



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาผลกระทบของการฉายแสงอุลตราไวโอเลตในสภาพแวดล้อมของ  
ก๊าซต่างๆที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ  
ชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับ  
ไอระเหยของสารอินทรีย์

**Effect of Ultraviolet Illumination in Ambient Gases on The  
Photoluminescence and Electrical Properties of Nanoporous Silicon Layer  
for Application to Organic Vapor Sensor**

นายนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้คณะฯ ประจำปีงบประมาณ 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิจัย จากรายได้คณะ ประจำปีงบประมาณ 2555

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ของทางสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

27 กันยายน 2555

## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่มีจุดเด่นอยู่ที่ สามารถสร้างได้ง่าย สร้างบนเนื้อผลึกซิลิกอน ใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนกับขั้วลูมิเนียม 2 ขั้ว โดยทำการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันบนแผ่นซิลิกอนชนิดพี และทำการสร้างขั้วลูมิเนียมบนชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 500  $\mu\text{m}$  ซึ่งชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองศึกษาการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยคำนึงถึงผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน แล้วทำการทดลองตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ พบว่าชั้นพอร์สซิลิกอนที่ใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเป็น 48% โดยปริมาตร เวลา 10 นาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$  เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน พบว่าชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนสามารถตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่มีความเข้มข้นไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ต่างๆ กันได้ ซึ่งเหมาะที่จะนำมาพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ต่อไป

## **Abstract**

The purpose of this research is to present the fabrication process and electrical characteristics of nanoporous silicon sensor in organic vapor. The advantage of this device are simple process compatible in silicon technology and usable in room temperature. The device consists of nanoporous silicon layer which is deposited by aluminum film with 500  $\mu\text{m}$  electrode gap. Nanoporous silicon is used as the chemical vapor sensing element. In this study, the nanoporous silicon was formed by anodization of silicon wafer in hydrofluoric solution and the effect of hydrofluoric solution, time and current were examined. The result showed that when using hydrofluoric solution 48% by volume with current 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$  in 10 minutes, the nanoporous silicon can detect organic vapor efficiently. Studying on electrical characteristics of nanoporous silicon, it was found that the nanoporous silicon layer can detect the different organic vapor concentrations. Therefore, the nanoporous silicon in organic vapor sensor is important to develop other applications in the future.

# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	I
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
รายการคำย่อ.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎีของงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 นาโนพอร์สซิลิคอน.....	5
2.1 ทฤษฎีนาโนพอร์สซิลิคอน.....	5
2.1.1 โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	5
2.1.2 การแบ่งประเภทของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	6
2.1.3 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	8
2.2 เทคนิคการสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน.....	11
2.2.1 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมลึ.....	11
2.1.2 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	12
2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	14
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	15
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	20
2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	22
2.4.1 ปฏิกริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน.....	22
2.4.2 การเกิดรูพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน .....	24
2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	28
2.5 ความพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	31
<b>บทที่ 3 การตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....</b>	<b>34</b>
3.1 นิยามของเซนเซอร์.....	34
3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี.....	34
3.1.2 เซนเซอร์ทางฟิสิกส์.....	35
3.2 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ.....	35
3.3 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน...	36
3.3.1 หลักการดูดซับและความแน่นในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	37
3.3.2 การเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.	41
<b>บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....</b>	<b>45</b>
4.1 กระบวนการสร้าง.....	45
4.1.1 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	45
4.1.2 การสร้างตัวตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	46
4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	49
4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	49
4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	50
4.2.3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก	
การตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ.....	51

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	53
5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน.....	53
5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน.....	57
5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์ส ซิลิกอน.....	64
5.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของ สารอินทรีย์.....	71
5.4.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์.....	75
5.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการ แอนโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์.....	81
5.5 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยใช้ชั้น นาโนพอร์สซิลิกอน.....	90
5.5.1 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆต่อ การตรวจจับแบบต่อเนื่อง.....	90
5.5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นไอระเหยของสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ต่ออุปกรณ์ตรวจจับ.....	91
5.5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของไอระเหยของสารอินทรีย์ต่างชนิดกันต่ออุปกรณ์ ตรวจจับ.....	93
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	98

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	17

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน.....	2
2.1 โครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน (ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง.....	6
2.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดต่างๆ กัน.....	7
2.3 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	9
2.4 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ (ก) เนื้อผลึกซิลิคอน (ข) ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (ค) ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (ง) ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ.....	10
2.5 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอน.....	11
2.6 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการเอโนไลซ์เซชัน.....	15
2.7 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง (ก) แบบแอโนดิก (ข) แบบแคโทดิก.....	16
2.8 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	17
2.9 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิก....	19
2.10 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	20
2.11 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	21
2.12 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน.....	23
2.13 แบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ (ก) ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า (ข) ลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดพอร์สซิลิคอน.....	26
2.14 การเคลื่อนที่พาหะ โสลที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพล ของสนามไฟฟ้า.....	26
2.15 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน.....	27
2.16 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	28
2.17 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน.....	29
2.19 กลไกในการหยุดกักโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนชนิดพี โดยที่	
(ก) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล	
(ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะโฮล จากผลึกซิลิคอนผ่านไป	
ยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน.....	30
2.20 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่	
(ก) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า 2W	
(ข) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W.....	32
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	33
2.22 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ.....	34
3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี.....	34
3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์.....	35
3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	37
3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ก) ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์มาเกาะ	
(ข) โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์มาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุน	
(ค) โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้น โมโนเลเยอร์	
(ง) โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นมัลติเลเยอร์	
(จ) โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์มาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน	
(ฉ) โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์เกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ช) ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยออกไปหมดแล้ว.....	38
3.5 แบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	41

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แบบจำลองการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ก) ก่อนตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ (ข) ขณะตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์.....	42
3.7 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ก) ช่วงที่ไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์	
(ข) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์มาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน	
(ค) ช่วงที่เกิดการอึดตัวในการตรวจจับโมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์	
(ง) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์เกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(จ) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารอินทรีย์ระเหยออกไปหมดแล้ว.....	43
4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์เท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน.....	44
4.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ก) การเตรียมแผ่นซิลิคอน (ข) การสร้างขั้วลูมิเนียมด้านหลัง	
(ค) การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ง) การสร้างขั้วลูมิเนียมด้านหน้า.....	48
4.3 อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	49
4.4 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์.....	51
4.7 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์.....	51
5.1 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที.....	58
5.2 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที.....	59
5.3 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที.....	59
5.4 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที.....	60
5.5 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที.....	60
5.6 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที.....	61
5.7 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที.....	61
5.8 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที.....	62
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับเวลาในการ แอนโนไดซ์เซชัน.....	63
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับเวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน.....	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm <sup>2</sup> .....	66
5.12 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm <sup>2</sup> .....	66
5.13 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm <sup>2</sup> .....	67
5.14 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm <sup>2</sup> .....	67
5.15 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm <sup>2</sup> .....	68
5.16 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm <sup>2</sup> .....	68
5.17 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm <sup>2</sup> .....	69
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน.....	70
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน.....	70
5.20 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์.....	71
5.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	71
5.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	72
5.23 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ก) กระแสไฟฟ้าก่อนเปิดไอระเหยของสารอินทรีย์ (ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอระเหยของสารอินทรีย์ (ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิ่มตัว (ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอระเหยของสารอินทรีย์ (จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม.....	73
5.24 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารอินทรีย์ของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	73
5.25 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารอินทรีย์ของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	74
5.26 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารอินทรีย์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 5 นาที.....	75
5.27 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอสอลล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที.....	76
5.28 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารอินทรีย์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารอินทรีย์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 15 นาที.....	77

