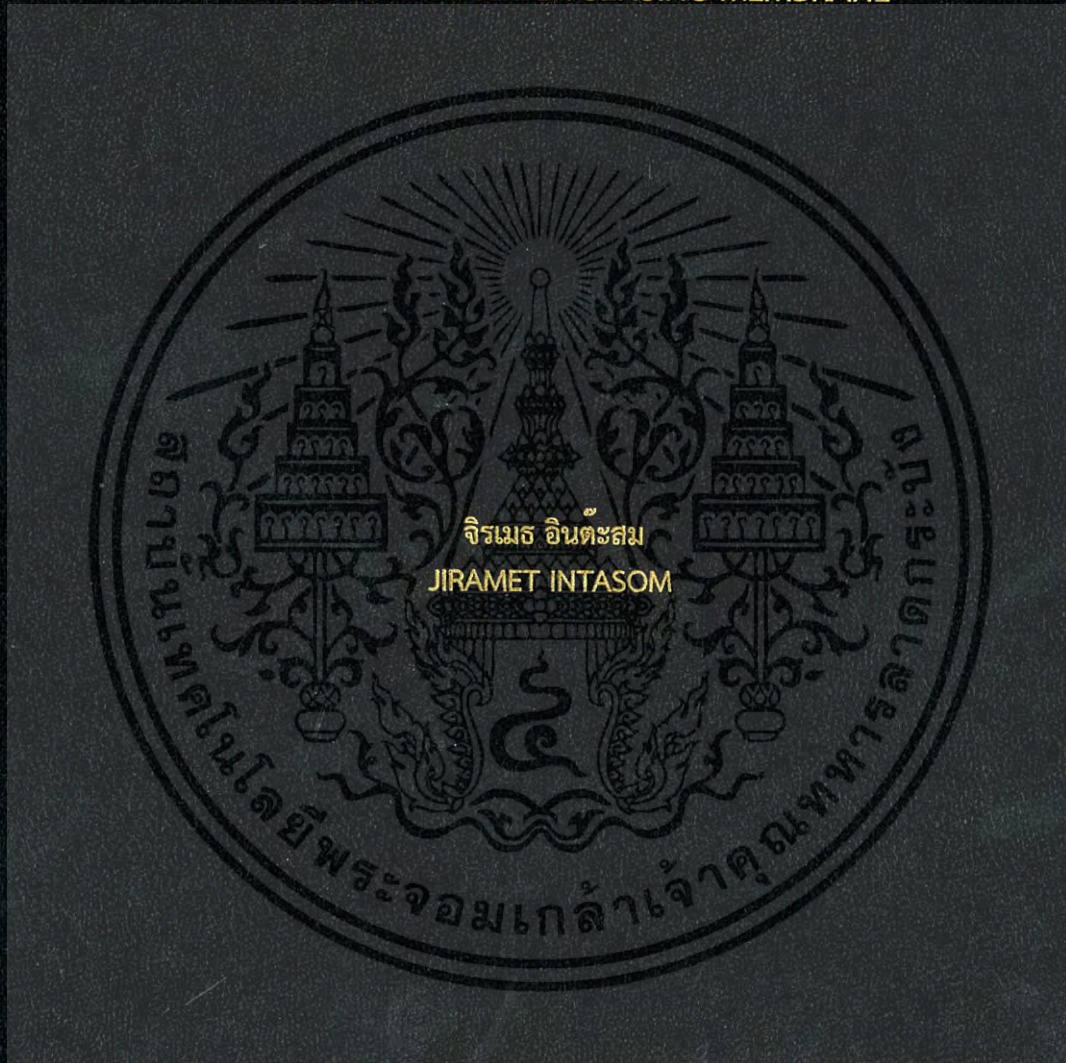


การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง  
แบบโครงสร้าง EGFET ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรน

STUDY ON ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF pH - SENSOR BASED ON  
EXTENDED GATE FIELD EFFECT TRANSISTOR (EGFET) STRUCTURE WITH  
POROUS SILICON LAYER SENSING MEMBRANE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-043-054

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ต่าง  
แบบโครงสร้าง EGFET ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรน

STUDY ON ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF pH - SENSOR BASED ON  
EXTENDED GATE FIELD EFFECT TRANSISTOR (EGFET) STRUCTURE WITH  
POROUS SILICON LAYER SENSING MEMBRANE



T148835



เลขที่.....  
เลขทะเบียน 148835  
พิมพ์เดือนปี 23 10ย. 2560

b. 00266926  
.....  
.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-043-054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF pH – SENSOR BASED ON  
EXTENDED GATE FIELD EFFECT TRANSISTOR (EGFET) STRUCTURE WITH  
POROUS SILICON LAYER SENSING MEMBRANE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-EN-M-043-054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดสภาพความเป็นกรด-ด่างแบบโครงสร้าง EGFET ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรน

Thesis Title Study on Electrical Characteristics of pH-Sensor Based on Extended Gate Field Effect Transistor (EGFET) Structure with Porous Silicon Layer Sensing Membrane

นักศึกษา นายจิรเมธ อินตะสม

รหัสประจำตัว 58601174

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-043-054

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.อัมพร โปธิโย	
รศ.ดร.วิสุทธี จูติรุ่งเรือง	
ดร.รังสรรค์ เมืองเหล็ก	
รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ	
ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 17.00-19.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น คณะบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ขอสงวนสิทธิ์ในการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดสภาพความเป็นกรด-ต่างแบบโครงสร้าง EGFET ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรน
นักศึกษา	นายจิรเมธ อินตะสม
รหัสนักศึกษา	58601174
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาการสร้างและการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ต่างแบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรน ซึ่งชั้นพอร์ซิลิคอนจะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ (100) สภาพความต้านทานไฟฟ้า 10  $\Omega$ -cm สร้างด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการกระบวนการกัด 10 mA/cm<sup>2</sup>, 15 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup> และ 25 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ และใช้เวลาในการกัด 10 นาที ในสารละลายไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลในอัตราส่วน 4 : 1 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนมีค่า 46.15%, 58.53%, 71.42% และ 80.55% ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นตามลำดับแปรผันตรงกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการกัด จากนั้นนำพอร์ซิลิคอนมาทดสอบเป็นเมมเบรนของอุปกรณ์อีจีเฟตเปรียบเทียบกับการใช้ซิลิคอนผิวเรียบเป็นเมมเบรนพบว่าอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรนนั้นมีการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ต่างได้ดี เมื่อพิจารณาจากค่าแรงดันขีดเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอีจีเฟตที่มีพอร์ซิลิคอนความพรุนที่แตกต่างกันเป็นเมมเบรน พบว่าค่าของแรงดันขีดเริ่มอุปกรณ์นั้นมีค่าที่เปลี่ยนแปลงแปรผันตรงกับค่าความเป็นกรด-ต่าง อีกทั้งค่าแรงดันขีดเริ่มยังมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอน และคุณลักษณะกระแส-แรงดันของอุปกรณ์นั้น พบว่ากระแสเดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีความเป็นกรดมากขึ้นและลดลงเมื่อสารละลายมีสภาพเป็นด่างและเมื่อพอร์ซิลิคอนมีความพรุนมากขึ้นก็ส่งผลให้กระแสเดรนมีค่าลดลงเช่นกัน การตอบสนองต่อความเป็นกรด-ต่างทางแรงดันและการตอบสนองต่อความเป็นกรด-ต่างทางกระแสนั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ความพรุนของพอร์ซิลิคอน ค่าฮิสเตอร์รีซิสของเมมเบรนมีค่าประมาณ 3.1 mV ที่การวัดวงรอบการวัด pH7 -> pH4 -> pH7 และที่วงรอบการวัด pH7 -> pH10 -> pH7 มีค่าประมาณ 5.5 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study on Electrical Characteristics of pH – Sensor Based on Extended Gate Field Effect Transistor (EGFET) Structure with Porous Silicon Layer Sensing Membrane
Student	Mr. Jiramet Intasom
Student ID	58601174
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Dr. Narin Atiwongsangthong

### ABSTRACT

This thesis purpose to study of fabrication and electrical characteristics of EGFET pH sensor with porous silicon layer sensing membrane. The porous silicon layer prepared by p – type silicon wafer (100) resistivity 10  $\Omega$ -cm and formation with double tank electrochemical etching cell by varies anodization currents density 10 mA/cm<sup>2</sup>, 15 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup> and 25 mA/cm<sup>2</sup> respectively using 10 minute of anodization time and mixture HF with ethanol at a ratio 4:1 by volume. The result of porosity layer was found 46.15%, 58.53%, 71.42% and 80.55% respectively was increased with increase of currents density. Afterward, Porous silicon was used to membrane of EGFET and compared with flat silicon membrane. It was found that the response of EGFET with porous silicon membrane better than flat silicon membrane. Threshold voltage of devices direct change of acid – alkali and increase with increase of porosity layer. The I-V characteristics of devices, drain currents were increase as the pH values is acidic when pH values is alkaline drain currents were shifted downward, Moreover drain current was decreased when increased of porosity layer. The pH voltage sensitivity and pH currents sensitivity was increased of porosity layer increase. Hysteresis of membrane measured in loop pH7 -> pH4 -> pH 7 of 3.1 mV and loop pH7 -> pH10 -> pH 7 of 5.5 mV.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.นรินทร์ อติวงศ์ แสงทอง ที่ช่วยให้คำชี้แนะแนวทาง ให้ความช่วยเหลือในการวางแผนการทำวิจัยตลอดจนให้ความรู้ และอบรมสั่งสอนและให้ประสบการณ์ในการทำวิจัยแก่ข้าพเจ้า จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตาม วัตถุประสงค์ตามที่ได้วางไว้ ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ในการแนะนำอาจารย์ที่ปรึกษาให้แก่ ข้าพเจ้า และได้เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ความสามารถ พร้อมทั้งอบรมสั่งสอนให้มีความ รักสามัคคีในหมู่คณะ ตลอดจนให้โอกาสในการฝึกเป็นการผู้นำและถ่ายทอดประสบการณ์การในการ ใช้ชีวิตที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าเพื่อนำไปเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตต่อไป

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาท ความรู้ทางเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์และสอนเทคนิคการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทำงานวิจัย ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์และช่วยสนับสนุนเครื่องมือต่างๆ ใน ห้องปฏิบัติการงานวิจัยของข้าพเจ้าสำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้

ขอขอบพระคุณ ดร.วุฒินันท์ เจียมศักดิ์ศิริ, บริษัท วินเซนส์ จำกัด และศูนย์เทคโนโลยีไมโคร อิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ได้กรุณามอบชั่วโมงไฟฟ้าอ้างอิงให้แก่ข้าพเจ้าในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง ไปได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกคนที่คอยช่วยต่างๆ ตลอดจน เป็นกำลังใจให้โดยตลอดมา อันเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยให้กำลังใจในยามที่ ท้อแท้ และคอยสนับสนุน ส่งเสริม ในด้านการเรียนและทุนในการศึกษาโดยตลอดมา จนทำให้ วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุก ท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ประสบการณ์ต่างๆ จนกระทั่งจบการศึกษา

จิรเมธ อินท๊ะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อ.....	XII
รายการสัญลักษณ์.....	XIV
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 ความเป็นกรด - ด่าง (pH - Value).....	5
2.2 หลักการวัดความเป็นกรด - ด่าง.....	7
2.2.1 การวัดความเป็นกรด - ด่างด้วยกระดาษลิตมัส.....	7
2.2.2 การวัดความเป็นกรด - ด่าง ด้วยกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์.....	8
2.2.3 การวัดความเป็นกรด - ด่าง ด้วยเครื่องวัดพีเอชมิเตอร์.....	8
2.3 ทรานซิสเตอร์แบบมอส.....	10
2.3.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต.....	10
2.3.2 คุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต.....	12
2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	15
2.4.1 การทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกัลวานิก.....	16
2.5 อุปกรณ์อีจีเฟต.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของอุปกรณ์อีจีเฟต .....	18
2.5.2 ลักษณะสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์อีจีเฟต.....	19
2.6 ทฤษฎีพอร์สซิลิคอน.....	22
2.6.1 โครงสร้างพอร์สซิลิคอน.....	22
2.6.2 การจำแนกประเภทของพอร์สซิลิคอน.....	23
2.7 เทคนิคการสร้างพอร์สซิลิคอน (Formation Technique).....	24
2.7.1 วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	24
2.8 กลไกการเกิดพอร์สซิลิคอน .....	26
2.8.1 ปฏิกริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน .....	26
2.9 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน .....	28
2.10 การดักจับไฮโดรเจนไอออนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	29
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด .....	33
3.1 กระบวนการสร้าง.....	33
3.1.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี.....	33
3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน.....	34
3.1.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	35
3.1.4 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่าง โครงสร้าง EGFET โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน.....	38
3.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด .....	41
3.2.1 การวัดหาความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน.....	41
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด-ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอน .....	42
3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Effect).....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....	44
4.1 ผลการทดลองการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน .....	44
4.1.1 ผลกระทบของการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ ที่มีต่อชั้นพอร์สซิลิคอน.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการทดลองผลของชั้นพอร์สซิลิคอนในอุปกรณ์อีจีเฟต.....	47
4.3 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อีจีเฟต.....	50
4.3.1 ผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนต่อแรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟต (EGFET Threshold Voltage).....	50
4.3.2 ผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด – ด่าง ทางแรงดันของอีจีเฟต (Voltage Sensitivity).....	56
4.3.3 ผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อลักษณะกระแสแรงดันของอีจีเฟต (I-V Characteristics).....	61
4.3.4 ผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนต่อความไวในการตอบสนองทางกระแสของอีจีเฟต (Current Sensitivity).....	65
4.4 การศึกษาฮีสเทอร์รีซิสของพอร์สซิลิคอนที่ใช้เป็นเมมเบรน.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	73
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก .....	80
ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	81
ประวัติผู้เขียน .....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สเกลบอกค่าความเป็นกรด - ด่าง.....	5
2.2 ตารางแสดงค่าความเป็นกรด - ด่างที่ความเข้มข้นของปริมาณ $H^+$ และ $OH^-$ ต่างๆกัน .....	6
4.1 เปรอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	46
4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันขีดเริ่มที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกันของอุปกรณ์อีจีเฟดที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรน.....	55
4.3 ความไวในการตอบสนองทางแรงดันของอุปกรณ์อีจีเฟดที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรน .....	60
4.4 กระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์อีจีเฟดที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนที่ $V_{GS} = 3V$ .....	65
4.5 ความไวในการตอบสนองทางกระแสของอุปกรณ์อีจีเฟดที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรน.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การวัดความเป็นกรด - ต่าง ด้วยกระดาษลิตมัส	7
2.2 การวัดค่าความเป็นกรด - ต่างด้วยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์	8
2.3 องค์ประกอบโดยรวมของเครื่องวัดพีเอช	9
2.4 โครงสร้างของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลและชนิดพีแชนแนล	11
2.5 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลและชนิดพีแชนแนล	11
2.6 กราฟลักษณะกระแสแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล ที่ $V_{GS}$ คงที่	13
2.7 กราฟความสัมพันธ์ $I_{DS} - V_{GS}$ ของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล ที่ $V_{DS}$ คงที่	13
2.8 เซลล์ไฟฟ้าแบบกัลป์วานิก	16
2.9 เซลล์ไฟฟ้าแบบครึ่งเซลล์กัลวานิกในการวัดกรด - ต่างแบบโครงสร้าง EGFET	17
2.10 โครงสร้างและการต่อใช้งานอุปกรณ์จีอีเฟต	18
2.11 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่สลายที่มีค่า pH แตกต่างกัน ที่ $V_{DS}$ มีค่าคงที่	21
2.12 คุณลักษณะกระแสและแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ที่แรงดัน $V_{GS}$ คงที่	21
2.13 ตัวอย่างชั้นพอร์สซิลิคอนจากการถ่าย SEM	22
2.14 ภาพตัวอย่างโครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่จำแนกตามประเภทของรูพรุน	23
2.15 ภาพตัดขวางตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สร้างพอร์สซิลิคอน	25
2.16 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยกระบวนการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี	26
2.17 ปฏิกริยาทางเคมีและกลการกัดผลึกซิลิคอน	26
2.18 ภาพจำลองพอร์สซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน	28
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอนกับขนาดของรูพรุนที่มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน	29
2.20 ลักษณะการตอบสนองของอีจีเฟตภายใต้สภาพความเป็นกรด	30
2.21 ลักษณะการตอบสนองของอีจีเฟตภายใต้สภาพความเป็นกลาง	31
2.22 ลักษณะการตอบสนองของอีจีเฟตภายใต้สภาพความเป็นด่าง	31
3.1 ภาพตัดขวางเซลล์ไฟฟ้าเคมี	33
3.2 ภาพตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเคมี	34
3.3 การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งเดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์	36
3.4 การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งเดี่ยวแนวตั้งโดยเคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งวงวนอนโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์ .....	37
3.6 แผนผังอธิบายการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนทั้ง 3 กระบวนการ .....	38
3.7 กระบวนการสร้างเมมเบรนของอุปกรณ์วัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอน .....	39
3.8 ภาพตัวอย่างเมมเบรนสำหรับอุปกรณ์วัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET มุมมองด้านข้างและด้านบน .....	40
3.9 ตัวอย่างชิ้นงานจริงของอุปกรณ์วัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET .....	40
3.10 เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้ศึกษาความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน .....	41
3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET .....	42
3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาฮิสเทอรีซิสของเมมเบรน .....	43
4.1 ชั้นพอร์สซิลิคอนและการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ต่างกัน	45
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการสร้างต่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน .....	46
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต ของ EGFET ที่มีซิลิคอนผิวเรียบเป็นเมมเบรน.....	48
4.4 แรงดันขีดเริ่มของ EGFET ที่มีซิลิคอนผิวเรียบเป็นเมมเบรนภายใต้ค่าพีเอชที่ต่างกัน.....	48
4.5 ความสัมพันธ์กระแสเดรนและแรงดัน $V_{Ref}$ ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน ...	49
4.6 แรงดันขีดเริ่มของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนภายใต้ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน.....	49
4.7 ความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน ความพรุน 46.15% เป็นเมมเบรน .....	51
4.8 ความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน ความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรน .....	52
4.9 ความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน ความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรน .....	53
4.10 ความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน ความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรน .....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลX้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	55
4.12 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 46.15% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	56
4.13 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	57
4.14 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	58
4.15 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	59
4.16 ความไวในการตอบสนองทางแรงดันของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรน .....	60
4.17 ลักษณะกระแส-แรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 46.15% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน.....	61
4.18 ลักษณะกระแส-แรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน.....	62
4.19 ลักษณะกระแส-แรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน.....	63
4.20 ลักษณะกระแส-แรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน.....	64
4.21 กระแสเดรนอิมิตัวของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ที่ค่า $V_{GS} = 3V$ .....	65
4.22 ความสัมพันธ์ $\sqrt{I_{DS}}$ ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 46.15% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	66
4.23 ความสัมพันธ์ $\sqrt{I_{DS}}$ ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	67
4.24 ความสัมพันธ์ $\sqrt{I_{DS}}$ ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ความสัมพันธ์ $\sqrt{I_{DS}}$ ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน .....	69
4.26 ความไวในการตอบสนองทางกระแสของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน.....	70
4.27 ลักษณะฮิสเตอร์รีซิสของพอร์สซิลิคอนเมมเบรน.....	71



## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
EGFET	Extended-gate Field Effect Transistor	ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบมีส่วนต่อขยายเกต
SnO <sub>2</sub>	Tin Oxide	ทินออกไซด์
ZnO	Zinc Oxide	ซิงค์ออกไซด์
TiO <sub>2</sub>	Titanium Dioxide	ไททาเนียมไดออกไซด์
PdO	Paladium Oxide	พาลาเดียมออกไซด์
RuO <sub>2</sub>	Ruthenium Dioxide	รูเทเนียมไดออกไซด์
H <sup>+</sup>	Hydrogen Ion	ไฮโดรเจนไอออน
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	Hydronium Ion	ไฮโดรเนียมไอออน
OH <sup>-</sup>	Hydroxyl Ion	ไฮดร็อกซิลไอออน
pH	Potential of Hydrogen ion	ความเข้มข้นของไฮโดรเจน - ไอออน
pOH	Potential of Hydroxyl ion	ความเข้มข้นของไฮดร็อกซิล - ไอออน
NBS	Nation Bureau of Standard	สถาบันมาตรฐานแห่งชาติ
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	มอสทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า
BJT	Bipolar Junction Transistor	ทรานซิสเตอร์แบบสองรอยต่อ
VLSI	Very Large Scale Integration	วงจรรวมขนาดใหญ่
FET	Field Effect Transistor	ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า
NMOS	n – Channel MOSFET	มอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น - แชนแนล
PMOS	p – Channel MOSFET	มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี - แชนแนล
Si	Silicon	ซิลิคอน
SiO <sub>2</sub>	Silicon Dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
Ag/AgCl	Silver/Silver Chloride	ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลXII อังอ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อ (ต่อ)

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
SiH <sub>4</sub>	Silane	ไซเลน
HF	Hydrofluoric Acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
DI Water	Deionized Water	น้ำบริสุทธิ์ปราศจากประจุ
PCB	Print Circuit Board	แผ่นวงจรพิมพ์
TMEC	Thai Microelectronics	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ - ทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XIII อังอ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$\Delta E$	คือ	ความต่างศักย์ที่วัดได้ในสารละลาย
$E_0$	คือ	ค่า Electrode potential มาตรฐาน
$R$	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส (Joules/mol-Kelvin)
$T$	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
$n$	คือ	จำนวนประจุของอ็อกซิเจน
$F$	คือ	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Coulombs/mol)
$a_i$	คือ	อ็อกซิเจนที่วัดได้
$V_{GS}$	คือ	แรงดันเกตซอส
$V_{DS(sat)}$	คือ	แรงดันเดรนอิ่มตัว
$V_T$	คือ	แรงดันขีดเริ่มของมอสเฟต
$V_P$	คือ	แรงดันพินช์ออฟ
$I_{DS}$	คือ	กระแสเดรน
$I_{DS(sat)}$	คือ	กระแสเดรนอิ่มตัว
$\beta$	คือ	พารามิเตอร์ของมอสเฟต
$\mu_n$	คือ	สภาพคล่องของประจุพาหะ
$C_i$	คือ	ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อพื้นที่
$W$	คือ	ความกว้างของเกต
$L$	คือ	ความยาวของเกต
$\psi_F$	คือ	ศักย์เฟอร์มี
$Q_{dm}$	คือ	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำ ที่มีค่าสูงสุด
$V_{FB(MOSFET)}$	คือ	ค่าคงที่แรงดันแถบเรียบของมอสเฟต
$\phi_m$	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_s$	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$V_{T(EGFET)}$	คือ	แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ EGFET
$V_{T(MOSFET)}$	คือ	แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์มอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XIV อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\frac{\Phi_M}{q}$	คือ	ฟังก์ชันงานของเกตโลหะ
$E_{REF}$	คือ	ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
$\chi^{Sol}$	คือ	Surface Dipole ของสารละลาย
$\phi$	คือ	ศักย์ไฟฟ้าระหว่างสารละลายและเมมเบรน
$K_n$	คือ	ค่า Conduction Parameter
$\mu_n$	คือ	ค่าความคล่องของอิเล็กตรอน
$C_{OX}$	คือ	ค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์
$\frac{W}{L}$	คือ	อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแชนแนล



## รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กรด - ด่าง	pH - Value
กระดาษลิตมัส	Litmus Paper
กระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์	Universal Indicator
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	Electrical Potential
อิเล็กโทรดตรวจวัด	Sensing Electrode
ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง	Reference Electrode
สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน	pH Standard Buffer Solution
ไบอัสแรงดันไฟฟ้า	Voltage Bias
ไบอัสกระแส	Currents Bias
วงจรรวม	Integrated Circuit
แรงดันผิวสัมผัส	Surface Potential
การแพร่ระดมสารเจือ	Diffusion
มอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล	n - Channel MOSFET
มอสเฟตชนิดพีแชนแนล	p - Channel MOSFET
ฐานรอง	Substrate
สถานะผิว	Surface State
แรงดันพินช์ออฟ	Pinch off Voltage
แรงดันอิ่มตัว	Saturation Voltage
ย่านไม่อิ่มตัว	Non Saturation Region
ย่านอิ่มตัว	Saturation Region
แรงดันขีดเริ่ม	Threshold Voltage
แรงดันเดรน	Drain Voltage
แรงดันเกตซอส	Gate - Source Voltage
กระแสเดรน	Drain Currents
แรงดันแถบเรียบ	Flat Band Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XVI อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค(ต่อ)

### ภาษาไทย

เมมเบรนตรวจวัด

ส่วนต่อขยายเกต

การกัดผลึกซิลิคอน

การกัดด้วยไฟฟ้าเคมี

แอโนไดซ์เซชัน

การกัดย้อมสี

เซลล์ไฟฟ้าเคมี

ขั้วแอโนด

ขั้วแคโทด

แผ่นซิลิคอน

การไบแอสแบบแอโนดิก

การไบแอสแบบแคโทดิก

ผลของขนาดควอนตัม

การดักจับปริมาณไฮโดรเจนอ็อน

### ภาษาอังกฤษ

Sensing Membrane

Extended – Gate

Silicon Etching

Electrochemical Etching

Anodization

Stain Etching

Electrochemical Cell

Anode

Cathode

Silicon Wafer

Anodic Bias

Cathodic Bias

Quantum size effect

Hydrogen Ion Accumulation



# บทที่ 1

## บทนำ

อุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟต (Extended-Gate Field Effect Transistor : EGFET) เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างแบ่งแยกออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนของเมมเบรนที่ใช้ตรวจวัดและส่วนของมอสเฟต ซึ่งมีข้อได้เปรียบหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนในการผลิตต่ำ มีการบรรจุภัณฑ์ที่ง่าย ตอบสนองต่อความเป็นกรด – ด่าง ได้เป็นอย่างดี ทำความสะอาดได้ง่าย เป็นต้น

ซึ่งในบทนี้จะได้กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐาน และขอบเขตของงานวิจัย

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการตรวจวัดค่าสภาพความเป็นกรด – ด่าง (Acid - Alkaline) เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญมากทั้งในด้านอุตสาหกรรมทางด้านเคมี (Industrial Chemical) ห้องปฏิบัติการทางด้านเคมี (Chemical Laboratory) ชีวะเคมี (Biochemical) ทางด้านเกษตรกรรม (Agriculture) ตลอดจนกระทั่งอุตสาหกรรมทางด้านอาหารและยา (Food and Drug) เนื่องจากมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตเป็นอย่างมากซึ่งสภาพความเป็นกรด – ด่างจะเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่บ่งบอกถึงคุณภาพของกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ต่างๆ

การวัดสภาพความเป็นกรด – ด่าง ที่ถูกนำมาใช้ในปัจจุบันนั้นก็จะมีการตรวจวัดด้วยวิธีการและเครื่องมือหลายๆ แบบด้วยกัน เช่น การตรวจเช็คด้วยกระดาษลิตมัส การวัดด้วยกระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ (Universal Indicator) และการตรวจวัดด้วยพีเอชมิเตอร์แบบกระดาษแก้ว ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและใช้งานตรวจวัดได้ง่าย เป็นต้น แต่วิธีการตรวจวัดความเป็นกรด – ด่างที่ได้กล่าวมานั้นก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่บางประการ ยกตัวอย่างเช่น ในการวัดค่าด้วยกระดาษลิตมัสจะเป็นการวัดแบบเทียบสีซึ่งอาจจะเกิดการผิดพลาดในการเทียบสีหรือสีที่ผิดเพี้ยนจากสารเจือปน จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดสูงๆ อีกทั้งการวัดค่าความเป็นกรดต่างด้วยเครื่องวัดพีเอชแบบกระดาษแก้วก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดและความทนทานเนื่องจากอาจเกิดการแตกร้าวของตัวกระดาษแก้วได้

อุปกรณ์ EGFET เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าสภาพความเป็นกรด – ด่างได้ ถูกค้นพบโดย Van der Spiegel ที่ Moore School Pennsylvania [1] ซึ่งโครงสร้างแบบ EGFET นั้นจะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งแยกออกเป็นสองส่วนด้วยกันได้แก่ ส่วนของเมมเบรนที่ใช้ในการตรวจจับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความเป็นกรด - ด่างในสารเคมีและส่วนของมอสเฟต โดยที่ส่วนที่ใช้เป็นเมมเบรนนั้น จะถูกต่อแยกออกมาจากขาเกตของมอสเฟต ซึ่งในโครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้ EGFET ซึ่งมีข้อได้เปรียบที่หลากหลาย เช่น มอสเฟตที่ใช้ในการตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างในสารเคมีจะปราศจากการสัมผัสกับสารเคมีโดยสิ้นเชิงซึ่งทำให้มอสเฟตนั้นสามารถใช้งานได้หลายครั้ง มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน มีขั้นตอนการสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ มีการบรรจุภัณฑ์ที่ง่าย ไม่ไวต่อแสง และอุณหภูมิ เป็นต้น ในส่วนของวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นเมมเบรนในการตรวจวัดไฮโดรเจนไอออน สำหรับโครงสร้าง EGFET เพื่อบ่งบอกถึงค่าความเป็นกรด - ด่าง นั้นได้มีอยู่หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes) [2], ทินออกไซด์ ( $SnO_2$ ) [3], ซิงค์ออกไซด์ ( $ZnO$ ) [4], ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) [5], พาลาเดียมออกไซด์ ( $PdO$ ) [6], รูทีเนียมไดออกไซด์ ( $RuO_2$ ) [7] เป็นต้น

พอร์สซิลิคอนเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่มีความน่าสนใจซึ่งได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลาย ๆ ชนิด เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับไอระเหยของแอลกอฮอล์ (Alcohol Sensor) [8], สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (Anti-reflection) [9], อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Photo detector) [10-12] อีกทั้งยังได้มีงานวิจัยที่ได้นำพอร์สซิลิคอนมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเอนไซม์ [13-14] โดยได้ทำการทดสอบภายใต้เอนไซม์ที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่างได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะได้นำพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้เป็นเมมเบรนในการตรวจจับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ในสารละลายซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความเป็นกรด - ด่าง ในอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้าง EGFET และเพื่อศึกษาถึงกระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการแอโนไดซ์เซชันด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่าง ๆ
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนในการตรวจวัด
3. เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อสภาพความเป็นกรด - ด่างของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนในการตรวจวัด
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน
5. เพื่อศึกษาผลกระทบจากความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

อุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ต่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟดที่มีพอร์สซิลิโคนเป็นเมมเบรน เป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการสร้างและนำมาใช้งานในการตรวจวัดสภาพความเป็นกรด – ต่าง ได้ดี เนื่องจากพอร์สซิลิโคนเป็นวัสดุที่ดีโดยใช้พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากในการดักจับไฮโดรเจนอออนในสารละลายซึ่งเป็นตัวบ่งบอกสภาพความเป็นกรดต่างในสารละลาย และเมื่อในสารละลายมีปริมาณไฮโดรเจนอออนมากก็จะทำให้พื้นผิวของพอร์สซิลิโคนนั้นมีประจุ  $H^+$  จำนวนมากทำให้ขาคัดของมอสเฟดที่ถูกนำมาต่อใช้งานมีศักย์บวกเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อช่องทางเดินกระแสซึ่งน่าจะทำให้มอสเฟดแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกมาโดยแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนอออนในสารละลาย

ดังนั้นจึงสมมุติฐานว่าหากนำพอร์สซิลิโคนมาใช้เป็นเมมเบรนของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ต่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟด จะทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวมีการตอบสนองต่อสภาพความเป็นกรด – ต่าง ได้ดี

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการสร้างพอร์สซิลิโคนโดยวิธีการแอโนไดซ์เซชันด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี
2. ศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ต่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟดที่มีพอร์สซิลิโคนเป็นเมมเบรน
3. ศึกษาหลักการตรวจจับไฮโดรเจนอออน ( $H^+$ ) ในสารละลายของพอร์สซิลิโคนซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกปริมาณความเป็นกรด – ต่าง
4. ศึกษาการตอบสนองต่อสภาพความเป็นกรด – ต่าง ของอุปกรณ์ภายใต้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ต่างที่แตกต่างกัน
5. ศึกษาผลคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เมื่อทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่มีสภาพความเป็นกรด – ต่างที่แตกต่างกัน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด – ต่าง บนพื้นฐานแบบโครงสร้างอีจีเฟด
2. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเซ็นเซอร์ทางเคมีบนพื้นฐานของโครงสร้างอีจีเฟด
3. เพื่อเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ทางเลือกในการใช้ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด – ต่าง ของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีพีเอตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน ซึ่งจะทำการแบ่งเนื้อหาออกเป็นทั้งหมดจำนวน 5 บท โดยในแต่ละบทจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** ความเป็นมาของปัญหา ความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

**บทที่ 2** ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ทฤษฎีของของความเป็นกรด - ด่าง หลักการวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง หลักการของพีเอชมิเตอร์ ทฤษฎีของมอสเฟต ทฤษฎีไฟฟ้าเคมี อุปกรณ์อีจีพีเอต และกลไกในการดักจับไฮโดรเจนไอออนของพอร์สซิลิคอน

**บทที่ 3** กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนสำหรับใช้เป็นเมมเบรน สร้างอุปกรณ์อีจีพีเอต และการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

**บทที่ 4** ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

**บทที่ 5** สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ การประยุกต์ใช้และแนวทางการพัฒนาต่อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ความเป็นกรด - ด่าง (pH - Value) [15]

ความเป็นกรด - ด่างหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าค่าพีเอช (Potential of Hydrogen ion : pH) และเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงปริมาณของไฮโดรเจนไอออนหรือบ่งบอกถึงความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย (Hydrogen or hydronium ion;  $H^+$  or  $H_3O^+$ ) ซึ่งเกิดจากสารที่สามารถแตกตัวให้อนุมูลกรด ( $H^+$ ) หรือด่าง ( $OH^-$ ) ได้ โดยที่ค่าพีเอชของสารละลายจะเป็นค่าลอการิทึมของไฮโดรเจนไอออนที่เป็นลบ และการคำนวณหาค่าพีเอชจะสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (2.1)

$$pH = -\log[H^+] \quad (2.1)$$

โดยที่ pH คือ ค่าความเป็นกรด - ด่าง

$H^+$  คือ ปริมาณของไฮโดรเจนไอออน (โมล/ลิตร)

โดยที่ค่าของความเป็นกรด - ด่างจะมีค่าตั้งแต่ 0 - 14 ซึ่งถ้าหากสารละลายมีค่าความเป็นกรด - ด่าง ต่ำกว่า 7 นั้น ก็หมายถึงสารละลายดังกล่าวมีสภาพเป็นกรด หรือถ้าหากสารละลายมีค่าความเป็นกรด - เบส มีค่าสูงกว่า 7 นั้นก็จะหมายถึงสารละลายนั้นมีสภาพเป็นด่าง หรือถ้าหากสารละลายนั้นมีค่าความเป็นกรด - ด่าง เท่ากับ 7 ก็สามารถบอกได้ว่าสารละลายนั้นมีสภาพเป็นกลางและสามารถเขียนสรุปสั้นๆได้ว่า

- pH < 7 สารละลายมีสภาพเป็นกรด
- pH = 7 สารละลายมีสภาพเป็นกลาง
- pH > 7 สารละลายมีสภาพเป็นด่าง

หรืออาจจะเขียนเป็นสเกลได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สเกลบอกค่าความเป็นกรด - ด่าง

สภาพ	กรด ←						กลาง	→						ด่าง
ค่า pH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการบอกค่าความเป็นกรด – ต่างด้วยค่า pH แล้วยังสามารถบอกค่าของความเป็นกรด – ต่างของสารละลายได้โดยการใช้ค่า pOH (Potential of Hydroxyl ion) แทนได้อีกเช่นกัน โดยที่ค่าของ pOH คือค่าของปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{OH}^-$  ในสารละลาย ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (2.2)

$$pOH = -\log[\text{OH}^-] \quad (2.2)$$

โดยที่ pOH คือ ค่าความเป็นกรด – ต่าง

$\text{OH}^-$  คือ ปริมาณของไฮดรอกซิลไอออน (โมล/ลิตร)

ซึ่งเมื่อนำค่าปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนและความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนในสารละลายมาเขียนลงในตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อสารละลายมีปริมาณของไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) เพิ่มขึ้นก็จะทำให้สารละลายดังกล่าวมีสภาพเป็นกรดเพิ่มขึ้นไปด้วยและในทางตรงกันข้ามเมื่อมีปริมาณของไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) เพิ่มขึ้นก็จะทำให้สารละลายนั้นมีสภาพเป็นด่างเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่าความเป็นกรด – ต่างที่ความเข้มข้นของปริมาณ  $\text{H}^+$  และ  $\text{OH}^-$  ต่างๆกัน

$\text{H}^+$ โมล / ลิตร	pH	$\text{OH}^-$ โมล / ลิตร	pOH
$1 \times 10^0$	0	$1 \times 10^{-14}$	14
$1 \times 10^{-1}$	1	$1 \times 10^{-13}$	13
$1 \times 10^{-2}$	2	$1 \times 10^{-12}$	12
$1 \times 10^{-3}$	3	$1 \times 10^{-11}$	11
$1 \times 10^{-4}$	4	$1 \times 10^{-10}$	10
$1 \times 10^{-5}$	5	$1 \times 10^{-9}$	9
$1 \times 10^{-6}$	6	$1 \times 10^{-8}$	8
$1 \times 10^{-7}$	7	$1 \times 10^{-7}$	7
$1 \times 10^{-8}$	8	$1 \times 10^{-6}$	6
$1 \times 10^{-9}$	9	$1 \times 10^{-5}$	5
$1 \times 10^{-10}$	10	$1 \times 10^{-4}$	4
$1 \times 10^{-11}$	11	$1 \times 10^{-3}$	3
$1 \times 10^{-12}$	12	$1 \times 10^{-2}$	2
$1 \times 10^{-13}$	13	$1 \times 10^{-1}$	1
$1 \times 10^{-14}$	14	$1 \times 10^0$	0

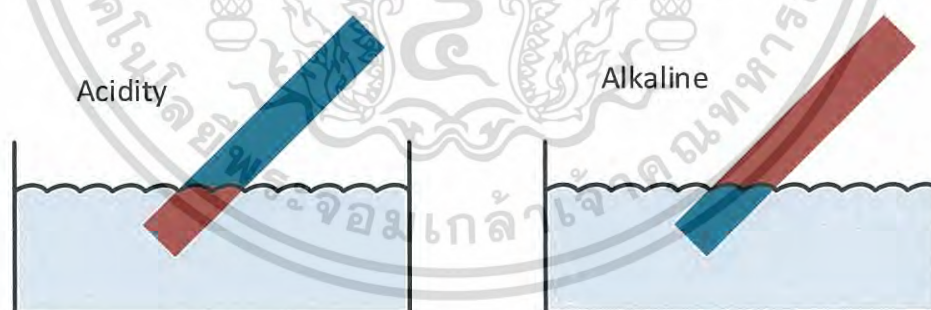
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หลักการวัดความเป็นกรด – ต่าง (pH – Measurements)

### 2.2.1 การวัดความเป็นกรด – ต่าง ด้วยกระดาษลิตมัส [16]

ในของเหลวหรือสารละลายส่วนใหญ่จะมีสภาพเป็นกรด – ต่างแตกต่างกันไป โดยส่วนมากแล้วเป็นสารที่อันตรายซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อน สิ่งเหล่านี้ไม่สามารถจำแนกออกได้ด้วยตาเปล่าและด้วยการชิม กระดาษลิตมัสเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตรวจสอบสภาพความเป็นกรด – ต่าง ของสารละลายได้และมีความรวดเร็วในการทดสอบ โดยกระดาษลิตมัสจะมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 2 สี ได้แก่สีฟ้ากับสีแดงและสีที่ได้จะได้อาจมาจากการย้อมอินทรีย์ ซึ่งในการทดสอบหากจะทดสอบความเป็นกรดนั้นจะถูกกำหนดให้ใช้กระดาษสีฟ้าหากกระดาษเปลี่ยนจะสีฟ้าเป็นสีแดงก็สามารถบ่งบอกได้ว่าสารละลายนั้นเป็นสภาพเป็นกรดและการทดสอบความเป็นต่างก็จะถูกกำหนดให้ใช้กระดาษสีแดงถ้าหากกระดาษเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีฟ้าก็แสดงว่าสารละลายนั้นมีสภาพเป็นต่าง และเมื่อสารละลายมีสภาพเป็นกลางเมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีแดงและสีฟ้าสารละลายจะไม่ทำปฏิกิริยากับกระดาษทำให้กระดาษไม่เปลี่ยนสีนั่นเอง ในใช้กระดาษลิตมัสในการทดสอบความเป็นกรด – ต่างของสารละลายจะทำให้สามารถจำแนกได้เพียง 3 ประเภท ได้แก่

1. สารละลายที่มีสภาพเป็นกรด คือ กระดาษเปลี่ยนจากสีฟ้าจะเปลี่ยนเป็นสีแดง
2. สารละลายที่มีสภาพเป็นต่าง คือ กระดาษเปลี่ยนจากสีแดงจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้า
3. สารละลายที่มีสภาพเป็นกลาง คือ สีกระดาษทั้งสีฟ้าและแดงจะไม่เปลี่ยนสี



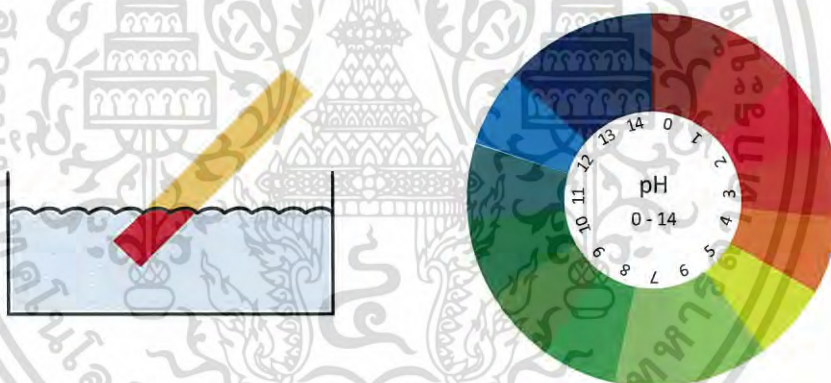
รูปที่ 2.1 การวัดความเป็นกรด – ต่าง ด้วยกระดาษลิตมัส

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าในการตรวจวัดสภาพความเป็นกรด – ต่าง ด้วยการตรวจวัดด้วยกระดาษลิตมัสจะบ่งบอกได้เพียงว่าสารละลายมีสภาพเป็นกรด ต่าง หรือมีสภาพเป็นกลางเท่านั้นจะไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าสารละลายชนิดใดที่มีสภาพความเป็นกรด – ต่าง มากหรือน้อยกว่ากัน ดังนั้นจะมีเครื่องมืออีกชนิดที่สามารถบ่งบอกได้นั้นก็คือกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ โดยจะอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การวัดความเป็นกรด - ด่าง ด้วยกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ [16]

ในการวัดค่าความเป็นกรด - ด่างด้วยกระดาษลิตมัสที่มีข้อจำกัดคือสามารถบ่งบอกได้เพียงแค่ว่าสารละลายดังกล่าวมีสภาพเป็นกรด ด่าง หรือเป็นกลาง เท่านั้นไม่สามารถบ่งบอกปริมาณความเป็นกรดหรือด่างได้ ดังนั้นแล้วหากต้องการทราบปริมาณความเป็นกรด - ด่าง จึงจำเป็นที่จะต้องใช้การวัดด้วยกระดาษยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator) โดยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์จะอยู่ในรูปของกระดาษเช่นเดียวกับลิตมัสต่างกันที่กระดาษที่ใช้ตรวจสอบของยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์จะเป็นสีเหลือง และการใช้งานก็จะคล้ายๆกับการวัดด้วยกระดาษลิตมัสโดยนำกระดาษไปแตะกับสารละลายที่ต้องการตรวจสอบจากนั้นอินดิเคเตอร์ก็จะมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและนำไปเทียบกับวงล้อสีก็จะสามารถบ่งบอกได้แล้วว่าสารละลายที่เราทำการตรวจสอบนั้นมีค่าความเป็นกรด - ด่าง เท่าไหร่ ข้อจำกัดของอินดิเคเตอร์ชนิดนี้คือค่าความเป็นกรด - ด่าง ที่วัดได้นั้นเป็นเพียงค่าอย่างคร่าวๆเท่านั้น และความผิดพลาดจากการเทียบสีหรือเกิดสีอื่นที่ผิดเพี้ยนก็ยังคงเป็นข้อจำกัดของอินดิเคเตอร์ชนิดนี้เช่นกัน หากต้องการการวัดที่มีความละเอียดและแม่นยำแล้วจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่ชื่อว่าพีเอชมิเตอร์

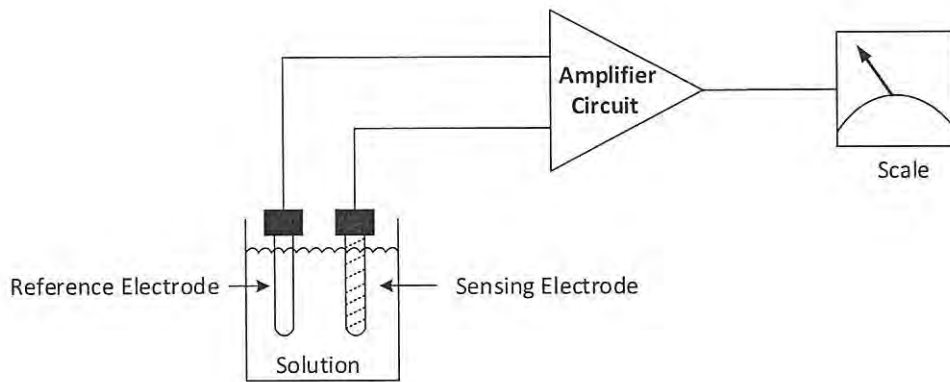


รูปที่ 2.2 การวัดค่าความเป็นกรด - ด่างด้วยยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์

## 2.2.3 การวัดความเป็นกรด - ด่าง ด้วยเครื่องวัดพีเอชมิเตอร์ [17-18]

ในส่วนของหลักการวัดค่าพีเอชหรือค่าความเป็นกรด - ด่าง จะอาศัยหลักการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrical Potential) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดตรวจวัด (Sensing Electrode) และอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) ที่จุ่มอยู่ในสารละลายซึ่งความต่างศักย์ที่ได้นั้นจะเกิดขึ้นจากปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้นๆ โดยที่ความปริมาณความเข้มข้นของไอออนจะถูกเปลี่ยนให้เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วทำการขยายแรงดันให้มีค่าสูงขึ้นด้วยวงจรขยายแรงดันโดยเครื่องวัดพีเอชแล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าที่วัดได้ดังกล่าวไปแสดงผลเป็นค่าพีเอช และองค์ประกอบโดยรวมของเครื่องวัดพีเอชจะแสดงดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบโดยรวมของเครื่องวัดพีเอช

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ามีส่วนที่สำคัญที่ทำให้วงจรนี้ครบวงจรและสามารถทำงานได้ก็คือส่วนของอิเล็กโทรดและส่วนของตัวเครื่องวัด โดยจะสามารถอธิบายแยกส่วนได้ดังนี้

1. อิเล็กโทรด ทำหน้าที่ในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย และที่สารละลายมีสภาพเป็นกลางหรือสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 จะส่งผลให้ที่อิเล็กโทรดวัดและอิเล็กโทรดอ้างอิงมีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ และเมื่อมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นหรือลดน้อยลงก็จะทำให้ความต่างศักย์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแปรผันไปตามปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน

2. ตัวเครื่องหรือ Potentiometer ในส่วนนี้จะทำหน้าที่หลักก็คือแปลงสัญญาณจากค่าความต่างศักย์ของไอออนเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าและทำหน้าที่ขยายสัญญาณความต่างศักย์ที่วัดได้ให้สูงขึ้นเพื่อนำไปแสดงผลที่มัลติเตอร์

การคำนวณค่าของพีเอชจะถูกดัดแปลงมาจากสมการของเนินส์ (Nernst's Equation) ดังสมการที่ (2.3) ซึ่งเป็นการคำนวณหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าโดยกำหนดให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 0 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยวัดเทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรด (Hydrogen Electrode) ซึ่งในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ไฮโดรเจนอิเล็กโทรดเพราะว่ามีขนาดใหญ่ดั่งนั้น Nation Bureau Standard (NBS) จึงได้กำหนดค่าพีเอชบัฟเฟอร์มาตรฐานขึ้นมาใช้ โดยทำการวัดค่าพีเอชมาตรฐานด้วยขั้วแบบซิลเวอร์ - ซิลเวอร์คลอไรด์ Ag/AgCl เปรียบเทียบกับไฮโดรเจนอิเล็กโทรด

$$\Delta E = E_0 - \frac{2.3RT}{nF} \log a_i \quad (2.3)$$

โดยที่	$\Delta E$	คือ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้
	$E_0$	คือ ค่า Electrode potential มาตรฐาน
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Joules/mol-Kelvin)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
n	คือ จำนวนประจุของอิเล็กตรอน
F	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Coulombs/mol)
$a_i$	คือ อิออนที่วัดได้

## 2.3 ทรานซิสเตอร์แบบมอส (MOSFET)

มอสทรานซิสเตอร์หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ามอสเฟต (Metal Oxide Semiconductors Field Effect Transistor : MOSFET) [19-20] ถูกสร้างขึ้นมาในช่วงปี ค.ศ. 1970 เป็นทรานซิสเตอร์ยุคที่สองหลังจากสร้างทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor : BJT) มาก่อนหน้านี้แล้วซึ่งเป็นมอสทรานซิสเตอร์จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเนื่องจากสร้างง่ายและมีขนาดเล็กกว่าทรานซิสเตอร์แบบบีเจที (BJT) ด้วยเหตุนี้มอสเฟตจึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำที่ปฏิวัติวงการอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมากจนนำไปสู่การสร้างนวัตกรรมการสังเคราะห์วงจรรวมขนาดใหญ่ (Very Large Scale Integration : VLSI) ซึ่งเป็นหัวใจของหน่วยประมวลผลและหน่วยความจำ มอสเฟตสามารถทำงานได้เพียงแค่อิสแรงดันไฟฟ้าซึ่งแตกต่างจากทรานซิสเตอร์แบบ BJT ที่จะต้องใช้กระแสในการไบอัสให้ทำงาน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การออกแบบวงจรโดยใช้ออสเฟตนั้นมีขนาดวงจรที่เล็กกว่าเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานช่วยในการไบอัส โดยในการทำงานของมอสเฟตนั้นกระแสที่ไหลจะถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำทั้งสองด้านซึ่งจะเป็นการป้อนสนามไฟฟ้าให้มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวหรือเรียกว่า Field Effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้ควบคุมกระแสในสารกึ่งตัวนำ และผลของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งจะเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนลซึ่งทำให้พาหะเคลื่อนที่ได้ภายใต้แชนแนลจึงส่งผลให้มอสทรานซิสเตอร์ทำงานได้ ดังนั้นแล้วทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า “ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า” หรือ Field Effect Transistor และที่นิยมเรียกกันโดยทั่วไปว่า FET หรือเรียกชื่ออุปกรณ์นี้เต็มๆว่า มอสเฟต (MOSFET) เพื่อให้รู้ว่าส่วนของเกตนันมีโครงสร้างแบบมอสและในส่วนของชั้นออกไซด์นั้นมีคุณสมบัติเป็นฉนวน

### 2.3.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟต [21]

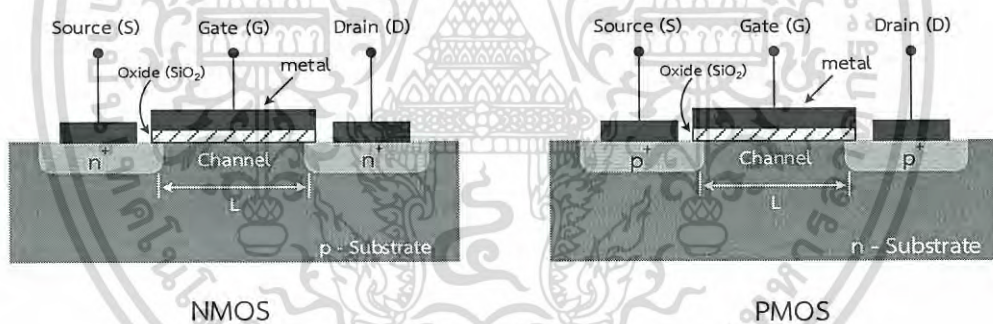
ในส่วนของมอสเฟตเราจะเราสามารถแบ่งชนิดได้อยู่ 2 ชนิดด้วยกัน เมื่อพิจารณาจากลักษณะและโหมดการทำงาน

1. มอสเฟตชนิดเอ็นแฮซีเมนต์ (Enhancement MOSFET) หรือที่เรียกกันว่ามอสเฟตชนิดแชนแนลที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Channel MOSFET) นั่นก็คือมอสทรานซิสเตอร์ที่ได้รับแรงดันศูนย์โวลต์ที่เกตจะทำให้ไม่มีแชนแนลเกิดขึ้นจึงทำให้ไม่เกิดการไหลของกระแสตรง ดังนั้นจึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

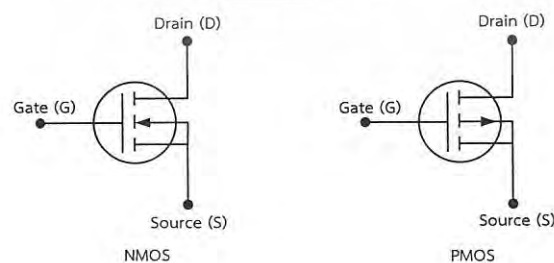
ทำให้มอสทรานซิสเตอร์ดังกล่าวนี้อยู่ในสภาวะ OFF แต่เมื่อแรงดันที่เกตนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจนแรงดันที่ผิวสัมผัส (Surface Potential) มีค่ามากพอทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทำให้เกิดแชนแนลขึ้นที่ผิวของชั้นสารกึ่งตัวนำและส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสเดรน

2. มอสเฟตชนิดพีลึ้น (Depletion MOSFET) หรือมอสเฟตชนิดแชนแนลเกิดจากการแพร่สารเจือหรือ Diffusion Channel MOSFET หมายถึงมอสทรานซิสเตอร์ที่ซึ่งมีการเกิดแชนแนลขึ้นได้ถึงแม้ว่าแรงดันที่เกตจะเป็นศูนย์ก็ตาม ซึ่งเป็นผลมาจากมีการแพร่ของอะตอมสารเจือเพื่อให้ออสเฟตนั้นเกิดเป็นแชนแนลนำกระแส ดังนั้นกระแสเดราก็จะไหลได้ถึงแม้แรงดันจะเป็นศูนย์

เมื่อพิจารณาจากชนิดของพาหะที่นำกระแสในมอสทรานซิสเตอร์แล้วนั้น พบว่าเรายังสามารถแบ่งมอสเฟตออกได้อีกเป็นสองชนิด ได้แก่ มอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล (n - Channel MOSFET) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเอ็นมอส (NMOS) และอีกชนิดคือมอสเฟตชนิดพีแชนแนล (p - Channel MOSFET) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าพีมอส (PMOS) โดยที่ทั้งเอ็นมอสและพีมอสมีกลไกในการนำกระแสที่แตกต่างกันนั่นคือเอ็นมอสนั้นกระแสจะเกิดจากการนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในแชนแนลชนิดเอ็นและพีมอสก็จะเกิดการนำไฟฟ้าของโฮลในแชนแนลชนิดพี ลักษณะโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟตทั้งเอ็นและพีแชนแนลจะแสดงดังรูปที่ 2.4 และสัญลักษณ์จะแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลและชนิดพีแชนแนล



รูปที่ 2.5 สัญลักษณ์ของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลและชนิดพีแชนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 และ 2.5 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างและสัญลักษณ์ของมอสเฟตจะประกอบไปด้วย ฐานรอง (Substrate) ขั้วซอส (Source : S) และส่วนเดรน (Drain : D) ซึ่งระยะห่างระหว่างซอสกับเดรนถูกพิจารณาว่าเป็นความยาวของแชนแนล (L) โดยที่ขั้วซอสและเดรนจะถูกเจืออะตอมชนิดเอ็นอย่างเข้มข้น ( $n^+$ ) เข้าไปในฐานรองชนิดพี (กรณีที่เป็นพีมอสจะเจืออะตอม  $p^+$  ลงในฐานรองชนิดเอ็น) และจากนั้นสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสามคือ ซอส เกต และเดรน ตามลำดับ [22]

### 2.3.2 คุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ต่างแบบโครงสร้างอีจีเฟตนั้นโดยพื้นฐานของตัวอุปกรณ์แล้วมีคุณลักษณะเหมือนกันกับมอสเฟตแบบแอนฮานซ์เม้นท์ชนิดเอ็นแชนแนล ซึ่งดังนั้นแล้วจะอธิบายรายละเอียดได้เพียงแค่มอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนลเท่านั้น

เมื่อพิจารณาในกรณีที่ไม่มีสถานะผิว (Surface State) ใดๆปรากฏขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างซิลิคอนที่เป็นฐานรองและซิลิคอนไดออกไซด์ที่เป็นชั้นฉนวน ( $Si - SiO_2$ ) ดังนั้นแล้วแรงดันที่เกตจึงมีค่าเป็นศูนย์ ( $V_{GS} = 0$ ) กล่าวได้ว่าจะไม่มีการเกิดขั้วจนถึงแม้ว่าแรงดันที่เดรนจะมีค่ามากกว่าศูนย์ก็ตาม ( $V_{DS} > 0$ ) และกระแสเดรนก็จะมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน ( $I_{DS} = 0$ ) ดังนั้นถือว่าทรานซิสเตอร์จะอยู่ในสภาวะ OFF แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่แรงดันเกตมีค่าเป็นบวก ( $V_{GS} > 0$ ) และมีค่ามากพอที่สนามไฟฟ้าที่ขั้วออกไซด์มีความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เกิดแชนแนลขึ้นได้ ( $V_{GS} > V_T$ ) จะทำให้แชนแนลที่เกิดขึ้นนั้นเชื่อมต่อระหว่างช่องทางเดินกระแสระหว่างเดรนและซอสได้ โดยกระแสเดรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าในช่วงแรกและเมื่อแรงดันเดรนมีค่าเพิ่มขึ้นในที่สุดก็จะถึงค่าแรงดันพินช์ออฟ (Pinch off Voltage :  $V_p$ ) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าแรงดันอิ่มตัว (Saturation Drain Voltage :  $V_{DS(sat)}$ ) และเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.4) [22]

$$(V_{GS} - V_{DS(sat)}) = V_T \quad (2.4)$$

หรือ

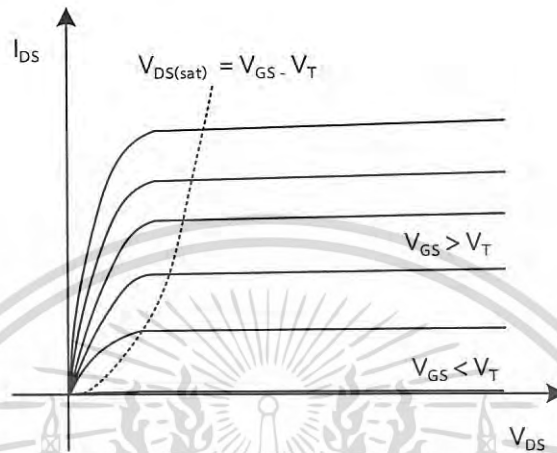
$$V_p = V_{DS(sat)} = (V_{GS} - V_T) \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.4) แรงดันอิ่มตัว  $V_{DS(sat)}$  จะแปรผันตามค่าของแรงดันเกต  $V_{GS}$  และเมื่อแรงดันเกตมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสเดรนอิ่มตัวก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังสมการที่ (2.6)

$$I_{DS(sat)} = \frac{V_{DS(sat)}}{R_{eff(n-ch)}} = \frac{V_{GS} - V_T}{R_{eff(n-ch)}} \quad (2.6)$$

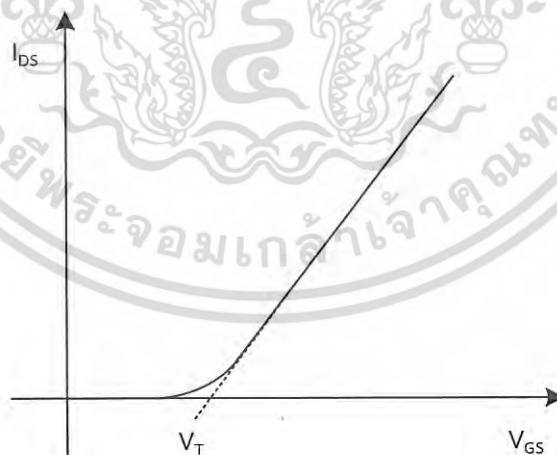
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นคุณสมบัติกระแสแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของมอสเฟตชนิดเอ็นฮานซ์เมนท์ชนิดเอ็นแซนแนลที่แรงดันเกตที่ค่าต่างๆ จึงจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของมอสเฟตชนิดเอ็นฮานซ์เมนท์ชนิดเอ็นแซนแนลในย่านไม่อิ่มตัวก็จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟลักษณะกระแสแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของมอสเฟตชนิดเอ็นแซนแนล ที่  $V_{GS}$  คงที่

จากกราฟในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนอิ่มตัวนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันเดรน กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าแรงดันเดรนที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นก็จะส่งผลต่อค่ากระแสเดรนอิ่มตัวให้มีค่าสูงขึ้นไปด้วย ในกรณีที่แรงดันเกตมีค่าคงที่



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์  $I_{DS} - V_{GS}$  ของมอสเฟตชนิดเอ็นแซนแนล ที่  $V_{DS}$  คงที่

ในกราฟที่ 2.7 นั้นสามารถแสดงค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) ของมอสเฟตได้ เนื่องจากแรงดันเกตที่ค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{GS} < V_T$ ) กระแสเดรนจะมีค่าเป็นศูนย์ ( $I_{DS} \approx 0$ ) และในกรณีที่แรงดันเกตมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่าของแรงดันขีดเริ่มทำให้มีกระแสเดรนอิ่มตัว ( $I_{DS(sat)}$ ) ค่าต่างๆ ดังนั้นแล้วแรงดันเกตที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่างๆ ที่ทำให้กระแสตรงเริ่มไหลได้จึงถูกพิจารณาให้แรงดันดังกล่าวเป็นแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ (Threshold Voltage :  $V_T$ ) และนอกเหนือจากนี้กราฟลักษณะกระแสแรงดัน ( $I_{DS} - V_{GS}$ ) ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตรงซึ่งเป็นกระแสเอาต์พุตในวงจร และแรงดันเกตซึ่งเป็นแรงดันอินพุตโดยที่แรงดันเกตนั่นจะเป็นตัวควบคุมการไหลและปริมาณกระแสตรงให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั่นเอง

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสตรง ( $I_{DS}$ ) แรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) แรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) และค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) สามารถอธิบายได้ด้วยการทำงานของมอสเฟตซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 ย่านการทำงานด้วยกัน ได้แก่ ย่านไม่อิ่มตัว (Non - Saturation Region) นั่นก็คือเมื่อ  $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$  และอธิบายได้ดังสมการที่ (2.7) และย่านอิ่มตัว (Saturation Region) เมื่อ  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$  อธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.8) [23]

$$I_{DS} = \beta \left[ (V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (2.7)$$

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ พารามิเตอร์ของมอสเฟตและมีค่าดังสมการที่ (2.9)

$$\beta = C_i \cdot \mu_n \cdot \frac{W}{L} \quad (2.9)$$

โดยที่	$\mu_n$	คือ สภาพคล่องของประจุพาหะ
	$C_i$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อพื้นที่
	$W$	คือ ความกว้างของเกต
	$L$	คือ ความยาวของเกต
	$V_T$	คือ แรงดันขีดเริ่ม

โดยค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอีกค่าหนึ่งของอุปกรณ์มอสเฟตคือค่าแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งนั่นก็หมายถึงค่าของแรงดันไบอัสที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดสภาวะ “สตริงอินเวอร์ชัน” กล่าวคือเป็นค่าแรงดันที่ทำให้มอสเฟตนั้นเริ่มทำงานได้ โดยแสดงดังสมการที่ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_T = V_{FB} - \frac{Q_{dm}}{C_i} + 2\psi_F \quad (2.10)$$

โดยที่	$\psi_F$	คือ ศักย์เฟอร์มิ
	$Q_{dm}$	คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าสูงสุด
	$C_i$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อพื้นที่
	$V_{FB}$	คือ ค่าคงที่แรงดันแถบเรียบของมอสเฟต (Flat Band Voltage) จะมีค่าดังสมการที่ (2.11)

$$V_{FB(MOSFET)} = \phi_m - \phi_s \quad (2.11)$$

โดยที่	$\phi_m$	คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ
	$\phi_s$	คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

## 2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electro Chemistry) [24,25]

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Reaction) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารที่เข้าทำปฏิกิริยากัน ซึ่งถ้าหากใช้การถ่ายเทอิเล็กตรอนเป็นเกณฑ์แล้วนั้นก็จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

- สารที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนออกมา เรียกว่า ตัวรีดักชัน (Reduction)
- สารที่รับอิเล็กตรอน เรียกว่า ออกซิเดชัน (Oxidation)

โดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

- เซลล์แบบกัลวานิก (Galvanic Cell) เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้าอันเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าของทั้งสองเซลล์อย่างสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดโดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ยกตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่เชื้อเพลิง เป็นต้น
- เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Cell) เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกในการทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานที่ได้รับซึ่งเซลล์ในลักษณะนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับการแยกหรือสังเคราะห์โลหะ เช่น การเคลือบโลหะ เป็นต้น

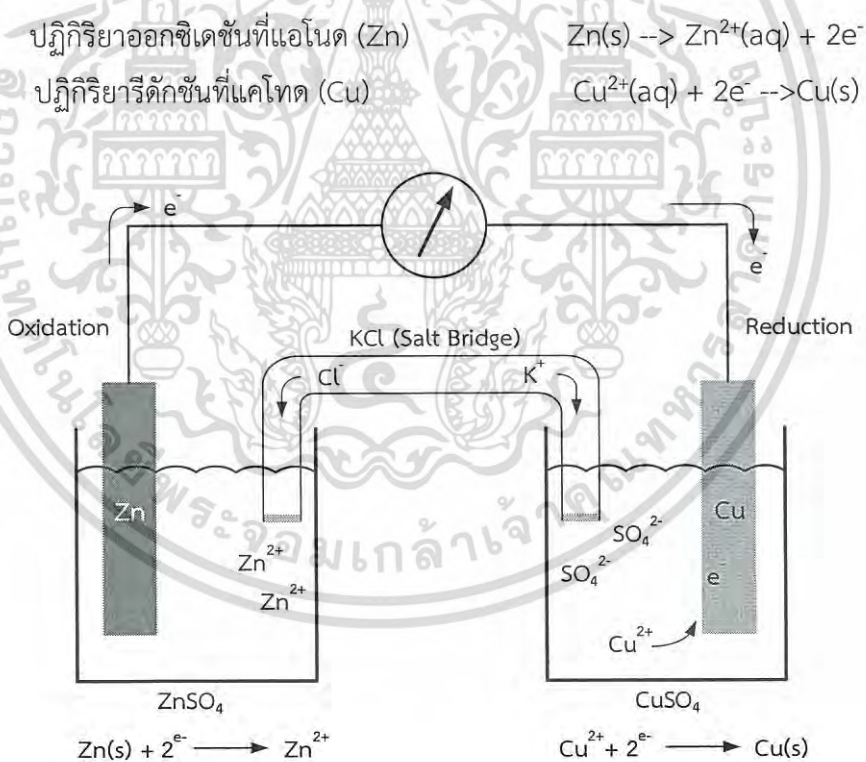
โดยในงานวิจัยนี้จะได้ใช้หลักการของเซลล์ไฟฟ้าแบบกัลวานิกในการทำงานของอุปกรณ์อ็อกซิเฟต

ดังนั้นจึงจะยกตัวอย่างเพียงแคเซลล์แบบกัลวานิกเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 การทำงานของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกัลวานิก

เมื่อนำแผ่นสังกะสีจุ่มลงในสารละลายของทองแดง หรือตัวรีดิวซ์จุ่มลงในตัวออกซิไดซ์โดยตรง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดพลังงานในรูปของความร้อน แต่ถ้าแยกตัวรีดิวซ์ออกจากตัวออกซิไดซ์ แล้วเชื่อมต่อวงจรภายนอกและสะพานเกลือ (Salt Bridge) อิเล็กตรอนก็จะถูกถ่ายโอนผ่านตัวกลางภายนอกจากขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไปยังขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ เซลล์ไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีนี้เรียกว่า เซลล์กัลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก (galvanic cell or voltaic cell) ดังรูปที่ 2.8 โดยองค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบกัลวานิกก็จะประกอบไปด้วย ขั้วโลหะที่จุ่มอยู่ในสารละลายทั้งสองครึ่งเซลล์ (Electrode), โวลท์มิเตอร์ (Volt Meter), สะพานเกลือ (Salt Bridge) จากรูปเซลล์กัลวานิกประกอบด้วยสองครึ่งเซลล์ โดยแต่ละครึ่งเซลล์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่จุ่มลงไปในการละลาย เรียกว่า อิเล็กโทรด (electrode) ขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า ขั้วแอโนด (anode) และขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เรียกว่า ขั้วแคโทด (cathode)

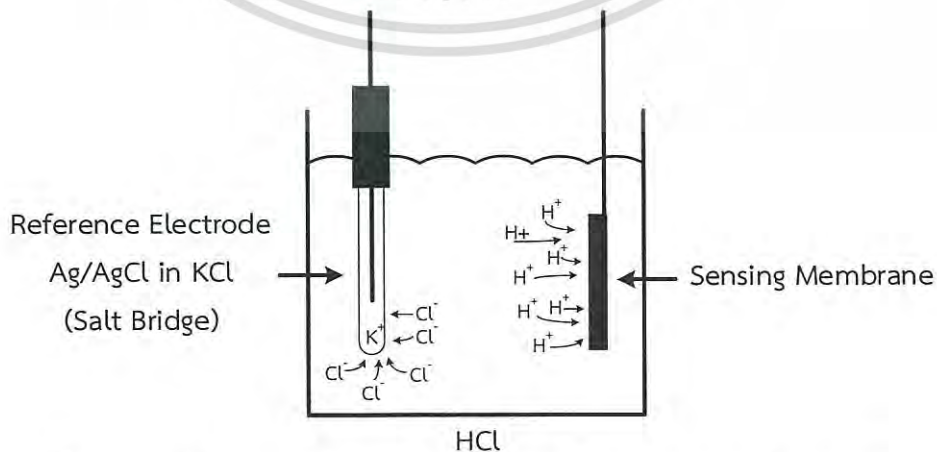


รูปที่ 2.8 เซลล์ไฟฟ้าแบบกัลวานิก

ในรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายกลไกการทำงานแบบละเอียดได้ว่าเมื่อครึ่งเซลล์ฝั่งซิงค์ (Zn) เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านตัวนำผ่านไปยังโวลท์มิเตอร์และวิ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปยังครึ่งเซลล์ฝั่งทองแดง (Cu) จากนั้นในช่วงของแท่งแดงก็จะมีอิเล็กตรอนทำให้  $\text{Cu}^{2+}$  ที่มีอยู่ในสารละลายครึ่งเซลล์ฝั่งทองแดงเข้าไปเกาะบริเวณขั้วทองแดงทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) เมื่อครึ่งเซลล์ฝั่งซิงค์เกิดการเสียอิเล็กตรอนจะทำให้สารละลายที่มีสภาพเป็นกลางนั้นสูญเสียสภาพความเป็นกลางเนื่องจากอิออนของ  $\text{Zn}^{2+}$  นั้นหลุดออกมาในสารละลายทำให้สารละลายมีความเป็นบวกมากขึ้นและครึ่งเซลล์ฝั่งทองแดงเมื่อได้รับอิเล็กตรอนก็จะทำให้  $\text{Cu}^{2+}$  ที่มีอยู่ในสารละลาย  $\text{CuSO}_4$  เข้าไปเกาะกับขั้วทองแดงทำให้เหลือเพียง  $\text{SO}_4^{2-}$  ทำให้สารละลายสูญเสียความเป็นกลางเช่นกันจึงทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันกับรีดักชันหยุดลง ดังนั้นจึงต้องใช้สะพานเกลือช่วยในการปรับสมดุล กล่าวได้ว่าเมื่อสารละลายที่ใช้เป็นสะพานเกลือแตกตัวออกจากกัน (ซึ่งในที่นี้ใช้ KCl ทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือ) อีออนบวก ( $\text{K}^+$ ) และอีออนลบ ( $\text{Cl}^-$ ) จากวิ่งไปคนละฝั่งโดยอีออน  $\text{K}^+$  จะวิ่งไปยังครึ่งเซลล์ฝั่งทองแดงแล้วทำการดึงอีออน  $\text{SO}_4^{2-}$  ไปรวมตัวตรงบริเวณสะพานเกลือและ  $\text{Cl}^-$  อีออนจะวิ่งไปยังครึ่งเซลล์ฝั่งซิงค์แล้วทำการดึงอีออน  $\text{Zn}^{2+}$  ไปรวมตัวตรงบริเวณสะพานเกลือเช่นกันทำให้บริเวณรอบๆ ขั้วไฟฟ้ามีความเป็นกลางส่งผลให้เซลล์ก็กลับเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันต่อไปได้

ดังนั้นในอุปกรณ์วัดความเป็นกรด - ด่างแบบโครงสร้างอีจีเฟตจะใช้หลักการเดียวกันกับเซลล์แบบกัลวานิกแต่จะพิจารณาอยู่ในรูปแบบของครึ่งเซลล์เดียวโดยในเซลล์ก็จะมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบ Ag/AgCl ที่อยู่ในสารละลาย KCl อิมิตัวทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือ โดยในรูปที่ 2.9 ยกตัวอย่างการวัดค่าพีเอชของสารละลาย HCl ด้วยอุปกรณ์อีจีเฟตจะเห็นได้ว่าอีออน  $\text{K}^+$  ที่แตกตัวจาก KCl ในขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะวิ่งมายังปลายสะพานเกลือและทำการดึงประจุคลอไรด์อีออน  $\text{Cl}^-$  ในสารละลายไปรวมตัวกันอยู่บริเวณปลายสะพานเกลือทำให้ในสารละลายนั้นเหลือเพียงแคไฮโดรเจนอีออน  $\text{H}^+$  ซึ่งเป็นประจุที่ต้องการวัดเพื่อบ่งบอกถึงปริมาณความเป็นกรด - ด่าง จากนั้นอีออน  $\text{H}^+$  จะเข้าไปจับตัวกับบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนและทำให้เกิดการ Induced กระแสทำให้มีกระแสตรงไหลได้และปริมาณกระแสที่ไหลก็จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของปริมาณของ  $\text{H}^+$  อีออนที่มีอยู่ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด - ด่าง ที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.9 เซลล์ไฟฟ้าแบบครึ่งเซลล์กัลวานิกในการวัดกรด - ด่างแบบโครงสร้าง EGFET

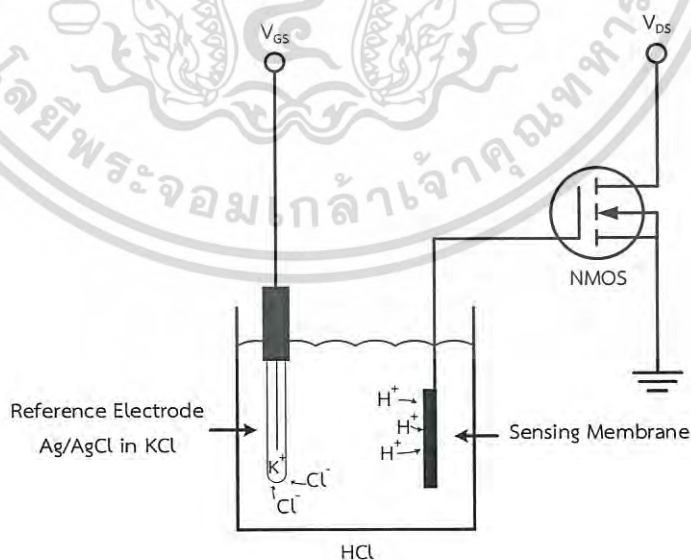
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 อุปกรณ์อีจีเฟต (EGFET)

### 2.5.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของอุปกรณ์อีจีเฟต

อุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ต่างแบบโครงสร้างอีจีเฟต (Extended-gate Field Effect Transistor : EGFET) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ถูกพัฒนามาจากพื้นฐานของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล (n - Channel MOSFET) หรือมอสเฟตแบบเอ็นแชนแนลซิมเมตริกชนิดเอ็นแชนแนล ถูกค้นพบโดย Van Der Spiegel โดยพัฒนาให้อุปกรณ์มอสเฟตนั้นสามารถตอบสนองต่อความเป็นกรด - ต่างได้โดยทำการเชื่อมต่อส่วนที่เรียกว่าเมมเบรนในการตรวจวัด (Sensing Membrane) เข้ากับขาเกตของมอสเฟต (Extended-Gate) โดยที่เมมเบรนจะทำหน้าที่ในการตรวจจับไฮโดรเจนไอออน ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนจะเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ถึงปริมาณความเป็นกรด - ต่างในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl Reference Electrode) ทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือ ซึ่งทั้งเมมเบรนในการตรวจวัดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนั้นจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายที่ต้องการวัด ในส่วนของวัสดุที่ถูกนำมาเป็นเมมเบรนในการตรวจวัดนั้นก็มียุหลายชนิดด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotubes), ทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ), ซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ), ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ), พาลาเดียมออกไซด์ ( $\text{PdO}$ ), รูทีเนียมไดออกไซด์ ( $\text{RuO}_2$ ) เป็นต้น และโครงสร้างแบบอีจีเฟตยังมีข้อดีในการผลิตและการใช้งาน เช่น มีต้นทุนที่ต่ำในการผลิต, ง่ายต่อการผลิตและบรรจุภัณฑ์, มอสเฟตที่นำมาต่อใช้งานจะไม่ถูกสัมผัสกับสารเคมีจึงทำให้ใช้งานได้ยาวนาน, ไม่มีผลกระทบจากอิทธิพลของแสง [26-27] เป็นต้น



รูปที่ 2.10 โครงสร้างและการต่อใช้งานอุปกรณ์อีจีเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 ลักษณะสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์อีจีเฟต

หลักการการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ต่างแบบโครงสร้างอีจีเฟตนั้นมีส่วนประกอบที่เป็นองค์ประกอบหลักก็คือมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เม้นท์ชนิดเอ็นแชนแนล โดยที่โครงสร้างแบบอีจีเฟตนั้นเกิดจากการนำส่วนที่เรียกว่าเมมเบรนไปต่อเชื่อมเข้ากับขาเกตของมอส (Extended-Gate) ซึ่งส่วนของเมมเบรนก็จะถูกจุ่มลงไปในสารละลายพร้อมกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์

ในส่วนของมอสเฟตนั้นค่าแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{T(MOSFET)}$ ) จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งแต่เมื่อนำมอสเฟตไปต่อเข้ากับเมมเบรนเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์อีจีเฟตจะทำให้ค่าของแรงดันขีดเริ่ม ( $V_{T(EGFET)}$ ) จะไม่ได้เป็นตัวแปรที่คงที่ซึ่งจะมีค่าที่แปรผันไปตามสภาพความเป็นกรด - ต่างของสารละลายที่นำไปทดสอบ โดยเมื่อจุ่มเมมเบรนและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงลงในสารละลายที่ทำการวัดและเมื่อทำการจ่ายแรงดันให้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะทำให้ไอออนโพแทสเซียม ( $K^+$ ) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่บรรจุอยู่ในขั้วไฟฟ้าอ้างอิงวิ่งออกมาอยู่ที่ปลายขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งในที่นี้ทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือ (Salt Bridge) ดึงไอออนลบที่มีอยู่ในสารละลายไปรวมตัวกันอยู่ที่บริเวณปลายสะพานเกลือทำให้บริเวณผิวของเมมเบรนเหลือเพียงไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ซึ่งเป็นไอออนที่ต้องการวัดและเป็นไอออนที่บ่งบอกถึงความเป็นกรด - ต่างของสารละลายด้วยไฮโดรเจนไอออนมีประจุเป็นบวกจึงทำให้เกิดการ Induced และทำให้มีกระแสเดรนไหล

เมื่อทำการพิจารณาที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือแล้วเมื่อให้แรงดันที่  $V_{GS}$  มีค่าเป็นศูนย์จะยังไม่ทำให้เกิดการดึงไอออนลบในสารละลายไปยังบริเวณปลายสะพานเกลือและเมื่อแรงดัน  $V_{GS}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่งจนทำให้ไอออนบวกและไอออนลบถูกดึงไปคนละข้างทำให้ระหว่างเมมเบรนกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนั้นมีประจุที่ต่างกันมากขึ้นทำให้ประจุบวกที่เมมเบรนนั้นเกิดการ Induced ให้กระแสเดรนไหลได้ และเมื่อกระแสเดรนเริ่มไหลจึงกล่าวได้ว่าอุปกรณ์อีจีเฟตนั้นก็จะอยู่ในสถานะที่เริ่มทำงาน (Turn on) ดังนั้นจึงนิยามแรงดัน  $V_{GS}$  ที่ทำให้อุปกรณ์อีจีเฟตนั้นอยู่ในสถานะ Turn on นั้นว่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟต (EGFET Threshold Voltage : ( $V_{T(EGFET)}$ ) โดยที่แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์นั้นก็จะแปรผันไปตามความเข้มข้นของ  $H^+$  ในสารละลายซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณความเป็นกรด - ต่าง ด้วยสภาพความเป็นกรด - ต่างที่แตกต่างกันทำให้มีปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน  $H^+$  แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องทำการจ่ายแรงดัน  $V_{GS}$  ที่ทำให้อุปกรณ์นั้นอยู่ในสถานะ Turn on ที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือเพื่อดึงประจุที่ไม่ต้องการไปรวมอยู่ปลายสะพานเกลือดังนั้นในสารละลายที่มีสภาพความเป็นกรด - ต่างที่ต่างกันจึงต้องจ่ายแรงดัน  $V_{GS}$  ที่ต่างกัน ทำให้สามารถหาค่าของการตอบสนองต่อสภาพความเป็นกรด - ต่างของอุปกรณ์ได้โดยพิจารณาจากค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตและสามารถหาได้จากสมการที่ (2.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{T(EGFET)} = V_{T(MOSFET)} - \frac{\Phi_M}{q} + E_{REF} + \chi^{Sol} - \phi \quad (2.12)$$

โดยที่	$V_{T(EGFET)}$	คือ แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ EGFET
	$V_{T(MOSFET)}$	คือ แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์มอสเฟต
	$\frac{\Phi_M}{q}$	คือ ฟังก์ชันงานของเกตโลหะ
	$E_{REF}$	คือ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
	$\chi^{Sol}$	คือ Surface Dipole ของสารละลาย
	$\phi$	คือ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างสารละลายและเมมเบรน

และค่าของกระแสเดรนต่อแรงดันที่เกตหรือแรงดันที่ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ( $V_{REF}$ ) นั้น ( $I_{DS} - V_{GS}$  or  $V_{REF}$ ) จะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.13)

$$I_{DS} = K_n [2(V_{REF} - V_{T(EGFET)})V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (2.13)$$

โดยที่	$I_{DS}$	คือ กระแสเดรน
	$K_n$	คือ ค่า Conduction Parameter มีค่าดังสมการที่ (2.14)
	$V_{REF}$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
	$V_{T(EGFET)}$	คือ แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟต
	$V_{DS}$	คือ แรงดันที่ขั้วเดรนซอส

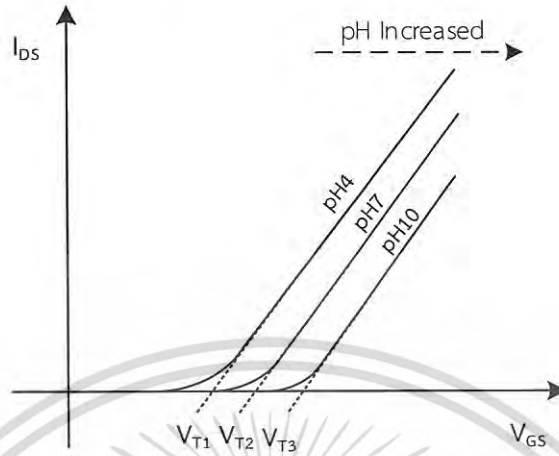
ค่าของ Conduction Parameter ( $K_n$ ) นั้นจะหาได้ดังสมการที่ (2.14)

$$K_n = \frac{W\mu_n C_{OX}}{2L} \quad (2.14)$$

โดยที่	$W/L$	คือ อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของแชนแนล
	$\mu_n$	คือ ค่าความคล่องของอิเล็กตรอน
	$C_{OX}$	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์

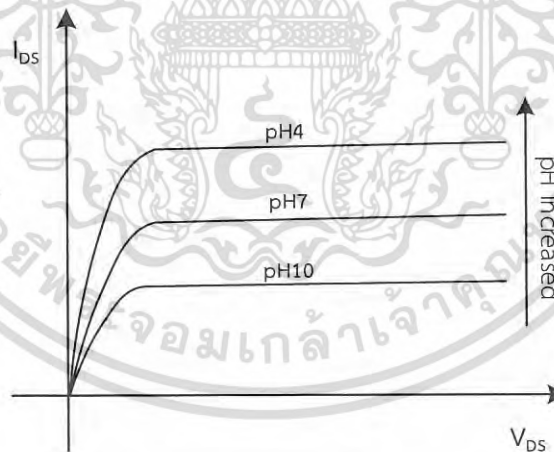
ดังนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันที่เกต ( $I_{DS} - V_{GS}$ ) เมื่อแรงดันเกตหรือแรงดันที่ทำการป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ค่าต่างๆจะแสดงดังในรูปที่ 2.11 และกราฟคุณลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกระแสและแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอุปกรณ์อีจีเฟตที่สารละลายมีสภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกันนั้น ก็จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่สารละลายที่มีค่า pH ต่างกัน ที่  $V_{DS}$  มีค่าคงที่

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าค่าของแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟต ( $V_{T(EGFET)}$ ) นั้นมีค่าที่แปรผันไปตามค่าของสภาพความเป็นกรด - ด่างของสารละลายทำให้สามารถพิจารณาการตอบสนองของอุปกรณ์ต่อความเป็นกรด - ด่างได้



รูปที่ 2.12 คุณลักษณะกระแสและแรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ที่แรงดัน  $V_{GS}$  คงที่

จากรูปที่ 2.12 ค่าของกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) ที่ค่าแรงดันเกตมีค่าคงที่นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับสภาพความเป็นกรดมากขึ้น เนื่องจากมีประจุบวกจากไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่มากขึ้นจึงทำให้เหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้มากขึ้นและส่งผลให้กระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่างของอุปกรณ์ได้ด้วยเช่นกัน

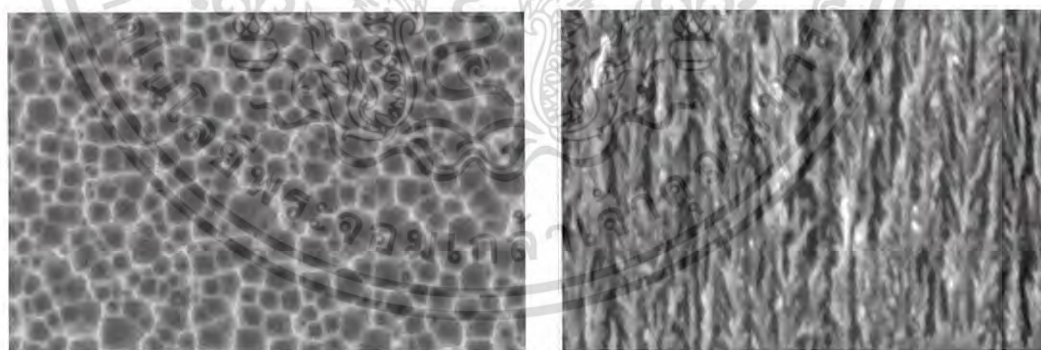
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 ทฤษฎีพอร์ซิลิคอน (Porous silicon)

พอร์ซิลิคอนคือวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมากอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีโครงสร้างไม่มีระเบียบบนผลึกซิลิคอนซึ่งเกิดจากกระบวนการกัดผลึกซิลิคอน (Silicon Etching) ซึ่งโดยทั่วไปวิธีการกัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายก็คือกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน (Anodization) โดยรูปร่างของพอร์ซิลิคอนจะมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะโดยจะได้อธิบายรายละเอียดดังกล่าวในส่วนต่อไป ซึ่งพอร์ซิลิคอนเป็นอีกวัสดุหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น อิเล็กทรอนิกส์ทางด้านแสง อิเล็กทรอนิกส์ทางการแพทย์ อุปกรณ์ตรวจวัดโรเซเหยแอลกอฮอล์ ตลอดจนใช้เป็นเมมเบรน เป็นต้น

### 2.6.1 โครงสร้างพอร์ซิลิคอน

พอร์ซิลิคอนคือผลึกซิลิคอนที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากมายบนผลึกซิลิคอนซึ่งจะมีความแข็งแรงและเปราะ โดยขนาดของรูพรุนเหล่านี้จะมีขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตรและมีขนาดใหญ่สุดถึงระดับไมโครเมตร โดยภายในโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนนั้นก็จะมีขนาดของโครงสร้างที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป โดยในรูปที่ 2.13 นั้นจะแสดงภาพตัวอย่างผิวหน้าและภาพถ่ายด้านข้าง [28-30] ของพอร์ซิลิคอนซึ่งในภาพที่แสดงจะเป็นการสร้างพอร์ซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดด้วยไฟฟ้าเคมีหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ากระบวนการแอโนไดซ์เซชัน (Anodization)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างชั้นพอร์ซิลิคอนจากการถ่าย SEM

(ก) ผิวหน้าของพอร์ซิลิคอน (ข) ภาพตัดขวางพอร์ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 การจำแนกประเภทของพอร์ซิลิคอน

พอร์ซิลิคอนเป็นผลึกซิลิคอนที่มีรูพรุนมากมายมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรไปจนถึงไมโครเมตรที่แทรกอยู่ตามผลึกซิลิคอน ซึ่งในการแบ่งประเภทของพอร์ซิลิคอนนั้นก็จะสามารถจำแนกออกได้ 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ จำแนกตามประเภทของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (Pore size), จำแนกตามลักษณะของรูพรุน (Pore type) และจำแนกตามรูปร่างของรูพรุน (Pore shape) โดยจะได้อธิบายรายละเอียดของการจำแนกแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้ [31]

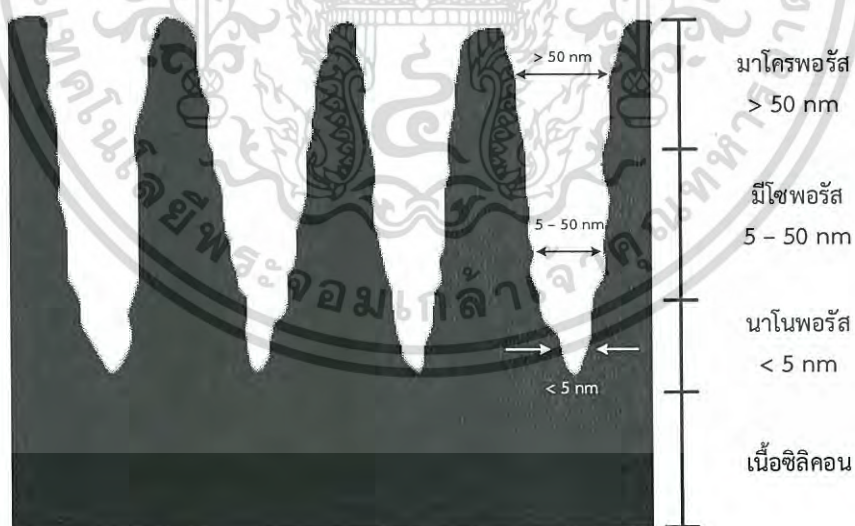
### 1. การจำแนกประเภทของพอร์ซิลิคอนตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Pore size)

ในการจำแนกประเภทพอร์ซิลิคอนในลักษณะนี้สามารถจำแนกย่อยได้เป็นอีก 3 ลักษณะดังนี้

1.1 ไมโครพอร์ซิลิคอน (microporous silicon) คือชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยรวมใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตรขึ้นไป

1.2 มีโซพอร์ซิลิคอน (mesoporous silicon) คือชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยรวมอยู่ในช่วง 5 นาโนเมตรถึง 50 นาโนเมตร

1.3 นาโนพอร์ซิลิคอน (nanoporous silicon) คือชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยรวมน้อยกว่า 5 นาโนเมตรลงไป



รูปที่ 2.14 ภาพตัวอย่างโครงสร้างพอร์ซิลิคอนที่จำแนกตามประเภทของรูพรุน

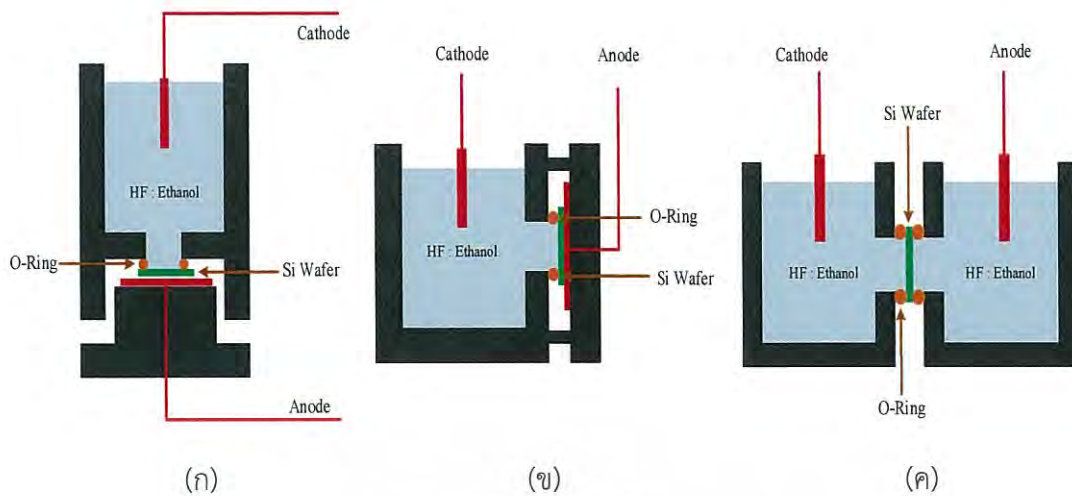
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 เทคนิคการสร้างพอร์ซซิลิคอน (Formation Technique)

ในการสร้างพอร์ซซิลิคอนนั้นโดยทั่วไปแล้วจะมีวิธีการสร้างหลายวิธีการสร้างด้วยกัน [32-36] เช่นการสร้างด้วยการสร้างด้วยการสลายตัวของก๊าซไฮโดรเจนด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave plasma decomposition  $\text{SiH}_4$ ), การสร้างด้วยการสลายตัวของก๊าซไฮโดรเจนด้วยเลเซอร์ (Laser Breakdown  $\text{SiH}_4$ ), การสร้างด้วยคลื่นความถี่สูง (Frequency Spark), การสร้างด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching หรือ Anodization) และการสร้างด้วยการกัดด้วยกรด (Stain Etching) ซึ่งในบรรดาวิธีการสร้างที่ได้ยกตัวอย่างมานั้นวิธีการที่นิยมใช้การมากที่สุดได้แก่วิธีการสร้างด้วยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งกระบวนการนี้เป็นวิธีที่สร้างได้ง่ายและสามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่ายและสามารถเตรียมได้ง่ายในห้องแล็บอีกทั้งยังไม่ต้องพึ่งพาเครื่องมือที่มีราคาสูง

### 2.7.1 วิธีการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching , Anodization)

กระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี [37-38] หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ากระบวนการแอโนไดซ์เซชัน (Anodization) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีข้อดีคือสามารถควบคุมปฏิกิริยาในกระบวนการกัดได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ชั้นพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการนี้มีความสม่ำเสมอ (Uniform) ทั่วทั้งแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เนื่องจากทำการควบคุมด้วยสนามไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถเตรียมได้ง่ายในห้องแล็บและมีต้นทุนในการสร้างที่ต่ำ โดยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะประกอบไปด้วยแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่อยู่ตรงกลางระหว่างขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) จุ่มอยู่ในสารละลายแล้วทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่คงที่ให้กับเซลล์ไฟฟ้าเคมีดังกล่าว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีก็จะเงื่อนไขต่างๆ ในการสร้าง ยกตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF), ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, เวลาในการกัด ตลอดจนผสมเอทานอลกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเพื่อทำหน้าที่ช่วยในการลดแรงดึงผิวและทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสัมผัสกับซิลิคอนได้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้วซิลิคอนเวเฟอร์ที่ผ่านการสร้างด้วยกระบวนการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นจะเกิดเป็นรูพรุนมากมายบนผิวหน้าของซิลิคอนและมีความสม่ำเสมอ อีกทั้งยังสามารถควบคุมความพรุนและความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการสร้างแบบการกัดด้วยกรด ซึ่งตัวอย่างภาพตัดขวางของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแสดงดังรูปที่ 2.15

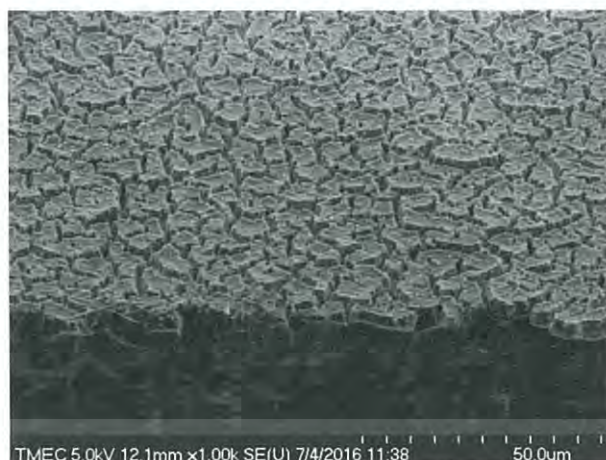


รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สร้างพอลิซิลิคอน

- (ก) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งตั้งเดี่ยวแนวตั้ง  
 (ข) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งตั้งเดี่ยวแนวนอน  
 (ค) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แนวนอน

จากรูปที่ 2.15 จะแสดงเซลล์ไฟฟ้าเคมี 3 รูปแบบ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายจะเห็นว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้ง 3 รูปแบบนั้นมีรูปลักษณะที่ต่างกันออกไปซึ่งแต่ละรูปแบบก็จะมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบที่ต่างกัน จาตรูปที่ 2.15 (ก) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งตั้งเดี่ยวแนวตั้ง (Single tank vertical cell) จะมีจุดเด่นคือเซลล์ไฟฟ้าเคมีลักษณะนี้ง่ายต่อการฉายแสงช่วยกระตุ้นการเกิดโพลีซิลิคอนในกระบวนการกัดได้ (ในกรณีที่ต้องการใช้แสงช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการกัด) ซึ่งเมื่อเทียบกับเซลล์ไฟฟ้าเคมีในรูปที่ 2.15 (ข) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งตั้งเดี่ยวแนวนอน (Single tank horizontal cell) เห็นว่าในกรณีที่ต้องการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดก็จากสามารถทำได้ยากกว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งตั้งเดี่ยวแนวตั้งซึ่งตั้งนั้นแล้วโดยทั่วไปจะนิยมใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งตั้งเดี่ยวแนวตั้งมากกว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งตั้งเดี่ยวแนวนอน ในส่วนของรูปที่ 2.15 (ค) เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แนวนอน (Double tank cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ได้พัฒนามาจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งตั้งเดี่ยวแนวนอนซึ่งข้อได้เปรียบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้นั้นจากรูปจะเห็นได้ว่าการเติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงไปสองด้านทั้งด้านหน้าแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์และด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์อีกทั้งยังไม่มีชั้นกั้นกั้นไฟฟ้าเข้าไปที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอนทำให้เซลล์ชนิดนี้มีความเครียดของวัสดุที่บริเวณ O-ring จึงทำให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้มีการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดอื่นที่ได้กล่าวมา ซึ่งชั้นพอลิซิลิคอนที่ได้จากการสร้างด้วยกระบวนการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะแสดงดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

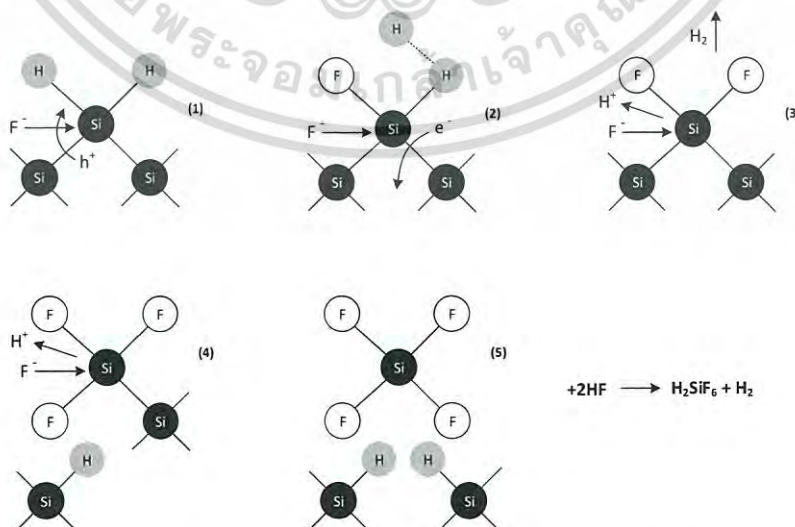


รูปที่ 2.16 ภาพถ่ายผิวหน้าของชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างด้วยกระบวนการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี

## 2.8 กลไกในการเกิดพอร์ซิลิคอน (Porous Silicon Mechanisms) [39]

### 2.8.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน

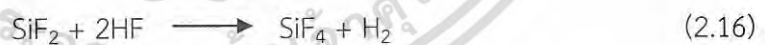
เมื่อจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในสภาวะปกตินั้นในส่วนของผิวหน้าของผลึกซิลิคอนนั้นจะยังไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัดผิวหน้าหรือเข้าทำปฏิกิริยาต่อผลึกซิลิคอน แต่เมื่อนำผลึกซิลิคอนมาบรรจุอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีลักษณะการไบอัสแบบแอโนดิก ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั้นจะถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเข้าทำปฏิกิริยากัดกร่อนจนบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ มากมายบนผิวหน้าของผลึกซิลิคอนซึ่งรูพรุนเหล่านี้เราจะเรียกว่า ชั้นพอร์ซิลิคอน โดยที่ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวจะอธิบายได้ดังรูปที่ 2.17



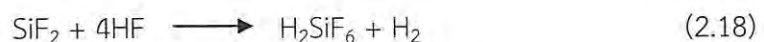
รูปที่ 2.17 ปฏิริยาทางเคมีและกลไกการกัดผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.17 ในช่วงเริ่มต้นเมื่อยังไม่มีสารไฮโดรฟลูออริก บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์นั้นจะถูกปกคลุมไปด้วยพันธะของไฮโดรเจน ซึ่งจะมีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนนั้นไม่สามารถเข้าไปทำลายพันธะระหว่างซิลิคอนและอะตอมไฮโดรเจนได้ (Si - H) เมื่อทำการไปบัสให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีมีลักษณะการไปอัสเป็นแบบแอโนดิกนั้น กล่าวคือมีการป้อนศักย์บวกให้กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์จนทำให้พาหะโฮลเคลื่อนที่มายังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ในขณะนั้นสัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกอยู่นั้นส่งผลให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนถูกทำลาย และอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในขณะนั้นเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนจนเกิดเป็นพันธะระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน (Si - F) ดังขั้นตอนในลำดับที่ 1 และจากอิทธิพลการโพลาไรซ์ (Polarizing) ของฟลูออรีนที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลให้ฟลูออรีนอีกตัว (F<sup>-</sup>) ที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเข้าทำลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนที่ยังเหลืออยู่ในแขนอีกข้างเช่นกันและมีการเกิดขึ้นของโมเลกุลไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีการปล่อยอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังแอโนด ซึ่งแสดงไว้ในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 และส่งผลให้ หลังจากนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอนของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F Group) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 ส่งผลให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนที่ผิวกับซิลิคอนตัวถัดมานั้นมีความแข็งแรงลดลง ซึ่งตั้งนั้นแล้วพันธะเคมีดังกล่าวนั้นก็就会被ทำลายลงได้โดยอิออนของฟลูออรีนและเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาใหม่ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ ขั้นตอนที่ 4 หลังจากที่ผ่านมาขั้นตอนนี้ไปแล้วอะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์พร้อมๆกับการเกิดขึ้นเป็นพันธะเคมีใหม่ระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนที่อยู่เป็นลำดับถัดมาต่อไป ดังแสดงในขั้นตอนที่ 5 ในส่วนของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเขียนได้ดังต่อไปนี้



จากสมการข้างต้นสามารถเขียนรวมได้เป็น



จากสมการเคมีที่ได้กล่าวมาเมื่อข้างต้นแล้วนั้น จะเริ่มต้นจากปฏิกิริยาที่ 2.15 ที่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Si) เป็นสารตั้งต้นอยู่ในสารละลายไฮโดรฟลูออริก ซึ่งในปฏิกิริยาเคมีในการกัดนี้จะอาศัยพาหะโฮล (h<sup>+</sup>) เป็นหลักในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งทำให้เกิด SiF<sub>2</sub> บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{SiF}_2$  ขึ้นกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ 2.16 และได้ผลออกมาเป็น  $\text{SiF}_4$  หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์และในระหว่างกระบวนการกัดที่เกิดขึ้นจะสังเกตเห็นได้ว่าการเกิดขึ้นของก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ระหว่างการกัดเกิดขึ้น สุดท้ายจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{SiF}_4$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็น  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  ที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังสมการที่ 2.17 และสามารถเขียนรวมได้ใหม่ดังสมการที่ 2.18

## 2.9 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน (Porosity of Porous silicon)

วัสดุโดยทั่วไปที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดต่างๆ มากมายกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุเอง ดังนั้นแล้วก็จะถือได้ว่าวัสดุดังกล่าวนี้เป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าของความพรุนที่ว่ามันสามารถแบ่งได้ถึงลักษณะและขนาดของโครงสร้างวัสดุอย่างคร่าวๆได้ โดยสามารถหาจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของวัสดุต่อช่องว่างภายในโครงสร้างของวัสดุ

พอร์สซิลิคอนก็คือผลึกซิลิคอนที่มีรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมากมายบนเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งขนาดของรูพรุนนั้นจะอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยเนื้อของผลึกซิลิคอนที่อยู่ในระดับนาโนเมตรนี้แสดงคุณสมบัติทางผลของขนาดควอนตัม (Quantum size effect) ในเชิง 1 มิติ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างผลึกซิลิคอนกับขนาดของรูพรุนก็จะมีผลต่อความพรุนและความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอน [40] โดยความพรุนของพอร์สซิลิคอนจะจำลองได้ดังรูปที่ 2.18

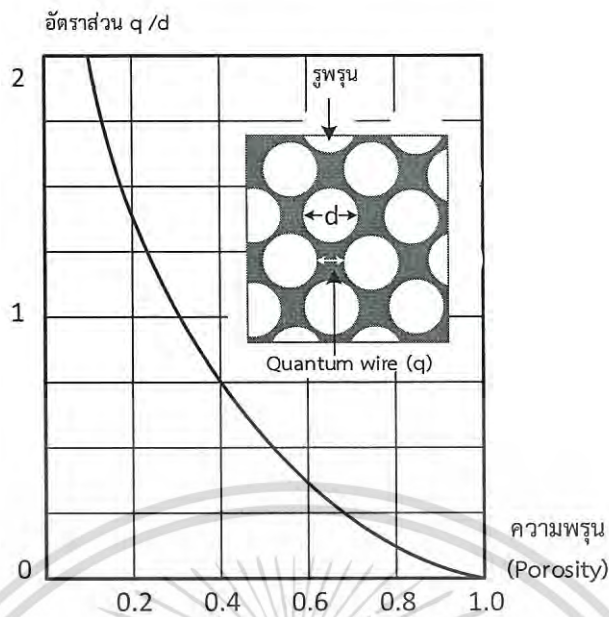


รูปที่ 2.18 ภาพจำลองพอร์สซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน

จะเห็นได้ว่าขนาดของเนื้อซิลิคอนและขนาดของรูพรุนนั้นจะส่งผลต่อค่าความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนด้วย กล่าวได้ว่าหากเนื้อซิลิคอนนั้นถูกกัดจนมีขนาดเล็กแล้ว ขนาดของรูพรุนก็จะมีความหนาที่เพิ่มขึ้นและค่าของความพรุนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามกันไปด้วยโดยแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่

2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอนกับขนาดของรูพรุนที่มีผลต่อความพรุนของพอร์ซิลิคอน

## 2.10 การดักจับไฮโดรเจนอออนของชั้นพอร์ซิลิคอน

อุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่างแบบโครงสร้างอีพิตในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างแบบง่าย โดยมีส่วนประกอบหลักๆ อยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ

### 1. ส่วนเมมเบรนในการดักจับไฮโดรเจนอออน

ในส่วนนี้พอร์ซิลิคอนจะถูกใช้เป็นการดักจับปริมาณไฮโดรเจนอออนในสารละลายซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงสภาพความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลาย ซึ่งพอร์ซิลิคอนนั้นโดยพื้นฐานแล้วจะเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุนเล็กๆ จำนวนมากบนผิวหน้าของผลึกซิลิคอน ทำให้สามารถดักจับเอาไฮโดรเจนอออนที่มีอยู่ในสารละลายเข้ามาทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของพอร์ซิลิคอนได้ดีกว่าวัสดุที่มีพื้นผิวเรียบ

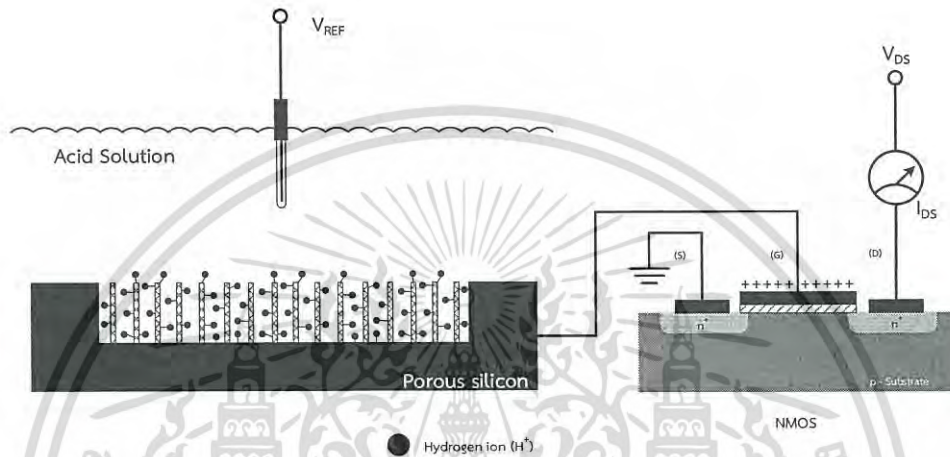
### 2. ส่วนของมอสเฟต

ในส่วนของมอสเฟตนี้จะถูกใช้เป็นส่วนขยายสัญญาณทางไฟฟ้าและแสดงลักษณะการเปลี่ยนเป็นทางไฟฟ้าเมื่อเมมเบรนที่ใช้ตรวจวัดนั้นอยู่ในสภาพความเป็นกรด – ด่างที่แตกต่างกันออกไป โดยขั้วเกิดของมอสเฟตจะถูกเชื่อมต่อกับเมมเบรนที่ใช้ในการตรวจวัดไฮโดรเจนอออนในสารละลาย

โดยหลักการตรวจจับไฮโดรเจนอออนของชั้นพอร์ซิลิคอนนั้นจะสามารถอธิบายได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

บริเวณผิวของชั้นพอร์ซิลิคอนนั้นจะมีพันธะแขวนขาดอยู่บริเวณผิวซึ่งในลักษณะดังกล่าวนี้จะทำให้มีระดับพลังงานหนึ่งที่เรียกว่าสถานะผิว (Surface State) เกิดขึ้น เมื่อพอร์ซิลิคอนที่ทำหน้าที่เอกสารเป็นอิเล็กโทรดสองขั้วสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไมออนูตาดิเนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

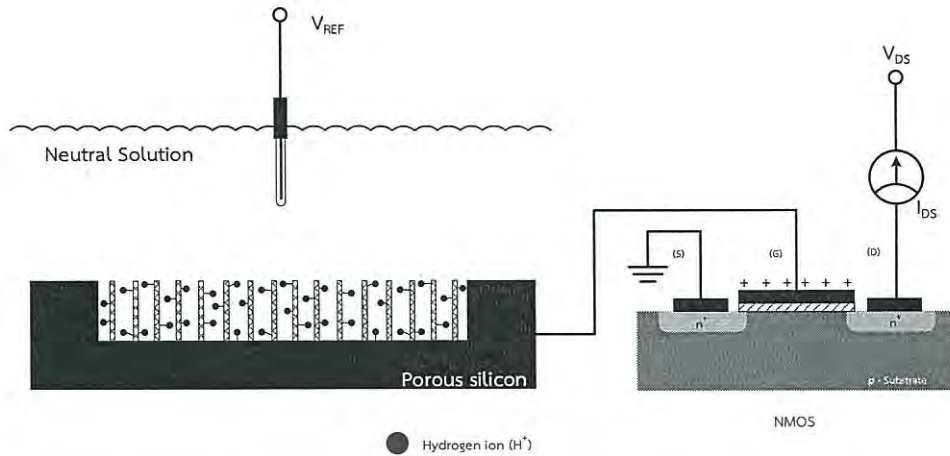
เป็นเมมเบรนที่ใช้ตรวจวัดถูกจุ่มลงไปในสารละลายที่มีไฮโดรเจนไอออนอยู่ก็จะทำให้ไฮโดรเจนไอออนเข้ามาจับตัวกับผนังที่เป็นรูพรุนซึ่งมีพันธะแวนเดอวาล์วและทำให้เกิดการเหนี่ยวนำพาหะที่บริเวณผิวของพอร์ซิลิคอนมากขึ้น ทำให้เกิดสถานะผิวมากขึ้น จนทำให้ชั้นพอร์ซิลิคอนนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นและเมื่อพอร์ซิลิคอนที่ทำหน้าที่เป็นเมมเบรนถูกต่อเข้ากับขั้วเกตของมอสเฟตแบบเอนฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแซนแนลก็จะทำให้มอสเฟตนั้นแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไปภายใต้สภาพความเป็นกรด – ต่างที่แตกต่างกันออกไป อธิบายได้ดังรูปที่ 2.20, 2.21 และ 2.22



รูปที่ 2.20 ลักษณะการตอบสนองของอีจีเฟตภายใต้สภาพความเป็นกรด

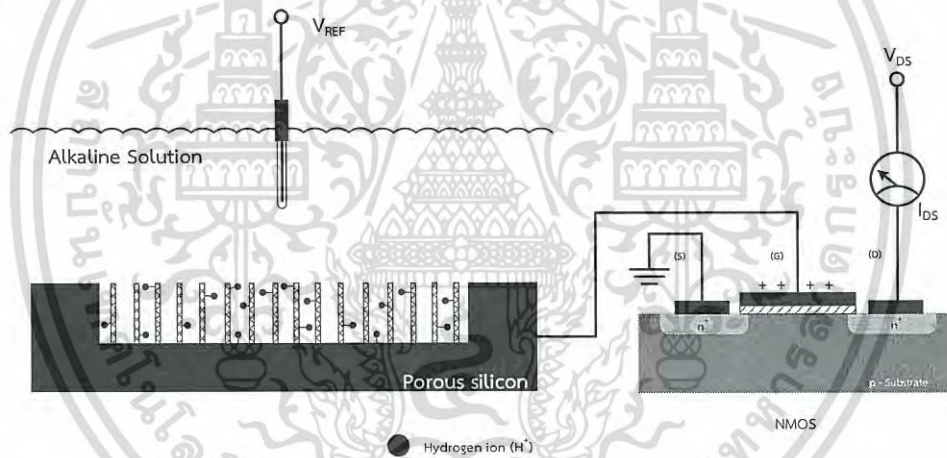
จากรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าเมื่อพอร์ซิลิคอนอยู่ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดนั้นภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรดนี้ก็จะประกอบไปด้วยไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จำนวนมากซึ่งไฮโดรเจนไอออนนั้นก็จะมีประจุเป็นบวกจึงทำให้พอร์ซิลิคอนมีศักย์บวกเพิ่มขึ้น ดังนั้นแล้วเมื่อพอร์ซิลิคอนที่ทำหน้าที่เป็นเมมเบรนถูกต่อเข้ากับขั้วเกตของมอสเฟตชนิดเอ็นแซนแนลแล้วนั้นจะส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้มากขึ้นและเมื่อวัดกระแสเดรนที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นไปด้วย

ในรูปที่ 2.21 เมื่อเมมเบรนของอีจีเฟตซึ่งในที่นี้คือพอร์ซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นกลางปริมาณของไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่างที่ทำการวัดจะมีปริมาณที่น้อยลงดังนั้นจึงส่งผลให้ผิวพอร์ซิลิคอนมีศักย์บวกน้อยลงและทำให้การเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้น้อยลงและกระแสเดรนที่ได้ก็จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการตรวจวัดภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรด



รูปที่ 2.21 ลักษณะการตอบสนองของออร์แกนิกฟิลด์ภายใต้สภาพความเป็นกลาง

สุดท้ายเมื่ออยู่ภายใต้สภาพความเป็นด่างการตอบสนองของอุปกรณ์ออร์แกนิกฟิลด์จะสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ลักษณะการตอบสนองของออร์แกนิกฟิลด์ภายใต้สภาพความเป็นด่าง

จากรูปที่ 2.22 เมื่อเมมเบรนของออร์แกนิกฟิลด์ซึ่งในที่นี้คือพอร์ซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นด่างซึ่งมีปริมาณของไฮโดรเจนไอออนอยู่ในสารละลายตัวอย่างที่ทำการวัดจะมีปริมาณที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดและเป็นกลาง ดังนั้นก็จะส่งผลให้ผิวพอร์ซิลิคอนมีศักย์บวกน้อยลงไปอีกเมื่อเทียบกับสารละลายที่มีสภาพความเป็นกรดและเป็นกลาง ดังนั้นแล้วการเหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้ก็จะน้อยลงและส่งผลกระทบให้กระแสเดรนที่ได้ก็จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการตรวจวัดภายใต้สารละลายที่มีสภาพเป็นกรดและเป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตอบสนองต่อสภาพความเป็นกรด – ต่าง ของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ต่าง แบบโครงสร้างอีจีเพตที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรนนั้นจะเห็นได้ว่าตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญนั้นก็ คือไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย โดยจะส่งผลทำให้อุปกรณ์อีจีเพตนั้นแสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้า ออกมาแตกต่างกันจึงทำให้สามารถบ่งบอกถึงสภาพความเป็นกรด – ต่างของสารละลายได้โดยการ พิจารณาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอีจีเพต ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

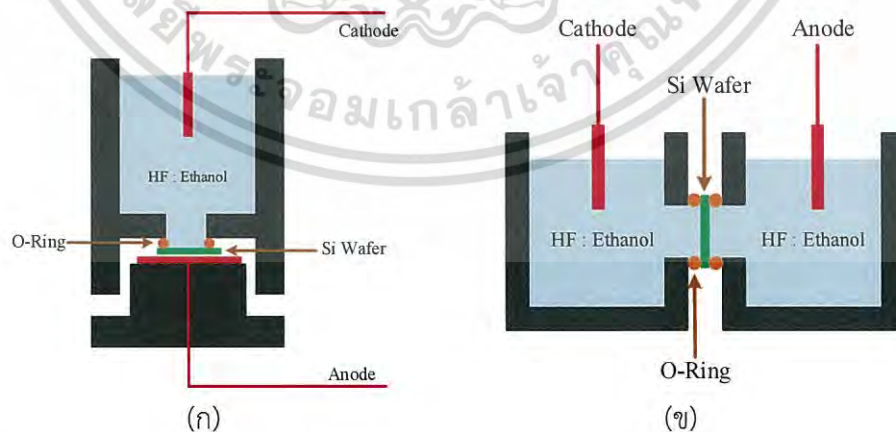
## กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงกระบวนการสร้างพอร์ซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี และกระบวนการสร้างหัววัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้าง EGFET (extended gate field effect transistor) รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

### 3.1 กระบวนการสร้าง

#### 3.1.1 การสร้างพอร์ซิลิคอนโดยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี (Anodization)

ในการสร้างพอร์ซิลิคอนโดยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับกันเป็นอย่างมากระหว่างมีต้นทุนในการสร้างที่ต่ำและหาวัสดุในการสร้างเซลล์ไฟฟ้าเคมีได้ง่ายซึ่งโดยทั่วไปแล้วเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นได้ทำมาจากเทฟลอน โดยกระบวนการดังกล่าวมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า กระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้สามารถควบคุมปฏิกิริยาในการกัดและตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการกัดได้ง่าย เช่น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการกัด เป็นต้น ซึ่งทำให้เราสามารถควบคุมความหนา และความลึกของชั้นพอร์ซิลิคอนได้ตามต้องการ โดยในงานวิจัยนี้ได้ นำชุดกัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้ง 2 ชนิดมาทำการสร้างพอร์ซิลิคอน ซึ่งได้แก่ เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกัเดี่ยวแนวตั้งและเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกัคู่แนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ก) แบบแท่งกัเดี่ยวแนวตั้ง (ข) แบบแท่งกัคู่แนวนอน



รูปที่ 3.2 ภาพตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าเคมี

- (ก) ชุดกักแบบแท่งเดี่ยว (ข) ชุดกักแบบแท่งคู่ ที่ใช้ในการแอโนดซ์เซชัน  
(ค) แสดงมุมมองด้านบนของชุดกักแท่งเดี่ยว (ง) แสดงมุมมองด้านบนของชุดกักแท่งคู่

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะเห็นได้ว่าเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่นำมาใช้นั้นทั้งสองแบบจากมีความแตกต่างกันโดยที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งเดี่ยวนั้นประกอบไปด้วยซิลิคอนเวเฟอร์โดยมีขั้วแอโนดสัมผัสทางด้านหลังแผ่นซิลิคอนและทางด้านหน้าจะสัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเพียงแค่ด้านหน้าเพียงด้านเดียวโดยขั้วแคโทดจุ่มลงไปในการละลายและมีโอริง (O - ring) ป้องกันการรั่วซึมของการละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่จากภาพจะเห็นได้ว่าซิลิคอนเวเฟอร์จะมีสัมผัสกับสารละลายทั้งสองด้านและมีขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจุ่มลงไปในการละลายทั้งสองด้านโดยซิลิคอนเวเฟอร์จะอยู่ตรงกลางระหว่างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทั้งสองด้านและมีโอริงเป็นส่วนป้องกันการรั่วซึมของสารละลายเช่นกัน โดยเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองแบบซิลิคอนเวเฟอร์ทางด้านขั้วแคโทดจะถูกกัดจนเป็นรูพรุนจนเกิดเป็นโพรัสซิลิคอนเมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านตัวกลางสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

### 3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน

ในการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนเวเฟอร์ก่อนที่จะนำไปสร้างชั้นโพรัสซิลิคอนนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ชนิดพี ที่มีระนาบ (100) และมีสภาพความต้านทานไฟฟ้า 4 – 10 โอห์ม-เซนติเมตร ( $\Omega\text{-cm}$ ) มาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยจำเป็นที่จะต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นอันดับแรกเพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนอยู่ก่อนจะนำเข้าสู่กระบวนการสร้างต่อไป โดยขั้นตอนการทำความสะอาดมีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water)
- ต้มในกรดไนตริก (nitric acid :  $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกเศษ

โลหะหนักที่ผิวหน้าของซิลิคอนเวเฟอร์

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวก

ไขมัน

- ล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (ultrasonic cleaner)

เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 5% เป็นเวลา 20 วินาที เพื่อกำจัดชั้น Native Oxide
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 3.1.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี

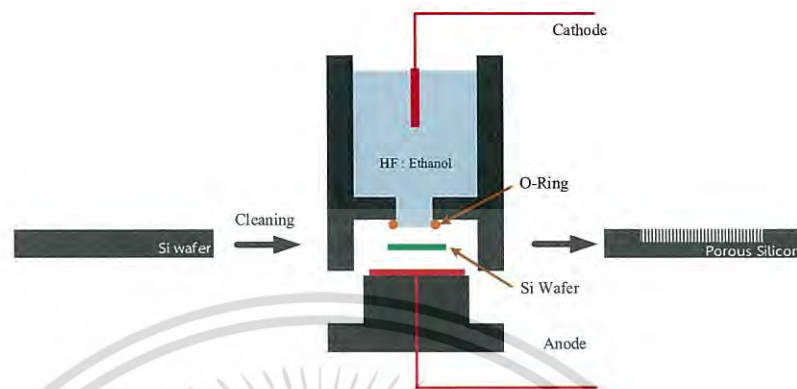
ในส่วนของการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนในงานวิจัยครั้งนี้จะประกอบไปด้วยกระบวนการสร้างที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ การสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งเดี่ยวตั้งโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ , การสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งเดี่ยวตั้งโดยเคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ และการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่ตั้งโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

3.1.3.1 การสร้างพอร์สด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งเดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

ในกระบวนการนี้ทำการสร้างโดยใช้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วนำมาใส่ในชุดกัด จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงในเซลล์ไฟฟ้าเคมีแล้วจุ่มขั้วแคโทดลงไปในด้านที่เติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกแล้วทำการบ่อนกระแสไฟฟ้าและกำหนดเวลาในการแอโนไดซ์เซชันตามเงื่อนไขที่กำหนด จึงเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งเดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ แสดงรูปที่ 3.3

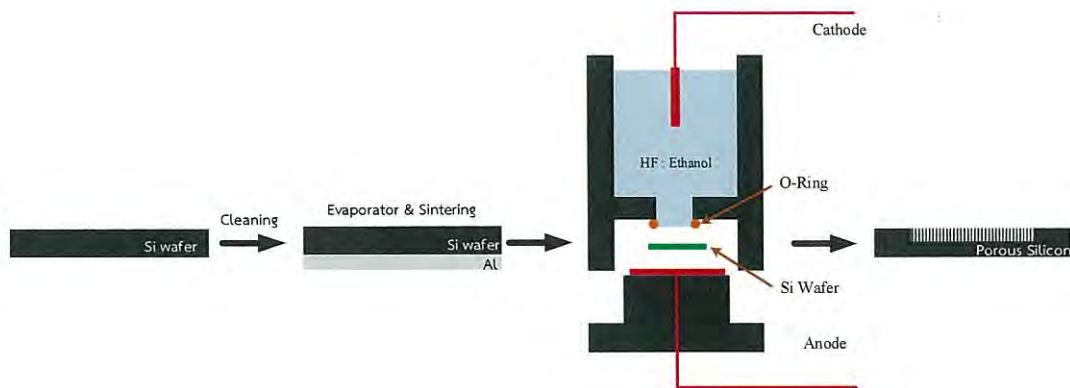


รูปที่ 3.3 การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งเดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์

3.1.3.2 การสร้างพอร์สด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งเดี่ยวแนวตั้งโดยเคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

ในกระบวนการนี้ทำการสร้างโดยใช้แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วเข้าสู่กระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมเข้าไปที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ (Vacuum Evaporator) โดยทำการเคลือบให้ได้ความหนาของชั้นอะลูมิเนียมประมาณ 1 ไมโครเมตร ขั้นตอนต่อไปนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นแล้วไปทำการซินเตอร์ริงเพื่อให้ชั้นอะลูมิเนียมนั้นสัมผัสกับเนื้อของผลึกซิลิคอนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าบนผลึกซิลิคอนได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนแล้วจะทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันยิ่งขึ้น โดยในกระบวนการซินเตอร์ริงจะใช้อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการซินเตอร์ริง 15 นาที จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาใส่ในชุดกัดเพื่อทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงในเซลล์ไฟฟ้าเคมีแล้วทำการจุ่มขั้วไฟฟ้าแคโทดลงไปที่เติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าและกำหนดเวลาตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างพอร์สด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งเดี่ยวตั้งโดยเคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ โดยกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนในขั้นตอนนี้จะแสดงดังรูปที่ 3.4

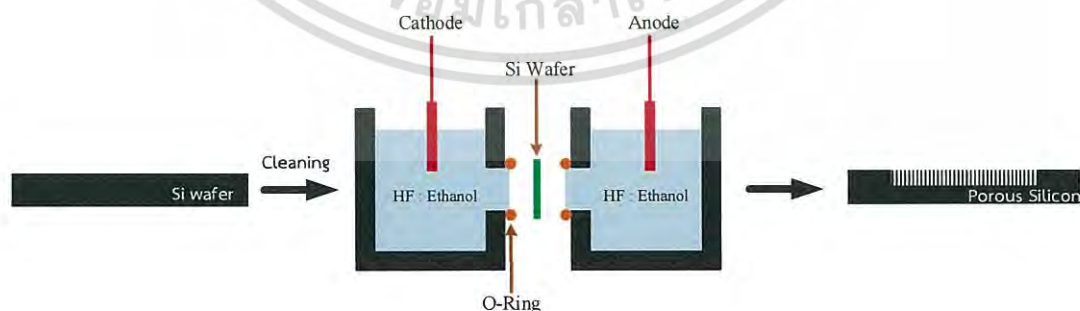
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งกึ่งเดี่ยวแนวตั้งโดยเคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์

3.1.3.3 การสร้างพอร์สด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แนวนอนโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์

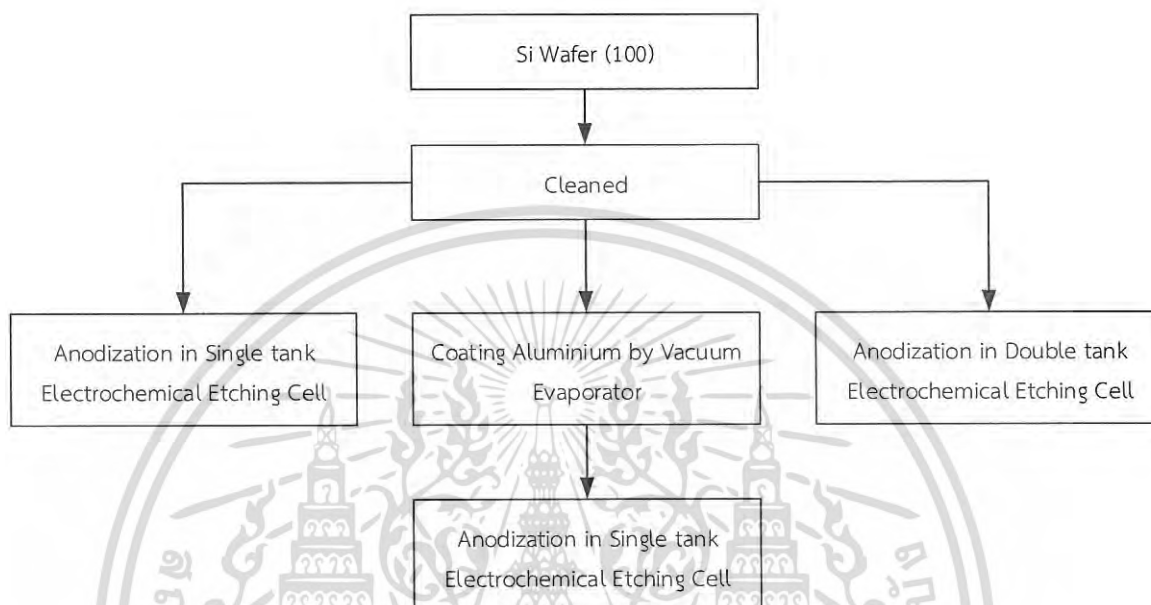
ในกระบวนการนี้จะทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วมาใส่ในชุดกักเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แนวนอนซึ่งซิลิคอนเวเฟอร์จะถูกประกบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองด้านโดยมีแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์อยู่ตรงกลาง จากนั้นทำการเติมสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงไปทั้งด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์ไฟฟ้าเคมี หลังจากนั้นจุ่มขั้วไฟฟ้าแอโนดลงไปที่ด้านหลังของเซลล์ไฟฟ้าเคมี และจุ่มขั้วไฟฟ้าแคโทดลงไปที่ด้านหน้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าและกำหนดเวลาในการแอโนไดซ์เซชันตามเงื่อนไขต่างๆที่ได้กำหนดไว้ โดยกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกักด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แนวนอนนี้จะแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แนวนอนโดยไม่เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนการสร้างทั้ง 3 ขั้นตอนที่ได้ทำการอธิบายไปเมื่อข้างต้นจะได้นำมาสร้างนั้นจะสามารถแสดงออกมาเป็นผังงานเพื่อให้มองเห็นถึงภาพรวมได้ดังรูปที่ 3.6



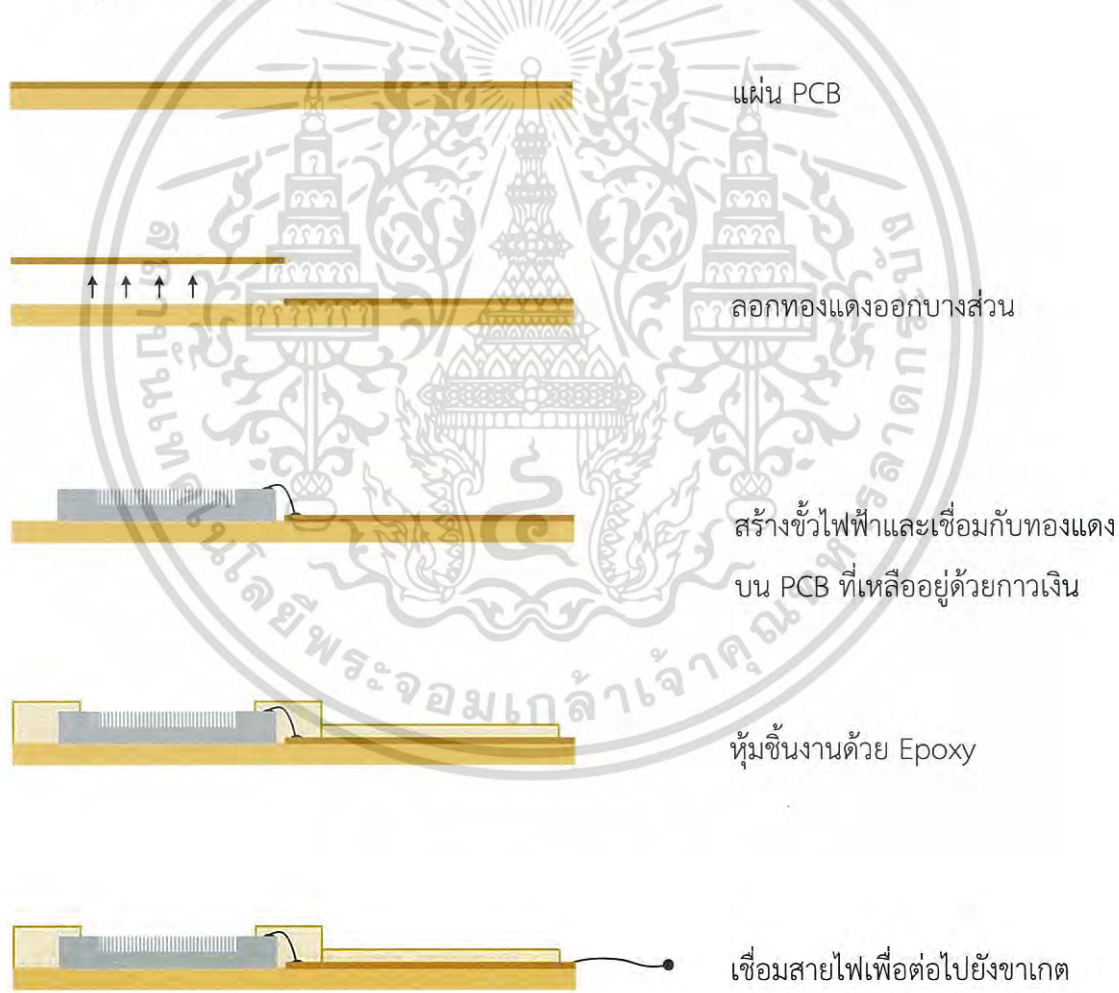
รูปที่ 3.6 แผนผังอธิบายการสร้างชั้นพอลิซิลิคอนทั้ง 3 กระบวนการ

### 3.1.4 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่าง โครงสร้าง EGFET โดยใช้ชั้นพอลิซิลิคอนเป็นเมมเบรน

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างหัววัดความเป็นกรด – ด่าง สำหรับใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรดต่างแบบโครงสร้าง extended – gate filed effect transistor (EGFET) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้นำพอลิซิลิคอนมาใช้เป็นหัววัดดังกล่าว ซึ่งพอลิซิลิคอนที่จะได้ทำการสร้างและนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะมีข้อได้เปรียบคือมีขั้นตอนการสร้างที่ง่าย สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความพรุน ความหนา ของชั้นพอลิซิลิคอนได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้มาร์กหรือกระจกต้นแบบในการสร้างเนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการให้พอลิซิลิคอนที่ได้นั้นเกิดขึ้นแบบสุ่มและเกิดขึ้นทั่วผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ และไม่ต้องพึ่งเครื่องมือราคาแพง อีกทั้งยังมีต้นทุนการสร้างที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการผลิตเมมเบรนแบบอื่นๆ โดยในขั้นตอนการสร้างหัววัดความเป็นกรด – ด่าง ของงานวิจัยนี้จะได้อธิบายได้ตามขั้นตอนดังที่จะได้อธิบายต่อไปนี้

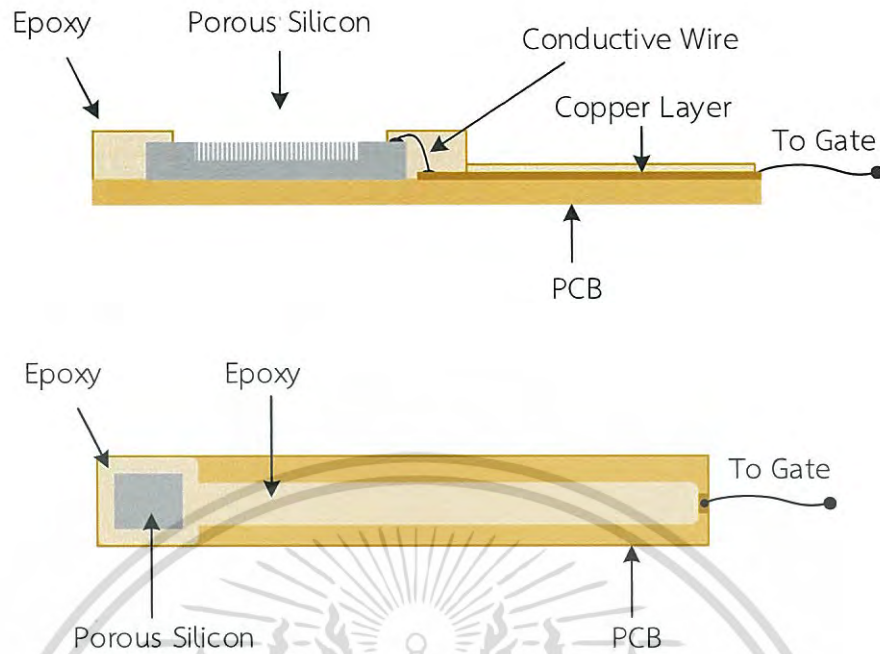
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก). นำพอร์สซิลิคอนที่ผ่านการสร้างด้วยกระบวนการแอนโดซ์เซชันแล้วไปทำความสะอาดด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) เป็นเวลา 5 นาที
- ข). นำพอร์สซิลิคอนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์แล้วไปเผาแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- ค). นำแผ่นปริ้นทองแดง (PCB) มาทำการลอกชั้นทองแดงออกดังในรูปที่ 3.7
- ง). นำพอร์สซิลิคอนที่เผาแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนแล้ววางบนแผ่น PCB ในส่วนที่ทำการลอกชั้นทองแดงออกแล้ว
- จ). ทำขั้วไฟฟ้าบนผิวหน้าซิลิคอนด้วยกาวเงิน (Silver Paste)
- ฉ). ทำการหุ้มชิ้นงานด้วยกาวอีพ็อกซีเพื่อกันกระแสรั่วโดยเหลือไว้เพียงส่วนของพอร์สซิลิคอนเพื่อใช้เป็นส่วนในการตรวจจับความเป็นกรด – ด่าง (Sensing Area)
- ช). เชื่อมสายไฟจากทองแดงเพื่อใช้สำหรับต่อใช้งานไปยังขาเขตของมอสเฟต

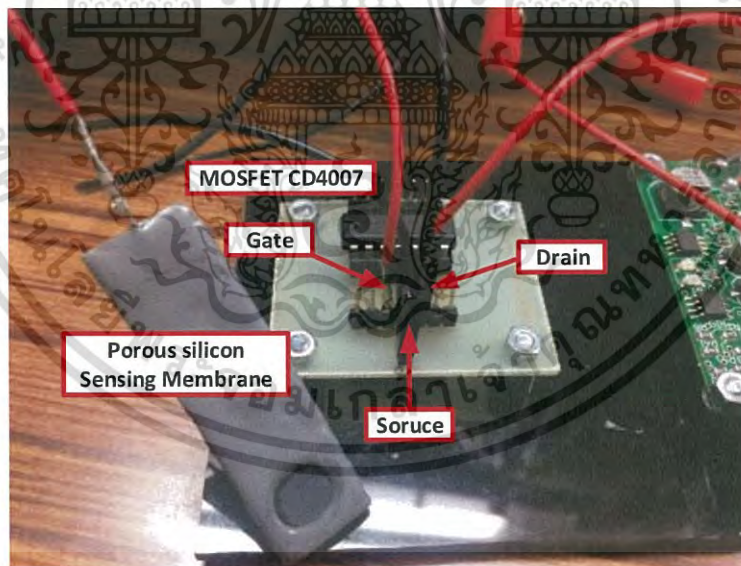


รูปที่ 3.7 กระบวนการสร้างเมมเบรนของอุปกรณ์วัดความเป็นกรด – ด่าง แบบโครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ภาพตัวอย่างเมมเบรนสำหรับอุปกรณ์วัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET มุมมอง ด้านข้างและด้านบน



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างชิ้นงานจริงของอุปกรณ์วัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET

จากรูปจะเห็นได้ว่าการสร้างหัววัดความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้าง EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนนั้นมีขั้นตอนการสร้างที่น้อยขั้นตอนและไม่ยุ่งยาก มีการแพ็คเกจที่ง่าย (Simple Package & Simple Passivation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

### 3.2.1 การวัดหาความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน

ในส่วนของการวัดเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนนั้น จะใช้วิธีการหาจากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุซึ่งความพรุนของพอร์สซิลิคอนนั้นกล่าวได้ว่ามีค่าเท่ากับอัตราของปริมาตรช่องว่างหรืออากาศในชั้นพอร์สซิลิคอนต่อปริมาตรทั้งหมด โดยจะทำการวัดน้ำหนักของผลึกซิลิคอน, วัดน้ำหนักของซิลิคอนเมื่อเกิดรูพรุนเป็นพอร์สซิลิคอน และวัดน้ำหนักของผลึกซิลิคอนหลังจากที่ทำการลอกชั้นพอร์สซิลิคอนออกแล้ว โดยวิธีการวัดชนิดนี้มีชื่อเรียกว่าวิธีการวิเมตริก (Gravimetric methods) จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวัดแทนค่าในสมการที่ 3.1

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความพรุน} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_3)} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่

$m_1$  คือ น้ำหนักของผลึกซิลิคอนก่อนเกิดรูพรุน

$m_2$  คือ น้ำหนักของผลึกซิลิคอนหลังเกิดเป็นรูพรุน (น้ำหนักพอร์สซิลิคอน)

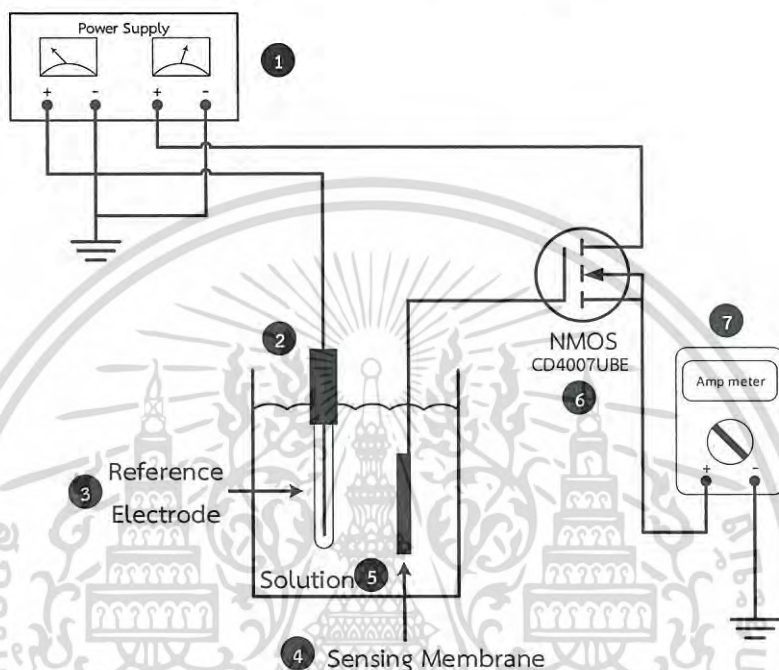
$m_3$  คือ น้ำหนักของผลึกซิลิคอนหลังการลอกชั้นพอร์สซิลิคอนออก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.10 เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้ศึกษาความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอน

ในการศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนจะใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการศึกษาดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET

จากรูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. Power Supply GW รุ่น GPC-30300
2. ปีกเกอร์
3. ขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode)
4. หัววัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอน
5. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 4 , 7 , 10
6. NMOS เบอร์ CD4007UBE Texas Instrument
7. มัลติมิเตอร์

โดยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่สร้างจากพอร์สซิลิคอนนี้จะทำการโดยเริ่มจากเสียบหัววัดที่ได้สร้างขึ้นเข้ากับขาเกตของทอสเฟตแล้วจุ่มลงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่ออื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

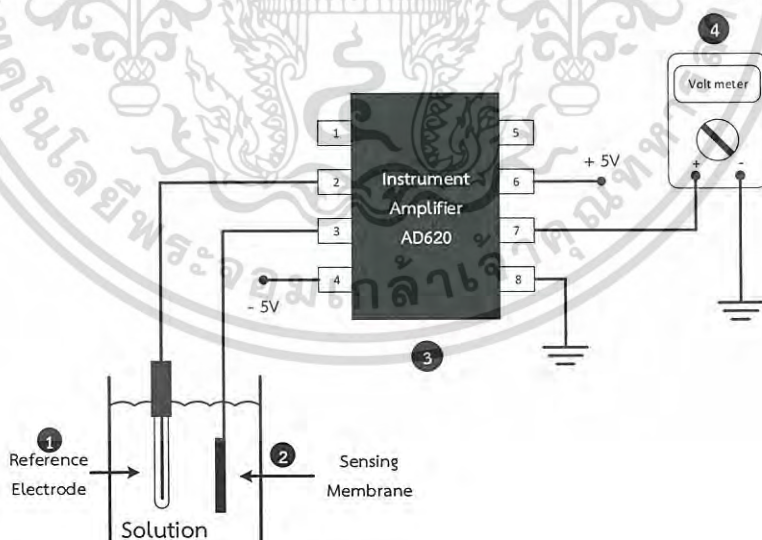
สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่นำมาทดสอบ จากนั้นจุ่มขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงลงในสารละลายบัฟเฟอร์เช่นเดียวกันโดยกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิงกับหัววัดให้มีค่าคงที่ จากนั้นทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรดอ้างอิง ( $V_{Ref}$ ,  $V_G$ ) และจ่ายแรงดันให้เข้ากับเดรน ( $V_{DS}$ ) และขาซอสต่อเข้ากับขั้วบวกของมัลติมิเตอร์และขั้วลบของมัลติมิเตอร์ลงกราวด์แล้วทำการบันทึกค่าต่างๆ ที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์

### 3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Effect)

ในการศึกษาฮิสเทอรีซิสของเมมเบรนนั้นจะใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการศึกษาดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode)
2. พอร์สซิลิคอนเมมเบรน (Porous Silicon Membrane)
3. ไอซี Instrument Amplifier เบอร์ AD620
4. มัลติมิเตอร์

โดยการวัดฮิสเทอรีซิสของเมมเบรนจะทำการต่อวงจรโดยจะทำการต่อขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเข้ากับขา 2 ของไอซีและต่อพอร์สซิลิคอนเข้ากับขา 3 และจ่ายแรงดันไฟฟ้า  $-5$  โวลต์ และ  $+5$  โวลต์ เข้ากับขาที่ 4 และ 7 ของไอซีตามลำดับ จากนั้นทำการวัดแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่ขา 6 แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาฮิสเทอรีซิสของเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง ซึ่งจะได้นำเสนอถึงผลการทดลองเกี่ยวกับการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันในเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง โครงสร้าง EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน

การทดลองทั้งหมดจะทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและใช้สารละลายตัวอย่างในการทดสอบ (Standard pH Buffer) โดยผลการทดลองทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดลองการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดลองในกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ากระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน เพื่อวิเคราะห์ถึงลักษณะพื้นผิวที่มีความเหมาะสมจากการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่าง ๆ เพื่อนำไปสร้างเป็นเมมเบรนในการตรวจจับไฮโดรเจนไอออนในอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง แบบ EGFET ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ผลกระทบของการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ ที่มีต่อชั้นพอร์สซิลิคอน

ในการทดลองนี้จะได้ทำการศึกษาถึงผลของชนิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันที่มีต่อความสม่ำเสมอและความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน โดยชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่นำมาทำการทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

1. เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งแคตโอดเดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์
2. เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งแคตโอดเดี่ยวแนวตั้งโดยเคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์
3. เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งคู่แคตโอดโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์

สารละลายที่ใช้ในกระบวนการจะใช้เป็นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับเอทานอลในอัตราส่วน 4 : 1 ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 10 นาทีและใช้ความหนาแน่นกระแส 10, 15, 20, 25  $\text{mA/cm}^2$  ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความสม่ำเสมอของชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเลตลงบนผิวหน้าของชิ้นงาน สุดท้ายทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ได้จากการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้ง 3 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากผ่านขั้นตอนการกัดด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแล้วจะทำการฉายแสงอัลตราไวโอเลตลงบน ชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ถึงการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนและลักษณะพื้นผิว โดยอาศัยคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนส์ของพอร์สซิลิคอน ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



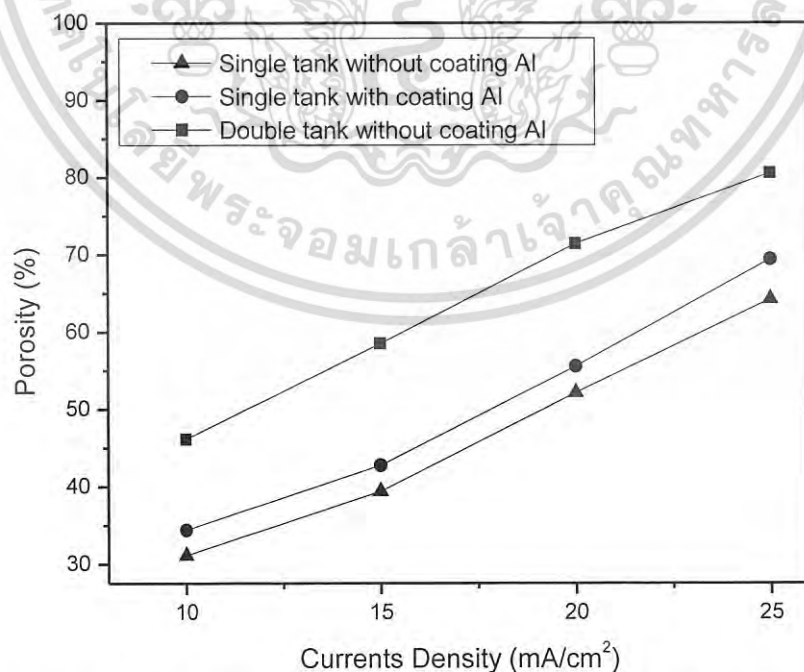
รูปที่ 4.1 ชั้นพอร์สซิลิคอนและการเรืองแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 (ก) ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งเดี่ยวแบบกัดโดยไม่เคลือบอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์จะเห็นได้ว่าการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนนั้นไม่สม่ำเสมอและเกิดขึ้นเยอะที่สุดที่บริเวณขอบของชิ้นงานเท่านั้น ซึ่งสาเหตุจากกระบวนการสร้างดังกล่าวในขั้นตอนการใส่แผ่นซิลิคอนเวเฟอร์จะมีการขันอัดเข้าไปในเซลล์ไฟฟ้าเคมีทำให้บริเวณดังกล่าวนั้นถูกกดทับด้วยโอริงจึงส่งผลให้เกิดความเครียดในวัสดุทำให้บริเวณดังกล่าวที่ถูกกดทับมีลักษณะการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้จุดนั้นมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเยอะที่สุดและไม่เกิดการกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์และทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้เกิดความไม่สม่ำเสมอ ในรูปที่ 4.1 (ข) ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งเดี่ยวแบบกัดโดยเคลือบอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์จากรูปจะเห็นได้ว่าชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีนี้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์ช่วยทำให้กระแสไฟฟ้านั้นกระจายตัวได้ทั่วแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ แต่การเกิดเป็นชั้นพอร์สซิลิคอนที่มากที่สุดยังคงเป็นบริเวณที่โอริงกดทับเช่นเดิม ในรูปที่ 4.1 (ค) เป็นชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่แวนอนกัดโดยไม่เคลือบอลูมิเนียมด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์สังเกตได้ว่าชั้นพอร์สซิลิคอนนั้นมีความสม่ำเสมอและมีความเป็นเนื้อเดียวกันทั่วบริเวณเนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้จะไม่มีการขันอัดซิลิคอนเวเฟอร์เข้าไปในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะทำให้ลดการเกิดความเครียดของวัสดุบริเวณที่โอริงกดทับได้อีกประการหนึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดนี้ซิลิคอนเวเฟอร์นั้นจะสัมผัสกับสารละลายทั้งสองด้านจึงทำให้เกิดการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าได้ทั่วแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนเวเฟอร์ทำให้ชั้นพอร์ซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการนี้มีความสม่ำเสมอและมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนด้วยอีกสองวิธีการที่กล่าวมาในข้างต้น จากนั้นจะทำการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ โดยทำการวัดด้วยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่วัดได้จะแสดงดังตารางที่ 4.1 และแสดงโดยกราฟในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน

ชนิดเซลล์ไฟฟ้าเคมี	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm <sup>2</sup> ) เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที			
	10 mA/cm <sup>2</sup>	15 mA/cm <sup>2</sup>	20 mA/cm <sup>2</sup>	25 mA/cm <sup>2</sup>
เซลล์ไฟฟ้าเคมีแท่งค้โดยไม่เคลือบชั้น อลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์	31.1 %	39.42 %	52.15 %	64.22 %
เซลล์ไฟฟ้าเคมีแท่งค้เดี่ยวโดยเคลือบชั้น อลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์	34.4 %	42.77 %	55.55 %	69.42 %
เซลล์ไฟฟ้าเคมีแท่งค้คู่โดยไม่เคลือบชั้น อลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์	46.15 %	58.53 %	71.42 %	80.55 %



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการสร้างต่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 และกราฟในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่โดยไม่เคลือบอลูมิเนียมหลังซิลิคอนเวเฟอร์นั้นมีความพรุนที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่เดี่ยวแนวตั้งโดยเคลือบอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์และสร้างแท่งคู่เดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์ ภายใต้เงื่อนไขความหนาแน่นกระแสและเวลาในการแอโนไดซ์เซชันเดียวกัน

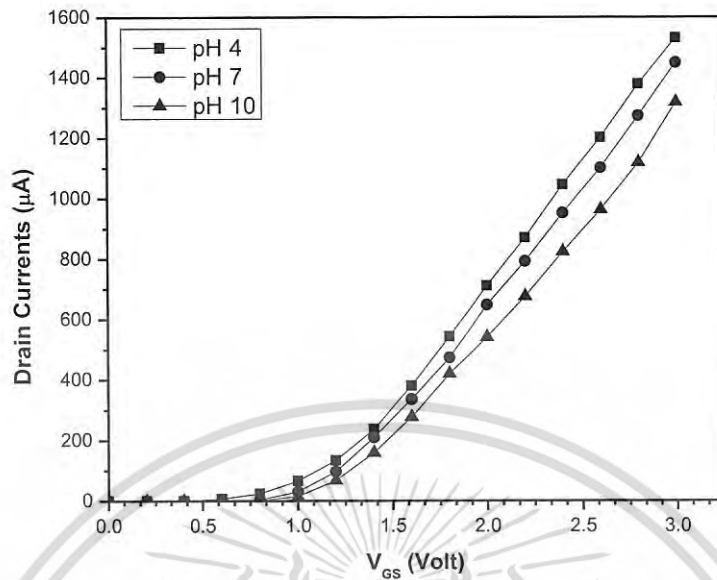
จากผลการทดลองผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่คู่มีความสม่ำเสมอของชั้นพอร์สซิลิคอน มีความเป็นเนื้อเดียวและมีความพรุนสูงที่สุด โดยที่ผลลัพธ์ได้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นเมมเบรนของอุปกรณ์ EGFET ซึ่งต้องการวัสดุที่มีความพรุนในการดักจับไฮโดรเจนไอออนเข้ามาทำปฏิกิริยา ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้ชุดกัดไฟฟ้าเคมีแท่งคู่แนวอนกัดโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์เป็นวิธีการหลักในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน

#### 4.2 ผลการทดลองผลของชั้นพอร์สซิลิคอนในอุปกรณ์อีจีเฟต

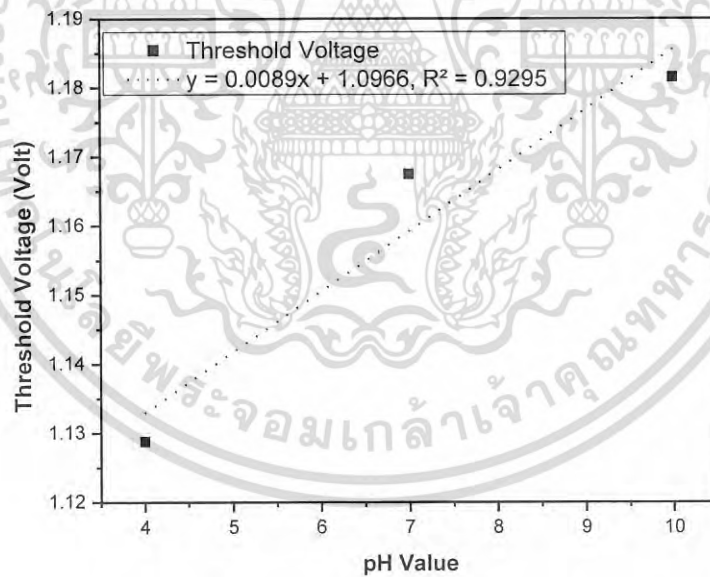
ในการทดลองนี้จะได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อีจีเฟต 2 แบบด้วยกัน ได้แก่ อุปกรณ์อีจีเฟตที่มีซิลิคอนผิวเรียบเป็นเมมเบรนและอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน โดยจะพิจารณาถึงแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีเมมเบรนต่างกันและทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ด่าง ที่แตกต่างกัน โดยที่พอร์สซิลิคอนที่นำมาทดสอบในการทดลองนี้จะใช้พอร์สซิลิคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 46.15% เนื่องจากเป็นความพรุนค่าต่ำสุดที่สร้างได้จากการทดลอง โดยในการทดลองจะทำการทดสอบภายใต้สารละลายตัวอย่างที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ตามลำดับ ที่แรงดันเดรนมีค่าเท่ากับ 0.3 โวลต์ และปรับเปลี่ยนค่าแรงดัน  $V_{Ref}$  จาก 0 ถึง 3 โวลต์ แล้วทำการวัดค่ากระแสเดรนที่ได้ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของกระแสเดรนนั้นมีค่าแตกต่างกันออกไป แสดงดังรูปที่ 4.3 และเมื่อพิจารณาในส่วนของค่าแรงดันขีดเริ่มพบว่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีซิลิคอนผิวเรียบเป็นเมมเบรนนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปซึ่งมีค่า 1.128, 1.167 และ 1.181 โวลต์ ที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ในสารละลายตัวอย่างที่มีปริมาณแตกต่างกันออกไป กล่าวคือในสารละลายตัวอย่างที่มีค่า pH 4 (สภาพเป็นกรด) นั้นจะมีปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายตัวอย่างที่มีค่า pH 7 และสารละลายตัวอย่างที่มีค่า pH 10 ตามลำดับ และเมื่อนำค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด - ด่าง แล้วทำการหาค่าความไวในการตอบสนองด้วยสมการเส้นตรงจะมีค่าเท่ากับ 8.9 mV/pH ตามสมการเส้นตรง

$$y = 0.0089X + 1.0966$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



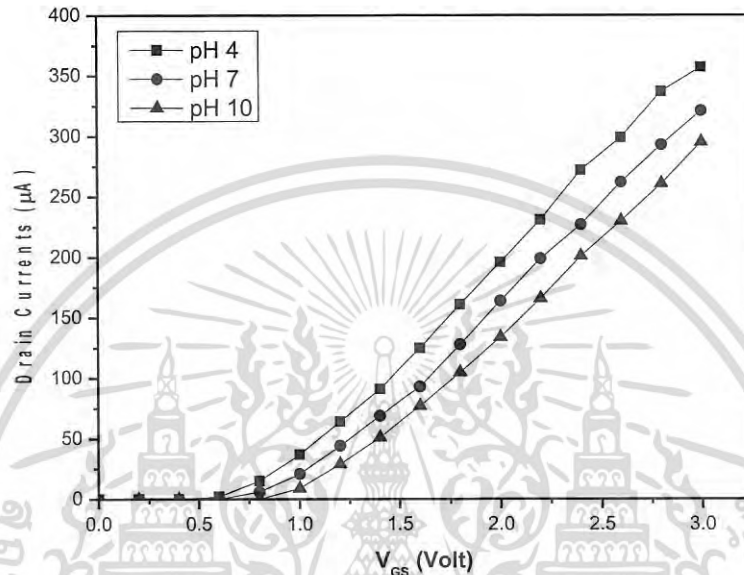
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต ของ EGFET ที่มีซิลิคอนนาทิวเรียงเป็นเมมเบรน



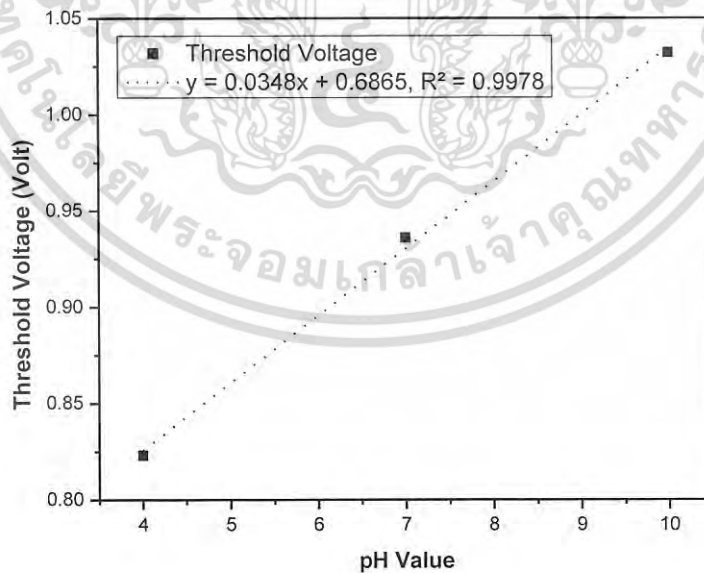
รูปที่ 4.4 แรงดันขีดเริ่มของ EGFET ที่มีซิลิคอนนาทิวเรียงเป็นเมมเบรนภายใต้ค่าพีเอชที่ต่างกัน

ในส่วนของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรนนั้นจะทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีซิลิคอนนาทิวเรียงเป็นเมมเบรน จากนั้นทำการวัดค่ากระแสเดรนที่ได้แล้วพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4.5 และเมื่อเราทำการพิจารณาถึงค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรนนั้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัดเจนขึ้นโดยแรงดันขีดเริ่มที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.823, 0.936 และ 1.032 โวลท์ ที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ตามลำดับ แสดงดังกราฟในรูปที่ 4.6 และเมื่อนำค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ที่ได้มาพล็อตกราฟ แสดงความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด - ด่าง แล้วทำการหาค่าความไวในการตอบสนองด้วยสมการเส้นตรงจะมีค่าเท่ากับ 34.8 mV/pH ตามสมการเส้นตรง  $y = 0.0348x + 0.6865$



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์กระแสเดรนและแรงดันเกตของ EGFET ที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรน



รูปที่ 4.6 แรงดันขีดเริ่มของ EGFET ที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรนภายใต้ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 และ 4.6 เมื่อทำการพิจารณาถึงค่าความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์อีจีเฟตทั้งสองแบบแล้วนั้นพบว่าอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีซิลิคอนผิวเรียบเป็นเมมเบรนนั้นมีค่าความไวในการตอบสนองมีค่า 8.8 mV/pH และในส่วนของอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรนมีค่าความไวในการตอบสนองมีค่า 34.8 mV/pH จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนเมมเบรนจากซิลิคอนผิวเรียบเป็นพอร์ซิลิคอนนั้น ส่งผลให้ค่าความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนและพื้นที่ของพอร์ซิลิคอน เมื่อถูกนำมาใช้เป็นเมมเบรนจึงทำให้สามารถดูดซับเอาสารละลายไวโนโครงสร้างที่เป็นรูพรุนได้มากขึ้นและมีการเหนี่ยวนำพาหะที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอร์ซิลิคอนสามารถนำไปใช้เป็นเมมเบรนของอุปกรณ์อีจีเฟตได้ ดังนั้นจึงจะมีการศึกษาถึงผลกระทบของความพรุนที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อีจีเฟตในหัวข้อต่อไป

#### 4.3 การศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อีจีเฟต

ในการศึกษาผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อีจีเฟตนั้นจะทำการทดสอบโดยการใช้ชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีค่าความพรุนที่แตกต่างกันโดยมีค่าความพรุน 46.15 %, 58.53 %, 71.42 % และ 80.55 % ตามลำดับ โดยชั้นพอร์ซิลิคอนจะทำการสร้างด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันในเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคั่ว จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองจะได้อธิบายเป็นหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

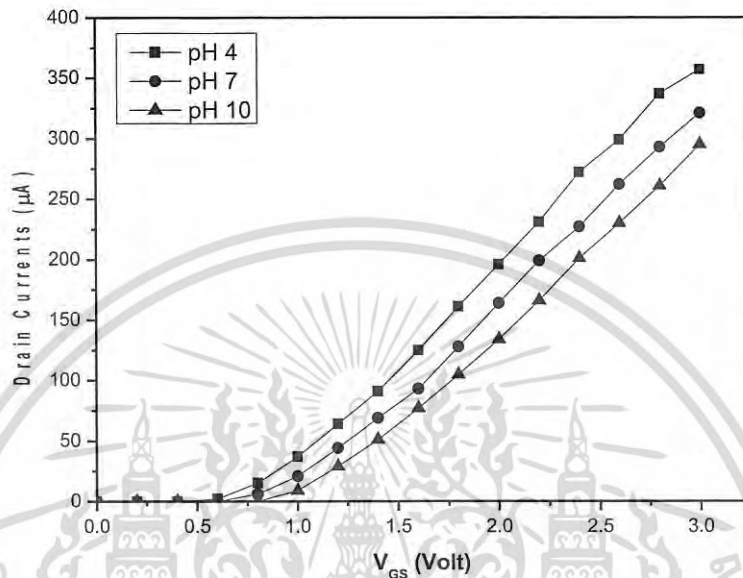
##### 4.3.1 ผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนต่อแรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟต (EGFET Threshold Voltage)

ในการทดลองนี้จะได้กล่าวถึงผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่ม (EGFET Threshold Voltage) ของอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรน จะทำการทดสอบโดยใช้พอร์ซิลิคอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนจำนวน 4 ความพรุน ซึ่งมีค่าความพรุน 46.15%, 58.%, 71.42% และ 80.55% ตามลำดับ ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ด่างที่ต่างกัน ซึ่งจะใช้สารละลายบัฟเฟอร์ตัวอย่างที่มีค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดลักษณะสมบัติของกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) ต่อแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) เพื่อพิจารณาถึงค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ โดยจะทำการปรับค่าแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ตั้งแต่ 0 - 3 โวลต์ และกำหนดให้แรงดันเดรนมีค่าคงที่เท่ากับ 0.3 โวลต์

ผลการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์ซิลิคอนที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์

ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างที่มีพอร์ซิลิคอนเป็นเมมเบรน โดยชั้นพอร์ซิลิคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พูน 46.15 % กราฟลักษณะสมบัติของกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) ต่อแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ที่ทำการทดสอบในสารละลายบัฟเฟอร์ตัวอย่างค่า pH 4, pH 7 และ pH 10 โดยกำหนดให้แรงดันเดรนคงที่เท่ากับ 0.3 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.7



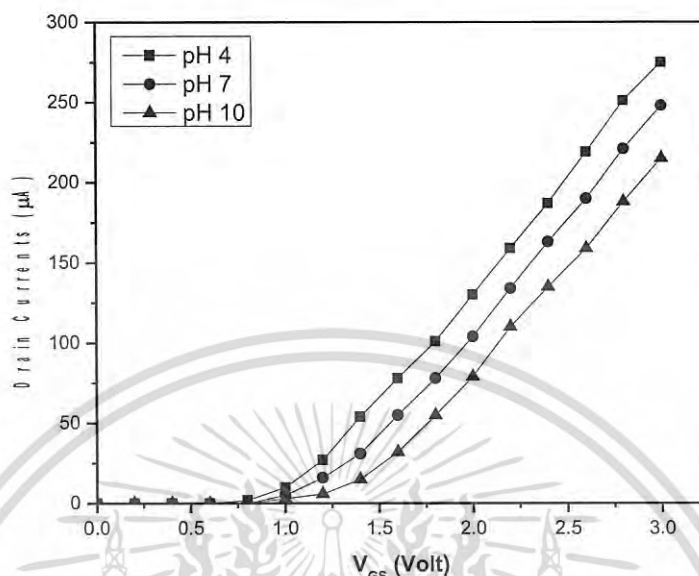
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน ความพูน 46.15% เป็นเมมเบรน

จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณากราฟลักษณะสมบัติ  $I_{DS} - V_{GS}$  จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเป็นกรด - ด่าง โดยแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพูน 46.15% เป็นเมมเบรน พบว่าที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 4 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 0.832 โวลต์ ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 7 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 0.936 โวลต์ และที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 10 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.032 โวลต์ ในส่วนของค่ากระแสเดรนที่ทำการวัดได้นั้นเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าค่าของกระแสเดรนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับแรงดันเกตและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าพีเอชด้วยเช่นกัน ซึ่งพบว่าที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 4 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 357  $\mu A$  ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 7 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 321  $\mu A$  และที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 10 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 295  $\mu A$  เมื่อพิจารณาที่แรงดันเกต  $V_{GS}$  มีค่าเท่ากับ 3 โวลต์

ผลการทดลองผลกระทบของความพูนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน โดยชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่า

เปอร์เซ็นต์ความพูน 58.53 % กราฟลักษณะสมบัติของกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) ต่อแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ที่ทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบในสารละลายบัฟเฟอร์ตัวอย่างค่า pH 4, pH 7 และ pH 10 โดยกำหนดให้แรงดันเดรนคงที่ 0.3 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.8

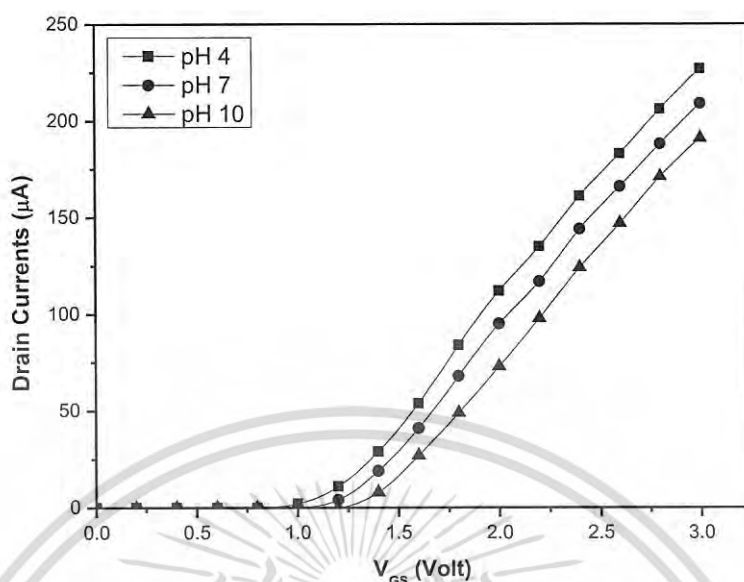


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน ความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรน

จากรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณารูปลักษณะสมบัติ  $I_{DS} - V_{GS}$  จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเป็นกรด - ด่าง โดยแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรน พบว่าที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 4 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.040 โวลต์ ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 7 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.165 โวลต์ และที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 10 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.282 โวลต์ ในส่วนของค่ากระแสเดรนที่ทำการวัดได้นั้นเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าค่าของกระแสเดรนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับแรงดันเกตและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าพีเอชด้วยเช่นกัน ซึ่งพบว่าที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 4 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 275  $\mu A$  ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 7 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 248  $\mu A$  และที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 10 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 215  $\mu A$  เมื่อพิจารณาที่แรงดันเกต  $V_{GS}$  มีค่าเท่ากับ 3 โวลต์

ผลการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน โดยชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 71.42% กราฟลักษณะสมบัติของกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) ต่อแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ที่ทำการทดสอบในสารละลายบัฟเฟอร์ตัวอย่างค่า pH 4, pH 7 และ pH 10 โดยกำหนดให้แรงดันเดรนคงที่ 0.3 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

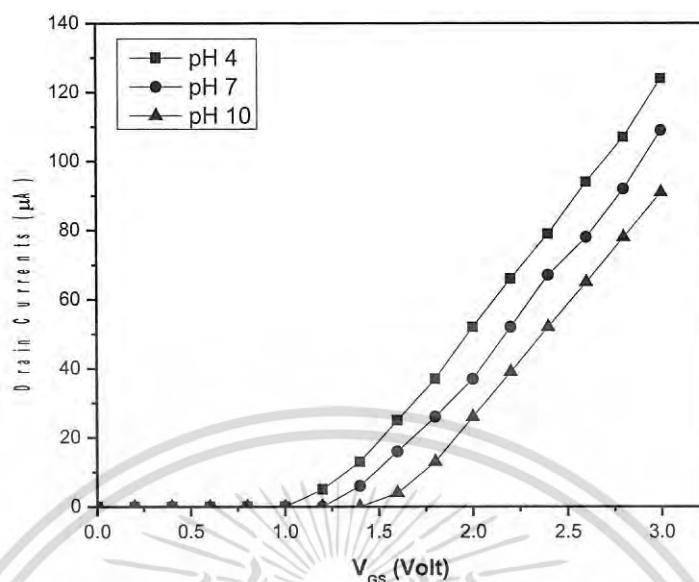


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน ความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรน

จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณารูปลักษณะสมบัติ  $I_{DS} - V_{GS}$  จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเป็นกรด - ด่าง โดยแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนที่ความพรุน 71.42% พบว่าที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 4 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.089 โวลต์ ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 7 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.213 โวลต์ และที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 10 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.361 โวลต์ ในส่วนของค่ากระแสเดรนที่ทำการวัดได้นั้นเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าค่าของกระแสเดรนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับแรงดันเกตและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าพีเอชด้วยเช่นกัน ซึ่งพบว่าที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 4 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 227  $\mu A$  ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 7 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 209  $\mu A$  และที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 10 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 191  $\mu A$  เมื่อพิจารณาที่แรงดันเกต  $V_{GS}$  มีค่าเท่ากับ 3 โวลต์

ผลการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน โดยชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 80.55% กราฟลักษณะสมบัติของกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) ต่อแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ที่ทำการทดสอบในสารละลายบัฟเฟอร์ตัวอย่างค่า pH 4, pH 7 และ pH 10 โดยกำหนดให้แรงดันเดรนคงที่ 0.3 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของ EGFET ที่มีพอร์สซิลิคอน ความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรน

จากรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณากราฟลักษณะสมบัติ  $I_{DS} - V_{GS}$  จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตโนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความเป็นกรด - ด่าง โดยแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนที่ความพรุน 80.55% พบว่าที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 4 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.2 โวลต์ ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 7 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.371 โวลต์ และ ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 10 แรงดันขีดเริ่มมีค่าเท่ากับ 1.521 โวลต์ ในส่วนของค่ากระแสเดรนที่ทำการวัดได้นั้นเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าค่าของกระแสเดรนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับแรงดันเกตและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าพีเอชด้วยเช่นกัน ซึ่งพบว่าที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 4 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 124  $\mu A$  ที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 7 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 109  $\mu A$  และที่สารละลายบัฟเฟอร์ค่า pH 10 กระแสเดรนสูงสุดมีค่าประมาณ 91  $\mu A$  เมื่อพิจารณาที่แรงดันเกต  $V_{GS}$  มีค่าเท่ากับ 3 โวลต์

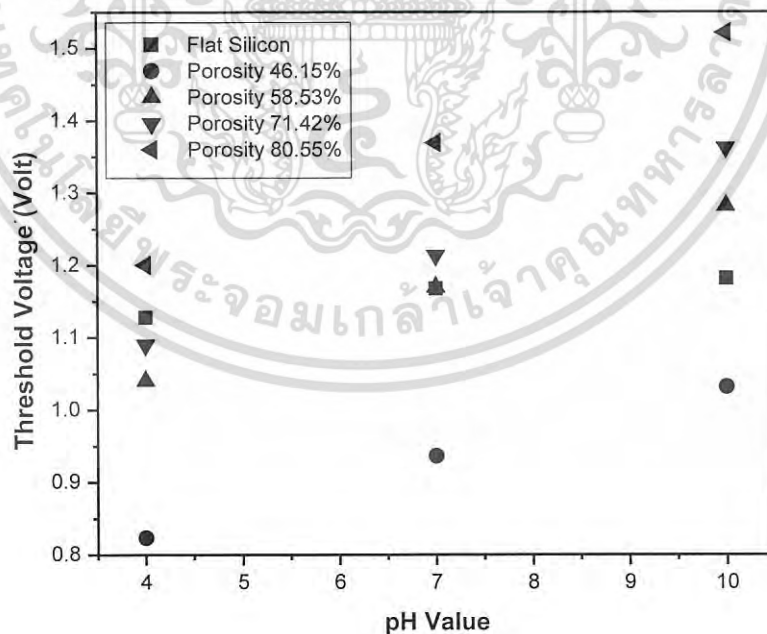
เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์กระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเกต ( $V_{GS}$ ) ของอีจีเฟตแล้วจะเห็นได้ว่าแรงดันขีดเริ่มนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทดสอบในสารละลายที่มีสภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่มีอยู่ในสารละลายนั้นมีปริมาณไม่เท่ากัน เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณความเป็นกรด - ด่าง กล่าวคือที่สารละลาย pH 4 นั้นจะมีปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่มากกว่า pH 7 และ pH 10 ตามลำดับ และเมื่อเมมเบรนถูกจุ่มลงในสารละลายด้วยปริมาณของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนอออนซึ่งมีประจุเป็นบวกที่มีปริมาณแตกต่างกันจะทำผิวหน้าของเมมเบรนมีศักย์เปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเพตนั้นมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยความสัมพันธ์ของแรงดันขีดเริ่มที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกันของอุปกรณ์อีจีเพตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันขีดเริ่มที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกันของอุปกรณ์อีจีเพตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรน

pH Value	เปอร์เซ็นต์ความพรุน				
	Flat Silicon	46.15%	58.53%	71.42%	80.55%
4	1.128 V	0.823 V	1.040 V	1.089 V	1.2 V
7	1.167 V	0.936 V	1.165 V	1.213 V	1.371 V
10	1.181 V	1.032 V	1.282 V	1.361 V	1.521 V

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ในรูปแบบของกราฟซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



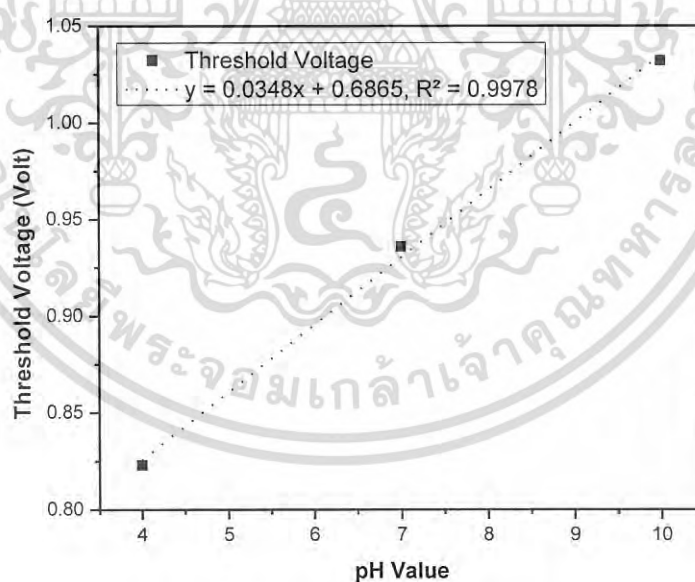
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเพตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด – ต่าง ทางแรงดันของอีจีเฟต (Voltage Sensitivity)

ในการทดลองนี้จะได้กล่าวถึงการทดสอบการตอบสนองต่อความเป็นกรด – ต่าง ทางแรงดัน (Voltage Sensitivity) ของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ต่าง แบบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน โดยทำการจะทำการทดสอบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนทั้งหมด 4 ความพรุน ซึ่งมีค่าความพรุน 46.15 %, 58.53 %, 71.42 % และ 80.55 % ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการหาค่าของการตอบสนองต่อความเป็นกรด – ต่าง ทางแรงดันโดยทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตต่อค่าพีเอชค่าต่างๆ ผลการทดลองอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ผลการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด – ต่าง ทางแรงดันของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ต่างแบบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 46.15 % เป็นเมมเบรน โดยในการทดลองจะนำเอาค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเฟตที่ได้ทำการทดลองไว้ในกราฟที่ 4.3.1 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับค่าพีเอชค่าต่างๆที่ได้ทำการทดลองและทำการหาค่าการตอบสนองของต่อความเป็นกรด – ต่าง ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.12

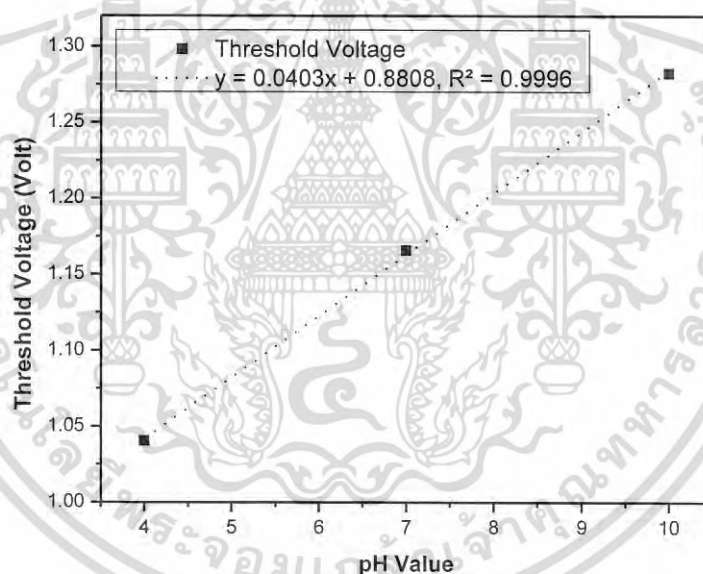


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 46.15% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 46.15 % เป็นเมมเบรนที่ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด – ต่างที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกัน จากการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ที่ pH 4 มีค่าเท่ากับ 0.823 โวลต์ ที่ค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ 0.936 โวลต์และที่ค่า pH 10 มีค่าเท่ากับ 1.032 โวลต์ โดยในรูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ด่าง ซึ่งจะมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ  $y = 0.0348x + 0.6865$  มีความเป็นเชิงเส้น 99.78 % และมีความไวในการตอบสนองเท่ากับ 34.8 mV/pH

ผลการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่มีต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่าง ทางแรงดันของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบอีจีเพดที่มีพอร์ซซิลิคอนความพรุน 58.53 % เป็นเมมเบรน โดยในการทดลองจะนำเอาค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเพดที่ได้ทำการทดลองไว้ในกรทดลองที่ 4.3.1 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับค่าพีเอชค่าต่างๆที่ได้ทำการทดลองและทำการหาค่าการตอบสนองของต่อความเป็นกรด - ด่าง ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.13

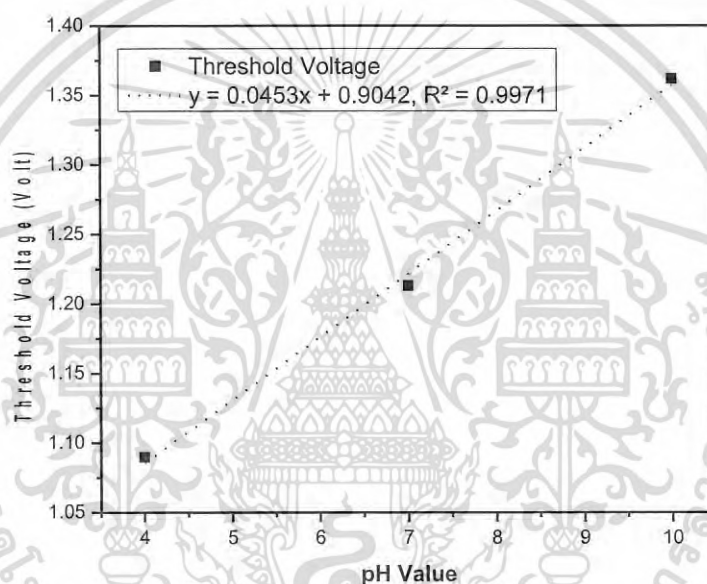


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเพดที่มีพอร์ซซิลิคอนความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและค่าพีเอชของอีจีเพดที่มีพอร์ซซิลิคอนความพรุน 58.53 % เป็นเมมเบรนที่ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ที่ pH 4 มีค่าเท่ากับ 1.040 โวลต์ ที่ค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ 1.165 โวลต์และที่ค่า pH 10 มีค่าเท่ากับ 1.282 โวลต์ โดยในรูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ด่างมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ  $y =$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$0.0403x + 0.8808$  มีความเป็นเชิงเส้น 99.96 % และมีความไวในการตอบสนองเท่ากับ 40.3 mV/pH

ผลการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์ซซิไลคอนที่มีต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ต่าง ทางแรงดันของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ต่างแบบอีจีเพดที่มีพอร์ซซิไลคอนความพรุน 71.42 % เป็นเมมเบรน โดยในการทดลองจะนำเอาค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีเพดที่ได้ทำการทดลองไว้ในกราฟที่ 4.3.1 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับค่าพีเอชค่าต่างๆที่ได้ทำการทดลองและทำการหาค่าการตอบสนองของต่อความเป็นกรด - ต่าง ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.14

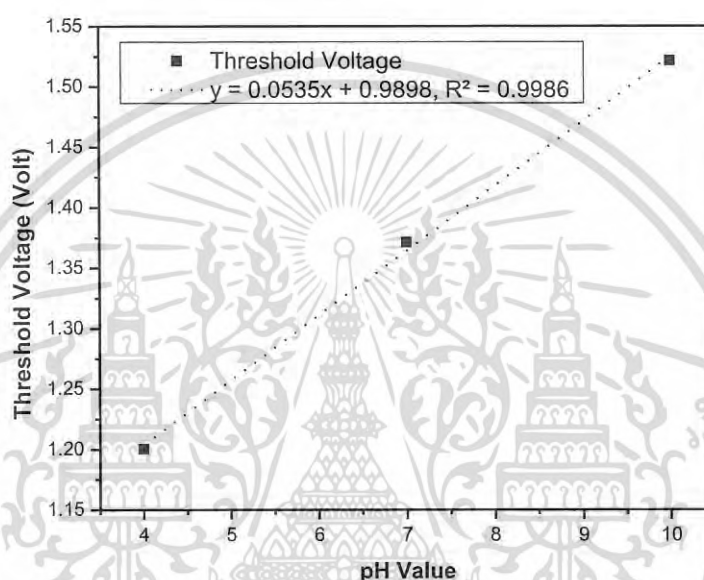


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีเพดที่มีพอร์ซซิไลคอนความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและค่าพีเอชของอีจีเพดที่มีพอร์ซซิไลคอนความพรุน 71.42 % เป็นเมมเบรนที่ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ต่างที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ที่ pH 4 มีค่าเท่ากับ 1.089 โวลต์ ที่ค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ 1.213 โวลต์และที่ค่า pH 10 มีค่าเท่ากับ 1.361 โวลต์ โดยในรูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ต่าง จะเห็นได้ว่าการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ  $y = 0.0453x + 0.9042$  มีความเป็นเชิงเส้น 99.71 % และมีความไวในการตอบสนองเท่ากับ 45.3 mV/pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ต่าง ทางแรงดันของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ต่างแบบอีจีพีเอที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรน โดยในการทดลองจะนำเอาค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์อีจีพีเอที่ได้ทำการทดลองไว้ในการทดลองที่ 4.3.1 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับค่าพีเอชค่าต่างๆที่ได้ทำการทดลองและทำการหาค่าการตอบสนองของต่อความเป็นกรด - ต่าง ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์แรงดันขีดเริ่มของอีจีพีเอที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

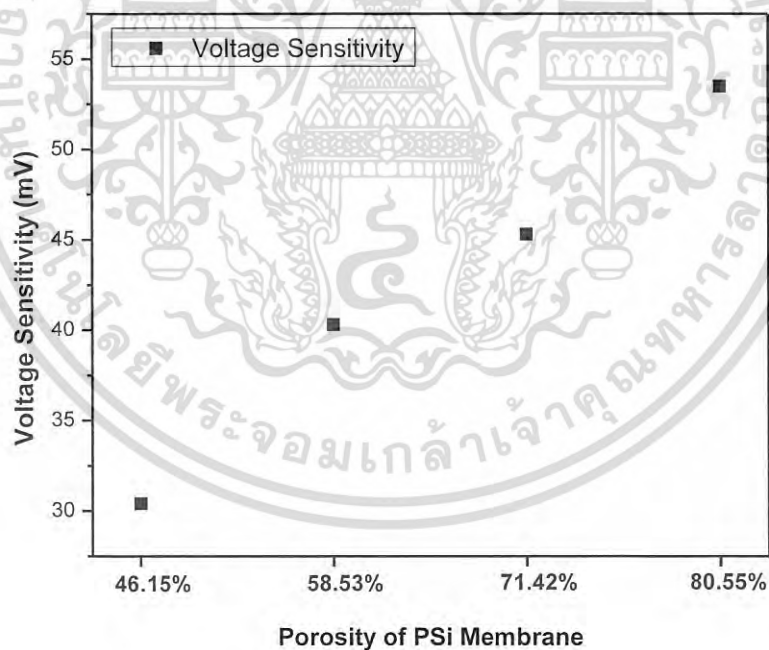
จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขีดเริ่มและค่าพีเอชของอีจีพีเอที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55 % เป็นเมมเบรนที่ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ต่างที่แตกต่างกัน จากการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ที่ pH 4 มีค่าเท่ากับ 1.2 โวลต์ ที่ค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ 1.371 โวลต์ และที่ค่า pH 10 มีค่าเท่ากับ 1.521 โวลต์ โดยในรูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ต่าง และมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ  $y = 0.0535x + 0.9898$  มีความเป็นเชิงเส้น 99.86 % และมีความไวในการตอบสนองเท่ากับ 40.3 mV/pH

จะเห็นได้ว่าเมื่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่นำมาใช้เป็นเมมเบรนนั้นมีความพรุนเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ความไวในการตอบสนองทางแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องด้วยเมื่อความพรุนที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้มีพื้นที่ในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายที่มากขึ้นและมีพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้นจึงสามารถจับกับไอออนนี้เป็นไอออนที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนไอออนได้มากยิ่งขึ้นจึงส่งผลให้ความไวในการตอบสนองทางแรงดันนั้นมามีค่าที่เพิ่มขึ้นและในทางกลับกันกระแสเดรนท์ได้นั้นจะมีค่าที่ลดลงเนื่องด้วยเมื่อความพรุนของพอร์สซิลิคอนมากขึ้นทำให้มีความต้านทานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองในหัวข้อนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.3 ความไวในการตอบสนองทางแรงดันของอุปกรณ์ไอจีเฟดที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรน

ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน	ความไวในการตอบสนองทางแรงดัน
46.15%	30.4 mV/pH
58.53%	40.3 mV/pH
71.42%	45.3 mV/pH
80.55%	53.5 mV/pH



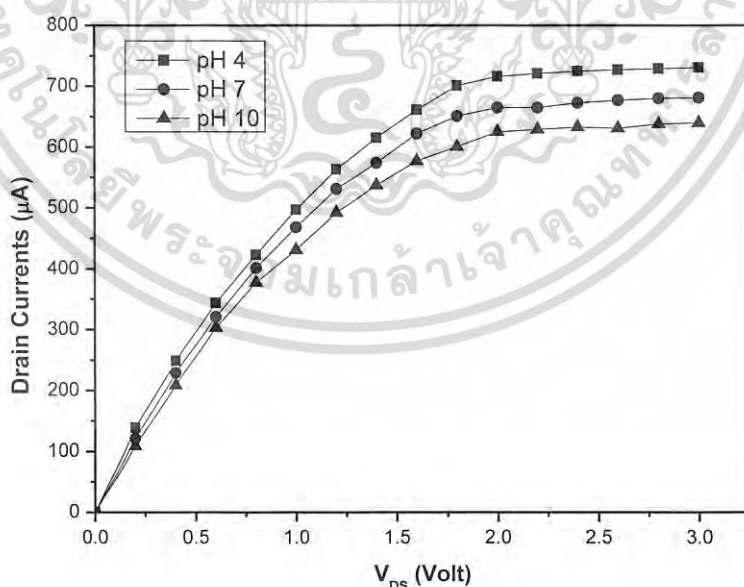
รูปที่ 4.16 ความไวในการตอบสนองทางแรงดันของไอจีเฟดที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อลักษณะกระแสแรงดันของอีจีเฟต (I-V Characteristics)

ในการทดลองนี้จะได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อลักษณะกระแส - แรงดัน (I-V Characteristics) ของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน โดยทำการจะทำการทดสอบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนทั้งหมด 4 ความพรุน ซึ่งมีค่าความพรุน 46.15 %, 58.53 %, 71.42 % และ 80.55 % ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการวัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ภายใต้ความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกันในสารละลายที่มีค่า pH 4, 7 และ 10 ตามลำดับ โดยกำหนดให้แรงดันเกตคงที่  $V_{GS} = 3$  โวลต์ และทำการปรับแรงดันเดรน  $V_{DS}$  ตั้งแต่ 0 -3 โวลต์ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสเดรนและพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเดรน ( $V_{DS}$ ) เพื่อพิจารณาถึงลักษณะกระแสแรงดันในย่านอิ่มตัว โดยผลการทดลองอธิบายได้ดังต่อไปนี้

อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 45.16% เป็นเมมเบรน ที่ทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสเดรนต่อแรงดันเดรน โดยกำหนดให้แรงเกต ( $V_{GS}$ ) คงที่เท่ากับ 3 โวลต์ เพื่อที่จะพิจารณาถึงลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันของอุปกรณ์ ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) โดยที่ลักษณะกระแส - แรงดันของอุปกรณ์อีจีเฟตจะแสดงดังรูปที่ 4.17

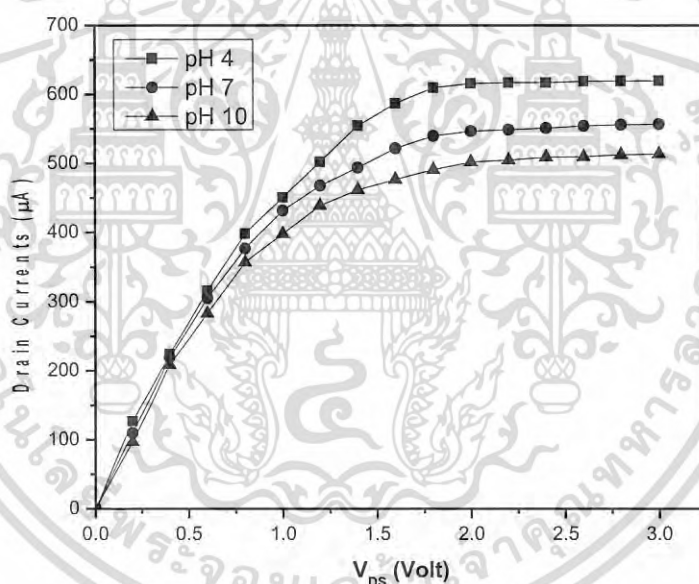


รูปที่ 4.17 ลักษณะกระแส-แรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 46.15% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเดรน ( $V_{DS}$ ) จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนอิมิต์วั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายเมื่อทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน โดยค่ากระแสเดรนอิมิต์วที่ทำทดสอบในสารละลายที่ค่า pH 4 มีค่า 731  $\mu\text{A}$  และที่สารละลายค่า pH 7 กระแสเดรนอิมิต์วมีค่า 681  $\mu\text{A}$  และที่สารละลายค่า pH 10 กระแสเดรนอิมิต์วมีค่า 640  $\mu\text{A}$  ที่แรงดันเกต  $V_{GS}$  คงที่เท่ากับ 3 โวลต์

อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรน ที่ทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสเดรนต่อแรงดันเดรน โดยกำหนดให้แรงเกต ( $V_{GS}$ ) คงที่เท่ากับ 3 โวลต์ เพื่อที่จะพิจารณาถึงลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันของอุปกรณ์ ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) โดยที่ลักษณะกระแส - แรงดันของอุปกรณ์อีจีเฟตจะแสดงดังรูปที่ 4.18

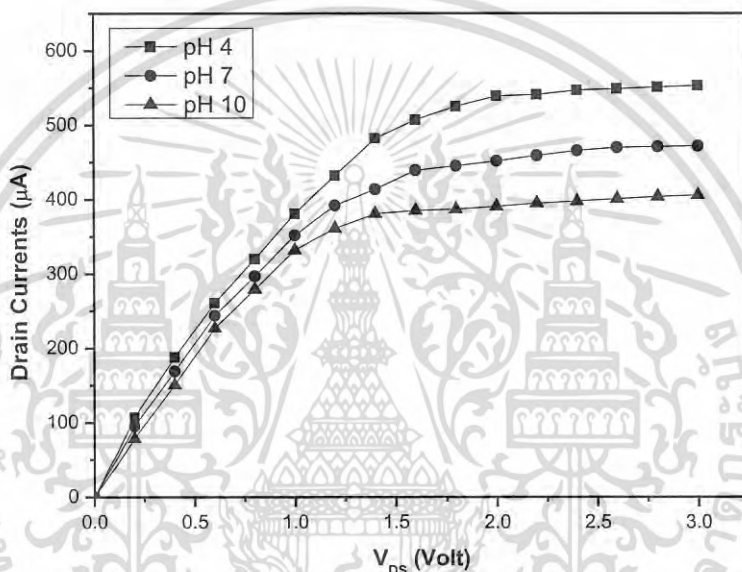


รูปที่ 4.18 ลักษณะกระแส-แรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

ในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเดรน ( $V_{DS}$ ) จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนอิมิต์วั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายเมื่อทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน โดยค่ากระแสเดรนอิมิต์วที่ทำทดสอบในสารละลายที่ค่า pH 4 มีค่า 620  $\mu\text{A}$  และที่สารละลายค่า pH 7 กระแสเดรนอิมิต์วมี

ค่า 557  $\mu\text{A}$  และที่สารละลายค่า pH 10 กระแสเดรนอิมตัวมีค่า 514  $\mu\text{A}$  ที่แรงดัน  $V_{GS}$  คงที่เท่ากับ 3 โวลต์

อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรน ที่ทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสเดรนต่อแรงดันเดรน โดยกำหนดให้แรงเกต ( $V_{GS}$ ) คงที่เท่ากับ 3 โวลต์ เพื่อที่จะพิจารณาถึงลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันของอุปกรณ์ ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) โดยที่ลักษณะกระแส - แรงดันของอุปกรณ์อีจีเฟตจะแสดงดังรูปที่ 4.19

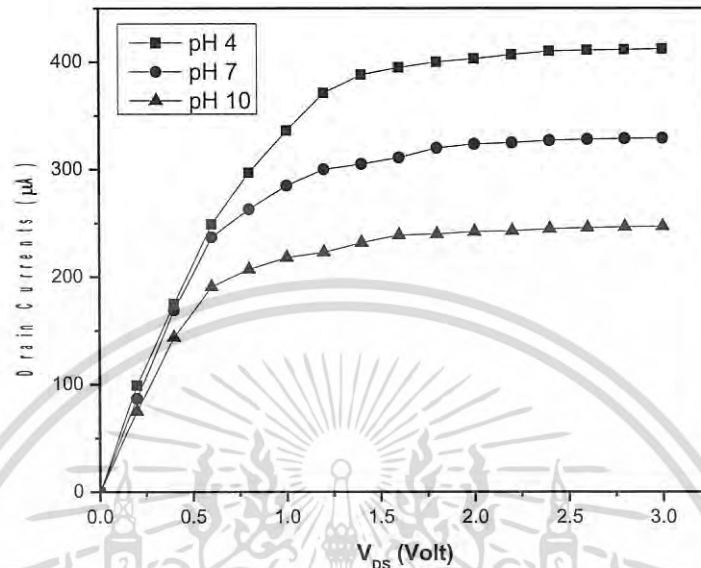


รูปที่ 4.19 ลักษณะกระแส-แรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

ในรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเดรน ( $V_{DS}$ ) จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนอิมตัวนั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายเมื่อทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน โดยค่ากระแสเดรนอิมตัวที่ทำการทดสอบในสารละลายที่ค่า pH 4 มีค่า 553  $\mu\text{A}$  และที่สารละลายค่า pH 7 กระแสเดรนอิมตัวมีค่า 472  $\mu\text{A}$  และที่สารละลายค่า pH 10 กระแสเดรนอิมตัวมีค่า 406  $\mu\text{A}$  ที่แรงดันเกต  $V_{GS}$  คงที่เท่ากับ 3 โวลต์

อุปกรณ์ตรวจวัดสภาพความเป็นกรด - ด่าง แบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรน ที่ทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสเดรนต่อแรงดันเดรน โดยกำหนดให้แรงเกต ( $V_{GS}$ ) คงที่เท่ากับ 3 โวลต์ เพื่อที่จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาถึงลักษณะเฉพาะของกระแสแรงดันของอุปกรณ์ ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) โดยที่ลักษณะกระแส - แรงดันของอุปกรณ์อีจีเฟตจะแสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ลักษณะกระแส-แรงดัน ( $I_{DS} - V_{DS}$ ) ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

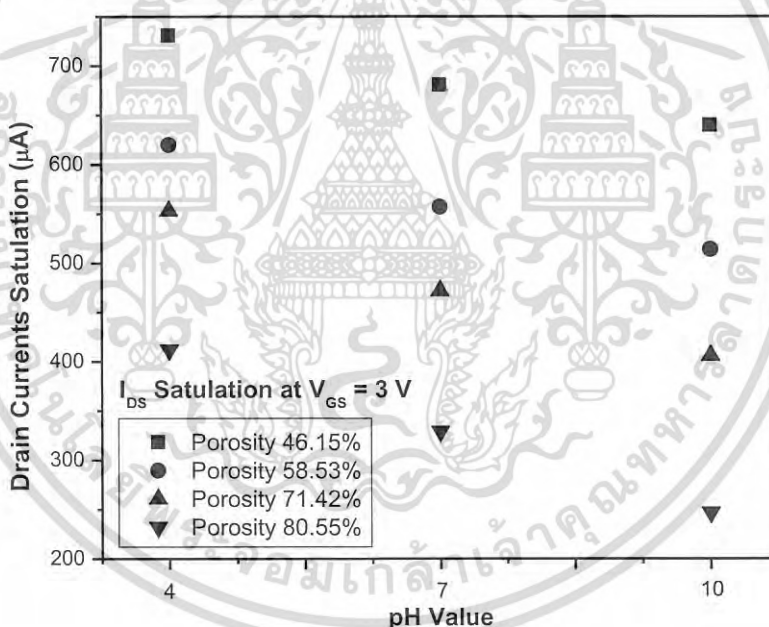
ในรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ( $I_{DS}$ ) และแรงดันเดรน ( $V_{DS}$ ) จะเห็นได้ว่ากระแสเดรนอิมิต์วั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายเมื่อทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน โดยค่ากระแสเดรนอิมิต์วั้นทำการทดสอบในสารละลายที่ค่า pH 4 มีค่า 412  $\mu A$  และที่สารละลายค่า pH 7 กระแสเดรนอิมิต์วั้นมีค่า 329  $\mu A$  และที่สารละลายค่า pH 10 กระแสเดรนอิมิต์วั้นมีค่า 247  $\mu A$  ที่ค่าแรงดันเกต  $V_{GS}$  คงที่เท่ากับ 3 โวลต์

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นได้ว่าค่ากระแสเดรนอิมิต์วั้นของอุปกรณ์อีจีเฟตนั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของสภาพความเป็นกรดต่างหรือค่าพีเอช โดยเมื่อพิจารณาจะเห็นว่าที่ pH 4 นั้นจะมีค่าของกระแสเดรนอิมิต์วั้นมากที่สุดถัดมาคือ pH 7 และ pH 10 ตามลำดับ กล่าวได้ว่าในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดนั้นจะมีปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) มากขึ้นไปด้วย ดังนั้นแล้วเมื่อผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งในที่นี้คือพอร์สซิลิคอนนั้นมีปริมาณไฮโดรเจนไอออนมากก็จะทำให้ขาเกตของมอสเฟตมีศักย์เป็นบวกมากขึ้นส่งผลให้เหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสได้มากขึ้นหรือน้อยลงตามสภาพความเป็นกรดต่าง อีกทั้งปริมาณกระแสที่ได้ยังขึ้นกับความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนด้วย กล่าวคือเมื่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนสูงขึ้นก็จะมีค่าความต้านทานมากขึ้นไปด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลลัพธ์ในการทดลองหัวข้อที่ 4.3.3 นี้จะสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 และอธิบายภาพรวมของการทดลองได้ดังรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.4 กระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์อ็ีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนที่  $V_{GS} = 3V$

pH Value	เปอร์เซ็นต์ความพรุน			
	46.15%	58.53%	71.42%	80.55%
4	731 $\mu A$	620 $\mu A$	553 $\mu A$	412 $\mu A$
7	681 $\mu A$	557 $\mu A$	472 $\mu A$	329 $\mu A$
10	640 $\mu A$	514 $\mu A$	406 $\mu A$	247 $\mu A$



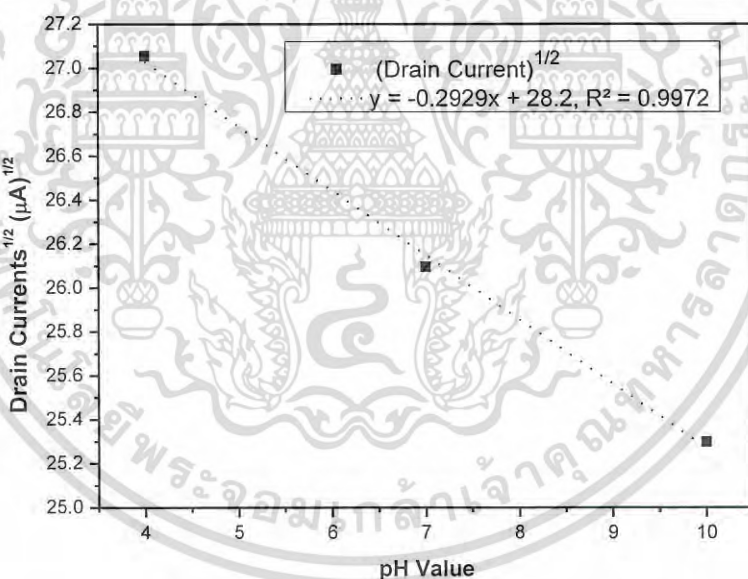
รูปที่ 4.21 กระแสเดรนอิมิตัวของอ็ีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ที่ค่า  $V_{GS} = 3V$

4.3.4 ผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนต่อความไวในการตอบสนองทางกระแสของอ็ีเฟต (Currents Sensitivity)

ในการทดลองนี้จะได้กล่าวถึงการทดสอบการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่าง ทางกระแส (Currents Sensitivity) ของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่าง แบบอ็ีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมมเบรน โดยทำการจะทำการทดสอบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิโคนเป็นเมมเบรนทั้งหมด 4 ความพรุน ซึ่งมีค่าความพรุน 46.15 %, 58.53 %, 71.42 % และ 80.55 % ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการหาค่าของการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่าง ทางแรงดันโดยทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัว ( $\sqrt{I_{DS}}$ ) ของอุปกรณ์อีจีเฟตต่อค่าพีเอชค่าต่างๆ ผลการทดลองจะได้อธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

การทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิโคนที่มีต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่าง ทางกระแสของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิโคนความพรุน 46.15 % เป็นเมมเบรน โดยในการทดลองจะนำเอาค่ากระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์อีจีเฟตที่ได้ทำการทดลองไว้ใน การทดลองที่ 4.3.3 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัว ( $\sqrt{I_{DS}}$ ) กับค่าพีเอชค่าต่างๆที่ได้ทำการทดลองและทำการหาค่าของการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่าง ทางกระแส ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.22

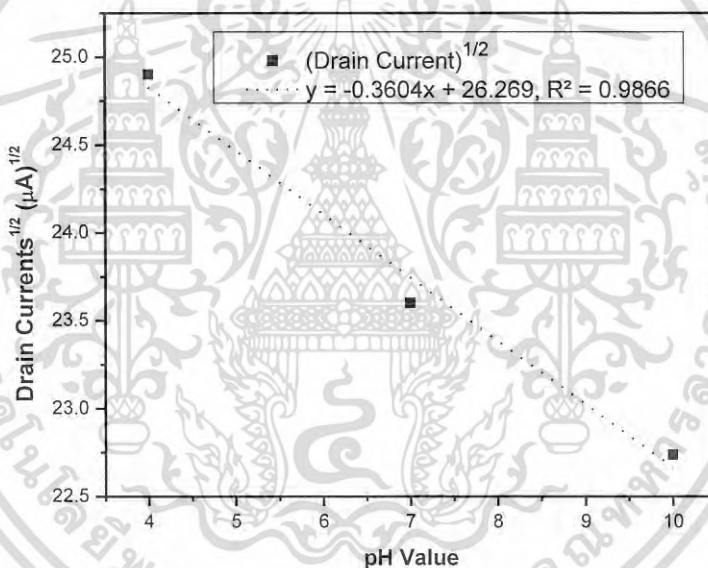


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์  $\sqrt{I_{DS}}$  ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิโคนความพรุน 46.15% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{I_{DS}}$  และค่าพีเอชของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิโคนความพรุน 46.15 % เป็นเมมเบรนที่ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกัน จากการทดลองในหัวข้อ 4.3.3 รากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์ที่ pH 4 มีค่าเท่ากับ  $27.055 \mu A^{1/2}$  ที่ค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ  $26.095 \mu A^{1/2}$  และที่ค่า pH 10 มีค่าเท่ากับ  $25.298 \mu A^{1/2}$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu\text{A}^{1/2}$  โดยในรูปที่ 4.22 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ด่างมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ  $y = -0.2929x + 28.2$  มีความเป็นเชิงเส้น 99.72 % และมีความไวในการตอบสนองทางกระแสเท่ากับ  $0.2929 \mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$

ในการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่าง ทางกระแสของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53 % เป็นเมมเบรน โดยในการทดลองจะนำเอาค่ากระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์อีจีเฟตที่ได้ทำการทดลองไว้ในกรทดลองที่ 4.3.3 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัว ( $\sqrt{I_{DS}}$ ) กับค่าพีเอชค่าต่างๆที่ได้ทำการทดลองและทำการหาค่าการตอบสนองของต่อความเป็นกรด - ด่างทางกระแส ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.23



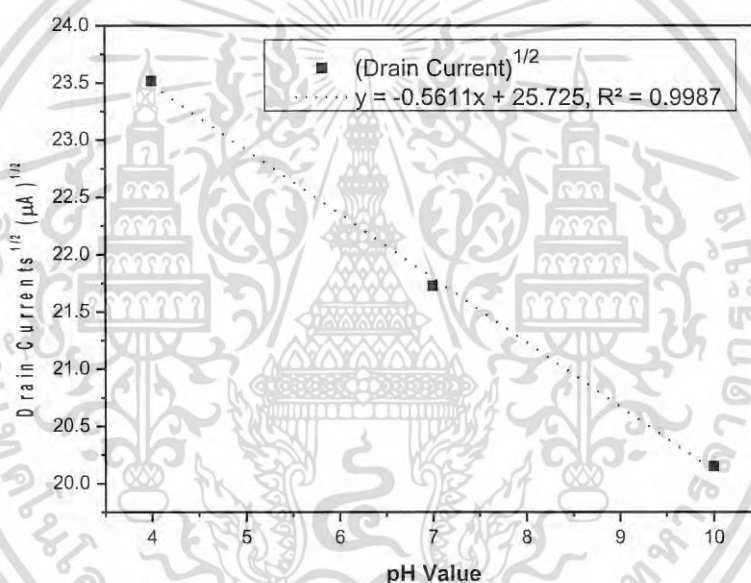
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์  $\sqrt{I_{DS}}$  ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{I_{DS}}$  และค่าพีเอชของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 58.53 % เป็นเมมเบรนที่ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกัน โดยในการทดลองในหัวข้อ 4.3.3 รากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์ที่ pH 4 มีค่าเท่ากับ  $24.899 \mu\text{A}^{1/2}$  ที่ค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ  $23.6 \mu\text{A}^{1/2}$  และที่ค่า pH 10 มีค่าเท่ากับ  $22.737 \mu\text{A}^{1/2}$  โดยในรูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ด่างมีการตอบสนองเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงเส้นตามสมการ  $y = -0.3604x + 26.269$  มีความเป็นเชิงเส้น 98.66 % และมีความไวในการตอบสนองทางกระแสเท่ากับ  $0.3604 \mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$

ในการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์ซซิโคนที่มีต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่าง ทางกระแสของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างแบบโครงสร้างอีจีเฟดที่มีพอร์ซซิโคนความพรุน 71.42 % เป็นเมมเบรน โดยในการทดลองจะนำเอาค่ากระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์อีจีเฟดที่ได้ทำการทดลองไว้ใน การทดลองที่ 4.3.3 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัว ( $\sqrt{I_{DS}}$ ) กับค่าพีเอชค่าต่างๆที่ได้ทำการทดลองและทำการหาค่าการตอบสนองของต่อความเป็นกรด - ด่างทางกระแส ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.24

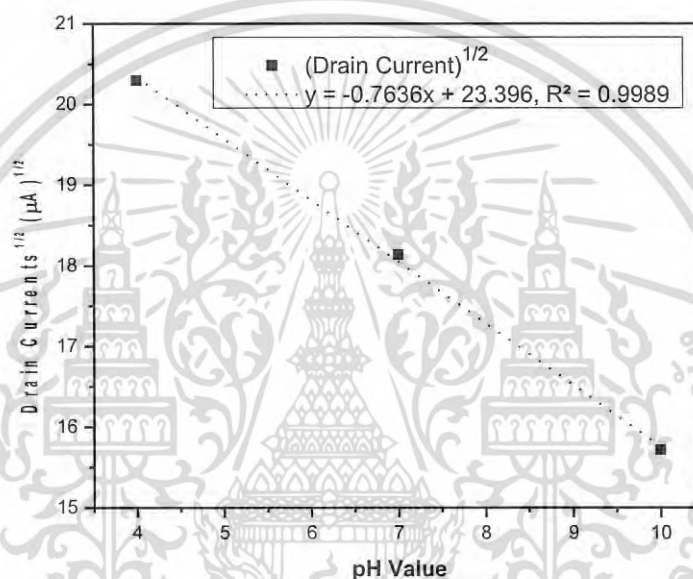


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์  $\sqrt{I_{DS}}$  ของอีจีเฟดที่มีพอร์ซซิโคนความพรุน 71.42% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

จากในรูปที่ 4.24 จะแสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{I_{DS}}$  และค่าพีเอชของอีจีเฟดที่มีพอร์ซซิโคนความพรุน 71.42 % เป็นเมมเบรนที่ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกัน โดยในการทดลองในหัวข้อ 4.3.3 รากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์ที่ pH 4 มีค่าเท่ากับ  $23.515 \mu\text{A}^{1/2}$  ที่ค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ  $21.725 \mu\text{A}^{1/2}$  และที่ค่า pH 10 มีค่าเท่ากับ  $20.149 \mu\text{A}^{1/2}$  ซึ่งในรูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ด่างมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ  $y = -0.5611x + 25.725$  มีความเป็นเชิงเส้นถึง 99.87 % และมีความไวในการตอบสนองทางกระแสเท่ากับ  $0.5611 \mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองผลกระทบของความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีต่อการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ต่าง ทางกระแสของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ต่างแบบโครงสร้างอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55 % เป็นเมมเบรน ซึ่งในการทดลองจะนำเอาค่ากระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์อีจีเฟตที่ได้ทำการทดลองไว้ใน การทดลองที่ 4.3.3 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง รากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัว ( $\sqrt{I_{DS}}$ ) กับค่าพีเอชค่าต่างๆที่ได้ทำการทดลองและทำการหาค่าการตอบสนองของต่อความเป็นกรด - ต่างทางกระแส ด้วยสมการเส้นตรง ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์และค่าพีเอช แสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์  $\sqrt{I_{DS}}$  ของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

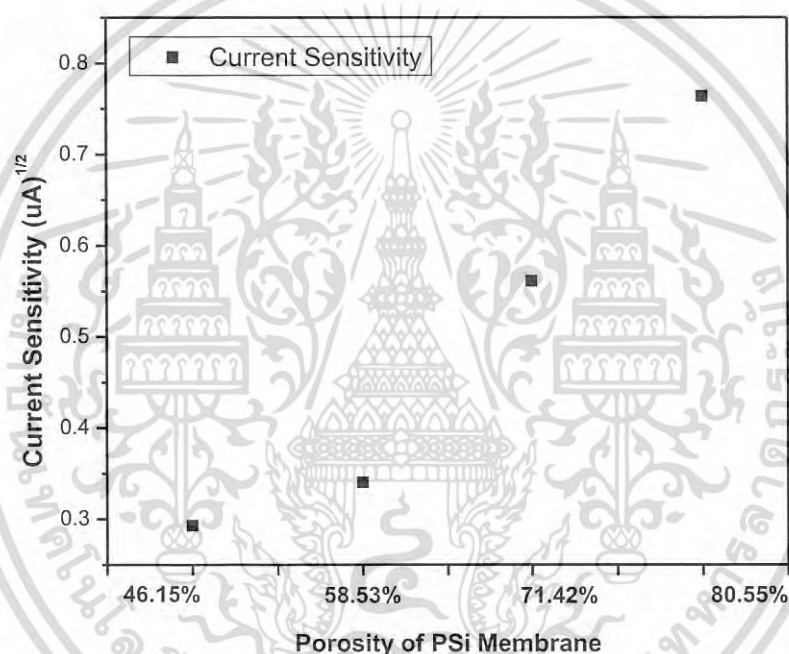
จากรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sqrt{I_{DS}}$  และค่าพีเอชของอีจีเฟตที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุน 80.55 % เป็นเมมเบรนที่ทำการทดสอบภายใต้สภาพความเป็นกรด - ต่างที่แตกต่างกัน และการทดลองในหัวข้อ 4.3.3 รากที่สองของกระแสเดรนอิมิตัวของอุปกรณ์ที่ pH 4 มีค่าเท่ากับ  $20.297 \mu\text{A}^{1/2}$  ที่ค่า pH 7 มีค่าเท่ากับ  $18.138 \mu\text{A}^{1/2}$  และที่ค่า pH 10 มีค่าเท่ากับ  $15.176 \mu\text{A}^{1/2}$  โดยในรูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด - ต่างมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นตามสมการ  $y = -0.7636x + 23.396$  มีความเป็นเชิงเส้นถึง 99.89 % และมีความไวในการตอบสนองทางกระแสเท่ากับ  $0.7636 \mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$

จากการผลลัพธ์ของการทดลองในหัวข้อนี้จะสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.4 และอธิบายภาพรวมของการทดลองได้ดังรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ความไวในการตอบสนองทางกระแสของอุปกรณ์อีจีเฟดที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรน

ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอน	ความไวในการตอบสนองทางกระแส
46.15%	0.2929 $\mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$
58.53%	0.3404 $\mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$
71.42%	0.5611 $\mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$
80.55%	0.7636 $\mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$



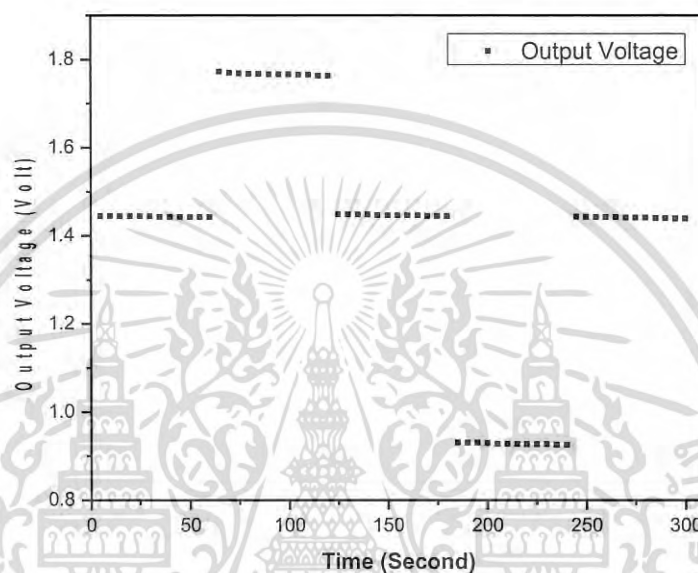
รูปที่ 4.26 ความไวในการตอบสนองทางกระแสของอีจีเฟดที่มีพอร์สซิลิคอนความพรุนต่างๆ เป็นเมมเบรนที่ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

#### 4.4 การศึกษาฮิสเตอร์รีซิสของพอร์สซิลิคอนที่ใช้เป็นเมมเบรน

การทดลองในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) ของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด - ด่างที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน ซึ่งตัวแปรดังกล่าวที่จะได้ทำการศึกษานี้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนจากการวัดที่เกิดขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะทำการวัดหาฮิสเตอร์รีซิสหลังจากที่อุปกรณ์ถูกแช่ลงในสารละลายตัวอย่างที่มีค่าเป็นกลางเพื่อให้อุปกรณ์นั้นมีเสถียรภาพและจากนั้นก็ทำการวัดค่าเป็นวงรอบ (Loop) โดยผลการทดลองอธิบายได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาฮีสเตอร์รีซิสของอีจีพีดที่มีพอร์สซิลิโคนเป็นเมมเบรนนั้นจะใช้อีจีพีดที่มีพอร์สซิลิโคนที่มีความพรุน 80.55% เป็นเมมเบรนมาทำการทดลอง เนื่องจากที่ความพรุน 80.55% นั้นอุปกรณ์อีจีพีดจากผลการทดลองพบว่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่าง ได้ดีที่สุดจึงได้เลือกเงื่อนไขดังกล่าวมาทำการศึกษาฮีสเตอร์รีซิส โดยจะทำการวัดเป็นวงรอบ pH 7 -> pH 4 -> pH 7 -> pH 10 -> pH 7 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ลักษณะฮีสเตอร์รีซิสของพอร์สซิลิโคนเมมเบรน

ในการวัดฮีสเตอร์รีซิสวงรอบ pH 7 -> pH 4 -> pH 7 -> pH 10 -> pH 7 ที่แสดงในรูปที่ 4.27 เมื่อพิจารณาที่วงรอบ pH 7 -> pH 4 -> pH 7 นั้นที่การวัด pH 7 รอบแรกมีค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย 1.4434 โวลต์ และที่การวัด pH 7 รอบที่สองค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยมีค่าประมาณ 1.4465 โวลต์ ดังนั้นเมื่อคำนวณแล้วค่าฮีสเตอร์รีซิสแล้วในวงรอบการวัดนี้มีค่า 3.1 mV และเมื่อพิจารณาที่วงรอบ pH 7 -> pH 10 -> pH 7 แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยที่การวัดในสารละลาย pH 7 รอบแรกมีค่า 1.4465 โวลต์ และแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยที่การวัดในสารละลาย pH 7 รอบที่สองมีค่า 1.441 โวลต์ เมื่อนำมาคำนวณพบว่าค่าฮีสเตอร์รีซิสของวงรอบการวัดนี้มีค่าเท่ากับ 5.5 mV จะเห็นได้ว่าที่วงรอบการวัดทั้งสองจะมีค่าของฮีสเตอร์รีซิสที่ต่างกันซึ่งเป็นผลกระทบของการแพร่ของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ที่เข้ามาฝังตัวในชั้นเมมเบรน ซึ่งในวงรอบของการวัด pH 7 -> pH 4 -> pH 7 จะมีการแพร่เข้ามาฝังตัวของไฮโดรเจนไอออนที่มีประจุเป็นบวกจากการวัดในสารละลาย pH 4 จึงทำให้เมมเบรนมีศักย์เป็นบวกเพิ่มขึ้นและเมื่อวนกลับมาวัดที่ pH 7 จึงทำให้แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยมีค่าสูงกว่ารอบแรก และการวัดในวงรอบ pH 7 -> pH 10 -> pH 7 ก็จะมีการแพร่เข้ามาฝังตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮดรอกซิลไอออนซึ่งมีประจุเป็นลบจากการวัดในสารละลายค่า pH 10 ทำให้เมมเบรนมีศักย์เป็นลบเพิ่มขึ้นจึงทำให้เมื่อวนกลับมาวัดที่ pH 7 นั้นมีแรงดันเอาท์พุทเฉลี่ยที่มีค่าน้อยกว่าการวัดในรอบแรก เนื่องจากการในการทดลองใช้เวลาถึง 5 นาทีในการทดสอบแต่ในส่วนของการใช้งานจริงนั้นเป็นการวัดเพียงแค่ช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นค่าฮิสเตอร์รีซิสที่แสดงให้เห็นในการทดลองจึงเป็นค่าที่ไม่ส่งผลมากต่อการวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยได้ที่ทำการศึกษเกี่ยวกับการสร้างและการศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่าง แบบโครงสร้างอีจีพีตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรน โดยโครงสร้างของอุปกรณ์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของมอสเฟตที่ทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์ และส่วนของพอร์สซิลิคอนที่ทำหน้าที่เป็นเมมเบรนในการตรวจจับไฮโดรเจนไอออน ซึ่งโครงสร้างอีจีพีตเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้างและมีความเหมาะสมที่จะนำไปเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่าง จากการศึกษาการสร้างและการศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดความเป็นกรด – ด่าง แบบโครงสร้างอีจีพีตที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

จากการศึกษาการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยการแอโนไดซ์เซชันในเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ ทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งแคโทดเดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์, เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งแคโทดเดี่ยวแนวตั้งโดยเคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์, เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งแคโทดคู่แนวนอนโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์ พบว่าการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งแคโทดเดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์นั้นชั้นพอร์สซิลิคอนจะเกิดเพียงแคบริเวณขอบเท่านั้นเนื่องจากถูกโอริงกดทับทำให้เกิดความเครียดในวัสดุจึงทำให้การนำไฟฟ้าตรงบริเวณนี้การนำไฟฟ้ามากกว่าจุดอื่นๆ และทำให้กระแสไฟฟ้าไม่กระจายตัวทั่วแผ่นซิลิคอน จากการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งแคโทดเดี่ยวแนวตั้งโดยเคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์พบว่าชั้นพอร์สซิลิคอนมีความสม่ำเสมอขึ้นเนื่องจากอลูมิเนียมที่เคลือบด้านหลังแผ่นซิลิคอนช่วยทำให้การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าดียิ่งขึ้นแต่จุดที่เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนมากที่สุดยังเป็นบริเวณที่โอริงกดทับเนื่องจากเซลล์แบบแท่งแคโทดเดี่ยวนั้นมีการขันอัดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์เข้าไปในเซลล์จึงส่งผลให้เกิดความเครียดบริเวณดังกล่าวอีกทั้งในกระบวนการนี้ก็ยังต้องเพิ่มกระบวนการสร้างอลูมิเนียมเข้ามาทำให้ขั้นตอนการสร้างมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น จากการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งแคโทดคู่แนวนอนโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์พบว่าชั้นพอร์สซิลิคอนนั้นมีความสม่ำเสมอทั่วบริเวณที่กัดเนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ซิลิคอนเวเฟอร์มีการสัมผัสกับสารละลายทั้งสองด้านจึงทำให้การกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าที่ดีอีกทั้งเซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ไม่มีการขันอัดแผ่นซิลิคอนเข้าไปในเซลล์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมีจึงทำให้ลดการเกิดความเครียดบริเวณโอรังทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สม่ำเสมอและยังลดต้นทุนในการเคลือบอลูมิเนียมอีกด้วย จึงเลือกใช้เงื่อนไขในการสร้างพอร์สซิลิคอนในงานวิจัยนี้

จากการศึกษาเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ได้จากการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกัดที่  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  พบว่าจากการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งคู่เดี่ยวแนวตั้งโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์เปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ได้มีค่าประมาณ 31.1 %, 39.42 %, 52.15 %, 64.22 % ตามลำดับ จากการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งคู่เดี่ยวแนวตั้งโดยเคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์พบว่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ได้มีค่าประมาณ 34.4 %, 42.77 %, 55.55 %, 69.42 % ตามลำดับ และจากการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดแท่งคู่คู่นวนอนโดยไม่เคลือบชั้นอลูมิเนียมที่ด้านหลังซิลิคอนเวเฟอร์พบว่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ได้มีค่าประมาณ 46.15 %, 58.53 %, 71.42 %, 80.55 % ตามลำดับ ซึ่งจากการสร้างด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่คู่จะได้เปอร์เซ็นต์ความพรุนที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับการสร้างภายใต้เงื่อนไขเดียวกันเนื่องจากกระแสไฟฟ้ามักมีการกระจายตัวที่ดี

จากการทดลองการใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนในอุปกรณ์อิมูโนอิเล็กโทรเคมีเปรียบเทียบกับการใช้ซิลิคอนผิวเรียบพบว่าอิมูโนอิเล็กโทรเคมีที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนภายใต้การทดสอบในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 4, pH 7, และ pH 10 นั้นมีการตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่างได้ดีกว่าอิมูโนอิเล็กโทรเคมีที่มีซิลิคอนผิวเรียบเป็นเมมเบรนเนื่องจากพอร์สซิลิคอนนั้นมีลักษณะที่เป็นรูพรุนมากมายอยู่ที่ผิวหน้าของซิลิคอนและมีพื้นที่ขนาดใหญ่อยู่บริเวณผิวหน้าเป็นจำนวนมากอีกทั้งยังมีพื้นที่ที่สัมผัสกับสารละลายมากกว่าซิลิคอนผิวเรียบเมื่อถูกจุ่มอยู่ในสารละลายก็จะทำให้ไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ที่มีอยู่ในสารละลายมาจับกับพื้นที่ขนาดใหญ่ดังกล่าวและทำให้ผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนมีศักย์เป็นบวกเพิ่มมากขึ้นหรือลดลงตามสภาพความเป็นกรด - ด่าง ซึ่งเมื่อพิจารณาที่แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ทั้งสองแบบจะเห็นได้ว่าอิมูโนอิเล็กโทรเคมีที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นเมมเบรนนั้นเมื่อทำการทดสอบภายใต้สารละลายที่มีสภาพความเป็นกรด - ด่างที่แตกต่างกันจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันขีดเริ่มที่ชัดเจน

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกันเป็นเมมเบรนของของอุปกรณ์อิมูโนอิเล็กโทรเคมีเพื่อการศึกษาถึงลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 46.15 %, 58.53 %, 71.42 % และ 80.55 % ตามลำดับ ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันจากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เปอร์เซ็นต์ความพรุน 46.15% ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่า 0.832 V, 0.936 V, 1.032 V และกระแสเดรนในย่านอิมิตัวเท่ากับ 731  $\mu\text{A}$ , 681  $\mu\text{A}$ , 640  $\mu\text{A}$  ที่ค่า pH 4, pH 7, pH 10 ตามลำดับ การตอบสนองทางแรงดันมีค่า 34.8 mV/pH และการตอบสนองทางกระแสมีค่า 0.2929  $\mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปอร์เซ็นความพรุน 58.53% ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่า 1.040 V, 1.165 V, 1.282 V และกระแสเดรนในย่านอิ่มตัวเท่ากับ 620  $\mu\text{A}$ , 557  $\mu\text{A}$ , 514  $\mu\text{A}$  ที่ค่า pH 4, pH 7, pH 10 ตามลำดับ การตอบสนองทางแรงดันมีค่า 40.3 mV/pH และการตอบสนองทางกระแสมีค่า 0.3604  $\mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$

3. เปอร์เซ็นความพรุน 71.42% ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่า 1.089 V, 1.213 V, 1.361 V และกระแสเดรนในย่านอิ่มตัวเท่ากับ 553  $\mu\text{A}$ , 472  $\mu\text{A}$ , 406  $\mu\text{A}$  ที่ค่า pH 4, pH 7, pH 10 ตามลำดับ การตอบสนองทางแรงดันมีค่า 45.3 mV/pH และการตอบสนองทางกระแสมีค่า 0.5611  $\mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$

4. เปอร์เซ็นความพรุน 80.55% ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่า 1.2 V, 1.371 V, 1.521 V และกระแสเดรนในย่านอิ่มตัวเท่ากับ 412  $\mu\text{A}$ , 329  $\mu\text{A}$ , 247  $\mu\text{A}$  ที่ค่า pH 4, pH 7, pH 10 ตามลำดับ การตอบสนองทางแรงดันมีค่า 53.5 mV/pH และการตอบสนองทางกระแสมีค่า 0.7636  $\mu\text{A}^{1/2}/\text{pH}$

จากผลการทดลองเห็นว่าเมื่อความพรุนของชั้นพอร์ซซิลิคอนมีค่าเพิ่มจะส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและกระแสเดรนมีค่าที่วัดได้มีค่าลดลงเนื่องจากความต้านทานของชั้นพอร์ซซิลิคอนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นและในทางกลับกันก็ส่งผลให้การตอบสนองต่อความเป็นกรด - ด่างมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อสารละลายที่เพิ่มขึ้น

ในการทดลองฮีสเตอร์รีซิสของเมมเบรนจากการวัดในสารละลายที่วงรอบ pH 7 -> pH 4 -> pH 7 พบว่าผลของฮีสเตอร์รีซิสมีค่า 3.1 mV และผลของฮีสเตอร์รีซิสที่ได้จากการวัดที่วงรอบ pH 7 -> pH 10 -> pH 7 นั้นมีค่า 5.5 mV ซึ่งผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เป็นผลมาจากปริมาณไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนที่เข้ามาฝังอยู่ในเมมเบรนที่ลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ในการทดสอบดังกล่าวใช้เวลา 5 นาทีในการทดสอบ ซึ่งโดยการวัดในงานทั่วไปแล้วจะเป็นการวัดแค่เพียงช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นผลของฮีสเตอร์รีซิสจึงส่งผลต่อการวัดในลักษณะสั้นๆไม่มาก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Van der Spiegel, I. Lauks, P. Chan, D. Babic. 1983. "The extended gatechemically sensitive field effect transistor as multi-species microprobe." *Sensors and Actuators B4* : 291–298.
- [2] Silva GR, Matsubara EY, Corio P, Roselen JM and Mulato M. 2007. "Carbon felt/carbon nanotubes/pani as ph sensor." *Materials Research Society Proceedings*. 1018 : EE1410-1
- [3] Batista PD, Mulato M, Graeff CFO, Fernandez FJR and Marques FD. 2006. "SnO extended gate field-effect transistor as pH sensor." *Brazilian Journal of Physics*. 36(2a) :478-481
- [4] Batista PD and Mulato M. 2005. "ZnO extended-gate field-effect transistors as pH sensors." *Applied Physics Letters*. 87(14) : 143508-143510.
- [5] Liao, Y.-H., Chou, J.-C. 2009. "Preparation and characterization of the titanium dioxide thin films used for pH electrode and procaine drug sensor by sol-gel method." *Mater Chem Phys*. 114 : 542–548.
- [6] Das A., Ko D.H., Chen C.-H., Chang L.-B., Lai C.-S., Chu F.-C., Chow L. and Lin. 2014. "R.-M. Highly sensitive palladium oxide thin film extended gate FETs as pH sensor." *Sens Actuators B Chem*. 205 : 199–205.
- [7] Sardarinejad A., Maurya D. and Alameh K. 2015. "The pH Sensing Properties of RF Sputtered RuO<sub>2</sub> Thin-Film Prepared Using Different Ar/O<sub>2</sub> Flow Ratio." *Materials*. 8 : 3352–3363.
- [8] K. Watanabe, T. Okada, I. Choe, Y. Sato. 1996. "Organic Vapor sensitivity in a porous silicon device." *Sensor and Actuators*. : 194-197
- [9] สมเกียรติ ศฤกษ, สรวิต มุ่งการนา, มนัสชัย ไชยนอก, มโน มีรักษ์ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ. 2547. "การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอน โดยการกัดย้อมสีเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน." *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27. เล่ม 2. หน้า 237-240.*
- [10] Unal B., Parbukov, A.N., Bayliss S.C. 2001. "Photovoltaic properties of a novel stain etched porous silicon and its application in photosensitive devices." *Opt. Mater*. 17 : 79–82.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Balagurov L.A., Bayliss S.C., Yarkin D.G., Andrushin, S.Y., Kasatochkin V.S., Orlov A.F., Petrova E.A. 2003. "Low noise photosensitive device structures based on porous silicon." *Solid-State Electron.* 47 : 65–69.
- [12] Hadjersi T., Gabouze N., 2008. "Photodetectors based on porous silicon produced by Ag-assisted electroless etching." *Opt. Mater.* 30 : 865–869.
- [13] Reddy R.R.K., Basu I., Bhattacharya E., Chaha A., 2001. "Porous silicon based potentiometric triglyceride biosensor." *Biosens Bioelectron.* 16 : 313-317.
- [14] Reddy R.R.K., Basu I., Bhattacharya E., Chadha A. 2003 "Estimation of triglycerides by a porous silicon based potentiometric biosensor." *Curr. Appl. Phys.* 3 : 155–161.
- [15] ไพฑูรย์ หมายมั่นสุข. 2542. *อุณหภูมิจึงความเป็นกรดและด่าง. การวิเคราะห์และน้ำเสียเบื้องต้น. สำนักวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. หน้าที่ 1 – 5.*
- [16] สุตาร์ตัน เพ็ชรหนู. 2560. คณะครุศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยราชภัฏสมเด็จพระเจ้าพระยา. *สมบัติของสารละลายการตรวจสอบสารละลายกรด – เบส.* [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/smbatikhxngsarlaykrdbes/3-kar-trwc-sxb-sarlalay-krd-bes>
- [17] รศ.ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2560. *ตำราเรียนรู้ อุปกรณ์เครื่องมือวิทยาศาสตร์(บทที่ 6 : เครื่องมือวัดพีเอช).* [Online]. Available : <http://home.kku.ac.th/chuare/12/pHmeter.pdf>
- [18] บริษัท ชายน้เทคโนโลยี จำกัด. 2560. *หลักการวัดพีเอชและเครื่องมือวัดพีเอช pH meter.* [Online]. Available : <http://www.sa.sciencetech.co.th/pdf/Micro.pdf>
- [19] สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. *ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ามอสเฟต (MOSFET)* [Online]. Available : [http://www.ce.kmitl.ac.th/download.php?DOWNLOAD\\_ID=4306](http://www.ce.kmitl.ac.th/download.php?DOWNLOAD_ID=4306)
- [20] อภิรักษ์ เสือเดช. วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 2551. *ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดออกไซด์โลหะ.* [Online]. Available : [http://suadet.yolasite.com/resources/elt2303/ELT2303\\_MOSFET\\_TH.pdf](http://suadet.yolasite.com/resources/elt2303/ELT2303_MOSFET_TH.pdf)
- [21] อวิรุทธ์ ศรีสุวรรณ. 2552. "การศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจวัดความเป็นกรด – ด่างแบบโครงสร้างฮีสเฟท ที่มีฟิล์มซิลิคอนไนไตรเป็นเมมเบรน." *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] สมเกียรติ ศุภเดช. 2549. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
- [23] Kwok K. Ng. 1995. "Complete Guide Semiconductor Devices." McGraw-Hill. New York : 518-520.
- [24] คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2542. **เคมีไฟฟ้าวิเคราะห์**. โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [25] เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2552. **เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า**. คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [26] Jia-Chyi Chena , Jung-Chuan Choub, Tai-Ping Sunc , Shen-Kan Hsiunga. 2003. "Portable urea biosensor based on the extended-gate field effect transistor." *Sensors and Actuators B91* : 180–186
- [27] Jyh-Liang Wang, Po-Yu Yang, Tsang-Yen Hsieh, Chuan-Chou Hwang, and Miin-Horng Juang. 2013. "pH-Sensing Characteristics of Hydrothermal Al-Doped ZnO Nanostructures." *Journal of Nanomaterials*. Volume 2013 : 1 – 6
- [28] Manoj KC , Mukul Dubey , Braden Bills , Ilham Y. Al-Qaradawi , Buddhi Sagar Lamsal , David Galipeau<sup>1</sup> and Qi Hua Fan. 2013. "Aqueous Electrolyte System for Porous Silicon Using Electrochemical Anodization." *IEEE International Conference on Electro-Information Technology, EIT 2013*, : 1-4.
- [29] W. Lang, P. Steiner and H. Sandmaier. 1995. "Porous silicon : a novel material for microsystem." *Sensor and actuators. A 21-23* : 835.
- [30] Ran Jiang, Xianghao Du, Weideng Sun, Zuyin Han and Zhengran Wu. 2015. "Enhancement of the blue photoluminescence intensity for the porous silicon with HfO<sub>2</sub> filling into microcavities." *Scientific Reports 5*, Article number: 15574.
- [31] สรวิต มุ่งการนา. 2542. "เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนจากการกักข้อมสี่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] H. Takagi, M. Mitome, R. Yano and T. Nakkagiri. 1992. "Microwave plasma deposition." *Solid State Phys, Vol. 27*, pp : 875
- [33] Y. Kanemitsu, T. Ogawa, K. Shiraishi and K. Takeda. 1993. "Nanocrystalline : Laser breakdown." *Phy. Rev., B48* : 4883

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] T. Kawaguchi and S. Miyazima, Japan J. 1993. "Laser breakdown in pure SiH<sub>4</sub>." Appl. Phys. Vol. 32, : L215.
- [35] R.E. Hummel, A. Morrone, M. Ludwing and S.S. Chang. 1993. "High-frequency spark discharge." Appl. Phys. Lett. Vol. 63. : 2771.
- [36] สรวิต มุ่งการนา, สมเกียรติ ศุภเดช และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. 2548. "การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดย้อมสี." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28. เล่ม 2. หน้า 1109-1112.
- [37] H.M. Ludwig, E.E. Hummel and M. Stora. 1995. Thin Solid Films Vol. 255 : 103.
- [38] วรภัทย์ พัฒนอานกุล, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. 2548. "ผลกระทบของการผสมเททานอลในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28. เล่ม 2. หน้า 1101-1104, 2548.
- [39] Y. Kang and J. Jorne. 1993. "Porous silicon formation : Morphological Stability Analysis." Appl. Phys. Lett. Vol. 62. No. 8, : 2224-2226.
- [40] W.Lang, P. Steiner, H. Sandmier. 1995. "Porous silicon : anovel for Microsystems." Sensor and Acturators A51. : 31-36, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Jiramet Intasom, Narin Atiwongsangthong, "Effect of Forming Porous Silicon with Different Electrochemical Etching Cell to Porosity Layer Under Various Anodization Currents Density." International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017., Volume 2, pp : 756 – 759.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Lecture Notes in Engineering and Computer Science**

**IMECS 2017**

International MultiConference of  
**Engineers and Computer  
 Scientists 2017**

Volume II

**Hong Kong  
 15-17 March, 2017**

S. I. Ao  
 Oscar Castillo  
 Craig Douglas  
 David Dagan Feng  
 A. M. Korsunsky (Eds.)

**IA ENG**

International Association of Engineers

ISBN: 978-988-14047-7-0  
 ISSN: 2078-0958

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Effect of Forming Porous Silicon with Different Electrochemical Etching Cell to Porosity Layer Under Various Anodization Current Density

Jiramet Intasom and Narin Atiwongsangthong, *Member, IAENG*

**Abstract**— In this research is purpose to study effect of forming porous silicon with different electrochemical etching cell to porosity layer under various anodization current density (10, 15, 20 and 25 mA/cm<sup>2</sup>). Three method of forming porous silicon were prepared by forming in single tank electrochemical etching cell without coating Al at backside of silicon wafer, forming in single tank electrochemical etching cell with coating Al at backside of silicon wafer and forming in double tank electrochemical etching cell without coating Al at backside of silicon wafer. After that investigate porous silicon by test photoluminescence with irradiate UV- Light on samples. The porosity of porous silicon was measure by gravimetric method. The result was found that the porous layer from forming by double tank electrochemical etching cell without coating Al at backside are most homogeneity and porosity of porous silicon are increase with the increase of current density.

**Index Terms**— porous silicon, porosity layer, different electrochemical etching cell

### I. INTRODUCTION

Porous silicon is a silicon crystalline which a lot of small pore on surface. It was discovered in 1956s by Ulhir[1] at Bell Laboratory in the U.S. during the studies of the electropolishing surface of silicon. At the present the porous silicon was applied to humidity sensor[2], optoelectronics devices[3] and biomedical sensor[4].

There are several methods for formation the porous silicon including stain-etching, electrochemical etching as we know anodization. In general was formation by anodization in single tank electrochemical etching cell. In process the current distribution is important factor is affected to uniformity layer and percentage of porosity. The formation the porous silicon by anodization in single tank electrochemical etching we cell observe the porous layer is not uniformity because this method has strain at the O – ring area the electric current not distributed is affected to porous silicon is not uniformity and low porosity percentage. Phatthanaphong P. et al[5] are studies the

Manuscript received December 21, 2016; revised Jan 16, 2017. This work was supported in part by the Electronics research center of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand.

J. Intasom is with the Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand ; e-mail: jiramet.ji@gmail.com

N. Atiwongsangthong is with Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand ; e-mail: narin.at@kmitl.ac.th

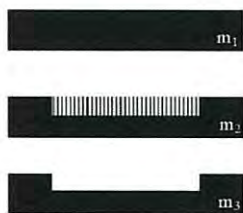
effect of coating aluminum at backside of silicon for formation of porous silicon by anodization in single tank electrochemical etching cell the result have shown the porosity layer more uniform than without coating aluminum at backside of silicon because the current distributed is better but the most of porosity layer still at the O – ring area because this point has a lot of electric current density. However, There is not information about formation of porous silicon by anodization in double tank electrochemical etching cell because it has not been investigate yet.

The purpose of this study was to investigate percentage of porosity and uniformity layer of porous silicon from formation by anodization in double tank electrochemical etching cell compare with anodization in single tank electrochemical etching cell without coating aluminium at backside of Si wafer and without coating aluminium at backside of Si wafer and.

### II. EXPERIMENTAL

This experiment, the porous silicon were forming by three methods including forming in single tank electrochemical without coating aluminum at backside of silicon, forming in single tank electrochemical with coating aluminum at backside of silicon and forming in double tank electrochemical without coating aluminum at backside of silicon to study of porosity layer from forming with three different electrochemical etching cell.

All Silicon wafer were prepared by p – type Si with orientation (100) resistivity 10 Ω-cm and thickness 625 μm. Silicon wafer were cut approximately 1 cm<sup>2</sup>. After that, we cleaned Silicon wafer by DI wafer, Acetone in ultrasonic cleaner for 5 min and dipped HF concentration 5% to remove native oxide. After that, forming porous silicon by anodization in three electrochemical etching cell (Made from Teflon) by various current density 10, 15, 20, 25 mA/cm<sup>2</sup> respectively. Next, sample were rinsed in DI water and blow dry with nitrogen gas. Finally, investigated uniformity of porous silicon by beaming ultraviolet on surface of silicon and measure porosity by gravimetric method [6] was described in Figure 1.



$$\text{porosity}\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 \quad (1)$$

Fig. 1. gravimetric method for measure porosity of porous silicon

$m_1$  is a mass of silicon wafer,  $m_2$  is a mass of silicon wafer after formation porous silicon and  $m_3$  is a mass of silicon after remove porous silicon layer by NaOH

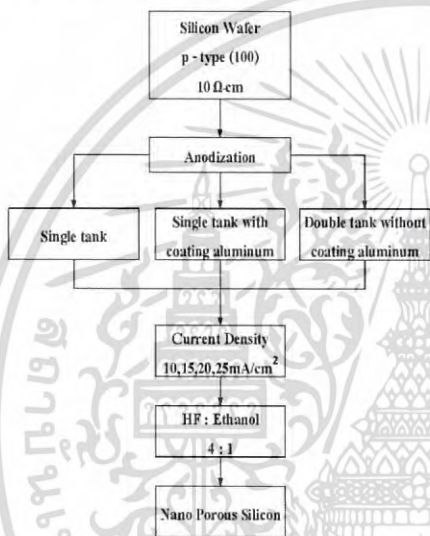


Fig. 2. Process of Formation Porous silicon

In Fig. 2, was describe a process of formation porous silicon in this research by flowchart.

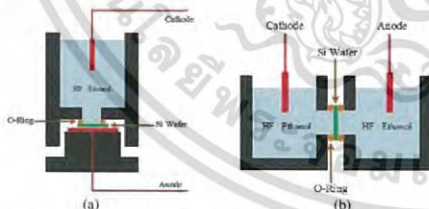


Fig. 3. Cross section of single tank (a) and double tank (b) electrochemical etching cell.

In part of forming in double tank electrochemical etching cell with coating aluminium at backside of silicon wafer

method, aluminium was coated by vacuum evaporator as you can see in figure 4.



Fig 3. Si wafer with coating aluminum at backside

### III. RESULTS AND DISCUSSION

#### A. Photoluminescence characteristics of porous silicon from formation with different electrochemical etching cell

After finishing of formation porous silicon, ultraviolet was irradiate on samples to investigate porous layer and porosity layer of porous silicon by photoluminescence characteristics.

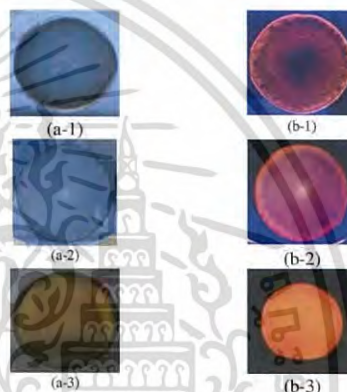


Fig. 4. Porous silicon samples and Photoluminescence of porous silicon form from formation with different electrochemical etching cell at current density 10 mA/cm<sup>2</sup>

From Fig.4 the result have shown photoluminescence of porous silicon form from formation with different electrochemical etching cell. Fig.4 (b-1) porous layer form formed by single tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer, the porosity layer have not uniformed and most porosity at edge (at O - ring area), because of this area was pressed with o - ring (a lot of stress at this area) is affect to electric current distribution poor. Fig.4 (b-2) porous layer form formed by single tank electrochemical etching cell with coating aluminum at backside of Si wafer, we can see the porosity layer are uniformed than formed by single tank electrochemical etching cell without coating Al at backside of Si wafer because aluminum at backside of Si wafer improve electric current distribution better, However, the porosity layer still on the edge of sample. Fig.4 (b-3) porous layer form formed by double tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer, the porosity layer are most uniformed were compared with forming by single tank

electrochemical etching cell without coating aluminum and with coating aluminum at backside of Si wafer, because both of front side and backside of silicon wafer were touch hydrofluoric acid is affected to electric current distribution better than two method as mentioned above.

#### B. Porosity of porous silicon from formation with different electrochemical etching cell by gravimetric method

The porosity layer (porosity percentage) from formation with different electrochemical etching are calculated by gravimetric method according equation (1). The result from measure was shown in Table 1.

TABLE I  
POROSITY PERCENTAGE OF POROUS SILICON

TYPE OF ELECTROCHEMICAL ETCHING CELL	CURRENT DENSITY (mA/cm <sup>2</sup> )	POROSITY (%)
1 SINGLE TANK ELECTROCHEMICAL ETCHING CELL WITHOUT COATING AL AT BACKSIDE OF SI WAFER	10	31.1
	15	39.42
	20	52.15
	25	64.22
2 SINGLE TANK ELECTROCHEMICAL ETCHING CELL WITH COATING AL AT BACKSIDE OF SI WAFER	10	34.4
	15	42.77
	20	55.55
	25	69.42
3 DOUBLE TANK ELECTROCHEMICAL ETCHING CELL WITH COATING AL AT BACKSIDE OF SI WAFER	10	46.15
	15	58.53
	20	71.42
	25	80.55

From table 1, porous silicon from formed by double tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer are highest porosity percentage when compared with formed by single tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer and formed by single tank electrochemical etching cell with coating aluminum at backside of Si wafer and data from table 1 was described by graph in Fig 5.

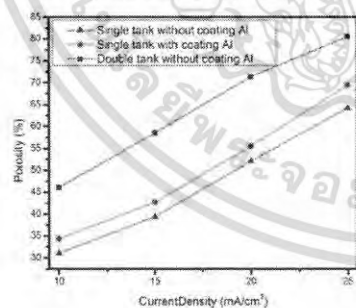


Fig 5. Porosity percentage of porous silicon form forming with different electrochemical etching cell

Fig 5. Demonstrate the effect of different current density on porosity percentage of porous silicon under different electrochemical etching cell. The porosity percentage from formed by double tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer was found in range 46.15%, 58.53%, 71.42 and 80.55%, from formed by single tank electrochemical etching cell with coating aluminum at backside of Si wafer porosity percentage in range 34.4%, 42.77%, 55.55% and 69.42%, from formed by single tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer was found in range 31.1%, 39.42%, 52.15% and 64.22% with increasing with current density 10 mA/cm<sup>2</sup> to 25 mA/cm<sup>2</sup> respectively. As we can see that the porosity from forming by double tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer was highest porosity because the double tank electrochemical etching cell silicon wafer were touch the hydrofluoric acid both of front side and backside. Therefore, electric current distributed better.

#### IV. CONCLUSION

Porous silicon were formed by electrochemical etching with different electrochemical etching cell including forming in single tank electrochemical without coating aluminum at backside of silicon wafer, forming in single tank electrochemical with coating aluminum at backside of silicon wafer and forming in double tank electrochemical without coating aluminum at backside of silicon wafer. The result have shown the porous layer form forming by double tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer are uniformed and best homogeneity layer. The porosity percentage increase from 31.1% to 64.22% by forming with single tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer, from 34.4% to 69.42% by forming with single tank electrochemical etching cell with coating aluminum at backside of Si wafer and increased from 46.15% to 80.55% by forming with double tank electrochemical etching cell without coating aluminum at backside of Si wafer. Moreover, porosity was increased with the increase of electric current density.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank you the Department of Microelectronics Engineering, Faculty of engineering, King mongkut's institute of technology ladkrabang (Bangkok, Thailand) for providing the materials and laboratory to carry out this research.

#### REFERENCES

- [1] A. Ullir, "Electrochemical Etching of Silicon in HF Acid," Tech.J., Vol. 35, pp. 333, 1965.
- [2] G.M. O'Halloran, P.J. Trimp, P.J. French, "A Porous Silicon Humidity Sensor," Solid State Device Research Conference, 1995. ESSDERC 95. Proceedings of the 25th European, pp. 347 - 350
- [3] Sellan, D.P., Turney, J.E., McGaughey, A.J.H., & Amon, C.H. (2010). Cross-plane phonon Applied physics, 108(11), 113524.
- [4] Farid A.Harraz, "Porous silicon chemical sensors and biosensors," Sensors and Actuators B 202 (2014), pp. 897-912

- [5] Phatthanapong P., Phanna B., Narin A. and Sumsak N., "The effect of Coating Aluminum at Backside of Silicon Wafer to Formation of Nanoporous silicon Layer by Anodization," EECON37 (2014), pp 673 - 676
- [6] R. Herino, G Bonchi, K. Barla and C. Bertrand, "Porosity and pore size distribution of porous silicon", J. Electrochem Soc : Solid State and Technology, Vol. 14, No. 8, pp. 1994-2000, 1987.



**Jiramet Intasom** received B.Eng degree in Computer Engineering from Rajamangala University of Technology Lanna.

Currently, is the Postgraduate Student at the Microelectronics Engineering, Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering of King mongkut's institute of technology ladkrabang, Thailand. His research focuses on nanomaterial and CMOS sensor platform.



**Narin Athiwongsangthong** received the B.Sc degree in Material Science from Chiangmai University, Thailand and M.Eng and D.Eng degree in Electrical Engineering from King mongkut's institute of technology ladkrabang, Thailand.

Currently, is the Lecturer at Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering of King mongkut's institute of technology ladkrabang ,Thailand. His research interest nanomaterial and thin film technology.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายจिरเมธ อินตะสม
วัน เดือน ปีเกิด	20 มกราคม 2534
ที่อยู่	38 หมู่ 15 ตำบลบ้านธิ อำเภอบ้านธิ จังหวัดลำพูน 51180
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) พอร์สซิลิคอนเซ็นเซอร์ 2.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

### ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Jiramet Intasom, Narin Atiwongsangthong, “Effect of Forming Porous Silicon with Different Electrochemical Etching Cell to Porosity Layer Under Various Anodization Currents Density.” International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017., Volume 2, pp : 756 – 759.
- [2] พรรณา บุระดา, จิรเมธ อินตะสม, นรินทร์ อติวงศ์แสงทองและสุรศักดิ์ เนียมเจริญ., “ผลความเข้มข้นของซิงค์อะซีเตตไดไฮเดรตที่มีต่อลักษณะโครงสร้างผลึกฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการโซล-เจลแบบหมุนเคลือบ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, เล่ม 2 หน้า 679-682.
- [3] จิรเมธ อินตะสม, พัฒนพงษ์ พรหมเกตู, พรรณา บุระดา, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การสร้างชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนด้วยวิธีแอโนไดซ์เซชันในเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแท่งคู่.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, หน้า 213 – 216.
- [4] จิรเมธ อินตะสม, วีระชัย พรประสิทธิ์ และนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, “ผลของอุณหภูมิในการแอนนีสที่มีต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจลแบบหมุนเคลือบ.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39, เล่ม 2 หน้า 583 - 586.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [5] จิรเมธ อินท๊ะสม, ภูครินทร์ ทองเกลี้ยง, วีระชัย พรประสิทธิ์ และนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, “การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความเป็นกรด – ด่าง แบบโครงสร้าง EGFET ที่มีซิลิคอนพอร์รัสเป็นเมมเบรน.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, หน้า 548-551.
- [6] วีระชัย พรประสิทธิ์, จิรเมธ อินท๊ะสม และนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, “การศึกษาโครงสร้างและคุณลักษณะทางแสงของฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโซล – เจลแบบหมุนเคลือบภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรท.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, หน้า 552-555.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้