

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออนเป็น
เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดอัตราการไหลและความเข้มข้นในท่อระดับ
ไมโครเมตร

**APPLICATIONS OF ION SENSITIVE FIELD EFFECT TRANSISTOR
DEVICES AS A SENSOR FOR LIQUID FLOW RATE AND
CONCENTRATION MEASUREMENT IN MICROCHANNEL**



กพ.
ธ 231ก
2553

สาขา.....
เลขทะเบียน 117062
วันเดือนปี 23 มิ.ย. 2554

b.....12332902
i.....

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-NT-M-001-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**APPLICATIONS OF ION SENSITIVE FIELD EFFECT TRANSISTOR
DEVICES AS A SENSOR FOR LIQUID FLOW RATE AND
CONCENTRATION MEASUREMENT IN MICROCHANNEL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL-2010-NT-M-001-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออนเป็นเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดอัตราการไหลและความเข้มข้นในท่อระดับไมโครเมตร

นักศึกษา

นายชนากร เขียมสกุล

รหัสประจำตัว

51064603

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.โอภาส ตรีทวีศักดิ์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออนได้ถูกนำมาใช้งานเป็นเซนเซอร์ที่ประกอบอยู่ในท่อของไหลระดับไมโครเมตร และนำไปประยุกต์ใช้งานในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล ได้แก่ การตรวจวัดอัตราการไหล การตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายและการตรวจวัดปริมาณคาร์บอนเนตในสารละลาย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออนสามารถวัดอัตราการไหลได้อยู่ในช่วงประมาณ 0.282-6.482 มิลลิลิตรต่อนาที โดยช่วงการวัดอัตราการไหลก็จะขึ้นกับปริมาตรของท่อของไหลระหว่างเซนเซอร์ และสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต โซเดียมฟอสเฟตและโซเดียมซัลเฟตในช่วงความเข้มข้น 10^{-4} – 1 โมลาร์ได้ ซึ่งลักษณะสัญญาณที่วัดได้จากสารละลายเข้มข้นค่าต่างๆ มีความเป็นเชิงเส้นดี รวมถึงสามารถตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนเนตในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอนเนตเข้มข้น 0.25 – 1 โมลาร์ได้

คำสำคัญ : อุปกรณ์ ISFET, ท่อของไหลระดับไมโครเมตร

Thesis Title	Applications of ion sensitive field effect transistor devices as a sensor for liquid flow rate and concentration measurement in microchannel
Student	Mr.Thanakorn Jiemsakul
Student ID	51064603
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jiti Nukeaw
Thesis Coadvisor	Dr.Opas Trithaveesak

ABSTRACT

In this research the applications of Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET) as integrated sensors in microfluidic channel were demonstrated. The following characteristics were studied: the fluid flow rate measurement, the solution concentration measurement and the carbonate ion detection in solution. From the results, the ISFETs based sensor can determine the flow rate in the range from 0.282 to 6.482 ml/min. However the detection range was also depended on volume of the channel between sensors. By the solution concentration measurement, the sensors can detect the concentration range of 10^{-4} – 1 molar of sodium nitrate (NaNO_3), sodium sulfate (Na_2SO_4) and sodium phosphate (Na_3PO_4) in the micro channel. The output signal shows linearly response with the concentration. Furthermore, the integrated sensor can also detect the hydrogen ions which generate from the reaction of hydrochloric acid with the sodium hydrogen carbonate solution in the concentration range from 0.25 – 1 molar.

Keywords : ISFET, microfluidic channel

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน ตั้งแต่ให้คำแนะนำและช่วยแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตรวจสอบและแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ อำนวยความสะดวกในเรื่องของสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ ในการทำวิจัย รวมถึงจัดหาทุนการศึกษาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร. โอภาส ศรีทวีศักดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับ งานวิจัยโดยสัมพันธ์กับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ ช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำงานวิจัย และ ตรวจสอบรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย ที่ให้ทุนการศึกษาที่ นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร ดร.สิริพัฒน์ ประโตนเทพ ดร.ทศยาภรณ์ ทิววงศ์ คุณวิน บรรจงปฎู รวมถึง คณาจารย์วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอีกหลายท่าน ที่ให้ คำแนะนำและแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัย ทำให้งานวิจัยมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.เบญจพล ต้นชู และ คุณยศวิต ราชณะสุข ที่ช่วยทำงานวิจัยและแก้ไขปัญหาในส่วน ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์และซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณ คุณสากล ระหงษ์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ในงานวิจัย และ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องของสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ดวงใจ นาคะปรีชา ดร.กาญจนา อุไรสินธุ์ และ ดร.ณัฐวุฒิ เริงชั้น ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย โดยเฉพาะในส่วนการประยุกต์งานของตัวอุปกรณ์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยใน ทุกๆด้าน โดยเฉพาะการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างและ วิเคราะห์ตัวอุปกรณ์ในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ มารดาและครอบครัว รวมถึงพี่น้องชาววิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอม เกล้าลาดกระบังทุกคน ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษาได้เป็นอย่างดี คุณประโยชน์ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายชนากร เจียมสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic System).....	6
2.2.1 หลักการทางฟิสิกส์ของระบบของไหลจุลภาค.....	7
2.2.2 วัสดุที่ใช้ในระบบของไหลจุลภาค.....	8
2.2.3 การสร้างระบบของไหลจุลภาค.....	8
2.2.4 ส่วนประกอบในระบบของไหลจุลภาค.....	9
2.2.5 ข้อดีของระบบของไหลจุลภาค.....	11
2.3 วิธีการวัดอัตราการไหลของอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์.....	12
2.3.1 วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์ thermal flow sensor.....	12
2.3.2 วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์ bubble flow meter.....	13
2.3.3 วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน ร่วมกับขั้ว ion generator.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4 วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออนชนิดเกตคู่ (double gate ISFET).....	15
2.4 อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน.....	17
2.4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน.....	17
2.4.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน.....	18
2.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน.....	20
2.5 RF Plasma Cleaner.....	21
2.5.1 หลักการทำงานของ RF Plasma Cleaner.....	21
2.5.2 หลักการของการประกบติด (Bonding) โดยใช้ RF Plasma Cleaner.....	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 การเตรียมตัวอุปกรณ์และการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน.....	23
3.1.1 การเตรียมตัวอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน.....	23
3.1.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน.....	27
3.2 การสร้างและการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์.....	28
3.2.1 การสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์.....	28
3.2.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์.....	33
3.3 การเตรียมระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหล.....	34
3.4 การวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์.....	38
3.4.1 รูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ.....	38
3.4.2 รูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศ.....	38
3.5 การนำอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี.....	39
3.5.1 การพัฒนาตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์โดยเพิ่มส่วนของขั้วอ้างอิง.....	39
3.5.2 การใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เพื่อวัดความเข้มข้นของสารละลาย.....	41
3.5.3 การใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เพื่อวัดปริมาณไฮโดรเจนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนในสารละลาย.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา v ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	48
4.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน และข้ออ้างอิงที่ประกอบอยู่ในตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิคอนเซนเซอร์.....	48
4.1.1 การวัดกระแสเกต - ศักย์ไฟฟ้าเกต ($I_{GS} - V_{GS}$).....	48
4.1.2 การวัดกระแสเดรน - ศักย์ไฟฟ้าเดรน ($I_{DS} - V_{DS}$).....	49
4.2 การวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิคอนเซนเซอร์.....	50
4.2.1 รูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ.....	51
4.2.2 รูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศ.....	54
4.3 การประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี.....	62
4.3.1 การใช้อุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิคอนเซนเซอร์เพื่อวัดความเข้มข้นของสารละลาย.....	62
4.3.2 การใช้อุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิคอนเซนเซอร์เพื่อวัดปริมาณไฮโดรเจน ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนในสารละลาย.....	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก ก. องค์ประกอบและการนำไปใช้งานของเซนเซอร์แต่ละชนิด.....	81
ภาคผนวก ข. การเปรียบเทียบค่ากระแสเกตและกระแสเดรน ของอุปกรณ์ ISFET หมายเลขต่างๆ.....	83
ภาคผนวก ค. ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับศักย์ไฟฟ้าเดรน ของอุปกรณ์ ISFET หมายเลขต่างๆ.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นชั้น ion sensing membrane.....	18
4.1 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.0055 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร.....	51
4.2 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.001375 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร.....	52
4.3 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.00925 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร.....	53
4.4 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.013 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร.....	55
4.5 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.0095 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร.....	56
4.6 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.008 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร.....	58
4.7 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.002375 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร.....	59
4.8 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.00475 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร.....	60
4.9 การเปรียบเทียบความกว้างของท่อนำของไหลที่มีผลต่อช่วงการวัดอัตราการไหล.....	61
4.10 การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ที่มีผลต่อช่วงการวัดอัตราการไหล.....	61
4.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมไนเตรตที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	63
4.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	63
4.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	64
4.14 ผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมไนเตรตเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 ผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดย อุปกรณ์ ISFET.....	65
4.16 ผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดย อุปกรณ์ ISFET.....	66
4.17 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับลวดเงิน เงินคลอไรด์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ 4, 7 และ 10.....	69
4.18 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับลวดเงิน เงินคลอไรด์ ในสารละลาย บัฟเฟอร์ 4, 7 และ 10 ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์.....	70
4.19 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายบัฟเฟอร์ 4, 7, 10 และค่าการตอบสนองที่ผ่านการแทรกครด HF เป็นเวลาต่างๆ.....	72
4.20 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้ว ในสารละลายบัฟเฟอร์ 4, 7 และ 10.....	73
4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้ว ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นค่าต่างๆ.....	74
4.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-ด่างของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับ ขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้วในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเข้มข้นค่าต่างๆ.....	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ห้องปฏิบัติการบนชิป (Lab-on-a-Chip) ที่สร้างด้วยเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค.....	7
2.2 ชิปที่สร้างขึ้นด้วยแม่แบบที่ทำจาก PDMS โพลิเมอร์.....	9
2.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ thermal flow sensor ที่ใช้ไดโอด 3 ตัวเป็นระบบเซนเซอร์.....	12
2.4 โครงสร้างของอุปกรณ์ bubble flow meter ที่ประกอบด้วย oxygen producer และ oxygen sensor.....	14
2.5 ลักษณะของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดจากอุปกรณ์ oxygen sensor.....	14
2.6 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่ใช้ ISFET ร่วมกับขั้ว ion generator.....	15
2.7 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่ใช้ double gate ISFET ร่วมกับขั้วโลหะไฟฟ้า.....	16
2.8 ลักษณะของสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดจาก double gate ISFET ร่วมกับขั้วโลหะไฟฟ้าสองขั้ว.....	16
2.9 โครงสร้างของอุปกรณ์ ISFET.....	18
2.10 ลักษณะแถบพลังงานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ.....	19
2.11 คุณสมบัติ $I_{DS} - V_{DS}$ ที่ศักย์ไฟฟ้า V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ.....	20
2.12 คุณสมบัติ $I_{DS} - V_{GS}$ ในสารละลาย pH 4, 7 และ 10 ที่ศักย์ไฟฟ้า V_{DS} คงที่.....	20
2.13 กระบวนการสร้างพลาสติกในหลอดสุญญากาศ.....	21
2.14 กระบวนการตัดแปลงผิวหน้าของ PDMS (surface modification) ด้วยออกซิเจนพลาสมา.....	22
3.1 อุปกรณ์ ISFET ที่ถูกผลิตบนฐานรองรับซิลิคอน.....	23
3.2 อุปกรณ์ ISFET ที่ติดลงบนแผ่นซิลิคอนด้วย photoresist.....	24
3.3 อุปกรณ์ ISFET ที่ติดด้วย Ni - mask ก่อนเข้าสู่กระบวนการ RF plasma.....	24
3.4 การจำลองกระบวนการ Ni electroplating.....	25
3.5 ขั้วโลหะนิกเกิลที่ได้จากกระบวนการ Ni electroplating.....	26
3.6 อุปกรณ์ ISFET ที่จะนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล.....	27
3.7 อุปกรณ์ ISFET ที่ติดบนแผ่นลายวงจรพิมพ์.....	27
3.8 ท่อนำของไหลที่ถูกออกแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์.....	28
3.9 ซิลิคอนโมลด์แบบในส่วนของท่อนำของไหล.....	29
3.10 ตัวอย่างการติดอุปกรณ์ ISFET และขั้วอ้างอิงลงบนท่อนำของไหล.....	29
3.11 อุปกรณ์ไมโครโฟลวเซนเซอร์.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12	แผนผังสรุปขั้นตอนการสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์.....31
3.13	การตรวจสอบการไหลของสารตัวอย่างภายในท่อของไหล.....33
3.14	ระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET.....34
3.15	ระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหล.....34
3.16	วงจรอ่านค่า pH ของอุปกรณ์ ISFET.....35
3.17	การพัฒนาระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหล.....36
3.18	วงจรที่ถูกพัฒนา โดยการรวมวงจรอ่านค่า pH ทั้งสองวงจรเข้าด้วยกัน.....37
3.19	ซอฟต์แวร์ LabVIEW ที่ในการประมวลผลอัตราการไหล.....37
3.20	โครงสร้างของอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นท่อของไหล ที่อยู่ขนานกัน.....39
3.21	อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นท่อของไหลที่อยู่ขนานกัน.....40
3.22	อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อของไหล.....40
3.23	ขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนไมโครแชมเบอร์.....41
3.24	ระบบการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายโดยการวัดค่าการนำไฟฟ้า.....42
3.25	ระบบการวัดปริมาณไฮโดรเจนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนेटในสารละลาย.....44
3.26	การเตรียมระบบ Membraneless vaporization.....45
3.27	แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....47
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{GS} กระแส I_{DS} กับศักย์ไฟฟ้า V_{GS} ที่ค่า V_{DS} คงที่.....49
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} กับศักย์ไฟฟ้า V_{DS} ที่ค่า V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ.....50
4.3	ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.0055 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร.....52
4.4	ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.001375 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร.....53
4.5	ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.00925 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร.....54
4.6	ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.013 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร.....56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา X ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.0095 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร.....	57
4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.008 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร.....	58
4.9 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.002375 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร.....	59
4.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.00475 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร.....	60
4.11 ลักษณะสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมไนเตรด ที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	63
4.12 ลักษณะสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	64
4.13 ลักษณะสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมฟอสเฟต ที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	64
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายกับความเข้มข้นของสารละลายค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	66
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมไนเตรดเข้มข้นค่าต่างๆ.....	67
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายค่าต่างๆ.....	67
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET.....	68
4.18 ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับหลอดเงิน เงินคลอไรด์ในสารละลายบัฟเฟอร์.....	70
4.19 ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับหลอดเงิน เงินคลอไรด์ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์.....	70
4.20 ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแห้งแก้วในสารละลายบัฟเฟอร์.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้ว ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นค่าต่างๆ.....	74
4.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้ว ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเข้มข้นค่าต่างๆ.....	75



บทที่ 1

บทนำ

อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร (Micro Flow Sensor) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้าน เช่น งานทางด้านเคมีวิเคราะห์ ด้านการแพทย์ รวมถึงงานอุตสาหกรรมบางประเภท [1-4] โดยตัวอุปกรณ์ก็มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือ สามารถตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างในปริมาณน้อยได้ มีขนาดเล็กจึงง่ายต่อการพกพา ในการไปปฏิบัติงานนอกสถานที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน (Ion Sensitive Field Effect Transistor: ISFET) ที่ใช้วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง มาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล จึงทำให้ในงานวิจัยนี้มีความน่าสนใจที่จะนำตัวอุปกรณ์ไปใช้งานทางด้านชีวเคมีได้

ในบทนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐานและขอบเขตของงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวมีความสำคัญต่องานทางด้านเคมีวิเคราะห์ ด้านการแพทย์ ตลอดจนอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม อาหาร เครื่องสำอางและยา ซึ่งเป็นกระบวนการพื้นฐานในการกำหนดความเร็วของสารตัวอย่างในการเข้าทำปฏิกิริยา รวมถึงการวัดความหนืดที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

โดยวิธีการวัดอัตราการไหลโดยทั่วไปจะเป็นการวัดปริมาตรของของเหลวในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง แล้วนำไปคำนวณเป็นอัตราการไหล ซึ่งถือเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายแต่เสียเวลาค่อนข้างนานและใช้สารตัวอย่างปริมาณมาก ดังนั้นจึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะศึกษาและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่สามารถวัดได้รวดเร็ว และใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย

อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตรเริ่มมีการศึกษาและทำการสร้างในปีคริสต์ศักราช 1974 โดยอุปกรณ์ไดโอดตัวหนึ่งทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างที่ต้องการจะวัดอัตราการไหล แล้วใช้ไดโอดอีกตัววัดอุณหภูมิของสารที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้จากปริมาตรของของเหลวระหว่างไดโอดต่อผลต่างเวลาตั้งแต่ไดโอดตัวที่เริ่มให้ความร้อน จนกระทั่งไดโอดตัวที่สองวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้ [5] ซึ่งรูปแบบการวัดอัตราการไหลแบบนี้จะเกิดปัญหาในกรณีที่สารตัวอย่างสัมผัสความร้อนไม่ได้ อาจทำให้สารตัวอย่างเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไป เป็นต้น จึงได้มีการพัฒนารูปแบบการวัดอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในเพื่อการค้าเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปัจจุบันรูปแบบการวัดอัตราการไหลที่ได้รับความนิยมคือการผ่านของเหลว สลับกับท่อนอากาศเพื่อให้ตัวตรวจจับสัญญาณของไหลเกิดสัญญาณที่เปลี่ยนแปลง แล้วนำไป คำนวณเป็นอัตราการไหล [6] หรือ ใช้การวัดความนำไฟฟ้าของขั้วโลหะไฟฟ้าขณะที่มีของเหลวไหลผ่าน ซึ่งรูปแบบการวัดที่กล่าวข้างต้นนั้น สามารถวัดอัตราการไหลได้ใกล้เคียงกับวิธีชั่ง ปริมาตร ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ตัวตรวจวัดอัตราการไหลโดยประยุกต์อุปกรณ์ ISFET มาใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล ซึ่งอุปกรณ์ ISFET มักจะถูกนำไปประยุกต์ใช้งาน ทางด้านชีวเคมี จึงเป็นจุดเด่นของตัวอุปกรณ์คือนอกจากจะวัดอัตราการไหลได้แล้ว ยังสามารถ วิเคราะห์ตัวสารในเชิงชีวเคมีได้อีกด้วย

อุปกรณ์ ISFET เริ่มต้นมีการศึกษาในปีคริสต์ศักราช 1970 โดย Piet Bergveld [7] ได้นำเสนอ ผลงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการนำอุปกรณ์มอสเฟทมัลติลอกชั้น โลหะเกตออก แล้วนำตัวอุปกรณ์ไปวัด สมบัติทางไฟฟ้าในสารละลาย พบว่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลาย และ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลจากขั้วเดรน ไปซอสเกิดการเปลี่ยนแปลง ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของ ไอออนในสารละลาย Piet Bergveld ได้อธิบายว่าชั้นฉนวนบริเวณขั้วเกตทำหน้าที่เป็นเมมเบรนที่ไว ต่อไอออน (Ion Sensing Membrane) โดยการใช้งานอุปกรณ์ ISFET ต้องต่อร่วมกับขั้วโลหะไฟฟ้า อ่างอิงแล้วมุ่งลงในสารละลายที่ต้องการจะวัด ซึ่งจะให้สัญญาณที่วัดจากตัว ISFET มีความคงที่และ แม่นยำยิ่งขึ้น [8]

ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะนำอุปกรณ์มาประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี วัสดุที่จะนำมาใช้ทำตัว อุปกรณ์จะต้องไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารตัวอย่าง จึงได้เลือกวัสดุ polydimethylsiloxane (PDMS) มาใช้ สร้างเป็นส่วนของท่อนำของไหล เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวเคมี และยังมีลักษณะโปร่งแสง ทำให้สามารถสังเกตเห็นการไหลของสารตัวอย่างภายในท่อนำของไหลได้ [9]

กล่าวโดยภาพรวมของงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลว ที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร โดยมีอุปกรณ์ ISFET เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล แล้วนำไป ประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีของไหล

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงรูปแบบการวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร โดยมีอุปกรณ์ ISFET เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล
2. เพื่อศึกษาถึงหลักการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของอุปกรณ์ ISFET เพื่อจะ นำไปวัดอัตราการไหลและประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี
3. เพื่อศึกษาถึงการสร้างระบบขนส่งและควบคุมของไหล รวมถึงระบบประมวลผลอัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เพื่อวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวกับตัวอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลว ที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีได้

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์ ISFET 2 ตัว ทำงานร่วมกับขั้วโลหะ 2 ขั้วในการตรวจจับสัญญาณการไหล น่าจะสามารถนำไปคำนวณเป็นอัตราการไหลของสารตัวอย่างได้ โดยนำปริมาตรของของเหลวระหว่างตัว อุปกรณ์ ISFET และผลต่างเวลาเมื่อทั้ง 2 สัญญาณที่ตรวจวัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปคำนวณเป็นอัตราการไหล นอกจากนี้ตัวอุปกรณ์ ISFET ยังสามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย จึงน่าจะเป็นประโยชน์ในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษาถึงหลักการทํางาน กระบวนการสร้างพื้นฐานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET แล้วเตรียมบรรจุภัณฑ์ตัวอุปกรณ์เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล นำตัวอุปกรณ์ไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระแสและศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอส เพื่อพิสูจน์ว่าอุปกรณ์ ISFET ยังคงมีพฤติกรรมเป็นทรานซิสเตอร์ และทำการวัดกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์เพื่อตรวจสอบว่าไม่เกิดกระแสไหลผ่านฐานรองรับซิลิคอนมากเกินไป จากนั้นทำการศึกษารูปแบบการวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร ก่อนจะทำกรออกแบบและรูปแบบการวางตำแหน่งของระบบตรวจจับสัญญาณการไหลภายในท่อ นำของไหล หลังจากนั้นทำการสร้างตัวอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่มีส่วนของท่อ นำของไหลเป็นวัสดุ PDMS และมีฐานรองรับเป็นกระจก ซึ่งมีขนาดของท่อ นำของไหล 500, 1,000 และ 2,000 ไมโครเมตร และระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับสัญญาณค่าต่างๆ แล้วนำตัวอุปกรณ์ไปตรวจสอบการไหลภายในท่อเพื่อตรวจดูการรั่วซึม ขึ้นตอนสุดท้ายทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ ISFET อีกครั้ง แล้วนำตัวอุปกรณ์ไปทดสอบวัดอัตราการไหลตามรูปแบบการวัดที่ได้ศึกษา มา ก่อนนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของอุปกรณ์ ISFET และรูปแบบการวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร
2. สามารถออกแบบและสร้างเซนเซอร์ที่ประกอบขึ้นจากอุปกรณ์ ISFET ที่อยู่ภายในท่อของไหลระดับไมโครเมตร และนำไปวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างรวมถึงนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีได้
3. สามารถสร้างชุดต้นแบบที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์ ระบบควบคุมสารตัวอย่าง และระบบประมวลผลที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ได้
4. สามารถวิเคราะห์ถึงปัญหาและข้อจำกัดของตัวอุปกรณ์ พร้อมทั้งพัฒนาตัวอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้
5. หน่วยงานวิจัยสามารถนำตัวอุปกรณ์ไปพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านไบโอเซนเซอร์หรือนำไปใช้งานในภาคสนามได้

1.6 รายละเอียดของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตของการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร ซึ่งจะเริ่มด้วยระบบของไหลจุลภาค รูปแบบการวัดอัตราการไหล หลักการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล รวมถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหล

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยการเตรียมตัวอุปกรณ์ ISFET การสร้างอุปกรณ์ไมโครโฟลวเซนเซอร์และการตรวจสอบคุณสมบัติก่อนนำไปใช้ในการวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่าง การเตรียมระบบวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหล รวมถึงรูปแบบการวัดอัตราการไหลด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำเปรียบเทียบกับการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศ ในส่วนสุดท้ายเป็นการนำตัวอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี โดยการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต โซเดียมซัลเฟต และ โซเดียมฟอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมถึงการวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

บทที่ 4 เป็นผลการทดลองและวิเคราะห์ผล เริ่มด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ภายในอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ ผลการวัดอัตราการไหลด้วยรูปแบบการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำเปรียบเทียบกับการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำอากาศ ผลการประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี โดยใช้อุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์วัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต โซเดียมซัลเฟต และโซเดียมฟอสเฟตเปรียบเทียบกับการวัดค่าการนำไฟฟ้า และนำตัวอย่างไปปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

บทที่ 5 เป็นบทสรุป และข้อเสนอแนะของงานวิจัยทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทํางาน

2.1 บทนำ

ปัจจุบันการตรวจวิเคราะห์ทางด้านชีวเคมีต้องการเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้อย่างรวดเร็ว ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้ง่าย รวมถึงใช้สารตัวอย่างในการตรวจวิเคราะห์ปริมาณน้อย ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร (Micro Flow Sensor) โดยมีทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน (Ion Sensitive Field Effect Transistor: ISFET) เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล ซึ่งลักษณะของสัญญาณของไหลที่เปลี่ยนแปลงไปก็คือค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายของอุปกรณ์ ISFET [10] ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายถึง ระบบของไหลจุลภาค รูปแบบการวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร หลักการทํางานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET รวมถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหล

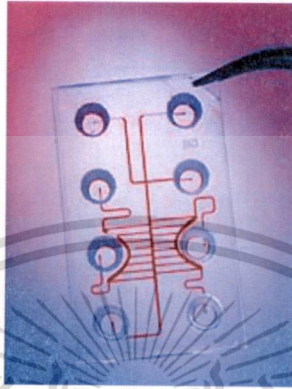
2.2 ระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic System)

ปัจจุบันการตรวจวิเคราะห์ทางด้านชีวเคมีมุ่งเน้นพัฒนางานทางการแพทย์ โดยที่สามารถตรวจวิเคราะห์เบื้องต้นนอกห้องปฏิบัติการ ที่เรียกว่า Point of care Diagnostics ด้วยเครื่องมือที่รวดเร็ว พกพาง่าย และมีขนาดเล็ก ดังนั้นแนวโน้มการวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีขนาดย่อมส่วนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจของนักวิจัยทั่วโลก เทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจและสามารถนำมาใช้สร้างเครื่องมือดังกล่าวก็คือ เทคโนโลยีระบบเครื่องไฟฟ้าจุลภาค หรือ Micro-Electronic-Mechanical-System (MEMS) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการสร้างโครงสร้างที่มีขนาดระหว่าง 100 nm ไปถึง 1,000 μm โดยที่นำเทคนิคในการสร้างวงจรรวมทางอิเล็กทรอนิกส์ (Integrated Circuit หรือเรียกย่อว่า IC) มาใช้ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวสร้างอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยท่อที่มีขนาดระดับไมโครเมตรที่สามารถเก็บของเหลวปริมาณน้อยมากในระดับไมโครลิตรหรือนาโนลิตร เรียกว่าระบบของไหลจุลภาค หรือไมโครฟลูอิดิก (Microfluidics) ท่อดังกล่าวมีขนาดตั้งแต่มิลลิเมตรไปจนถึงไมโครเมตร ระบบไมโครฟลูอิดิกจึงเป็นการย่อยส่วนของระบบของไหลตามท่อ โดยมีเทคนิคในการจัดการกับของเหลวปริมาณน้อยมากเป็นกุญแจสำคัญ ระบบของไหลจุลภาคไม่เป็นเพียงแค่การย่อยส่วนอุปกรณ์ต่างๆ

ให้เล็กลงเท่านั้นแต่ต้องการการออกแบบที่แตกต่างออกไป ซึ่งเรียกว่า ผลจากการย่อส่วน (Scaling

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect) ในโลกของไมโครฟลูอิดิกของเหลวจะไหลในลักษณะเป็นชั้น (Laminar Flow) ไม่ผสมกัน แรงตึงผิว (Surface Tension) ของของเหลวจะมีผลเป็นอย่างมาก ดังนั้นปรากฏการณ์ที่ไม่มีในระบบปกติจะแสดงให้เห็น ในบางครั้งจึงมีการกำหนดความหมายของระบบไมโครฟลูอิดิกให้กว้าง ครอบคลุมปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงไม่เป็นเพียงแต่ระบบย่อยส่วนเท่านั้น



รูปที่ 2.1 ห้องปฏิบัติการบนชิป (Lab-on-a-Chip) ที่สร้างด้วยเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค [32]

2.2.1 หลักการทางฟิสิกส์ของระบบของไหลจุลภาค

หลักการทางฟิสิกส์ของระบบของไหลจุลภาคนั้นมีเหมือนกับระบบของไหลปกติเพียงแต่ ปรากฏการณ์ที่มีผลนั้นแตกต่างกันเนื่องจากการยอส่วน (Surface Tension) ที่ชัดเจนได้แก่ การกระจายความร้อน (Thermal Diffusion) ในระบบของไหลจุลภาคเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ลักษณะการไหลก็จะเป็นแบบชั้นไม่ผสมกัน (Laminar Flow) มีผลมากจนเกิดปรากฏการณ์การไหลด้วยแรงตึงผิวไปตามท่อ (Capillary Phenomena) ข้อแตกต่างของระบบของไหลจุลภาคนี้ทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์ที่ไม่เคยมีมาก่อน

ในทอระดับไมโครเมตรนั้น ของเหลวจะไหลแบบชั้นเนื่องจากค่า Reynolds Number เท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertial Force) กับแรงหนืด (Viscosity) ของของไหลนั้นต่ำกว่า 1,500 – 2,000 ทำให้ลักษณะการไหลไม่เกิดการกวน (Turbulence)

การยอส่วนไม่เพียงแต่ลดขนาดของท่อเท่านั้นแต่ยังมีอุปสรรคที่ทำให้ทายรอกการแก้ไขได้แก่ ปัญหาความไม่บริสุทธิ์ของสาร (Impurities) และ ปัญหาเกี่ยวกับฟองอากาศ (Gas Bubble) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำระบบของไหลจุลภาคไปใช้เป็นเครื่องมือภาคสนาม ต้องมีการนำของเหลวต่างๆ เข้าและออกจากระบบ การออกแบบระบบเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องมีเทคนิคการกรองเพื่อแก้ปัญหาเพราะแม้แต่อณูภาคขนาดปกติและฟองอากาศเพียงฟองเดียวอาจทำให้ระบบทั้งระบบไม่ทำงานตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาท้าทายอีกอย่างหนึ่งคือ การลดปริมาตรของสารตัวอย่างซึ่งเป็นผลดีในแง่ของการลดสารเคมีในการทำปฏิกิริยา (Reagent) แต่หมายถึงการลดลงของสัญญาณการตรวจจับอีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการย้อมสี, การติดฉลาก (Labeling), การตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพ หรือมีเทคนิคการเตรียมความเข้มข้นของสาร อย่างไรก็ตามในบางกรณีที่มีความเข้มข้นของโมเลกุลเป้าหมายในสารตัวอย่างไม่เพียงพอเมื่อปริมาตรลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเทคนิคการแยก (Separation) เพื่อที่จะสามารถใช้สารตัวอย่างได้ทั้งหมด

2.2.2 วัสดุที่ใช้ในระบบของไหลจุลภาค

ระบบของไหลจุลภาคสามารถสร้างขึ้นด้วยเทคนิคเดียวกันกับการสร้างวงจรรวมไอซี ดังนั้นซิลิคอน (Silicon) จึงเป็นวัสดุแรกๆ ที่มีการนำมาใช้ แต่ต้องมีการศึกษาเรื่องปฏิสัมพันธ์ของพื้นผิว (Surface Interaction) เป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันวัสดุประเภทแก้วและโพลีเมอร์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางแทนที่ซิลิคอนเนื่องจากราคาที่ถูกลงกว่า แนวโน้มการใช้โพลีเมอร์มาทดแทนแก้วซึ่งมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีกว่าก็กำลังเป็นที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ PMMA (Polymethylmethacrylate) หรือที่เรียกว่า Plexiglas หรือ Perspex และ Acrylic, PC (Polycarbonate), PSU (Polycarbonate), PP (Polypropylene) และ PDMS (Polydimethylsiloxane) ปกติแล้ว PMMA PC และ PSU เป็นวัสดุที่ใช้ในขบวนการสร้างแบบ โครงสร้างที่มีความหนาแน่นมากเป็นพิเศษ (LIGA Process) PDMS เป็น Elastomer ชนิดหนึ่งที่เหมาะสำหรับการสร้างแบบหล่อรูปถึงแม้ว่าจะมีปัญหาเกี่ยวกับการหดตัว วัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในระบบของไหลจุลภาคได้แก่ โลหะ เช่น ทองคำ เงิน แพลทินัม ฯลฯ นำมาใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าหรือเป็นองค์ประกอบของส่วนตรวจวัด วัสดุประเภท Active Material สามารถนำมาใช้สร้างแอกทิวเอเตอร์ต่างๆ เช่น ไมโครปั๊มหรือไมโครวาล์วก็สามารถสร้างขึ้นด้วยวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหดเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่วัสดุ วัสดุอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการสร้างโครงสร้างที่เคลื่อนที่ได้ เช่น Diaphragm ของไมโครปั๊มหรือไมโครวาล์ว เรียกว่า Shape Memory Alloy หรือ SMA ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถจดจำรูปร่างเดิมของมัน เมื่อให้ความร้อน โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนแปลงไป เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง แต่เมื่ออุณหภูมิลดลง มันจะกลับสู่สภาพรูปร่างเดิมอีกครั้ง

2.2.3 การสร้างระบบของไหลจุลภาค

กระบวนการสร้างส่วนต่างๆ ในระบบของไหลจุลภาคนั้นอาศัยเทคนิคในการสร้างวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ซิลิคอนเป็นหลัก เรียกว่า Silicon Micro fabrication โดยมีขั้นตอนการสร้าง ลวดลายด้วยการฉายแสง (Photolithography) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้เกิดลวดลายตามที่ต้องการแบบเอาไว้ และที่นิยมมากในปัจจุบันคือขบวนการสร้างด้วยวัสดุประเภทโพลีเมอร์ที่ต้องอาศัย การหล่อแบบขึ้นรูป (Molding) ทำให้ได้ต้นแบบที่มีราคาถูกกว่าและง่ายกว่าในการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้างอีกแบบที่ใช้ในขบวนการสร้างโครงสร้างที่มีความหนาและมีความสูงมากเรียกว่า LIGA ที่มาจากภาษาเยอรมันที่แปลว่า Lithography Electroplating และ Molding อาศัยการใช้แสงที่มีกำลังสูง เช่น รังสีเอ็กซ์ มาสร้างต้นแบบที่มีลวดลายและมีผนัง โครงสร้างที่เรียบและตั้งฉากกับแผ่นฐานรอง หลังจากนั้นจึงนำแม่แบบนี้ไปหล่อขึ้นรูปด้วยการเคลือบด้วยไฟฟ้า แล้วจึงถอดแบบนำไปใช้เป็นแม่แบบในการหล่อขึ้นรูปต่อไป การสร้างร่องที่มีผนังที่เรียบและตั้งฉากนั้นสามารถสร้างขึ้นด้วยกระบวนการอีกแบบหนึ่งที่เรียกว่า การกัดแบบลึก (Deep Reactive Ion Etching หรือ DRIE) อาศัยการกัดด้วยการปะทะของประจุและทำปฏิกิริยาเคมีบริเวณผิว นอกจากนี้ยังมีกระบวนการสร้างเชิงปริมาณ (Mass Production) โดยใช้การฉีดขึ้นรูปแบบละเอียด (Microinjection Molding) ซึ่งอาศัยการฉีดพลาสติกที่หลอมเหลวเข้าไปในแม่แบบประกบด้วยแรงดันสูง หลังจากนั้นจึงทำให้เย็นลงและแข็งตัว จึงถอดออกจากแบบและประกบเป็นชิปที่สมบูรณ์ และเทคนิคกระบวนการที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบันคือ ขบวนการ Soft Lithography เป็นขบวนการหล่อขึ้นรูปด้วย PDMS โพลีเมอร์บนแม่แบบ (Master) ที่ทำจากซิลิคอนเวเฟอร์ หรือการกำหนดลวดลายด้วยการพิมพ์ (Stamping) ด้วยแม่แบบที่ทำจาก PDMS โพลีเมอร์ ขบวนการ Soft Lithography มีหลายเทคนิคคือ การหล่อขึ้นรูปแบบเท, การหล่อขึ้นรูปแบบใช้แรงดึงดูตามท่อ (Capillary Micro-molding), การถ่ายลวดลายแบบพิมพ์สัมผัส (Micro-contact Printing) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ชิปที่สร้างขึ้นด้วยแม่แบบที่ทำจาก PDMS โพลีเมอร์

2.2.4 ส่วนประกอบในระบบของไหลจุลภาค

ในระบบจุลภาคหนึ่งๆ อาจจะประกอบด้วยท่อ หัวฉีด ปัมป์ ช่อง ตัวผสม ส่วนกรอง วาล์ว เซนเซอร์ ฯลฯ การสร้างชิปของระบบของไหลจุลภาคหนึ่งๆ ต้องอาศัยความรู้อย่างลึกซึ้งเรื่องของผลการย่อยสลาย วิทยาศาสตร์เกี่ยวกับพื้นผิว คุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามต้องการและถูกต้อง ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในระบบของไหลจุลภาคได้แก่เครือข่ายของท่อขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงส่วนต่างๆ ในระบบ ปกติจะเป็นท่อปิดที่มีขนาดตั้งแต่ไมโครเมตรจนถึงขนาดนาโนเมตร ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ฟิลเตอร์หรือตัวกรอง (Filter) เป็นส่วนสำคัญในช่วงของระบบที่มีการนำของไหลเข้าสู่ระบบ มีหลายเทคนิคที่นำมาใช้ เช่น การสร้างรูพรุน (Sieve) หรือการสร้างช่องด้วยเสา (Poles) เพื่อป้องกันอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือช่องว่างระหว่างเสาไหลผ่านไปได้ หรือการเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลจากแบบชั้น (Laminar Flow) ไปเป็นแบบกวนวน (Turbulent Flow) ต้องอาศัยตัวขวาง (Obstruction) การไหลเพื่อเกิดการกวนผสมระหว่างการไหล
2. ไมโครวาล์ว (Micro-valve) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมการไหลในท่อด้วยการปิดเปิดประตูกั้น แบ่งออกเป็นสองชนิดได้แก่ ชนิด Passive และชนิด Active ไมโครวาล์วชนิด Passive นั้นอาศัยความดันที่แตกต่างระหว่างด้านทั้งสองของวาล์วเพื่อควบคุมการปิดเปิด ไม่ต้องมีแอกทิเวเตอร์มาขับเคลื่อนแต่ไมโครวาล์วแบบ Active นั้นอาศัยอุปกรณ์ขับเคลื่อนเพื่อควบคุมการทำงาน มีอยู่หลายชนิดได้แก่ Pneumatic, Thermopneumatic, Thermo mechanical, Piezoelectric, Electrostatic, Electromagnetic, Electrochemical, Capillary Force เป็นต้น
3. ไมโครปั๊ม (Micro-pump) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยปั๊มของเหลวในระบบให้สามารถไหลในท่อไปตามส่วนต่างๆ ได้โดยมีทั้งแบบชนิด Mechanical และ Non-Mechanical ไมโครปั๊มแบบ Mechanical อาศัยการสร้างแรงดันจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ Chamber ในปั๊มเป็นการถ่ายทอดพลังงานทางกลไปสู่ของไหลโดยตรง ไมโครปั๊มแบบกลมีอยู่หลายชนิด ตัวอย่างเช่น Peristaltic, Reciprocating, Rotary Pumps เป็นต้น ไมโครปั๊มแบบ Non-Mechanical นั้นสามารถเคลื่อนของไหลไปตามท่อโดยไม่อาศัยพลังงานกล ไม่มีส่วนใดๆ เคลื่อนไหว แต่อาศัยพลังงานอื่นๆ เช่น แรงดึงผิว การขยายจากพลังงานความร้อน แรงจากสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก เป็นต้น
4. การสร้างหยด (Droplet) ของเหลวขนาดเล็กที่มีปริมาตรในระดับนาโนลิตรหรือพิโคลิตรเป็นส่วนหนึ่งของระบบที่จำเป็นกับการใช้บางอย่างต้องอาศัยหัวฉีด (Nozzle) ที่ควบคุมด้วยไฟฟ้าโดยสามารถใช้หลักการเดียวกันกับการสร้างหยดหมึกในเครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท
5. ไมโครมิกเซอร์ (Micro-mixer) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยผสมสารเคมีเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยปกติแล้วการผสมในระดับจุลภาคนั้นอาศัยการแพร่ของสาร เพราะการไหลในระดับจุลภาคเป็นแบบชั้น เวลาที่ใช้ในการผสมหรือเวลาในการแพร่ของสารก็ขึ้นอยู่กับระยะที่สารสองชนิดมาผสมกัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดการผสมที่รวดเร็ว จึงต้องออกแบบให้มีพื้นที่สัมผัสของสารสองชนิดให้มากที่สุด ไมโครมิกเซอร์ก็เช่นเดียวกัน แบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ แบบ Active และแบบ Passive ไมโครมิกเซอร์แบบ Active นั้นอาศัยการกวนด้วยการปั๊มหรือใบพัดขนาดจิ๋ว ในขณะที่ไมโครมิกเซอร์แบบ Passive นั้นอาศัยการกวนด้วยการปั่นหรือใบพัดขนาดจิ๋ว ในขณะที่ไมโครมิกเซอร์แบบ Passive นั้นอาศัยการกวนด้วยการปั่นหรือใบพัดขนาดจิ๋ว

โครมิกเซอร์แบบ Passive นั้นไม่มีส่วนใดๆ ที่เคลื่อนที่โดยอาศัยการแพร่ของสารโดยตรง

6. ไมโครรีแอกเตอร์ (Micro-reactor) เป็นอีกส่วนที่สำคัญของระบบที่เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี มีลักษณะเป็นหลุมหรือช่องที่มีขนาดเล็กที่สารมากกว่าหนึ่งชนิดมาผสมกัน การที่มีขนาดเล็กช่วยทำให้การนำความร้อนเกิดได้รวดเร็วขึ้น การกระจายความร้อนสม่ำเสมอ อัตราส่วนระหว่างพื้นผิวและปริมาตรสูงขึ้น จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดสารเคมีและค่าใช้จ่าย
7. ไมโครเซนเซอร์ (Micro-sensor) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการตรวจวัดในระบบ เช่น เซนเซอร์สำหรับวัดความเข้มข้นของสารละลาย, เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดทางชีวภาพ (Biosensor), เซนเซอร์วัดอัตราการไหล (Flow sensor), เซนเซอร์วัดความเป็นกรดหรือด่าง (pH Sensor), เซนเซอร์ทางเคมี (Chemical Sensor) เป็นต้น ไมโครเซนเซอร์ก็มีมากมายหลายชนิด เช่น เซนเซอร์แบบเคมีคอนดักเตอร์ เซนเซอร์แบบฟิล์มบาง เซนเซอร์แบบความต้านทาน เป็นต้น
8. ส่วนการแยก (Separation) เป็นขั้นตอนสุดท้ายในระบบที่จะบ่งบอกว่าสารนั้นเป็นสารชนิดใด อาศัยเทคนิคต่างๆ มากมาย เช่น Gas Chromatography, Liquid Chromatography, Capillary Electrophoresis, Mass Spectrometry, Flow Injection Analysis เป็นต้น

2.2.5 ข้อดีของระบบของไหลจุลภาค

1. ขนาดเล็กของระบบช่วยให้สามารถพกพาไปติดตั้งหรือทำการทดลองได้
2. ราคาถูกเมื่อผลิตจำนวนมากเพราะอาศัยการผลิตแบบ Batch Fabrication คล้ายการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์ชิป
3. ใช้พลังงานน้อยเนื่องจากการย่อส่วน
4. ประหยัดสารเคมี (Reagent) ที่มีราคาแพงและลดค่าใช้จ่าย
5. ประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากการปนเปื้อนและความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน
6. สามารถใช้ในงานที่ต้องการตรวจซ้ำเป็นจำนวนมาก (High Throughput) โดยอาศัยการสร้างระบบแบบขนาน (Parallel Processing)
7. ลดขั้นตอนการทำงาน เช่น ขั้นตอนการเตรียมสารซึ่งสามารถทำได้บนชิปเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานเนื่องจากใช้สารอันตรายน้อยลง

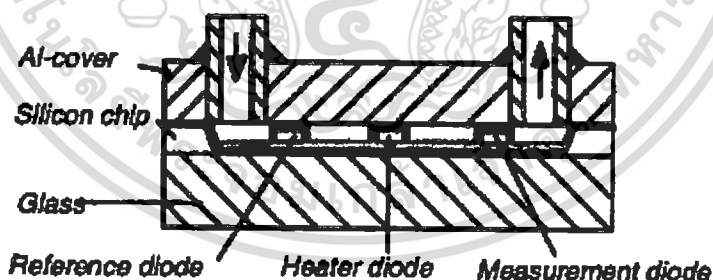
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วิธีการวัดอัตราการไหลของอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์

อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตรหรืออุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เริ่มมีการศึกษาและทำการสร้างในปีคริสต์ศักราช 1974 โดยนำมาใช้วัดอัตราการไหลของสารเคมีในงานด้านเคมีวิเคราะห์ ซึ่งตัวอุปกรณ์ประกอบไปด้วยไดโอดทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างที่ต้องการจะวัดอัตราการไหล แล้วใช้ไดโอดอีกตัววัดอุณหภูมิของสารที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วคำนวณหาอัตราการไหลได้จากปริมาตรของของเหลวระหว่างไดโอดต่อผลต่างเวลาตั้งแต่ไดโอดตัวที่เริ่มให้ความร้อน จนกระทั่งไดโอดตัวที่สองวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้ โดยวิธีการวัดแบบนี้สามารถหาอัตราการไหลของสารเคมีได้รวดเร็วกว่าวิธีการชั่งปริมาตรแต่จะเกิดปัญหาในกรณีที่สารเคมีสัมผัสความร้อนไม่ได้ อาจทำให้สารเคมีเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไป จึงทำให้มีการพัฒนาตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์และวิธีการวัดอัตราการไหลอยู่อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการวัดอัตราการไหลรวมถึงโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่มีการสร้างตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

2.3.1 วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์ thermal flow sensor

อุปกรณ์ thermal flow sensor เป็นตัวอุปกรณ์ที่นำมาใช้วัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตรตั้งแต่แรกเริ่ม ซึ่งตัวอุปกรณ์หลักจะประกอบไปด้วยเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่ให้อุณหภูมิและเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ [5]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ thermal flow sensor ที่ใช้ไดโอด 3 ตัวเป็นระบบเซนเซอร์

จากรูปที่ 2.3 แสดงถึงโครงสร้างอุปกรณ์ thermal flow sensor ซึ่งประกอบไปด้วยไดโอด 3 ตัว โดยไดโอดตัวที่อยู่กึ่งกลางทำหน้าที่ให้ความร้อน (heater diode) ตัวที่อยู่ทางขวาของรูปทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของสารตัวอย่าง (measurement diode) ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสารตัวอย่างไหลผ่านไดโอดตัวกลางที่ทำหน้าที่ให้ความร้อน ส่วนไดโอดตัวที่อยู่ทางซ้ายของรูปหรือไดโอดตัวแรก ที่สัมผัสสารตัวอย่างจะทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของสารก่อนที่ได้รับการให้ความร้อน เพื่อที่จะใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบอุณหภูมิกับไดโอดตัวที่อยู่ทางขวาของภาพ (reference diode) โดยวิธีการหาอัตรา การไหลของสารตัวอย่างก็จะเริ่มจากการผ่านสารตัวอย่างเข้ามาในท่อนำของไหลผ่าน reference diode เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิของสารก่อนที่จะได้รับความร้อน เมื่อสารตัวอย่างไหลผ่าน heater diode อุณหภูมิของสารตัวอย่างก็จะสูงขึ้น จนกระทั่งสารตัวอย่างไหลผ่าน measurement diode ก็จะทำการ วัดอุณหภูมิของสารที่เปลี่ยนแปลงไป เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จาก reference diode โดย ระบบประมวลผลจะทำการจับเวลาตั้งแต่ heater diode เริ่มให้ความร้อนจนกระทั่ง measurement diode สามารถวัดอุณหภูมิของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะสามารถคำนวณอัตราการไหล ของสารตัวอย่างได้จากปริมาตรของท่อนำของไหลระหว่าง heater diode กับ measurement diode ต่อช่วงเวลาที่ถูกวัดได้จากระบบประมวลผล

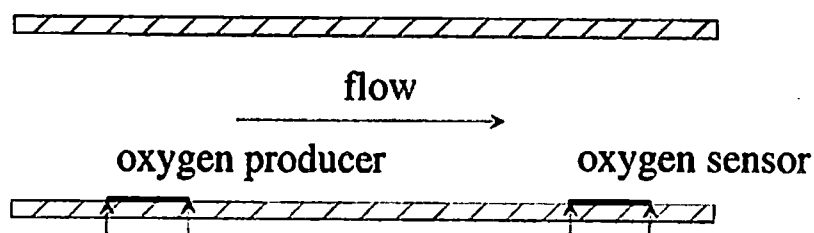
โดยรูปแบบการวัดอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์แบบ โครงสร้างนี้ ยังสามารถวิเคราะห์อัตราการ ไหลด้วยวิธีอื่นได้ ด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้ากับ heater diode เพื่อทำความร้อนตลอดเวลา แล้วใช้ diode ที่อยู่ทั้งสองด้านของ heater diode วัดอุณหภูมิของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่มี การไหล กล่าวคือถ้าไม่มีการไหล อุณหภูมิที่วัดได้จาก diode ทั้งสองตัวต้องเท่ากัน ซึ่งผลต่างก็จะ เท่ากับศูนย์ แต่ถ้าเกิดการไหลขึ้นอุณหภูมิที่วัดได้จาก diode ทั้งสองตัวก็จะไม่เท่ากัน โดย diode ตัว ที่อยู่ในทิศทางทวนกระแสการไหลก็จะวัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า diode ตัวที่อยู่ในทิศทางตามกระแส การไหล ซึ่งจะทำให้เกิดผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้จาก diode ทั้งสองตัว โดยผลต่างของ อุณหภูมิดังกล่าวจะมากหรือน้อยขึ้นกับอัตราการไหลของสารตัวอย่างนั่นเอง ด้วยการวิเคราะห์ถึง ผลต่างอุณหภูมิ (temperature profile) ด้วยวิธีดังกล่าว ก็จะสามารถวัดอัตราการไหลได้เช่นเดียวกัน [12]

ซึ่งวิธีการวัดรูปแบบนี้มีข้อดีคือสามารถวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างได้ค่อนข้าง รวดเร็ว และยังสามารถวัดอุณหภูมิของสารตัวอย่างไปได้พร้อมๆกัน แต่มีข้อเสียตรงที่จะต้องมีการ ให้ความร้อนกับสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปเมื่อโดนความร้อน สารชนิดนั้นก็จะเสียดสภาพไปเลยไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีก รวมถึงยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน ในกรณีที่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้ากับ heater ตลอดเวลาเพื่อทำความร้อนให้กับสารตัวอย่างขณะทำการวัด อัตราการไหลแบบวิเคราะห์ถึงผลต่างอุณหภูมิ

2.3.2 วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์ bubble flow meter

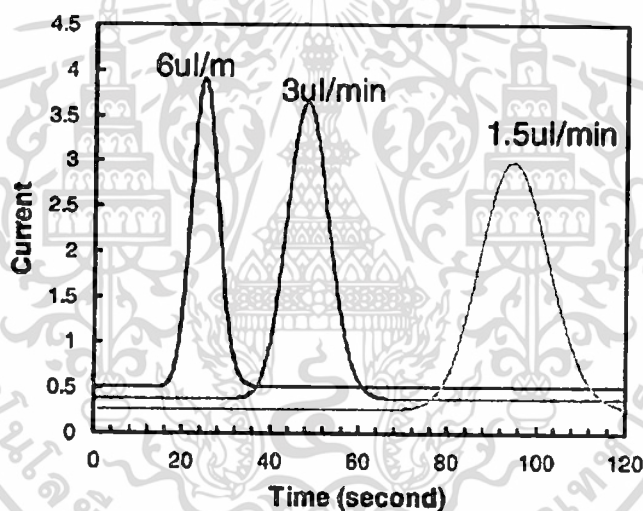
วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์ bubble flow meter จะอาศัยหลักการผ่านสารตัวอย่าง ที่ต้องการจะวัดอัตราการไหลสลับกับท่อนอากาศเข้าไปในท่อนำของไหล แล้วใช้เซนเซอร์ 2 ตัว วัดผลต่างเวลาที่สัญญาณของเซนเซอร์ทั้งสองตัวเกิดการเปลี่ยนแปลงไปคำนวณเป็นอัตราการไหล หรือตัวอุปกรณ์อาจจะประกอบไปด้วยตัวสร้างฟองอากาศหรือออกซิเจน (bubble generator) หนึ่ง ตัว และตัวเซนเซอร์อีกหนึ่งตัว [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอุปกรณ์ bubble flow meter ที่ประกอบด้วย oxygen producer และ oxygen sensor

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงโครงสร้างอุปกรณ์ bubble flow meter ซึ่งจะใช้อxygen producer สร้างออกซิเจนแล้วใช้อxygen sensor จับสัญญาณของสารตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่วัดได้จากตัวเซนเซอร์จะเป็นไปตามรูปที่ 2.5



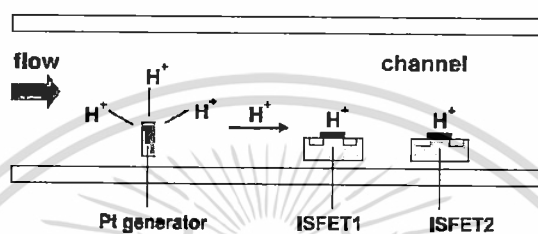
รูปที่ 2.5 ลักษณะของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดจากอุปกรณ์ oxygen sensor

โดยลักษณะของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดจากอุปกรณ์ oxygen sensor นั้นเกิดขึ้นมาจากการไหลของออกซิเจนในสารตัวอย่างที่สร้างมาจาก oxygen producer ผ่านตัวเซนเซอร์ ซึ่งช่วงเวลาตั้งแต่สัญญาณเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งกลับมาคงที่เรียกว่า Time of Flight (TOF) โดยสามารถหาอัตราการไหลของสารตัวอย่างได้จากช่วงเวลา TOF และค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวเซนเซอร์ ซึ่งวิธีการวัดรูปแบบนี้มีข้อดีที่ไม่ทำให้สารตัวอย่างเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ แต่มีปัญหาที่การเกิดฟองอากาศบริเวณท่อนำของไหลในกรณีที่อัตราการไหลต่ำมากๆ ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้ อาจทำให้การวัดอัตราการไหลเกิดความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออนร่วมกับขั้ว ion generator

วิธีการวัดอัตราการไหลรูปแบบนี้จะใช้ขั้ว ion generator สร้างไฮโดรเจนไอออนขณะที่มีสารตัวอย่างไหลอยู่ในท่อและใช้อุปกรณ์ ISFET เป็นตัวเซนเซอร์ ซึ่งตัวอุปกรณ์ ISFET สามารถตอบสนองต่อไฮโดรเจนไอออน จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์ ISFET เมื่อมีไฮโดรเจนไอออนที่ถูกสร้างจากขั้ว ion generator ไหลผ่าน [1-4]

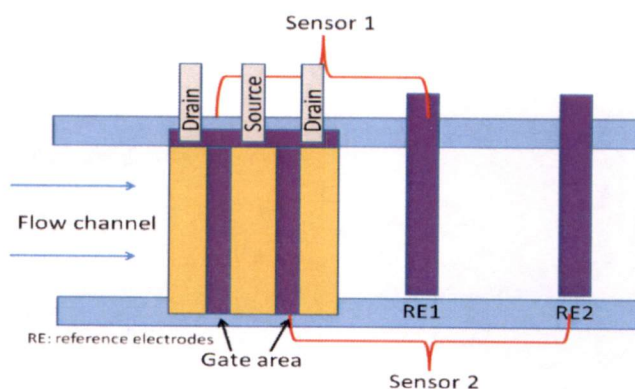


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่ใช้ ISFET ร่วมกับขั้ว ion generator

จากรูปที่ 2.6 แสดงถึงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่ประกอบไปด้วยขั้ว Pt generator 1 ขั้วทำหน้าที่สร้างไฮโดรเจนไอออน และอุปกรณ์ ISFET 2 ตัวทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ ซึ่งระบบประมวลผลอัตราการไหลจะทำการจับเวลาตั้งแต่ขั้ว Pt generator เริ่มสร้างไฮโดรเจนไอออน จนกระทั่งสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์ ISFET ทั้งสองตัวเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ในรูป 2.6 สามารถคำนวณหาอัตราไหลภายในท่อได้ถึง 3 ช่วงคือ ปริมาตรของท่อระหว่าง Pt generator กับ ISFET1 ปริมาตรของท่อระหว่าง Pt generator กับ ISFET2 และปริมาตรของท่อระหว่าง ISFET1 กับ ISFET2 ซึ่งเป็นข้อดีของตัวอุปกรณ์ที่สามารถวัดอัตราการไหลทั้ง 3 ช่วงซึ่งจะทำให้ตัวอุปกรณ์ดูน่าเชื่อถือมากขึ้น

2.3.4 วิธีการวัดอัตราการไหลด้วยทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออนชนิดเกตคู่ (double gate ISFET)

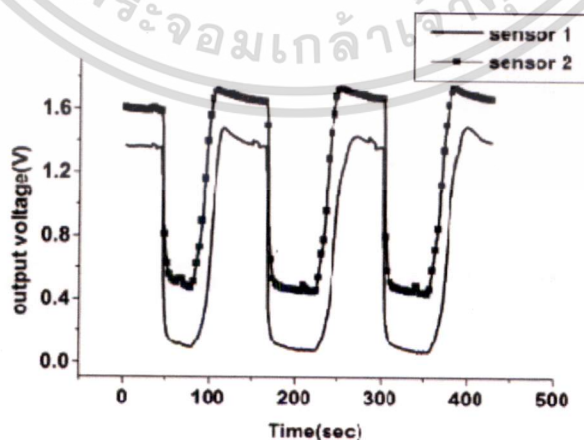
อุปกรณ์ double gate ISFET คืออุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วย ion sensing membrane 2 เมมเบรนในอุปกรณ์ ISFET ตัวเดียว ซึ่ง ion sensing membrane ก็เปรียบเสมือนขั้วเกตในอุปกรณ์ MOSFET ดังนั้นอุปกรณ์นี้จึงเรียกว่า double gate ISFET



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่ใช้ double gate ISFET ร่วมกับขั้วโลหะไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลที่ประกอบด้วย double gate ISFET 1 ตัวและขั้วโลหะไฟฟ้าอ้างอิง 2 ขั้ว โดยลักษณะของอุปกรณ์ double gate ISFET จะมีขั้วเดรน (drain) 2 ขั้วแต่ใช้ขั้วซอร์ส (source) ร่วมกัน ซึ่งหลักการทำงานจะใช้ ion sensing membrane ร่วมกับขั้วโลหะไฟฟ้าอ้างอิงทั้งสองขั้วเป็นเซนเซอร์ตัวที่หนึ่งและสอง

ซึ่งวิธีการวัดอัตราการไหลจะเป็นการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศหรือสารละลายเข้าไปในท่อนำของไหลเพื่อทำให้สัญญาณที่วัดได้จากเซนเซอร์ทั้งสองตัวเกิดการเปลี่ยนแปลง แล้วนำไปคำนวณเป็นอัตราการไหลต่อไป แต่วิธีการวัดโดยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับสารละลายยังคงมีปัญหาในกรณีอัตราการไหลต่ำอยู่ เนื่องจากเกิดการติดของท่อนอากาศภายในท่อนำของไหลหรือเกิดจากการแพร่ของสารละลายไปสู่ท่อน้ำแล้วทำให้ผลการวัดเกิดความคลาดเคลื่อน แต่ยังมีข้อดีที่ใช้อุปกรณ์ ISFET เป็นเซนเซอร์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชีวเคมีได้



รูปที่ 2.8 ลักษณะของสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดจาก double gate ISFET ร่วมกับขั้วโลหะไฟฟ้าสองขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวิธีการวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตรที่ได้กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดนั้น สามารถสรุปวิธีการวัดได้ 3 วิธีหลักๆ โดยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์และรูปแบบการวัดคือ วิธีการแรกตัวโครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบไปด้วย heater 1 ตัวทำหน้าที่ให้ความร้อนอยู่ตรงกลางระหว่างตัววัดอุณหภูมิ 2 ตัวแล้ววิเคราะห์ถึงผลต่างอุณหภูมิที่ขึ้นกับอัตราการไหลของสารตัวอย่าง วิธีการที่สองโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วย generator 1 ตัวและเซนเซอร์ 1 ตัว เช่น การใช้ heater diode เป็นตัวให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง และใช้ measurement diode วัดอุณหภูมิของสารที่เปลี่ยนแปลงหรือการใช้ ion generator สร้างไฮโดรเจนไอออน และใช้ ISFET วัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น ในส่วนของวิธีการสามที่ขึ้นกับรูปแบบการวัด ตัวอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยเซนเซอร์ 2 ตัวที่มีลักษณะเหมือนกัน แต่จะทำการผ่านสารตัวอย่างสลับกับสารชนิดอื่นเข้าไปในท่อนำของไหล เพื่อให้สัญญาณที่วัดได้ตัวเซนเซอร์ทั้งสองตัวเกิดการเปลี่ยนแปลง แล้วนำไปคำนวณเป็นอัตราการไหล เช่น การผ่านสารตัวอย่างสลับท่อนอากาศหรือสารละลาย เป็นต้น ซึ่งวิธีการวัดอัตราการไหลทั้งหมดสามารถคำนวณหาอัตราการไหล (flow rate: FR) ได้จากสมการที่ (2.1)

$$FR = V/t_f \tag{2.1}$$

เมื่อ V คือปริมาตรของสารตัวอย่างระหว่าง generator กับเซนเซอร์ หรือปริมาตรของสารตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์ทั้งสองตัว

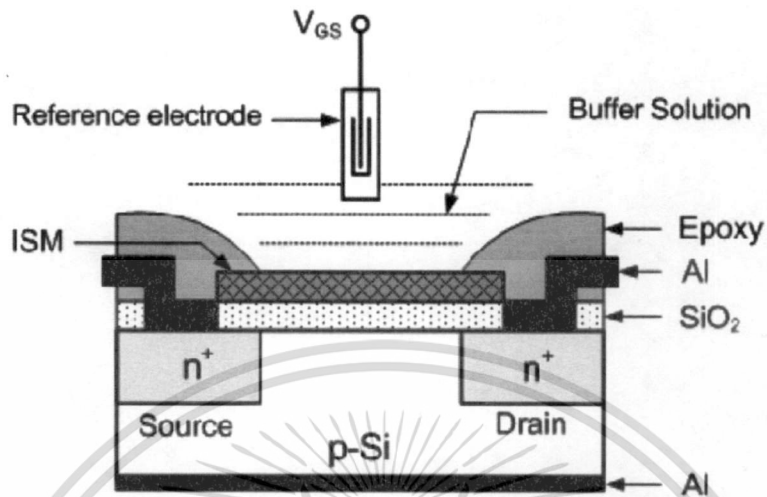
t_f คือช่วงเวลาตั้งแต่ generator เริ่มทำงานจนกระทั่งสัญญาณเซนเซอร์เปลี่ยนแปลง หรือช่วงเวลาระหว่างที่สัญญาณจากเซนเซอร์ตัวที่หนึ่งและตัวที่สองมีการเปลี่ยนแปลง

2.4 อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน

2.4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน

โครงสร้างของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน (Ion Sensitive Field Effect Transistor: ISFET) ถูกพัฒนามาจากโครงสร้างของมอสทรานซิสเตอร์ (MOSFET) โดยลอกชั้นโตะเกต (gate) ออก ให้ชั้นเกตออกไซด์หรือชั้นเมมเบรน (Ion Sensing Membrane: ISM) สัมผัสกับสารละลายโดยตรง เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์วัดค่าความเป็นกรด-ด่างหรือความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย ซึ่งในการใช้งานอุปกรณ์ ISFET ต้องต่อร่วมกับขั้วโตะไฟฟ้าอ้างอิง (reference

electrode) และจุ่มลงในสารละลายที่ต้องการจะวัด ซึ่งจะให้สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้มีความคงที่และแม่นยำยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของอุปกรณ์ ISFET

ซึ่งชั้น ion sensing membrane หรือ ISM เป็นส่วนสำคัญของอุปกรณ์ ISFET เนื่องจากเป็นส่วนที่บ่งบอกถึงความสามารถในการตอบสนองต่อความเข้มข้นหรือปริมาณไอออนในสารละลาย เสถียรภาพของตัวอุปกรณ์ รวมถึงความไวในการตอบสนอง โดยวัสดุที่ได้รับความสนใจนำมาใช้งานเป็นชั้น ISM ได้แก่วัสดุในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นชั้น ion sensing membrane

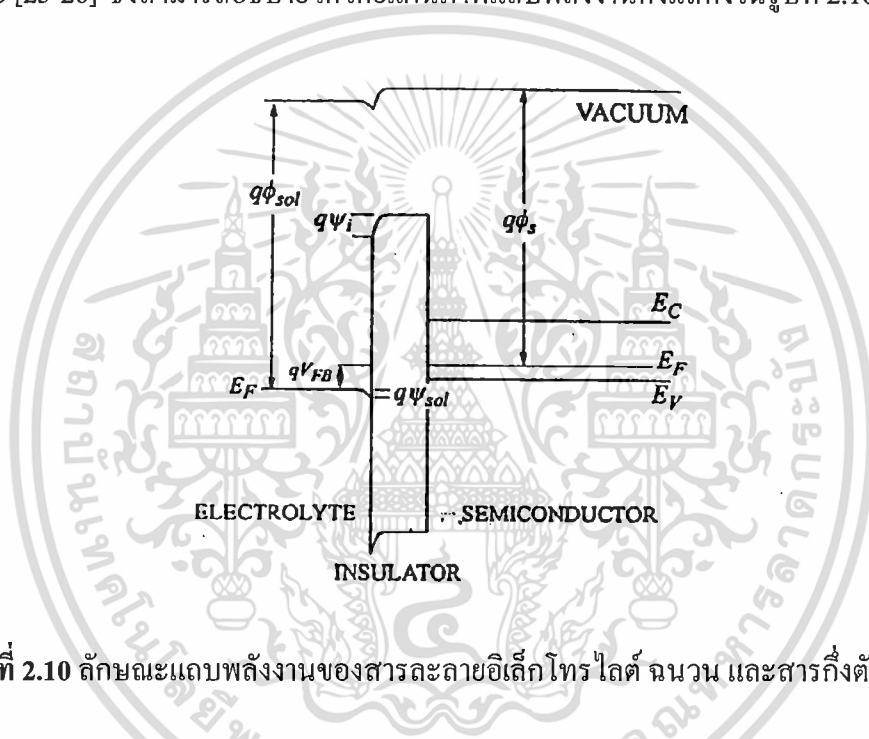
Ion Sensing Membrane	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	SnO ₂	PbTiO ₃
Sensitivity [mV/pH]	25-48	46-56	53-56	55-57	55-58	56-59
Available pH range	4-10	1-13	1-13	2.5-13	2-10	2-12
Drift [mV/h]	Unstable	0.83-1	0.83	0.5	1.65	0.5-1
Response time (s)	60	< 1	< 1	< 1	-	-
reference	[13-14]	[15-16]	[17]	[18-19]	[20-22]	[23-24]

2.4.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน

หลักการทำงานของอุปกรณ์ ISFET สามารถอธิบายได้โดยการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ MOSFET เนื่องจากโครงสร้างของตัวอุปกรณ์มีการพัฒนามาจาก MOSFET โดยการทำงานของเอกสารฉบับนี้ทุกสิ่งทุกอย่างที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ไม่ได้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะให้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่เพียงเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจถึงหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์ ISFET ได้เท่านั้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ทั้งสองชนิด ขณะที่อยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัว (non-saturated) ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากขั้วเดรนไปขั้วซอส (I_{DS}) จะขึ้นอยู่กับค่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชัน (μ_n) ความจุไฟฟ้าของฉนวนและอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของช่องทางเดินกระแส นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้าจิดริ่ม (V_T) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับฟังก์ชันงานของวัสดุ (ϕ)

ค่าศักย์ไฟฟ้าจิดริ่มสำหรับอุปกรณ์ MOSFET จะมีความคงที่ ส่งผลให้กระแส I_{DS} ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่เกต (V_{GS}) เพียงอย่างเดียว เมื่อศักย์ไฟฟาระหว่างเดรนกับซอส (V_{DS}) มีค่าคงที่ แต่สำหรับอุปกรณ์ ISFET ค่าศักย์ไฟฟ้าจิดริ่มจะไม่คงที่ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วโลหะไฟฟ้าอ้างอิง-สารละลาย-เมมเบรน จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย [25-26] ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยแผนภาพแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.10 [27]



รูปที่ 2.10 ลักษณะแถบพลังงานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ

เมื่อพิจารณาถึงแถบพลังงานในรูปที่ 2.10 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าแถบเรียบ (V_{FB}) ของอุปกรณ์ ISFET ได้ดังสมการที่ (2.2) [28]

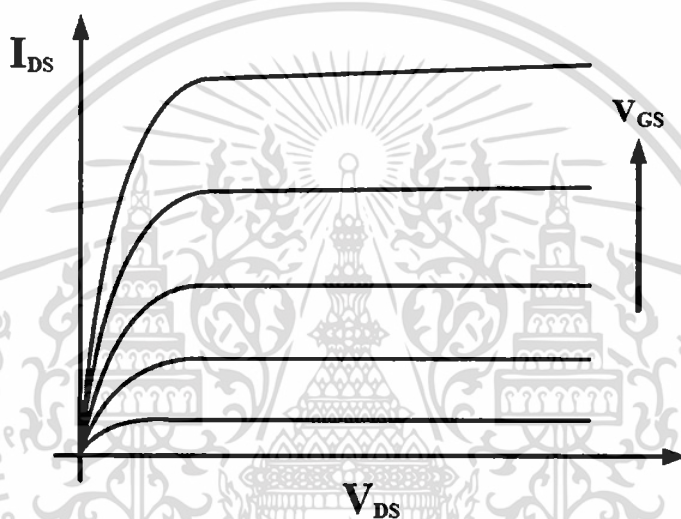
$$V_{FB} = \phi_{sol} - \phi_s + \psi_i - \psi_{sol} \quad (2.2)$$

- เมื่อ ϕ_{sol} คือ ฟังก์ชันงานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
 ϕ_s คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
 ψ_i คือ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์
 ψ_{sol} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมด้านสารละลายแต่ละชนิด

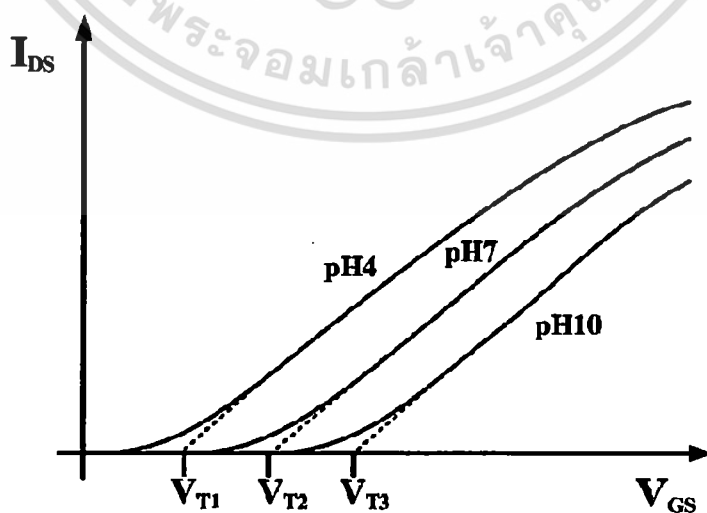
โดยปริมาณของไอออนในสารละลายจะไม่ส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้า ψ_i แต่จะส่งผลต่อศักย์ไฟฟ้า ψ_{sol} ทำให้กระแส I_{DS} ของอุปกรณ์ ISFET เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากพารามิเตอร์ ψ_{sol} ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้า V_{FB} และ V_T มีการเปลี่ยนแปลง

2.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกระแส - ศักย์ไฟฟ้า $I_{DS} - V_{DS}$ ของอุปกรณ์ ISFET เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วเกตหรือศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับขั้วโลหะไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.11 และความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ศักย์ไฟฟ้า $I_{DS} - V_{GS}$ ในสารละลายค่า pH ต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 คุณสมบัติ $I_{DS} - V_{DS}$ ที่ศักย์ไฟฟ้า V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ

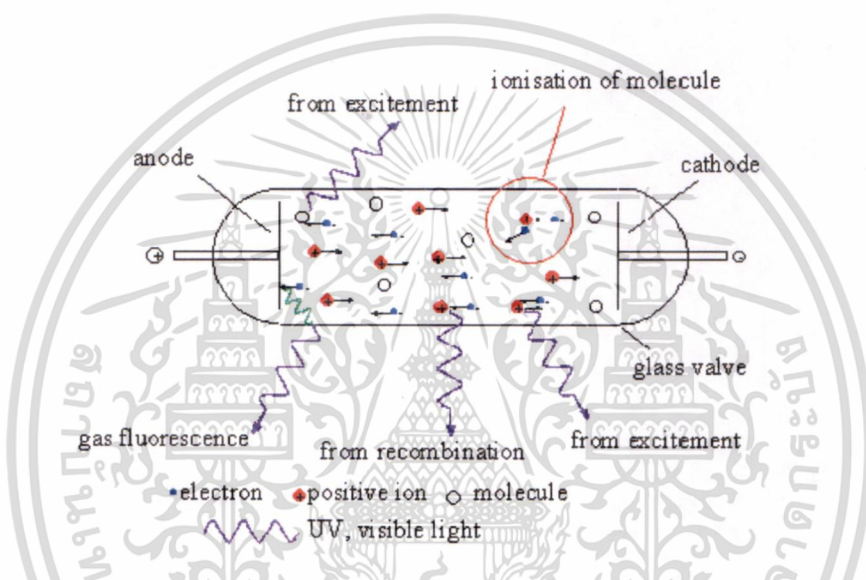


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.12 คุณสมบัติ $I_{DS} - V_{GS}$ ในสารละลาย pH 4, 7 และ 10 ที่ศักย์ไฟฟ้า V_{DS} คงที่
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.12 สามารถแสดงค่าของศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่ม V_T ได้ สังกัดได้จากศักย์ไฟฟ้า V_{GS} ที่ค่าต่ำๆจะไม่มีค่ากระแส I_{DS} แต่กระแสจะเริ่มไหลได้ตรงศักย์ไฟฟ้า V_T นอกจากนี้ยังแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า V_T กับค่า pH ทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์ถึงการตอบสนองต่อความเป็นกรดด่างของตัวอุปกรณ์ ISFET ได้

2.5 RF Plasma Cleaner

2.5.1 หลักการทำงานของ RF Plasma Cleaner



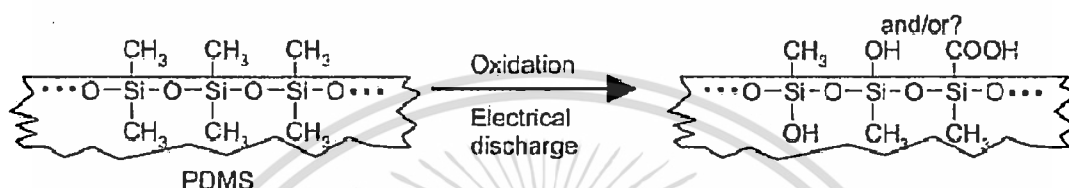
รูปที่ 2.13 กระบวนการสร้างพลาสมาในหลอดสุญญากาศ

จากรูปที่ 2.13 เมื่อก๊าซภายในหลอดสุญญากาศถูกกระตุ้นภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าความถี่สูง อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากขั้วแคโทด (Cathode) และถูกเร่งไปยังขั้วแอโนด (Anode) ขณะนั้นอิเล็กตรอนก็จะชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะเข้าไปชนขั้วแอโนด ทำให้เกิดการคายประจุ (Discharge) ออกมาเป็นแก๊สที่มีประจุ หรือพลาสมา (Plasma) ซึ่งจะทำอันตรกิริยา (Interaction) กับ พื้นผิวของชิ้นงานส่งผลให้สิ่งปนเปื้อนจากสารอินทรีย์จะถูกกำจัดออกไป โดยพลาสมาพลังงานสูงและทำให้พื้นผิวถูกปรับเปลี่ยนสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี (Surface modification) จาก Hydrophobic surface เป็น Hydrophilic surface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 หลักการของการประกบติด (Bonding) โดยใช้ RF Plasma Cleaner

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของ PDMS จะเป็นแบบ hydrophobic เนื่องจากมีกลุ่ม CH_3 อยู่บนผิวซึ่งสามารถทำการตัดแปลงผิวหน้าของ PDMS ให้เป็นแบบ Hydrophilic ได้โดยอาศัยกระบวนการทำความสะอาดด้วยออกซิเจนพลาสมา (O_2 Plasma cleaner) โดยพลาสมาจะทำการเปลี่ยนกลุ่ม CH_3 ที่อยู่บนผิวของ PDMS ให้เป็นกลุ่มของ OH ทำให้ผิวของ PDMS สามารถสร้างพันธะกับพื้นผิวอื่นได้ เรียกกระบวนการตัดแปลงผิวหน้าของ PDMS นี้ว่า Surface Modification



รูปที่ 2.14 กระบวนการตัดแปลงผิวหน้าของ PDMS (surface modification) ด้วยออกซิเจนพลาสมา

บทที่ 3

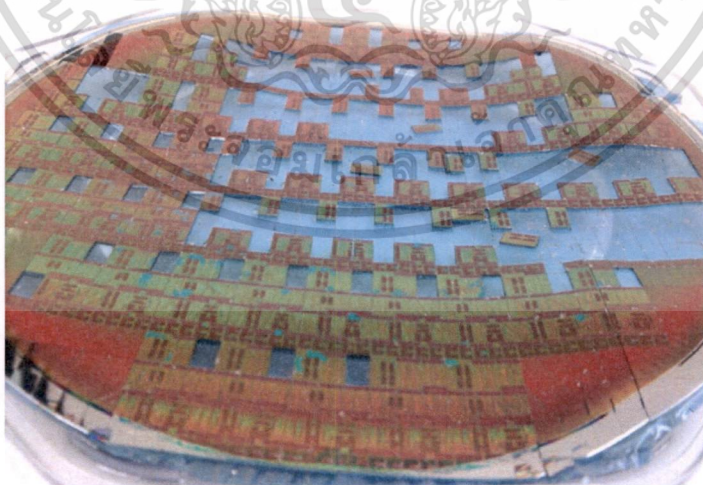
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเริ่มต้นจากการศึกษาถึงตัวอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้เป็นตัวจับสัญญาณของไหลในอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร (Micro Flow Sensor) ว่ามีหลักการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างไร รวมถึงการเตรียมตัวอุปกรณ์ ISFET ก่อนที่จะนำไปใช้เป็นเซนเซอร์ หลังจากนั้นจึงดำเนินการสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ พร้อมทั้งตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์หลังจากสร้างเสร็จแล้วนำตัวอุปกรณ์ไปตรวจวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างและนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี

3.1 การเตรียมตัวอุปกรณ์และการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน

3.1.1 การเตรียมตัวอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน

การสร้างอุปกรณ์ ISFET ใช้เทคโนโลยีในการผลิตเช่นเดียวกับการสร้าง Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) โดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นการสร้างบนฐานรองรับซิลิคอนดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีการเตรียมดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ ISFET ที่ถูกผลิตบนฐานรองรับซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำตัวอุปกรณ์ ISFET ที่นำออกมาจากแผ่นซิลิกอน อาจจะมีฝุ่นติดอยู่ที่ผิวหน้าและตัวอุปกรณ์ ISFET ให้นำไปล้างด้วยน้ำ DI (Deionization Water) และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ทำความสะอาดตัวอุปกรณ์แล้วทำการกัดชั้นออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวหน้าของอุปกรณ์ ISFET โดยเฉพาะบริเวณ Ion Sensing Membrane (ISM) ที่มีผลต่อการตอบสนองไอออน ด้วยการใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid: HF) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ปริมาตร/ปริมาตร) หยดลงไปบริเวณผิวหน้าแล้วปล่อยให้ประมาณ 45 วินาที ก่อนล้างออกด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ขั้นตอนต่อมาเป็นการเตรียมขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ก่อนที่จะนำไปบัดกรี โดยบริเวณขั้วไฟฟ้าจะเป็นโลหะอลูมิเนียมที่มีชั้นของไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เคลือบอยู่ ซึ่งจะต้องทำการกัดชั้น TiN

นำอุปกรณ์ ISFET มาติดลงบนแผ่นซิลิกอนด้วย photoresist แล้วปล่อยให้แห้งประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอุปกรณ์ติดบนแผ่นซิลิกอนได้แน่นขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ ISFET ที่ติดลงบนแผ่นซิลิกอนด้วย photoresist

ในขั้นตอนการกัดชั้น TiN จะใช้กระบวนการ RF plasma ซึ่งอาจจะทำลายผิวหน้า โดยเฉพาะบริเวณ ISM จึงต้องทำการปิดผิวหน้าของอุปกรณ์ ISFET โดยเปิดไว้เฉพาะบริเวณขั้วไฟฟ้าที่ต้องการจะกัดเท่านั้น แต่ก่อนอื่นให้ทาส photoresist บริเวณขอบของขั้วไฟฟ้าเสียก่อน เพื่อป้องกันการเสียหายของขั้วไฟฟ้าหลังจากกระบวนการ RF plasma หลังจากนั้นนำ Ni - mask ที่ได้จากกระบวนการ electroplating มาติดบนอุปกรณ์ ISFET ด้วย photoresist ซึ่งเปิดไว้เฉพาะบริเวณขั้วไฟฟ้าที่ต้องการจะกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แล้วปล่อยให้แห้งประมาณ 1 ชั่วโมงก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการ RF plasma



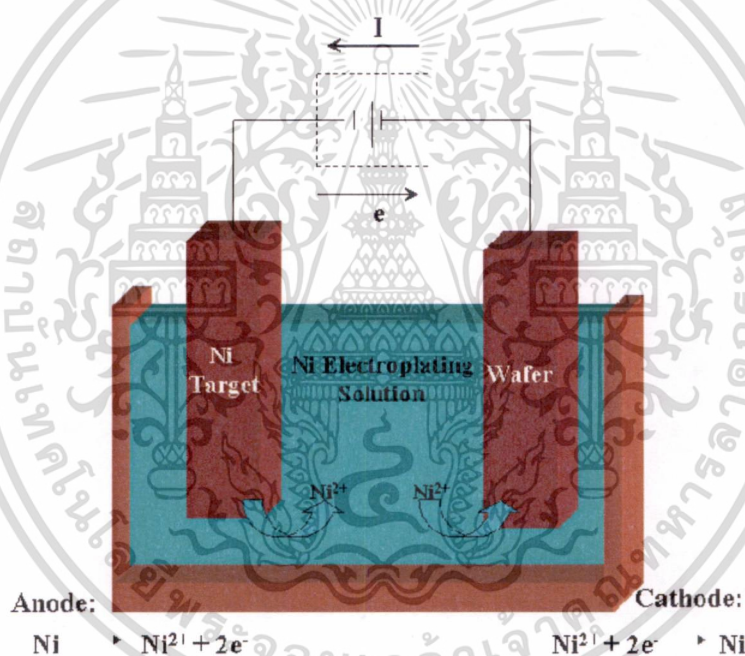
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ ISFET ที่ติดด้วย Ni - mask ก่อนเข้าสู่กระบวนการ RF plasma

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่อุปกรณ์ ISFET ถูกติดด้วย Ni – mask แล้ว ก็จะถูกนำเข้าสู่เครื่อง RF plasma เพื่อทำการกัดชั้น TiN ออก ซึ่งก๊าซที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการ RF plasma จะเป็นก๊าซ CF4 โดยจะทำการพลาสมา 2 ครั้ง ด้วย RF power 500 วัตต์ ซึ่งครั้งแรกจะใช้เวลา 1 นาทีแล้วเปิดฝาเครื่องขึ้นมาเพื่อตรวจสอบคุณภาพของอุปกรณ์และ Ni – mask ว่ายังติดอยู่หรือไม่ หลังจากนั้นทำการพลาสมาครั้งที่สองใช้เวลา 7 นาที ซึ่งหลังจากกระบวนการนี้ชั้นของ TiN จะถูกกัดออกจนหมดเหลือแต่ชั้นของโลหะอลูมิเนียม

นำอุปกรณ์ ISFET ที่ผ่านกระบวนการ RF plasma ไปแช่ในอะซิโตนเพื่อล้าง photoresist ก่อนล้างด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

หลังจากเตรียมขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET แล้ว ขั้นตอนต่อมาจะเป็นการเตรียมขั้วโลหะ เพื่อที่จะนำมาบัดกรีกับอุปกรณ์ ISFET ซึ่งขั้วโลหะจะถูกสร้างจากกระบวนการ Ni electroplating



รูปที่ 3.4 การจำลองกระบวนการ Ni electroplating

ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการ Ni electroplating จะต้องมีการเตรียมแผ่นสแตนเลสที่จะเป็นชิ้นงานให้โลหะนิเกิลมาติด โดยการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายให้เรียบ ล้างด้วยน้ำและเป่าให้แห้ง ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

หลังจากที่ทำความสะอาดแผ่นสแตนเลสเรียบร้อยแล้ว ก็จะถึงขั้นตอนการสร้างลวดลายของขั้วโลหะ โดยการนำ dry film ชนิด negative มารีดติดลงบนแผ่นสแตนเลสให้เรียบและหลีกเลี่ยงการเกิดฟองอากาศ ซึ่ง dry film ชนิด negative เมื่อโดนแสงยูวีจะแปรสภาพและเกิดการเอกสารถือเป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งตัว โดยหลังจากการติด dry film ลงบนแผ่นสแตนเลสให้นำพลาสติกฟิล์มมาสก็ที่เป็นลวดลายของขั้วโลหะมาติดทับด้านบน ก่อนนำไปฉายแสงยูวีด้วยเครื่อง UV exposure เป็นเวลา 10 วินาที

นำแผ่นสแตนเลสที่ผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตไปแช่ในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) ประมาณ 3 นาที dry film ชนิด negative ในส่วนที่ไม่โดนแสงยูวีจะหลุดออกเหลือแต่ฟิล์มส่วนที่ยังโดนแสง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ dry film ส่วนที่เป็นลายขั้วโลหะ ติดลงบนแผ่นสแตนเลสแน่นขึ้น

ขั้นตอนต่อมา นำแผ่นสแตนเลสที่ผ่านการอบมาแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ประมาณ 20 นาที เพื่อให้เกิดชั้นของออกไซด์เคลือบบริเวณผิวหน้าของแผ่นสแตนเลส จะได้ง่ายต่อการลอกขั้วโลหะนี้เกิดออกจากแผ่นสแตนเลสหลังจากผ่านกระบวนการ Ni electroplating

หลังจากการแช่สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตให้นำไปล้างด้วยน้ำก็จะเข้าสู่กระบวนการ Ni electroplating ซึ่งจะนำแผ่นสแตนเลสจุ่มลงไปในสารละลายนิเกิลเงาและใช้แหล่งจ่ายไฟแบบกระแสตรงที่ (power supply) จ่ายกระแสไฟฟ้า 0.05 แอมแปร์ ให้แก่ระบบ โดยต่อขั้วบวกเข้ากับแท่ง โลหะนิเกิลและต่อขั้วลบเข้ากับแผ่นสแตนเลส ซึ่งตลอดกระบวนการทำงานจะต้องใช้ปั๊มลมช่วยสร้างฟองอากาศให้แก่สารละลายนิเกิลเงาตลอดเวลา เพื่อให้อนุภาคของโลหะนิเกิลเดินทางจากแท่งโลหะ ไปเกาะบริเวณแผ่นสแตนเลสได้อย่างสม่ำเสมอ โดยใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมงก็จะได้ขั้วโลหะนิเกิลติดอยู่บนแผ่นสแตนเลส

ทำการล้าง dry film ส่วนที่ยังเหลืออยู่โดยใช้อะซิโตน แล้วใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กัดขั้วโลหะนิเกิลออกจากแผ่นสแตนเลส แล้วนำไปล้างด้วยน้ำให้สะอาด ก็จะได้ขั้วโลหะนิเกิลที่จะนำไปบัดกรีบริเวณขั้วไฟฟ้าของ ISFET ดังแสดงในรูป 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้วโลหะนิเกิลที่ได้จากกระบวนการ Ni electroplating

นำขั้วโลหะนิเกิลไปบัดกรีบริเวณขั้วไฟฟ้าของ ISFET ที่เตรียมไว้แล้วนำไปทำความสะอาดโดยแช่ในอะซิโตนประมาณ 20 นาที ตามด้วยแช่ในไอโซโพรพานอล อีก 20 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดก่อนนำไปเป่าแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ ISFET ที่จะนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล

เนื่องจากรูปแบบการเตรียมตัวอุปกรณ์ ISFET ก่อนข้างจะบดกรีขั้วโลหะได้ยาก รวมถึงบริเวณขอบของตัวอุปกรณ์ไม่มีการเคลือบฉนวนไว้ ซึ่งถ้านำไปประกอบเป็นอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์แล้ว เมื่อมีสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวไหลผ่านแล้วสัมผัสกับบริเวณขอบของอุปกรณ์ ISFET จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลลัดวงจรผ่านฐานรองรับซิลิคอน จึงได้มีการพัฒนารูปแบบการเตรียมตัวอุปกรณ์ ISFET โดยการนำตัวอุปกรณ์มาติดกาวและวางลงบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) แล้วทำการบดกรีด้วยเส้นลวดทองโดยใช้เครื่องเชื่อมสายไอซี แล้วทาทับด้วยอีพอกซี (Epoxy) ทั้งที่บริเวณบดกรีและขอบของตัวอุปกรณ์เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดกระแสลัดวงจรผ่านฐานรองรับซิลิคอนเมื่อนำไปตรวจวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่าง โดยกระบวนการเตรียมตัวอุปกรณ์ ISFET ทั้งหมดทำที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ ISFET ที่ติดบนแผ่นลายวงจรพิมพ์

3.1.2 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน

การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ก่อนจะนำไปประกอบเป็นอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เป็นการวัดเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบว่าตัวอุปกรณ์ยังพร้อมใช้งานอยู่หรือไม่ โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างเดรนกับซอสซึ่งจะอยู่ระหว่าง 500 – 700 มิลลิโวลต์ แต่ถ้าทำการวัดสลับขั้วค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะสูงมาก กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลจากซอสไปเดรนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นมาเบ้ขอประโชชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

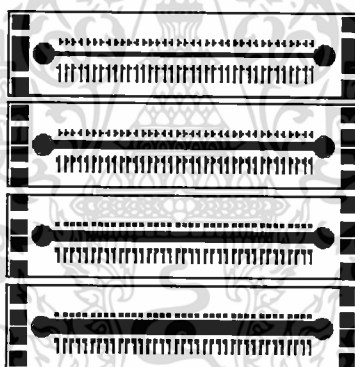
จึงไม่สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าได้ (overload) ซึ่งถ้าทำการวัดแล้วเกิดความต่างศักย์แสดงว่าอาจจะเกิดจากการบัดกรีสัมผัสกันระหว่างซอสกับเดรน ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาก็ได้ก่อนนำไปสร้างอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์

3.2 การสร้างและการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์

3.2.1 การสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์

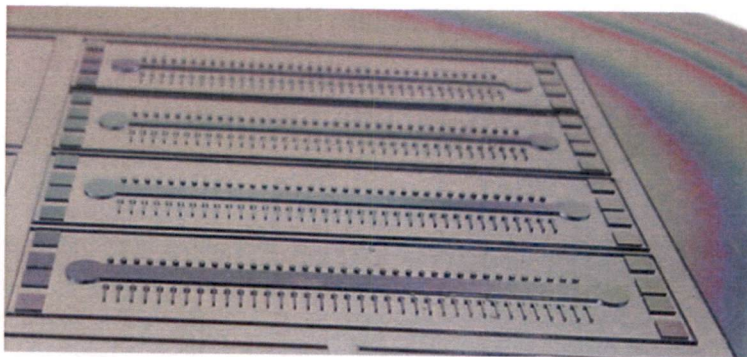
การสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์จะประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักๆ คือ การออกแบบส่วนของท่อนำของไหล รูปแบบการวางตัวอุปกรณ์ของระบบตรวจจับสัญญาณของไหล และการประกอบตัวอุปกรณ์

ขั้นตอนแรกทำการออกแบบส่วนของท่อนำของไหลโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความกว้าง 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ไมโครเมตร ความยาว 3.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.8 ท่อนำของไหลที่ถูกออกแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

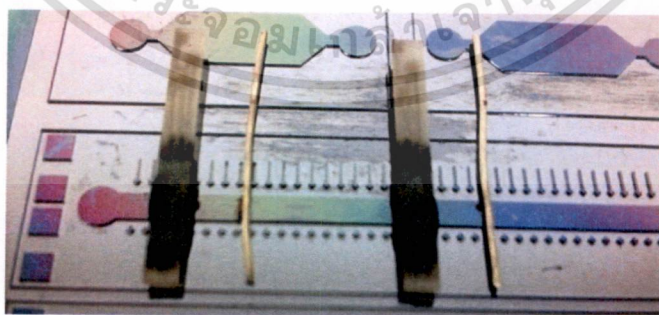
หลังจากออกแบบส่วนของท่อนำของไหลเรียบร้อยแล้ว ให้นำไปทำเป็นพลาสติกฟิล์ม มาสก์ แล้วเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี [29] เพื่อจะสร้างซิลิคอนโมลด์ต้นแบบ โดยแผ่นซิลิคอนจะถูกกัดเป็นร่องลึก 250 ไมโครเมตรด้วยเครื่อง Deep Reactive Ion Etcher (DRIE) ซึ่งได้รับความร่วมมือในการสร้างจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.9 ซิลิคอนโมลด์แบบในส่วนของท่อนำของไหล

นำอุปกรณ์ ISFET และขั้วโลหะที่จะใช้ทำเป็นขั้วอ้างอิง (reference electrode) มาติดตั้งบนซิลิคอนโมลด์แบบ บริเวณท่อนำของไหลด้วย photoresist ปล่อยให้ประมาณ 1 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวอุปกรณ์ ISFET และขั้วโลหะติดบนท่อนำของไหล ซึ่งขั้วโลหะที่ใช้เป็นขั้วอ้างอิงมี 2 ชนิดคือขั้วเงิน เงินคลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นลวดเงินเคลือบด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และขั้วแพลทินัม (Platinum: Pt) ซึ่งสร้างจากการระเหยสารด้วยเครื่อง E-beam evaporation โดยมีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร ลงบนฐานรองรับที่เป็นขั้วโลหะที่เกิดที่สร้างจากกระบวนการ Ni electroplating

ซึ่งรูปแบบของตัวอุปกรณ์จะมีทั้งหมด 3 ลักษณะคือใช้อุปกรณ์ double gate ISFET 1 ตัว ร่วมกับขั้วแพลทินัม 2 ขั้ว (ดังแสดงในรูป 2.7), ใช้อุปกรณ์ ISFET 2 ตัว ร่วมกับขั้วแพลทินัม 2 ขั้ว และใช้อุปกรณ์ ISFET 2 ตัวร่วมกับขั้วเงิน เงินคลอไรด์ 2 ขั้ว ซึ่งรูปแบบของตัวอุปกรณ์อย่างหลังนี้อาจนำไปประยุกต์ใช้ตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างหรือค่าความเข้มข้นของไอออนในสารตัวอย่างได้



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ ISFET และขั้วอ้างอิงลงบนท่อนำของไหล

ระหว่างที่รอให้ตัวอุปกรณ์ติดสนิทลงบนท่อนำของไหล ให้ทำการเตรียมวัสดุ polydimethylsiloxane (PDMS) ซึ่งผสมจาก PDMS monomer กับ curing agent ในอัตราส่วน 10:1 เอกสารฉบับนี้แนะนำให้ใช้วิธีนี้เพราะวิธีอื่นที่ใช้อาจทำให้วัสดุแข็งตัวเร็วเกินไป หรืออาจทำให้วัสดุไม่ทั่วกรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วคนให้เข้ากัน โดยระหว่างการผสมจะเกิดฟองอากาศต้องนำไปไว้ในโถดูดความชื้น (desiccator) แล้วดูดออกด้วยปั๊ม

นำแผ่นซิลิคอนโมลตันแบบที่มีตัวอุปกรณ์ติดอยู่บนท่อนำของไหลมาติดบล็อกอะคริลิก เพื่อเป็นแม่แบบในการหล่อ PDMS และนำไปใส่ในโถดูดความชื้นก่อนทำการระเหยสาร Hexamethyldisiloxane (HMDS) เคลือบลงบนผิวหน้าของซิลิคอนโมลประมาณ 20 นาทีเพื่อช่วยให้ลอก PDMS ออกจากโมลได้ง่ายขึ้น

เท PDMS ที่ผสมลงบนแม่แบบซิลิคอนโมลแล้วนำไปดูดฟองอากาศออกในโถดูดความชื้นอีกครั้ง เนื่องจากอาจมีอากาศติดอยู่ตามตัวอุปกรณ์ ISFET หรือขั้วอ้างอิง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ PDMS แข็งตัว

หลังจากที่ PDMS แข็งตัวแล้ว ให้ทำการลอกออกจากซิลิคอนโมลต้นแบบด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะบริเวณตัวอุปกรณ์ ISFET และขั้วอ้างอิง ซึ่งจะใช้อะซิโตนช่วยในการละลาย photoresist ระหว่างการลอก ซึ่งหลังจากผ่านขั้นตอนนี้ก็จะได้ส่วนของท่อนำของไหลที่เป็นวัสดุ PDMS (PDMS flow channel chip) ให้นำไปเจาะรูบริเวณทางเข้า-ออกของสารแล้วทำความสะอาดด้วยเมทานอลและเป่าให้แห้ง

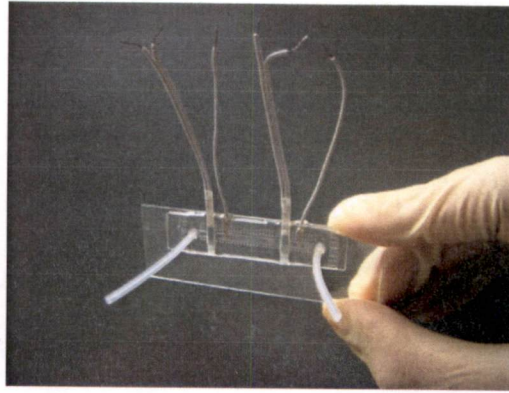
นำแผ่นซิลิคอนโมลต้นแบบไปทำความสะอาดคราบ photoresist โดยการล้างด้วยอะซิโตน ตามด้วยเมทานอลเพื่อล้างเศษ PDMS ที่อาจติดอยู่ตามรอยสลักของโมล สุดท้ายล้างด้วยไอโซโพรพานอล แล้วเป่าให้แห้ง

เมื่อได้ส่วนของท่อนำของไหลที่มีอุปกรณ์ ISFET และขั้วอ้างอิงอยู่ภายในแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการประกบติด (bonding) ส่วนของท่อนำของไหลกับฐานรองรับที่เป็นกระจก ด้วยกระบวนการ RF oxygen plasma

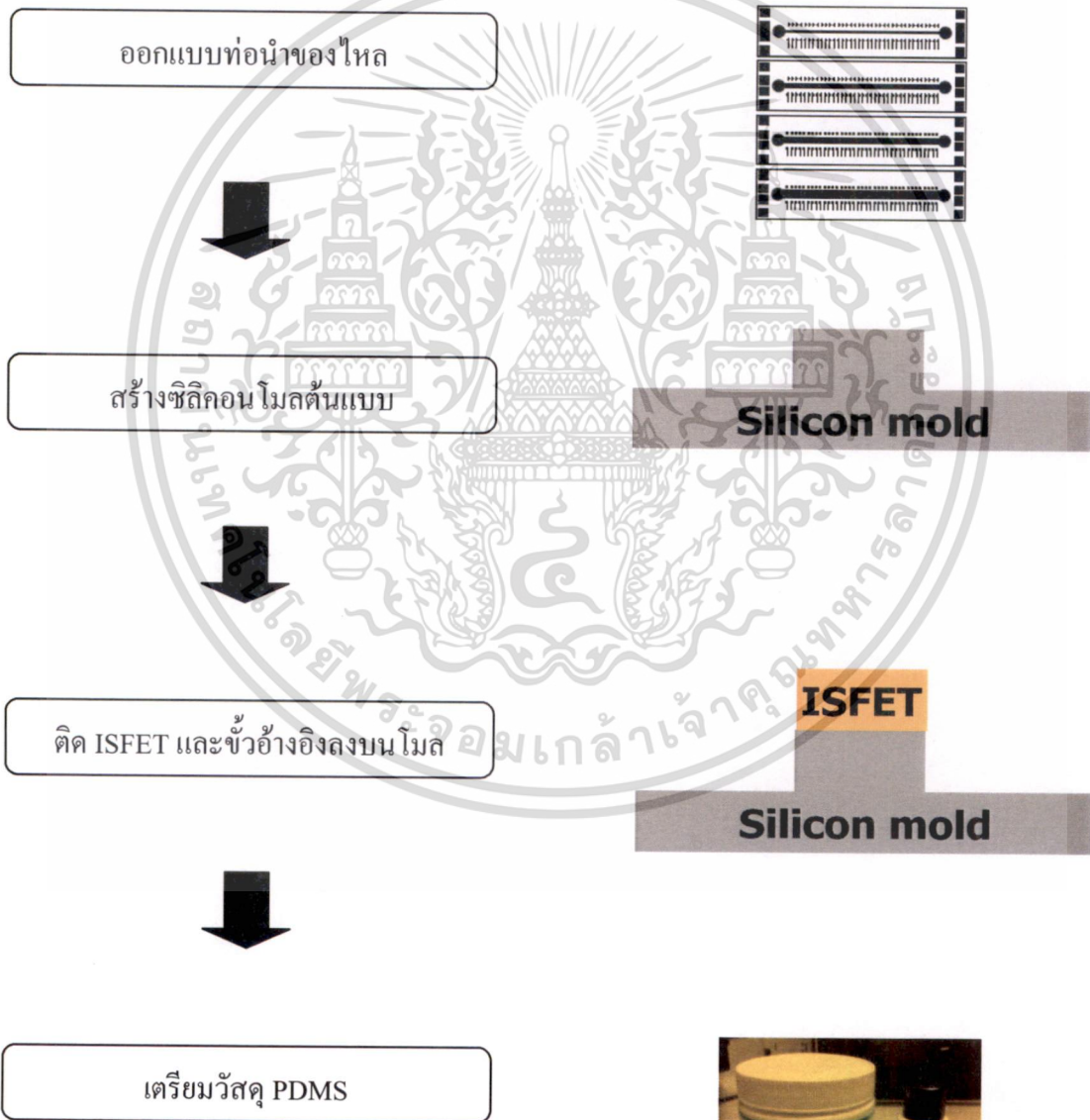
ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ (glass slide) โดยนำไปแช่ในอะซิโตนประมาณ 20 นาที ตามด้วยแช่ในไอโซโพรพานอล อีก 20 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดก่อนนำไปเป่าแห้ง

นำส่วนของท่อนำของไหลและกระจกสไลด์เข้าสู่เครื่อง RF plasma โดยหงายหน้าส่วนของท่อนำของไหลให้โดนพลาสมา ทำการดูดอากาศภายในเครื่องออกแล้วค่อยปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าไปภายในและทำการพลาสมาโดยใช้ RF power 80 วัตต์ เป็นเวลา 15 วินาที แล้วนำส่วนของท่อนำของไหลมาคว่ำหน้าประกบติดลงบนกระจกสไลด์ แล้วปล่อยไว้ประมาณ 12 ชั่วโมงเพื่อให้ทั้งสองส่วนประกบติดกันจนแน่น

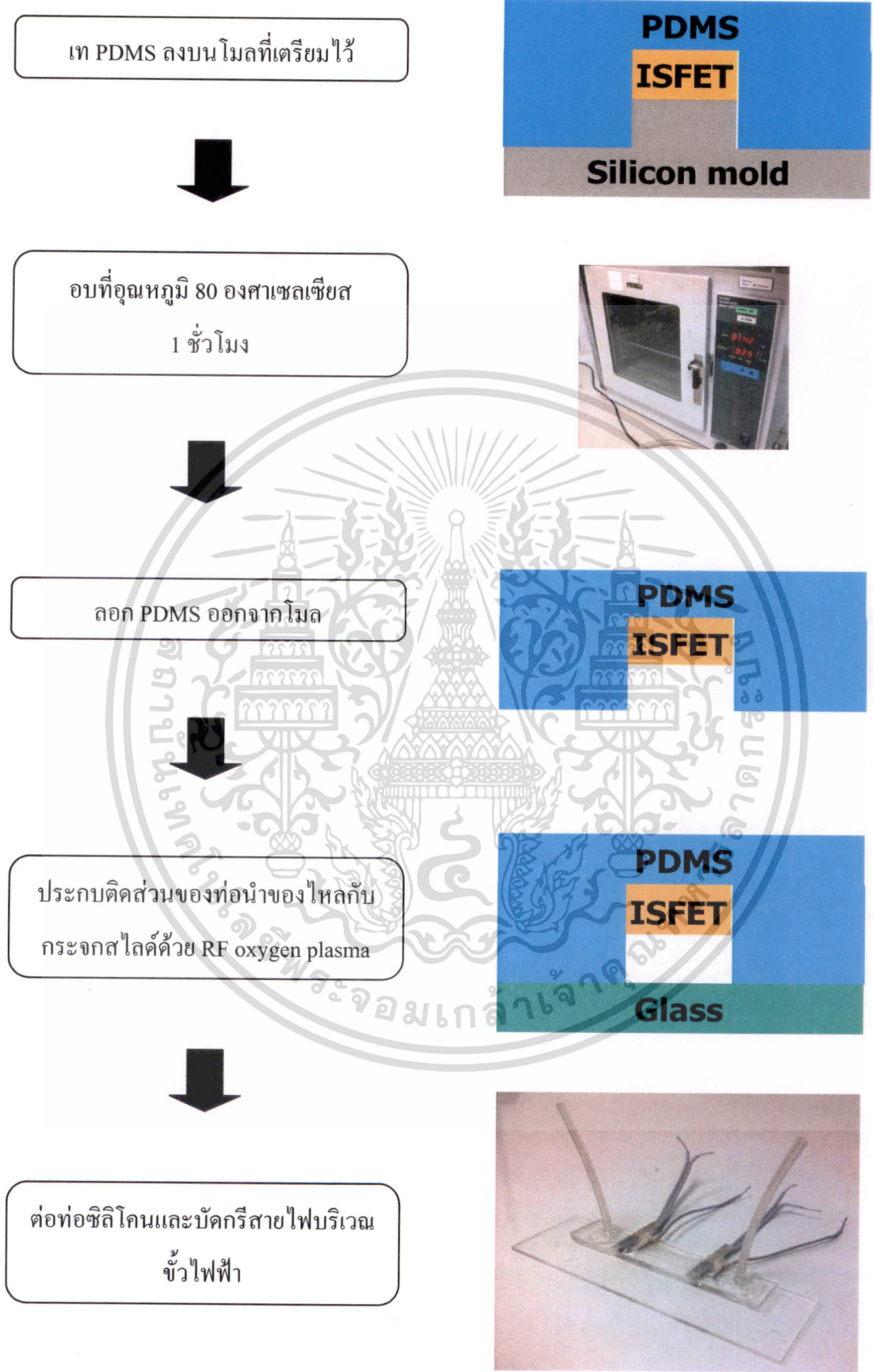
นำตัวอุปกรณ์ไปต่อท่อซิลิโคน (silicon tube) บริเวณทางเข้า-ออกของสารตัวอย่าง รวมถึงแบตเตอรี่สายไฟบริเวณขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET และขั้วอ้างอิง แล้วเท PDMS ทับในส่วนที่ต่อท่อและแบตเตอรี่ ก็จะเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดเซนเซอร์



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เซนเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

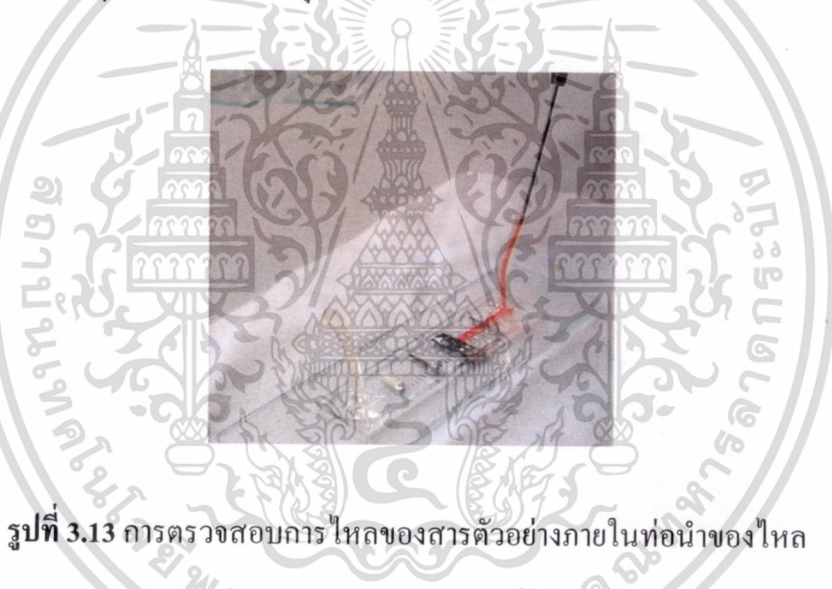


รูปที่ 3.12 แผนผังสรุปขั้นตอนการสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์

ขั้นตอนแรกเป็นการตรวจสอบการไหลของสารตัวอย่างภายในท่อนำของไหลโดยใช้เมทานอลผสมสีแดงฉีดเข้าไปในท่อด้วยหลอดฉีดยา (syringe) เพื่อตรวจสอบดูการรั่วซึมภายในท่อนำของไหล ซึ่งปัญหาที่พบคือการประกบติดกัน (bonding) ของส่วนท่อนำของไหลกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือมีบางส่วนที่ติดและบางส่วนที่ไม่ติด โดยอาจจะทำให้เกิดการรั่วซึมของสารตัวอย่างไปสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET บริเวณที่มีการบัดกรี ทำให้เกิดกระแสลัดวงจรและตัวอุปกรณ์ ISFET เกิดความเสียหายได้ ซึ่งปัญหานี้เกิดขึ้นจากความสะอาดของผิวหน้าส่วนท่อนำของไหลและกระจกสไลด์ ดังนั้นจึงต้องมีการทำความสะอาดผิวหน้าของทั้งสองส่วนก่อนการประกบติด โดยทำการล้างผิวหน้าส่วนท่อนำของไหลด้วยเมทานอล และเช็ดกระจกสไลด์ด้วยไอโซโพรพานอลก่อนเป่าให้แห้ง และหลังขั้นตอนการประกบติดให้หาวัตถุที่มีน้ำหนักมากมาทับตัวอุปกรณ์ไว้ เพื่อให้อุปกรณ์ทั้งสองส่วนติดกันดียิ่งขึ้น



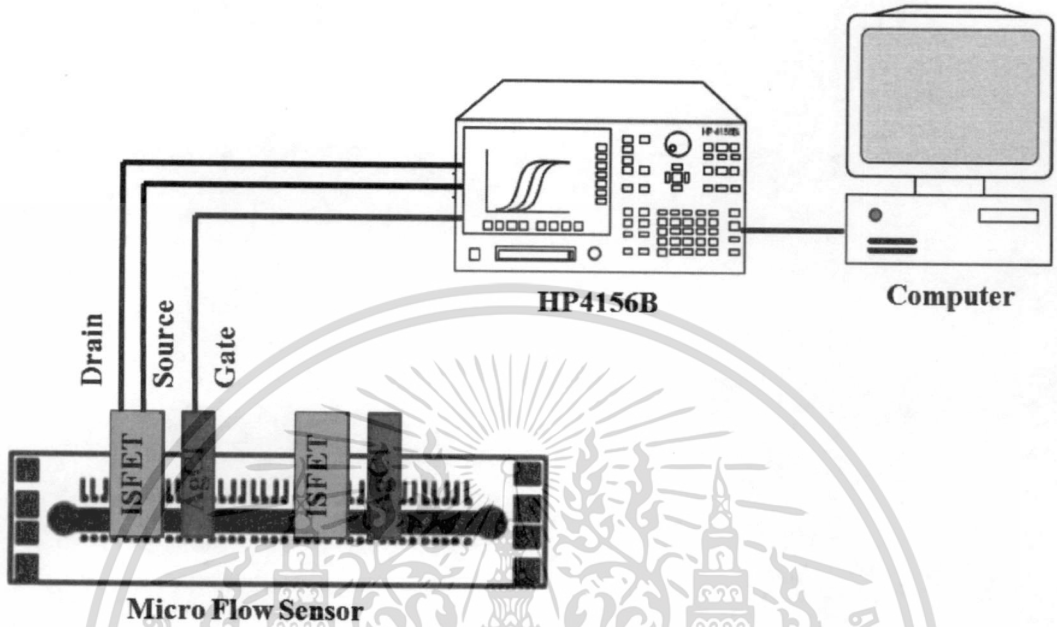
รูปที่ 3.13 การตรวจสอบการไหลของสารตัวอย่างภายในท่อนำของไหล

ขั้นตอนที่สองเป็นการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET และขั้วอ้างอิงที่ประกอบอยู่ภายในตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ด้วยเครื่อง HP4156B Precision Semiconductor Parameter Analyzer ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม Interactive Characteristics Software (ICS) ซึ่งการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าในครั้งนี้เป็นการตรวจสอบระบบการทำงานของตัวตรวจจับสัญญาณของไหลว่าพร้อมทำงานหรือไม่ โดยขั้นตอนแรกจะทำการวัดกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์ ISFET เพื่อตรวจสอบว่ามีสารตัวอย่างไหลไปสัมผัสบริเวณขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET หรือไม่ โดยการฉีดน้ำเข้าไปในท่อนำของไหลและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่วัดคือ กระแสเกต - ศักย์ไฟฟ้าเกต ($I_{GS} - V_{GS}$) ที่ V_{GS} จาก 0 – 2.5 โวลต์ แล้ววัดค่า I_{GS} ที่ศักย์ไฟฟ้าเดรน (V_{DS}) คงที่เท่ากับ 0.2 โวลต์ ซึ่งหลังจากวัดกระแสรั่วของอุปกรณ์ ISFET แล้ว ก็จะศึกษาถึงย่านการทำงานของอุปกรณ์ ISFET ว่ายังมีคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์อยู่หรือไม่ โดยวัดคุณสมบัติทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาหรือการเขียนเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปเผยแพร่จะเขียนหน้าการคัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

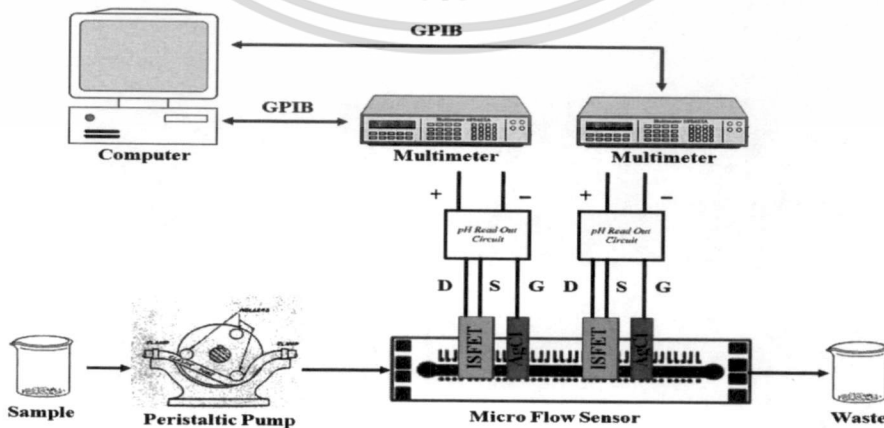
ไฟฟ้าที่วัดคือกระแสเดรน - ศักย์ไฟฟ้าเดรน ($I_{DS} - V_{DS}$) ที่ V_{DS} จาก 0 - 2 โวลต์ แล้ววัดค่า I_{DS} ที่ ศักย์ไฟฟ้าเกต (V_{GS}) คงที่เท่ากับ 0, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.4 โวลต์



รูปที่ 3.14 ระบบการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET

ซึ่งหลังจากสร้างตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์และทำการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ว่าพร้อมใช้งานแล้ว จึงเริ่มจัดเตรียมระบบในการวัดและประมวลผลอัตราการไหล

3.3 การเตรียมระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหล



รูปที่ 3.15 ระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหล

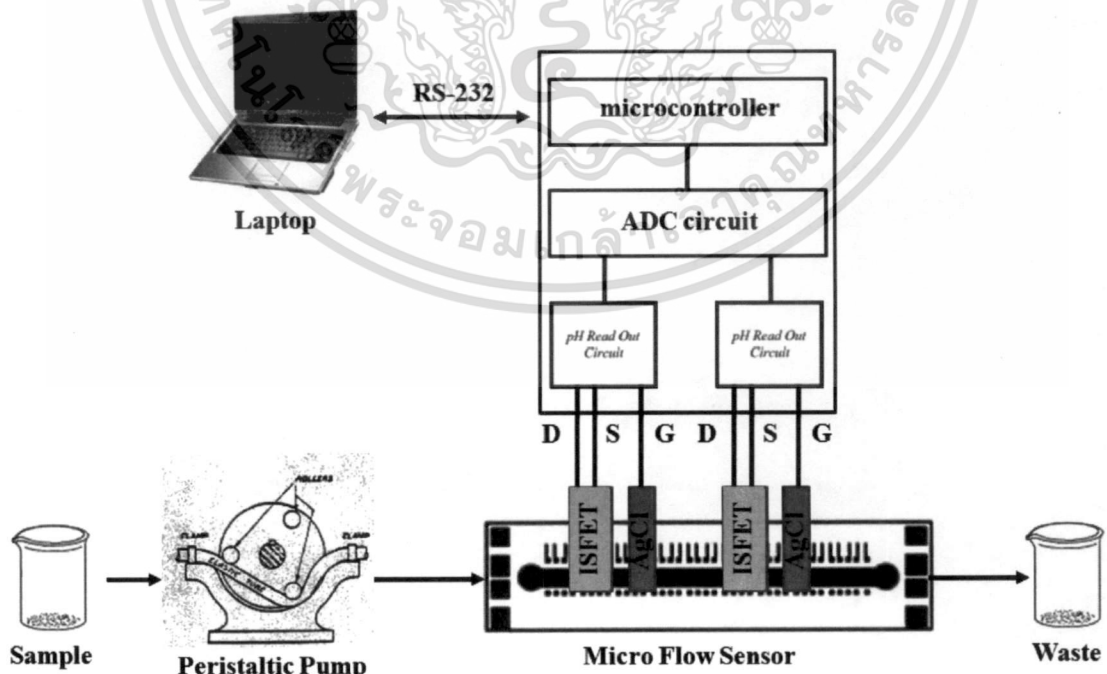
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อผู้พิมพ์/ผู้จำหน่าย/ผู้เผยแพร่/ผู้ถือลิขสิทธิ์/ผู้ถือกรรมสิทธิ์ในเอกสารฉบับนี้ หากมีการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร ผู้ใช้จะรับผิดชอบต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น

$$FR = V/t_i \quad (3.1)$$

เมื่อ FR	คืออัตราการไหลของสารตัวอย่าง (flow rate)
V	คือปริมาตรของสารตัวอย่างระหว่างตัวตรวจจับสัญญาณของไหลทั้งสองตัว
t_i	คือช่วงเวลาระหว่างที่สัญญาณจากตัวตรวจจับตัวที่หนึ่งและตัวที่สองมีการเปลี่ยนแปลง

โดยการที่จะทำให้สัญญาณที่วัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น จะต้องทำการผ่านสารตัวอย่างต่างชนิดกันเข้าไปในท่อนำของไหล ซึ่งอาจจะเป็นสารที่มีปริมาณไอออนแตกต่างกันมากๆ หรือการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศ เพื่อให้อุปกรณ์ ISFET เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า V_{GS} อย่างชัดเจน แล้วนำไปคำนวณอัตราการไหลได้อย่างถูกต้อง

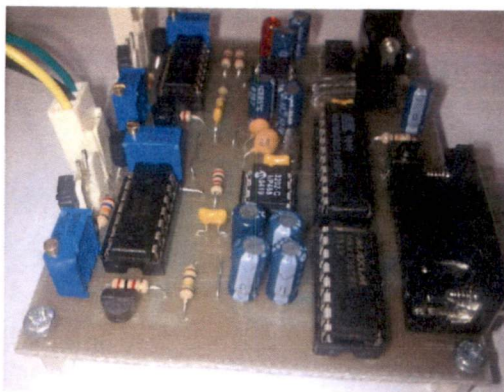
ซึ่งระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหลในเบื้องต้นนี้ยังเป็นระบบที่ค่อนข้างใหญ่และยุ่งยากที่จะเคลื่อนย้ายไปใช้งานนอกสถานที่ จึงได้พัฒนาระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหลด้วยการรวมวงจรอ่านค่า pH ทั้งสองวงจรเข้าด้วยกัน แล้วทำการแปลงสัญญาณศักย์ไฟฟ้า V_{GS} ที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Convertor Circuit) ก่อนทำการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) และมีการรับส่งข้อมูลไปยังแล็ปท็อปผ่าน RS-232



รูปที่ 3.17 การพัฒนาระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหล

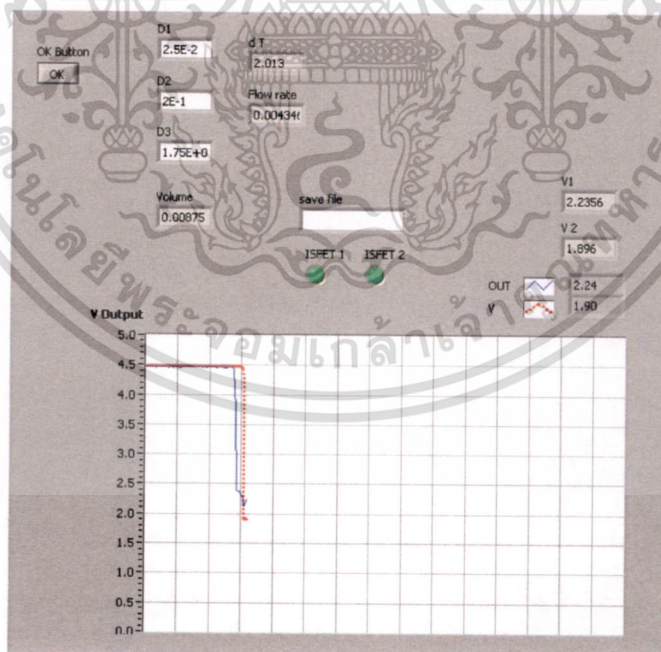
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 วงจรที่ถูกพัฒนาโดยการรวมวงจรอ่านค่า pH ทั้งสองวงจรเข้าด้วยกัน

ในส่วนของการประมวลผลอัตราการไหลที่แสดงออกมาทางคอมพิวเตอร์นั้น จะใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ในการประมวลผลออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสามารถใส่ค่าความกว้างของท่อของไหล ความลึกของท่อของไหลและระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับสัญญาณของไหล ก่อนที่ซอฟต์แวร์จะคำนวณปริมาตรของท่อนสารตัวอย่างระหว่างตัวตรวจจับสัญญาณ พร้อมทั้งทำการจับผลต่างเวลาที่ได้จากตัวตรวจจับสัญญาณทั้งสองตัวเมื่อสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลง แล้วนำไปประมวลผลเป็นอัตราการไหลของสารตัวอย่างได้



รูปที่ 3.19 ซอฟต์แวร์ LabVIEW ที่ในการประมวลผลอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์

อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่ถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ จะใช้ตัวตรวจจับสัญญาณของไหลสองตัว ดังนั้นจึงเลือกใช้รูปแบบวิธีการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับสารชนิดอื่นเข้าไปในท่อของไหล เพื่อให้ทำให้สัญญาณที่วัดได้จากตัวตรวจจับสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลง แล้วนำไปคำนวณเป็นอัตราการไหล ซึ่งรูปแบบการวัดที่ใช้จะเป็นผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ และการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกันว่าวิธีการใดสามารถวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างได้แม่นยำกว่ากัน

3.4.1 รูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ

โดยสารตัวอย่างที่เลือกใช้คือสารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) เข้มข้น 1 โมลาร์ เนื่องจากเป็นสารละลายที่สามารถเตรียมได้ง่าย และมีค่าความเป็นกรด-ด่างคือกลาง จึงไม่ทำลายผิวหน้าเมมเบรนของอุปกรณ์ ISFET และขั้วโลหะไฟฟ้า รวมถึงมีความเข้มข้นของไอออนภายในสารละลายค่อนข้างสูง จึงน่าจะทำให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างท่อน้ำกับสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

เตรียมระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหลดังแสดงในรูป 3.14 ซึ่งการตรวจสอบรูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำว่าแม่นยำมากน้อยแค่ไหนนั้น จึงต้องมีการเปรียบเทียบกับวิธีการวัดอัตราการไหลที่เชื่อถือได้ ซึ่งวิธีการวัดอัตราการไหลดังกล่าวคือการชั่งปริมาตรของสารตัวอย่างในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ที่ความเร็วในการปั๊มของ peristaltic pump ค่าต่างๆ ซึ่งช่วงเวลาที่ใช้คือ 5 นาทีและทำการเฉลี่ยปริมาตรของสารตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำที่สุด ก่อนนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากรูปแบบการวัดดังกล่าว

3.4.2 รูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ

สารตัวอย่างที่เลือกใช้นี้เนื่องจากป้องกันปัญหาการติดค้างของไอออนในสารละลายบริเวณเมมเบรนของอุปกรณ์ ISFET ซึ่งลักษณะการวัดก็จะเตรียมระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหลดังแสดงในรูป 3.16 และทำการวัดเปรียบเทียบผลกับการวัดอัตราการไหลด้วยวิธีการชั่งปริมาตรในเวลา 5 นาที โดยทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดที่ได้จากวิธีการดังกล่าว

โดยการวัดอัตราการไหลทั้งสองรูปแบบจะถูกเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะวิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเปรียบเทียบผลกับการวัดอัตราการไหลด้วยวิธีการชั่งปริมาตร รูปแบบการวัดวิธีใดที่ให้ผลใกล้เคียงการวัดอัตราการไหลด้วยวิธีการชั่งปริมาตร ก็จะถูกนำมาประยุกต์ใช้

ร่วมกับตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เพื่อจะศึกษาถึงความกว้างของท่อนำของไหล และระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ ว่ามีผลต่อช่วงการวัดอัตราการไหลอย่างไร

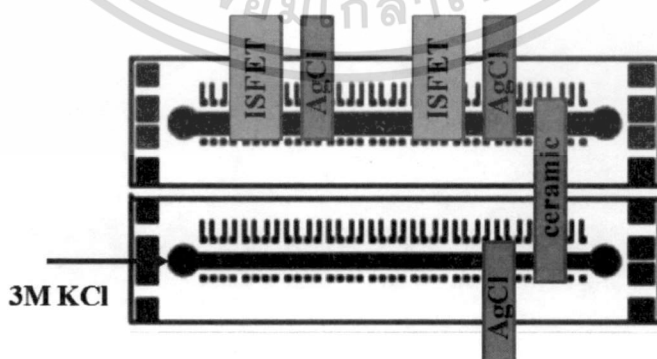
3.5 การนำอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี

หลังจากที่ตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์สามารถวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างได้แล้ว ก็ให้นำตัวอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีของไหล เนื่องจากการวิเคราะห์ของไหลในปัจจุบันต้องการความรวดเร็วในการตรวจสอบ รวมถึงต้องการใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย จึงต้องมีการย่อขนาดของห้องปฏิบัติการ จึงก่อให้เกิดห้องปฏิบัติการบนชิปหรือ Lab on a Chip ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ต้องอาศัยระบบของไหลจุลภาค ดังนั้นอัตราการไหลของสารตัวอย่างจึงปัจจัยสำคัญในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในระบบ

โดยตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างนั้น ใช้ขั้วอ้างอิงเป็นขั้วแพลทินัม ซึ่งไม่เหมาะสมกับการไปวัดปริมาณไอออนในสารตัวอย่าง เนื่องจากให้ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าตามสารละลายที่ใช้วัด จึงไม่นิยมนำมาทำเป็นขั้วอ้างอิง ในส่วนของขั้วเงิน เงินคลอไรด์นั้น สร้างขึ้นจากเส้นลวดโลหะเงินแล้วเคลือบด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งถ้าทำการวัดสารตัวอย่างหลายๆครั้ง อาจทำให้เกลือไรต์ที่เคลือบอยู่บนลวดโลหะเงินหลุดหมด ส่งผลให้ค่าวัดได้เกิดความความคลาดเคลื่อน ในงานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาเพื่อที่จะประกอบส่วนของขั้วอ้างอิงลงในตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์

3.5.1 การพัฒนาตัวอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์โดยเพิ่มส่วนของขั้วอ้างอิง

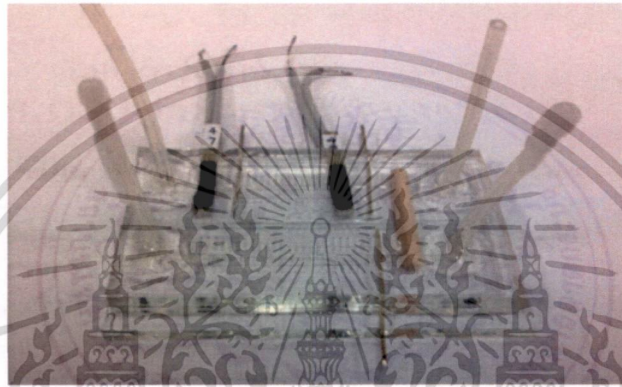
1. อุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นท่อนำของไหลที่อยู่ขนานกัน



รูปที่ 3.20 โครงสร้างของอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นท่อนำของไหลที่อยู่ขนานกัน

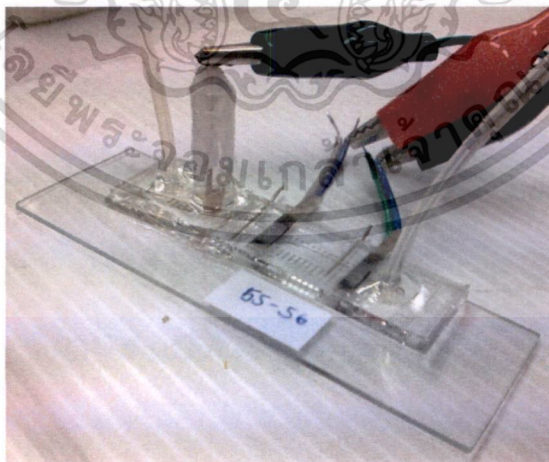
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากรูปที่ 3.20 จะแสดงแนวคิดการสร้างตัวอุปกรณ์โดยใช้แท่งเซรามิกวางคร่อม
 ท่อนำของไหลทั้ง 2 ท่อที่อยู่ติดกันบนซิลิคอน โมลด์ต้นแบบ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือช่วย
 แลกเปลี่ยนไอออน โดยท่อนำของไหลที่อยู่ด้านบนจะเป็นส่วนของอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่
 ใช้วัดอัตราการไหลของสารตัวอย่าง ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ISFET และขั้วเงิน เงินคลอไรด์ ส่วน
 ท่อนำของไหลที่อยู่ด้านล่าง จะทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง ซึ่งประกอบไปด้วยขั้วเงิน เงินคลอไรด์และมี
 สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 โมลาร์หล่ออยู่ในท่อตลอดเวลา โดยในกรณีที่ต้องการวัด
 ปริมาณไอออนในสารตัวอย่างก็จะใช้ขั้วนี้เป็นขั้วอ้างอิง



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นท่อนำของไหลที่อยู่บนานกัน

2. อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อนำของไหล



รูปที่ 3.22 อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อนำของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการสร้างจะทำวางแท่งเซรามิกลงบนซิลิคอน โมลด์ต้นแบบพร้อมกับอุปกรณ์ ISFET และขั้วเงิน เงินคลอไรด์ก่อนทำการเท PDMS ซึ่งจะต้องเหลือส่วนบนของแท่งเซรามิกไว้ไม่ให้ PDMS ปิดทับทั้งหมด ซึ่งหลังจากกระบวนการประกบติดระหว่างส่วนของท่อนำของไหล และกระจกสไลด์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำแท่งแก้วที่ผ่านการทำความสะอาดมาประกบติดบริเวณแท่งเซรามิกด้วยกระบวนการ RF plasma แล้วใช้ PDMS เททับบริเวณ โคนของแท่งแก้ว เพื่อให้ติดแน่นยิ่งขึ้น ใส่ขั้วเงิน เงินคลอไรด์ลงไปในแท่งแก้ว พร้อมทั้งหล่อด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 โมลาร์ แล้วปิดด้วยพาราฟิล์ม (parafilm) โดยเหลือส่วนของขั้วเงิน เงินคลอไรด์ไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิงในกรณีที่ต้องการวัดปริมาณไอออนในสารตัวอย่าง

3. ขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วที่อยู่บน ไมโครแชมเบอร์ (micro chamber)



รูปที่ 3.23 ขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วที่อยู่บน ไมโครแชมเบอร์

โดยการสร้างก็จะเหมือนกับอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อนำของไหล เพียงแต่วางแท่งเซรามิกลงบนซิลิคอน โมลด์ต้นแบบของไมโครแชมเบอร์ แล้วทำการสร้างเหมือนเดิมทั้งหมด ซึ่งแนวคิดของการสร้างอุปกรณ์ตัวนี้ขึ้นมาเนื่องจาก มีอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์หลายตัวที่ใช้ขั้วแพลทินัมเป็นขั้วอ้างอิง ซึ่งไม่สามารถนำมาวัดปริมาณไอออนในสารตัวอย่างได้ จึงจะเป็นการสูญเสียเปล่าถ้าอุปกรณ์เหล่านี้สามารถวัดได้เพียงอัตราการไหลเท่านั้น ซึ่งขั้วอ้างอิงที่ถูกสร้างขึ้นสามารถต่อกับอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ได้โดยการต่อกันของท่อซิลิคอน

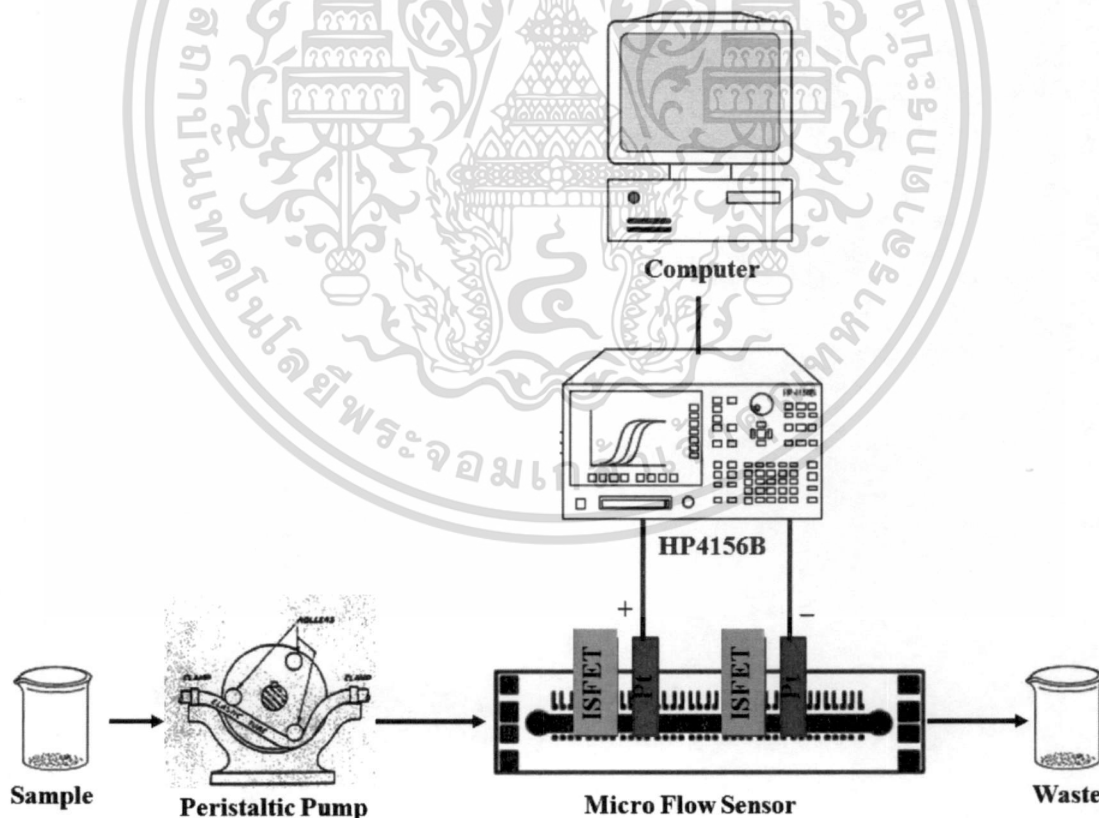
3.5.2 การใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เพื่อวัดความเข้มข้นของสารละลาย

เป็นการนำตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีเบื้องต้น โดยการไปวัดความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการทดลองเปรียบเทียบกับการวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ของสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆเทียบไปด้วย เพื่อดูผลที่วัดได้จากตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์กับผลจากวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร วิธีการใดให้ผลที่ดีและไม่ใช้อย่างไร

ซึ่งวิธีการทดลองจะเตรียมระบบการวัดค่าดังแสดงในรูป 3.16 โดยสารละลายที่ใช้ในการวัดคือสารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3), สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ซึ่งสารละลายแต่ละชนิดจะเตรียมที่ความเข้มข้น 10^{-4} - 1 โมลาร์ โดยจะทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า V_{GS} เริ่มจากน้ำ DI, สารละลายเข้มข้น 0.0001 โมลาร์, สารละลายเข้มข้น 0.001 โมลาร์, สารละลายเข้มข้น 0.01 โมลาร์, สารละลายเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายเข้มข้น 1 โมลาร์ ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการวัดแต่ละสารตัวอย่างนาน 5 นาที เพื่อสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้า V_{GS} หลังจากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างศักย์ไฟฟ้า V_{GS} ของน้ำ DI กับสารละลายเข้มข้นค่าต่างๆ ซึ่งเหตุผลที่นำผลต่างของศักย์ไฟฟ้า V_{GS} มาใช้เนื่องจากในการวัดในแต่ละครั้งจะมีอุณหภูมิและแสงสว่างมาเกี่ยวข้อง โดยสิ่งเหล่านี้จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า V_{GS} ที่วัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่สิ่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือระดับของผลต่างระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า V_{GS} ของสารแต่ละชนิด



รูปที่ 3.24 ระบบการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายโดยการวัดค่าการนำไฟฟ้า

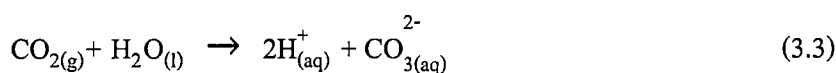
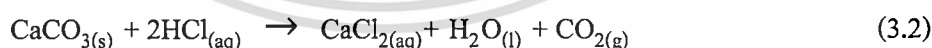
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายโดยการวัดค่าการนำไฟฟ้านั้น จะเตรียมระบบการวัดค่าดังแสดงในรูปที่ 3.24 ซึ่งจะใช้ขั้วแพลทินัมที่อยู่ภายในอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ เซนเซอร์ต่อเข้ากับเครื่อง HP4156B Precision Semiconductor Parameter Analyzer ซึ่งตัวเครื่องจะทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วแพลทินัม และวัดค่ากระแสไฟฟ้าหรือการนำไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายที่ค่าความเข้มข้นต่างๆออกมา หลังจากนั้นจึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าของสารตัวอย่างชนิดต่างๆ พร้อมทั้งกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าให้คงที่แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลาย

ซึ่งหลังจากทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำผลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ เซนเซอร์และผลที่วัดได้จากการวัดค่าการนำไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกัน เพื่อวิเคราะห์ถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี

3.5.3 การใช้อุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เซนเซอร์เพื่อวัดปริมาณไฮโดรเจนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนในสารละลาย

ปัจจุบันธาตุแคลเซียม (Ca) ถูกนำมาประยุกต์ใช้อยู่ในผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบ เช่น ผลิตภัณฑ์เสริมอาหารที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับกระดูกและฟัน ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ที่เป็นส่วนประกอบทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัว เป็นต้น เพียงแต่แคลเซียมมักจะไม่ใช่เป็นธาตุตัวเดียว แต่จะอยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีตัวตรวจจับสัญญาณเป็นอุปกรณ์ ISFET โดยมีเมมเบรนเป็นซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ที่จะตอบสนองได้ดีเฉพาะไฮโดรเจนไอออนเท่านั้น ไม่สามารถวัดการตอบสนองต่อแคลเซียมไอออนได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการที่จะเชื่อมโยงเพื่อที่จะวัดความเข้มข้นของแคลเซียมให้ได้ โดยการวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่แปรผันโดยตรงกับคาร์บอนไอออน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคลเซียม ดังสมการทางปฏิกิริยาเคมีที่ (3.2) และ (3.3)



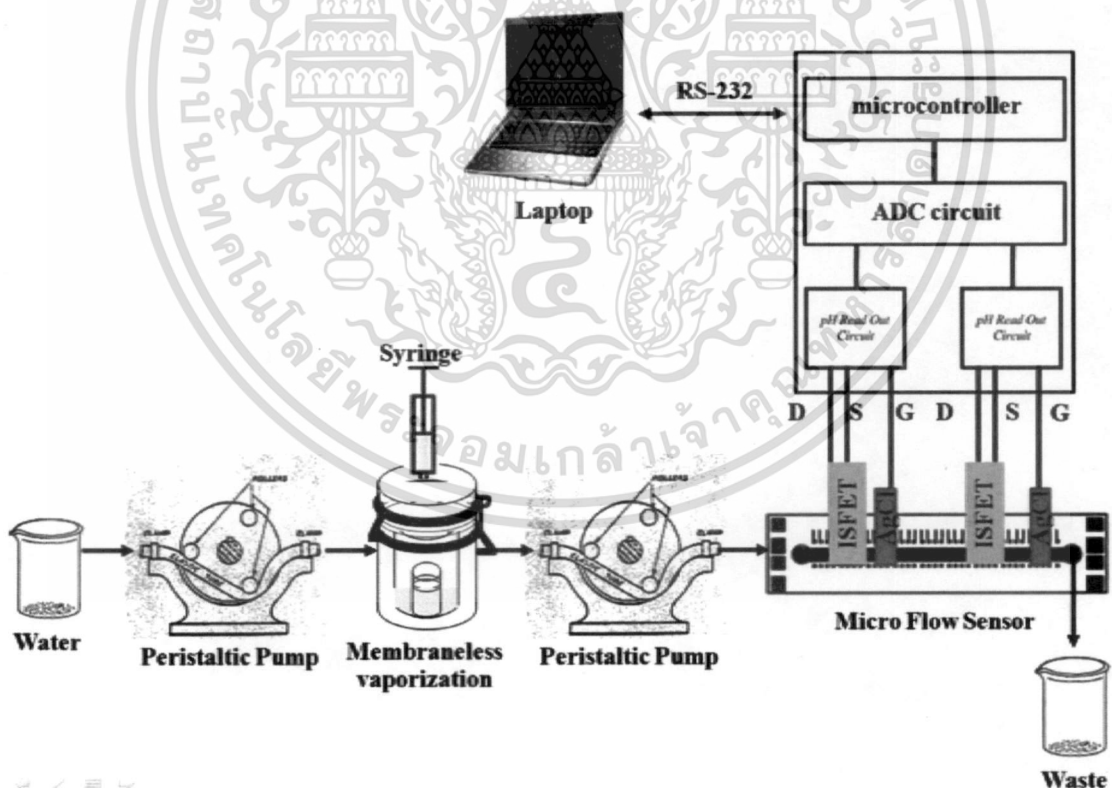
จากสมการทางปฏิกิริยาเคมีที่ (3.2) สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้ว จะเกิดเป็นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และจากสมการทางปฏิกิริยาเคมีที่ (3.3) ถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวไปรวมกับน้ำจะเกิดเป็นไฮโดรเจนไอออนและคาร์บอนไอออน ซึ่งอุปกรณ์ ISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นไฮโดรเจนไอออนได้ และปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นก็จะสอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้จากสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้เป็นสารตั้งต้น

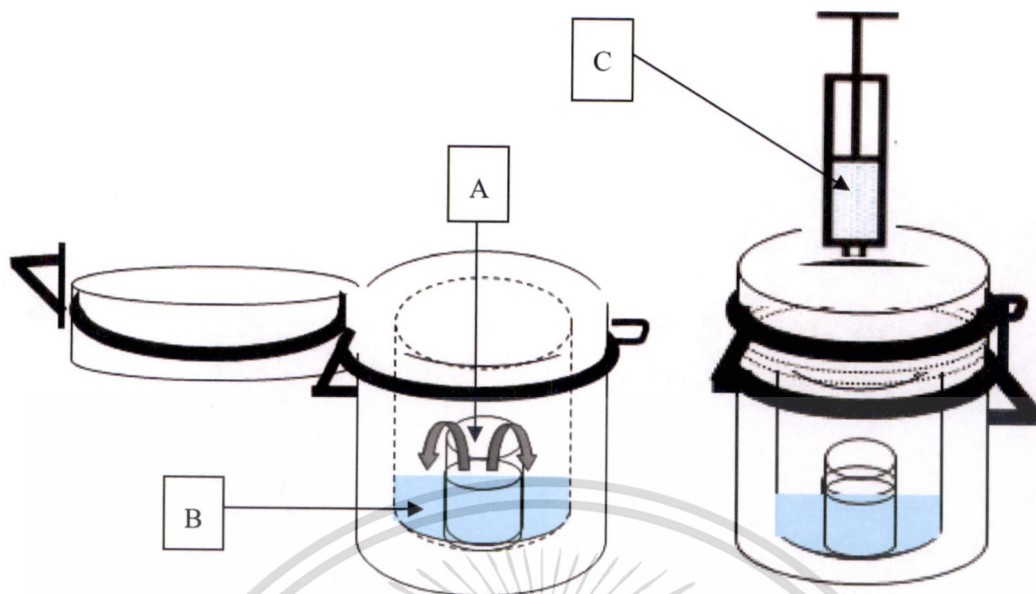
โดยในการทดลองตอนนี้จะเป็นการนำตัวอุปกรณ์ ISFET ไปวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย ดังนั้นจึงต้องมีการหาค่าการตอบสนองของตัวอุปกรณ์ (sensitivity) ก่อนที่จะนำไปใช้ในการทดลอง โดยนำตัวอุปกรณ์ ISFET ไปวัดที่พีเออร์ 4, 7 และ 10 และในการทดลองยังต้องการศึกษาถึงอิทธิพลของโพแทสเซียมคลอไรด์ว่ามีผลต่อค่าการตอบสนองของตัวอุปกรณ์ ISFET หรือไม่ ในกรณีที่ใช้ข้าวอ้างอิงเป็นลวดเงิน เงินคลอไรด์ ด้วยการผสมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ลงในพีเออร์ 4, 7 และ 10 แล้วทำการวัดด้วยอุปกรณ์ ISFET

หลังจากทำการหาค่าการตอบสนองของตัวอุปกรณ์ ISFET เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มทำการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย โดยเตรียมระบบการวัดค่าดังแสดงในรูปที่ 3.25 โดยปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะทำในอุปกรณ์ Membraneless vaporization [31]



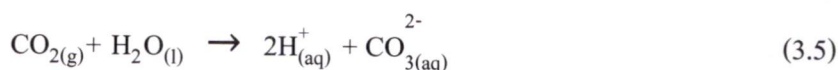
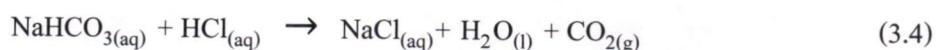
รูปที่ 3.25 ระบบการวัดปริมาณไฮโดรเจนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 การเตรียมระบบ Membraneless vaporization

จากรูปที่ 3.26 เป็นการเตรียมระบบ Membraneless vaporization ซึ่งเป็นส่วนของอุปกรณ์ที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น โดยทำการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) เข้มข้น 1 โมลาร์และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 4.5 โมลาร์ แล้วทำการทดลองโดยการใส่สารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตลงไปที่ตำแหน่ง A ในปริมาตรต่างๆคือ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิลิตร โดยในส่วนของสารละลายที่มีปริมาตรน้อยๆ ก็จะต้องเติมน้ำ DI ให้เป็น 4 มิลลิลิตร ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 1 มิลลิลิตร ก็ต้องเติมน้ำ DI อีก 3 มิลลิลิตรให้ครบเป็น 4 มิลลิลิตร เป็นต้น ในส่วนของตำแหน่ง B จะเป็นน้ำ DI ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมาจากปฏิกิริยา ก็จะมารวมกับน้ำ DI ที่ตำแหน่ง B หลังจากนั้นจะทำการปิดฝาตัวอุปกรณ์ Membraneless vaporization แล้วฉีดกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 1 มิลลิลิตรที่อยู่ในตำแหน่ง C ลงไป แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการที่ (3.4) และ (3.5)

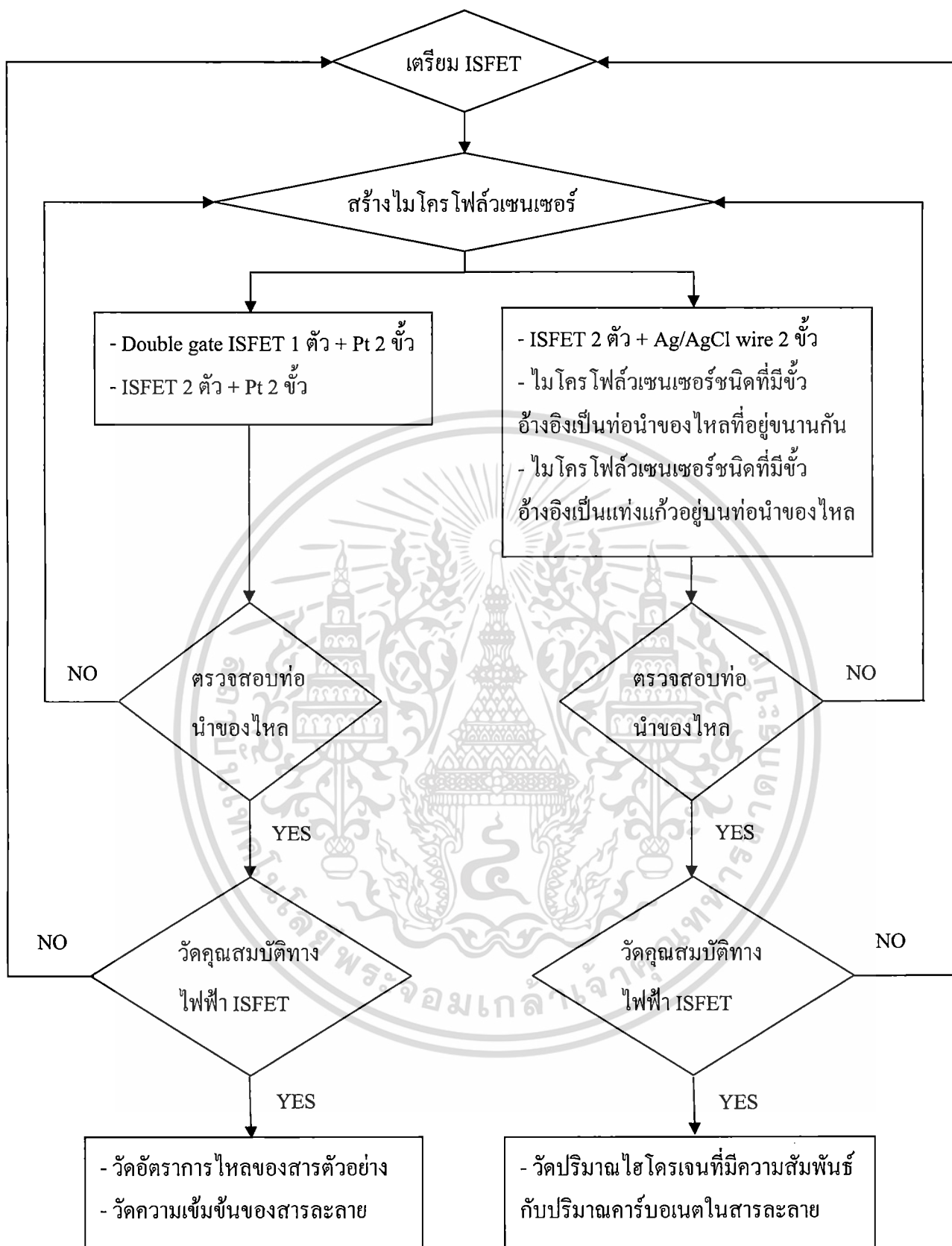


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการทางปฏิกิริยาเคมีที่ (3.4) เมื่อสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่อยู่ในตำแหน่ง A ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกที่ตีตมาจากตำแหน่ง C เกิดเป็นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะระเหยออกจากตำแหน่ง A มารวมกับน้ำที่ตำแหน่ง B แล้วเกิดเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ (3.5) ซึ่งในระบบการวัดค่าความเข้มข้นของปริมาณไฮโดรเจนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอเนตในสารละลายดังแสดงในรูปที่ 3.25 จะต้องมีการไหลของน้ำตลอดเวลา เพื่อให้สารละลายที่เกิดหลังจากปฏิกิริยาไหลเข้าสู่อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ โดยจะต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้เหมาะสม เพื่อให้ระดับน้ำที่อยู่ในอุปกรณ์ Membraneless vaporization คงที่และไม่สั่นไปผสมกับสารละลายที่อยู่ในตำแหน่ง A โดยการทดลองนี้ได้รับความร่วมมือจาก Flow Innovation Research for Science and Technology Laboratories มหาวิทยาลัยมหิดล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

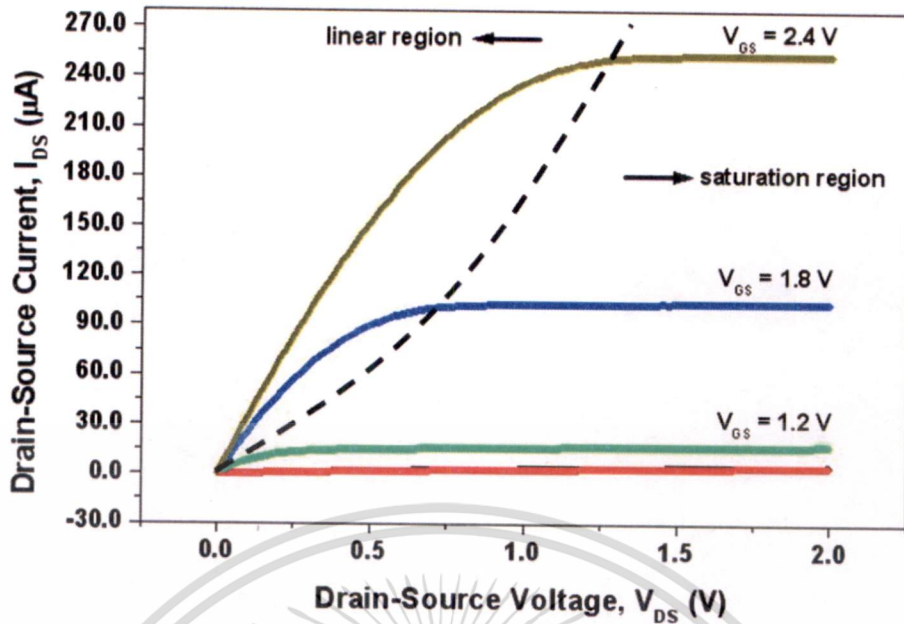
สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองรวมถึงการวิเคราะห์ผลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร (Micro Flow Sensor) โดยมีอุปกรณ์ ISFET เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล โดยในส่วนของผลการทดลองจะประกอบไปด้วย การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET และข้ออ้างอิงที่ประกอบอยู่ภายในตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์หลังจากกระบวนการสร้างเพื่อทำการตรวจสอบว่าตัวอุปกรณ์สามารถใช้งานได้ และผลการวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างด้วยรูปแบบการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ และการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศเปรียบเทียบกับวิธีการซึ่งปริมาตร รวมถึงการนำตัวอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีคือการวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต โซเดียมซัลเฟต และโซเดียมฟอสเฟต รวมถึงการวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

4.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออนและข้ออ้างอิงที่ประกอบอยู่ภายในตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์

4.1.1 การวัดกระแสเกต - ศักย์ไฟฟ้าเกต ($I_{GS} - V_{GS}$)

การวัด $I_{GS} - V_{GS}$ ของอุปกรณ์ ISFET เป็นการวัดเพื่อตรวจสอบกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์ ซึ่งการเกิดกระแสรั่วมีอยู่ด้วยสองสาเหตุคือ ชั้นเมมเบรนมีรอยแตกทำให้สารตัวอย่างสัมผัสกับฐานรองรับซิลิคอน หรือเกิดจากการที่สารตัวอย่างไหลไปสัมผัสบริเวณขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ซึ่งการเกิดกระแสรั่วเหล่านี้จะทำให้อุปกรณ์ ISFET เปรียบเสมือนเป็นขั้วโลหะไฟฟ้าธรรมดาไม่มีคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์อีกต่อไป ดังนั้นหลังจากกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์จึงต้องมีการตรวจสอบกระแสรั่วของอุปกรณ์ ISFET ก่อนนำไปใช้งาน

โดยการวัด $I_{GS} - V_{GS}$ ของอุปกรณ์ ISFET นั้นจะฉีดน้ำเข้าไปในท่อนำของไหลแล้วทำการวัดค่า I_{GS} ที่ค่า V_{GS} ในช่วง 0 – 2.5 โวลต์ โดยให้ศักย์ไฟฟ้า V_{DS} คงที่เท่ากับ 0.2 โวลต์ ซึ่งค่าของ I_{GS} ที่สามารถยอมรับได้อยู่ที่ค่าต่ำกว่า 1 ไมโครแอมแปร์ ซึ่งจะมีการวัดค่า I_{DS} ที่เป็นกระแสของอุปกรณ์ ISFET เปรียบเทียบกับกระแส I_{GS} ด้วย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{DS} กับศักย์ไฟฟ้า V_{DS} ที่ค่า V_{GS} คงที่ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้า V_{DS} เพิ่มขึ้นกระแส I_{DS} จะเพิ่มขึ้นตามค่าของศักย์ไฟฟ้า V_{DS} เกือบจะเป็นเชิงเส้นในช่วงแรก ซึ่งจะเรียกย่านการทำงานในช่วงนี้ว่า linear region ซึ่งความชันของกราฟในช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นกับศักย์ไฟฟ้า V_{GS} เนื่องจากมีผลเกี่ยวเนื่องกับการนำไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ด้วย และเมื่อศักย์ไฟฟ้า V_{DS} มีค่ามากกว่าศักย์ไฟฟ้า V_{GS} อิมตัว กระแส I_{DS} จะมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้า V_{DS} อีกต่อไป โดยจะเรียกการทำงานในช่วงนี้ว่า saturation region ซึ่งย่านการทำงานของอุปกรณ์ ISFET ทั้งหมดมีลักษณะคล้ายมอสทรานซิสเตอร์

4.2 การวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์

เนื่องจากตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่ถูกสร้างขึ้นมาในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยตัวตรวจจับสัญญาณการไหลสองตัว ดังนั้นรูปแบบการวัดอัตราการไหลจึงต้องทำการผ่านสารตัวอย่างสลับกับสารชนิดอื่นเข้าไปในท่อหน้าของไหล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกรูปแบบการวัดโดยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ และการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศ และจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบการวัดทั้งสองวิธี ว่าวิธีใดสามารถวัดอัตราการไหลได้แม่นยำกว่ากัน

4.2.1 รูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำ

สารตัวอย่างที่ใช้คือสารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) เข้มข้น 1 โมลาร์ เนื่องจากเป็นสารละลายที่สามารถเตรียมได้ง่าย และมีค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างเป็นกลาง จึงไม่ทำลายผิวหน้าเมมเบรนของอุปกรณ์ ISFET และขั้วโลหะไฟฟ้า รวมถึงมีความเข้มข้นของไอออนภายในสารละลายค่อนข้างสูง จึงน่าจะให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างท่อน้ำกับสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน การคำนวณอัตราการไหลจะได้ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนมากนัก

โดยในการวัดอัตราการไหลจะเตรียมระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหลดังแสดงในรูป 3.14 แล้วทำการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำเข้าไปภายในตัวอุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์โดยใช้ peristaltic pump ยี่ห้อ EYELA รุ่น SMP-21 โดยในการทดลองจะทำการวัดอัตราการไหลที่ได้จากอุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์เปรียบเทียบกับการวัดอัตราการไหลด้วยวิธีที่เชื่อถือได้อย่างวิธีการชั่งปริมาตรของสารตัวอย่างในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง

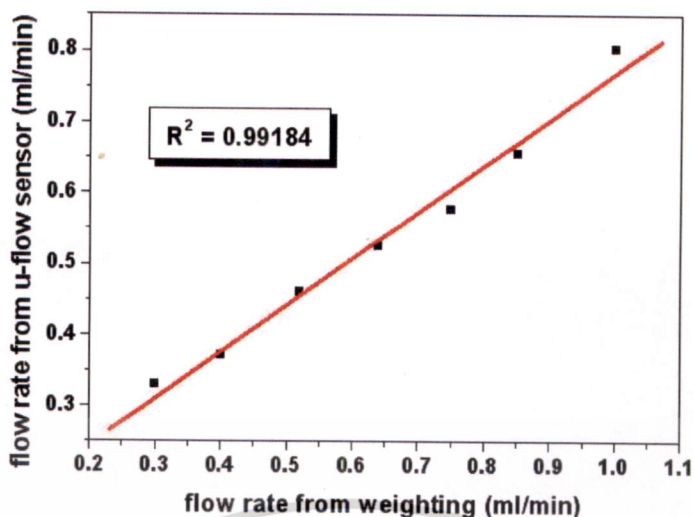
ซึ่งอุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีลักษณะดังนี้

ความกว้างของท่อน้ำของไหล	2,000 μm
ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์	1.1 cm
ความลึกของท่อน้ำของไหล	250 μm
ปริมาตรของท่อน้ำสารตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์	0.0055 cm^3

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหล โดยใช้อุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.0055 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร

flow rate from weighting (ml/min)	flow rate from micro flow sensor (ml/min)	%error
0.300	0.330	10.000
0.400	0.372	7.000
0.520	0.460	11.538
0.640	0.525	17.969
0.750	0.577	23.067
0.850	0.656	22.824
1.000	0.803	19.700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



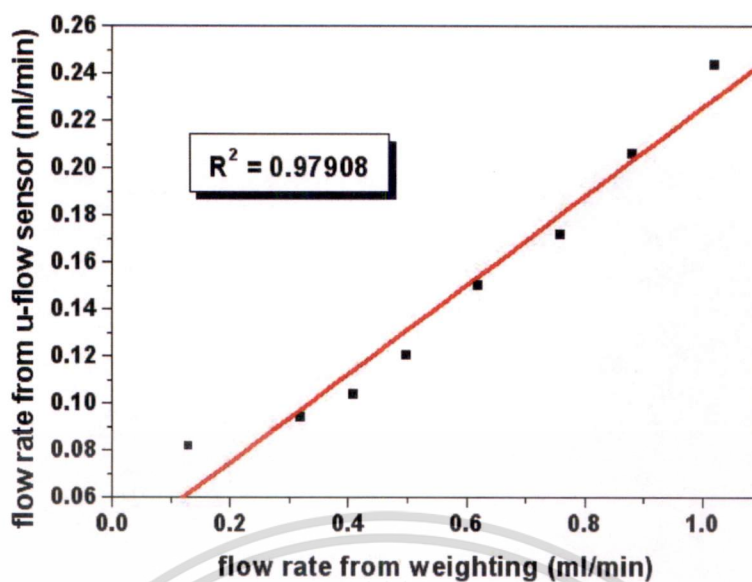
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครฟลูว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.0055 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร

ความกว้างของท่อของไหล	500	μm
ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์	1.1	cm
ความลึกของท่อของไหล	250	μm
ปริมาตรของท่อโดยสารตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์	0.001375	cm ³

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครฟลูว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.001375 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร

flow rate from weighting (ml/min)	flow rate from micro flow sensor (ml/min)	%error
0.130	0.082	36.923
0.320	0.095	70.312
0.410	0.104	74.634
0.500	0.121	75.800
0.620	0.150	75.806
0.760	0.172	77.368
0.880	0.206	76.591
1.020	0.244	76.078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



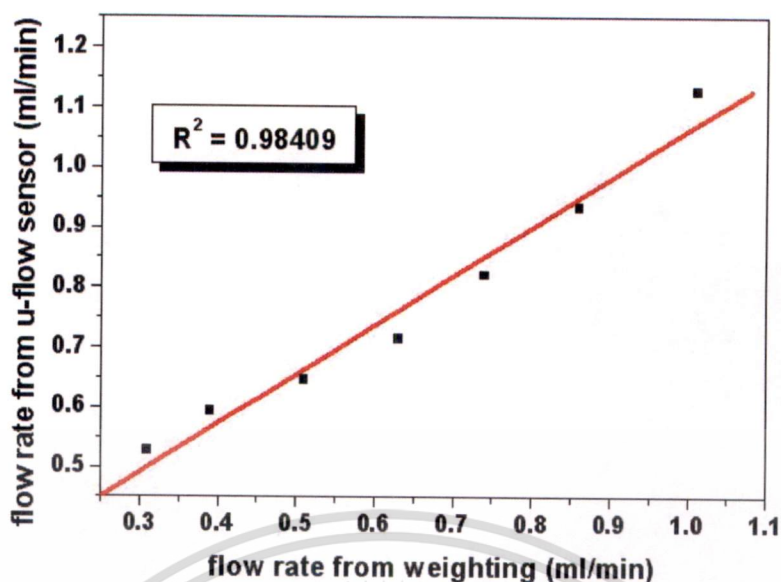
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.001375 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร

ความกว้างของท่อนำของไหล	2,000	μm
ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์	1.85	cm
ความลึกของท่อนำของไหล	250	μm
ปริมาตรของท่ออเนกประสงค์อย่างระหว่างเซนเซอร์	0.00925	cm ³

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.00925 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร

flow rate from weighting (ml/min)	flow rate from micro flow sensor (ml/min)	%error
0.310	0.527	70.000
0.390	0.594	52.308
0.510	0.645	26.471
0.630	0.714	13.333
0.740	0.821	10.946
0.860	0.934	8.605
1.010	1.128	11.683

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.00925 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร

จากรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 พบว่าความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เทียบกับการวัดด้วยการชั่งปริมาตรค่อนข้างแปรผันตามกัน สังเกตได้จากค่า linear regression (R^2) ในรูปมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์การเป็นเชิงเส้นของรูปแบบการวัดอัตราการไหลทั้งสองวิธี แต่ถ้าวัดพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%error) ของอัตราการไหลที่วัดได้จากตัวอุปกรณ์เทียบกับการวัดอัตราการไหลที่ค่อนข้างแม่นยำจากวิธีการชั่งปริมาตรพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ดังนั้นรูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำจึงไม่น่าจะนำมาใช้เป็นวิธีการวัดกับตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดนี้ได้ ซึ่งสาเหตุที่เกิดค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเป็นเพราะผลของการแพร่ไอออน (ion diffusion) เนื่องจากไอออนจากสารละลายโซเดียมไนเตรตสามารถแพร่ไปยังท่อน้ำที่ผ่านไปก่อนหน้านี้ได้ ทำให้อัตราการไหลที่วัดได้จากตัวอุปกรณ์เกิดความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะภายในท่อน้ำของไหลขนาดเล็กของตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.001375 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงถึง 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นเพราะของไหลจะไหลผ่านท่อขนาดเล็กในอัตราเร็วที่สูงมากประกอบกับผลของการแพร่ไอออน ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนยิ่งสูง

4.2.2 รูปแบบการวัดด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อน้ำอากาศ

สารตัวอย่างที่ใช้คือท่อน้ำเพื่อป้องกันปัญหาการติดค้างของไอออนบริเวณเมมเบรนของอุปกรณ์ ISFET ในกรณีที่ใช้สารตัวอย่างเป็นสารละลาย ซึ่งในการวัดอัตราการไหลจะเตรียมระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหลดังแสดงในรูป 3.16 แล้วทำการผ่านสารตัวอย่างสลับกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนตัวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นชอบในการดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนอากาศเข้าไปภายในตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์โดยใช้ peristaltic pump ยี่ห้อ ISMATEC โดยในการทดลองจะทำการวัดอัตราการไหลที่ได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เปรียบเทียบกับ การวัดอัตราการไหลด้วยวิธีการชั่งปริมาตรของสารตัวอย่างในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง เพื่อตรวจสอบ ความแม่นยำในการวัดของตัวอุปกรณ์

ซึ่งอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีลักษณะดังนี้

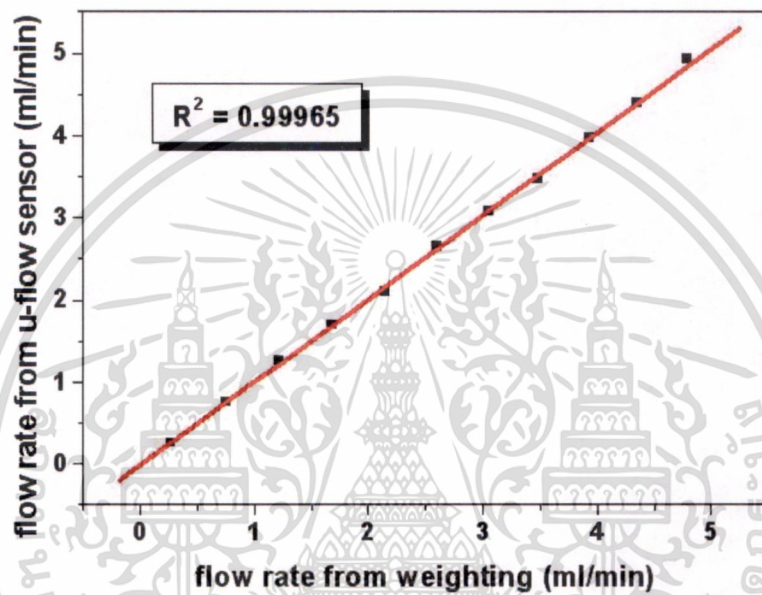
ความกว้างของท่อ นำของไหล	2,000 μm
ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์	2.6 cm
ความลึกของท่อ นำของไหล	250 μm
ปริมาตรของท่อ นำสารตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์	0.013 cm^3

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหล โดยใช้ อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.013 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับ การวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร

flow rate from weighting (ml/min)	flow rate from micro flow sensor (ml/min)	%error
0.272	0.282	3.676
0.741	0.787	6.208
1.200	1.206	0.500
1.653	1.662	0.544
2.117	2.087	1.417
2.573	2.659	3.342
3.019	3.059	1.325
3.476	3.456	0.575
3.942	3.993	1.294
4.187	4.224	0.884
4.637	4.544	2.006
5.093	4.885	4.084
5.520	5.294	4.094
5.988	6.047	0.985
6.443	6.482	0.605

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

flow rate from weighting (ml/min)	flow rate from micro flow sensor (ml/min)	%error
3.483	3.469	0.402
3.939	3.968	0.736
4.356	4.407	1.171
4.797	4.928	2.731



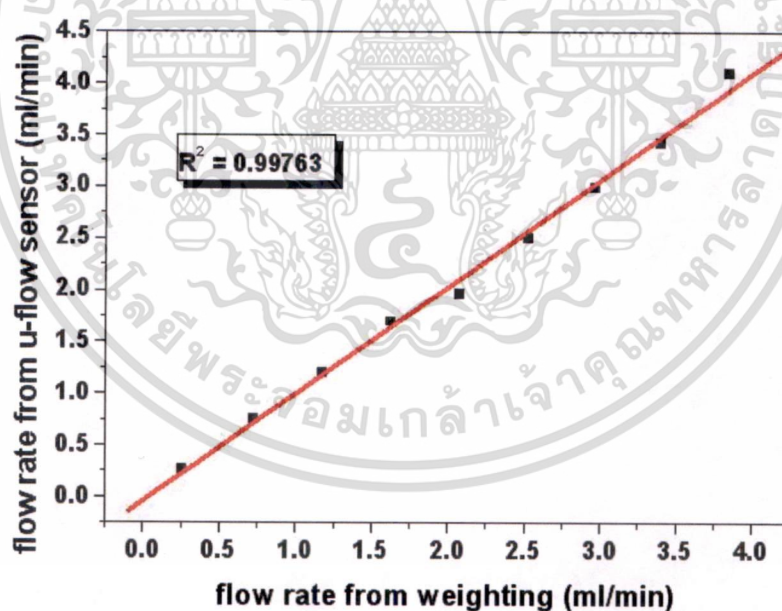
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.0095 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร

ความกว้างของท่อของไหล	2,000	μm
ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์	1.6	cm
ความลึกของท่อของไหล	250	μm
ปริมาตรของท่อสารตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์	0.008	cm^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.008 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร

flow rate from weighting (ml/min)	flow rate from micro flow sensor (ml/min)	%error
0.262	0.265	1.145
0.727	0.749	3.026
1.179	1.203	2.036
1.626	1.694	4.182
2.076	1.959	5.636
2.529	2.509	0.791
2.963	2.988	0.844
3.401	3.429	0.823
3.851	4.103	6.544



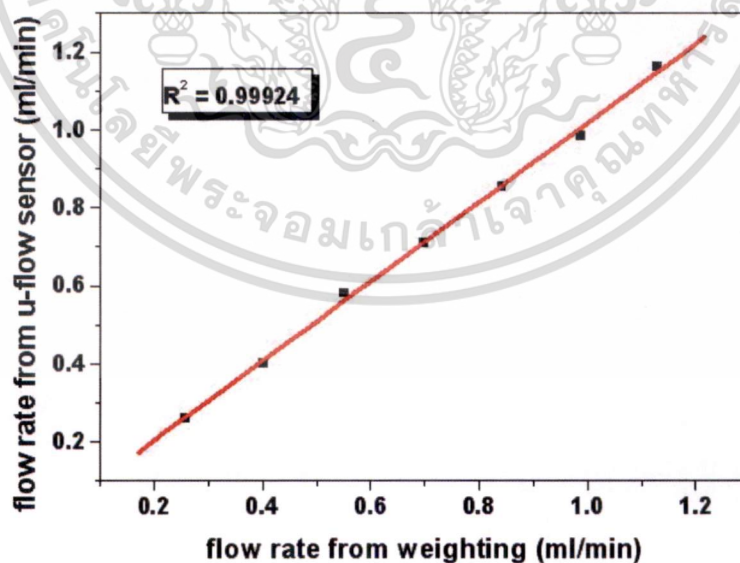
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.008 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของท่อ นำของไหล	500	μm
ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์	1.9	cm
ความลึกของท่อ นำของไหล	250	μm
ปริมาตรของท่อ นสารตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์	0.002375	cm^3

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหล โดยใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.002375 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร

flow rate from weighting (ml/min)	flow rate from micro flow sensor (ml/min)	%error
0.258	0.260	0.775
0.402	0.402	0
0.552	0.581	5.254
0.698	0.711	1.862
0.841	0.855	1.665
0.987	0.985	0.203
1.129	1.162	2.923



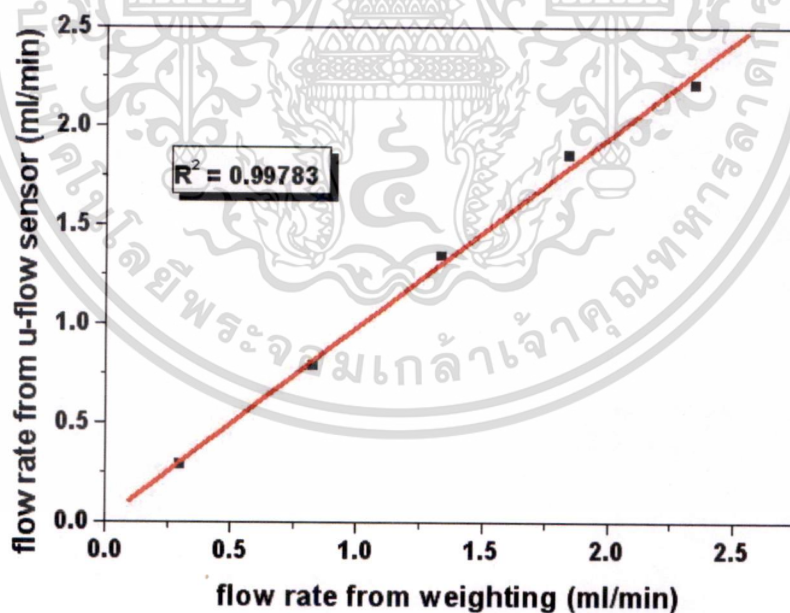
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.002375 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของท่อของไหล	1,000	μm
ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์	1.9	cm
ความลึกของท่อของไหล	250	μm
ปริมาตรของท่อนสารตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์	0.00475	cm^3

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบการวัดอัตราการไหลโดยใช้อุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.00475 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดโดยวิธีการชั่งปริมาตร

flow rate from weighting (ml/min)	flow rate from micro flow sensor (ml/min)	%error
0.298	0.293	1.678
0.826	0.789	4.479
1.340	1.344	0.299
1.842	1.859	0.923
2.348	2.215	5.664



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครฟลิวเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.00475 ลูกบาศก์เซนติเมตร กับการวัดด้วยการชั่งปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.10 พบว่าความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่วัดได้จากอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เปรียบเทียบกับการวัดด้วยการชั่งปริมาตรมีความเป็นเชิงเส้นสูง เนื่องจาก R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 รวมถึงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการชั่งปริมาตรก็ไม่สูงมากนัก ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความไวในการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณการไหลนั่นเอง ดังนั้นรูปแบบการวัดอัตราการไหลด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศจึงน่าจะนำมาใช้กับตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ในงานวิจัยนี้ได้ ซึ่งมีข้อดีคือสามารถตรวจวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างได้ค่อนข้างแม่นยำและรวดเร็วกว่าวิธีการชั่งปริมาตร รวมถึงไม่มีปัญหาการแพร่ของไอออนมาเกี่ยวข้อง

หลังจากที่รูปแบบการวัดอัตราการไหลด้วยการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ได้แล้ว จึงได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลของความกว้างของท่อของไหล และระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ ว่ามีผลต่อช่วงการวัดอัตราการไหล (working range) ของตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์อย่างไร

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบความกว้างของท่อของไหลที่มีผลต่อช่วงการวัดอัตราการไหล

Channel width (μm)	Distance (cm)	Volume (cm^3)	Working range (ml/min)
500	1.9	0.002375	0.26 - 1.16
1,000	1.9	0.00475	0.29 - 2.22
2,000	1.9	0.0095	0.26 - 4.93

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ที่มีผลต่อช่วงการวัดอัตราการไหล

Channel width (μm)	Distance (cm)	Volume (cm^3)	Working range (ml/min)
2,000	1.6	0.008	0.27 - 4.10
2,000	1.9	0.0095	0.26 - 4.93
2,000	2.6	0.013	0.28 - 6.48

จากการทดลองพบว่าเมื่อความกว้างของท่อของไหลเพิ่มขึ้น ช่วงในการวัดอัตราการไหลก็จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ ช่วงในการวัดอัตราการไหลก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นเช่นเดียว ดังนั้นปัจจัยที่มีผลเกี่ยวเนื่องกับช่วงการวัดอัตราการไหลน่าจะเป็นปริมาตรของท่อขนส่งตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์ ดังนั้นในการออกแบบตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ ควรเลือกท่อของไหลที่มีความกว้าง และวางเซนเซอร์ให้ห่างกัน เพื่อเพิ่มปริมาตรของท่อขนส่งตัวอย่างระหว่างเซนเซอร์ จะได้ช่วงในการวัดอัตราการไหลของตัวอุปกรณ์ในช่วงที่กว้าง

4.3 การประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี

หลังจากที่อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์สามารถวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างได้โดยใช้วิธีการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศแล้ว ก็จะนำตัวอุปกรณ์มาประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำตัวอุปกรณ์ไปตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3), สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) รวมถึงการวัดความเข้มข้นของคาร์บอเนตในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3)

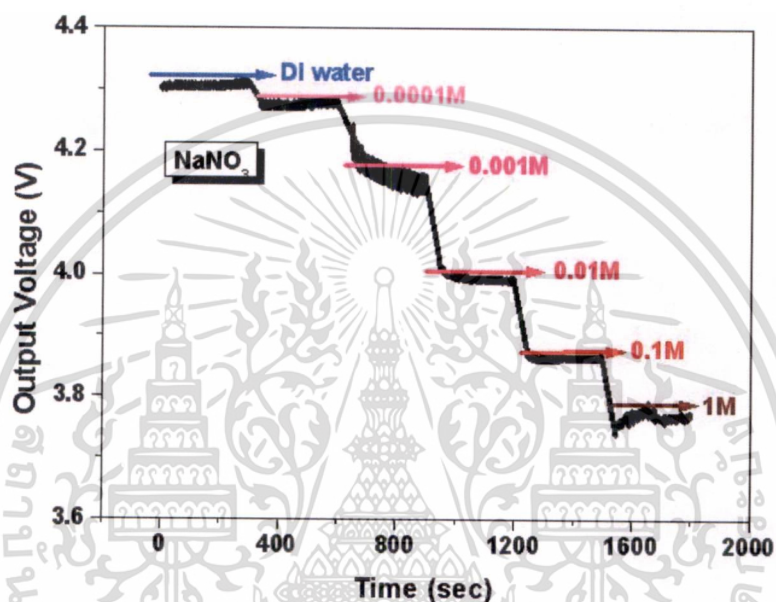
4.3.1 การใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์เพื่อวัดความเข้มข้นของสารละลาย

อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต, สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายโซเดียมฟอสเฟต ที่ความเข้มข้น 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 โมลาร์ ยกเว้นในส่วนของสารละลายโซเดียมฟอสเฟตจะไม่เตรียมที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เพราะจะเกิดการตกผลึกที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจจะทำให้ตัวอุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ โดยจะมีการวัดความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากตัวอุปกรณ์เปรียบเทียบกับ การวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)

ซึ่งวิธีการทดลองจะเตรียมระบบการวัดค่าดังแสดงในรูป 3.16 พร้อมทั้งเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นค่าต่างๆ โดยในการทดลองจะใช้อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีความกว้างท่อของไหล 0.2 เซนติเมตร และใช้ขั้วอ้างอิงเป็นโลหะแพลทินัม ซึ่งอุปกรณ์ ISFET หมายเลข 26 จะถูกใช้เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณศักย์ไฟฟ้า V_{GS} โดยจะทำการผ่านสารละลายที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ เข้าไปภายในตัวอุปกรณ์ด้วย peristaltic pump ยี่ห้อ EYELA รุ่น SMP-21 ด้วยอัตราการไหลประมาณ 1 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งจะเริ่มจากน้ำ DI, สารละลายเข้มข้น 0.0001 โมลาร์, สารละลายเข้มข้น 0.001 โมลาร์, สารละลายเข้มข้น 0.01 โมลาร์, สารละลายเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายเข้มข้น 1 โมลาร์ ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการวัดแต่ละสารตัวอย่างนาน 5 นาที เพื่อสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้า V_{GS}

ตารางที่ 4.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมไนเตรดที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

Output Voltage of ISFET (V)					
DI water	0.0001M	0.001M	0.01M	0.1M	1M
4.306	4.273	4.151	3.988	3.864	3.742

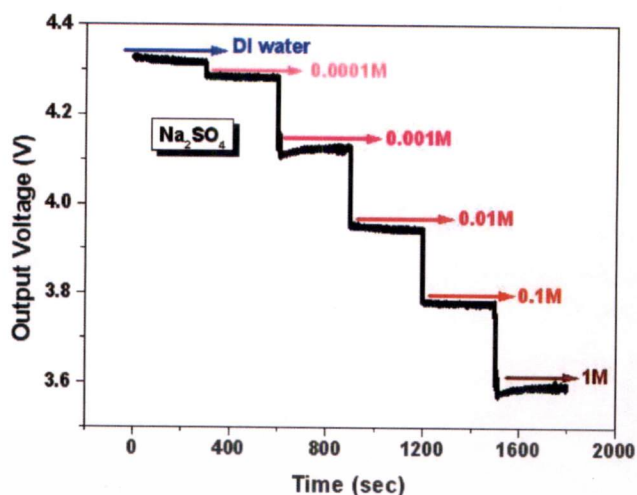


รูปที่ 4.11 ลักษณะสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมไนเตรดที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

ตารางที่ 4.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

Output Voltage of ISFET (V)					
DI water	0.0001M	0.001M	0.01M	0.1M	1M
4.329	4.284	4.124	3.956	3.779	3.591

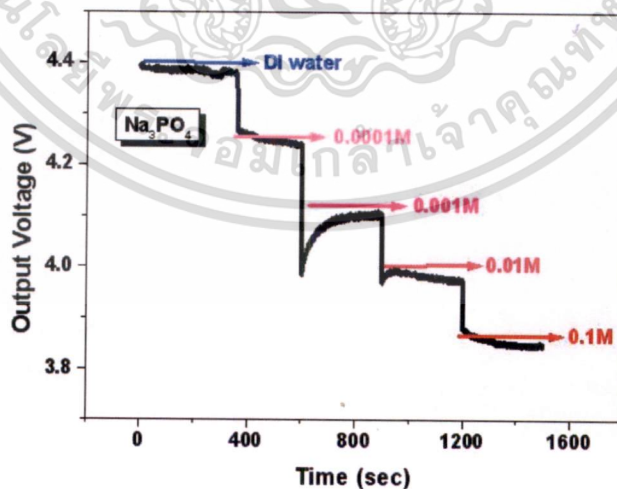
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

ตารางที่ 4.13 ค่าศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

Output Voltage of ISFET (V)				
DI water	0.0001M	0.001M	0.01M	0.1M
4.380	4.229	4.103	3.977	3.843



รูปที่ 4.13 ลักษณะสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ ISFET ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชั้นเมมเบรนเป็นซิลิคอนไนไตรด์ ซึ่งจะตอบสนองต่อไฮโดรเจนไอออนได้ดี แต่สารละลายที่ถูกนำมาวัดในการทดลองนี้มีไอออนอยู่หลายชนิดคือ โซเดียมไอออน, ไนเตรตไอออน, ซัลเฟตไอออนและฟอสเฟตไอออน ซึ่งไอออนทุกชนิดมีผลต่อสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายที่วัดได้เป็นอิทธิพลมาจากปริมาณของไอออนในสารละลาย แต่ไม่สามารถจะบ่งบอกถึงชนิดของไอออนที่ตอบสนองต่ออุปกรณ์ ISFET ได้

จากรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 พบว่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปในทางเดียวกันตามความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้น จึงได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลาย แต่ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์ ISFET ในแต่ละครั้งจะมีอุณหภูมิและแสงสว่างมาเกี่ยวข้องทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์ ISFET เกิดการเปลี่ยนแปลง ในการทดลองนี้จึงเลือกที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายกับความเข้มข้นของสารละลายค่าต่างๆ เนื่องจากผลต่างศักย์ไฟฟ้าค่อนข้างจะคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและแสงสว่าง

ตารางที่ 4.14 ผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมไนเตรตเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

Difference voltage between DI water & solution (V)				
$\Delta(w - 0.0001M)$	$\Delta(w - 0.001M)$	$\Delta(w - 0.01M)$	$\Delta(w - 0.1M)$	$\Delta(w - 1M)$
0.033	0.155	0.318	0.442	0.564

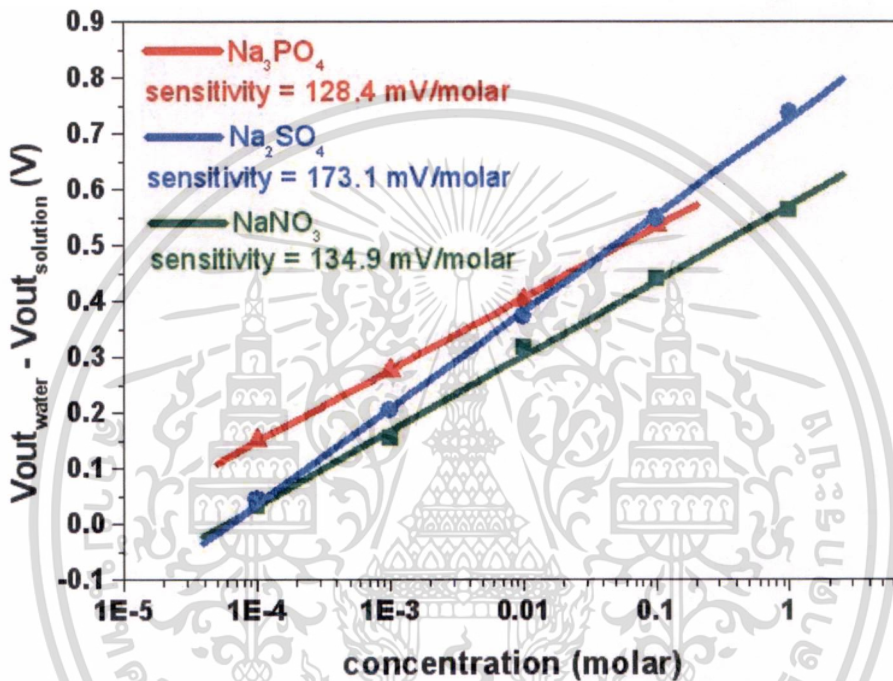
ตารางที่ 4.15 ผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

Difference voltage between DI water & solution (V)				
$\Delta(w - 0.0001M)$	$\Delta(w - 0.001M)$	$\Delta(w - 0.01M)$	$\Delta(w - 0.1M)$	$\Delta(w - 1M)$
0.045	0.205	0.373	0.550	0.738

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมฟอสเฟตเข้มข้นค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

Difference voltage between DI water & solution (V)			
$\Delta(w - 0.0001M)$	$\Delta(w - 0.001M)$	$\Delta(w - 0.01M)$	$\Delta(w - 0.1M)$
0.151	0.277	0.403	0.537

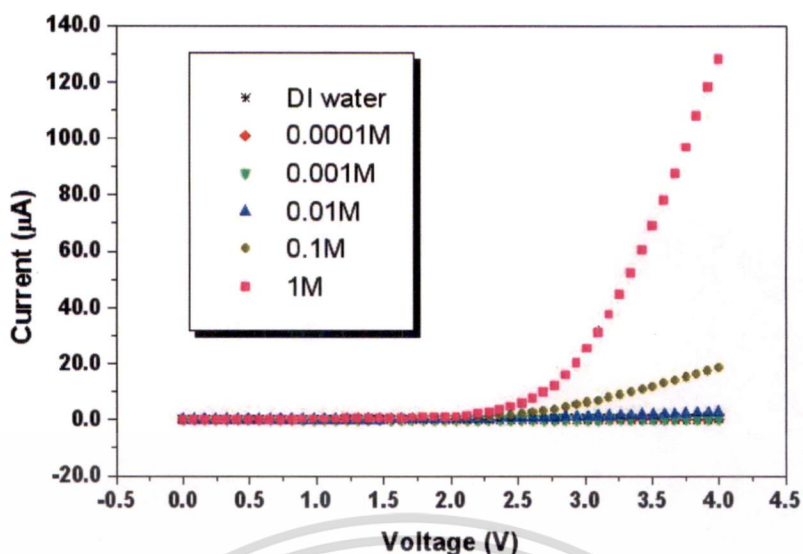


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายกับความเข้มข้นของสารละลายค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET

จากรูปที่ 4.14 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายกับความเข้มข้นของสารละลายค่าต่างๆ ค่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น โดยอุปกรณ์ ISFET มีค่าการตอบสนองต่อสารละลายโซเดียมไนเตรต, โซเดียมซัลเฟตและโซเดียมฟอสเฟตเท่ากับ 134.9, 173.1 และ 128.4 ตามลำดับ

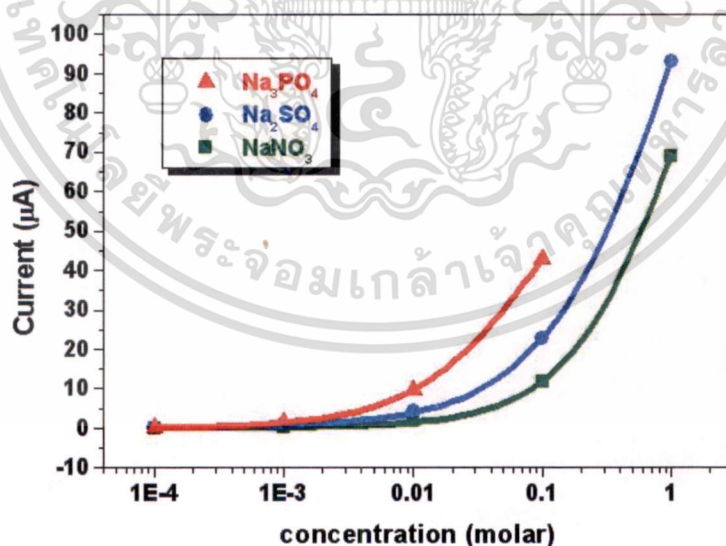
โดยในการทดลองนี้จะมีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ความเข้มข้นค่าต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับกรวัดด้วยอุปกรณ์ไมโครโพลีลิวเซนเซอร์ ซึ่งจะเตรียมระบบการวัดค่าดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.24 และใช้ขั้วแพลทินัมที่อยู่ภายในอุปกรณ์ไมโครโพลีลิวเซนเซอร์ต่อเข้ากับเครื่อง HP4156B Precision Semiconductor Parameter Analyzer ซึ่งตัวเครื่องจะทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วแพลทินัม และวัดค่ากระแสไฟฟ้าหรือการนำไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของน้ำ DI และสารละลายโซเดียมไคลอไรด์เข้มข้นค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 ถ้ากำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 3.5 โวลต์ แล้วนำค่ากระแสไฟฟ้าไปหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายค่าต่างๆ พบว่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16



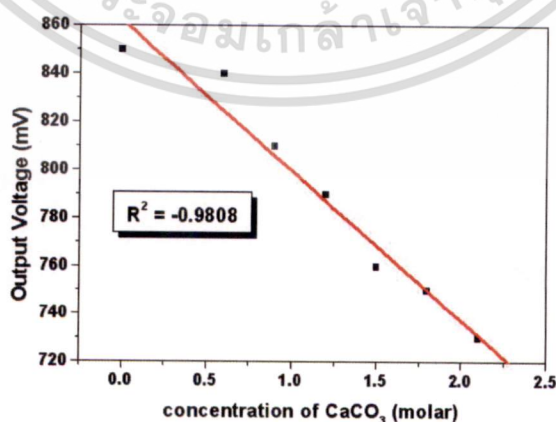
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายค่าต่างๆ

จากการใช้อุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ในการวัดความเข้มข้นของสารละลายโดยเปรียบเทียบการวัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่าลักษณะของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เป็นสัญญาณที่เสถียรและเชื่อถือได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีเมอร์ก่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น ในขณะที่สัญญาณทางไฟฟ้าของการวัดค่าการนำไฟฟ้าก่อนข้างเป็นเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นในการวัดสารละลายเข้มข้นต่ำๆ อุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์น่าจะวัดผลได้ละเอียดกว่าการวัดค่าการนำไฟฟ้า

4.3.2 การใช้อุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เพื่อวัดปริมาณไฮโดรเจนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนในสารละลาย

อุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ในการทดลองนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนไอออนในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต โดยมีอุปกรณ์ ISFET เป็นตัวตรวจวัด ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ ISFET ที่มีชั้นเมมเบรนเป็นซิลิคอนไนไตรด์ ซึ่งจะตอบสนองได้ดีเฉพาะไฮโดรเจนไอออนเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีและอุปกรณ์ที่ชื่อว่า Membraneless vaporization ดังแสดงในรูปที่ 3.26 เข้ามาช่วยในการทดลอง โดยทำการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเข้มข้น 1 โมลาร์และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 4.5 โมลาร์ แล้วทำการทดลองโดยการใส่สารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตลงไปที่ตำแหน่ง A ในปริมาตรต่างๆคือ 1, 2, 3 และ 4 มิลลิลิตร ซึ่งในส่วนของสารละลายที่มีปริมาตรน้อยๆ ก็จะต้องเติมน้ำ DI ให้เป็น 4 มิลลิลิตร ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 1 มิลลิลิตร ก็ต้องเติมน้ำ DI อีก 3 มิลลิลิตร ให้ครบเป็น 4 มิลลิลิตร เป็นต้น ในส่วนของตำแหน่ง B จะเป็นน้ำ DI ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดมาจากปฏิกิริยา ก็จะมารวมกับน้ำ DI ที่ตำแหน่ง B หลังจากนั้นจะทำการปิดฝาตัวอุปกรณ์ Membraneless vaporization แล้วฉีดกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 1 มิลลิลิตรที่อยู่ในตำแหน่ง C ลงไป แล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาประมาณ 2 นาที ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการที่ (3.4) และ (3.5)



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตค่า

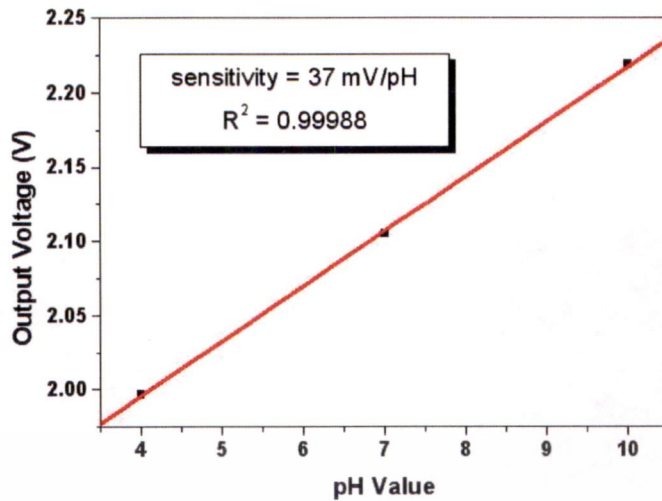
ต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตค่าต่างๆ ที่วัดโดยอุปกรณ์ ISFET ร่วมกับขั้วเงิน เงินคลอไรด์ชนิดแท่งแก้ว โดยการจุ่มลงไปนในสารละลายหลังจากเกิดปฏิกิริยา ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์ตามความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น สังเกตได้จากค่า $R^2 = -0.9808$ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ -1 และค่าติดลบแสดงถึงค่าศักย์ไฟฟ้าแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เซนเซอร์ที่มี ISFET และขั้วเงิน เงินคลอไรด์ เป็นตัวตรวจวัด จึงถูกนำมาประกอบในระบบ Membraneless vaporization ดังแสดงในรูปที่ 3.25 เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการตรวจวัด

โดยอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ จะถูกนำไปตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนในสารละลายหลังจากเกิดปฏิกิริยา จึงจะต้องมีวัดค่าการตอบสนอง (sensitivity) ของอุปกรณ์ ISFET ก่อนที่จะทำการทดลอง ด้วยการนำตัวอุปกรณ์ ISFET ไปวัดบัฟเฟอร์ 4, 7 และ 10 ซึ่งในการทดลองนี้จะมีการศึกษาถึงอิทธิพลของโพแทสเซียมคลอไรด์ว่ามีผลต่อค่าการตอบสนองของตัวอุปกรณ์ ISFET หรือไม่ ในกรณีที่ใช้ขั้วอ้างอิงเป็นขั้วเงิน เงินคลอไรด์ เนื่องจากสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์จะช่วยรักษาคลอไรด์ที่เคลือบอยู่บนขั้วเงินขณะทำการวัด โดยการผสมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ลงในบัฟเฟอร์ 4, 7 และ 10 แล้วทำการวัดด้วยอุปกรณ์ ISFET

ตารางที่ 4.17 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วเงิน เงินคลอไรด์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ 4, 7 และ 10

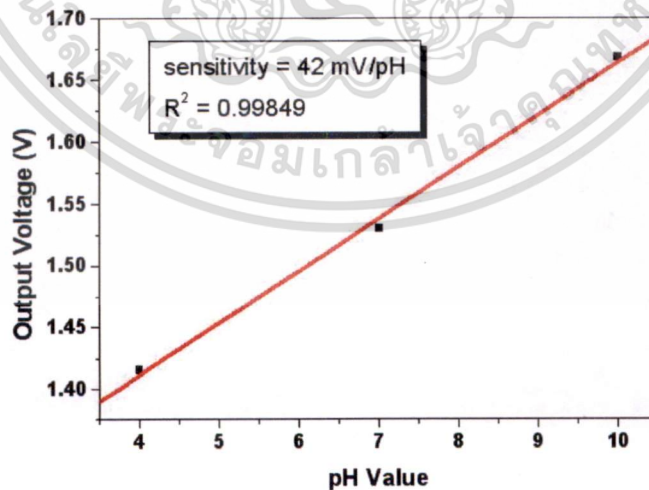
Output Voltage of ISFET (V)		
pH4	pH7	pH10
1.997	2.105	2.219



รูปที่ 4.18 ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับลวดเงิน เงินคลอไรด์
ในสารละลายบัฟเฟอร์

ตารางที่ 4.18 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับลวดเงิน เงินคลอไรด์ ในสารละลาย
บัฟเฟอร์ 4, 7 และ 10 ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์

Output Voltage of ISFET (V)		
pH4 + 1M KCl	pH7 + 1M KCl	pH10 + 1M KCl
1.416	1.530	1.668



รูปที่ 4.19 ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับลวดเงิน เงินคลอไรด์
ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่รูปที่ 4.18 พบว่าค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET เท่ากับ 37 mV/pH ซึ่งถือเป็นค่าที่ต่ำกว่าปกติเมื่อเทียบกับค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่มีชั้นเมมเบรนเป็นซิลิคอนไนไตรด์ซึ่งมีค่าการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 50 mV/pH ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่นำอุปกรณ์ ISFET ไปประกอบเป็นอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์บริเวณเมมเบรนไม่สามารถสัมผัสกับสารละลายบัฟเฟอร์ได้ทั้งหมด ทำให้ค่าการตอบสนองค่อนข้างต่ำกว่าปกติ

ในส่วนของการวัดค่าการตอบสนองในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์จะเห็นได้ว่าค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET สูงขึ้น ทั้งนี้ น่าจะมีอิทธิพลของโพแทสเซียมไอออนและคลอไรด์ไอออนมาเกี่ยวข้องด้วย สังเกตได้จากค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ในรูปที่ 4.19 มีค่ามากกว่าอุปกรณ์ ISFET ในรูปที่ 4.18

หลังจากทำการวัดค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET แล้ว ก็จะนำตัวอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ไปวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอเนตไอออนในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซึ่งในช่วงแรกก็มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ดี แต่พอทำการวัดไปได้ระยะเวลาหนึ่ง พบว่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์ ISFET ไม่คงที่ ซึ่งเกิดจากคลอไรด์ที่เคลือบอยู่บนสวิตช์ถูกกัดออกจนหมด ทำให้ตัวอุปกรณ์เกิดความเสียหายไม่สามารถวัดได้อีกต่อไป

หลังจากที่อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ที่มีขั้วอ้างอิงเป็นสวิตช์เงินเงินคลอไรด์ เกิดความเสียหาย จึงได้มีการพัฒนาตัวอุปกรณ์ เพื่อที่จะนำไปวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอเนตไอออนในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และตัวอุปกรณ์ไม่เกิดความเสียหาย ด้วยการสร้างอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นท่อของไหลที่อยู่ขนานกัน อุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อของไหล รวมถึงขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วที่อยู่บนไมโครแชมเบอร์ เพื่อที่จะนำไปต่อกับอุปกรณ์ไมโครโฟลว์เซนเซอร์แบบเดิมแล้วนำไปวัดสารละลาย

โดยตัวอุปกรณ์ที่จะทำการสร้างใหม่ทั้งหมด จะต้องมีการปรับค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ให้เหมาะสมก่อน โดยการนำอุปกรณ์ ISFET ไปวัดในสารละลายบัฟเฟอร์แล้วสังเกตค่าการตอบสนอง ถ้ายังไม่ได้ค่าอยู่ประมาณ 50 mV/pH ก็จะนำแช่ในกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้นร้อยละ 10 นาน 10 วินาที แล้วนำไปวัดค่าการตอบสนองอีกครั้ง ซึ่งจะทำการกระบวนการแบบนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าการตอบสนองตามที่ต้องการ

ตารางที่ 4.19 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ในสารละลายบัฟเฟอร์ 4, 7, 10 และค่าการตอบสนองที่ผ่านการแช่กรด HF เป็นเวลาต่างๆ

เวลาในการแช่ HF 1%	Output Voltage of ISFET (V)			Sensitivity (mV/pH)
	pH4	pH7	pH10	
0 second	0.894	1.068	1.187	46.800
10 second	1.002	1.174	1.304	49.000
20 second	1.049	1.217	1.350	49.600

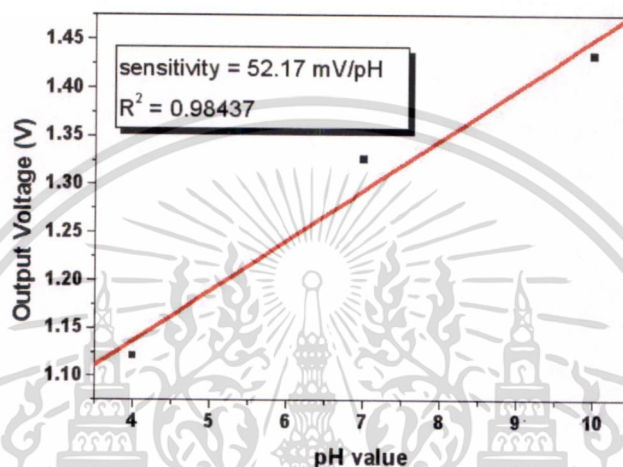
จากตารางที่ 4.19 พบว่าค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อผ่านการแช่ในกรดไฮโดรฟลูออริก เข้มข้นร้อยละ 10 เนื่องจากกรดจะไปกัดชั้นออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของเมมเบรน ทำให้ผิวสัมผัสของเมมเบรนสามารถโดนสารละลายได้มากยิ่งขึ้น ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ก็จะดีขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามการแช่ในกรดเป็นเวลานานๆก็จะไม่ดีต่อผิวหน้าของเมมเบรนเช่นเดียวกัน

หลังจากที่ได้ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ตามที่ต้องการแล้ว ก็จะนำอุปกรณ์ ISFET ไปสร้างเป็นอุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นท่อนำของไหลที่อยู่ขนานกัน และอุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อนำของไหล แล้วนำไปวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซึ่งปรากฏว่าอุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นท่อนำของไหลที่อยู่ขนานกัน ไม่สามารถวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้เนื่องจากไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนโดยผ่านทางสะพานเกลือได้ รวมถึงขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนไมโครเซนเซอร์ ที่นำไปต่อกับอุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์แบบเดิมแล้วนำไปวัดสารละลายก็ไม่สามารถวัดสัญญาณทางไฟฟ้าได้เช่นเดียวกัน อาจเป็นเพราะระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ ISFET กับขั้วอ้างอิงอยู่ห่างกันเกินไป

แต่ในส่วนของอุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อนำของไหล อุปกรณ์ ISFET ตัวที่อยู่ใกล้ขั้วอ้างอิงสามารถวัดสัญญาณทางไฟฟ้า นั่นคืออุปกรณ์ ISFET หมายเลข 55 จึงได้ทำวัดหาค่าการตอบสนองของตัวอุปกรณ์

ตารางที่ 4.20 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้วในสารละลายบัฟเฟอร์ 4, 7 และ 10

Output Voltage of ISFET (V)		
pH4	pH7	pH10
1.121	1.326	1.434



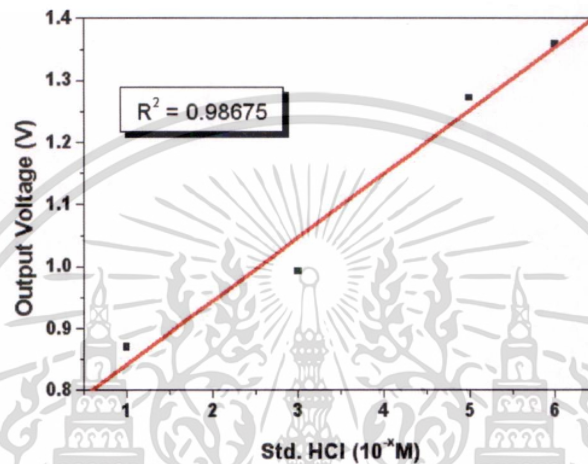
รูปที่ 4.20 ค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้วในสารละลายบัฟเฟอร์

จากรูปที่ 4.20 พบว่าค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET ที่ผ่านการแช่ในกรดไฮโดรฟลูออริก เข้มข้นร้อยละ 10 แล้วจะมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของเมมเบรนซิลิคอนไนไตรด์ เนื่องจากกรดจะไปกัดชั้นออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวหน้าเมมเบรนออก ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอุปกรณ์ ISFET ก่อนนำไปประกอบเป็นอุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์เซนเซอร์

หลังจากหาค่าการตอบสนองของอุปกรณ์ ISFET แล้วก็จะนำตัวอุปกรณ์ไปตรวจวัดการตอบสนองต่อสารละลายชนิดอื่น เพื่อพิสูจน์ว่าอุปกรณ์ ISFET สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายได้ โดยการเตรียมกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น $10^{-1}M$, $10^{-3}M$, $10^{-5}M$ และ $10^{-6}M$ แล้วนำไปวัดด้วยตัวอุปกรณ์

ตารางที่ 4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้วในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นค่าต่างๆ

Output Voltage of ISFET (V)			
HCl 10^{-1} M	HCl 10^{-3} M	HCl 10^{-5} M	HCl 10^{-6} M
0.870	0.992	1.272	1.359



รูปที่ 4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้วในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.21 พบว่าอุปกรณ์ ISFET สามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกได้เช่นเดียวกัน โดยที่ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อความเป็นกรดของไฮโดรคลอริกมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลการตอบสนองเช่นเดียวกับการวัดสารละลายบัฟเฟอร์

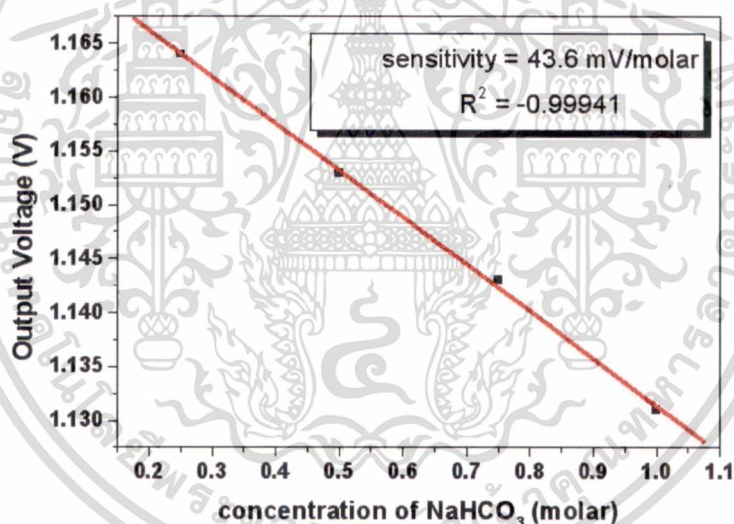
เมื่ออุปกรณ์ไมโครโพลีเมอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อนำของไหลสามารถตอบสนองต่อสารละลายบัฟเฟอร์ และกรดไฮโดรคลอริกค่อนข้างดี จึงนำตัวอุปกรณ์ไปวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-ด่างของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้วในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเข้มข้นค่าต่างๆ

Output Voltage of ISFET (V)			
NaHCO ₃ 0.25M	NaHCO ₃ 0.5M	NaHCO ₃ 0.75M	NaHCO ₃ 1M
1.164	1.153	1.143	1.131
pH 4.82	pH 4.61	pH 4.42	pH 4.19

จากตารางที่ 4.22 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่นำไปวัดในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน คือเมื่อค่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลง โดยจะมีการหาค่าการตอบสนองดังในรูปที่ 4.22 และค่าความเป็นกรด - ด่างที่วัดได้อยู่ที่ประมาณ 4



รูปที่ 4.22 ค่าศักย์ไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ที่ใช้งานร่วมกับขั้วอ้างอิงชนิดแท่งแก้วในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเข้มข้นค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.22 พบว่าอุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิคอนเซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อของไหล สามารถตอบสนองต่อปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอเนตไอออนในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตได้ค่อนข้างดี โดยมีค่าการตอบสนองเท่ากับ 43.6 mV/molar ซึ่งเป็นแนวคิดในการพัฒนาตัวอุปกรณ์ที่ดี ถึงแม้ว่าจะใช้ได้กับอุปกรณ์ ISFET ตัวที่อยู่ใกล้ขั้วอ้างอิงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาถึงรูปแบบการวัดอัตราการไหลและทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตร โดยมีทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ไวต่อไอออน (Ion Sensitive Field Effect Transistor: ISFET) เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล รวมถึงการนำตัวอุปกรณ์ไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่าง วัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต, โซเดียมซัลเฟต, โซเดียมฟอสเฟต และการวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีปริมาตรในระดับไมโครลิตรได้ถูกสร้างขึ้นด้วยวัสดุ polydimethylsiloxane (PDMS) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างจึงเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานทางด้านชีวเคมี และมีอุปกรณ์ ISFET เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล ซึ่งสามารถตอบสนองต่อความเข้มข้นของไอออนในสารละลายได้ อุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลในงานวิจัยนี้จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการวัดความเข้มข้นของสารละลาย

หลังจากที่ทำการสร้างตัวอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะมีการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ก่อนนำไปใช้งานโดยการตรวจสอบการรั่วซึมภายในท่อของไหลด้วยการฉีดเมทานอลผสมสีแดงเพื่อสังเกตการไหลภายในท่อ รวมถึงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ISFET ซึ่งประกอบไปด้วยการวัดกระแสเกต – ศักย์ไฟฟ้าเกตเพื่อตรวจสอบกระแสรั่วไหลของอุปกรณ์ ISFET และการวัดกระแสเดรน – ศักย์ไฟฟ้าเดรนเพื่อศึกษาย่านการทำงานของอุปกรณ์ ISFET

ในส่วนของการเตรียมระบบการวัดค่าและประมวลผลอัตราการไหล วงจรอ่านค่า pH ของอุปกรณ์ ISFET ทั้งสองวงจรถูกรวมเข้าด้วยกัน แล้วทำการแปลงสัญญาณศักย์ไฟฟ้า V_{GS} ที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยวงจร Analog to Digital Convertor (ADC circuit) ก่อนทำประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) และมีการรับส่งข้อมูลไปยังแลปท็อปผ่าน RS-232 ซึ่งในส่วนของการประมวลผลอัตราการไหลที่แสดงออกมาทางแลปท็อปนั้น จะใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ในการประมวลผลออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

รูปแบบการวัดอัตราการไหลของสารตัวอย่างที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับตัวอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้คือการผ่านสารตัวอย่างสลับกับท่อนอากาศเข้าไปภายในตัวอุปกรณ์ เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดอัตราการไหลด้วยการชั่งปริมาตร และปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อช่วงการวัดอัตราการไหลของตัวอุปกรณ์คือปริมาตรของท่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารระหว่างเซนเซอร์ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการไหลในงานวิจัยนี้สามารถวัดอัตราการไหลได้อยู่ในช่วงกว้างสุดที่ 0.282 – 6.482 มิลลิลิตรต่อนาที

ในส่วนการประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยการตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3), สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) รวมถึงการวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอเนตไอออนในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3)

โดยในส่วนการตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไนเตรต, สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายโซเดียมฟอสเฟต จะทำการวัดที่ความเข้มข้น 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 โมลาร์ ซึ่งจะเปรียบเทียบกับระหว่างการวัดด้วยอุปกรณ์ ISFET ภายในไมโครโพลีลิวเซนเซอร์กับการวัดค่าความนำไฟฟ้า โดยลักษณะของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ ISFET ก่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้นสูง และให้ค่าการตอบสนองต่อสารละลายโซเดียมไนเตรต, สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายโซเดียมฟอสเฟตอยู่ที่ 134.9, 173.1 และ 128.4 mV/molar ตามลำดับ แต่ลักษณะของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากการวัดค่าความนำไฟฟ้าจะเป็นเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งถ้าพิจารณาในกรณีที่ต้องการจะวัดความเข้มข้นของสารละลายค่าต่างๆ การวัดโดยใช้อุปกรณ์ไมโครโพลีลิวเซนเซอร์น่าจะให้ผลทางสัญญาณไฟฟ้าที่ละเอียดกว่าการวัดค่าความนำไฟฟ้า

ในส่วนการวัดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอเนตไอออนในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต อุปกรณ์ไมโครโพลีลิวเซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนท่อนำของไหลได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการวัด ซึ่งจากการทดลองตัวอุปกรณ์ ISFET ตัวที่อยู่ใกล้ขั้วอ้างอิงแท่งแก้ว สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตได้ดี ซึ่งให้ค่าการตอบสนองอยู่ที่ 43.6 mV/molar ซึ่งก็เป็นแนวโน้มที่ดีในการเปลี่ยนสารตัวอย่างเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร หรือปูนซีเมนต์ เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

อุปกรณ์ไมโครโพลีลิวเซนเซอร์ในงานวิจัยนี้ มีความน่าสนใจที่เลือกใช้อุปกรณ์ ISFET เป็นตัวตรวจจับสัญญาณของไหล เนื่องจากอุปกรณ์ ISFET สามารถตอบสนองต่อปริมาณไอออนในสารตัวอย่างได้ จึงน่าจะเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านเคมีในการวัดความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ซึ่งตัวอุปกรณ์ ISFET นี้เองสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดโดยนำไปเป็นเซนเซอร์รวมอยู่ในงานประเภท Lap on chip ก็จะทำให้ตัวอุปกรณ์มีความสมบูรณ์และมีประโยชน์เพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Arshak Poghosian, Tatsuo Yoshinobu, and Michael J. Schöning, “Flow-velocity Microsensors Based on Semiconductor Fieldeffect Structures”, *Sensors* 2003, 2003, pp. 202-212.
- [2] A. Poghosian, J.W. Schultze, and M.J. Schöning, “Multi-parameter detection of (bio-)chemical and physical quantities using an identical transducer principle”, *Sensors and Actuators B* 91, 2003, pp. 83-91.
- [3] A. Poghosian, J.W. Schultze, and M.J. Schöning, “Application of a (bio-)chemical sensor (ISFET) for the detection of physical parameters in liquids”, *Electrochimica Acta* 48, 2003, pp. 3289-3297.
- [4] Arshak Poghosian, Lars Berndsen, and Michael J. Schöning, “Chemical sensor as physical sensor: ISFET-based flow-velocity, flow-direction and diffusion-coefficient sensor”, *Sensors and Actuators B* 95, 2003, pp. 384-390.
- [5] N.T. Nguyen, “Micromachined flow sensors – a review”, *Flow Meas. Instrum.*, Vol. 8, No. 1, 1997, pp. 7-16.
- [6] Jian Wu, and Willy Sansen, “Electrochemical time of flight flow sensor”, *Sensors and Actuators A* 97-98, 2002, pp. 68-74.
- [7] P. Bergveld, “Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurement”, *IEEE Transactions on Electron devices*, Vol. BME-17(1), 1970, pp. 59-63.
- [8] T. Matsuo and K.D. Wise, “An integrated field-effect electrode for biopotential recording” *IEEE Trans. Biomed. Eng.* BME-21, 1974, pp. 485-487.
- [9] Chiyang Yu, Wenshian Liang, Iching Kuan, Chehung Wei, and Weiguog Gu, “Fabrication and characterization of a flow-through PCR device with integrated chromium resistive heaters”, *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 2007.
- [10] P. Bergveld. “Thirty years of ISFETOLOGY what happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years”, *Sensors and Actuators B* 88, 2003, pp. 1-20.
- [11] โสภกา กลิ่นจันทร์. 2546. *ไบโอเซนเซอร์เบื้องต้น*. กรุงเทพฯ:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- [12] S. Cerimovic, A. Talic, F. Kohl, R. Beigelbeck, J. Schalko, and A. Jachimowicz, "Micromachined Flow Sensors Enabling Electrocalorimetric and TOF Transduction", *Procedia Chemistry* 1, 2009, pp. 132-135.
- [13] P.Bergveld, "Development, operation, and application of the Ion-Sensitive Field Effect Transistor as a tool for electrophysiology", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, BME-19, No.5, September 1972, pp.342-351.
- [14] P.Bergveld, "Future applications of ISFETs", *Sensors and Actuators B4*, 1991, pp.125-133.
- [15] T.Matsou and M.Esashi, "Methods of ISFET fabrication", *Sensors and Actuators* 1, 1981, pp.77-96.
- [16] Luc Bousse and Shahriar Mostar-shed, "Comparison of the hysteresis of Ta₂O₅ and Si₃N₄ pH-sensing", *Sensors and Actuators B17*, 1994, pp. 157-164.
- [17] L. Bousse, H.H. Van Den Vlekkert and N.F. De Rooij, "Hysteresis in Al₂O₃ gate ISFETs", *Sensors and Actuators B2*, 1990, pp.103-110.
- [18] A.S. Poghossian: "The super-nerstian pH sensitivity of Ta₂O₅ gate ISFETs", *Sensors and Actuators B*, 1992, pp.367-370.
- [19] Luc Bousse and Shahriar Mostar-shed., "Comparison of the hysteresis of Ta₂O₅ and Si₃N₄, pH-sensing-insulators", *Sensors and Actuators B*, 17, 1994, pp. 157-164.
- [20] Chung-We Pan, Jung-Chuan Chou, Tai-Ping Sun and Shen-Kan Hsiung "Development of the tin oxide pH electrode by the sputtering method", *Sensors and Actuators B* 108, 2005, pp. 863-869.
- [21] Hung-Kwei Liao, Jung-Chuan Chou, Wen-Yaw Chung, Tai-Ping Sun and Shen-Kan Hsiung, "Study of amorphous tin oxide thin films for ISFET applications", *Sensors and Actuators B* 50, 1998, pp. 104-109.
- [22] Hung-Kwei Liao, En-Shieh Yang, Jung-Chuan Chou, Wen-Yaw Chung, Tai-Ping Sun, and Shen-Kan Hsiun, "Temperature and Optical Characteristics of Tin Oxide Membrane Gate ISFET", *IEEE Transactions on electron devices*, VOL. 46, NO. 12, DECEMBER 1999, pp. 2278-2281.
- [23] JAN S-S, CHEN Y-C, CHOU J-C, CHENG C-C and LU C-T, "Nonideal Factors of Ion-Sensitive Field-Effect Transistors with Lead Titanate Gate", *Jpn J Appl Phys Part 1*, VOL.41,NO.10, 2002, pp.6297-6301.

- [24] Shiun-Sheng Jan, Jung-Lung Chiang, Ying-Chung Chen, Jung-Chuan Chou and Chien-Chuan Cheng, "Characteristics of the hydrogen ion-sensitive field effect transistors with sol-gel-derived lead titanate gate", *Analytica Chimica Acta* 469, July 2002, pp. 205–216.
- [25] L. Bousse, N.F. de Rooij and P. Bergveld: "Operation of chemically sensitive field effect sensors and as a function of the insulator-electrolyte interface", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-30, 1983, pp.1263-1270.
- [26] S.D. Moss, C.C. Johnson and J. Janata, "Hydrogen, calcium and potassium ion sensitive FET transducer: a preliminary report", *IEEE Trans. On Biomedical Eng.*, BME-25, 1978, pp.49-54.
- [27] Kwok K. Ng, "Complete guide semiconductor devices", McGraw-Hill, New York, 1995, pp. 518-520.
- [28] H.-K. Liao, J.-C. Chou, W.-Y. Chung, T.-P. Sun and S.-K. Hsiung, Proc. "Study on pHpzc and surface potential of tin oxide gate ISFET" *Materials Chemistry and Physics* 59, 1999, pp. 6-11
- [29] ชลิตดา ภูหาเรือง. 2547. "กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสร้างลวดลายขนาด 5 ไมครอน บนซิลิคอนไดออกไซด์และอลูมิเนียม" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] Jung-Chuan Chou and Chen-Yu Weng, "Sensitivity and hysteresis effect in Al₂O₃ gate pH ISFET", *Materials Chemistry and Physics* 71, 2001, pp. 120–124.
- [31] K. Sereenonchai, P. Saetear, N. Amornthammarong, K. Uraisin, P. Wilairat a, S. Motomizuc and D. Nacapricha, "Membraneless vaporization unit for direct analysis of solid sample", *Analytica Chimica Acta* 597, 2007, 157–162.
- [32] Figure 2.1 [online]. Available; <http://www.examiner.com/x-11432-Pittsburgh-Medical-Technology-Examiner~y2009m11d21-IBM-scientists-have-unveiled-a-new-labonachip-device-for-screening-infections-and--biomarkers>



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

องค์ประกอบและการนำไปใช้งานของเซนเซอร์แต่ละชนิด

หมายเลข เซนเซอร์	ชนิดของเซนเซอร์	ชนิดของ ISFET	ชนิดของขั้ว อ้างอิง	การนำไปใช้งาน
3-4	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิล เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.0055 cm^3	Si_3N_4 double gate ISFET	โลหะ แพลทินัม	วัดอัตราการไหลด้วย รูปแบบการผ่านสาร ตัวอย่างสลับท่อน้ำ
11-12	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิล เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.001375 cm^3	Si_3N_4 double gate ISFET	โลหะ แพลทินัม	วัดอัตราการไหลด้วย รูปแบบการผ่านสาร ตัวอย่างสลับท่อน้ำ
15-16	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิล เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.00925 cm^3	Si_3N_4 double gate ISFET	โลหะ แพลทินัม	วัดอัตราการไหลด้วย รูปแบบการผ่านสาร ตัวอย่างสลับท่อน้ำ
25-26	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิล เซนเซอร์	Si_3N_4 double gate ISFET	โลหะ แพลทินัม	วัดความเข้มข้นของ สารละลาย
43-44	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิล เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.013 cm^3	Si_3N_4 gate ISFET	ลวดเงิน เงิน คลอไรด์	วัดอัตราการไหลด้วย รูปแบบการผ่านสาร ตัวอย่างสลับท่อนอากาศ
47-48	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิล เซนเซอร์ที่มีปริมาตร ระหว่างเซนเซอร์ 0.0095 cm^3	Si_3N_4 gate ISFET	ลวดเงิน เงิน คลอไรด์	วัดอัตราการไหลด้วย รูปแบบการผ่านสาร ตัวอย่างสลับท่อนอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข เซนเซอร์	ชนิดของเซนเซอร์	ชนิดของ ISFET	ชนิดของขั้ว อ้างอิง	การนำไปใช้งาน
49-50	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.008 cm^3	Si_3N_4 gate ISFET	ลวดเงิน เงิน คลอไรด์	วัดอัตราการไหลด้วย รูปแบบการผ่านสาร ตัวอย่างสลับที่อนอากาศ
51-52	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.002375 cm^3	Si_3N_4 gate ISFET	ลวดเงิน เงิน คลอไรด์	วัดอัตราการไหลด้วย รูปแบบการผ่านสาร ตัวอย่างสลับที่อนอากาศ
53-54	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์ที่มีปริมาตรระหว่างเซนเซอร์ 0.00475 cm^3	Si_3N_4 gate ISFET	ลวดเงิน เงิน คลอไรด์	วัดอัตราการไหลด้วย รูปแบบการผ่านสาร ตัวอย่างสลับที่อนอากาศ
55-56	อุปกรณ์ไมโครโพลีซิลิโคนเซนเซอร์ชนิดที่มีขั้วอ้างอิงเป็นแท่งแก้วอยู่บนที่อนนำของไหล	Si_3N_4 gate ISFET	ขั้วเงิน เงิน คลอไรด์ ชนิดแท่ง แก้ว	วัดความเข้มข้นของ คาร์บอนตในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การเปรียบเทียบค่ากระแสเกตและกระแสเดรนของอุปกรณ์ ISFET หมายเลขต่างๆ

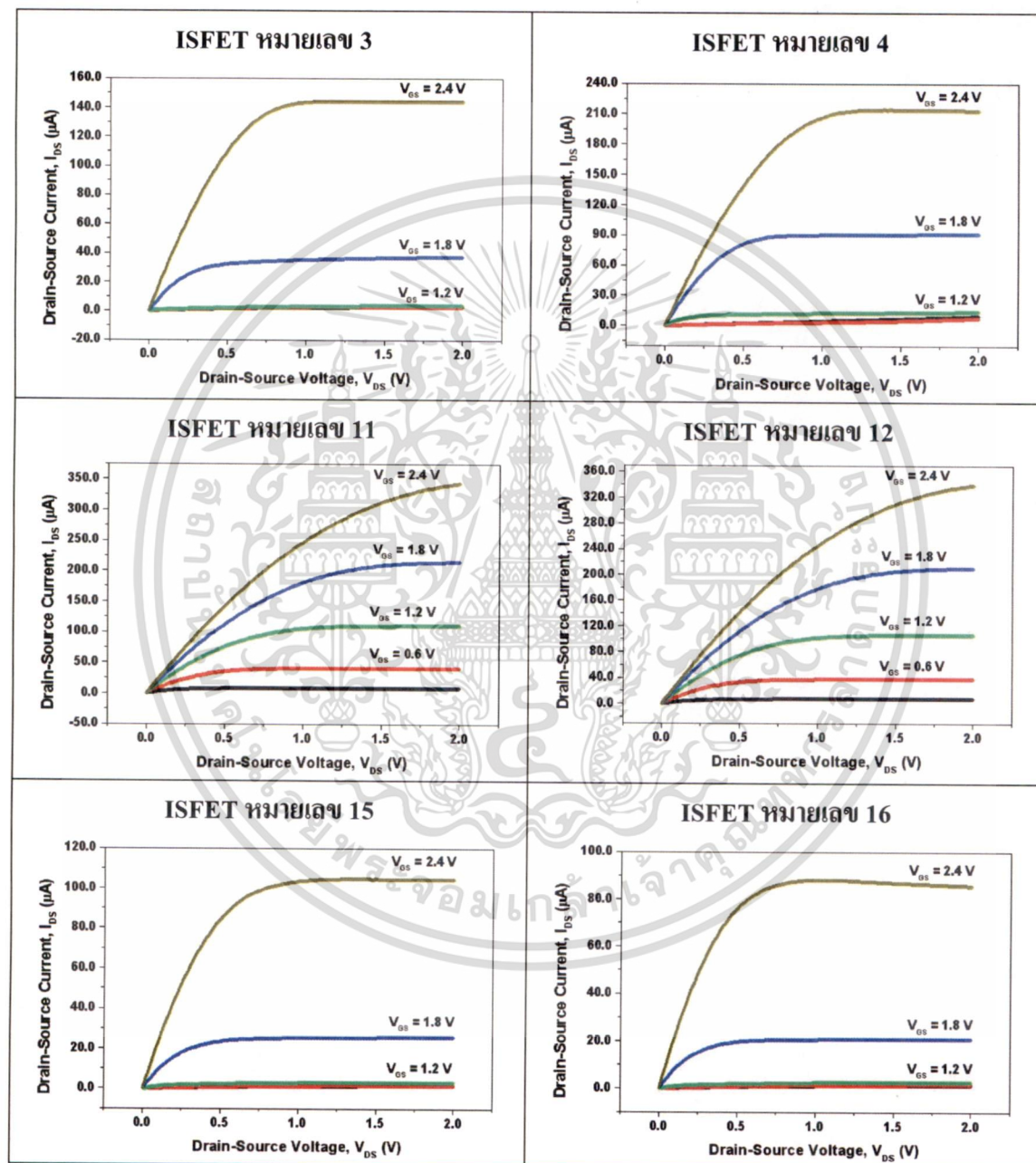
ศักย์ไฟฟ้าเกต (V_{GS}) และศักย์ไฟฟ้าเดรน (V_{DS}) คงที่เท่ากับ 2.5 โวลต์ และ 0.2 โวลต์ ตามลำดับ

หมายเลข ISFET	กระแสเกต (nA)	กระแสเดรน (μ A)
3	0.704	56.300
4	315.000	63.800
11	0.013	61.900
12	0.032	62.200
15	2.170	46.400
16	7.930	44.000
26	0.013	85.400
43	2.820	69.300
44	0.031	70.700
47	282.000	75.700
48	78.200	79.500
49	77.800	72.300
50	407.000	88.900
51	0.040	71.100
52	0.306	58.200
53	0.207	58.600
54	1.080	56.900
55	368.000	88.500

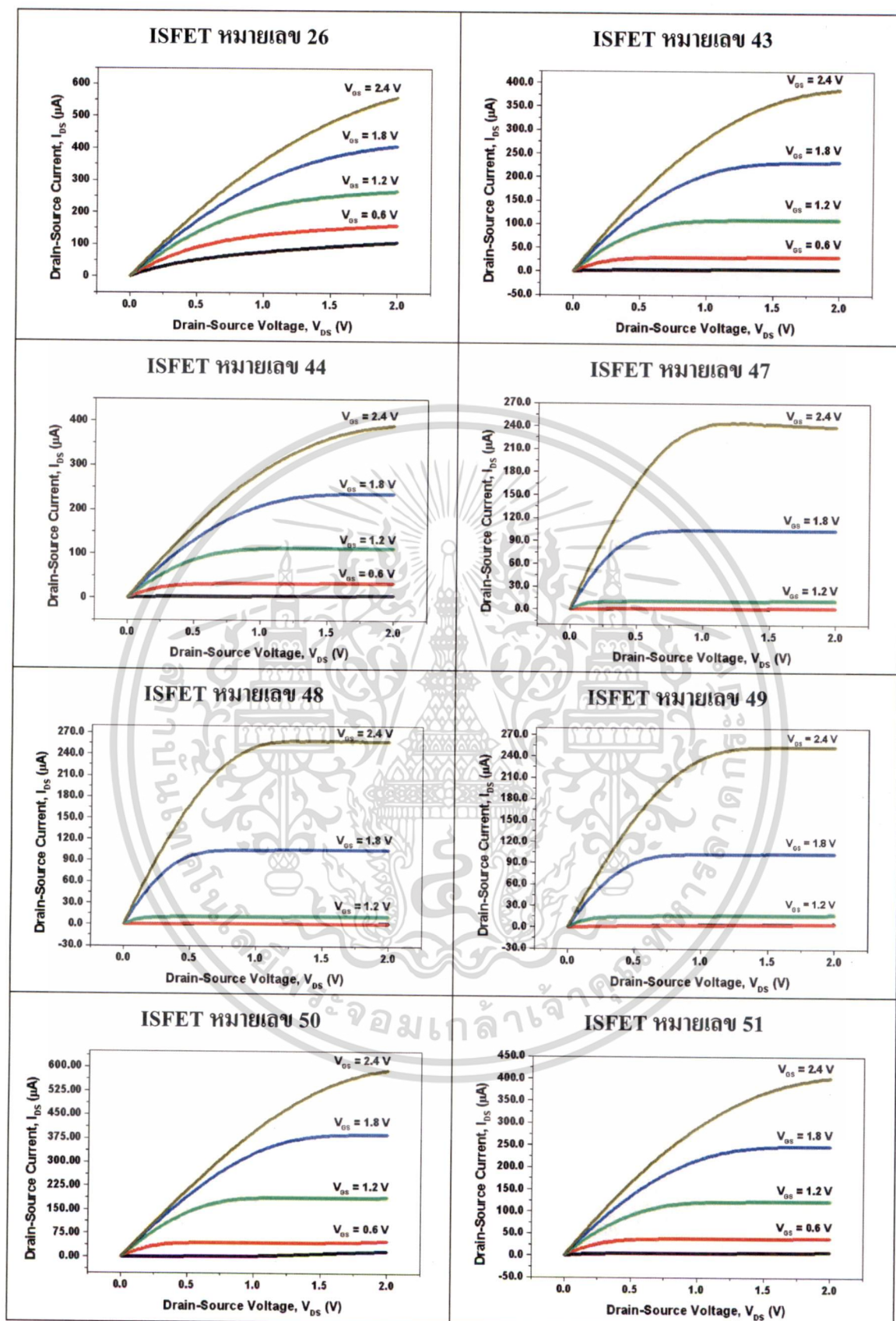
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

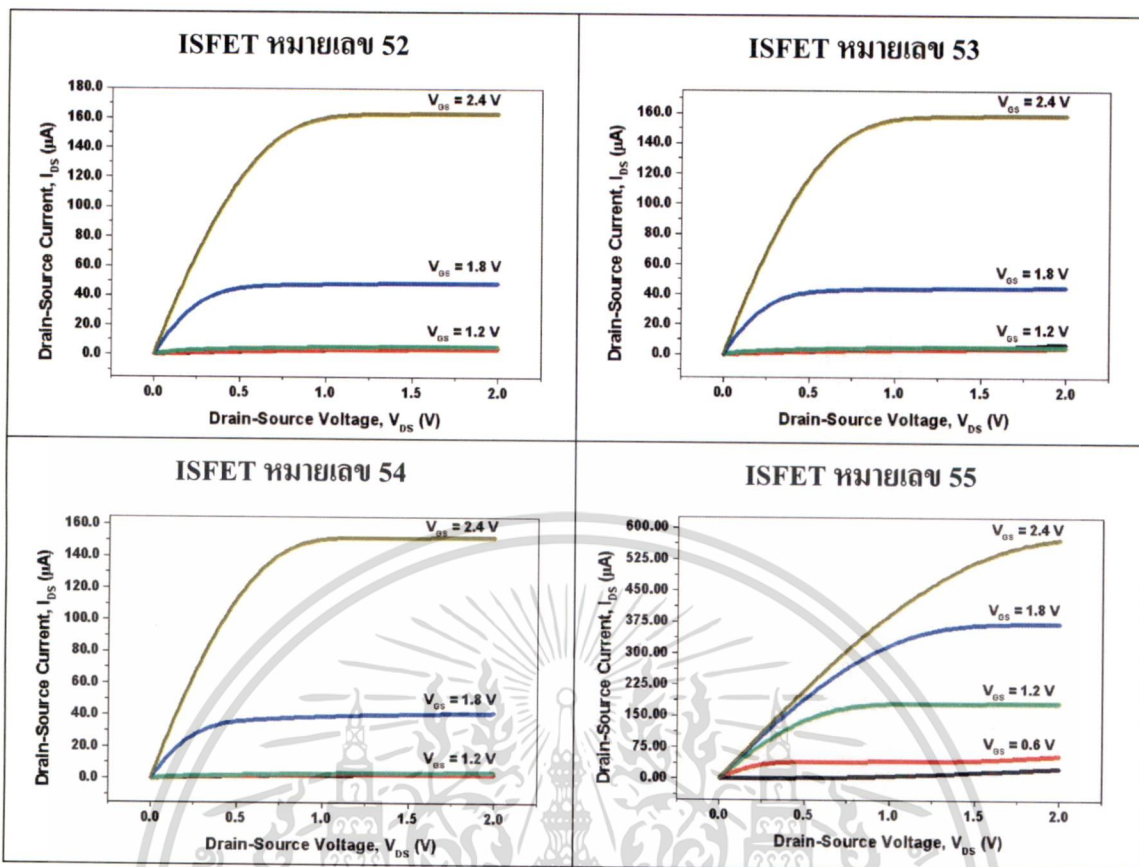
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับศักย์ไฟฟ้าเดรนของอุปกรณ์ ISFET หมายเลขต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธนากร เจียมสกุล
วัน เดือน ปีเกิด	7 สิงหาคม พ.ศ. 2528
ที่อยู่	ข/3 004/8 ตำบลนครนายก อำเภอเมือง จังหวัดนครนายก 26000
ประวัติการศึกษา	- ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนครนายกวิทยาคม - ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] T.Jiemsakul, O.Trithaveesak, W.Bunjongpru, C.Hruanun, A.Poyai, and J.Nukeaw, "Application of Double Gate Ion Sensitive Field Effect Transistor for Detection of Fluid Flow Rate in Micro-channel", Advanced Materials Research, Vols. 93-94, 2010, pp. 109-112.

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

- [1] T. Jiemsakul, A. Srisuwan, O. Trithaveesak, W. Bunjongpru, J. Supadech, J. Nukeaw, C. Hruanun, and A. Poyai, "Fabrication and Applications of Micro Flow Sensor using ISFET Device", The 4th International Conference on Sensors (Asiasense2009).
- [2] T.Jiemsakul, O.Trithaveesak, W.Bunjongpru, C.Hruanun, A.Poyai, and J.Nukeaw, "Application of Double Gate Ion Sensitive Field Effect Transistor for Detection of Fluid Flow Rate in Micro-channel", International conference on Functionalized and Sensing Materials (FuSeM).
- [3] Thanakorn Jiemsakul, Opas Trithaveesak, Win Bunjongpru, Yossawat Rayanasukha, Supanit Porntheerapat, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, and Jiti Nukeaw, "A ISFETs integrated Microchannel Device for Detection Solution Concentration", the 16th International Conference on Flow Injection Analysis Including Related Techniques (16thICFIA).
- [4] Kanjana Saeteaw, Pattasuda Duangkaew, Rungroj Maolanon, Gamolwan Tumcharern, Wisaroot Sripumkhai, Thanakorn Jiemsakul, Supanit Porntheeraphat, Jiti Nukeaw, and Sirapat Pratontep, "Detection of Potassium Ions in Water using In-line Microchamber with Electrochemical Electrode Array", the 16th International Conference on Flow Injection Analysis Including Related Techniques (16thICFIA).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้