

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆโดยอาศัย  
หลักการตอบสนองทางกระแสและการเปลี่ยนแปลงค่าความเก็บประจุ  
ของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

Development of Chemical Vapour Elements Sensor by Current  
Response and Capacitance of Nanoporous Silicon Layer

จัดทำโดย

นายนิรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

TP

519

16219ก

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ประจำปีงบประมาณ 2554

b. 12599 578  
i. ....

เลขหมู่  
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของ  
เลขทะเบียน 130304  
ร.น. เลื่อน. ข. 3. 1019. 2557

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่มีจุดเด่นอยู่ที่ สามารถสร้างได้ง่าย สร้างบนเนื้อผลึกซิลิคอน ใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับขั้วลุ่มิเนียม 2 ขั้ว โดยทำการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันบนแผ่นซิลิคอนชนิดพี และทำการสร้างขั้วลุ่มิเนียมบนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 500  $\mu\text{m}$  ซึ่งชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองศึกษาการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยคำนึงถึงผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนแล้วทำการทดลองตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ พบว่าชั้นพอร์สซิลิคอนที่ใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเป็น 48% โดยปริมาตร เวลา 10 นาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$  เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน พบว่าชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนสามารถตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่มีความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ที่ต่างๆ กันได้ ซึ่งเหมาะที่จะนำมาพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ต่อไป

## Abstract

The purpose of this research is to present the fabrication process and electrical characteristics of nanoporous silicon sensor in chemical 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 chemical vapor efficiently. Studying on electrical characteristics of nanoporous silicon, it was found that the nanoporous silicon layer can detect the different chemical vapor concentrations. Therefore, the nanoporous silicon in chemical 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 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมสี่.....	11
2.2.2 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	12
2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	14
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	15
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับ	
สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	20
2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	22
2.4.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน.....	22
2.4.2 การเกิดรูพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน .....	24
2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	28
2.5 ความพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน.....	31
บทที่ 3 การตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	34
3.1 นิยามของเซนเซอร์.....	34
3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี.....	34
3.1.2 เซนเซอร์ทางฟิสิกส์.....	35
3.2 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ.....	35
3.3 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	36
3.3.1 หลักการดูดซับและควบแน่นในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	37
3.3.2 การเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	41
บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	45
4.1 กระบวนการสร้าง.....	45
4.1.1 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	45
4.1.2 การสร้างตัวตรวจจับไอระเหยของสารเคมี โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	46
4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	49
4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	49
4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	50
4.2.3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก การตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ.....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	53
5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	53
5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	57
5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์ส ซิลิคอน.....	64
5.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของ สารเคมี.....	71
5.4.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	75
5.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการ แอนโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	81
5.5 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ โดยใช้ชั้นนาโน พอร์สซิลิคอน.....	90
5.5.1 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆต่อการ ตรวจจับแบบต่อเนื่อง.....	90
5.5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆต่อ อุปกรณ์ตรวจจับ.....	91
5.5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของไอระเหยของสารเคมีต่างชนิดกันต่ออุปกรณ์ ตรวจจับ.....	93
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(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 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการเอโนโดซ์เซชัน.....	15
2.7 ลักษณะการไปอัสเซตล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง	
(ก) แบบแอโนดิก (ข) แบบแคโทดิก.....	16
2.8 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอน	
(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	17
2.9 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนที่มีการไปอัสแบบแอโนดิก....	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 โสลที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า.....	26
2.15 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน.....	27
2.16 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	28
2.17 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน.....	29
2.19 กลไกในการหยุดกักโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคนชนิดพี โดยที่	
(ก) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิโคน และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล	
(ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิโคนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิโคน	
(ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะโฮล จากผลึกซิลิโคนผ่านไปยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่กั้นหลุมของรูพรุน.....	30
2.20 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิโคนที่สร้างจากผลึกซิลิโคนชนิดเอ็น โดยที่	
(ก) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิโคนที่มีขนาดมากกว่า 2W	
(ข) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิโคนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W.....	32
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิโคน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของนาโนพอร์สซิลิโคน.....	33
2.22 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิโคนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ.....	34
3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี.....	34
3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์.....	35
3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน.....	37
3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน	
(ก) ชั้นนาโนพอร์สซิลิโคนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาเกาะ	
(ข) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุน	
(ค) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้น โมโนเลเยอร์	
(ง) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นมัลติเลเยอร์	
(จ) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน	
(ฉ) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน	
(ช) ชั้นนาโนพอร์สซิลิโคนที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกไปหมดแล้ว.....	38
3.5 แบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน.....	41
3.6 แบบจำลองการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน	
(ก) ก่อนตรวจจับไอระเหยของสารเคมี (ข) ขณะตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ก) ช่วงที่ไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี	
(ข) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน	
(ค) ช่วงที่เกิดการอิมตัวในการตรวจจับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี	
(ง) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(จ) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกไปหมดแล้ว.....	43
4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แก๊งค์เดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน.....	44
4.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน	
(ก) การเตรียมแผ่นซิลิคอน (ข) การสร้างขั้วลุ่มิเนียมด้านหลัง	
(ค) การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ง) การสร้างขั้วลุ่มิเนียมด้านหน้า.....	48
4.3 อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	49
4.4 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	51
4.7 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	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
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
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 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนโดซ์เซชัน.....	70
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนโดซ์เซชัน.....	70
5.20 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	71
5.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	71
5.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	72
5.23 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ก) กระแสไฟฟ้าก่อนเปิดไอระเหยของสารเคมี (ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอระเหยของสารเคมี (ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิ่มตัว (ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอระเหยของสารเคมี (จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม.....	73
5.24 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	73
5.25 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน.....	74
5.26 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการเอโนโดซ์เซชัน 5 นาที.....	75
5.27 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอแอลกอฮอล์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการเอโนโดซ์เซชัน 10 นาที.....	76
5.28 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการเอโนโดซ์เซชัน 15 นาที.....	77
5.29 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการเอโนโดซ์เซชัน 20 นาที.....	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 25 นาที.....	79
5.31 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชันต่างๆ กัน.....	80
5.32 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน.....	81
5.33 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชัน $5 \text{ mA/cm}^2$ .....	82
5.34 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชัน $10 \text{ mA/cm}^2$ .....	83
5.35 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชัน $15 \text{ mA/cm}^2$ .....	84
5.36 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชัน $20 \text{ mA/cm}^2$ .....	85
5.37 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชัน $25 \text{ mA/cm}^2$ .....	86
5.38 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชัน $30 \text{ mA/cm}^2$ .....	87
5.39 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชันต่างๆ กัน.....	88
5.40 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ ระดับอ้างอิงเดียวกัน.....	89
5.41 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมีที่ทำการวัดแบบต่อเนื่อง.....	90
5.45 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอสารเคมีต่างชนิดกันของอุปกรณ์ ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี.....	91

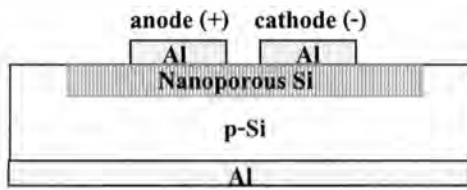
# บทที่ 1

## บทนำ

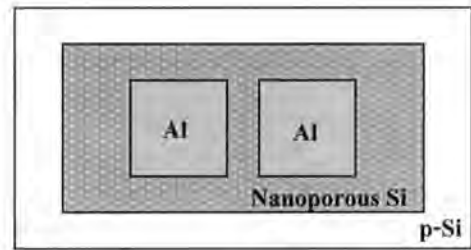
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

นาโนนาโนพอร์สซิลิคอน (nanoporous silicon หรือ Nanoporous Si) คือเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1956 ในขณะที่ทำการทดลองการกัดทางไฟฟ้าเคมีของแผ่นซิลิคอน ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกโดย Uhlir [1] จนมาถึงปี ค.ศ. 1990 ได้มีการรายงานการค้นพบสมบัติเปล่งแสง ณ ที่อุณหภูมิห้องของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนเป็นครั้งแรกโดย Canham [2] ซึ่งการค้นพบคุณสมบัติเปล่งแสงของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนนี้ ได้ทำให้เกิดแนวความคิดและความเป็นไปได้ที่จะนำเอานาโนนาโนพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการสร้างชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuits : ICs) มาตรฐาน ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้มีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อศึกษานาโนนาโนพอร์สซิลิคอนและนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆ มากมาย ยกตัวอย่างเช่น ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ไอโซเลชัน (electronic isolation) [3,4] โดยมีการนำเอาชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนมาใช้งานสร้างเป็นฉนวนในงานวิจัยทางด้านซิลิคอนบนฉนวน (Silicon-On-Insulator : SOI) นอกจากนี้ยังใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน [5] และยังสามารถใช้เป็นตัวตรวจจับไอสารอินทรีย์ [6] อีกด้วย

โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีในงานวิจัยนี้ได้มีความคิดที่จะนำชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี [10] เนื่องจากชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นสร้างในเนื้อซิลิคอนจึงสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก ทำให้ผลิตได้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ราคาต่ออุปกรณ์ถูก กระบวนการสร้างชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนทำได้ง่าย และสามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้ ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีในงานวิจัยนี้เป็น โครงสร้างแบบง่าย คือมีชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิคอน และข้อมูลนิยมอยู่บนชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 1.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิคอน

(ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการเอโนไคซ์เซชัน
2. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีเอโนไคซ์เซชัน
3. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน
4. เพื่อศึกษาผลของเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนต่อลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี
5. เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี เปอร์เซ็นต์ไอระเหยของสารเคมี ต่อกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

## 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

สมมุติฐานของงานวิจัยนี้ คือ ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการเอโนไคซ์เซชันสามารถควบคุม ความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างเพื่อให้ได้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ จากนั้นนำชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ได้มาศึกษาถึงสมบัติในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากของนาโนพอร์สซิลิคอนเป็นบริเวณที่ใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี [11-13] เมื่อโมเลกุลของไอระเหยของสารเคมีมารวมตัวกันในรูพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอนก็จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าบริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน และด้วยคุณสมบัตินี้เองจึงได้นำชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ทฤษฎีของงานวิจัย

จากสมมติฐานที่กล่าวข้างต้น ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนสามารถตรวจจับไอระเหยของสารเคมีได้โดยใช้หลักการที่พื้นผิวที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากสามารถดูดซับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีได้ดีและมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่าพื้นผิวที่เป็นพื้นราบเรียบ เมื่อมีการไหลของไอระเหยของสารเคมีผ่านบริเวณชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีที่เข้ามาในบริเวณรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจะจับตัวกับผนังของรูพรุน เมื่อโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนเป็นจำนวนเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้เกิดสถานะผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น [14, 15] ซึ่งจากหลักการนี้เอง ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตอยู่ที่การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน โดยคำนึงถึงผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน เพื่อให้ได้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีความสม่ำเสมอและเหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี โดยจะทำการศึกษาการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน เพื่อทำการศึกษาดังโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อมาทำการศึกษาดังการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน และศึกษาถึงผลของเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีผลต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี พร้อมทั้งศึกษาถึงความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี เปอร์เซ็นต์ไอระเหยของสารเคมี ที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีนาโนพอร์สซิลิกอน
2. ศึกษากระบวนการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน
3. ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีแอนโนไดซ์เซชัน
4. ศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

6. ศึกษาผลของเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนต่อลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

7. ศึกษาผลของความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี เปรอร์เซ็นต์ไอระเหยของสารเคมี ต่อกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

โดยเนื้อหาในรายงานเล่มนี้จะแบ่งเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาของนาโนพอร์สซิลิคอน และความสำคัญของงานวิจัยที่ได้ศึกษา หัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ที่ได้ทำการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน สมมติฐาน และแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนสุดท้ายคือขอบเขตของงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 นาโนพอร์สซิลิคอน เป็นการกล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับนาโนพอร์สซิลิคอน เทคนิคการสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน โดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดนาโนพอร์สซิลิคอน และความพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน

บทที่ 3 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน เป็นการกล่าวถึง นิยามเซนเซอร์ หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี และหลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

บทที่ 4 กระบวนการสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เป็นการกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน เทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความพรุน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว และเครื่องมือในการวัดผลของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง เป็นการกล่าวถึงผลการทดลองเกี่ยวกับการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการเอโนไคเซชัน และผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

# นาโนพอร์สซิลิกอน

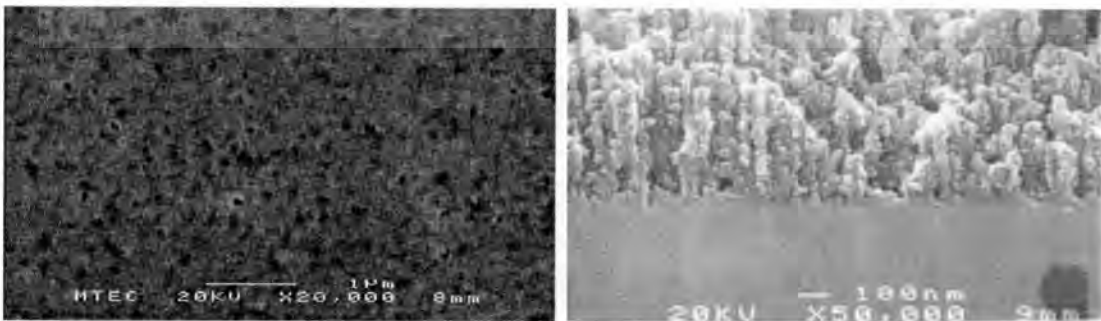
ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีนาโนพอร์สซิลิกอน วิธีการสร้างนาโนพอร์สซิลิกอน โดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดนาโนพอร์สซิลิกอน และความพรุนของนาโนพอร์สซิลิกอน

### 2.1 ทฤษฎีนาโนพอร์สซิลิกอน

นาโนพอร์สซิลิกอน เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีทั้งโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และไม่ เป็นระเบียบ ภายในของนาโนพอร์สซิลิกอนอะตอมนั้นนอกจากจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็น ระเบียบเหมือนกับผลึกซิลิกอนเดี่ยว แต่ยังมีจุดบกพร่องของผลึก ช่องว่าง ระยะห่างของ ช่องว่าง และพันธะแขนขาดกับอะตอมข้างเคียง โครงสร้างที่มีขนาดเล็กนี้สามารถพบได้ 2 รูปแบบ คือ จุด และแท่ง หรือเป็นแบบผสม ผลึกขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนี้มีลักษณะแข็งแรงเปราะ และมีรู พรุน นาโนพอร์สซิลิกอนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจ มีบทความจำนวนมากพยายามอธิบายถึงคุณสมบัติ ทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของนาโนพอร์สซิลิกอน [16-18] และได้นำนาโนพอร์สซิลิกอนมา ประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ทางด้านการแพทย์ และ อุปกรณ์ตรวจจับไอสารอินทรีย์ เป็นต้น

#### 2.1.1 โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอน

นาโนพอร์สซิลิกอน คือ ผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยใน ชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร จนถึงระดับไมโครเมตร โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาด โครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.1



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างนาโนพอร์สซิลิกอน (ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอนในรูปที่ 2.1 เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอนโดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิกอนยังพบต่อไปอีกว่าที่บริเวณผิวของไมโคร นาโนพอร์สซิลิกอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิกอนไฮไดรด์ (Si:H) หรือซิลิกอนออกซิไฮไดรด์ (Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป [19-21]

### 2.1.2 การแบ่งประเภทของนาโนพอร์สซิลิกอน

นาโนพอร์สซิลิกอนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [18] คือ

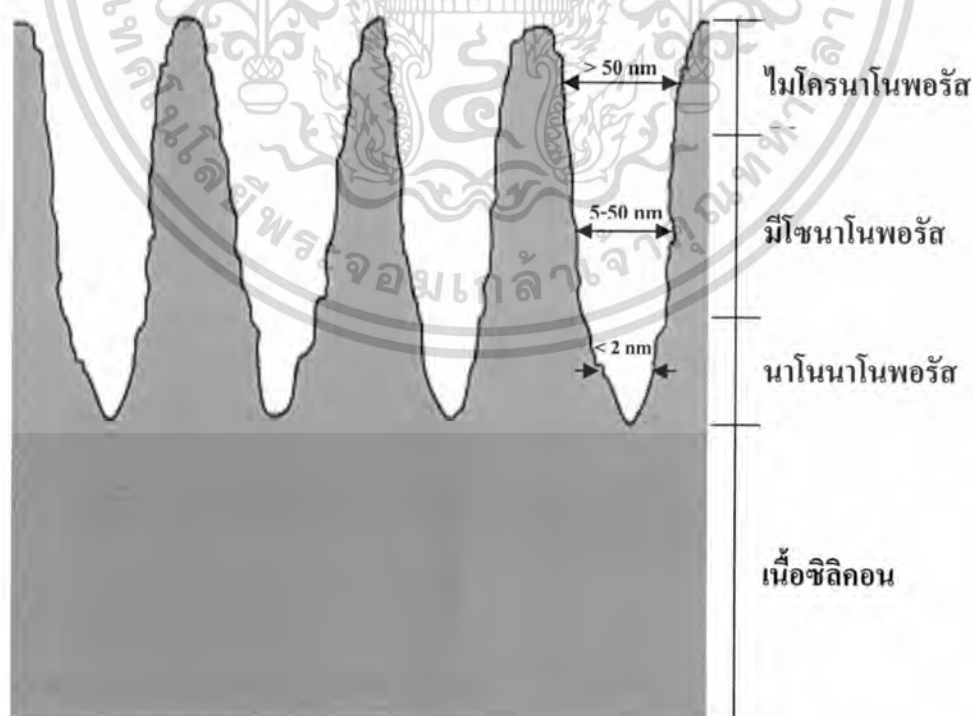
#### 1. แบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

นาโนพอร์สซิลิกอนสามารถแบ่งได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ดังนี้

1.1 โครงสร้างของชั้นไมโครนาโนพอร์สซิลิกอน (microporous) เป็นชั้นของนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไป

1.2 โครงสร้างของชั้นมีโซนาโนพอร์สซิลิกอน (mesoporous) เป็นชั้นของนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่อยู่ระหว่าง 5 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร

1.3 โครงสร้างของชั้นนาโนนาโนพอร์สซิลิกอน (nanoporous) เป็นชั้นของนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่เล็กกว่า 5 นาโนเมตร ลงไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะติดกับเนื้อของซิลิกอน



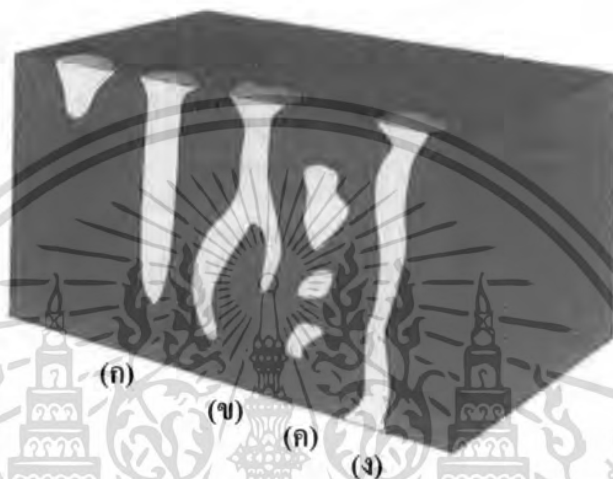
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะรูพรุนของนาโนพอร์สซึลิกอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- 2.1 ลักษณะเป็นรูตันและ ไม่มีการแยกของรูพรุน (blind)
- 2.2 ลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกของรูพรุน (banchd)
- 2.3 ลักษณะเป็น โพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน (totally isolated)
- 2.4 ลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกไปยังอีกด้าน (through)



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองรูพรุนของนาโนพอร์สซึลิกอนลักษณะต่างๆ กัน

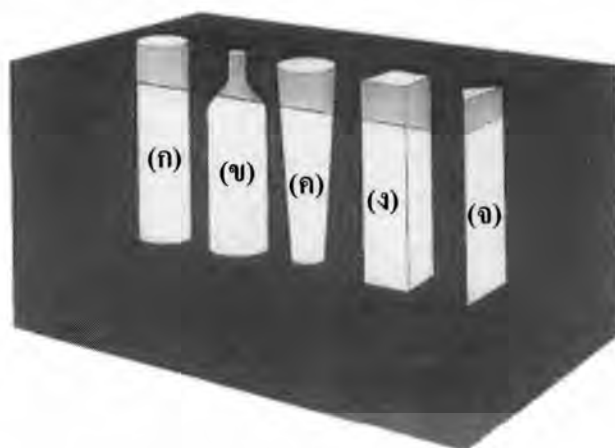
- (ก) ลักษณะเป็นรูตันและ ไม่มีการแยกของรูพรุน
- (ข) ลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกของรูพรุน
- (ค) ลักษณะเป็น โพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน
- (ง) ลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกไปยังอีกด้าน

## 3. แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูปร่างรูพรุนของนาโนพอร์สซึลิกอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- 3.1 รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (cylindrical)
- 3.2 รูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำหมึก (ing-bottle)
- 3.3 รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย (funnel)
- 3.4 รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ (cuboid)
- 3.5 รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด (triangular)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

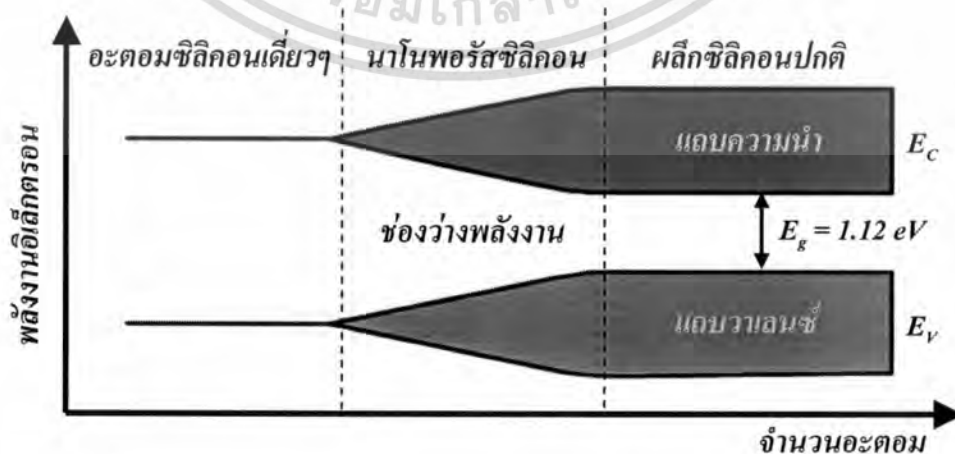


รูปที่ 2.4 ภาพจำลองรูพรุนของนาโนพอร์สซิลิกอนรูปร่างต่างๆ

- (ก) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (ข) รูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำหมึก  
 (ค) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย (ง) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์  
 (จ) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด

### 2.1.3 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิกอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอมทำให้เกิดการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ก็จะทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะนำไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนของช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม (มีจำนวนอะตอมของซิลิกอนอยู่ภายในประมาณ  $10^{22}$  อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) แสดงดังรูปที่ 2.5 [22]



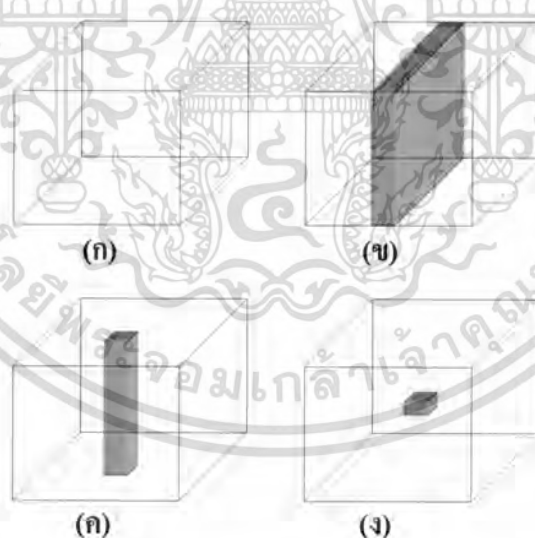
รูปที่ 2.5 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ผลของขนาดควอนตัม (quantum size effect) ซึ่งค่าพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์นี้จะมีค่าเท่ากับ

$$E_q = \Delta E_c + \Delta E_v \quad (2.1)$$

โดยที่  $E_q$  คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม  
 $\Delta E_c$  คือ พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำเดิมก่อนเกิดนาโนพอร์สซิลิคอน  
 $\Delta E_v$  คือ พลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบวาเลนซ์เดิมก่อนเกิดนาโนพอร์สซิลิคอน



รูป 2.6 แบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ

- (ก) เนื้อผลึกซิลิคอน      (ข) ควอนตัมในเชิง 2 มิติ  
 (ค) ควอนตัมในเชิง 1 มิติ    (ง) ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ

จากรูปที่ 2.6 พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆ เหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

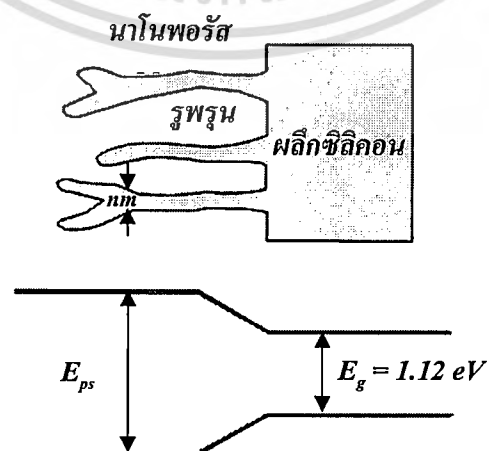
เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิคอนปกติ มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับ ด้วยลักษณะและขนาดของโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. ควอมตัมในเชิง 2 มิติ (quantum well) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความบางมากๆ ในระดับชั้นของโมเลกุล เช่น 30-50 ชั้นโมเลกุล ( $< 100$  nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างแบบ 2 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข)

2. ควอมตัมในเชิง 1 มิติ (quantum wire) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆ ที่มีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร ( $< 10$  nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างลักษณะนี้จะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปในโครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของโครงสร้างที่เป็นเส้นหรือเสานี้เท่านั้น ดังแสดงในรูป 2.6 (ค) ซึ่งลักษณะช่องว่างพลังงานของโครงสร้าง 1 มิติแบบนี้ จะมีขนาดที่กว้างกว่าช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในลักษณะแบบนี้จะมีขนาดเล็กกว่า และมีจำนวนอะตอมที่อยู่ภายในน้อยกว่าโครงสร้าง 2 มิติ

3. ควอมตัมในแบบไม่มีมิติ (quantum dot) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก ( $< 1$  nm) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะแบบนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ภายใน โครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ง) อะตอมที่อยู่ภายใน โครงสร้างจุดเล็กๆเหล่านี้จะมีจำนวนที่น้อยกว่าในโครงสร้างสองแบบแรก ซึ่งจะมีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของโครงสร้างที่เป็นแบบจุดนี้ จะมีความกว้างที่มากกว่าในโครงสร้างสองแบบแรก



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

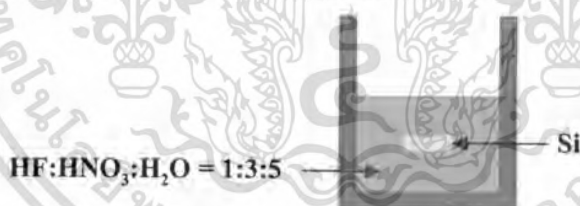
เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นนาโนพอร์ซซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสา แถบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของนาโนพอร์ซซิลิคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัมในเชิง 1 มิติ โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน ( $E_{ps}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับนาโนเมตรของนาโนพอร์ซซิลิคอน

## 2.2 เทคนิคการสร้างนาโนพอร์ซซิลิคอน

กระบวนการสร้างนาโนพอร์ซซิลิคอนให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน [23-27] แต่จะขอพิจารณาถึงเทคนิคการสร้างนาโนพอร์ซซิลิคอนที่เหมาะสม สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการสร้างได้ และสามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำได้

### 2.2.1 การสร้างนาโนพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมลิ (stain etching)

การสร้างนาโนพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมลิ [28] เป็นเทคนิคที่ทำการจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารประกอบของกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid : HF) ซึ่งจะประกอบด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก (nitric :  $HNO_3$ ) และน้ำ ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้การกระตุ้นด้วยแสงสว่างในขณะที่ทำการกัดด้วยปฏิกิริยาเคมี เพื่อเป็นตัวช่วยการทำปฏิกิริยา

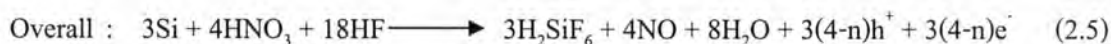
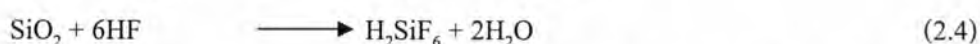
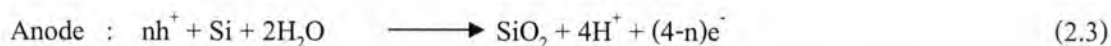
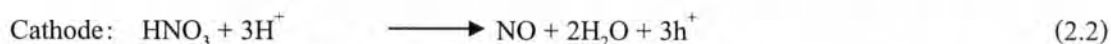


รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบข้อมลิ

จากรูปที่ 2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดแบบข้อมลิคือ การทำให้เกิดประจุโฮล เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก เพื่อทำให้เกิดประจุโฮล หลังจากนั้นประจุโฮลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้ซิลิคอน ไดออกไซด์ ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เอง สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอน ไดออกไซด์บางส่วนออก ซึ่งการเกิดซิลิคอน ไดออกไซด์ และการถูกกัดของซิลิคอน ไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยา ดังนั้นลักษณะ โครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ (non-uniform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมีสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่า บริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยาจะมีสีสันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวินสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีสันจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ส่วนความหนาของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการกัดแบบข้อมีจะมีค่าประมาณ 100 nm และพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนที่เกิดจากกระบวนการกัดแบบข้อมีจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.9 [28]

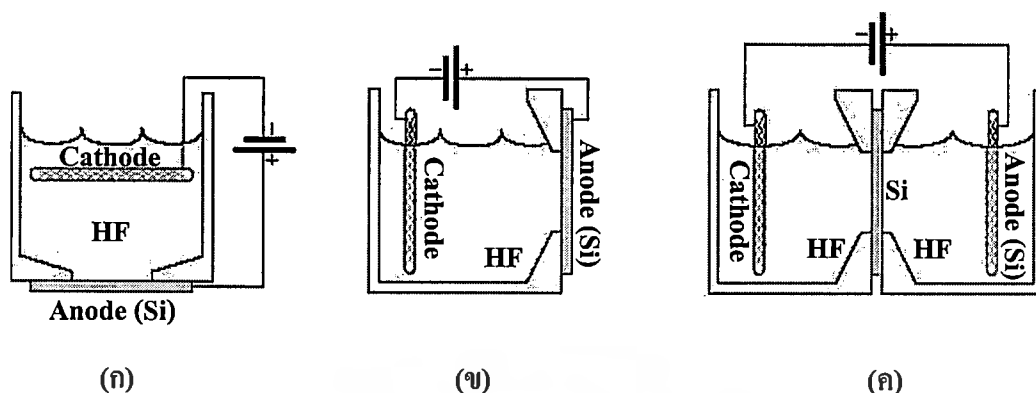


รูปที่ 2.9 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมี

### 2.2.2 การสร้างนาโนพอร์ซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (anodization)

การสร้างนาโนพอร์ซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน [29,30] เป็นวิธีที่สามารถควบคุมปฏิกิริยาในการสร้างนาโนพอร์ซิลิคอน ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ (uniform) ทั่วกันทั้งแผ่น โดยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันนี้จะใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 2.10

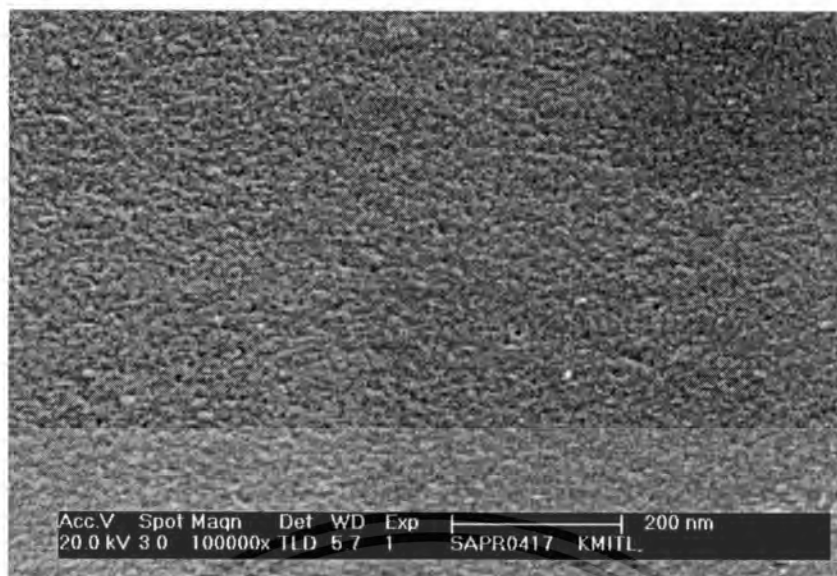
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน

- (ก) เซลล์แท่งกึ่งเดียวในแนวตั้ง (ข) เซลล์แท่งกึ่งเดียวในแนวนอน  
(ค) เซลล์แท่งกึ่งคู่ในแนวนอน

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชันนี้จะประกอบด้วย แผ่นซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะจมอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จากรูปที่ 2.10 (ก) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท่งกึ่งเดียวในแนวตั้ง (single tank vertical cell) มีจุดเด่นอยู่ที่ขณะทำการสร้างนาโนพอร์ซิลิคอนสามารถฉายแสงเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการกัดได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.10 (ข) จะเห็นได้ว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท่งกึ่งเดียวในแนวนอน (single tank lateral cell) นั้นทำการฉายแสงได้ยากกว่า ส่วนรูปที่ 2.10 (ค) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท่งกึ่งคู่ในแนวนอน (double tank lateral cell) ซึ่งพัฒนามาจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท่งกึ่งเดียวในแนวนอน เพื่อใช้ต่อร่วมกับปั๊ม (pump) ทำให้มีการไหลเวียนของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตลอดเวลาส่งผลทำให้ได้ชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนที่สม่ำเสมอมากขึ้น แต่ก็ยังมีปัญหาในการฉายแสงเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการกัด โดยส่วนใหญ่การสร้างชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนด้วยวิธีแอโนไดซ์เซชันจะมีเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างการสร้างก็คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก การผสมเอทานอลเพื่อช่วยให้เกิดความสม่ำเสมอของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนมากขึ้น [30] เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแอโนไดซ์เซชัน ซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยการสร้างนาโนพอร์ซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันนี้ สามารถควบคุมความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาของนาโนพอร์ซิลิคอน ได้ดีกว่าวิธีการกัดแบบย้อมสี โดยภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนที่เกิดกระบวนการแอโนไดซ์เซชันจะมีลักษณะสม่ำเสมอกว่าวิธีการกัดแบบย้อมสี แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซึกลิคอนที่ได้จากระบวนการแอโนไดซ์เซชัน

## 2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

การสร้างนาโนพอร์สซึกลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี [31] เป็นวิธีการที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก โดยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อะตอมของสารมีการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังตัวอย่างเช่น สาร  $M$  มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ  $n$  คือ มีอิเล็กตรอน  $n$  อนุภาคโคจรอยู่ในวงนอกสุดของอะตอม สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังนี้ คือ



โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction)

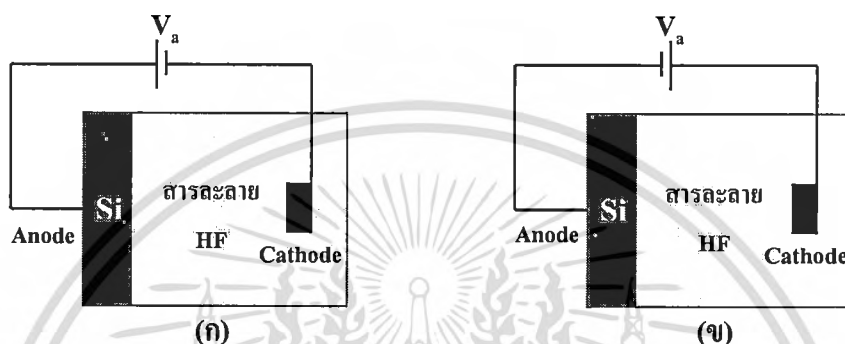
2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเท และเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลายปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction)

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนดหรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชิ้นหนึ่งจะเป็นแคโทด



รูปที่ 2.12 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง  
(ก) แบบแอโนดิก (ข) แบบแคโทดิก

พิจารณาเซลล์ไฟฟ้าในรูปที่ 2.12 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอน (Si) ซึ่งจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในที่นี่ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเช่นกัน จากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

#### 1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้แผ่นซิลิคอนสามารถถูกกัดได้

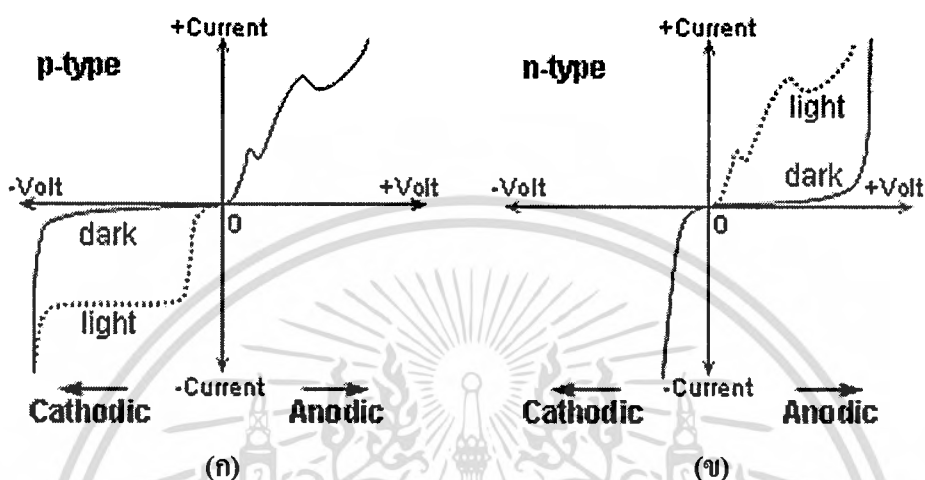
#### 2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดแผ่นซิลิคอน

### 2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบช็อตตีไดโอด (schottky diode) ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนักผู้ใดเห็นประโยชน์หรือเห็นว่าการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นจากการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ แผ่นซิลิคอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ภายใต้เงื่อนไขในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง แสดงดังรูปที่ 2.13 [31]



รูปที่ 2.13 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

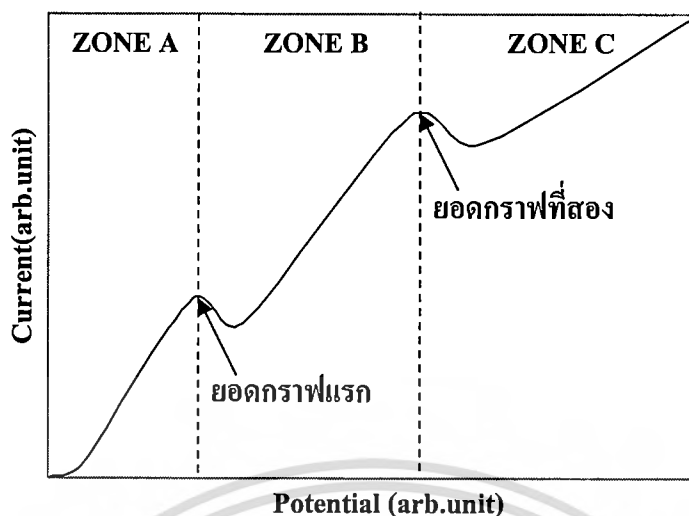
จากรูปที่ 2.13 แสดงถึงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนโอดิก และการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนโอดิก ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในแผ่นซิลิคอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง เช่นเดียวกันกับไดโอดทั่วไป ส่วนในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับแผ่นซิลิคอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนโอดิกสำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน

ชนิดของแผ่น ซิลิคอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบแคโทดิก	แบบแอโนดิก
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะไม่ถูกกัด</li> <li>- ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื้อของแผ่นซิลิคอนถูกกัด โดย</li> <li>- จะเกิดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน</li> <li>- ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ</li> <li>- จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ</li> <li>- ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง</li> </ul>
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะไม่ถูกกัด</li> <li>- ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื้อของแผ่นซิลิคอนถูกกัดก็ต่อเมื่อ</li> <li>- ทำการฉายแสง โดย</li> <li>- จะเกิดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน</li> <li>- ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ</li> <li>- จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ</li> <li>- ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ</li> </ul>

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขั้วตักเหมือนกัน โดยการเกิดนาโนพอร์สซิลิคอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิกเท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก จะไม่เกิดนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้นไม่ว่าชนิดของแผ่นซิลิคอนจะเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกนั้น เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ดังนั้นในระหว่างการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกจึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดนาโนพอร์สซิลิคอน

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิกของทั้งแผ่นซิลิคอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนของอิเล็กโทรดแบบแอโนดิก

จากรูปที่ 2.14 ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยยอดกราฟอยู่ 2 จุดด้วยกัน โดยยอดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A เป็นช่วงในการเริ่มสร้างนาโนพอร์ซิลิคอน (porous silicon formation regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนขึ้นมาที่ต่อเมื่อค่ากระแส ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก ส่วนในบริเวณ B เป็นช่วงการกัดที่ทำให้เกิดนาโนพอร์ซิลิคอน ส่วนช่วงที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของซิลิคอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนไปสู่ลักษณะช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า (electropolishing regions) ซึ่งอยู่ในบริเวณ C โดยโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์ซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกันกับนาโนพอร์ซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ยอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากยอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ อิมพีแดนซ์เชิงลบ (negative impedance) ขึ้น โดยจากรูปที่ 2.14

### - ในส่วนของยอดกราฟแรก

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม ขึ้นภายในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

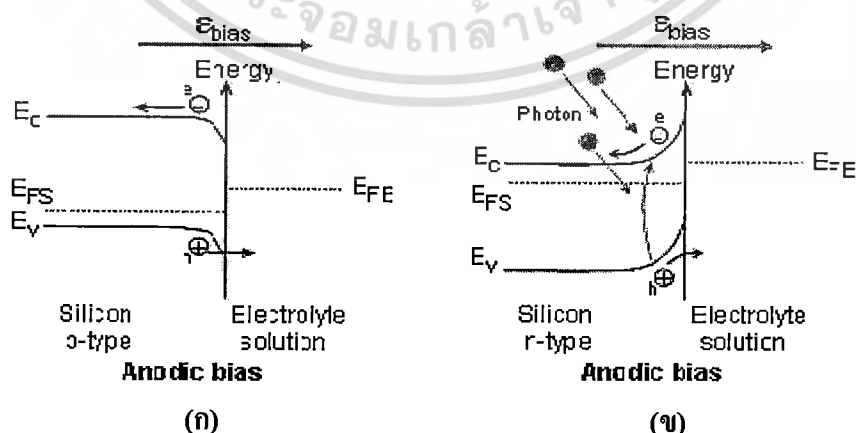
สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆ โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน และเมื่อโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุมโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น

### - ในส่วนยอดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณช่วงการกัดที่ทำให้เกิดนาโนพอร์สซิลิคอน กับช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

### 2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะมีลักษณะเป็นแบบช็อตติโดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส แสดงดังรูปที่ 2.15 [32]



รูปที่ 2.15 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

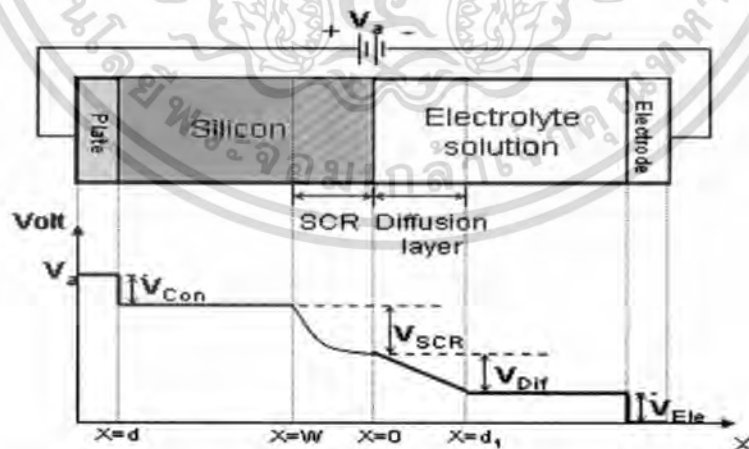
จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบตรง ทำให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก)

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบแอโนดิก ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการสร้างชั้นนาโนพอร์ซิลิคอน จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้กับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

### 2.3.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดนาโนพอร์ซิลิคอน จะประกอบด้วยแผ่นซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีกรไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.16 [33]



รูปที่ 2.16 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่  $d$  เป็นความหนาของแผ่นซิลิคอน,  $w$  เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส และ  $d_1$  เป็นความกว้างของบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ

- ในเนื้อของแผ่นซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะนำกระแส

- ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรด กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ (diffusion layer)

ถ้าให้  $V_a$  เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้าวรวมของระบบได้ดังนี้ คือ

$$V_a = V_{diff} + V_{SCR} + V_{Con} + V_{Elec} \quad (2.8)$$

โดย  $V_{diff}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

$V_{SCR}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะ

$V_{Con}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน

$V_{Elec}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

ศักดาไฟฟ้า  $V_{con}$  กับ  $V_{elec}$  ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอนแบบเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงทำให้สมการที่ (2.8) สามารถเขียนได้เป็น

$$V_a = V_{diff} + V_{SCR} + Constant \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ ( $V_{diff}$ ) กับศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะ เป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

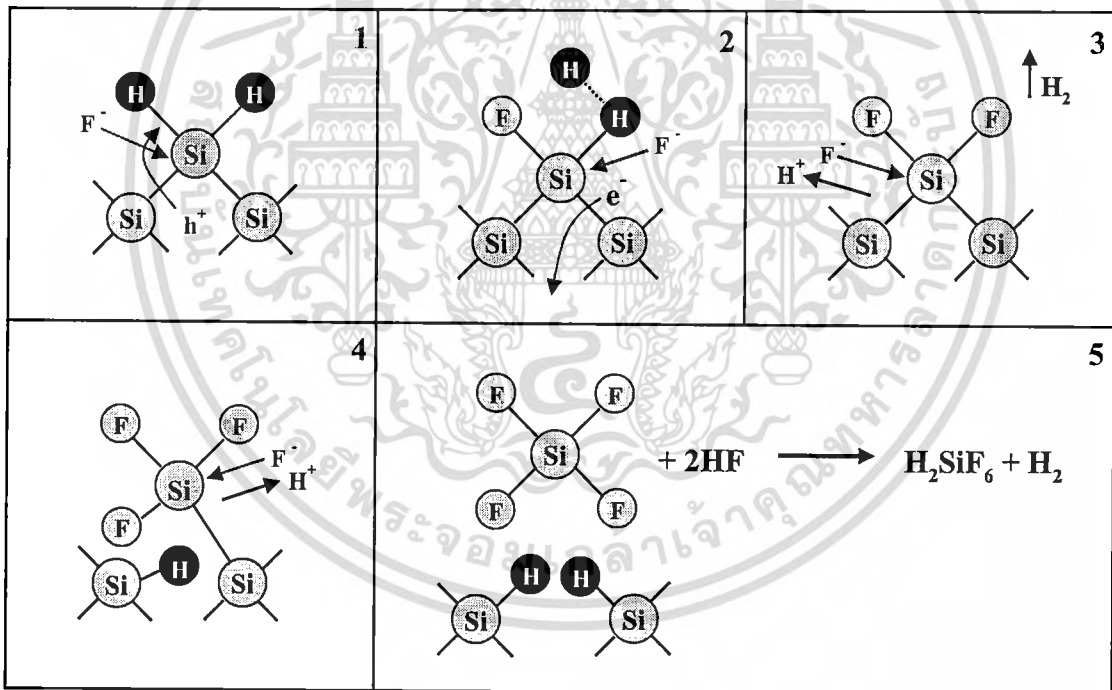
ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบตรง ทำให้ไม่เกิดบริเวณหลอดพาหะขึ้นในแผ่นซิลิคอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ โดย  $V_{diff}$  นี้จะควบคุม อิออนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะตกคร่อมบริเวณนี้ โดยบริเวณปลอดพาหะนี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัด และ โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้น

## 2.4 กลไกในการเกิดนาโนพอร์สซิลิคอน [34]

### 2.4.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน

ในสภาวะปกติเมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำปฏิกิริยา แต่เมื่อไรก็ตามที่แผ่นซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบแอนโนดิกแล้ว ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.17

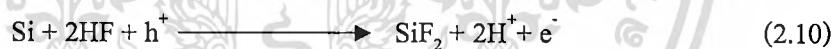


รูปที่ 2.17 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน

เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกรไบอัสแบบแอนโนดิก ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแอนโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้ไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการเอกซาร์นี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบอัสเซสส์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก โดยมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้แก่ขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮล สามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้ โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทน ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการโพลาริซ (polarizing) ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้อิออนของฟลูออรีน (F<sup>-</sup>) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถที่จะเข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้น จะเกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอน โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนที่อยู่ถัดเข้ามา มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้ โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่า อะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนพร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิคอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ [34]



จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวม ได้เป็น



จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้นนั้น เริ่มจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ (2.10) ที่มีแผ่นซิลิคอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้ จำเป็นต้องอาศัยโฮล (h<sup>+</sup>) ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF<sub>2</sub> ขึ้นที่บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน ต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF<sub>2</sub> กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ (2.11) ได้ผลลัพธ์เป็น SiF<sub>4</sub> หลุดออกมาจากผิวของแผ่นซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สังเกตได้ว่า จะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นเอกรสารเป็นเอกรสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าอันตรายเกินไปซึ่งประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{SiF}_4$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะ  
ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายก็คือสารละลาย  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการ  
ที่ (2.12)

#### 2.4.2 การเกิดรูพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน

แผ่นซิลิคอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะไม่ถูกกัด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการ  
การป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบไบอัสขั้วบวกแก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ให้กระแสไหลผ่านรอย  
สัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดทาง  
ไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 แบบ คือ (1) การกัดแบบขัดผิวหน้า  
ด้วยไฟฟ้า (electropolishing) และ (2) การกัดแบบทำให้เกิดนาโนพอร์สซิลิคอน (nanoporous  
etching)

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน  
ระหว่างการแอโนไดซ์เซชัน โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่าง  
มากต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ

##### - การกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสให้แก่เซลล์ไฟฟ้า  
เคมีในปริมาณสูงๆ ( $J > J_{ps}$ ) ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนมีปริมาณของพาหะโฮล  
สะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอ็อกซิเจนของฟลูออรีนที่อยู่ใน  
สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยอ็อกซิเจนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายในสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้า  
ผิวของแผ่นซิลิคอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุด  
ของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงเอาอ็อกซิเจนของฟลูออรีนเข้า  
มาทำปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นส่วนใหญ่ มีผล  
ทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้นเราจึงเรียกการกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้า  
ด้วยไฟฟ้า

##### - การกัดแบบทำให้เกิดนาโนพอร์สซิลิคอน

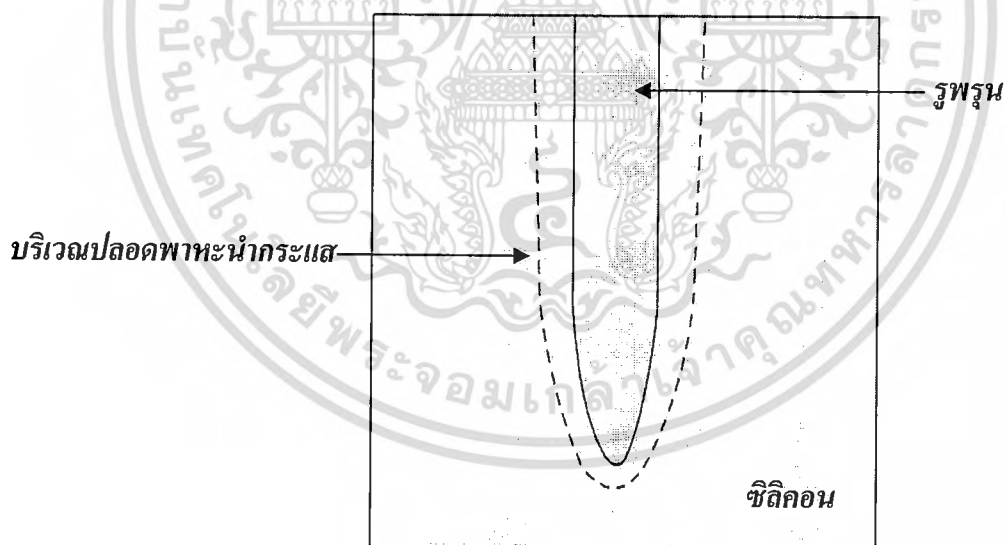
ส่วนลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดนาโนพอร์สซิลิคอน จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความ  
หนาแน่นกระแสในปริมาณต่ำ ( $J < J_{ps}$ ) ซึ่งจะทำให้ปริมาณอ็อกซิเจนของฟลูออรีนในสารละลายกรด  
ไฮโดรฟลูออริก มีจำนวนมากกว่าจำนวนของโฮลที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน ทำให้การ  
กัดในลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวน โฮล ดังนั้นถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือ  
รอยซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิวหรือจุดบกพร่องต่างๆ ในผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.18  
(ข) เมื่อทำการไบอัสแบบแอโนดิกให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมหรือ  
จุดบกพร่องเหล่านี้ มีปริมาณความเข้มข้นสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่บริเวณอื่นๆ ซึ่งจะเอาพาหะโฮลเข้ามา



จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนทั้งชนิดพี และชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าผลึกซิลิคอนทั้งสองชนิดมีกลไกการเกิดโครงสร้างของนาโนพอร์ซิลิคอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแบบแอโนดิก

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นการไบอัสแบบตรง ซึ่งการไบอัสในลักษณะเช่นนี้จะไปลดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณปลอดพาหะลง โดยจะเกิดขึ้นตามผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน อันเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอโนดิก จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณปลอดพาหะ มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้นถ้าบริเวณของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีลักษณะเป็นหลุม ซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบๆ หลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นรอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน

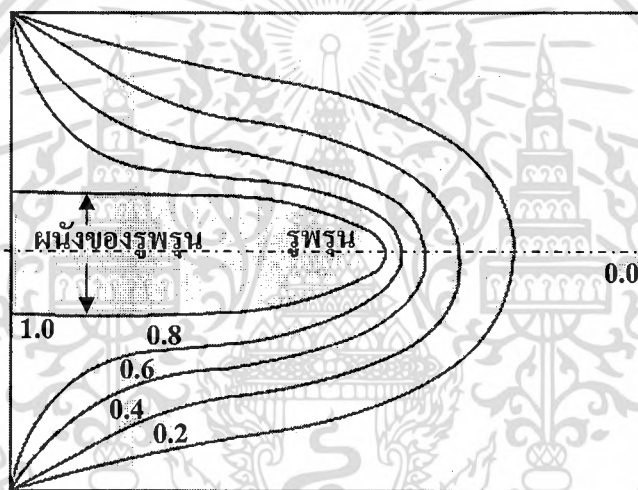
โดยความกว้างของบริเวณบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 V_{SCR}}{qN_D}} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	$W$	คือ ความกว้างบริเวณบริเวณปลอดภัย
	$\epsilon_s$	คือ เปรอริมิติวิตี (permittivity) ของผลึกซิลิคอน
	$\epsilon_0$	คือ เปรอริมิติวิตีของสุญญากาศ
	$V_{SCR}$	คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณปลอดภัย
	$q$	คือ ประจุของอิเล็กตรอน
	$N_D$	คือ จำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้

จากสมการที่ (2.14) จะเห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณปลอดภัยจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณปลอดภัย ( $V_{SCR}$ ) และจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D$ ) ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น



รูปที่ 2.21 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพวง

บริเวณปลอดภัยที่เกิดขึ้นรอบรูพวง จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 2.21 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบๆ ผนังของรูพวง ( $E_s$ ) มีค่าเท่ากับ

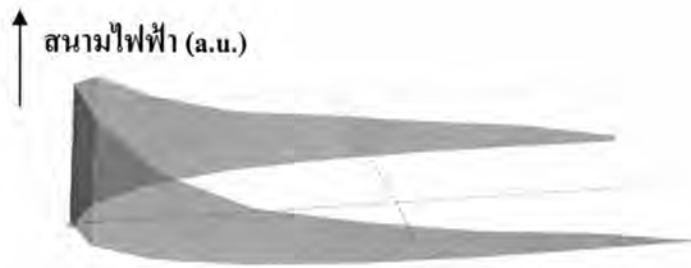
$$E_s = 2V_{SCR}/W \quad (2.15)$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบๆก้นหลุมของรูพวง ( $E'_s$ ) จะมีค่า

$$E'_s = V_{SCR}/r \quad (2.16)$$

โดย  $r$  คือ รัศมีก้นหลุมของรูพวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน

จากรูปที่ 2.22 จะเห็นได้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูพรุนจะมีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือผนังบริเวณก้นหลุมของรูพรุนมีปริมาณของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าบริเวณผนังรอบๆ ของรูพรุนอยู่ถึงประมาณ 2-3 เท่า ส่วนผนังบริเวณปากรูจะมีค่าต่ำสุดจนเกือบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจากการที่ก้นหลุมของรูพรุนมีขนาดของสนามไฟฟ้าในปริมาณสูงนั้น มีผลทำให้สามารถดึงพาหะนำกระแส (โฮล) มาที่บริเวณนี้กัน ได้มาก ส่งผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมจะมีปริมาณกระแสที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน

#### 2.4.3 กลไกในการหยุดกักโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน

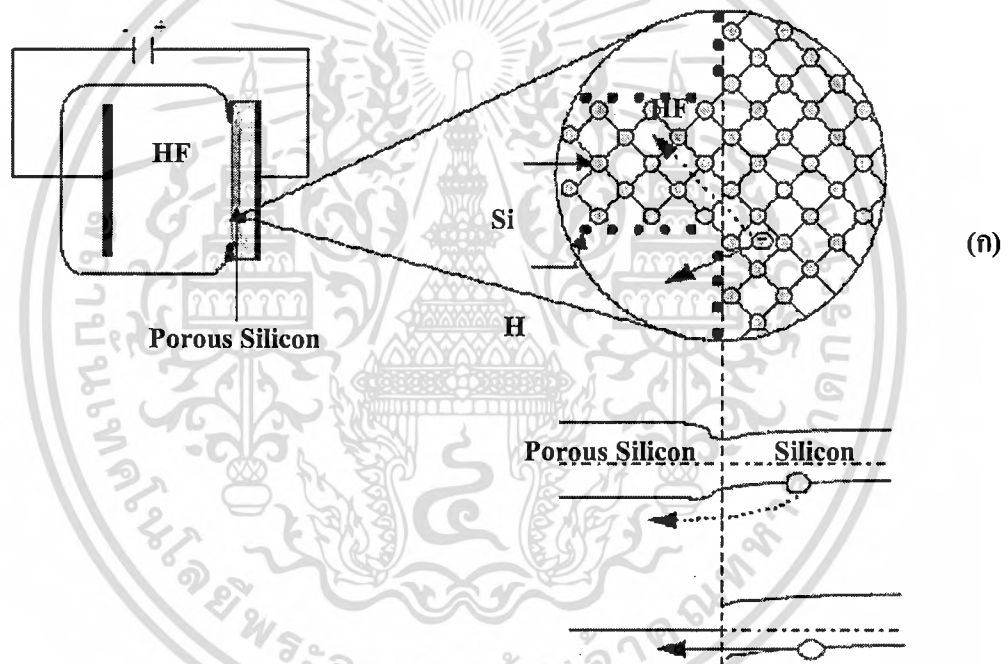
จากการเกิดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้น โดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮล ในผลึกซิลิคอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญ ต่อกระบวนการกักเนื้อของผลึกซิลิคอน ในแบบทำให้เกิดนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี เป็นกระบวนการกักที่สามารถลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร แต่กระบวนการนี้ก็จะอาศัยกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนด้วย ซึ่งจากการศึกษาพบว่านาโนพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

- การหยุดกัดของนาโนพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากซิลิคอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนโนดิก ทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณปลดพาหะขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพีจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ผลของขนาดควอนตัมขึ้นในส่วนของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่

2.24



รูปที่ 2.24 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนชนิดพี โดยที่

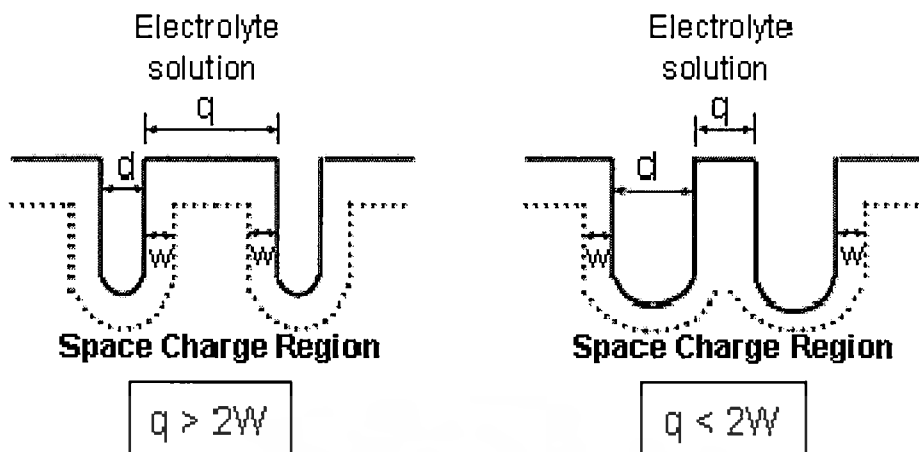
- (ก) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน และทิศทางเคลื่อนที่ของพาหะโฮล
- (ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน
- (ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะโฮล จากผลึกซิลิคอนผ่านไปยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดพีจะถูกกัดจนเป็นโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจนทำให้โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กกลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานในนาโนพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ระหว่างนาโนพอร์สซิลิคอนกับผลึกซิลิคอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นค่าแ่งศักย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\Delta E_v$  สำหรับโฮล และเท่ากับ  $\Delta E_c$  สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้นการที่พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดโครงสร้างในส่วนต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่า  $\Delta E_v$  ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ค่าแ่งศักย์  $\Delta E_v$  มีค่าพลังงานมากกว่าพลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนได้ ผลที่ตามมาก็คือเกิดการหยุดกัดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า  $\Delta E_v$  นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอน โดย  $\Delta E_v$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัดในส่วนของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนนาโนพอร์สซิลิคอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่ถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีสามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ค) ดังนั้นจึงทำให้บริเวณก้นหลุมของนาโนพอร์สซิลิคอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่อง

**- การหยุดกัดของนาโนพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น**

เนื่องจากการไปอัสเซสล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนโนดิก สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะเป็นการไปอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ  $w$  ดังนั้นกลไกในการหยุดกัดของนาโนพอร์สซิลิคอนสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นแล้วจะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนที่สร้าง

จากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่

(ก) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า  $2W$

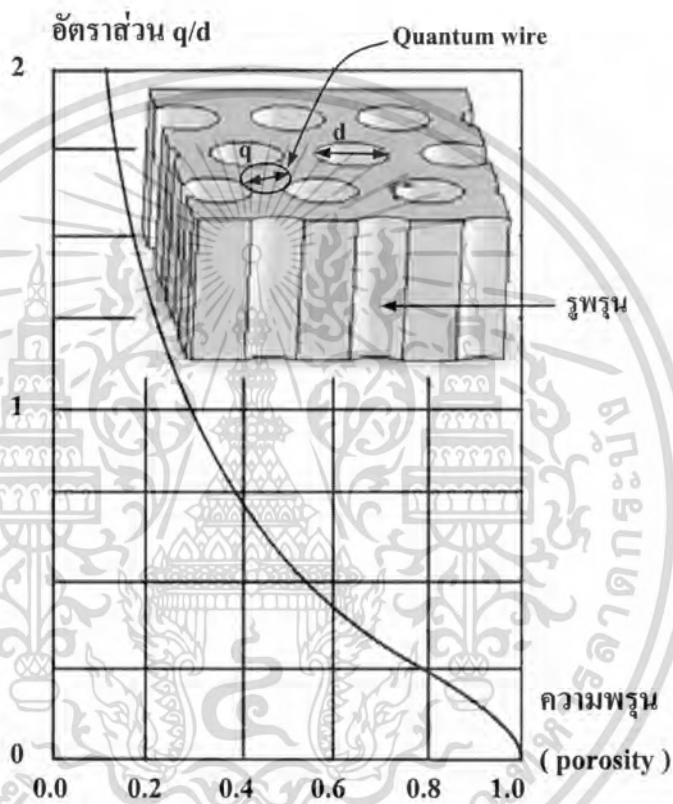
(ข) โครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า  $2W$

จากรูปที่ 2.25 (ก) จะเห็นได้ว่านาโนพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อถูกทำการกัดจะทำให้ขนาดโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน ( $q$ ) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพรุนภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลอดพาหะนำกระแสปกคลุมอยู่รอบๆ รูพรุนแต่ละรู ในกรณีนี้ ขนาดของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ( $q > 2W$ ) ดังนั้นจึงยังสามารถทำการกัดเพื่อลดขนาดของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไรก็ตามที่ขนาดของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนมีขนาดที่น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ( $q < 2W$ ) ดังรูปที่ 2.25 (ข) จะมีผลทำให้เกิดการซ้อนทับกันของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส จนโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอนถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลให้เกิดการหยุดกัของนาโนพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้

## 2.5 ความพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอน

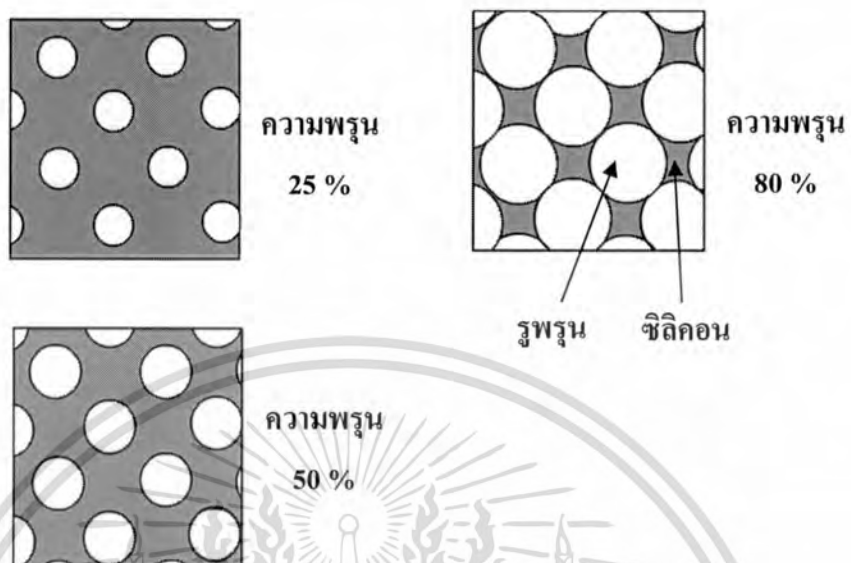
โดยทั่วไปแล้ววัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

นาโนพอร์สซิลิกอน คือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอนที่เหลือนั้นและขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง ผลของขนาดควอนตัม ส่งผลในลักษณะของควอนตัมในเชิง 1 มิติ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 2.26 [35]



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิกอน ( $q$ ) กับขนาดของรูพรุน ( $d$ ) ที่มีต่อความพรุนของนาโนพอร์สซิลิกอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อซิลิกอนและขนาดของรูพรุน มีผลต่อความพรุนของนาโนพอร์สซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกักจนมีขนาดเล็กกลง หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากกว่าเดิม แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างนาโนพอร์ซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ ของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

ในบทนี้จะกล่าวถึง นิยามเซนเซอร์ หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี และการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

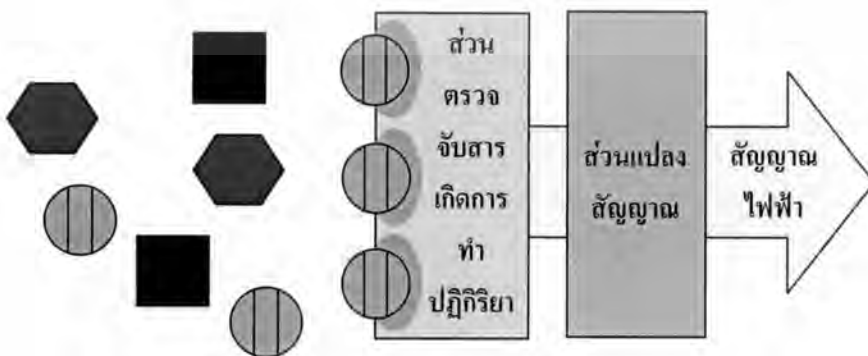
### 3.1 นิยามของเซนเซอร์ [37]

เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีความสามารถใช้แทนการตอบสนองทางประสาทสัมผัสของมนุษย์ เช่น การมองเห็น การสัมผัส การได้ยิน การดมกลิ่น และการลิ้มรส จึงได้มีการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจวัด และแสดงผลออกมาในรูปของสัญญาณหรือพลังงานในรูปแบบหนึ่ง

เซนเซอร์ หมายถึง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณพลังงานในรูปแบบต่างๆ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น โฟโตทรานซิสเตอร์, อุปกรณ์ตรวจวัดความดัน และอุปกรณ์ตรวจวัดไอสารเคมี เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งเซนเซอร์ได้เป็น 2 แบบ คือ เซนเซอร์ทางเคมีและเซนเซอร์ทางฟิสิกส์

#### 3.1.1 เซนเซอร์ทางเคมี (chemical sensors)

เซนเซอร์ทางเคมี จัดเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสารประเภทหนึ่ง โดยส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมีประกอบด้วย ขั้นตอนการตรวจจับสารเชื่อมต่อกับส่วนแปลงสัญญาณ โดยขั้นตอนการตรวจจับสารจะทำหน้าที่ตรวจจับด้วยการทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของสารที่ผ่านเข้ามา จากนั้นส่วนแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถแบ่งอุปกรณ์เซนเซอร์ทางเคมีที่สำคัญได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทวัดความนำไฟฟ้า (conductimetric) และประเภทวัดศักย์ไฟฟ้า (potentiometric)

### 3.1.2 เซนเซอร์ทางฟิสิกส์ (physical sensors)

เซนเซอร์ทางฟิสิกส์ จัดเป็นอุปกรณ์ตรวจสอบสารประเภทหนึ่ง โดยส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์ประกอบด้วย ขั้นตอนการตรวจจับสารเชื่อมต่อกับส่วนแปลงสัญญาณ โดยขั้นตอนการตรวจจับสารจะทำหน้าที่ตรวจจับด้วยสารที่โมเลกุลของสารที่ผ่านเข้ามาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างภายในของขั้นตอนการตรวจจับสาร จากนั้นส่วนแปลงสัญญาณจะทำหน้าที่แปลงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซนเซอร์ทางฟิสิกส์

โดยตัวอย่างอุปกรณ์เซนเซอร์ทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือ เซนเซอร์วัดความดัน (pressure sensors) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (temperature sensors)

## 3.2 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี [38]

วิธีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีสามารถทำได้หลายวิธี โดยใช้หลักการดังนี้

1. หลักการวิธีวัดทางเคมี วิธีนี้จะตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยให้ไอระเหยของสารเคมีรีดิวซ์โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2CrO_7$ ) มีสีแดงส้มในสถานะที่มีกรดกำมะถันอยู่ด้วย ให้กลายเป็นโครเมียมซัลเฟต ( $Cr_2(SO_4)_3$ ) มีสีเขียว ซึ่งความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไปจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณไอระเหยของสารเคมีที่ตรวจวัดได้ ถ้ามีปริมาณไอระเหยของสารเคมีมากขึ้นก็จะทำให้สีเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลักการวิธีวัดทางการดูดกลืนรังสี วิธีนี้จะตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของไอระเหยของสารเคมีซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งทำให้ปริมาณรังสีอินฟราเรดที่ผ่านไประยะหนึ่งมีความเข้มของรังสีลดลง ถ้ามีปริมาณไอระเหยของสารเคมีมากการดูดกลืนรังสีจะมากขึ้นเป็นสัดส่วนตามกัน เมื่อวัดความเข้มรังสีที่เปลี่ยนไป ก็จะทำให้ทราบว่ามีปริมาณระเหยของสารเคมีอยู่เท่าใด

3. หลักการวิธีวัดทางเคมีไฟฟ้า วิธีนี้จะตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยการให้ไอระเหยของสารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ากับเครื่องตรวจวัด ซึ่งประกอบด้วย แผ่นพลาสติกนิ่มบางๆ 2 แผ่น ขนานกัน และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรออยู่ระหว่างกลาง ไอระเหยของสารเคมีจะถูกดูดซับอยู่บนแผ่นพลาสติกนิ่ม และถูกออกซิไดซ์เป็นกรดอะซิติก (acetic acid) จึงให้อิเล็กตรอนออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านแผ่นพลาสติกนิ่มผ่านไปยังเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไอระเหยของสารเคมี

จากหลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีทั้ง 3 วิธีข้างต้น เป็นวิธีการที่ยุ่งยาก และใช้ค่าใช้จ่ายที่สูง งานวิจัยนี้จึงได้มีความสนใจที่จะใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนซึ่งมีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ซึ่งชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นจะทำการสร้างในเนื้อซิลิคอนจึงสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก ทำให้ผลิตได้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ราคาต่ออุปกรณ์ถูก และกระบวนการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นทำได้ง่าย สามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการอิเล็กทรอนิกส์ได้

### 3.3 หลักการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างแบบง่าย ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ

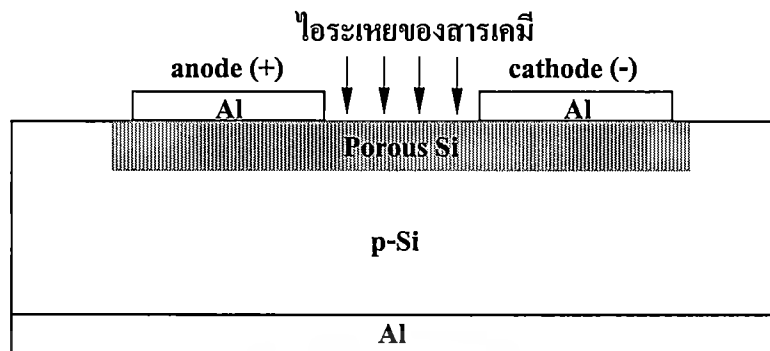
#### - ส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด กับ ขั้วแอโนด อยู่บนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจะทำหน้าที่ในการตรวจวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีถูกดูดซับเข้ามาในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

#### - ส่วนที่เป็นชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีได้ดีและมีเนื้อที่ในการดูดซับมากกว่าพื้นผิวราบเรียบที่ไม่มีรูพรุน จะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับไอระเหยของสารเคมี

โดยอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนโครงสร้างแบบง่ายนี้ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

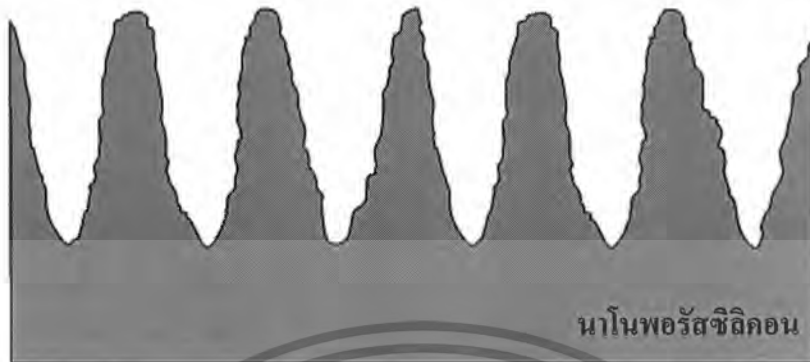
โดยหลักการหลักๆ ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนี้มีอยู่ 2 หลักการ คือ หลักการแรก เป็นหลักการดูดซับและควบแน่นในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน และหลักการที่สอง เป็นหลักการเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งทั้ง 2 หลักการนี้จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน สามารถอธิบายแยกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 3.3.1 หลักการดูดซับและควบแน่นในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน [39-44]

ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน จะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดซับ (adsorption) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมี เนื่องจากพื้นผิวที่มีรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนสามารถดูดซับโมเลกุลก๊าซได้ดีกว่า และมีเนื้อที่ในการดูดซับมากกว่าพื้นผิวราบเรียบที่ไม่มีรูพรุน โดยการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีจะเริ่มจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาเกาะ เมื่อมีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามาในระบบผ่านบริเวณพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีนี้จะถูกดูดซับและจับตัวกับผนังรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals attractive force) เมื่อมีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามาเพิ่มมากขึ้น โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีจะรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้น โมโนเลเยอร์ (mono layer) ต่อมาเมื่อมีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามาเพิ่มมากขึ้นอีก โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีก็จะรวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นชั้นมัลติเลเยอร์ (multi layer) และเมื่อโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมารวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นอีกเรื่อยๆ ส่งผลให้ความดันไอบนรูพรุนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน (capillary condensation) ส่งผลทำให้เกิดการอิมมิดีใน การดูดซับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีภายในรูพรุน และเมื่อไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามาในระบบจะส่งผลทำให้โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกจากรูพรุนซึ่งที่อุณหภูมิห้อง

โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีสามารถระเหยได้เองแต่จะใช้เวลานาน จึงควรใช้ความร้อนหรือลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป่าไล่ซึ่งจะทำให้โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยไปจนหมดได้ไวขึ้น โดยกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นนี้ แสดงดังรูปที่ 3.4



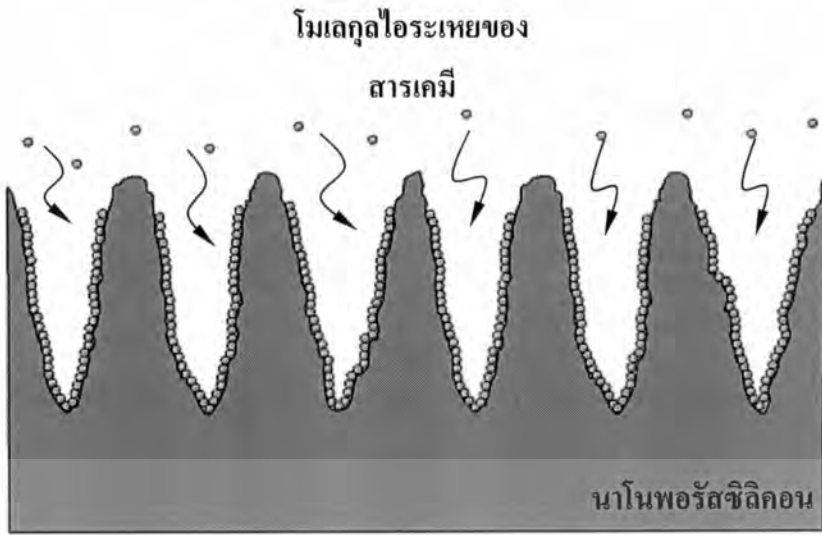
รูปที่ 3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์ซิลิกา

- (ก) ชั้นนาโนพอร์ซิลิกาที่ยังไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาเกาะ
- (ข) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุน
- (ค) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นเรียงตัวกันเป็นชั้น โมโนเลเยอร์
- (ง) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกหลายๆ ชั้นเป็นมัลติเลเยอร์
- (จ) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันเพิ่มขึ้นอีกเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นภายใน

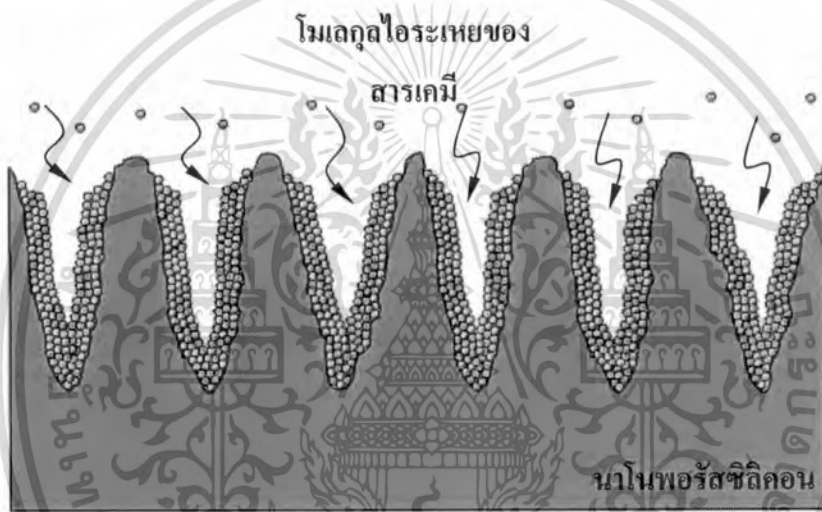
รูพรุน

- (ฉ) โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอร์ซิลิกา
- (ช) ชั้นนาโนพอร์ซิลิกาที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกไปหมดแล้ว

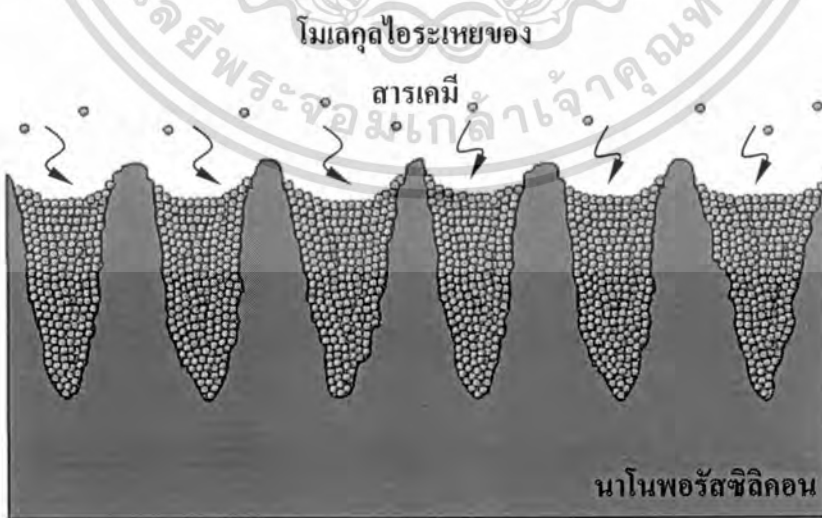
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

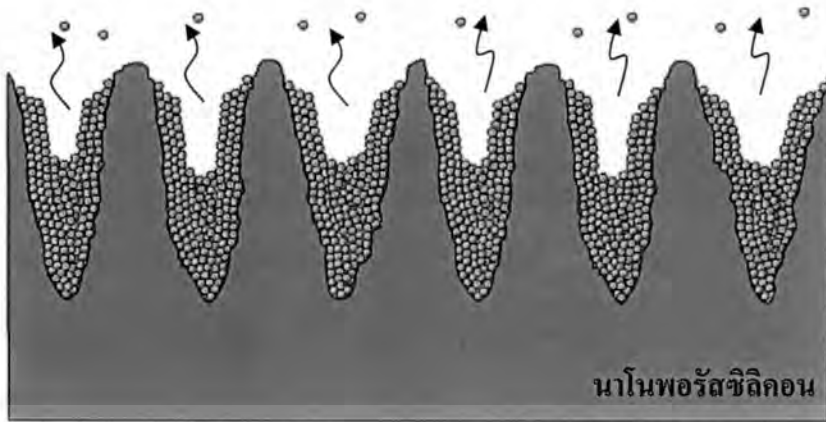


(ข)

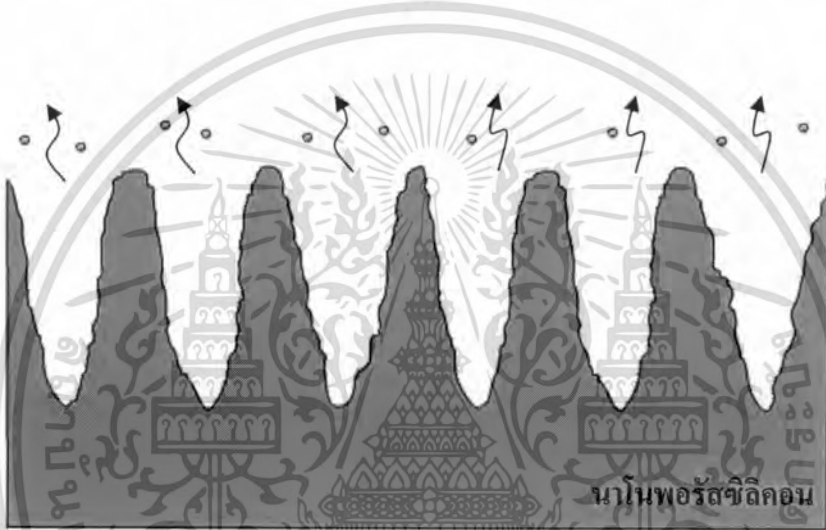


(ค)

รูปที่ 3.4 แบบจำลองการตรวจจับโอะระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ต่อ)  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 แบบจำลองการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน (ต่อ)

จากรูปที่ 3.4 เป็นแบบจำลองการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

- (ก) เริ่มจากชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่ยังไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาเกาะ
- (ข) เมื่อมีการไหลของโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามาในระบบ โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีจะเข้ามาในบริเวณรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน แล้วจับตัวกับผนังของรูพรุน
- (ค) เมื่อ โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามารวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นจะเรียงตัวกันเป็นชั้นที่เรียกว่า ชั้น โมโนเลเยอร์
- (ง) เมื่อ โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามารวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นอีกหลายๆ ชั้น เป็นชั้นที่เรียกว่า ชั้นมัลติเลเยอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จ) เมื่อโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามารวมตัวกันเพิ่มมากขึ้นอีกเรื่อยๆ จะส่งผลทำให้ความดันไอภายในรูพรุนมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน ทำให้เกิดการอึดตัวในการดูดซับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีภายในรูพรุน

(ค) เมื่อไม่มีการไหลของโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามาในระบบ จะส่งผลทำให้โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีจะระเหยออกจากรูพรุน

(ข) เมื่อโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกจากรูพรุนไปจนหมดก็จะเหลือแต่ชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน

### 3.3.2 หลักการเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน [45-48]

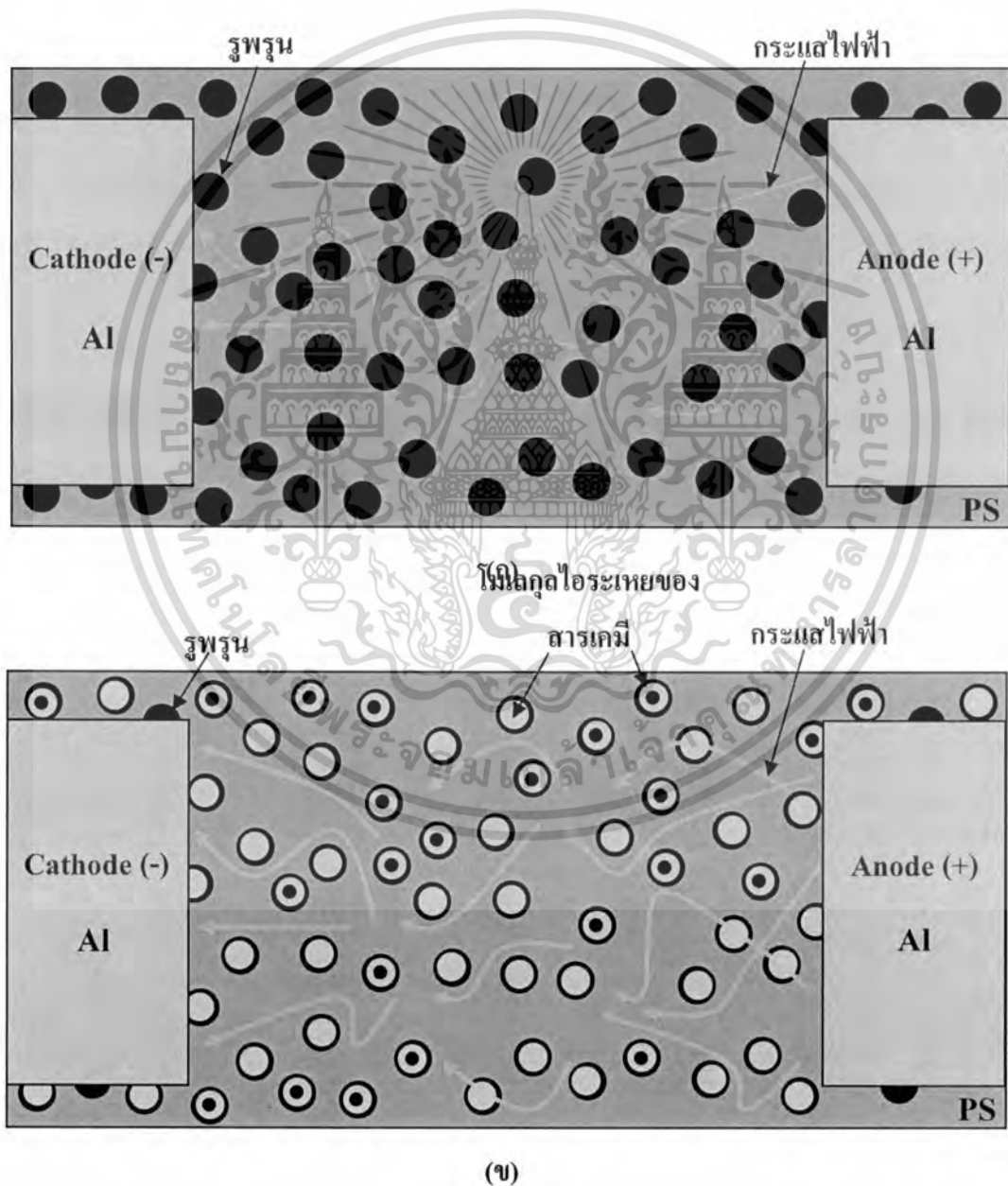
บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคนมีพื้นระนาบขนาดและสารเจือปนอื่นๆ อยู่บริเวณผิวซึ่งจะทำให้มีระดับพลังงานที่เรียกว่าสถานะผิว (surface states) เกิดขึ้น เมื่อโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีถูกดูดซับและจับตัวกับผนังรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน จะส่งผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำพาหะที่บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคนเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดสถานะผิวเพิ่มมากขึ้น บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคนจึงสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองการเกิดสถานะผิวที่บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิโคน

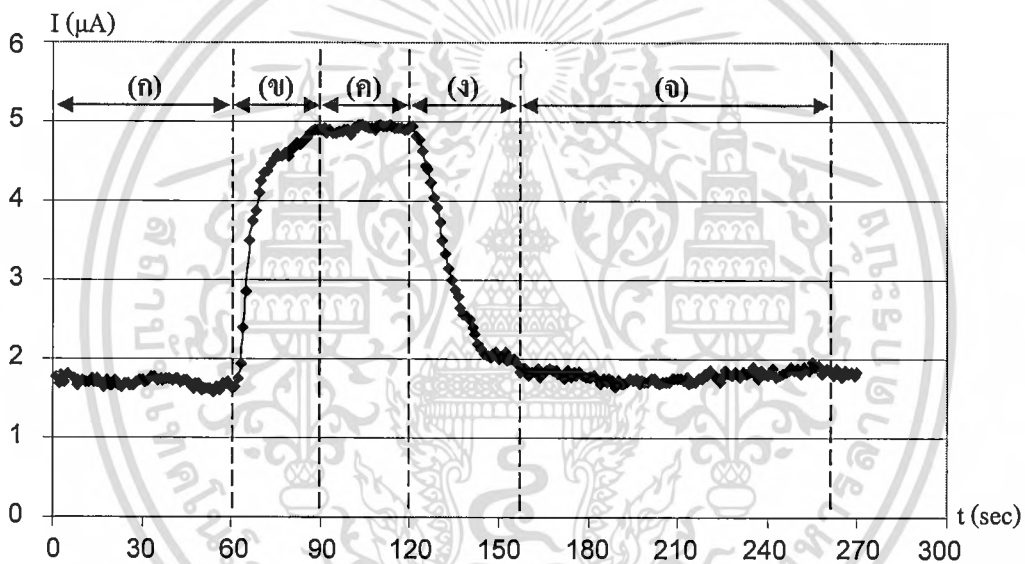
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 เมื่อโมเลกุลไอร่หะของสารเคมีเข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนทำให้เกิดสถานะผิวเพิ่มมากขึ้น ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น และเมื่อมีโมเลกุลไอร่หะของสารเคมีเข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน ส่งผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นจนไปคงที่อยู่ทีี่ค่าหนึ่ง เนื่องจากเกิดการอิมตัวในการตรวจจับโมเลกุลไอร่หะของสารเคมี โดยการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่เพิ่มขึ้นนี้จะเกิดจาก 2 สาเหตุ คือ สถานะผิวที่เพิ่มมากขึ้นของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน และการนำไฟฟ้าของระหะของสารเคมีที่ควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน (ก) ก่อน (ข) ขณะตรวจจับไอร่หะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 (ก) เป็นการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดก่อนที่จะมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี สังเกตได้ว่าจะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าน้อยมาก เนื่องจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าความต้านทานที่สูง และจากรูปที่ 3.6 (ข) เมื่อมีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมากขึ้น ทำให้มีการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเพิ่มมากขึ้น สังเกตได้ว่าจะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจาก 2 สาเหตุหลักๆ คือ เกิดจากสถานะผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มมากขึ้น และเกิดจากการนำไฟฟ้าของระเหยของสารเคมีที่ควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน โดยตัวอย่างผลทดลองลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

- (ก) ช่วงที่ไม่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี
- (ข) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมาจับตัวกันที่บริเวณพื้นผิวของรูพรุนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและเกิดการควบแน่นภายในรูพรุน
- (ค) ช่วงที่เกิดการอิมมิดีในการตรวจจับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี
- (ง) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกไปจากชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน
- (จ) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีระเหยออกไปหมดแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 เป็นช่วงต่างๆ ของลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนสามารถอธิบายได้ดังนี้

(ก) ช่วงที่ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนยังไม่มีารดูดซับโมเลกุลไอระเหยของสารเคมี

(ข) ช่วงที่มีโมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเข้ามาในระบบ แล้วเข้ามารวมตัวกันภายในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำพาหะที่ผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเพิ่มมากขึ้น เกิดสถานะผิวเพิ่มมากขึ้น ทำให้บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนสามารถนำไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น และช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีมารวมตัวกันภายในรูพรุนเป็นจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุน ทำให้มีการนำไฟฟ้าของระเหยของสารเคมีที่ควบแน่นเป็นของเหลวภายในรูพรุนเกิดขึ้น

(ค) ช่วงที่เกิดการอ้อมตัวในการตรวจจับ โมเลกุลไอระเหยของสารเคมี ทำให้การนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง

(ง) ช่วงที่หยุดการไหลของไอระเหยของสารเคมี ทำให้โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกจากรูพรุนไปเรื่อยๆ ส่งผลทำให้การนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าลดลง

(จ) ช่วงที่โมเลกุลไอระเหยของสารเคมีเกิดการระเหยออกจากรูพรุนจนหมด ส่งผลทำให้บริเวณผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกลับมานำไฟฟ้าอยู่ที่ระดับเดิมในตอนแรก

โดยเหตุการณ์การดูดซับและควบแน่นในรูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน และเหตุการณ์การเหนี่ยวนำพาหะบริเวณผิวและการนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน จะเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ส่งผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนสามารถทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีได้

## บทที่ 4

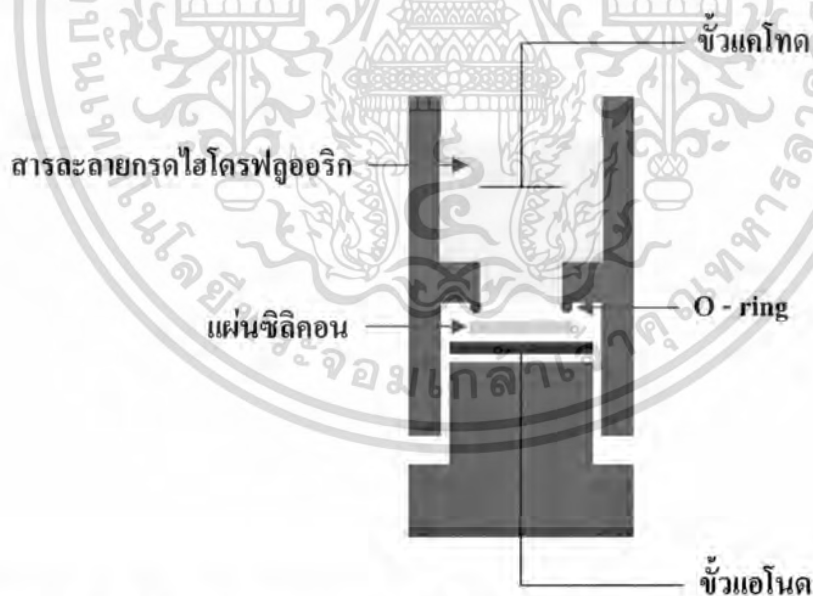
### กระบวนการสร้าง และเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

ในบทนี้จะกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน เทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความพรุน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว และเครื่องมือในการวัดผลของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

#### 4.1 กระบวนการสร้าง

##### 4.1.1 การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

การสร้างนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน เป็นวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถควบคุมปฏิกิริยาในการกัดเพื่อทำให้เกิดชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาตามความต้องการได้ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้ง เนื่องจากใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ และสามารถทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งนี้จะประกอบด้วย แผ่นซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดจะจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แผ่นซิลิคอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยจะใช้โอริง (O-ring) เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซลล์ ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี และทำการป้อนกระแสไฟฟ้าบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วลบจะจมอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้านี้เองก็จะทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดด้วยโดยเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการแอโนไดซ์เซชันที่ได้ให้ความสนใจคือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการแอโนไดซ์เซชันซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก

#### 4.1.2 การสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้การสร้างด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น และสามารถควบคุมความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ได้อีกด้วย

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

##### 1. การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

ใช้แผ่นซิลิคอนชนิดพี มีระนาบ (100) สภาพด้านทาน 1-2 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาของแผ่นซิลิคอนเท่ากับ 450 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.2 (ก)

##### 2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

- ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยน้ำบริสุทธิ์ (De-Ionized (DI) water) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิวหน้า

- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน (trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน

- ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 3. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้านหลังแผ่นซิลิคอน

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำขั้วด้านหลังของอุปกรณ์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ (vacuum evaporator) ซึ่งสามารถทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนได้ความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.2 (ข)

### 4. กระบวนการซินเตอร์ริง

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้านหลังแผ่น ไปทำการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนให้ระหว่างกระบวนการเอโนไคซ์เซชัน มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการวางแผ่นซิลิคอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 L/min อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที

### 5. การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

โดยการนำเอาแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ข้างต้น ไปวางตรงตำแหน่งบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ลงไปในเซลล์ไฟฟ้าเคมี นำขั้วอิเล็กโตรดจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วลบให้กับขั้วอิเล็กโตรดที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้น มีผลทำให้ที่บริเวณของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความพรุนของนาโนพอร์สซิลิคอนก็คือเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการเอโนไคซ์เซชัน อันได้แก่

- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเอโนไคซ์เซชัน
- เวลาที่ใช้ในการเอโนไคซ์เซชัน

หลังจากกระบวนการเอโนไคซ์เซชันเสร็จสมบูรณ์แล้ว จะได้ชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอนเกิดขึ้นตรงบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 4.2 (ค)

### 6. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนหลังจากการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

นำแผ่นซิลิคอนออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี ไปผ่านการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งสุดท้าย โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- แช่แผ่นซิลิคอนในระเหยของสารเคมีเป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดชะล้างสารละลายกรด

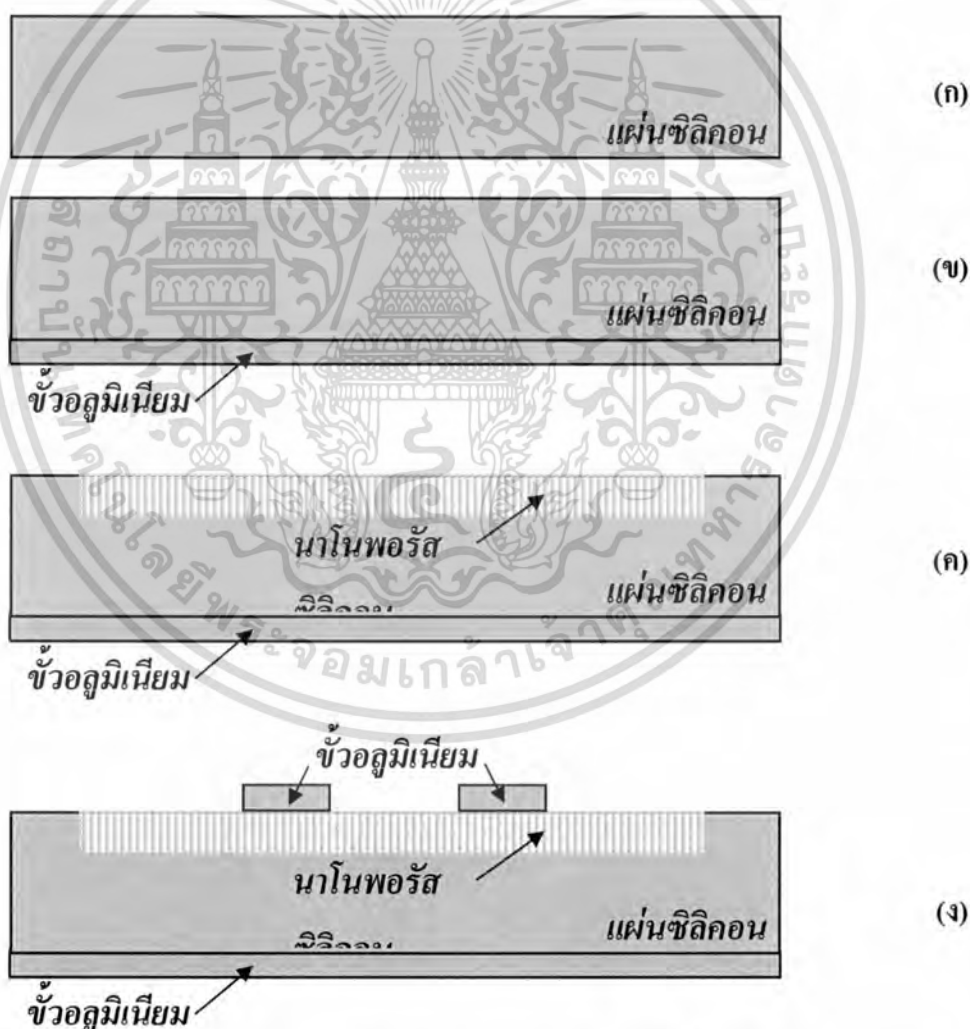
ไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่ในชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

### 7. การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหน้าโดยการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนบริเวณที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้มาสก์สำหรับทำขั้วโลหะเพื่อทำขั้วของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วประมาณ  $500 \mu\text{m}$  ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 4.2 (ง)

### 8. กระบวนการซินเตอร์ริง

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำขั้วอลูมิเนียมด้านหน้าไปทำการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อนาโนพอร์สซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยการวางแผ่นซิลิคอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล  $1 \text{ L/min}$  อุณหภูมิ  $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

(ก) การเตรียมแผ่นซิลิคอน

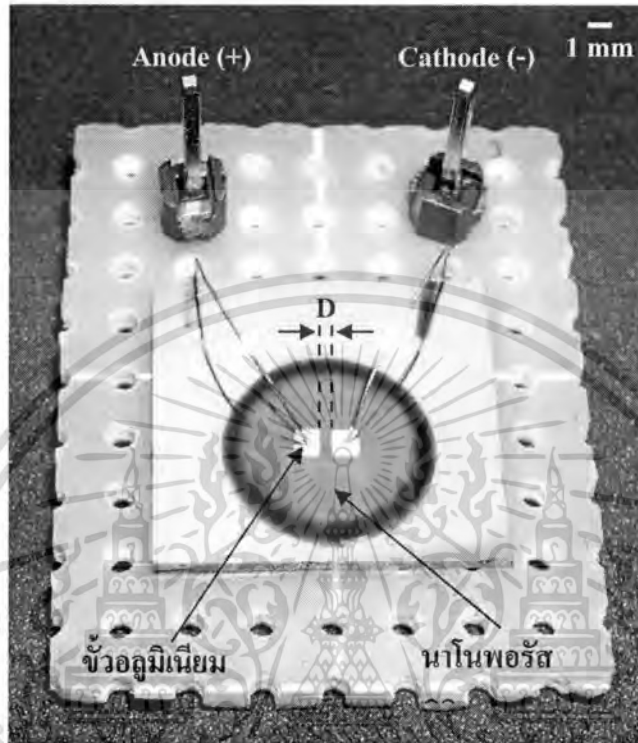
(ข) การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหลัง

(ค) การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

(ง) การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากกระบวนการข้างต้น มีขนาดของขั้วลุ่มิเนียมประมาณ  $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$  และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (D) ประมาณ  $500 \mu\text{m}$  แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

## 4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

### 4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

การวัดค่าความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน โดยค่าความพรุนของวัสดุใดๆ สามารถหาได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความพรุน} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_3)} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่  $m_1$  คือ น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นก่อนการเกิดรูพรุน

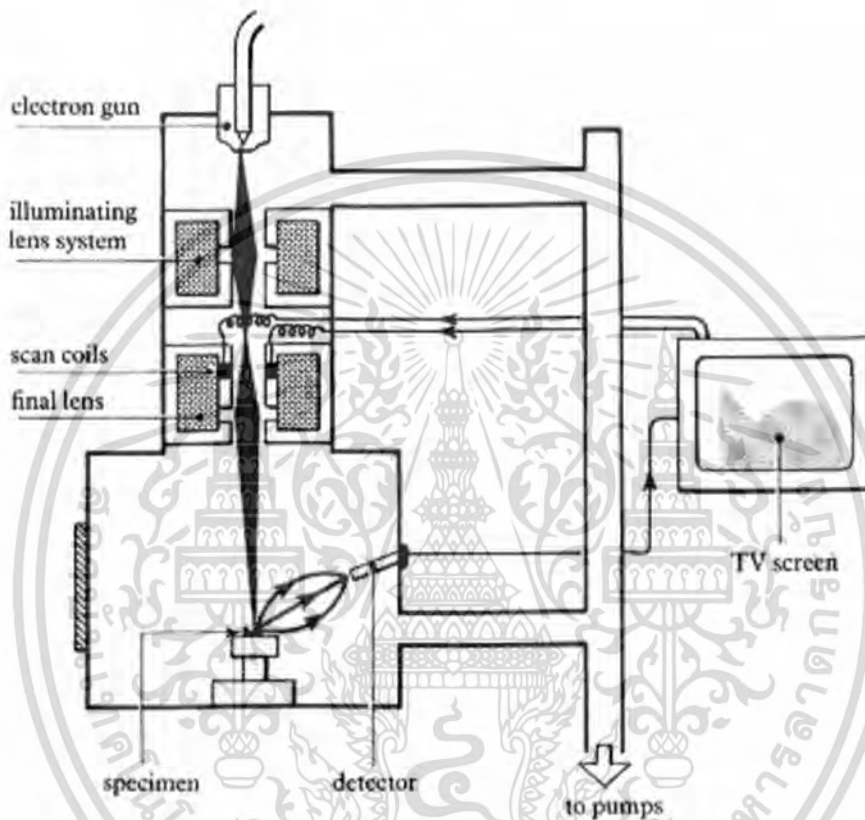
$m_2$  คือ น้ำหนักของวัสดุหลังการเกิดรูพรุน

$m_3$  คือ น้ำหนักของวัสดุที่เหลือหลังจากการลอกชั้นความพรุนออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิว และศึกษาโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน เครื่อง SEM นี้ มีจุดเด่นอยู่ที่กำลังขยายสูงถึง 20 ถึง 500,000 เท่า จึงสามารถศึกษาพื้นผิวที่มีขนาดเล็กได้ดี โดยส่วนประกอบของเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.4



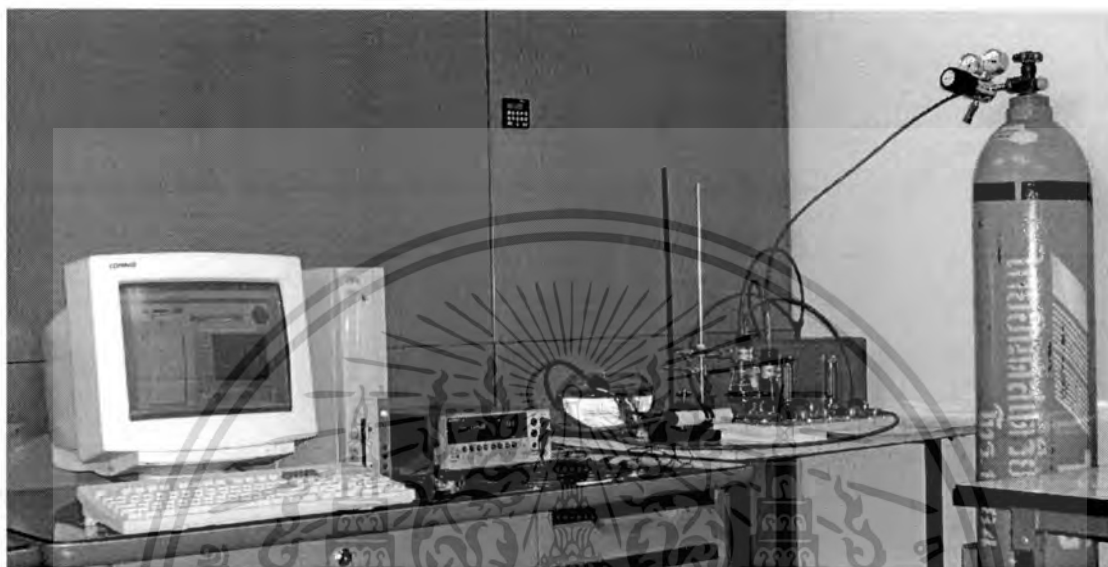
รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 4.4 การทำงานของเครื่อง SEM จะเริ่มจาก แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ให้อิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 kV โดยอิลูมินเลนส์ (illuminating lens system) ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิวของวัสดุ คล้ายกับการกวาดรูปบนจอโทรทัศน์ และเลนส์ตัวสุดท้ายทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากสแกนคอยล์ให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ก่อนถึงตัววัสดุ เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัสดุจะให้สัญญาณออกมา ซึ่งสัญญาณต่างๆ จะถูกตรวจจับและถูกนำไปแสดงผลที่จอภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

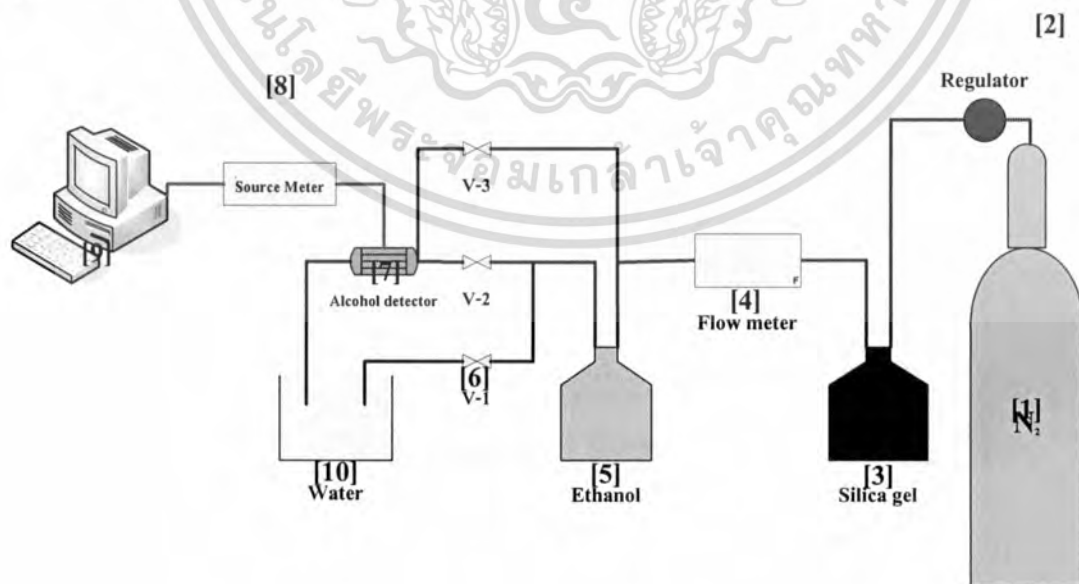
4.2.3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีชนิดต่างๆ

การศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีจะใช้ชุดเครื่องมือในการวัด แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ชุดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

โดยแยกชุดเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 ชุดเครื่องมือในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ประกอบด้วย ส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ถังก๊าซไนโตรเจน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหยของสารเคมี เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยากับ ระเหยของสารเคมีและซึ้นนาโนพอร์สซิลิคอน

2. รีเกกูเลเตอร์ (regulator) ทำหน้าที่ควบคุมความดันในระบบ

3. ซิลิกาเจล (silica gel) ทำหน้าที่ดูดความชื้นของก๊าซไนโตรเจน

4. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (flow meter) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหล

5. ไอระเหยของสารเคมี

6. ระบบวาล์ว โดยวาล์วต่างๆ จะมีหน้าที่ดังนี้

- วาล์ว 1 (V-1) ใช้ในการปล่อยให้ก๊าซไนโตรเจนและไอระเหยของสารเคมีไหลลงสู่อ่างน้ำขณะเริ่มต้นระบบ เพื่อปรับความดันและอัตราการไหลในระบบให้คงที่ก่อนเริ่มทำการวัด

- วาล์ว 2 (V-2) ใช้ในการควบคุมก๊าซไนโตรเจนและไอระเหยของสารเคมีให้ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แล้วไหลลงสู่อ่างน้ำ

- วาล์ว 3 (V-3) ใช้ในการควบคุมก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่ อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แล้วไหลลงสู่อ่างน้ำ

7. อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ซึ่งอยู่ในหลอดแก้วทึบแสง

8. เครื่องมือวัดแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ใช้ในการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

9. คอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ติดต่อกับเครื่องมือวัดแรงดัน/กระแสไฟฟ้าของบริษัท Keithley รุ่น 2400 ด้วยโปรแกรม LabVIEW ในการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอระเหย

10. อ่างน้ำ ทำหน้าที่รักษาความดันในระบบให้คงที่

โดยชุดเครื่องมือในการวัดอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีนี้ จะเริ่มต้นด้วยการเปิดถังก๊าซไนโตรเจนและตัวรีเกกูเลเตอร์เพื่อให้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบ ทำการปรับเครื่องมือวัดอัตราการไหลให้ได้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนตามต้องการ เปิดวาล์ว 1 ปิดวาล์ว 2 และ 3 รอจนความดันและอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนในระบบคงที่ เมื่อเริ่มทำการวัดจะเปิดวาล์ว 3 และปิดวาล์ว 1 ให้ก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีก่อน เมื่อต้องการวัดการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีก็จะเปิดวาล์ว 2 พร้อมกับปิดวาล์ว 3 ให้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหยของสารเคมีเข้าไปในระบบที่มีอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีอยู่ และเมื่อต้องการจะหยุดวัดก็ทำการเปิดวาล์ว 3 พร้อมกับปิดวาล์ว 2 ให้ก๊าซไนโตรเจนให้ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี เพื่อทำการไล่ไอระเหยของสารเคมีที่ยังคงค้างอยู่ออกจากระบบ ซึ่งทุกครั้งที่ทำการวัดควรระวังเรื่องความดันและอัตราการไหลในระบบให้คงที่อยู่

เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลอง และผลการทดลอง

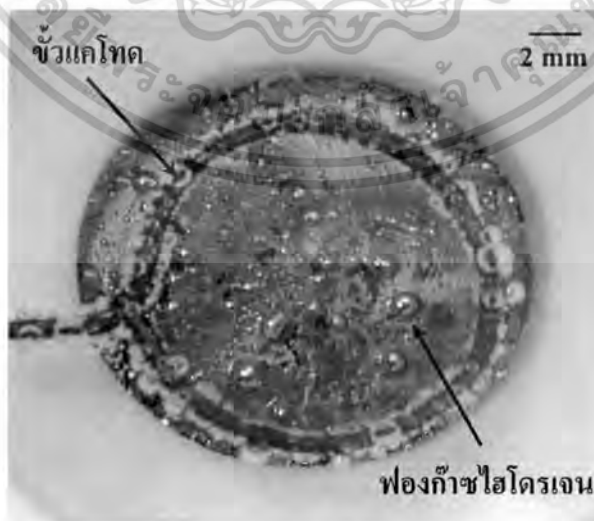
ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน และผลการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

#### 5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึง ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ เปรียบเทียบกับ ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอล เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ ในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน

##### 5.1.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์

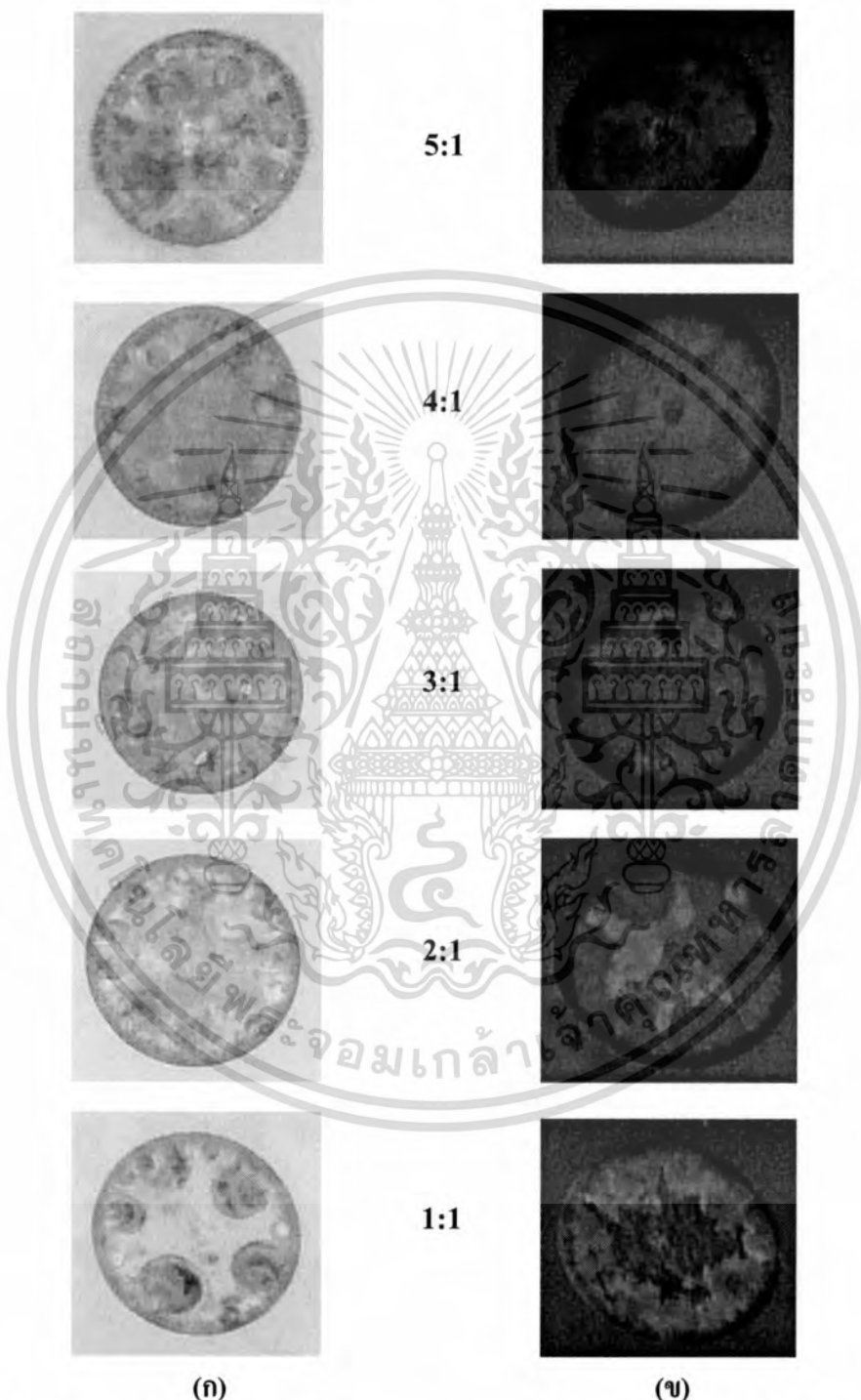
ทำการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้ เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47.8%) ต่อน้ำบริสุทธิ์ เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ จะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนรวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ เป็น 4:1 โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 สังเกตได้ว่า ขณะทำการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนเป็นจำนวนมากที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ส่งผลทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ต่างๆ กัน  
 (ก) พื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน (ข) การเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 (ก) สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์เป็น 4:1 เกิดชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และสังเกตสมบัติการเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยการฉายแสงจากหลอดแบลคไลต์ (black light) ที่มีความยาวคลื่น 365 nm ดังรูปที่ 5.2 (ข) สังเกตได้ว่าที่ อัตราส่วน 4:1 มีการเรืองแสงสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

### 5.1.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอล

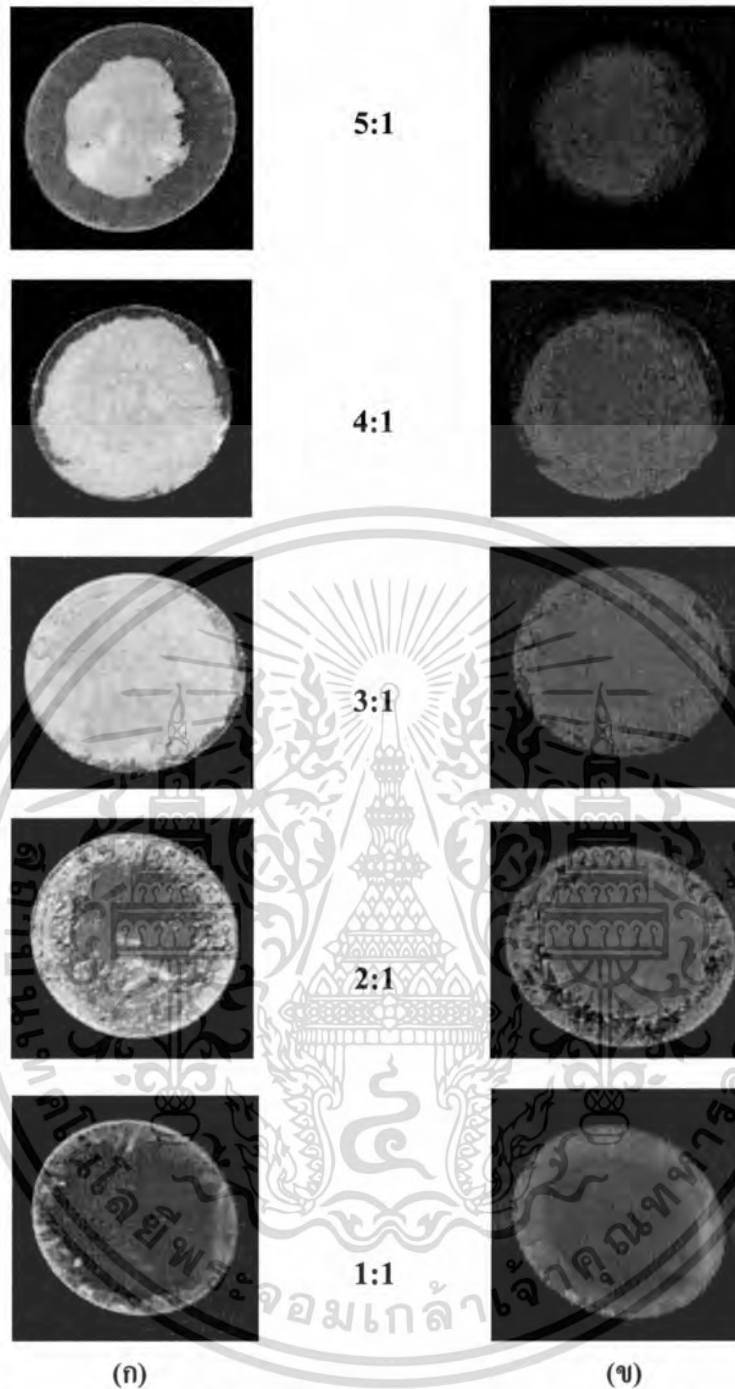
ทำการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการเอโนไลเซชัน โดยใช้ เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47.8%) ต่อเอทานอล (100%) เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ ได้ช่วยลดการเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอล เป็น 4:1 โดยปริมาตร

จากรูปที่ 5.3 สังเกตได้ว่าขณะทำการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนเป็นจำนวนน้อย ส่งผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่ได้มีความสม่ำเสมอมากกว่าชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่ได้จากอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากเอทานอลไปช่วยลดแรงตึงผิวของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำให้ลดจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถเข้าถึงผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนได้ดี จึงได้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่มีความสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



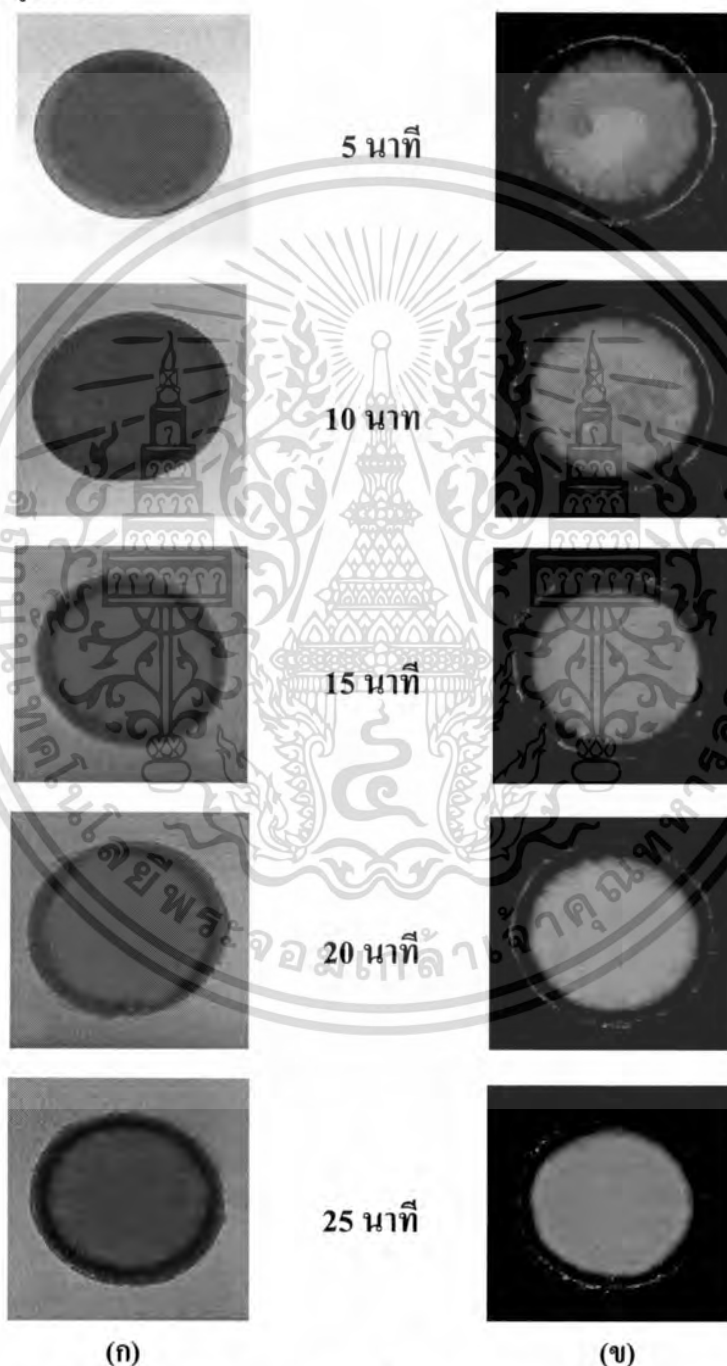
รูปที่ 5.4 ชั้นนาโนพอร์ซิลิกอนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลต่างๆ กัน  
(ก) พื้นผิวของชั้นนาโนพอร์ซิลิกอน (ข) การเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์ซิลิกอน

จากรูปที่ 5.4 (ก) สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วน 4:1 มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ พร้อมทั้งมีโครงสร้างที่ไม่เปราะบางแตกหักง่าย ซึ่งที่อัตราส่วน 3:1, 2:1, 1:1 มีโครงสร้างที่เปราะบางแตกหักง่าย และสังเกตสมบัติการเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์ซิลิกอนด้วยการฉายแสงจากหลอดแบลคไลต์ ดังรูปที่ 5.4 (ข) สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วน 4:1 มีการเรืองแสงสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึง ผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน โดยทำการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน ใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ ได้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการสร้างต่างๆ กัน

(ก) พื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน (ข) การเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.5 (ก) สังเกตได้ว่าเมื่อใช้เวลามากขึ้นสีของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน และเมื่อสังเกตสมบัติการเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน ด้วยการฉายแสงจากหลอดแบลคไลต์ แสดงดังรูปที่ 5.5 (ข) สังเกตได้ว่าสีในการเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีส้มเข้มไปเป็นสีส้มอ่อน เนื่องจากใช้เวลาในการกักเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจึงถูกกักนานขึ้นส่งผลทำให้ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนมีเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้สีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน และการเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนจึงมีการเปลี่ยนแปลงจากสีส้มเข้มไปเป็นสีส้มอ่อน

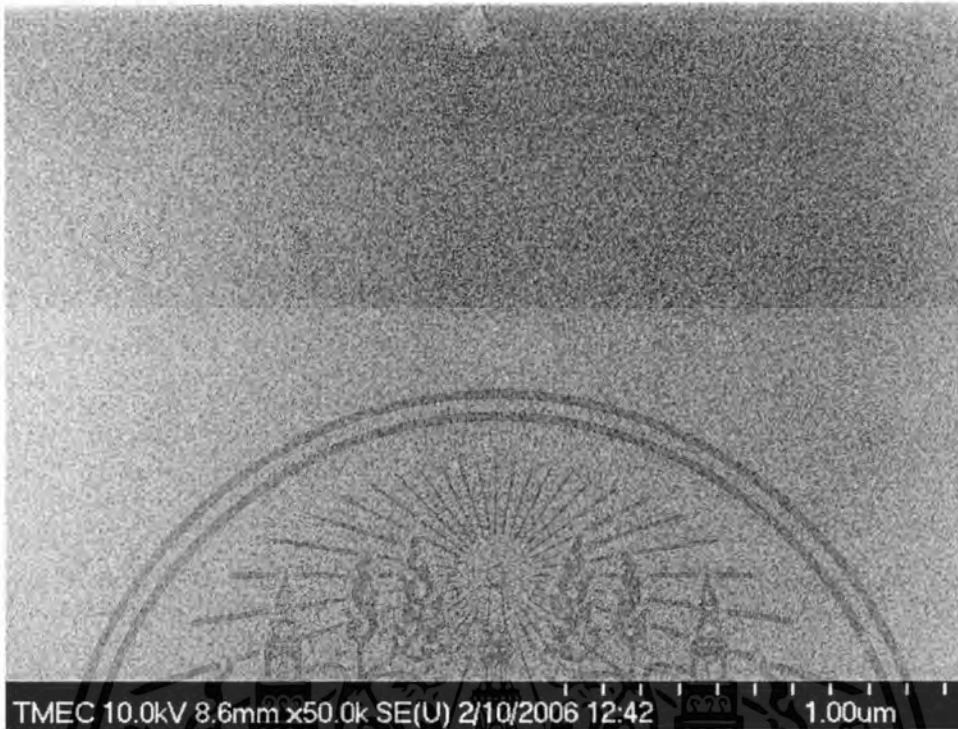
### 5.2.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยเครื่อง SEM

ทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างโดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ ซึ่งได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 5.6-5.13



รูปที่ 5.6 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

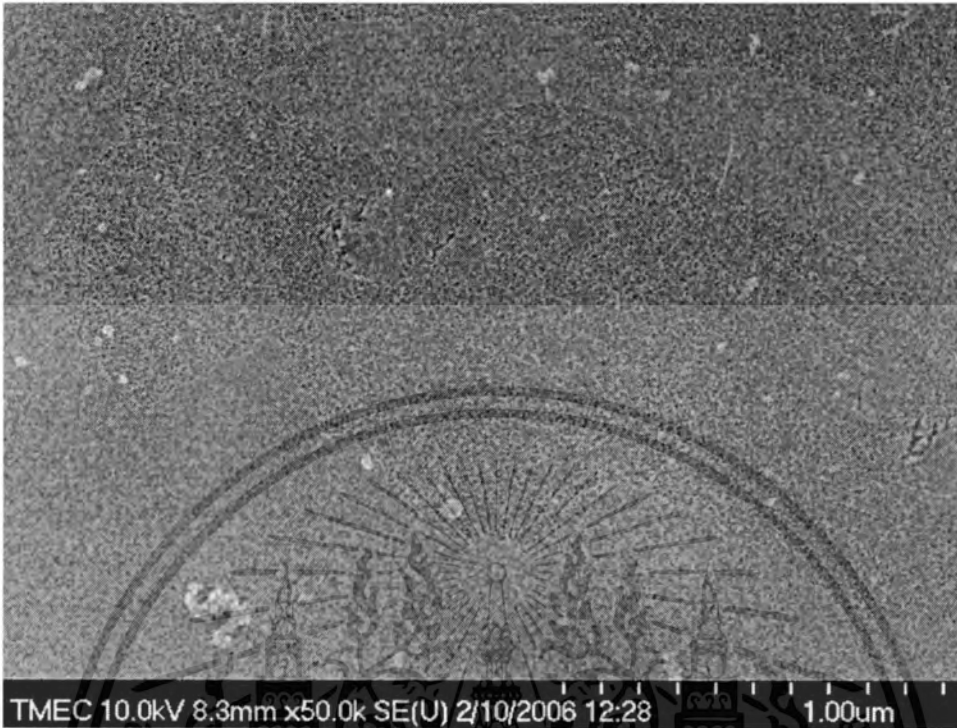


รูปที่ 5.7 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์ซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที

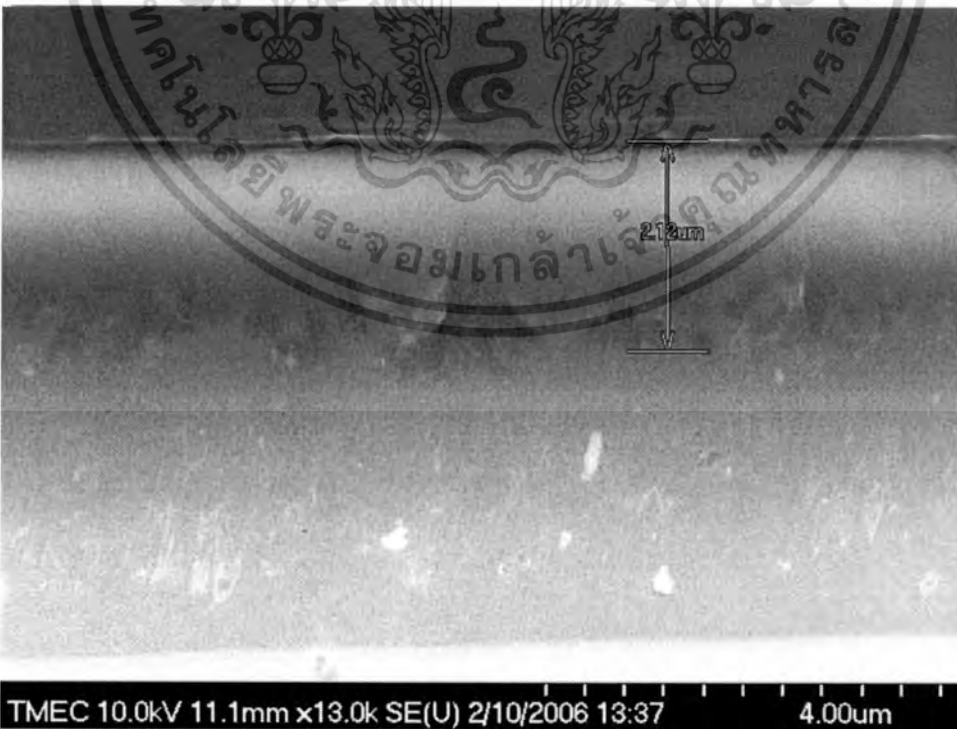


รูปที่ 5.8 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์ซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

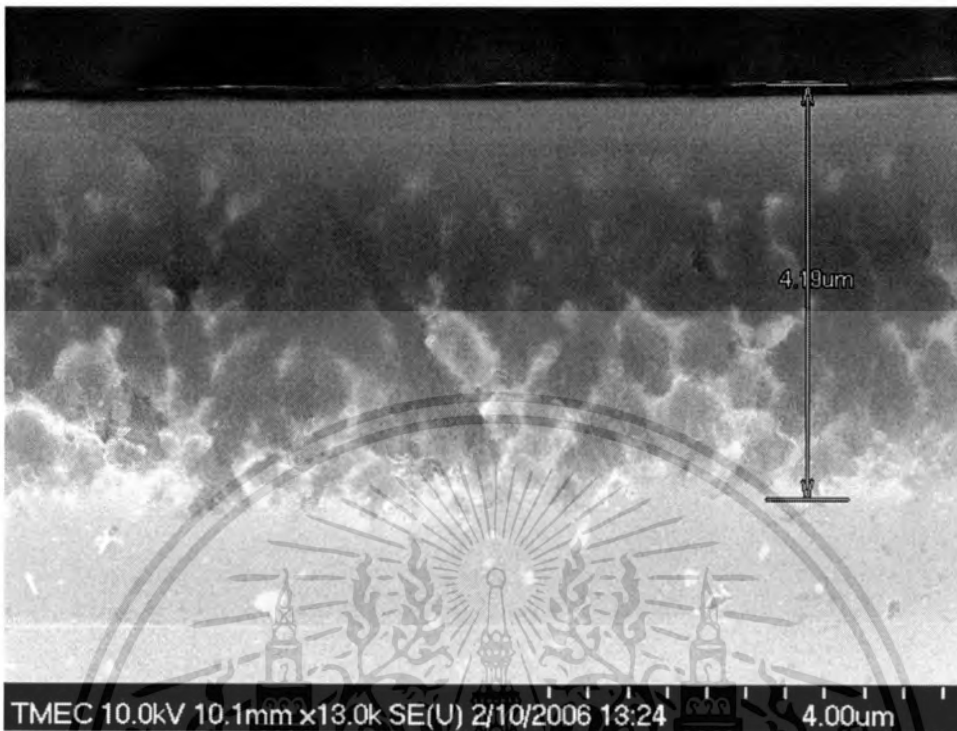


รูปที่ 5.9 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที

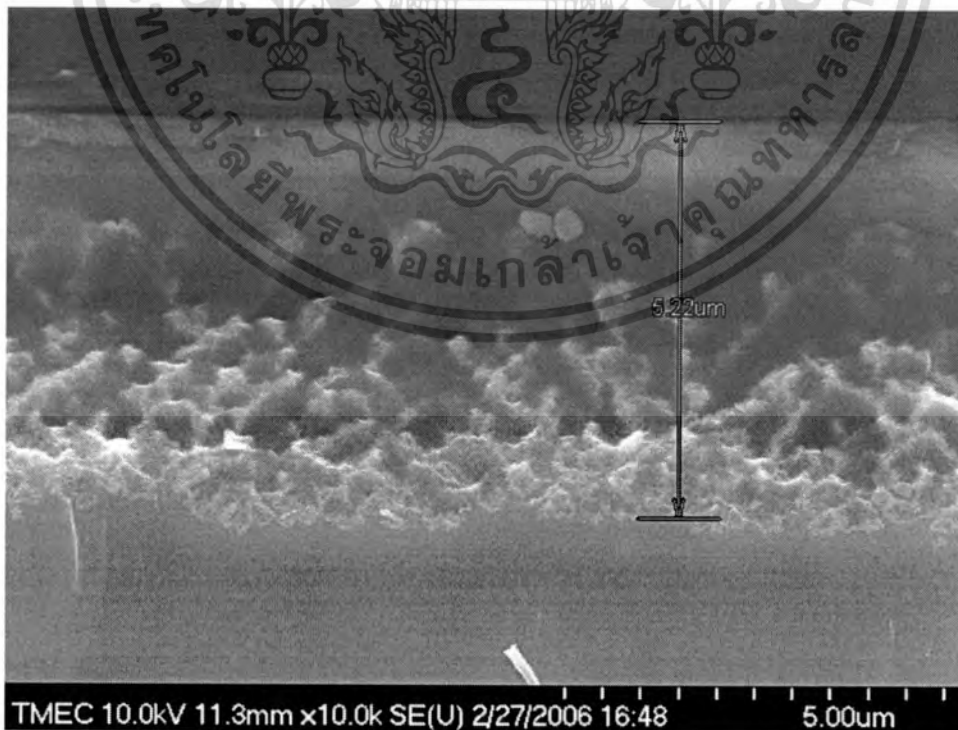


รูปที่ 5.10 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยู่ได้เห็น ไปะประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

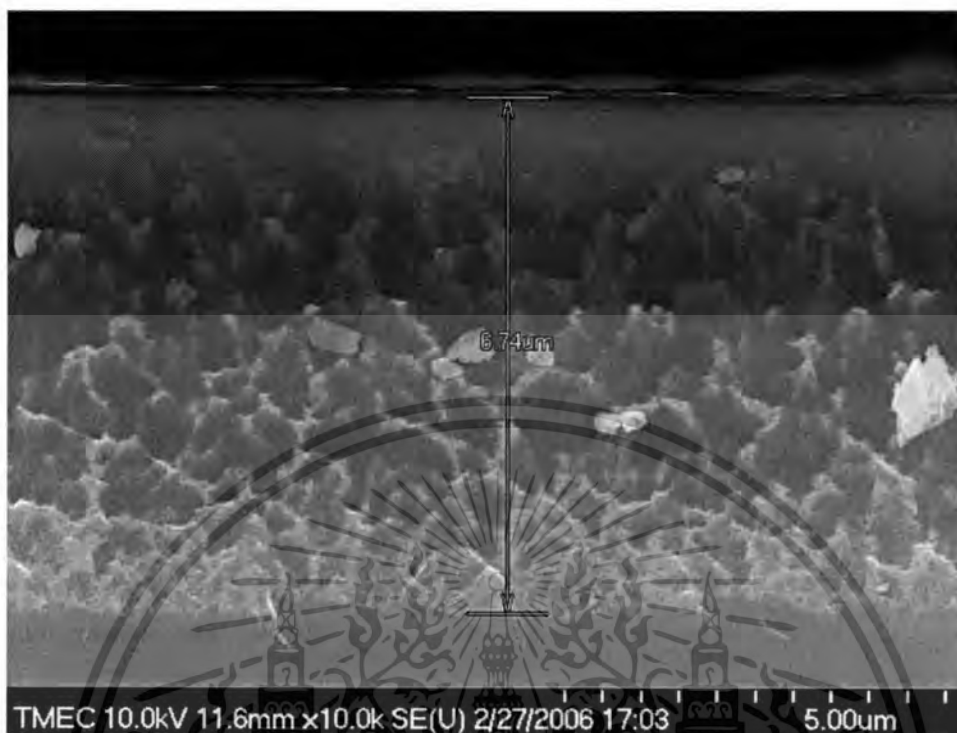


รูปที่ 5.11 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที



รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที

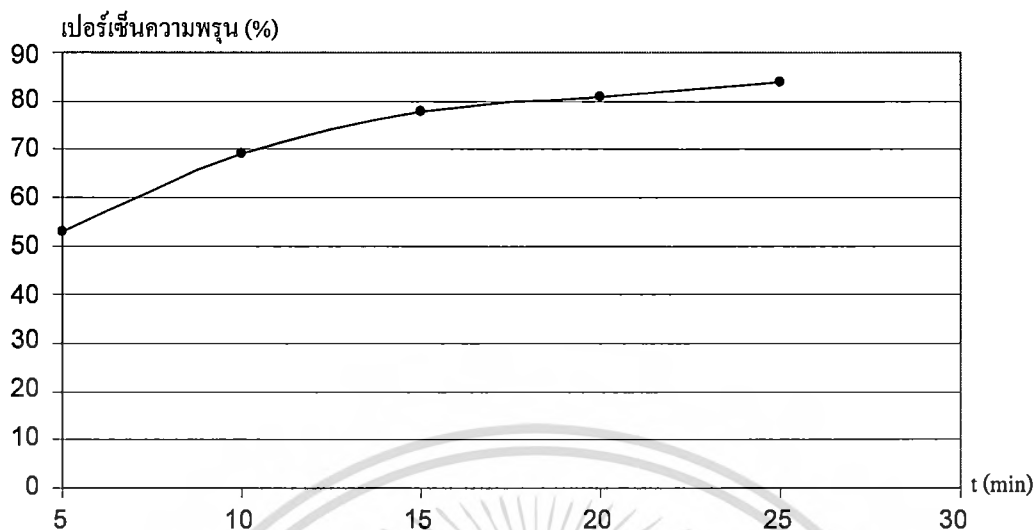
จากรูปที่ 5.6-5.9 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้พื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนถูกกัดและทำให้รูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากรูปที่ 5.10-5.13 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนมีความหนาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันมากขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการกัดชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนนานขึ้น ส่งผลทำให้รูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนมีขนาดใหญ่ขึ้น และความหนาของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนเพิ่มมากขึ้น

### 5.2.1 การศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอน

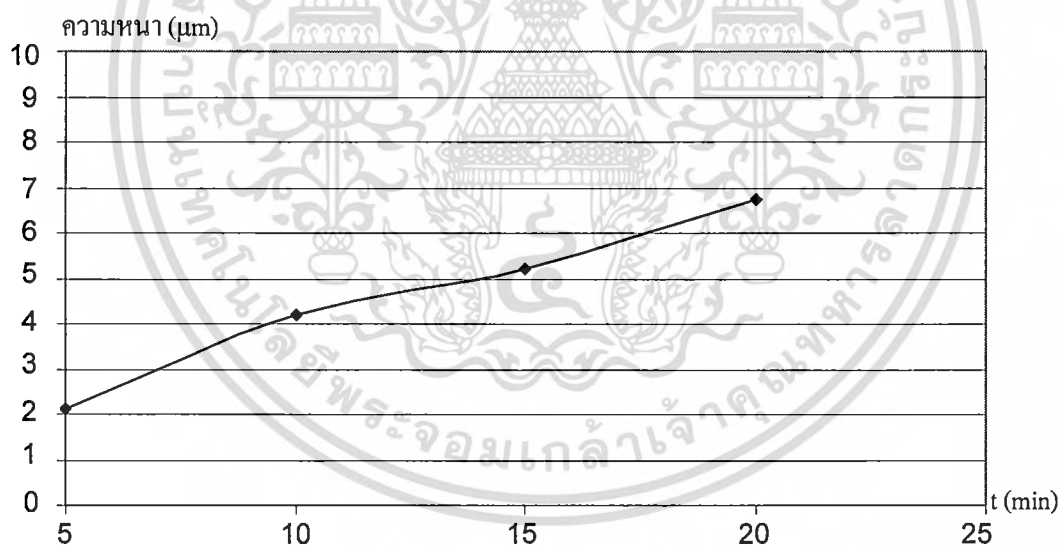
ทำการศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอนที่สร้างโดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ โดยอ้างอิงความพรุน [49] และความหนา จากรูปที่ 5.6 ถึง 5.13 และคำนวณหาค่าความพรุนจากสมการเปอร์เซ็นต์ความพรุน โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน (ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ในหัวข้อ 4.2.1) แสดงดังรูปที่ 5.14-5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน

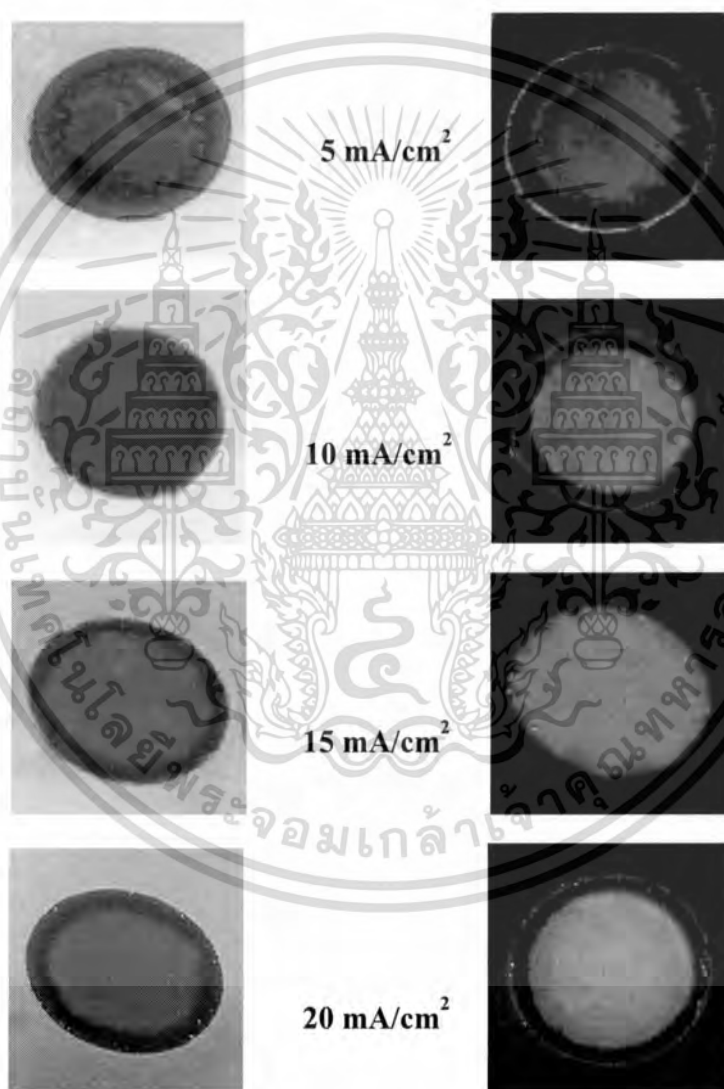


รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน

จากรูปที่ 5.14-5.15 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าเวลาในการแอโนไดซ์เซชันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งเปอร์เซ็นต์ความพรุนและความลึกของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึง ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  ได้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 5.16



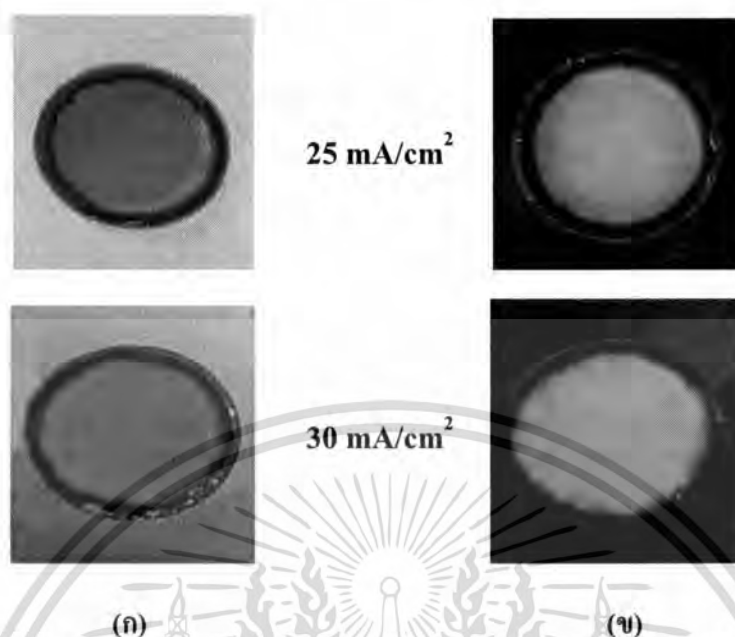
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.16 ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน

(ก) พื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน (ข) การเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



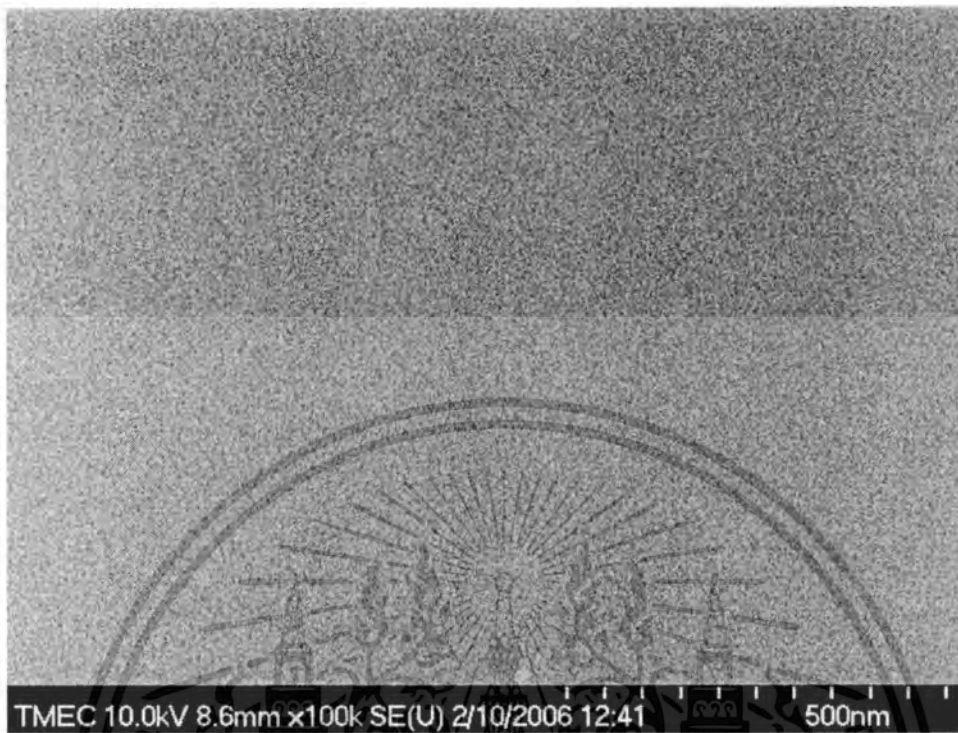
รูปที่ 5.16 (ต่อ) ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน

(ก) พื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน (ข) การเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

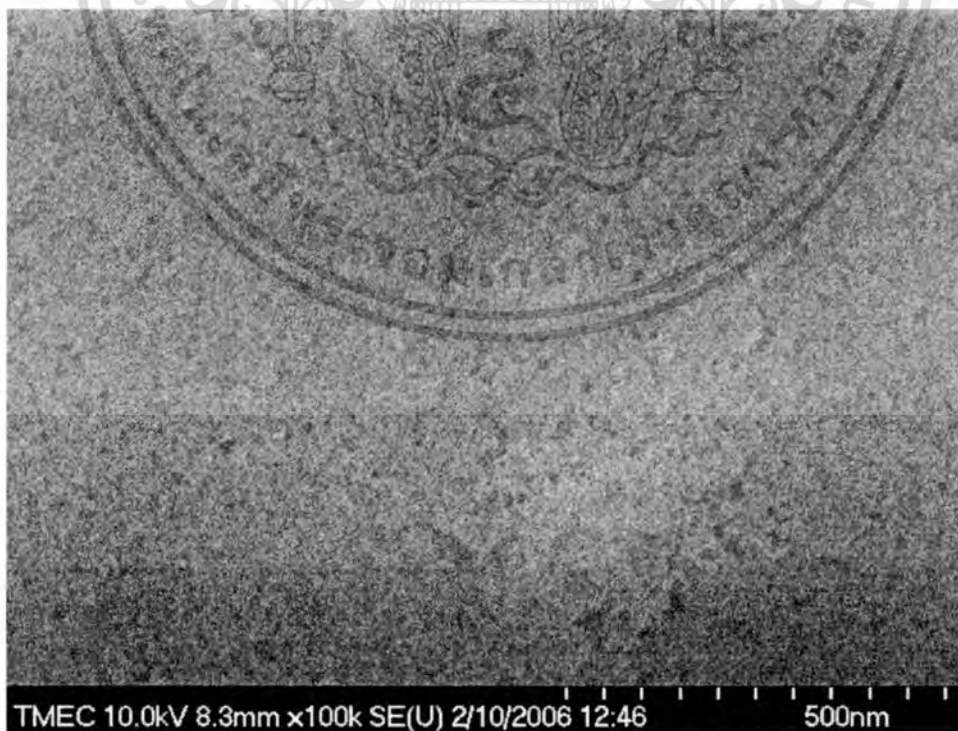
จากรูปที่ 5.16 (ก) สังเกตได้ว่าเมื่อใช้เวลามากขึ้นสีของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน และเมื่อสังเกตสมบัติการเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ด้วยการฉายแสงจากหลอดแบลคไลต์ แสดงดังรูปที่ 5.16 (ข) สังเกตได้ว่าสีในการเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีส้มเข้มไปเป็นสีส้มอ่อน เนื่องจากการใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการกัดเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจึงถูกกัดเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน และการเรืองแสงของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจึงมีการเปลี่ยนแปลงจากสีส้มเข้มไปเป็นสีส้มอ่อน

### 5.3.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยเครื่อง SEM

ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่สร้างโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$  และ  $20 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ ซึ่งได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 5.17-5.23



รูปที่ 5.17 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 5.18 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup>  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์หรือสื่ออื่นใด  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

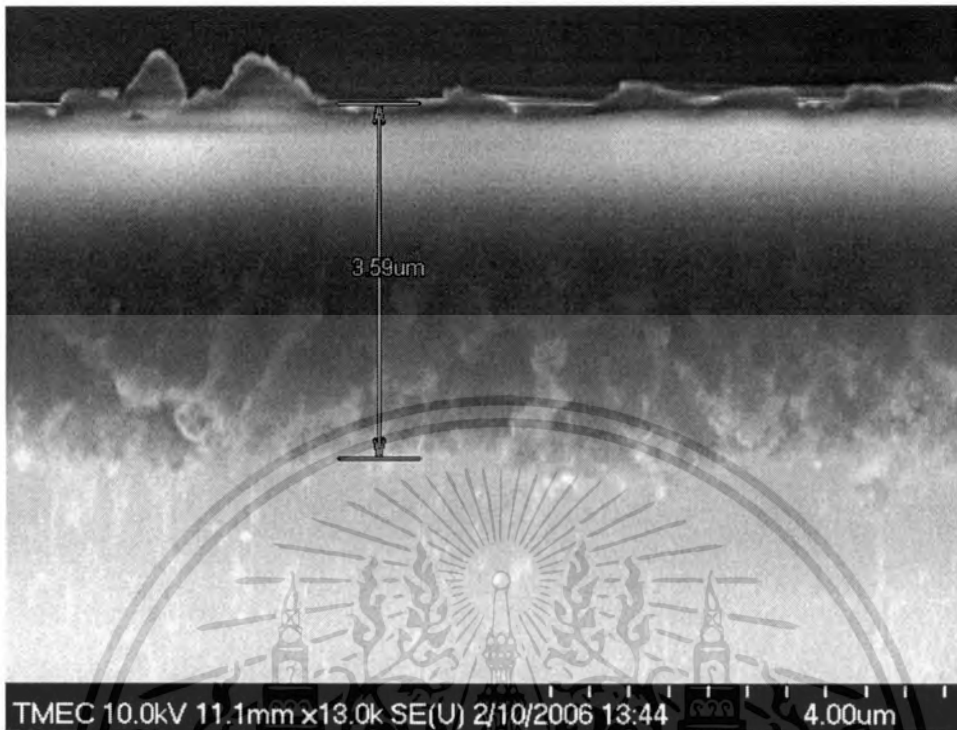


รูปที่ 5.19 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $15 \text{ mA/cm}^2$



รูปที่ 5.20 ภาพพื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซัลไฟคอน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $20 \text{ mA/cm}^2$

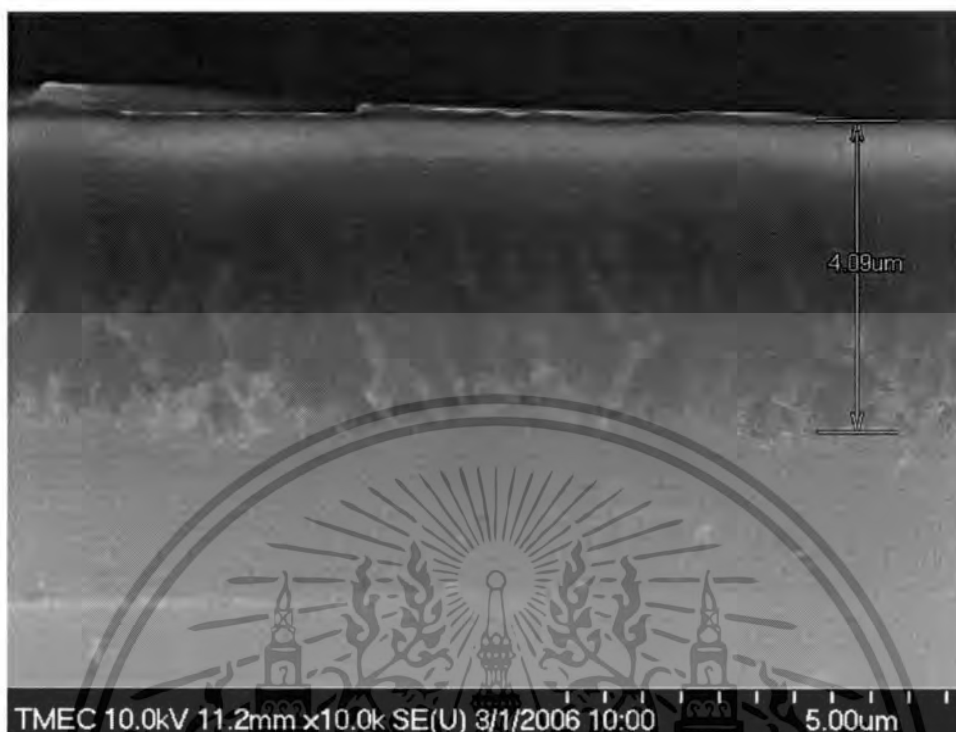
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์หรือสื่ออื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $5 \text{ mA/cm}^2$



รูปที่ 5.22 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$   
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในสื่อมวลชน  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 ภาพตัดขวางของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $20 \text{ mA/cm}^2$

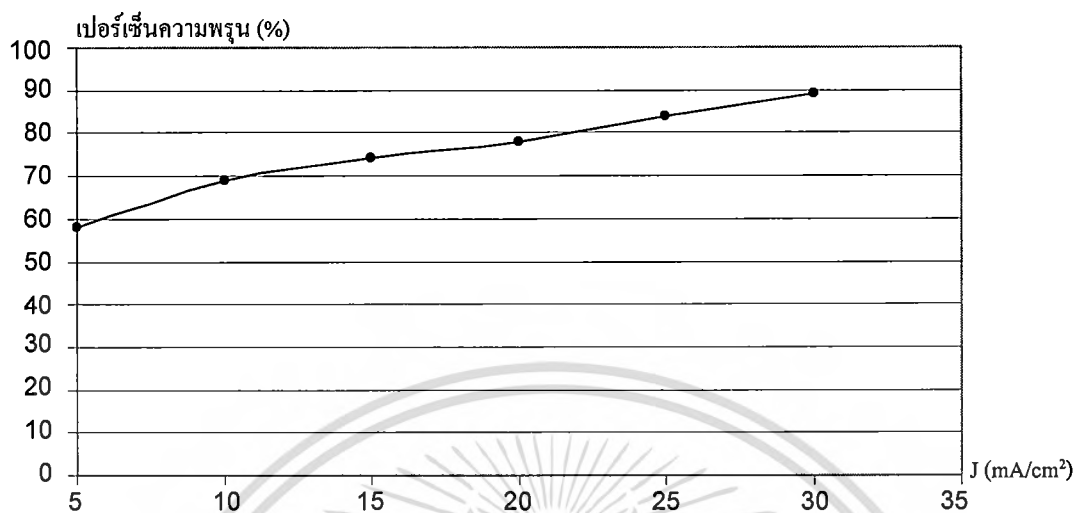
จากรูปที่ 5.17-5.20 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิงค์ด้วยวิธีการเอโนไคเซชันจะมีผลทำให้พื้นผิวของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ถูกกัดและทำให้รูพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิงค์มีขนาดใหญ่ขึ้น และจากรูปที่ 5.21-5.23 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิงค์ด้วยวิธีการเอโนไคเซชันจะมีผลทำให้ความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนไคเซชันมากขึ้น ทำให้พาหะโฮลในซิงค์ขณะทำการกัดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้รูพรุนของนาโนพอร์สซิงค์มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเอโนไคเซชันใช้เวลาเท่ากัน

### 5.3.2 การศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นนาโนพอร์สซิงค์

ทำการศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นนาโนพอร์สซิงค์ที่สร้างโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$  และ  $20 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ โดยอ้างอิงความพรุน [49] และความหนา จากรูปที่ 5.17 ถึง 5.23 และคำนวณหาความพรุนจากสมการเปอร์เซ็นต์ความ

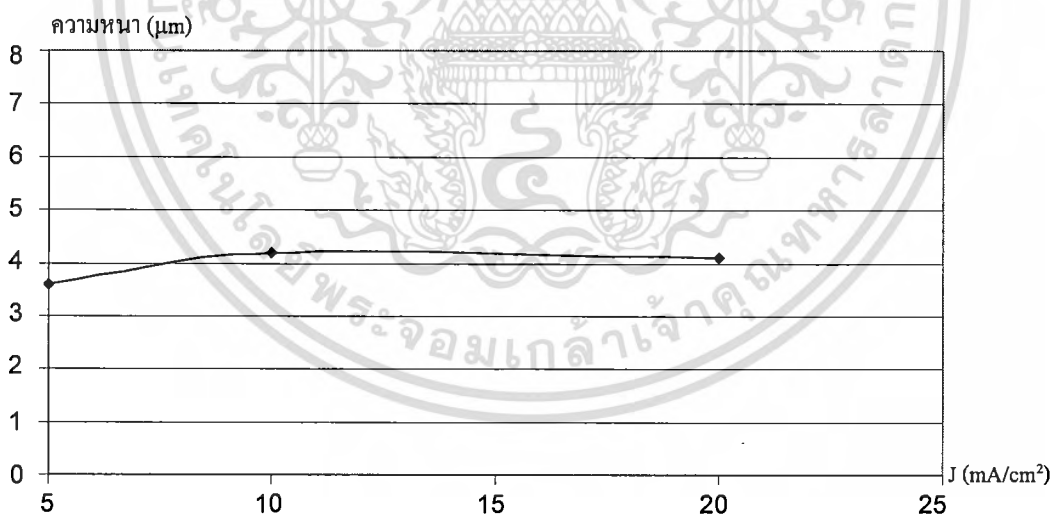
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พรมโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดพรม (ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 4.2.1) แสดงดังรูปที่ 5.24-5.25



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนกับความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้า

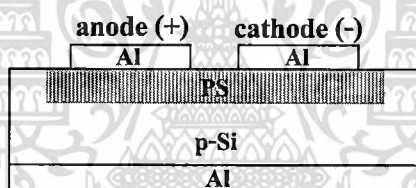
ในการแอโนไดซ์เซชัน

จากรูปที่ 5.24-5.25 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น แต่ความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนแต่ไม่มีผลกับความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

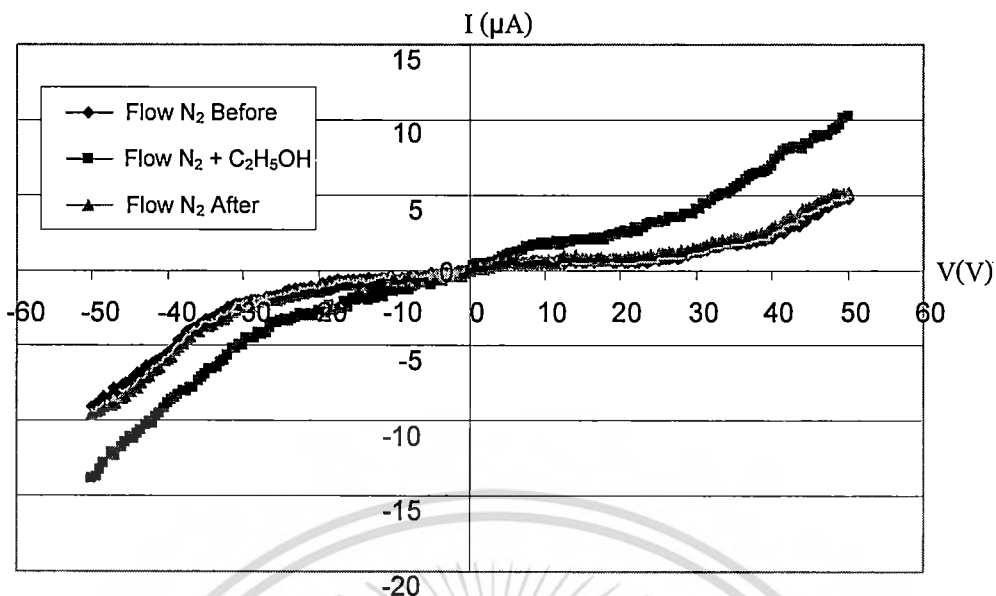
#### 5.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนในอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

การทดลองนี้ศึกษาถึง การตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี (ด้วยชุดเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.2.3) ของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  แล้วทำการต่อขั้วเพื่อใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 5.26

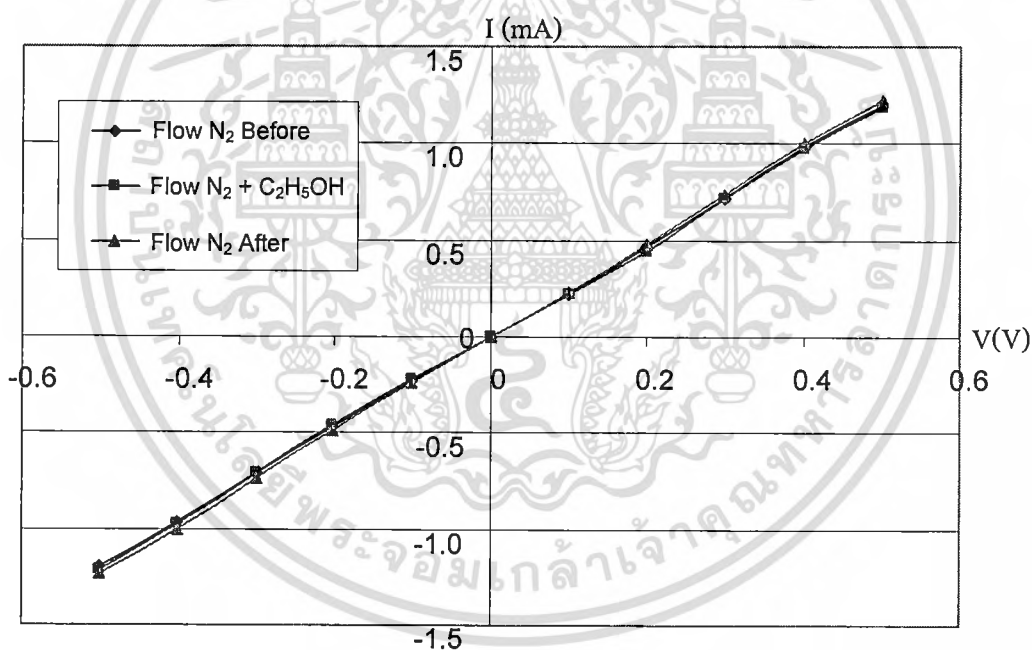


รูปที่ 5.26 ภาพการต่อขั้วที่ใช้ในการวัดของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

ทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในการเปิดก๊าซไนโตรเจนเวลา 30 วินาที แล้วเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 30 วินาที และเปิดก๊าซไนโตรเจน 30 วินาที ของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล  $1 \text{ l/min}$  โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แสดงดังรูปที่ 5.27 เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.27 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน



รูปที่ 5.28 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

จากรูปที่ 5.27 พบว่าลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปิดให้มีการไหลของไอระเหยของสารเคมี แต่จากรูปที่ 5.28 พบว่า ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เมื่อเปิดให้มีการไหลของไอระเหยของสารเคมี จากผลการทดลองนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงลักษณะ

สมบัติกระแสไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี โดยพิจารณาช่วงในการตรวจจับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.29 ซึ่งสามารถอธิบายช่วงในการตรวจจับต่างๆ ได้ดังนี้

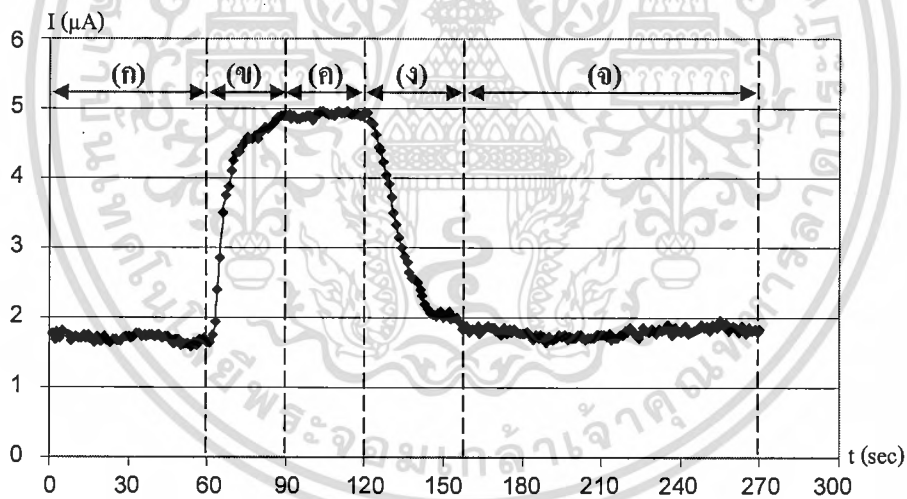
- กระแสไฟฟ้าช่วงก่อนเปิดไอระเหยของสารเคมี เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซไนโตรเจนเข้ามาในระบบ

- กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอระเหยของสารเคมี เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมี แล้วเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

- กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิ่มตัว เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมี แล้วเกิดการคงที่ของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

- กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอระเหยของสารเคมี เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่ทำการปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมีพร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนเพื่อให้ไอระเหยของสารเคมีออกจากระบบ แล้วเกิดการตกลงของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

- กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซไนโตรเจน แล้วเกิดการตกลงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมเหมือนในตอนแรก



รูปที่ 5.29 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

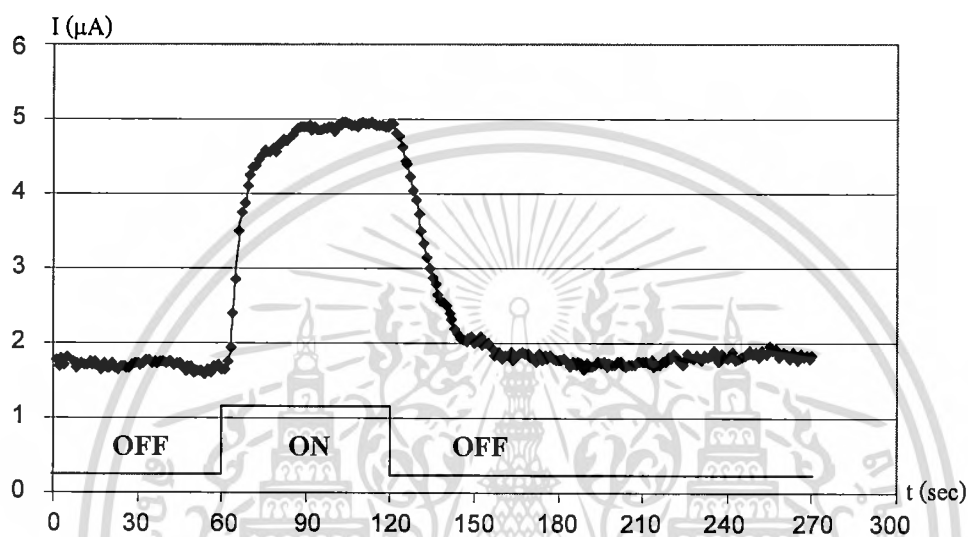
(ก) กระแสไฟฟ้าช่วงก่อนเปิดไอระเหยของสารเคมี (ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิดไอระเหยของสารเคมี

(ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิ่มตัว (ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิดไอระเหยของสารเคมี

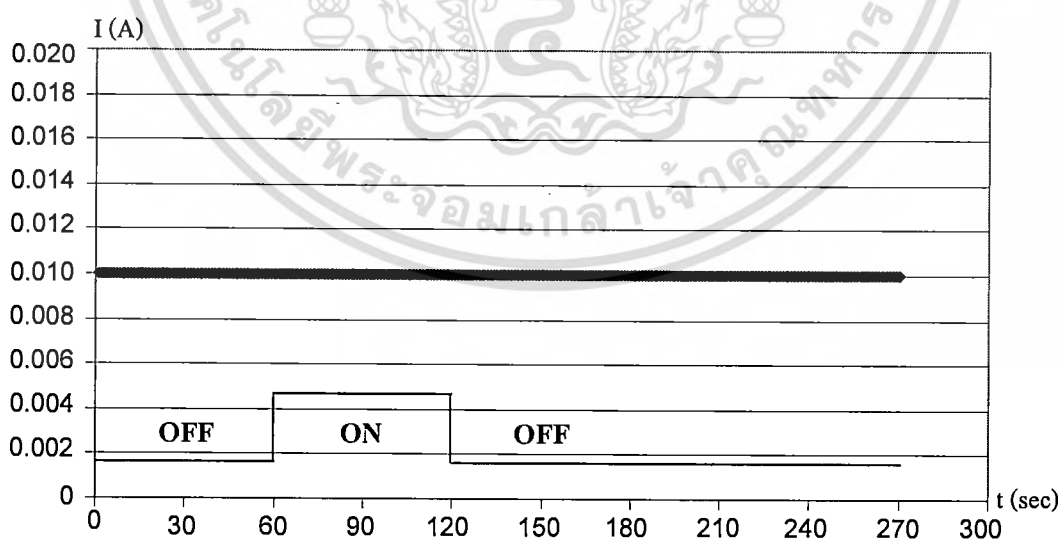
(จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดก๊าซไนโตรเจน 60 วินาที แล้วเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 60 วินาที และเปิดก๊าซไนโตรเจน 150 วินาที ของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 5.30-5.31



รูปที่ 5.30 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน



รูปที่ 5.31 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

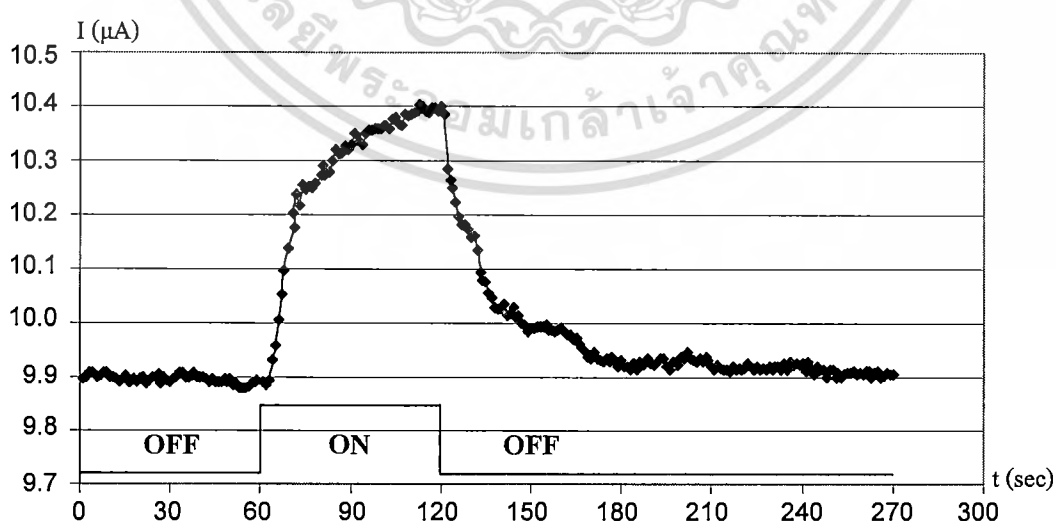
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.30 พบว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีการตอบสนองต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แต่จากรูปที่ 5.31 พบว่าอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนไม่มีการสนองต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ซึ่งแสดงว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนสามารถนำไปใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีได้ จึงได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 5.4.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

การทดลองนี้ศึกษาถึง ผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  ใช้เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ แล้วทำการต่อขั้วเพื่อทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดก๊าซไนโตรเจน 60 วินาที แล้วเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 60 วินาที และเปิดก๊าซไนโตรเจน 150 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล  $1 \text{ l/min}$  โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ ดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่สร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  เวลา 5 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 53% ความหนาประมาณ  $2.12 \mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.32

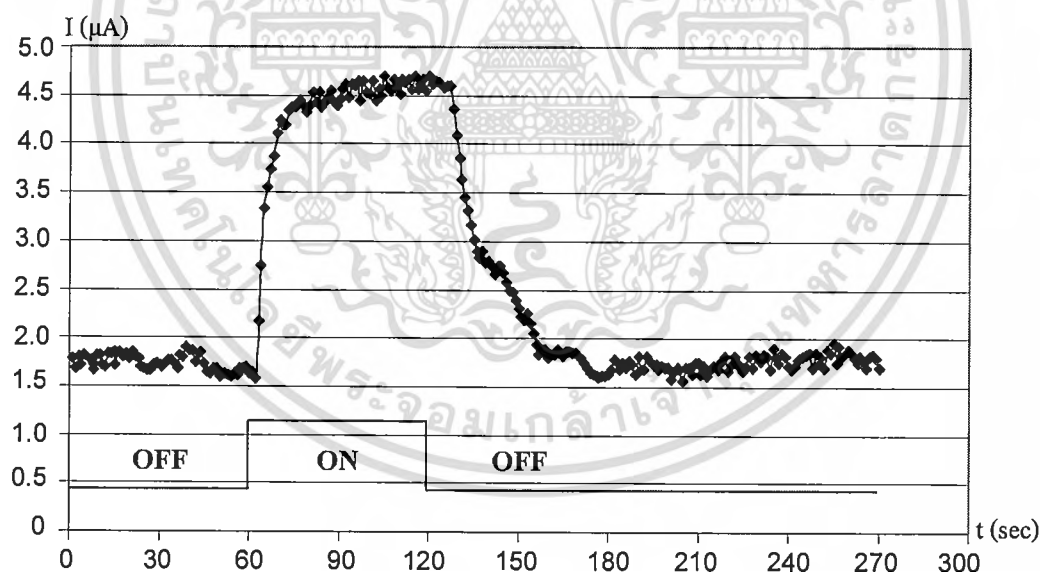


รูปที่ 5.32 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรคัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.32 พบว่าที่เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 5 นาที กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ  $9.9 \mu\text{A}$  เมื่อทำการวัดไอระเหยของสารเคมีขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมีที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนขึ้นไปอยู่ที่ประมาณ  $10.4 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 120 วินาที และทำการปิดไอระเหยของสารเคมีพร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ  $9.9 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 210 วินาที ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ  $0.5 \mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอ้อมตัวนานกว่า 60 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมี กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 90 วินาที

- อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่สร้างขึ้นนาโนพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  เวลา 10 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 69% ความหนาประมาณ  $4.19 \mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.33

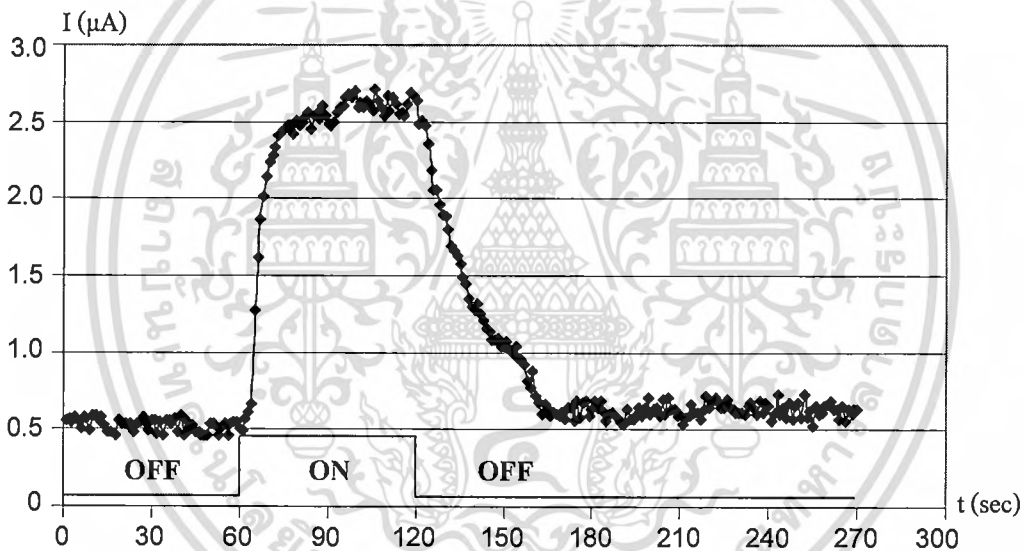


รูปที่ 5.33 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับ ไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 10 นาที

จากรูปที่ 5.33 พบว่าที่เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 10 นาที กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ  $1.7 \mu\text{A}$  เมื่อทำการวัดไอระเหยของสารเคมีขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมีที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนอิมิตัวอยู่ที่ประมาณ  $4.7 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอระเหยของสารเคมีพร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ  $1.7 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 160 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ  $3 \mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมิตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมี กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

- อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่สร้างขึ้นนาโนพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  เวลา 15 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 78% ความหนาประมาณ  $5.22 \mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.34



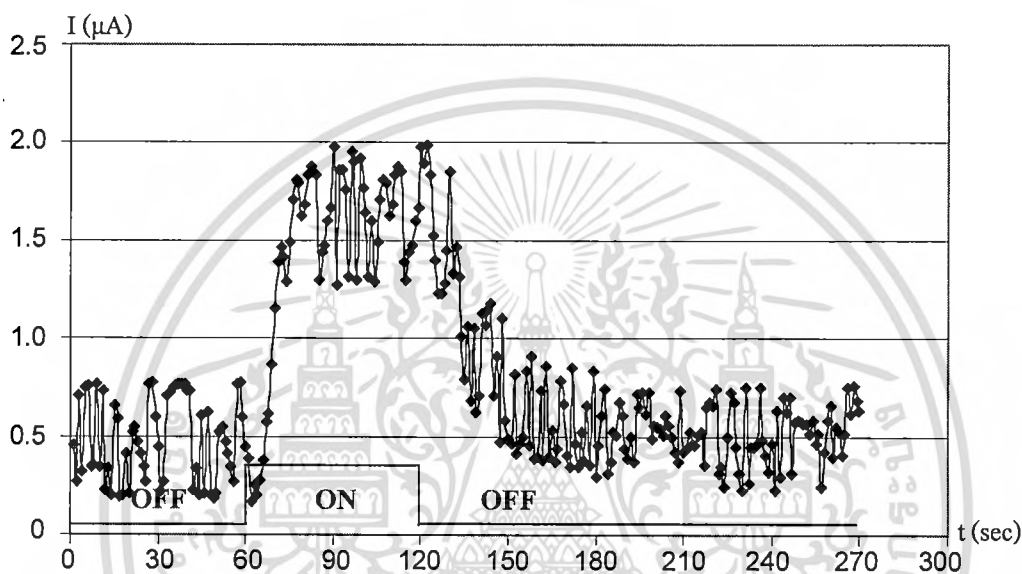
รูปที่ 5.34 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 15 นาที

จากรูปที่ 5.34 พบว่าที่เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 15 นาที กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ  $0.5 \mu\text{A}$  เมื่อทำการวัดไอระเหยของสารเคมีขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมีที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิมิตัวอยู่ที่ประมาณ  $2.6 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอระเหยของสารเคมีพร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ  $0.5 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 160 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ  $2.1 \mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมี กระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

- อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่สร้างขึ้นนาโนพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> เวลา 20 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 81% ความหนาประมาณ 6.74  $\mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.35

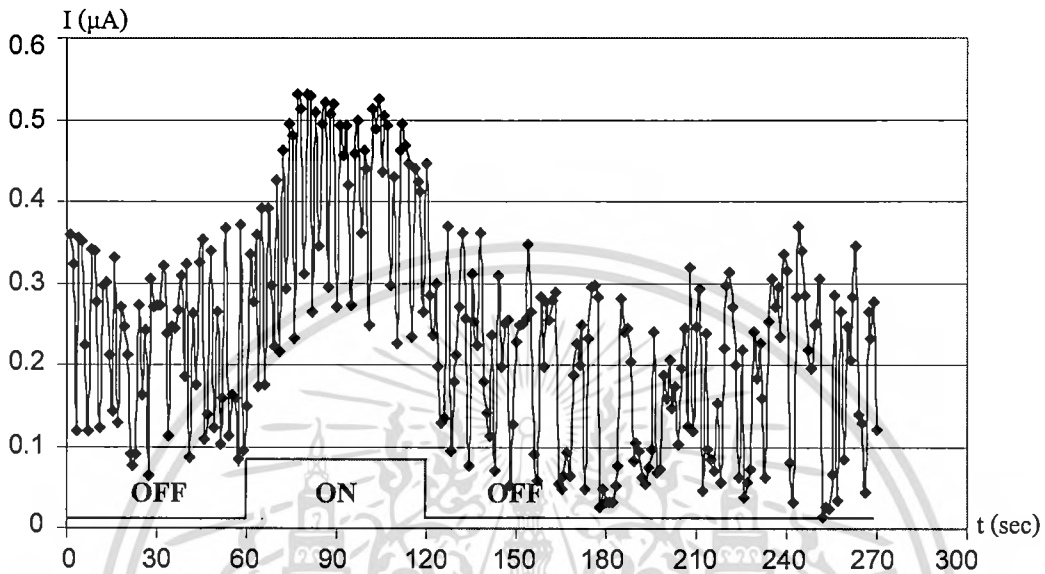


รูปที่ 5.35 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที

จากรูปที่ 5.35 พบว่าที่เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมาก และมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าประมาณ 81 % ความหนาประมาณ 6.74  $\mu\text{m}$  ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที มีค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

- อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่สร้างขึ้นนาโนพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> เวลา 25 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 84%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.36

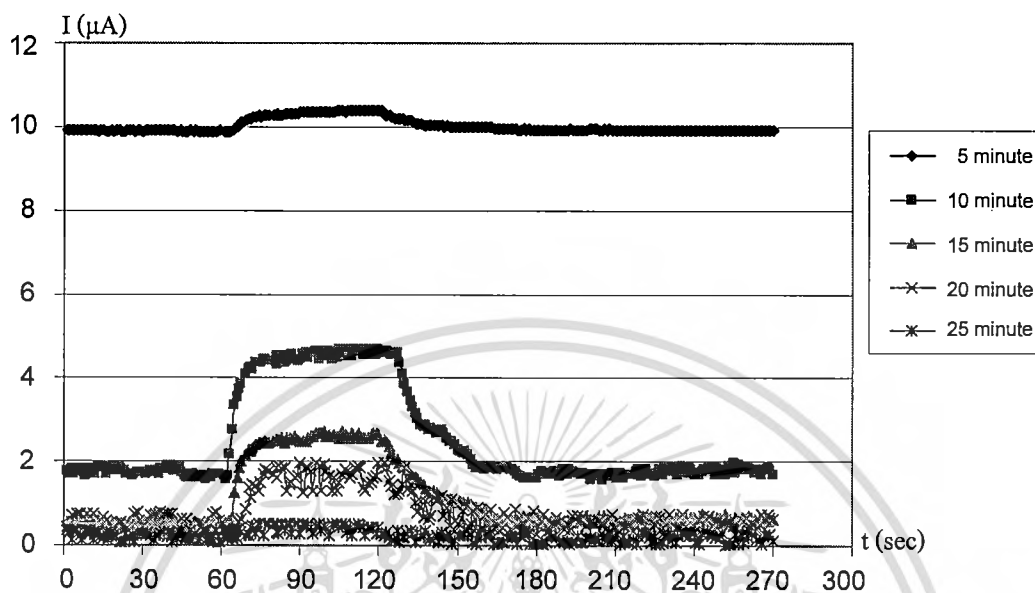
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้เวลาในการแอนโอดีเซชัน 25 นาที

จากรูปที่ 5.36 พบว่าที่เวลาในการแอนโอดีเซชัน 25 นาที กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมาก และมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าประมาณ 84 % ส่งผลทำให้ความต้านทานของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ใช้เวลาในการแอนโอดีเซชัน 25 นาที มีค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

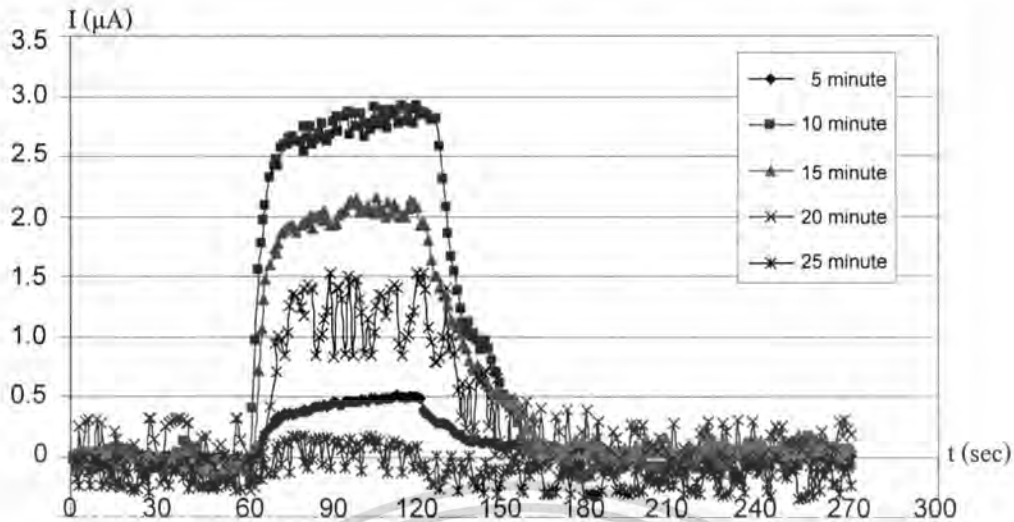
จากรูปที่ 5.32 – 5.36 จึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้นาโนพอร์สซิลิคอนที่ใช้เวลาในการแอนโอดีเซชัน 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ ในกราฟเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.37 พบว่า อุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 5 นาที จะมีกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่าสูงที่สุด ตามด้วยที่เวลา 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันมากขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ค่าความต้านทานของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าลดลงตามลำดับ

ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้นาโนพอร์สซิลิคอนที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ ที่ระดับกระแสไฟฟ้าตอนเริ่มต้นเป็น 0  $\mu\text{A}$  เพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน

จากรูปที่ 5.38 พบว่า อุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที มีค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีประมาณ  $3 \mu\text{A}$  ซึ่งมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 15 นาที, 20 นาที, 5 นาที และ 25 นาทีตามลำดับ โดยจากข้อมูลข้างต้นอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นประมาณ  $3 \mu\text{A}$  ใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งใช้น้อยกว่าอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 69% ความหนาประมาณ  $4.19 \mu\text{m}$ ) เป็นเวลาที่เหมาะสมในการแอโนไดซ์เซชัน

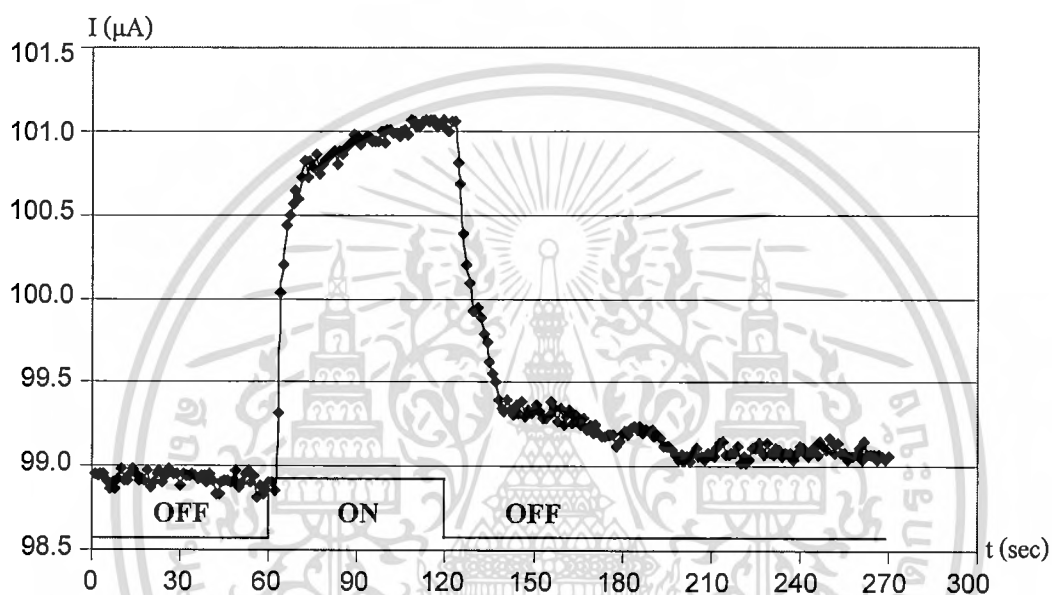
#### 5.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

การทดลองนี้ศึกษาถึง ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ แล้วทำการต่อขั้วเพื่อทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดก๊าซไนโตรเจน 60 วินาที แล้วเปิดก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมกับไอเอทานอล 60 วินาที และเปิดก๊าซไนโตรเจน 150 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ ดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่สร้างขึ้นนาโนพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup> (ความพรุนประมาณ 58% ความหนาประมาณ 3.59 μm) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.39

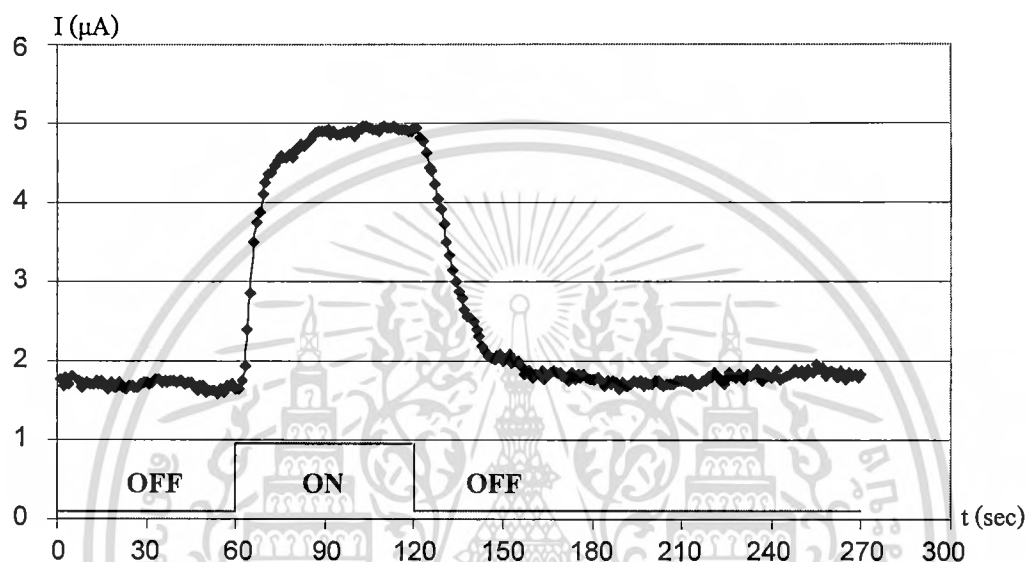


รูปที่ 5.39 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm<sup>2</sup>

จากรูปที่ 5.39 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm<sup>2</sup> กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ 98.8 μA เมื่อทำการวัดไอระเหยของสารเคมีขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมีที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนขึ้นไปอยู่ที่ประมาณ 101.1 μA ที่เวลาประมาณ 120 วินาที และทำการปิดไอระเหยของสารเคมีพร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ 98.8 μA ที่เวลาประมาณ 200 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าค่าประมาณ 2.3 μA เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมิตัวนานกว่า 60 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 80 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

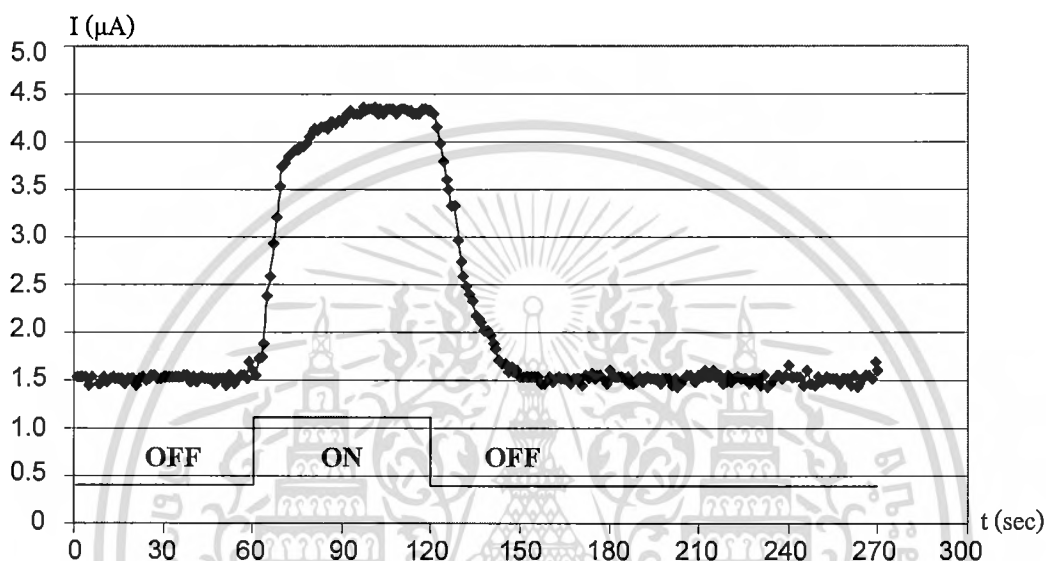
- อุปกรณ์ตรวจจับไอร่หะเหยของสารเคมี ที่สร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> (ความพรุนประมาณ 69% ความหนาประมาณ 4.19 μm) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอร่หะเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอร่หะเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอร่หะเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm<sup>2</sup>

จากรูปที่ 5.40 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 10 mA/cm<sup>2</sup> กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซในโตรเจนอยู่ที่ประมาณ 1.8 μA เมื่อทำการวัดไอร่หะเหยของสารเคมีขณะเปิดก๊าซในโตรเจนผสมกับไอร่หะเหยของสารเคมีที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ 4.9 μA ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอร่หะเหยของสารเคมีพร้อมกับเปิดก๊าซในโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ 1.8 μA ที่เวลาประมาณ 160 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 3.1 μA เมื่อมีการตรวจจับไอร่หะเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอร่หะเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

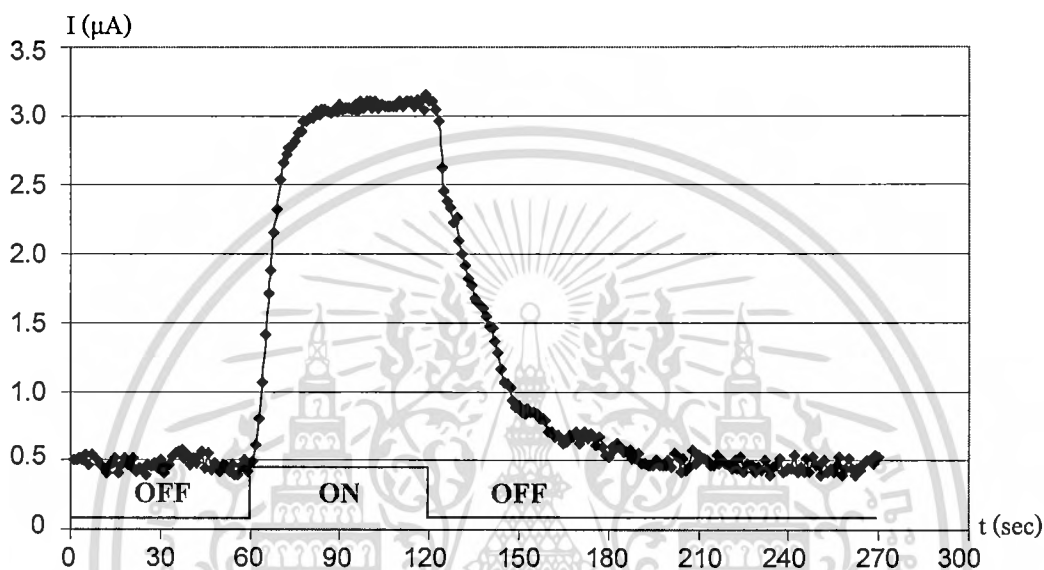
- อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่สร้างขึ้นนาโนพอร์สซิลิกอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $15 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 74%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.41



รูปที่ 5.41 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $15 \text{ mA/cm}^2$

จากรูปที่ 5.41 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $15 \text{ mA/cm}^2$  กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ  $1.5 \mu\text{A}$  เมื่อทำการวัดไอระเหยของสารเคมีขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมีที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ  $4.3 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอระเหยของสารเคมีพร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ  $1.5 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 160 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ  $2.8 \mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

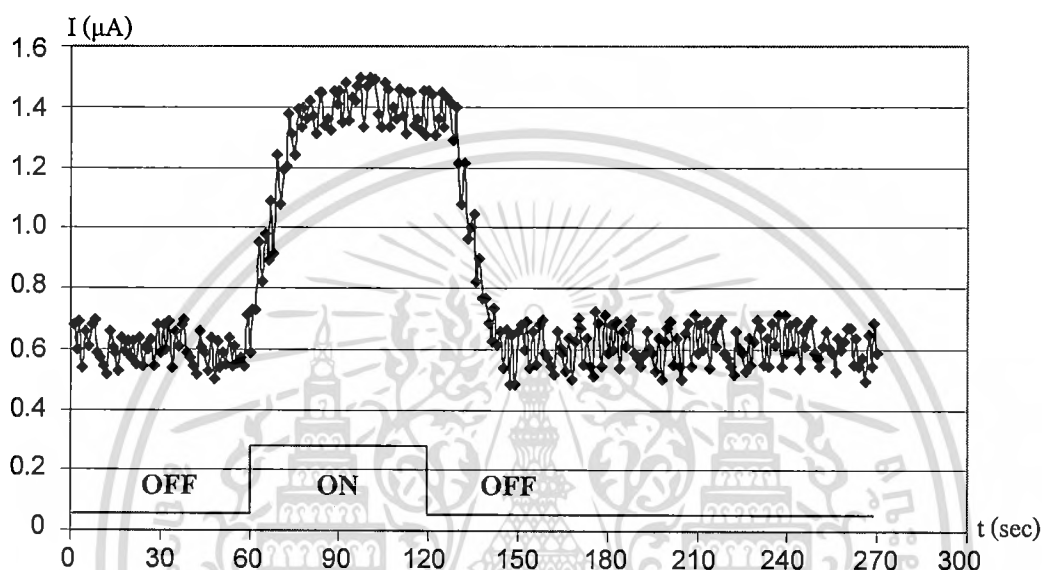
- อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่สร้างขึ้นนาโนพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $20 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 78% ความหนาประมาณ  $4.09 \mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.42 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $20 \text{ mA/cm}^2$

จากรูปที่ 5.42 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $20 \text{ mA/cm}^2$  กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นขณะทำการเปิดก๊าซไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณ  $0.5 \mu\text{A}$  เมื่อทำการวัดไอระเหยของสารเคมีขณะเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอระเหยของสารเคมีที่เวลาประมาณ 60 วินาที กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนอิ่มตัวอยู่ที่ประมาณ  $3.1 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 90 วินาที และทำการปิดไอระเหยของสารเคมีพร้อมกับเปิดก๊าซไนโตรเจนที่เวลาประมาณ 120 วินาที กระแสไฟฟ้าจะตกลงเรื่อยๆ จนตกลงมาที่จุดเดิมตอนเริ่มต้นประมาณ  $0.5 \mu\text{A}$  ที่เวลาประมาณ 180 วินาที ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ  $2.6 \mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 60 วินาที

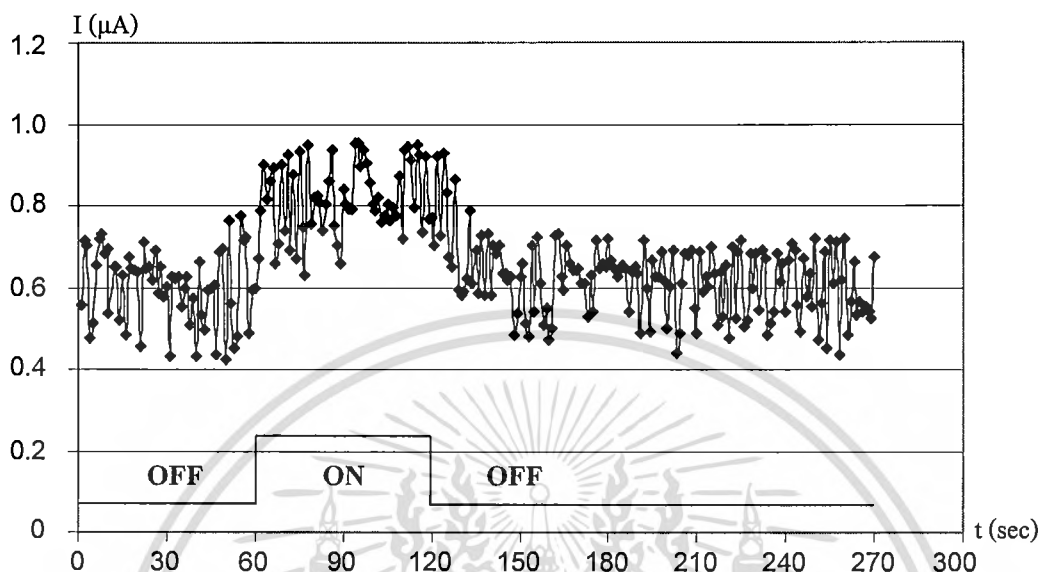
- อุปกรณ์ตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมี ที่สร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $25 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 84%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอรยะเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.43



รูปที่ 5.43 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอรยะเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $25 \text{ mA/cm}^2$

จากรูปที่ 5.43 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $25 \text{ mA/cm}^2$  กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมี แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมากและมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าประมาณ 84 % ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $25 \text{ mA/cm}^2$  มีค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมี

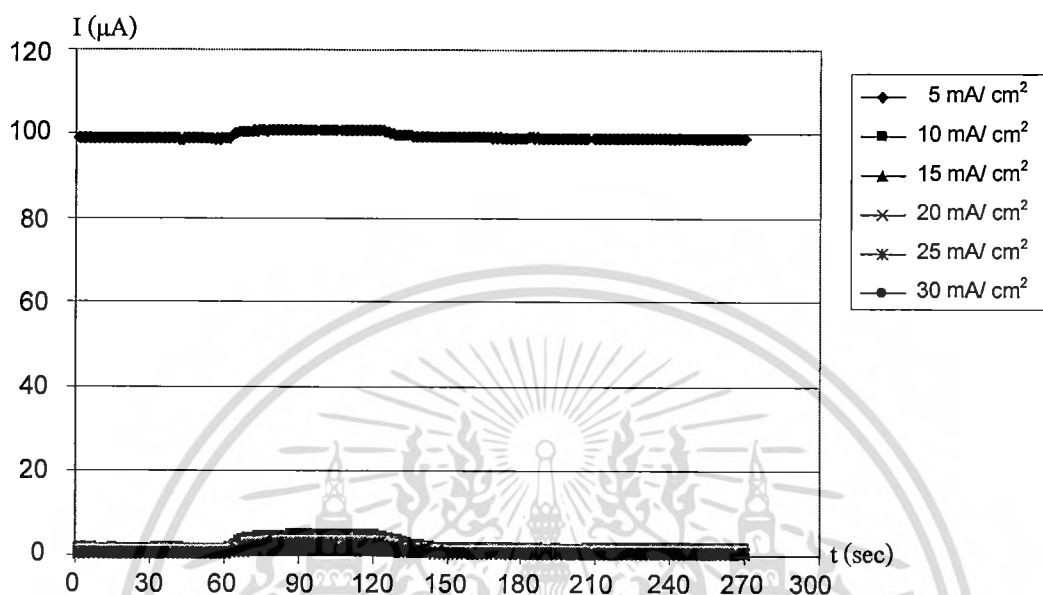
- อุปกรณ์ตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมี ที่สร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $30 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 89%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอรยะเหยของสารเคมี แสดงดังรูปที่ 5.44



**รูปที่ 5.44** ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $30 \text{ mA/cm}^2$

จากรูปที่ 5.44 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $30 \text{ mA/cm}^2$  กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำมากและมีค่าไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าประมาณ 89 % ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $25 \text{ mA/cm}^2$  มีค่าสูงมาก จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

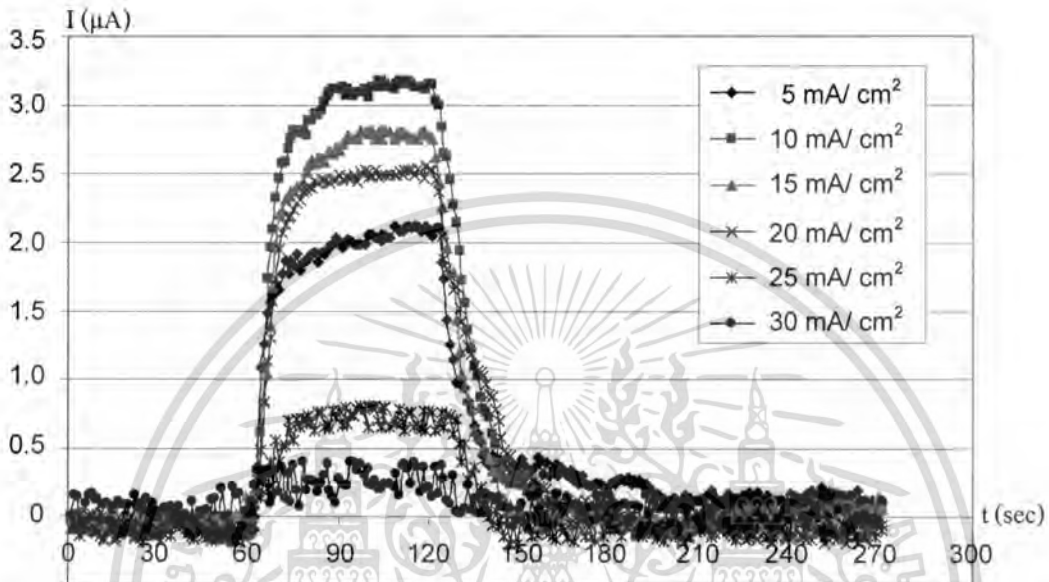
จากรูปที่ 5.39 – 5.44 จึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้นาโนพอร์สซิลิคอนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ ในกราฟเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.45 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.45 พบว่า อุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm<sup>2</sup> มีกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่าสูงที่สุด ตามด้วยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup>, 15 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup>, 25 mA/cm<sup>2</sup> และ 30 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อใช้เวลานานในการแอโนไดซ์เซชันเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ให้ค่าความต้านทานของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าลดลงตามลำดับ

ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้นาโนพอร์สซิลิคอนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup>, 10 mA/cm<sup>2</sup>, 15 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup>, 25 mA/cm<sup>2</sup> และ 30 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ที่ระดับกระแสไฟฟ้าตอนเริ่มต้นเป็น 0 μA เพื่อทำการเปรียบเทียบดูปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.46 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน

จากรูปที่ 5.46 พบว่า อุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $10 \text{ mA/cm}^2$  มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีประมาณ  $3.1 \mu\text{A}$  ซึ่งมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ โดยจากข้อมูลข้างต้นอุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $10 \text{ mA/cm}^2$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นประมาณ  $3.1 \mu\text{A}$  ใช้เวลาในการอิมิตัวประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $10 \text{ mA/cm}^2$  (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 69% ความหนาแน่นประมาณ  $4.19 \mu\text{m}$ ) เป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการแอโนไดซ์เซชัน

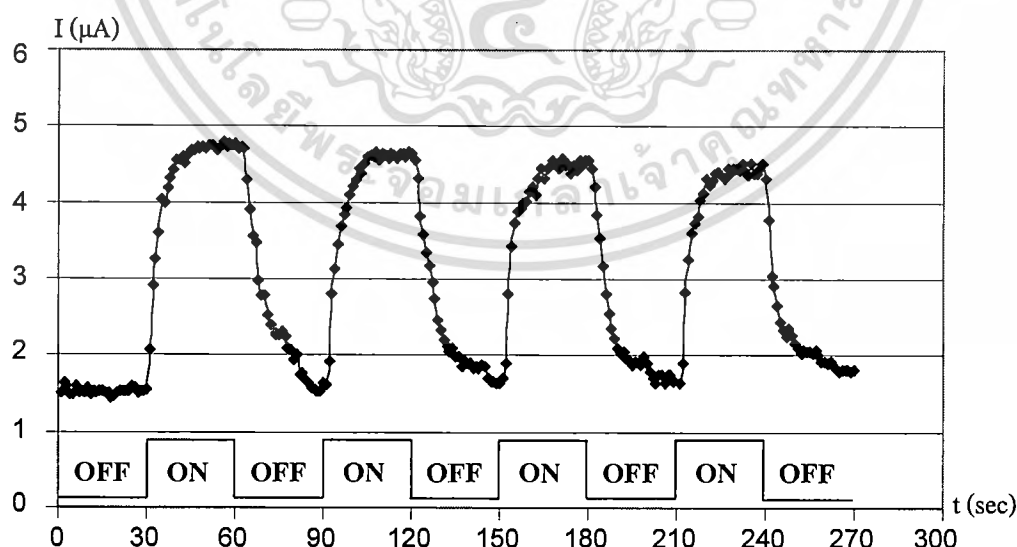
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.5 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน

การทดลองนี้ศึกษาถึง ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมีในลักษณะต่างๆ กันของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนที่สร้างด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  ดังหัวข้อต่อไปนี้

### 5.5.1 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมีต่อการตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมีแบบต่อเนื่อง

การทดลองนี้ศึกษาถึง การตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมีแบบต่อเนื่องของอุปกรณ์ตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันที่ อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  แล้วทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดก๊าซไนโตรเจน 30 วินาที ต่อมาเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 30 วินาที แล้วเปิดก๊าซไนโตรเจน 30 วินาที และเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 30 วินาที ต่อไปเรื่อยๆ 4 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล  $1 \text{ l/min}$  โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 5.47



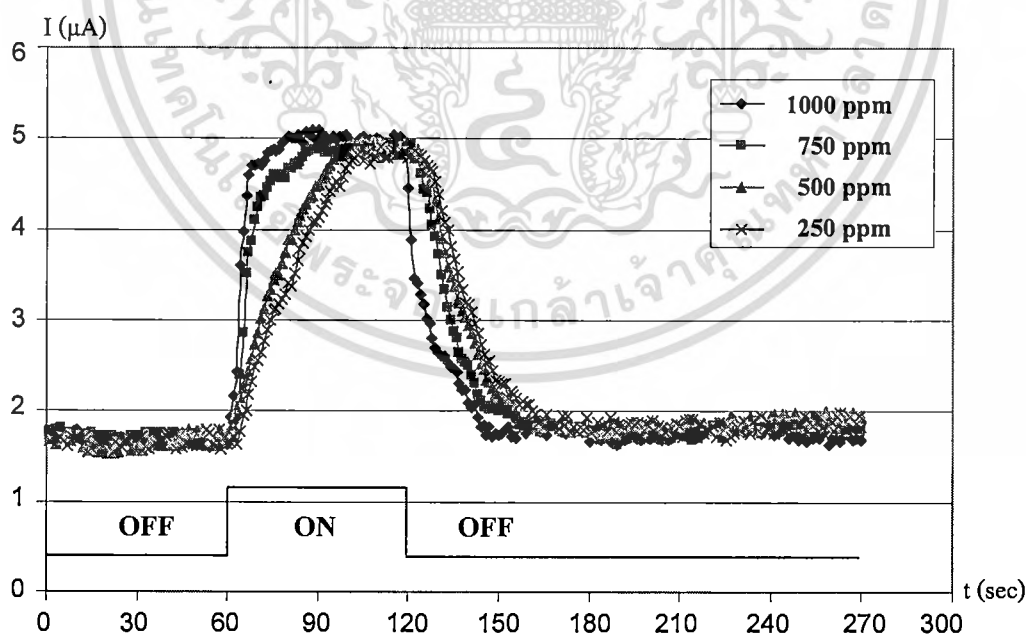
รูปที่ 5.47 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอรยะเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอรยะเหยของสารเคมีที่ทำการวัดแบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.47 พบว่า เมื่อทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีแบบต่อเนื่อง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงการตรวจจับจะมีค่าที่สอดคล้องกัน ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้เซ็นนาโนพอร์สซิลิคอนสามารถทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีแบบต่อเนื่องได้

### 5.5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

การทดลองนี้ศึกษาถึง ผลของความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี (part per million : ppm) ต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้เซ็นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอนโดซ์เซชันที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  วัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดก๊าซไนโตรเจน 60 วินาที แล้วเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอเอทานอล 60 วินาที และเปิดก๊าซไนโตรเจน 150 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เอทานอลบริสุทธิ์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีเปลี่ยนแปลงเป็น 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm และ 1000 ppm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.48



รูปที่ 5.48 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่มีความความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.48 พบว่า เมื่อทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีต่างๆ กัน จะได้ผลการทดลองดังนี้

- ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี 250 ppm ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 3.1  $\mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 45 วินาที และเมื่อทำการปิดไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 50 วินาที

- ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี 500 ppm ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมีค่าประมาณ 3.1  $\mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 40 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 45 วินาที

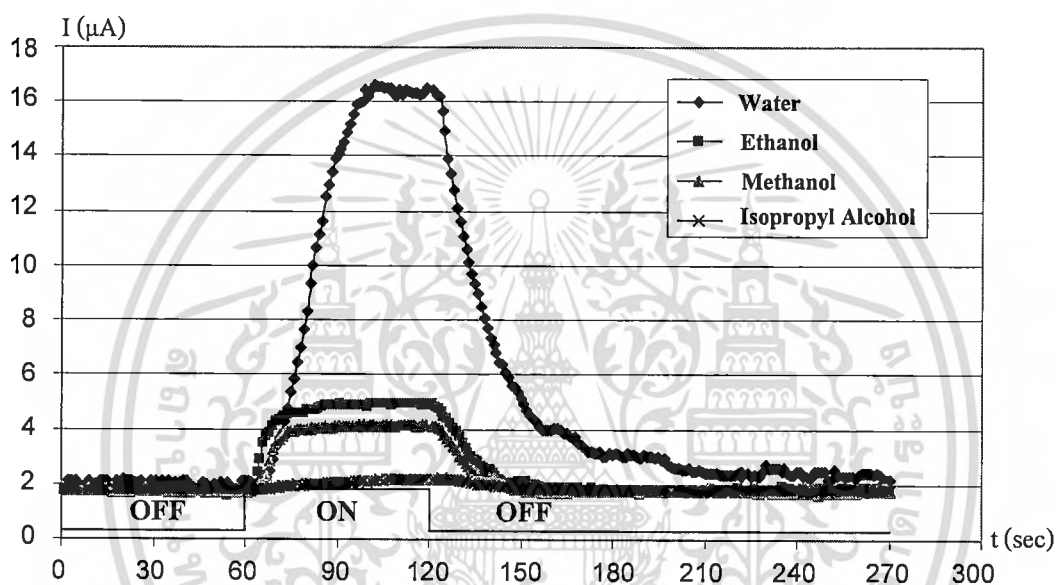
- ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี 750 ppm ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 3.1  $\mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

- ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี 1000 ppm ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 3.1  $\mu\text{A}$  เมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 20 วินาที และเมื่อมีการปิดไอระเหยของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 20 วินาที

พิจารณาจากข้อมูลทั้งหมดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีเพิ่มขึ้นจาก 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm, 1000 ppm จะส่งผลทำให้เวลาในการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าจนเกิดการอิมตัวในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีจะใช้เวลาประมาณ 45 วินาที, 40 วินาที, 30 วินาที และ 20 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เวลาสั้นลง และทำให้เวลาในการลดลงของกระแสไฟฟ้าจนกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมจะใช้เวลาประมาณ 50 วินาที, 45 วินาที, 40 วินาที และ 20 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เวลาสั้นลงเช่นกัน ส่วนปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนเกิดการอิมตัวจะมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 3.1  $\mu\text{A}$  ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้เซ็นเซอร์โพรงซีลิกอนสามารถทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมีต่างๆ กันได้

### 5.5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของไอสารเคมีต่างชนิดกันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

การทดลองนี้จะศึกษาถึง ผลของไอสารเคมีต่างชนิดกันต่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนำโนพอร์สซิลิโคนด้วยวิธีการแอนโดซ์เซชันที่ อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ โดยเปิดก๊าซไนโตรเจนผสมกับไอน้ำ, ไอเอทานอล, ไอเมทานอล และไอไอโซโพรพิลอะลกอฮอล์ของสารเคมี ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด ไอสารเคมีต่างชนิดกันของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

จากรูปที่ 5.51 พบว่า เมื่อทำการตรวจจับไอสารเคมีต่างชนิดกัน จะได้ผลการทดลอง ดังนี้

- ไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 14.3 μA เมื่อมีการตรวจจับไอน้ำกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 45 วินาที และเมื่อมีการปิดไอน้ำกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 110 วินาที
- ไอเอทานอล (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 3.1 μA เมื่อมีการตรวจจับไอเอทานอลกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที และเมื่อมีการปิดไอเอทานอลกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

- ไอเมทานอล (CH<sub>3</sub>OH) ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 2.4 μA เมื่อมีการตรวจจับไอเมทานอลกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิ่มตัวประมาณ 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อมีการปิดไอเมทานอลกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 30 วินาที

- ไอไอโซโพรพิลอะลกอฮอล์ของสารเคมี ((CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CHOH) ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 0.4  $\mu$ A เมื่อมีการตรวจจับไอไอโซโพรพิลอะลกอฮอล์ของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะใช้เวลาในการอิมตัวนานกว่า 60 วินาที และเมื่อมีการปิดไอไอโซโพรพิลอะลกอฮอล์ของสารเคมีกระแสไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ ใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที

เมื่ออุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้เซ็นเซอร์ชนิดคอนดักติวิตีคอนทำการตรวจจับไอสารเคมีต่างชนิดกัน ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงต่อการตรวจจับไอน้ำ มีค่ามากที่สุดรองลงมาคือไอเอทานอล ไอเมทานอล และไอไอโซโพรพิลอะลกอฮอล์ของสารเคมี ตามลำดับ โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงต่อการตรวจจับไอสารเคมีในแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้เซ็นเซอร์ชนิดคอนดักติวิตีคอนสามารถทำการตรวจจับไอสารเคมีต่างชนิดกันได้อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน การสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันเพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้าน การตรวจจับไอระเหยของสารเคมี โดยมีโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีแบบ ประกอบด้วย ฐานรองซิลิคอนชนิดพีที่สร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนอยู่บนผิวหน้า และมีขั้วโลหะที่เป็นอนุภาคนีเมียมอยู่บนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่าย เหมาะที่จะนำไปใช้สร้างเป็น วงจรรวมต่อไปในอนาคต

ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 3 แบบ โดยส่วนแรก คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ผสมกับ น้ำบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับเอทานอลที่อัตราส่วน 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตร ส่วนที่สอง คือ ระยะเวลาในการสร้าง 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ส่วนที่สาม คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup>, 10 mA/cm<sup>2</sup>, 15 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup>, 25 mA/cm<sup>2</sup> และ 30 mA/cm<sup>2</sup> จากนั้นนำชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ได้มาทดสอบความสม่ำเสมอ หาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน และความลึกของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน

จากการทดสอบความสม่ำเสมอ พบว่าชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากความเข้มข้นของ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับน้ำบริสุทธิ์มีความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำการสร้างชั้นนา โนพอร์สซิลิคอนที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับเอทานอล พบว่าชั้นนา โนพอร์สซิลิคอนที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากเอทานอลไปช่วยลดแรงดึงผิวของ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำให้ลดจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซที่ มีขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก สามารถเข้าถึงผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนได้ดี จึงได้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอ โดย อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลที่เหมาะสมเป็น 4:1 โดยปริมาตร ทำให้ได้ ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่มีความสม่ำเสมอและไม่ประปรายแตกหักง่าย

เมื่อทำการทดลองถึงผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์ เซชัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการแอโนไดซ์เซชันจะส่งผลทำให้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมี เปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น และมีความลึกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีเวลาในการทำปฏิกิริยามาก ขึ้น และทำการทดลองถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน จะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่ความลึกของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนยังคงมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันมากขึ้น ทำให้พหุสโตนบริเวณผิวขั้วลิกอนขณะทำการกัดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการแอโนไดซ์เซชันนั้นใช้เวลาเท่าเดิม แต่จากการทดลองข้างต้นยังไม่สามารถสรุปได้ว่า เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอนเท่าใด ถึงจะเหมาะสมที่จะนำมาตรวจจับไอระเหยของสารเคมี จึงได้ทำการทดลองหาค่าเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการตรวจจับไอแอลกอฮอล์

อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอนที่สร้างด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือ ระยะเวลาในการแอโนไดซ์เซชันเป็น 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ส่วนที่สองคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันเป็น  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  จากนั้นนำอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีมาทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอน

จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอนเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอน พบว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอนมีการตอบสนองต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แต่อุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอนไม่มีการตอบสนองต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แล้วทำการทดลองถึงผลของเวลาในการสร้างชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นประมาณ  $3 \mu\text{A}$  ใช้เวลาในการอิมตัวในการตรวจจับไอแอลกอฮอล์ประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการตกกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งเป็นเวลาในการแอโนไดซ์เซชันที่เหมาะสมที่สุด และทำการทดลองถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $10 \text{ mA/cm}^2$  มีปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นประมาณ  $3.1 \mu\text{A}$  ใช้เวลาในการอิมตัวประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการตกกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันที่เหมาะสมที่สุด

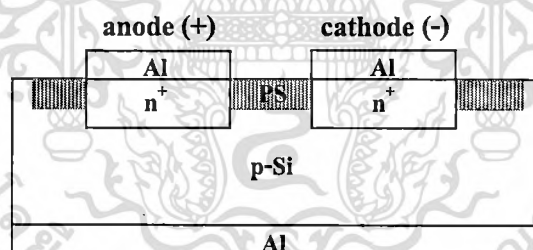
อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สขั้วลิกอนที่สร้างด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 69% ความลึกประมาณ  $4.19 \mu\text{m}$  ทำการศึกษาถึงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีแบบต่อเนื่อง และทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm และ 1000 ppm ตามลำดับ พร้อมทั้งทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้เข้าเป็นประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เปอร์เซ็นต์ระเหยของสารเคมีผสมกับน้ำเป็น 100%, 75%, 50%, 25% และน้ำ 100 % ตามลำดับ และทำการตรวจจับไอสารเคมีต่างชนิดกันโดยใช้ ไอน้ำ, ไอเอทานอล, ไอเมทานอล และ ไอไอโซโพรพิลระเหยของสารเคมี ในการทดสอบ

จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในตรวจจับไอระเหยของสารเคมีของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน พบว่าเมื่อทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีแบบต่อเนื่องปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงการตรวจจับจะมีค่าที่สอดคล้องกัน และอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนี้ สามารถทำการตรวจจับไอระเหยของสารเคมีที่ความเข้มข้นไอระเหยของสารเคมี และเปอร์เซ็นต์ระเหยของสารเคมีต่างๆ กันได้ รวมทั้งสามารถตรวจจับไอของสารเคมีต่างชนิดกันได้อีกด้วย

อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างแบบง่ายๆ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนเมื่อมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี แต่อุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนี้มีข้อเสียอยู่ที่มีขั้วไฟฟ้าอยู่บนชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนส่งผลทำให้รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าความต้านทานที่สูง ซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นอย่างมาก จึงควรสร้างให้ขั้วไฟฟ้าอยู่บนเนื้อซิลิคอนเพื่อช่วยลดค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสลง โดยใช้โครงสร้างที่มีชั้น  $n^+$  เพิ่มเข้ามาจากโครงสร้างเดิม แสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ปรับปรุงแล้ว

จากรูปที่ 6.1 เป็นอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนที่ทำการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อลดค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสลง โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าที่รอยสัมผัสระหว่าง  $n^+$  กับชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน เมื่อชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนมีการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับไอระเหยของสารเคมีโดยใช้ชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจจับไอสารเคมีได้หลายชนิด และนำไปใช้ร่วมกับวงจรรวมต่างๆ ในการตรวจจับความชื้นได้อีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Uhlir, "Electrochemical Etching of Silicon in HF Acid," Tech. J., Vol. 35, pp. 333, 1956.
- [2] L. Canham, "A glowing future for silicon," New Scientist, 1995.
- [3] K. Imai, "A new dielectric isolation method using porous silicon," Solid State Electronic, Vol. 24, pp. 155-164, 1980.
- [4] K. Imai and H. Unno, "FIPOS (Full Isolation by Porous silicon Oxidized Silicon) technology and It's application to LSI's," IEEE Transaction on electron devices, Vol. ED-31, No. 3, 1984.
- [5] สมเกียรติ ศุภเดช, สรวิศ มุ่งการณา, มนัสชัย ไชยนอก, มโน มีร์กษ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอน โดยการกัดข้อมสี่เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27, เล่ม 2, หน้า 237-240, 2547.
- [6] I. Schechter, M. Ben-Chorin and Kux, "Gas sensing properties of porous silicon," Anal. Chem. 67, pp. 3727-3732, 1995.
- [7] M. Gratzel, "TiO<sub>2</sub> Photocatalytic purification and treatment of water and air," Proc. First Intern. Conf., pp. 23, 1992.
- [8] Z.M. Rittersma, "Recent achievement in miniaturized humidity sensor," Sensors and Actuators , Vol. 96, pp. 196-210, 2002.
- [9] E. Comini, G. Fraglia, G. Sberveglieri, M.Z. Atashbar, W. Wlodarski, "Alcohol and Organic Vapours Sensor Based on Nano-sized TiO<sub>2</sub> Thin Film," IEEE, pp. 302-304, 1999.
- [10] A. Foucaran, F. Pascal-Delannoy, A . Sackda, P. Combette, A. Boyer, "Porous silicon layers used for gas sensor applications," Thin Solid Films Vol. 297, pp. 317-320, 1997.
- [11] K. Watanabe, T. Okada, I. Choe, Y. Sato, "Organic vapor sensitivity in a porous silicon device," Sensor and Actuators B 33, pp. 194-197, 1996.
- [12] W.M. Kwok, Y.C. Bow, W.Y. Chan, M.C. Poon, P.G. Han, H. Wong, "Study of porous silicon gas sensor," IEEE, pp. 80-83, 1999.
- [13] Seong-Jeen Kin, Sang-Hoon Lee, "Organic vapor sensing by current response of porous silicon layer," IOP Publishing Ltd., pp. 3505-3509, 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] M.B. Chohrin and A. Kurex, "Adsorbance effects on photoluminescence and electrical conductivity of porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, v-64, pp. 481-483, 1994.
- [15] A. Richter, "Design consideration and performance of adsorptive humidity sensor with capacitive readout," *The 7<sup>th</sup> Int. Conf. Solid-State Sensor and Actuators. Transducers'93*, Yokohama Japan, 1993.
- [16] Canham L. T., "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 57, 1046-8, 1990.
- [17] W. Lang, P. Steiner and H. Sandmaier, "Porous silicon : a novel material for microsystem," *Sensor and actuators*, A 21-23, 835-9, 1995.
- [18] Leigh canham, "Properties of porous silicon," *IEE Inspec*, pp.1-43, 1997.
- [19] C. Tsai, K.H. Li, J. Sarathy, J.C. Campbell, B.K. Hance and J.M. White, "Thermal treatment studies of the photoluminescence intensity of porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 59, pp. 2814-2816, 1992.
- [20] C. Tsai, K.H. Li, D.S. Kinósky, R.Z. Qian, T.C. Hus, J.T. Irby, S.K. Banerjee, A.F. Tasch and J.C. Campbell, "Correlation between silicon hydride specie and the photoluminescence intensity of porous silicon," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60, pp. 1700 - 1702, 1992.
- [21] Y. Kanemitsu, T. Matsumoto, T. Futagi and H. Mimura, "Hydrogen termination and optical properties of porous silicon : photochemical etching effect," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 32, Part 1, No. 1B, pp. 411-414, 1993.
- [22] H.F. Wolf, "Semiconductors willey-interscience a division of Jonhn & Sons," pp. 50, 1971.
- [23] H. Takagi, M. Mitome, R. Yano and T. Nakagiri, "Microwave plasma depositon," *Solid State Phys*, Vol. 27, pp. 875, 1992.
- [24] Y. Kanemitsu, T. Ogawa, K. Shiraishi and K. Takeda, "Nanocrystalline: Laser breakdown," *Phy. Rev.*, B48 , pp. 4883, 1993.
- [25] T. Kawaguchi and S. Miyazima, *Japan J.*, "Laser breakdown in pure SiH<sub>4</sub>," *Appl. Phys. Vol.* 32, pp. L215, 1993.
- [26] R.E. Hummel, A. Morrone, M. Ludwing and S.S. Chang, "High-frequency spark discharge" *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 63, pp. 2771, 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] H.M. Ludwig, E. E. Hummel and M. Stora, "Thin Solid Films," Vol. 255, pp. 103, 1995.
- [28] สรวิศ มุ่งการนา, สมเกียรติ สุภเดช และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเลือกสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดย้อมสี," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, เล่ม 2, หน้า 1109-1112, 2548.
- [29] Z. Gaburro, N. Dalosso and L. Pavesi, "Porous silicon," Dipartimento di Fisica, Università di Trento, Via Sommarive 14, I-38050.
- [30] วรวิทย์ พัฒนอานกุล, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, "ผลกระทบของการผสมเอทานอลในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีแอนโนไดเซชัน," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, เล่ม 2, หน้า 1101-1104, 2548.
- [31] Y. Kanemitsu, "Light emission from porous silicon and related materials," Physics reports, Vol. 263, No. 1, pp.8, 1995.
- [32] T.E. Jenkin, "Semiconductor science growth and characterization techniques," pp. 177.
- [33] Y. Kang and J. Jorne, "Porous silicon formation : Morphological Stability Analysis," Appl. Phys. Lett., Vol. 62, No. 8, pp. 2224 – 2226, 1993.
- [34] W. Lang, P. Steiner, H. Sandmaier, "Porous silicon:anovel for Microsystems," Sensor and Acturators A51, pp. 31-36, 1995.
- [35] V. Lehmann and U. Gosele, "Porous silicon formation : A Quantum wire effect," Appl. Phys. Lett., Vol. 58, No. 8, pp. 856 – 858, 1991.
- [36] J. Singh, "Semiconductor optoelectronics physic and technology", Mcgraw-hill international edition, pp. 339, 1992.
- [37] สมพงษ์ เจริญกิจ, "การพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์, " วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [38] สุรศักดิ์ ไวกทวงศ์สกุล, "โครงการรณรงค์เมาไม่ขับ," มุลนิธิเมาไม่ขับ, <http://www.ddd.or.th>, <http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/september/radio9-1.html>.
- [39] S. Lowell and Joan E. Shields, "Powder surface area and porosity," Third edition, pp. 1-9, 1991.

- [40] Roland N. Horne, Henry J. Ramey, Jr., Shubo Shang, Antonio Correa, John Horn brook, "Improving models of vapor-dominated geothermal fields:The effects of adsorption," New Zeland Geothermal Workshop, pp. 1-6, 1994.
- [41] Greg Thiele, "Characterization of ceramic materials : Por-size distribution," American Ceramic Society Bulletin, Vol. 84, No.8, 2005
- [42] Erica J. Wanless and Hugo K. Christenson, "Interaction between surfaces in ethanol : Adsorption, capillary condensation, and solvation forces," Chem. Phys. pp. 2460-4267,1994.
- [43] Markus Tuller, Dani Or, and Lynn M. Dudley, "Adsorption and capillary condensation in porous media : Liquid retention and interfacial configurations in angular pores," Water Resources Research, Vol. 35, No. 7, pp.1949-1964, 1999.
- [44] S.Z. Qiao, S.K. Bhatia, X.S. Zhao "Prediction of multilayer adsorption and capillary condensation phenomena in cylindrical mesopores," Elsevier Inc., pp. 287-298, 2003.
- [45] D. Stievenard and D. Deresm, "Electrical properties of an aluminum-porous silicon junction governed by dangling bonds," IEMN, UMR 9929, 1570-1572, 1995.
- [46] C. J. Oton, L. Pancheri, Z. Gaburro, L. Pavesi, C. Baratto, G. Fagliaand, G. Sberveglieri, "Multiparametric porous silicon gas sensors with improved quality and sensitivity"
- [47] Zeno Gaburro, Claudio J. Oton, and Lorenzo Pavesi, "Opposite effects of NO<sub>2</sub> on electrical injection in porous silicon gas sensors," Appl. Phys. Lett., Vol. 84, No. 22, 2004.
- [48] Yu. A. Vashpanov, "Adsorption sensitivity of microporous silicon to organic and biomolecules with high dipole moment," Plenary reports, vol. 1, p. 40-41, 2002.
- [49] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, "การศึกษาคูณสมบัติภูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์ซซิลิคอน, " วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.