

# รายงานผลงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

เซ็นเซอร์ตรวจนับเม็ดเลือดที่สร้างขึ้นจากเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาค

ด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมี

Blood Cell Counting Sensor Using MEMS Technology by

Electrochemical Etching Technique

จัดทำโดย

นายนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

เซ็นเซอร์ตรวจนับเม็ดเลือดที่สร้างขึ้นจากเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาค

ด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมี

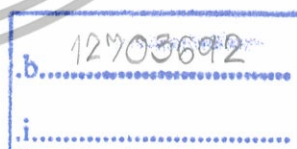
Blood Cell Counting Sensor Using MEMS Technology by

Electrochemical Etching Technique

จัดทำโดย

นายนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 138002  
ใบสมัครปี - 8 ก.ย. 2558



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการทำวิจัยเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2556

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย



นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง  
1 กุมภาพันธ์ 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

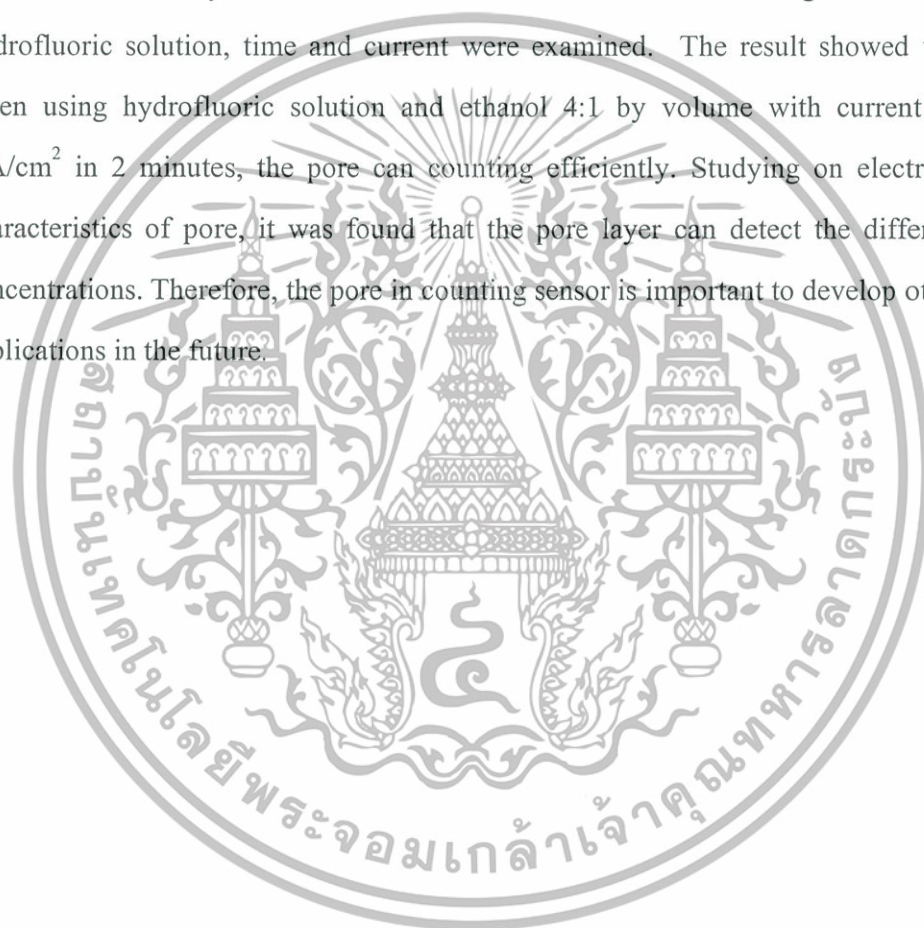
ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นรูพรุนในอุปกรณ์ตรวจนับ ที่มีจุดเด่นอยู่ที่ สามารถสร้างได้ง่าย สร้างบนเนื้อซิลิคอน ใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นรูพรุนกับชั้นออลูมิเนียม โดยทำการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันบนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น และทำการสร้างชั้นออลูมิเนียมบนชั้นรูพรุน ซึ่งชั้นรูพรุนจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจนับ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองศึกษาการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน โดยคำนึงถึงผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างชั้นรูพรุน แล้วทำการทดลองตรวจนับ พบว่าชั้นรูพรุนที่ใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจนับ จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจนับของชั้นรูพรุน พบว่าชั้นรูพรุนสามารถตรวจนับที่ความเข้มข้นต่างๆ กันได้ ซึ่งเหมาะที่จะนำมาพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจนับ ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

The purpose of this research is to present the fabrication process and electrical characteristics of pore in counting sensor. The advantage of this device are simple process compatible in silicon technology and usable in room temperature. The device consists of pore layer which is deposited by aluminum film. Pore is used as the counting sensing element. In this study, the pore was formed by anodization of silicon wafer in hydrofluoric solution and the effect of mixing ethanol in hydrofluoric solution, time and current were examined. The result showed that when using hydrofluoric solution and ethanol 4:1 by volume with current 10 mA/cm<sup>2</sup> in 2 minutes, the pore can counting efficiently. Studying on electrical characteristics of pore, it was found that the pore layer can detect the different concentrations. Therefore, the pore in counting sensor is important to develop other applications in the future.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 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.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 การกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	4
2.1 ทฤษฎีรูพรุนจากการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	4
2.1.1 โครงสร้างรูพรุนของซิลิคอน.....	4
2.1.2 การแบ่งประเภทรูพรุน.....	5
2.2 เทคนิคการสร้างรูพรุน.....	7
2.2.1 การสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมลิ (stain etching).....	7
2.2.2 การสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (anodization).....	9
2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	10
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	11
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริก.....	15
2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

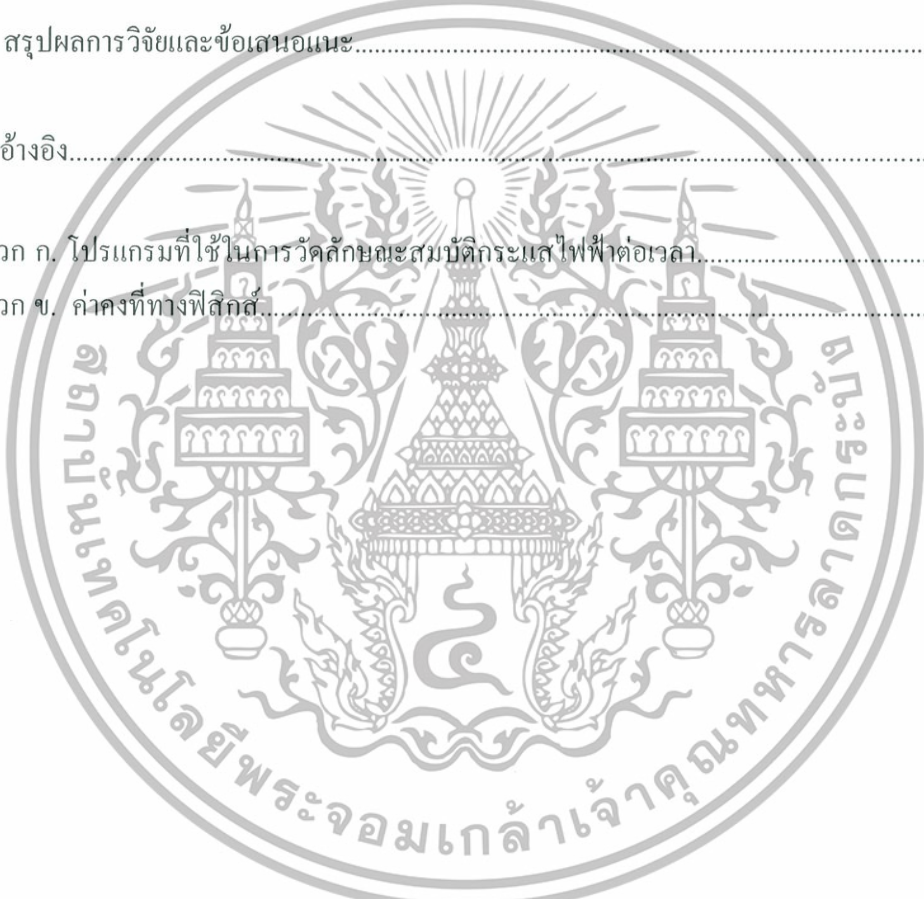
	หน้า
2.4 กลไกในการเกิดรุกรุน.....	18
2.5 ความพรุน.....	27
<b>บทที่ 3 หลักการตรวจนับเม็ดเลือด.....</b>	<b>29</b>
3.1 นิยามของเม็ดเลือด.....	29
3.2 หลักการวัดความต้านทานทางไฟฟ้า (Electrical impedance).....	32
<b>บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....</b>	<b>34</b>
4.1 กระบวนการสร้าง.....	34
4.1.1 การสร้างรุกรุนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	34
4.1.2 การสร้างอุปกรณ์ตรวจนับ.....	35
4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด.....	39
4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นรุกรุน.....	39
4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	39
<b>บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....</b>	<b>41</b>
5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในการสร้างชั้นรุกรุน.....	41
5.1.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์.....	41
5.1.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอล.....	43
5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสร้างชั้นรุกรุน.....	45
5.2.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นรุกรุนด้วยเครื่อง SEM.....	46
5.2.2 การศึกษาความพรุน และความลึกของรุกรุน.....	50
5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรุกรุน.....	52
5.3.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นรุกรุนด้วยเครื่อง SEM.....	53
5.3.2 การศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นรุกรุน.....	57
5.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นรุกรุนในอุปกรณ์ตรวจนับ.....	59
5.4.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอนโดไซเซชันต่ออุปกรณ์ตรวจนับ.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการ แอนโดสเซนชันต่ออุปกรณ์ตรวจจับ.....	65
5.5 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับโดยใช้ชั้นรูพรุน.....	71
5.5.1 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับต่อการตรวจจับแบบต่อเนื่อง.....	71
5.5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นต่ออุปกรณ์ตรวจจับ.....	72
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลา.....	79
ภาคผนวก ข. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการ ไปอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	13
ข.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างรูปพรุนของซิลิคอน	
(ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง.....	4
2.2 ภาพจำลองโครงสร้างรูปพรุนที่มีขนาดต่างๆ กัน.....	5
2.3 ภาพจำลองรูปพรุนลักษณะต่างๆ กัน	
(ก) ลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูปพรุน	
(ข) ลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกของรูปพรุน	
(ค) ลักษณะเป็นโพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน	
(ง) ลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกไปยังอีกด้าน.....	6
2.4 ภาพจำลองรูปพรุนรูปร่างต่างๆ	
(ก) รูปพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก	
(ข) รูปพรุนที่มีรูปร่างคล้ายช้อนน้ำหมัก	
(ค) รูปพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย	
(ง) รูปพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์	
(จ) รูปพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด.....	7
2.5 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกักแบบย้อมสี.....	7
2.6 ภาพพื้นผิวของชั้นรูปพรุนที่ได้จากการกักแบบย้อมสี.....	8
2.7 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอนโอดซ์เซชัน	
(ก) เซลล์เท็งก์เดี่ยวในแนวตั้ง	
(ข) เซลล์เท็งก์เดี่ยวในแนวนอน	
(ค) เซลล์เท็งก์คู่ในแนวนอน.....	9
2.8 ภาพพื้นผิวของชั้นรูปพรุนที่ได้จากกระบวนการแอนโอดซ์เซชัน.....	10
2.9 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง	
(ก) แบบแอนโอดิก (ข) แบบแคโทดิก.....	11
2.10 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอน	
(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	12
2.11 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอนโอดิก.....	14
2.12 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน	
(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	16
2.14 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอน.....	18
2.15 แบบจำลองการกักเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ	
(ก) ลักษณะการกักแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า	
(ข) ลักษณะการกักแบบทำให้เกิดรูพรุน.....	21
2.16 การเคลื่อนที่พาหะ โฮลที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า.....	21
2.17 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน.....	22
2.18 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	23
2.19 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	24
2.20 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน.....	24
2.21 กลไกในการหยุดกักโครงสร้างของชั้นรูพรุนชนิดพี โดยที่	
(ก) โครงสร้างของรูพรุน และทิศทางเคลื่อนที่ของพาหะ โฮล	
(ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะ โฮลจากผลึกซิลิคอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของรูพรุน	
(ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะ โฮล จากผลึกซิลิคอนผ่านไปยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน.....	25
2.22 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของรูพรุนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดอื่น โดยที่	
(ก) โครงสร้างของรูพรุนที่มีขนาดมากกว่า 2W	
(ข) โครงสร้างของรูพรุนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W.....	27
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของชั้นรูพรุน.....	28
2.24 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างรูพรุนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ กัน .....	28
3.1 แสดงรูปร่างและขนาดของเม็ดเลือดแดง.....	29
3.2 แสดงโครงสร้างและหลักการนับเซลล์เม็ดเลือดแบบ Electrical Impedance.....	32
4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แห้งกึ่งตัวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ภาพตัดขวางอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกักทางไฟฟ้าเคมี และภาพ โครงสร้างของช่องแคบเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นในแผ่นผลึกซิลิคอน.....	37
4.3 กระบวนการสร้างและภาพตัดขวางของผลึกซิลิคอนและรูช่องในเซ็นเซอร์ตรวจนับ.....	38
4.4 ภาพ โครงสร้างด้านบนในส่วนที่เป็นรูช่องว่างของเซ็นเซอร์ตรวจนับเม็ดเลือด.....	38
4.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	39
5.1 การสร้างชั้นรูพรุน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์เป็น 4:1 โดยปริมาตร.....	41
5.2 พื้นผิวของชั้นรูพรุนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ต่างๆ กัน.....	42
5.3 การสร้างชั้นรูพรุน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร.....	43
5.4 พื้นผิวของชั้นรูพรุนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลต่างๆ กัน.....	44
5.5 พื้นผิวของชั้นรูพรุนที่เวลาในการสร้างต่างๆ กัน.....	45
5.6 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที.....	46
5.7 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที.....	47
5.8 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที.....	47
5.9 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที.....	48
5.10 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที.....	48
5.11 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที.....	49
5.12 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที.....	49
5.13 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที.....	50
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นรูพรุนกับเวลาในการเอโนโดซ์เซชัน.....	51
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นรูพรุนกับเวลาในการเอโนโดซ์เซชัน.....	51
5.16 พื้นผิวของชั้นรูพรุนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน.....	52
5.17 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm <sup>2</sup> .....	54
5.18 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm <sup>2</sup> .....	54
5.19 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm <sup>2</sup> .....	55
5.20 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm <sup>2</sup> .....	55
5.21 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm <sup>2</sup> .....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.22 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm <sup>2</sup> .....	56
5.23 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm <sup>2</sup> .....	57
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นรูพรุนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน.....	58
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของชั้นรูพรุนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน.....	58
5.26 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจวัดของชั้นรูพรุน	
(ก) กระแสไฟฟ้าช่วงก่อนเปิด	(ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิด
(ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิมิตัว	(ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิด
(จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมามีค่าเริ่มต้นเดิม.....	59
5.27 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ที่มีชั้นรูพรุน.....	60
5.28 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นรูพรุน.....	60
5.29 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรงจันท์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 5 นาที.....	61
5.30 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรงจันท์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 10 นาที.....	62
5.31 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรงจันท์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 15 นาที.....	62
5.32 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรงจันท์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที.....	63
5.33 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรงจันท์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 25 นาที.....	64
5.34 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรงจันท์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน.....	64
5.35 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรงจันท์ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน.....	65
5.36 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรงจันท์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน 5 mA/cm <sup>2</sup> .....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.37 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนโดซ์เซชัน $10 \text{ mA/cm}^2$ .....	66
5.38 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนโดซ์เซชัน $15 \text{ mA/cm}^2$ .....	67
5.39 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนโดซ์เซชัน $20 \text{ mA/cm}^2$ .....	68
5.40 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนโดซ์เซชัน $25 \text{ mA/cm}^2$ .....	68
5.41 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนโดซ์เซชัน $30 \text{ mA/cm}^2$ .....	69
5.42 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนโดซ์เซชันต่างๆ กัน.....	70
5.43 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับที่ใช้ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าในการแอโนโดซ์เซชันต่างๆ กันที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน.....	71
5.44 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ทำการวัดแบบต่อเนื่อง.....	72
5.45 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	73
ก.1 ภาพหน้าจอของของโปรแกรมที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสต่อเวลา โดย (ก) ส่วนโปรแกรม LabVIEW (ข) ส่วนการตั้งค่าการทำงาน (ค) ส่วนบันทึกผล (ง) ส่วนตาราง (จ) ส่วนแสดงกราฟ.....	79
ก.2 ภาพส่วนโปรแกรม LabVIEW โดย (ก) สั่งให้โปรแกรมทำงานจนครบรอบ (ข) สั่งให้โปรแกรมที่เขียนขึ้นทำงานไปเรื่อยๆ (ค) สั่งให้โปรแกรมหยุดการทำงาน (ง) สั่งให้โปรแกรมหยุดการทำงานชั่วคราว.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.3 ภาพส่วนตั้งค่าการทำงานของโปรแกรม	
(ก) ปุ่มสั่งยืนยันการการป้อนค่าต่างๆ	(ข) ช่องกำหนดแรงดัน
(ค) ช่องแสดงค่าของกระแสที่วัดได้	(ง) ช่องกำหนดจำนวนจุดของการวัด
(จ) ช่องกำหนดเวลาห่างระหว่างแต่ละจุด	(ฉ) ช่องแสดงจุดขณะทำการวัด
(ช) ส่วนแสดงเวลาขณะทำการวัด.....	80
ก.4 ภาพส่วนบันทึกข้อมูล.....	81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีผู้ป่วยที่เป็นโรคเกิดจากความผิดปกติของเม็ดเลือดจำนวนมากขึ้น เช่น โรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มมะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิดเฉียบพลัน โรคที่เกิดจากความบกพร่องของไขกระดูก เช่น โรคไขกระดูกฝ่อ และยิ่งรวมไปถึงโรคทางพันธุกรรมที่เป็นความผิดปกติตั้งแต่กำเนิด เช่น โรคโลหิตจางธาลัสซีเมีย โรคที่เกิดจากการขาดเกล็ดเลือด เป็นต้น ผู้ป่วยที่เป็นโรคเหล่านี้ จำเป็นที่ต้องได้รับการตรวจวินิจฉัยหาความผิดปกติและได้รับการรักษาอย่างเหมาะสมตามความผิดปกติ เพื่อให้สามารถควบคุมโรคได้โดยในการวินิจฉัยโรคบางชนิดเหล่านี้ ส่วนมากจะมีการแสดงความผิดปกติออกมา ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเม็ดเลือดในผู้ป่วย ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์ได้โดยผ่านกระบวนการนับจำนวนเม็ดเลือดจากตัวอย่างเลือดของผู้ป่วยนั่นเอง หากจำนวนเซลล์ที่นับได้มีมากหรือน้อย หรือมีลักษณะที่ผิดปกติออกไปจะเป็นการบ่งชี้อาการของโรคต่างๆ ได้ ดังนั้นการตรวจนับเซลล์ในเลือดจึงเป็นวิธีการที่ใช้กันมากในทางการแพทย์ เพราะให้ข้อมูลกว้างๆ เกี่ยวกับสุขภาพของผู้ป่วยได้ ในบางแห่งมักจะทำการตรวจนับเม็ดเลือดเป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสุขภาพประจำปี

สำหรับการตรวจทางโลหิตวิทยาเพื่อวินิจฉัยโรคนั้น ห้องปฏิบัติการพยาธิวิทยาจะทำการตรวจนับเม็ดเลือดอย่างสมบูรณ์ (Complete Blood Count : CBC) โดยตรวจนับองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง การเรียงตัวของเม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว และเกร็ดเลือด วิธีการตรวจ CBC ที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่สองวิธีหลัก คือ การตรวจด้วยเครื่อง Automatic Blood Analyzer ซึ่งใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจนับจำนวนเซลล์และบ่งชี้ชนิดของเซลล์เม็ดเลือดที่เรียกว่า เทคนิค Flow Cytometry การตรวจด้วยเครื่องอัตโนมัติมีข้อดีคือรวดเร็ว ผิดพลาดน้อยใช้เป็นการ Screening เบื้องต้นได้ดีเหมาะกับโรงพยาบาลใหญ่หรือศูนย์การแพทย์ที่มีจำนวนคนไข้ที่ต้องตรวจจำนวนมาก แต่มีข้อเสียคือค่าใช้จ่ายสูงกว่าวิธีแบบดั้งเดิม ที่ตรวจโดยให้ผู้เชี่ยวชาญส่องแผ่นสไลด์เลือดด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพราะตัวเครื่องวิเคราะห์ทางโลหิตวิทยาแบบอัตโนมัติ และน้ำยาที่ต้องใช้ในการตรวจมีราคาแพง เฉพาะโรงพยาบาลขนาดใหญ่หรือห้องปฏิบัติการบางแห่งเท่านั้น ที่มีเครื่องตรวจแบบอัตโนมัติ ดังนั้นจึงต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญทางด้านโลหิตวิทยาที่มีประสบการณ์มาช่วยตรวจวิเคราะห์ เพื่อความแม่นยำ ซึ่งในประเทศไทยและหลายๆ ประเทศมีผู้เชี่ยวชาญทางด้านนี้จำนวนจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงพยาบาลทั่วไปในต่างจังหวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะศึกษา วิจัยและพัฒนา เซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดเลือดที่สร้างขึ้นจากเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมีโดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. พัฒนาด้านแบบเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดเลือดที่สร้างขึ้นจากเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมี เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาตัวตรวจจับจำนวนเม็ดเลือดในอนาคต
2. พัฒนาศักยภาพการวิจัยทางด้านกลไฟฟ้าจุลภาค
3. สร้างองค์ความรู้และทักษะ ในด้านการพัฒนาอุปกรณ์กลไฟฟ้าจุลภาคที่เป็นประโยชน์ และสามารถเผยแพร่ ถ่ายทอดให้แก่ นักศึกษา นักวิจัย ตลอดจนบุคคลที่สนใจ
4. ลดต้นทุนในกระบวนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดเลือด ด้วยการสร้างอุปกรณ์ขึ้นจากเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาคด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมี ที่มีพื้นฐานเดียวกันกับเทคโนโลยีจรรวม

## 1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

สมมุติฐานของงานวิจัยนี้ คือ ชีวรูพรุนที่สร้างด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี สามารถควบคุมความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในการสร้าง เพื่อให้ได้รูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ จากนั้นนำรูพรุนที่ได้มาศึกษาถึงสมบัติต่างๆ โดยใช้พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากเป็นบริเวณที่ใช้ในการผ่านของอนุภาคขนาดเล็ก เมื่ออนุภาคขนาดเล็กไหลผ่านรูพรุนก็จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้า และด้วยคุณสมบัตินี้เองจึงได้นำรูพรุนนี้มาสร้างเป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดเลือดโดยการใช้เทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาค

## 1.4 ทฤษฎีของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนากระบวนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดเลือด โดยการใช้เทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาค (MicroElectroMechanical Systems: MEMS) ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching) ของแผ่นสลิคซิลิคอนเพื่อสร้างเป็นรูหรือช่องแคบๆที่ให้มีเม็ดเลือดไหลผ่านได้ ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งหน่วยหรือตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดเลือด (Blood Cell Counting Sensor) โดยเทคโนโลยีดังกล่าวนี้มีพื้นฐานเดียวกันกับเทคโนโลยีของการผลิตวงจรรวม ที่สามารถสร้างชิ้นงานได้คราวละหลายๆพร้อมกันได้ มาใช้ในกระบวนการสร้าง ทำให้สามารถสร้างตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดเลือดที่มีขนาดเล็กลง ราคาถูกลง เนื่องจากสามารถลดต้นทุนการผลิตต่อชิ้นลงได้มาก ทำให้เราสามารถใช้งานแล้วถอดเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะส่วนของโมดูลหรือตัวเซ็นเซอร์ทิ้งไปได้ โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงส่วนที่เป็นวงจรเชื่อมต่อ และส่วนประมวลผล ทำให้ระบบโดยรวมมีราคาถูกลง สามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงกว้างมากขึ้น

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของโครงการวิจัยนี้อยู่ที่การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ในการสร้างรูหรือช่องว่าง ขนาดต่างๆบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อให้เม็ดเลือดชนิดต่างๆไหลผ่าน ซึ่งโครงสร้างของรูหรือช่องว่างดังกล่าวจะสร้างขึ้นด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี ทั้งนี้ก็นำไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็น เซ็นเซอร์ตรวจนับเม็ดเลือดด้วยเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาคนั่นเอง

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีการกัดทางไฟฟ้าเคมี
2. ศึกษากระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี
3. ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา และความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่มีต่อโครงสร้างของรูพูนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี
4. ศึกษากระบวนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจนับเม็ดเลือดด้วยเทคโนโลยีกลไฟฟ้าจุลภาค

เนื้อหาในรายงานเล่มนี้จะแบ่งเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงความจำเป็น และความสำคัญองงานวิจัยที่ได้ศึกษา หัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ที่ได้ทำการศึกษา สมมติฐาน และแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ส่วนสุดท้ายคือ ขอบเขตของงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 การกัดทางไฟฟ้าเคมี เป็นการกล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิคการสร้างรูพูนขนาดเล็ก โดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดรูพูน ความพูน

บทที่ 3 หลักการตรวจนับอนุภาคขนาดเล็ก เป็นการกล่าวถึง นิยามเซนเซอร์ หลักการตรวจนับของอุปกรณ์

บทที่ 4 กระบวนการสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เป็นการกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นรูพูน เทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความพูน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว และเครื่องมือในการวัดผล

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง เป็นการกล่าวถึงผลการทดลองเกี่ยวกับการสร้างชั้นรูพูนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี และผลการทดลอง โครงสร้างของรูพูน

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# รูปพรุนจากการกัดทางไฟฟ้าเคมี

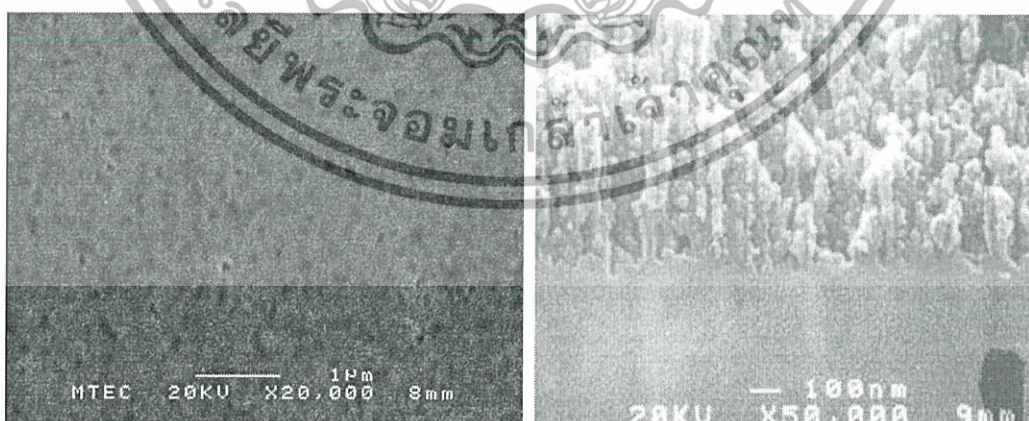
ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีรูปพรุน วิธีการสร้างรูปพรุน โดยเน้นไปที่วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดรูปพรุน ความพรุนของวัสดุ

### 2.1 ทฤษฎีรูปพรุนจากการกัดทางไฟฟ้าเคมี

ซิลิคอนรูปพรุน เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีทั้งโครงสร้างที่เป็นระเบียบ และไม่เป็นระเบียบ ภายในของซิลิคอนรูปพรุนอะตอมนั้นนอกจากจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบ เหมือนกับผลึกซิลิคอนเดี่ยว แต่ยังมีจุดบกพร่องของผลึก ช่องว่าง ระยะห่างของช่องว่าง และพื้นระนาบขนาดค้ำอะตอมข้างเคียง โครงสร้างที่มีขนาดเล็กนี้สามารถพบได้ 2 รูปแบบ คือ จุด และ แท่ง หรือเป็นแบบผสม ผลึกขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนี้มีลักษณะแข็งแรง และมีรูปพรุน ซิลิคอนรูปพรุนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจ มีบทความจำนวนมากพยายามอธิบายถึงคุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของซิลิคอนรูปพรุน และได้นำซิลิคอนรูปพรุนมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ทางด้านการแพทย์ เป็นต้น

#### 2.1.1 โครงสร้างรูปพรุนของซิลิคอน

ซิลิคอนรูปพรุน คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูปพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจนถึงระดับไมโครเมตร โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.1



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างรูปพรุนของซิลิคอน (ก) ภาพพื้นผิว (ข) ภาพตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างรูพรุนของซิลิคอนในรูปที่ 2.1 เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาโครงสร้างรูพรุนของซิลิคอน ยังพบต่อไปอีกว่าที่บริเวณผิวของรูพรุนไมโครซิลิคอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิคอนไฮไดรด์ (Si:H) หรือ ซิลิคอนออกซิไฮไดรด์ (Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป

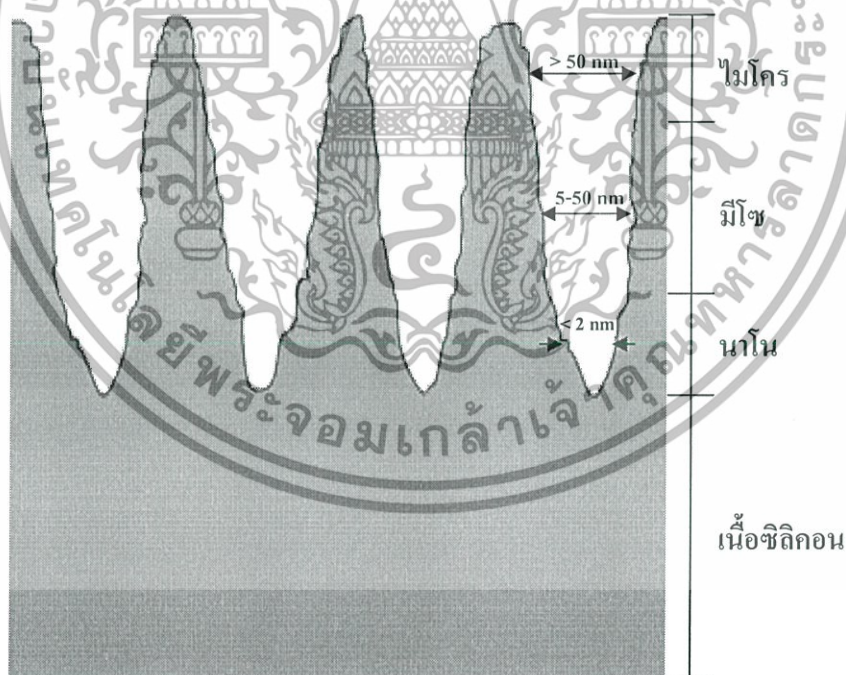
### 2.1.2 การแบ่งประเภทรูพรุน

รูพรุนของซิลิคอนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [18] คือ

1. แบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

รูพรุนของซิลิคอนสามารถแบ่งได้ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ดังนี้

- 1.1 โครงสร้างของชั้นรูพรุนไมโคร (microporous) เป็นชั้นรูพรุนของซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไป
- 1.2 โครงสร้างของชั้นรูพรุนมีโซ (mesoporous) เป็นชั้นรูพรุนของซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่อยู่ระหว่าง 5 นาโนเมตร ถึง 50 นาโนเมตร
- 1.3 โครงสร้างของชั้นรูพรุนนาโน (nanoporous) เป็นชั้นรูพรุนของซิลิคอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่เล็กกว่า 5 นาโนเมตร ลงไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะติดกับเนื้อของซิลิคอน



รูปที่ 2.2 ภาพจำลองโครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะรูพรุนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- 2.1 ลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูพรุน (blind)
- 2.2 ลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกของรูพรุน (banched)
- 2.3 ลักษณะเป็นโพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน (totally isolated)
- 2.4 ลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกไปยังอีกด้าน (through)



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองรูพรุนลักษณะต่างๆ กัน

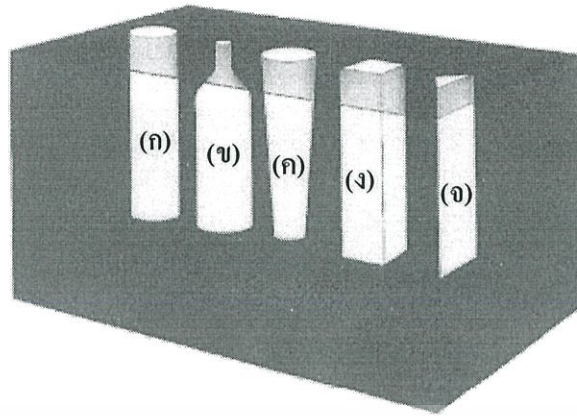
- (ก) ลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูพรุน
- (ข) ลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกของรูพรุน
- (ค) ลักษณะเป็นโพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน
- (ง) ลักษณะเป็นรูกลวงทะลุออกไปยังอีกด้าน

## 3. แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูปร่างรูพรุนสามารถแบ่งออกได้เป็น 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 ภาพจำลองรูพรุนรูปร่างต่างๆ

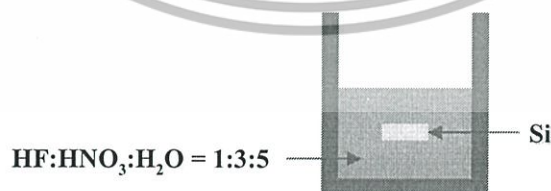
- (ก) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (ข) รูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำหมึก  
 (ค) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย (ง) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์  
 (จ) รูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด

## 2.2 เทคนิคการสร้างรูพรุน

กระบวนการสร้างรูพรุนมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่จะขอพิจารณาถึงเทคนิคการสร้างรูพรุนที่เหมาะสม สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการสร้างได้ และสามารถทำการสร้างในห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ได้

### 2.2.1 การสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมลี้ (stain etching)

การสร้างรูพรุน ด้วยวิธีการกัดแบบข้อมลี้ เป็นเทคนิคที่ทำการจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารประกอบของกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid : HF) ซึ่งจะประกอบด้วย สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก (nitric :  $\text{HNO}_3$ ) และน้ำ ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้การกระตุ้นด้วยแสงสว่างในขณะที่ทำการกัดด้วยปฏิกิริยาเคมี เพื่อเป็นตัวช่วยการทำปฏิกิริยา

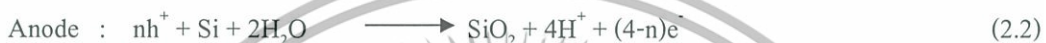
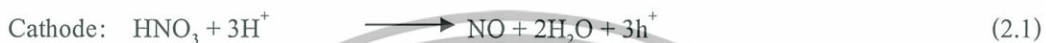


รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบข้อมลี้

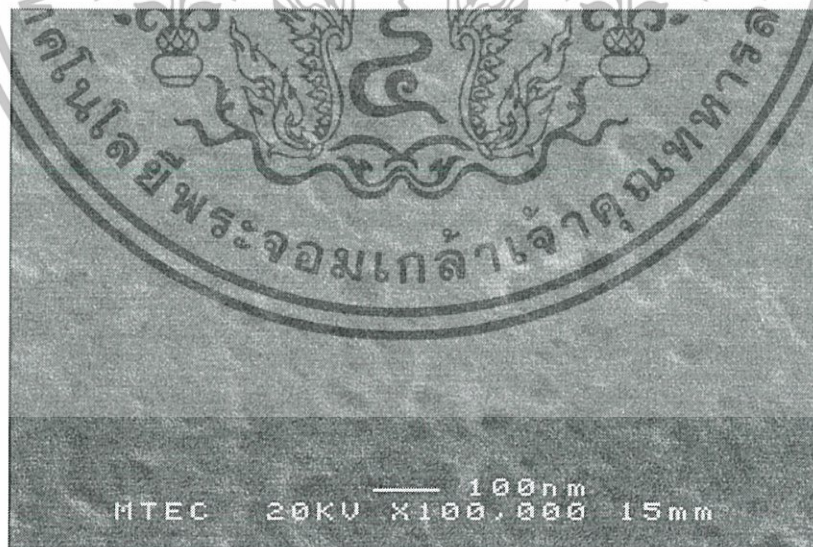
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการกัดแบบข้อมสี่คือ การทำให้เกิดประจุ โขล เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก เพื่อทำให้เกิดประจุ โขล หลังจากนั้นประจุ โขลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เอง สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ซึ่งการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์ และการถูกกัดของซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยา ดังนั้นลักษณะ โครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ (non-uniform)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมสี่สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่า บริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยาจะมีสีส้มเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นรูพรุนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีส้มจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ส่วนความหนาของชั้นรูพรุนที่ได้จากกระบวนการกัดแบบข้อมสี่จะมีค่าประมาณ 100 nm และพื้นผิวของชั้นรูพรุนที่เกิดจากกระบวนการกัดแบบข้อมสี่จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.6

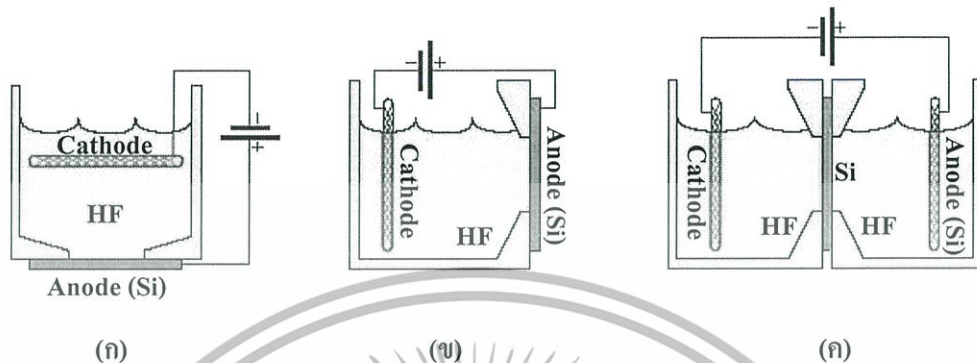


รูปที่ 2.6 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (anodization)

การสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน เป็นวิธีที่สามารถควบคุมปฏิกิริยาในการสร้างรูพรุน ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดชั้นรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ (uniform) ทั่วกันทั้งแผ่น วิธีการแอนโนไดซ์เซชันนี้จะใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 2.7

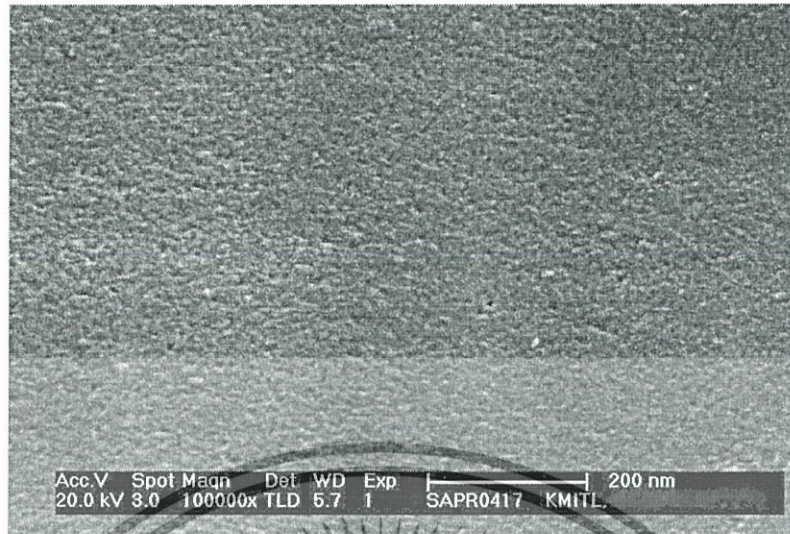


รูปที่ 2.7 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน

- (ก) เซลล์แท็งก์เดียวในแนวตั้ง (ข) เซลล์แท็งก์เดียวในแนวนอน  
(ค) เซลล์แท็งก์คู่ในแนวนอน

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันนี้จะประกอบด้วย แผ่นซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะจมอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จากรูปที่ 2.7 (ก) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดียวในแนวตั้ง (single tank vertical cell) มีจุดเด่นอยู่ที่ขณะทำการสร้างพอร์ซซิลิคอนสามารถฉายแสงเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการกัดได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.7 (ข) จะเห็นได้ว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดียวในแนวนอน (single tank lateral cell) นั้นทำการฉายแสงได้ยากกว่า ส่วนรูปที่ 2.7 (ค) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์คู่ในแนวนอน (double tank lateral cell) ซึ่งพัฒนามาจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดียวในแนวนอน เพื่อใช้ต่อร่วมกับปั๊ม (pump) ทำให้มีการไหลเวียนของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตลอดเวลาส่งผลทำให้ได้ชั้นพอร์ซซิลิคอนที่สม่ำเสมอมากขึ้น แต่ก็ยังมีปัญหาในการฉายแสงเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการกัด โดยส่วนใหญ่การสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีแอนโนไดซ์เซชันจะมีเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ระหว่างการสร้างก็คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก การผสมเอทานอลเพื่อช่วยให้เกิดความสม่ำเสมอของชั้นพอร์ซซิลิคอนมากขึ้น เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแอนโนไดซ์เซชัน ซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยการสร้างรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันนี้ สามารถควบคุมความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาของรูพรุน ได้ดีกว่าวิธีการกัดแบบย้อมสี โดยภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุนที่เกิดกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันจะมีลักษณะสม่ำเสมอกว่าวิธีการกัดแบบย้อมสี แสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุนที่ได้จากกระบวนการเอโนโดซ์เซชัน

### 2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

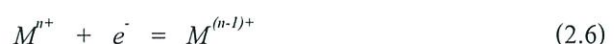
การสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี [31] เป็นวิธีการที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก โดยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

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



โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction)

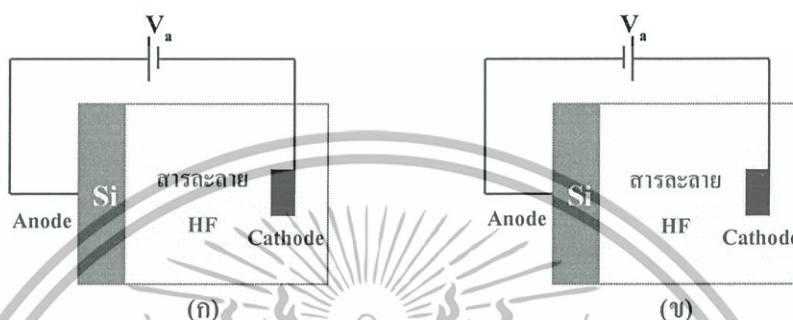
2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเท และเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่นไอออนของโลหะในสารละลายปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction)

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนดหรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกอันหนึ่งจะเป็นแคโทด



รูปที่ 2.9 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่าง

(ก) แบบแอโนดิก (ข) แบบแคโทดิก

พิจารณาเซลล์ไฟฟ้าในรูปที่ 2.9 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอน (Si) ซึ่งจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในที่นี้ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเช่นกัน จากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

#### 1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้แผ่นซิลิคอนสามารถถูกกัดได้

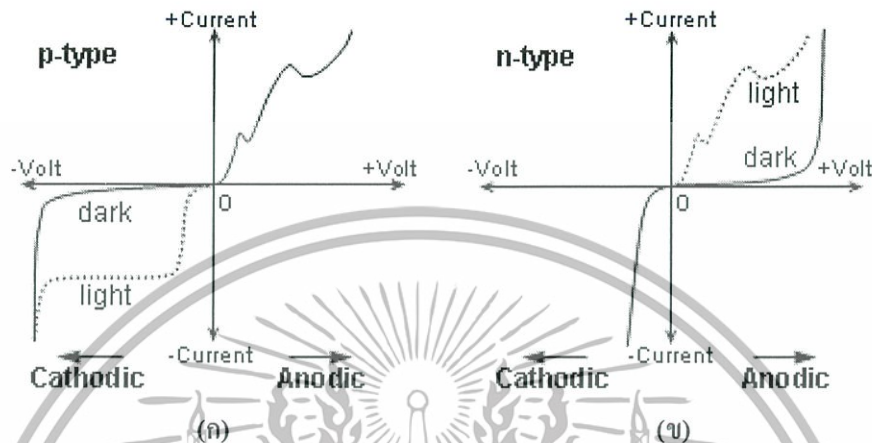
#### 2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดแผ่นซิลิคอน

### 2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นรูพรุนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบช็อตติไคโอด (schottky diode) ที่เกิดขึ้นจากการ

สัมพันธ์กันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ แผ่นซิลิคอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ภายใต้งี้ออนในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.10 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากรูปที่ 2.10 แสดงถึงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพี และเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก และการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก ลักษณะของกระแส และแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในแผ่นซิลิคอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง เช่นเดียวกันกับไดโอดทั่วไป ส่วนในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับแผ่นซิลิคอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกสำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

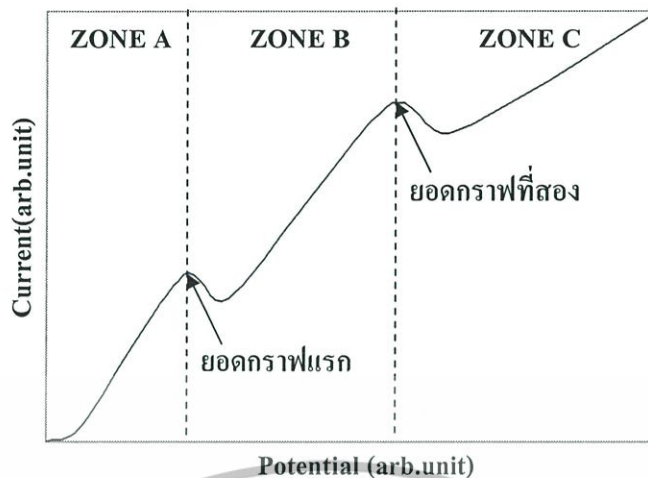
ตารางที่ 2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน

ชนิดของแผ่น ซิลิกอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบแคโทดิก	แบบแอโนดิก
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื้อของแผ่นซิลิกอนจะไม่ถูกกัด</li> <li>- ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื้อของแผ่นซิลิกอนถูกกัด โดย</li> <li>- จะเกิด โครงสร้างของรูพรุนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ</li> <li>- จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ</li> <li>- ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง</li> </ul>
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื้อของแผ่นซิลิกอนจะไม่ถูกกัด</li> <li>- ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เนื้อของแผ่นซิลิกอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย</li> <li>- จะเกิด โครงสร้างของรูพรุนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ</li> <li>- จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ</li> <li>- ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ</li> </ul>

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสขั้วตึกเหมือนกัน โดยการเกิดรูพรุนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิกเท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก จะไม่เกิดรูพรุนขึ้นไม่ว่าชนิดของแผ่นซิลิกอนจะเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกนั้น เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ดังนั้นในระหว่างการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกจึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหลังของแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดรูพรุน

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิกของทั้งแผ่นซิลิกอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีในส่วนของไอส์แบบแอนโนดิก

จากรูปที่ 2.11 ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยยอดกราฟอยู่ 2 จุดด้วยกัน โดยยอดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A เป็นช่วงในการเริ่มสร้างรูพรุน จะเป็นบริเวณที่เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นรูพรุนขึ้นมาที่ต่อเมื่อค่ากระแส ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่ามากกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก ส่วนในบริเวณ B เป็นช่วงการกัดที่ทำให้เกิดรูพรุน ส่วนช่วงที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของซิลิคอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นรูพรุนไปสู่ลักษณะช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า (electropolishing regions) ซึ่งอยู่ในบริเวณ C โดยโครงสร้างของชั้นรูพรุนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับรูพรุนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ยอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากยอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์อิมพีแดนซ์เชิงลบ (negative impedance) ขึ้น โดยจากรูปที่ 2.11

#### - ในส่วนของยอดกราฟแรก

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัมขึ้นภายในโครงสร้าง มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสชั้นรอบๆ โครงสร้างของรูพรุน และเมื่อโครงสร้างของรูพรุนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุมโครงสร้างของรูพรุนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นความพรุนนี้มีค่าเพิ่มขึ้น

- ในส่วนยอดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณช่วงการกัดที่ทำให้เกิดรูพรุน กับช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ที่บริเวณผิวของรูพรุนในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีลักษณะเป็นแบบขั้วคัต โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส แสดงดังรูปที่

2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

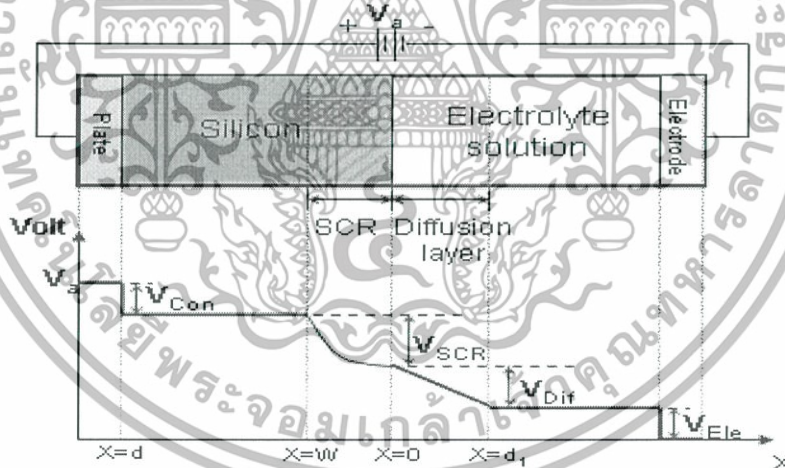
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนโอดิก กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากการไบอัสแบบตรง ทำให้เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก)

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบแอนโอดิก ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการสร้างชั้นรูพรุน จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้กับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข)

### 2.3.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัก จะประกอบด้วยแผ่นซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอนโอดิก ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่  $d$  เป็นความหนาของแผ่นซิลิคอน,  $w$  เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส และ  $d_1$  เป็นความกว้างของบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ

- ในเนื้อของแผ่นซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะนำกระแส

- ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรด กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ (diffusion layer)

ถ้าให้  $V_a$  เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟารวมของระบบได้ดังนี้ คือ

$$V_a = V_{diff} \pm V_{SCR} \pm V_{Con} + V_{Elec} \quad (2.7)$$

โดย  $V_{diff}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

$V_{SCR}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะ

$V_{Con}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน

$V_{Elec}$  คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

ศักดาไฟฟ้า  $V_{con}$  กับ  $V_{elec}$  ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของรูพูนแบบเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงทำให้สมการที่ (2.7) สามารถเขียนได้เป็น

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

จากสมการที่ (2.8) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ ( $V_{diff}$ ) กับศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะ เป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบตรง ทำให้ไม่เกิดบริเวณหลอดพาหะขึ้นในแผ่นซิลิคอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ โดย  $V_{diff}$  นี้จะควบคุม อีออนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

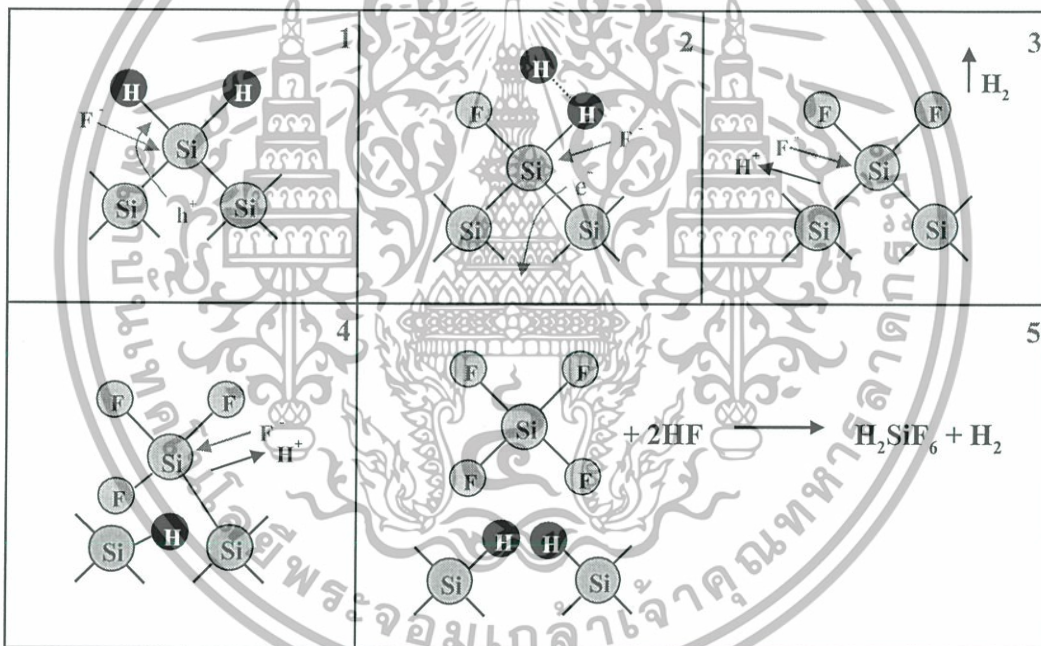
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะตกคร่อมบริเวณนี้ โดยบริเวณปลอดพาหะนี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัด และ โครงสร้างของรูพรุนที่ถูกสร้างขึ้น

## 2.4 กลไกในการเกิดรูพรุน

### 2.4.1 ปฏิกิริยาเคมีในการกัดบริเวณผิวของแผ่นซิลิคอน

ในสภาวะปกติเมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำปฏิกิริยา แต่เมื่อไรก็ตามที่แผ่นซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบแอนโนดิกแล้ว ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นรูพรุนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอน

เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีการไบอัสแบบแอนโนดิก ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแอโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้ไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการ

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

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



จากสมการที่ (2.10) และ (2.11) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวม ได้เป็น



จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้นนั้น เริ่มจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ (2.19) 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 สังเกตได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่น

ซิลิคอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{SiF}_4$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะ  
ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายก็คือสารละลาย  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการ  
ที่ (2.11)

#### 2.4.2 การเกิดรูพรุน

แผ่นซิลิคอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะไม่ถูกกัด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการ  
ป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบไบอัสขั้วบวกแก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ให้กระแสไหลผ่านรอย  
สัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดทาง  
ไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 แบบ คือ (1) การกัดแบบขัดผิวหน้า  
ด้วยไฟฟ้า (electropolishing) และ (2) การกัดแบบทำให้เกิดรูพรุน (porous etching)

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน  
ระหว่างการแอโนไดซ์เซชัน โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่าง  
มากต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ

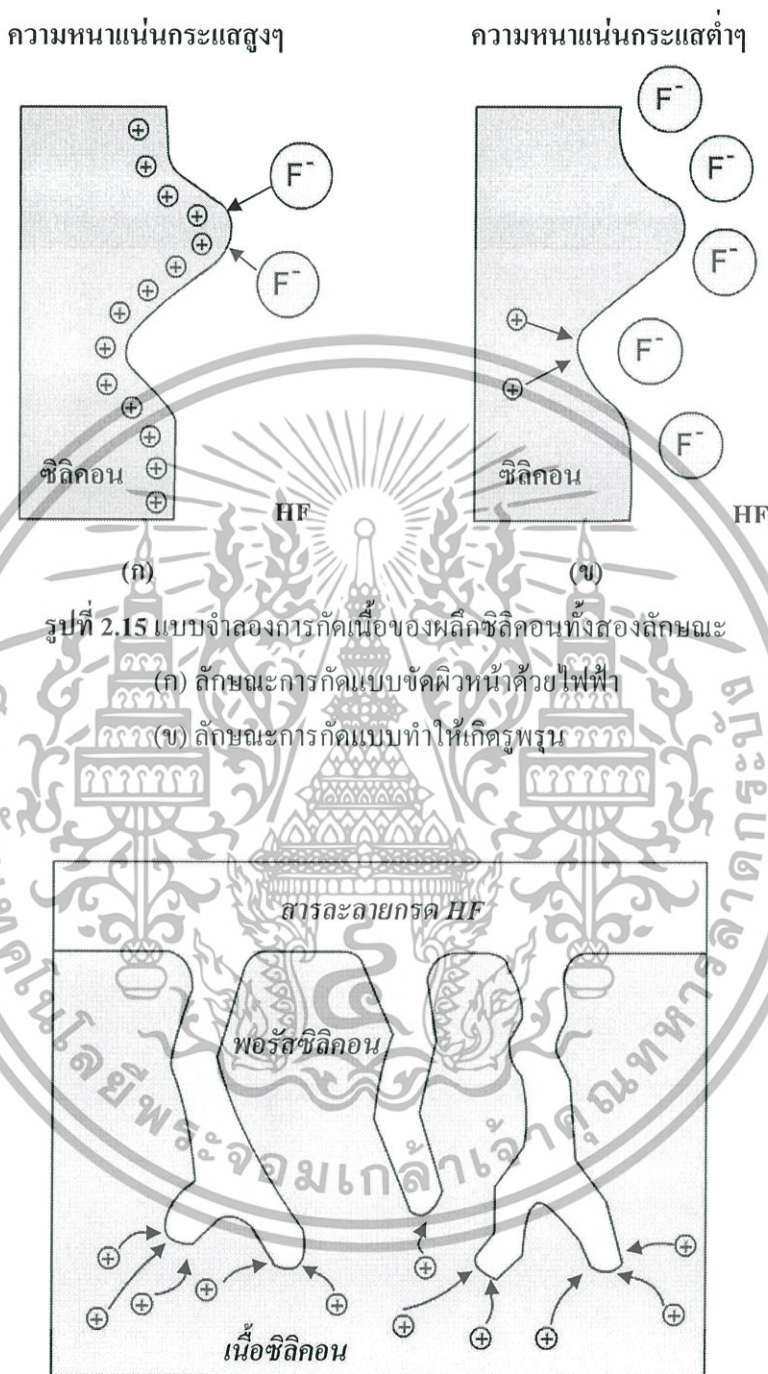
##### - การกัดแบบขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสให้แก่เซลล์ไฟฟ้า  
เคมีในปริมาณสูงๆ ( $J > J_{ps}$ ) ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนมีปริมาณของพาหะโฮล  
สะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอ็อกซิเจนของฟลูออรีนที่อยู่ใน  
สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยอ็อกซิเจนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายในสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้า  
ผิวของแผ่นซิลิคอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุด  
ของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงเอาอ็อกซิเจนของฟลูออรีนเข้า  
มาทำปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นส่วนใหญ่ มีผล  
ทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้นเราจึงเรียกการกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้า  
ด้วยไฟฟ้า

##### - การกัดแบบทำให้เกิดรูพรุน

ส่วนลักษณะการกัดแบบทำให้เกิดรูพรุน จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่น  
กระแสในปริมาณต่ำ ( $J < J_{ps}$ ) ซึ่งจะทำให้ปริมาณอ็อกซิเจนของฟลูออรีนในสารละลายกรดไฮโดร  
ฟลูออริก มีจำนวนมากกว่าจำนวนของโฮลที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน ทำให้การกัดใน  
ลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวนโฮล ดังนั้นถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือรอยซึ่ง  
เกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิวหรือจุดบกพร่องต่างๆ ในผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)  
เมื่อทำการไบอัสแบบแอโนดิกให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมหรือจุดบกพร่อง  
เหล่านี้ มีปริมาณความเข้มสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่บริเวณอื่นๆ ซึ่งจะเอาพาหะโฮลเข้ามายังจุดนี้กันมาก

ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณก้นหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน



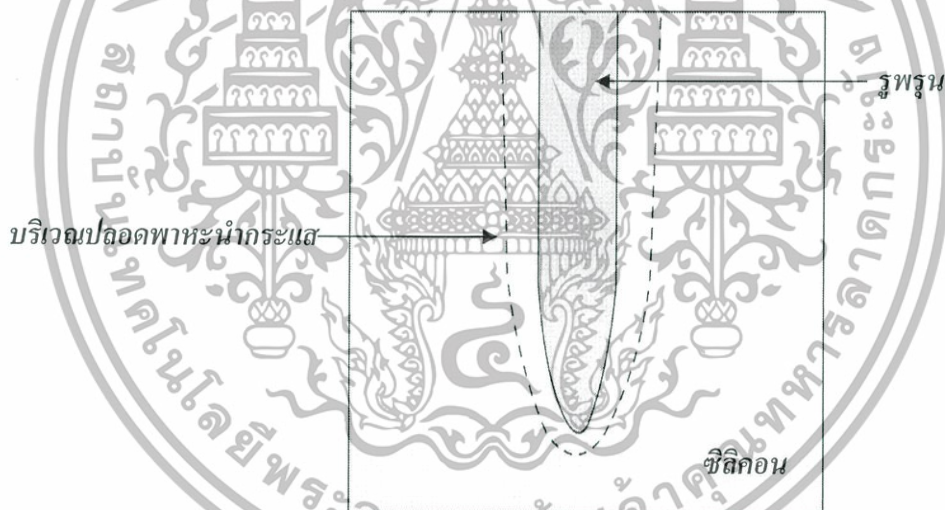
รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่พาหะ โสไลที่ถูกดึงมารวมกับที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนทั้งชนิดพี และชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าผลึกซิลิคอนทั้งสองชนิดมีกลไกการเกิดโครงสร้างของรูพรุนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแบบแอนดิก

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นการไบอัสแบบตรง ซึ่งการไบอัสในลักษณะเช่นนี้จะไปลดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณปลอดพาหะลง โดยจะเกิดขึ้นตามผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน อันเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนดิก จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณปลอดพาหะ มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้นถ้าบริเวณของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีลักษณะเป็นหลุม ซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบๆ หลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นรอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ ผนังของรูพรุนที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน

โดยความกว้างของบริเวณบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_{SCR}}{qN_D}} \quad (2.13)$$

โดยที่  $W$  คือ ความกว้างบริเวณบริเวณปลอดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\epsilon_s$	คือ เปรอรัมิติวิตี (permittivity) ของผลึกซิลิกอน
$\epsilon_0$	คือ เปรอรัมิติวิตีของสุญญากาศ
$V_{SCR}$	คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ
$q$	คือ ประจุของอิเล็กตรอน
$N_D$	คือ จำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้

จากสมการที่ (2.13) จะเห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ ( $V_{SCR}$ ) และจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D$ ) ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น



รูปที่ 2.18 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน

บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบรูพรุน จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 2.18 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบๆ ผนังของรูพรุน ( $E_s$ ) มีค่าเท่ากับ

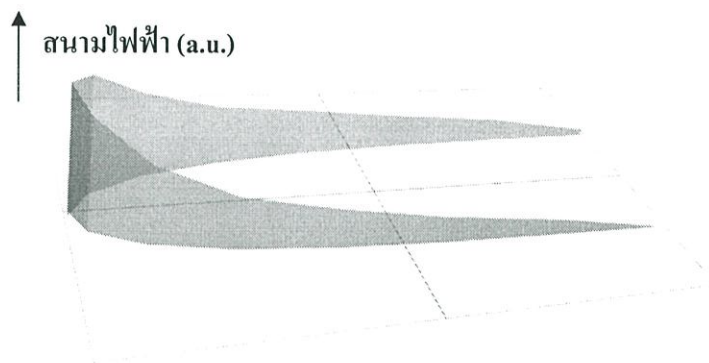
$$E_s = 2V_{SCR}/W \quad (2.14)$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบๆก้นหลุมของรูพรุน ( $E'_s$ ) จะมีค่า

$$E'_s = V_{SCR}/r \quad (2.15)$$

โดย  $r$  คือ รัศมีก้นหลุมของรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูพรุนจะมีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือผนังบริเวณก้นหลุมของรูพรุนมีปริมาณของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าบริเวณผนังรอบๆ ของรูพรุนอยู่ถึงประมาณ 2-3 เท่า ส่วนผนังบริเวณปากรูจะมีค่าต่ำสุดจนเกือบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจากการที่ก้นหลุมของรูพรุนมีขนาดของสนามไฟฟ้าในปริมาณสูงนั้น มีผลทำให้สามารถดึงพาหะนำกระแส (โฮล) มาที่บริเวณนี้กันได้มาก ส่งผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมจะมีปริมาณกระแสที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน

#### 2.4.3 กลไกในการหยุดกัทรอบๆรูพรุน

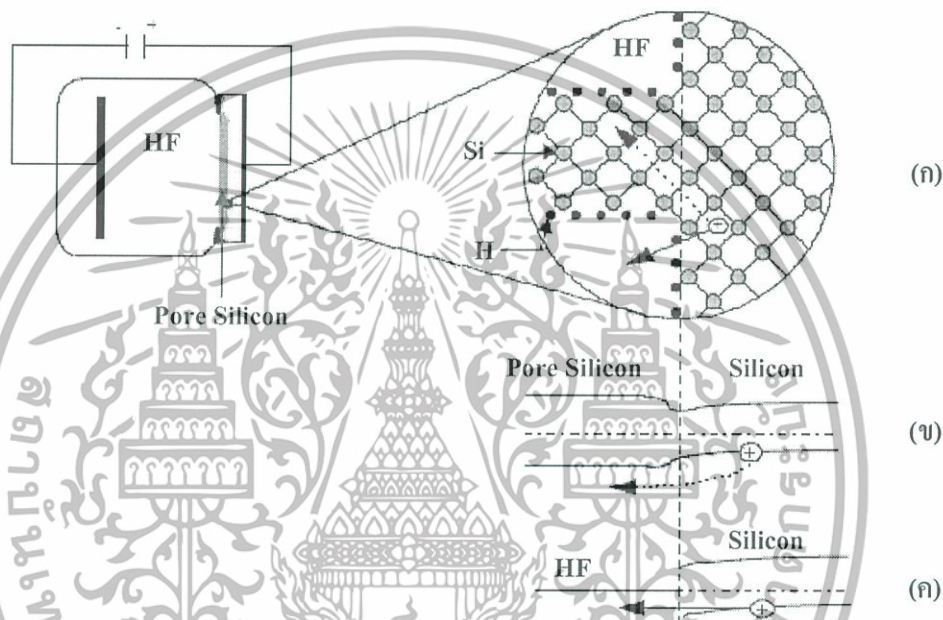
จากการเกิดโครงสร้างของรูพรุนขึ้นโดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิคอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญ ต่อกระบวนการกักเนื้อของผลึกซิลิคอนในแบบทำให้เกิดรูพรุนด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี เป็นกระบวนการกักที่สามารถลดขนาดโครงสร้างของรูพรุนให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ จนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร แต่กระบวนการนี้ก็จะอาศัยกลไกในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หยุดกัด โครงสร้างของรูพรุนด้วย ซึ่งจากการศึกษาพบว่ารูพรุนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพี และชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

- การหยุดกัดของรูพรุนที่ถูกสร้างขึ้นจากซิลิคอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไปอัสเซสล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอนโนดิก ทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณปลดพาหะขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพีจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ผลของขนาดควอนตัมขึ้นในส่วนของนาโนซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นรูพรุนชนิดพี โดยที่

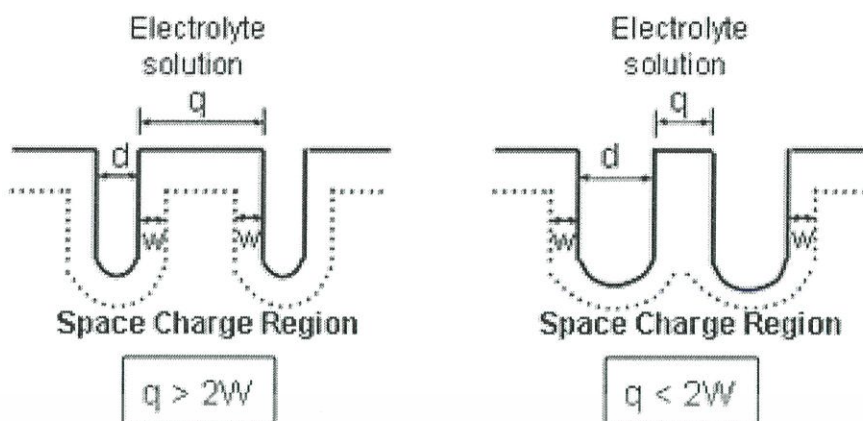
- (ก) โครงสร้างของรูพรุน และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะ โฮล
- (ข) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่ของพาหะ โฮลจากผลึกซิลิคอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของรูพรุน
- (ค) ลักษณะแถบพลังงาน และการเคลื่อนที่พาหะ โฮล จากผลึกซิลิคอนผ่านไปยังสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดพีจะถูกกัดจนเป็น โครงสร้างของรูพรุนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจนทำให้โครงสร้างของรูพรุนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ระหว่างซิลิคอนพรุนกับผลึกซิลิคอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นค่าแพนซ์กัซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\Delta E_V$  สำหรับโฮล และเท่ากับ  $\Delta E_C$  สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้นการที่พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนซิลิคอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดโครงสร้างในส่วนต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่า  $\Delta E_V$  ดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ค่าแพนซ์กั  $\Delta E_V$  มีค่าพลังงานมากกว่าพลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนของนาโนซิลิคอนได้ ผลที่ตามมาคือเกิดการหยุดกัดโครงสร้างของรูพรุนในส่วนนี้ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า  $\Delta E_V$  นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนซิลิคอน โดย  $\Delta E_V$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนซิลิคอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัดในส่วนของนาโนซิลิคอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนซิลิคอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่ถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีสามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ค) ดังนั้นจึงทำให้บริเวณก้นหลุมจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่อง

- การหยุดกัดของรูพรุนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการไปอัสเซดล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะแอโนดิก สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะเป็นการไปอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ  $W$  ดังนั้นกลไกในการหยุดกัดของรูพรุนสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นแล้วจะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของรูพรุน แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของรูพรุนที่สร้าง

จากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่

(ก) โครงสร้างของรูพรุนที่มีขนาดมากกว่า  $2W$

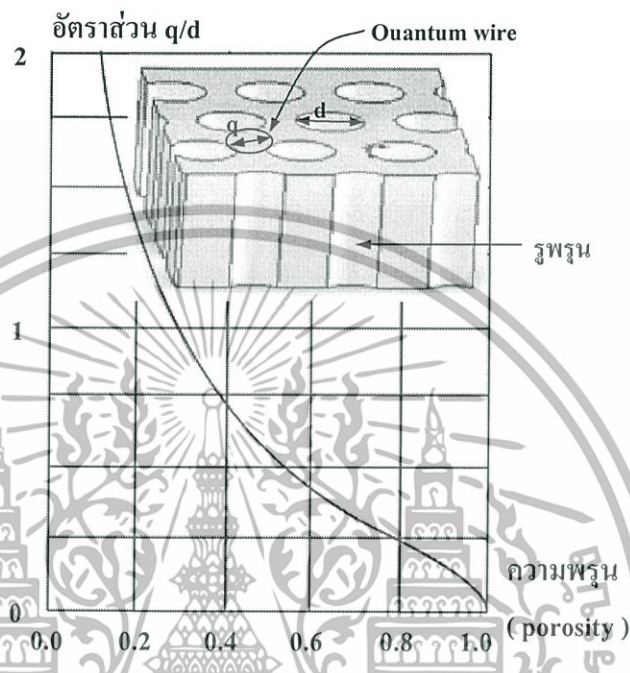
(ข) โครงสร้างของรูพรุนที่มีขนาดน้อยกว่า  $2W$

จากรูปที่ 2.22 (ก) จะเห็นได้ว่ารูพรุนที่สร้างขึ้นจากแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อถูกทำการกัด จะทำให้ขนาดโครงสร้างของรูพรุน ( $q$ ) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพรุนภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลอดพาหะนำกระแสปกคลุมอยู่รอบๆ รูพรุนแต่ละรู ในกรณีนี้ขนาดของโครงสร้างรูพรุนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ( $q > 2W$ ) ดังนั้นจึงยังสามารถทำการกัดเพื่อลดขนาดของโครงสร้างรูพรุนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไรก็ตามที่ขนาดของโครงสร้างรูพรุนมีขนาดที่น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ( $q < 2W$ ) ดังรูปที่ 2.22 (ข) จะมีผลทำให้เกิดการซ้อนทับกันของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส จนโครงสร้างของรูพรุนถูกรอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของรูพรุนในส่วนนี้

## 2.5 ความพรุน

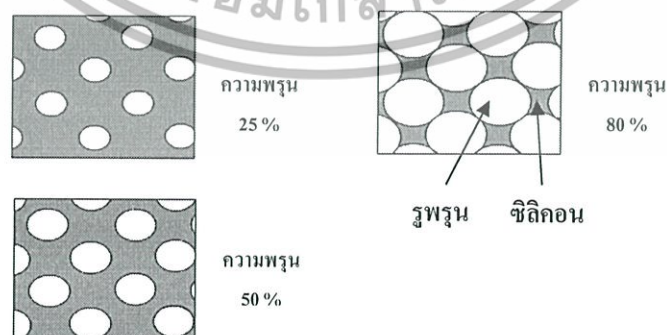
โดยทั่วไปแล้ววัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากจะกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอนที่เหลือและขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรหรือไมโครเมตร เนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง ผลของขนาดควอนตัม ส่งผลในลักษณะของ ควอนตัมในเชิง 1 มิติ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นรูพรุน แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อซิลิคอน ( $q$ ) กับขนาดของรูพรุน ( $d$ ) ที่มีต่อความพรุนของชั้นรูพรุน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อซิลิคอนและขนาดของรูพรุน มีผลต่อความพรุน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กลง หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นรูพรุนนั้นมีความพรุนมากกว่าเดิม แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างรูพรุนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# หลักการตรวจนับเม็ดเลือด

### 3.1 นิยามของเม็ดเลือด

เลือดเป็นเนื้อเยื่อเกี่ยวพันชนิดหนึ่งซึ่งมีสารระหว่างเซลล์ เป็นของเหลวเป็นตัวกลางติดต่อระหว่างเซลล์ของร่างกาย และมีเม็ดเลือดเป็นเซลล์ต้องลอยอยู่ในร่างกายมีเลือดอยู่ประมาณ 7-8 % ของน้ำหนักตัว ปริมาณของเลือดแตกต่างกันไปตาม อายุ ขนาด น้ำหนักตัว เพศ และ สภาพของสุขภาพ เลือดมีสีแดงเมื่ออยู่ในหลอดเลือดแดง มีสีคล้ำลงเล็กน้อยเมื่ออยู่ในหลอดเลือดดำ มีความหนืดกว่าน้ำ 5 เท่า มีอุณหภูมิประมาณ  $37.8^{\circ}\text{C}$  มีฤทธิ์เป็นด่างเล็กน้อย มีกลิ่นคาว หน้าที่ของเลือดคือ

1. ระบบการขนส่ง ออกซิเจน อาหาร ภูมิคุ้มกัน ฮอร์โมน ระบบป้องกันตัวเอง การทำลายของเสีย

2. ระบบป้องกันด้วยระบบภูมิคุ้มกัน

3. ควบคุมความสมดุลของร่างกาย โดยการควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย

เลือดมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ

1. เม็ดเลือด (Blood cell) มีประมาณ 45 %

2. พลาสมา (Plasma) มีประมาณ 55 %

1. เม็ดเลือด (Blood cell) ประกอบด้วย เม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาว และ เกร็ดเลือด

1.1 เม็ดเลือดแดง (Red Blood Cell : RBC)



รูปที่ 3.1 แสดงรูปร่างและขนาดของเม็ดเลือดแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เม็ดเลือดแดงมีรูปร่างด้านหน้าเป็นรูปกลมคล้ายจาน ตรงกลางมีรอยบุ๋มลึกลงไปคล้าย โคนัท แต่ไม่มีรูทะลุถึงกัน มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดประมาณ 7 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเซลล์ อื่นๆ ของร่างกายมากเม็ดเลือดแดงจะถูกสร้างที่บริเวณไขกระดูกของร่างกายตามที่แตกต่างกัน ไขกระดูกที่มีประสิทธิภาพในการสร้าง ได้แก่ ไขกระดูกหน้าอก กระดูกซี่โครง กระดูกสันหลัง และ กระดูกกะโหลกศีรษะ อัตราการสร้างเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นกับปริมาณออกซิเจนในเลือด ถ้าออกซิเจน ต่ำ หรือร่างกายสูญเสียเลือด จะมีผลเร่งให้ไขกระดูกสร้างเม็ดเลือดแดงเพิ่มขึ้นภายในเม็ดเลือดแดง มีฮีโมโกลบินเป็นสารสำคัญในการพาออกซิเจนที่รับจากปอดไปยังเซลล์ต่างๆ ทั่วร่างกาย ฮีโมโกลบินประกอบด้วยส่วนประกอบที่เรียกว่า ฮีม (Heme) และส่วนที่เป็นโปรตีนซึ่งเรียกว่า โกลบิน (Globin) ฮีมมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญ ถ้าร่างกายขาดธาตุเหล็ก จะทำให้สร้างฮีมได้ไม่พอ ซึ่งส่งผลกระทบต่อไขกระดูกสร้างฮีโมโกลบิน และการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้สร้างได้ปริมาณน้อย และ คุณภาพของเม็ดเลือดแดงก็ลดลง

เม็ดเลือดแดงจะมีอายุประมาณ 120 วัน เมื่อหมดอายุการใช้งานแล้วจะถูกทำลายที่ม้าม โดย แยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นธาตุเหล็กในร่างกายจะเก็บไว้ใช้อีก และ ส่วนที่ไม่ใช่ธาตุเหล็กจะถูก นำไปที่ตับเพื่อขับออกทางน้ำดี และบางส่วนถูกขับออกทางไต จำนวนเม็ดเลือดแดงในผู้ชายมี ปริมาณมากกว่าผู้หญิง ในผู้ชายมีประมาณ 5 ล้านเซลล์ต่อเลือด 1 ลบ.ซม. ผู้หญิงมีประมาณ 4.5 ล้านเซลล์ต่อเลือด 1 ลบ.ซม.

#### หน้าที่ของเม็ดเลือดแดง

1. นำออกซิเจน ไปเลี้ยงเซลล์ทั่วร่างกาย
2. นำคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเซลล์ไปสู่ปอด
3. ทำให้เลือดมีสีแดง โดยฮีโมโกลบินร่วมกับออกซิเจน

#### 1.2 เม็ดเลือดขาว (White Blood Cell : WBC)

เม็ดเลือดขาวมีขนาดใหญ่กว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงคือมีขนาดประมาณ 10-20 ไมครอน เป็น เซลล์ที่มีนิวเคลียส ไม่มีฮีโมโกลบิน มีการเคลื่อนไหวแบบการคืบตัวคล้ายอะมีบา สามารถลอดผ่าน ผนังเลือดฝอยได้ จำนวนเม็ดเลือดขาวปกติประมาณ 5,000 – 7,000 เซลล์ต่อเลือด 1 ลบ.ซม. จำนวน เม็ดเลือดขาวเปลี่ยนแปลงได้ตาม อายุ เพศ และ สภาวะอื่นๆ เม็ดเลือดขาวมีการสร้างออกมาตลอด เหมือนเม็ดเลือดแดง มีอายุประมาณ 13 วัน อวัยวะสำหรับสร้างเม็ดเลือดขาว ได้แก่ ไขกระดูก ต่อม น้ำเหลือง ต่อมทอมซิล ต่อมไทมัส เป็นต้น

#### หน้าที่เม็ดเลือดขาว

ทำลายเชื้อโรค เมื่อมีสิ่งแปลกปลอมเข้าสู่ร่างกาย เม็ดเลือดขาวจะถูกผลิตเพิ่มขึ้นโดย อัดโนมิตี เพื่อเตรียมพร้อมที่จะทำลายสิ่งแปลกปลอมโดยวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การสะกดกลืนกิน (phagocytosis) เป็นวิธีทำลายเชื้อโรคโดยการกินและย่อยสลายเชื้อโรค
2. การสร้างเสริมภูมิคุ้มกันโรค (immunization) เม็ดเลือดขาวบางชนิดจะสร้างสารพวกโปรตีนที่มีคุณสมบัติต่อต้านสิ่งแปลกปลอมและเชื้อโรค

### 1.3 เกร็ดเลือด (Platelets)

เกร็ดเลือด มีรูปร่างกลมแบน ไม่มีนิวเคลียส ขนาด 2-4 ไมครอน เล็กกว่าเม็ดเลือดขาว และเม็ดเลือดแดง ปกติจะมีเกร็ดเลือดประมาณ 250,000 – 300,000 เซลล์ต่อเลือด 1 ลบ.ซม.

#### หน้าที่ของเกร็ดเลือด

การรักษาความสมดุลภายในหลอดเลือด (hemostasis) และ ช่วยในการอุดรอยรั่ว เมื่อเกิดการฉีกขาดของผนังเส้นเลือดได้ ช่วยทำให้เลือดแข็งตัว โดยผลิตแอนไซน์ทรอมโบพลาस्टิน (Thromboplastin) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เลือดแข็งตัว ดังนั้นการมีปริมาณของเกร็ดเลือดที่มากเกินไปทำให้เกิดการแข็งตัวของเลือดได้ง่าย และนำไปสู่การเกิดก้อนลิ่มเลือดอุดตันเส้นเลือดได้ ในทางตรงกันข้ามหากมีปริมาณของเกร็ดเลือดน้อยเกินไปก็จะส่งผลให้เกิดความผิดปกติในกระบวนการห้ามเลือด เกิดเลือดไหลหยุดช้า หรือเลือดไหลไม่หยุดได้

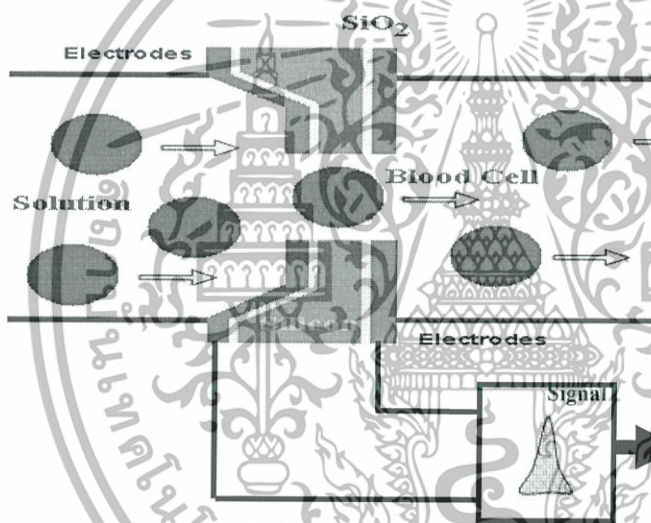
2. พลาสมา (Plasma) เป็นส่วนที่เป็นของเหลวในเลือด มีสีเหลืองใส มีฤทธิ์เป็นด่างเล็กน้อย หน้าที่ของพลาสมา ในพลาสมามีส่วนประกอบที่สำคัญและหน้าที่ ดังนี้

ส่วนประกอบ	หน้าที่
1. ปริมาณ 90-93% ของน้ำเลือดทั้งหมด	- ทำละลายของอาหาร ก๊าซ ของเสียต่างๆในเลือด - ช่วยลดความหนืดของเลือด ทำให้เลือดไหลเวียนได้ง่าย
2. โปรตีนชนิดต่างๆ 6-8% - albumin (อัลบูมิน) - globulin (แกมมาโกลบูลิน) - fibrinogen (ไฟบริโรเจน)	- ทำให้เกิดแรงดันออสโมซิสในน้ำเลือด รักษาปริมาตรของเลือด และ รักษาความสมดุลของน้ำในร่างกาย - เป็นตัวพาสารต่างๆ และ สร้าง antibody - ช่วยทำให้เลือดแข็งตัว
3. เกลือแร่ที่สำคัญ ได้แก่ โซเดียม คาร์บอนेट โซเดียมคลอไรด์ และ เกลือแคลเซียม	- ถ้าเป็นของเสียจะถูกกำจัดออก ถ้าเป็นสารอาหารจะอยู่ในน้ำเลือด เพื่อส่งไปเลี้ยงส่วนต่างๆ ของเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 หลักการวัดความต้านทานทางไฟฟ้า (Electrical impedance)

จากลักษณะของเซลล์เม็ดเลือดที่มีคุณสมบัติเป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้าที่ไม่ดี (Poor conductivity) จะขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดสัญญาณทางไฟฟ้าขึ้นได้ โดยเราสามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ วิธีการก็คือการสร้างสนามกระแสไฟฟ้าโดยมีขั้วไฟฟ้า (electrode) 2 ขั้ว คือ ขั้วบวกและขั้วลบ กระแสไฟฟ้าสามารถวิ่งถึงกันระหว่างสองขั้วนี้โดยอาศัยสื่อซึ่งเป็นสารละลาย โดยมีวัสดุปิดกั้นกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นฟิล์มซิลิคอนที่มีช่องเล็กๆ (aperture) ที่สามารถทะลุไปยังแผ่นซิลิคอนด้านตรงข้ามได้ ซึ่งช่องเล็กๆนี้ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องอยู่ในช่วงประมาณ 10-25 ไมครอน (อาจใหญ่หรือเล็กกว่านี้ได้ตามการออกแบบสำหรับการนับเซลล์เม็ดเลือดแต่ละชนิด) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าสามารถวิ่งถึงกันระหว่างสองขั้วไฟฟ้าโดยผ่านเฉพาะช่องเล็กๆนี้เท่านั้น การไหลของกระแสไฟฟ้าจะอาศัยน้ำยาที่เป็นสื่อตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



วงจรมับและตรวจวัดระดับสัญญาณ

รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างและหลักการนับเซลล์เม็ดเลือดแบบ Electrical impedance

โดยเซลล์เม็ดเลือดที่ต้องการนับ จะต้องถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำยาที่เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ฟอสเฟต (Phosphate Buffered Saline:PBS) ที่มีค่า pH ประมาณ 7 ทั้งนี้ก็เพื่อให้เซลล์เม็ดเลือดลอยแขวนในน้ำยาอัตราส่วนที่พอเหมาะ แล้วทำการนำเอาน้ำยาที่มีเซลล์เม็ดเลือดลอยแขวนอยู่ไปในภาชนะเพื่อเตรียมฉีดเข้าระบบ โดยการฉีดให้น้ำยาให้ท่วมบริเวณช่องเล็กๆ (aperture) ที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว ส่วนอีกด้านของเซ็นเซอร์จะดูดเซลล์เม็ดเลือดในน้ำยาด้วยแรงดัน negative pressure เซลล์เม็ดเลือดและน้ำยาจะวิ่งผ่านเข้าสู่ช่องเล็กๆ จากขั้วไฟฟ้าหนึ่งไปสู่ขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกข้างหนึ่ง ในขณะที่เซลล์เม็ดเลือดวิ่งไหลผ่านรูช่องเล็กๆ นั้น จะเกิดการกระตุกของกระแสไฟฟ้า ระหว่างขั้วทั้งสอง อันเนื่องมาจากช่องซึ่งมีขนาดเล็ก จะถูกเซลล์เม็ดเลือดที่มีคุณสมบัติเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าที่ไม่ดีมาขวางทางวิ่งของกระแสไฟฟ้า ทำให้เหลือช่องว่างในรูที่จะให้กระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านน้อยลง (บริเวณรูจะมีความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น) และเมื่อเซลล์เม็ดเลือดนั้นวิ่งหลุดออกจากบริเวณช่องเล็กๆ ไป กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านน้ำยาเป็นปกติเหมือนเดิม จาก การที่มีการกระตุกของกระแสไฟฟ้าในขณะที่เซลล์เม็ดเลือดวิ่งไหลผ่านช่องเล็กๆนี้เอง ทำให้เกิดสัญญาณ (pulse) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งสามารถที่จะบันทึกได้ โดยจำนวนครั้งของการกระตุกของกระแสไฟฟ้าจะเท่ากับจำนวนเซลล์เม็ดเลือดที่วิ่งไหลผ่านช่องเล็กๆนั้น ดังนั้นจึงทำให้เราสามารถบอกจำนวนเซลล์เม็ดเลือดที่นับได้ นั้นเอง ขนาดของเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับปริมาณของเซลล์เม็ดเลือด และทำให้สัญญาณ (pulse) ซึ่งแปลงเป็นจำนวนเซลล์และขนาดของเม็ดเลือด สำหรับการนับจำนวนเม็ดเลือดเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย จะได้ค่าปริมาตรเม็ดเลือดแดงโดยเฉลี่ย (MCV)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# กระบวนการสร้าง และเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

ในบทนี้จะกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นรูพรุน อุปกรณ์ตรวจนับ เทคนิคที่ใช้ในการหาค่า ความพรุน เครื่องมือในการวิเคราะห์พื้นผิว และเครื่องมือในการวัดผล

### 4.1 กระบวนการสร้าง

#### 4.1.1 การสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

การสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี หรือที่เรียกว่า แอนโนไดซ์เซชัน เป็นวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถควบคุมปฏิกิริยาในการกัดเพื่อทำให้เกิดชั้นรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ ความพรุน และความหนาตามความต้องการได้ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์ เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้ง เนื่องจากใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ และสามารถทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งใช้ในกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดี่ยวในแนวตั้งนี้จะประกอบด้วย แผ่นซีลิกอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ขั้วแคโทดจะจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แผ่นซีลิกอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยจะใช้โอริง (O-ring) เป็นส่วนป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซลล์ ต่อจากนั้นก็ทำการเท

สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี และทำการป้อนกระแสไฟฟ้าบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นขั้วลบจะจมอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้านี้เองก็จะทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดด้วยโดยเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันที่ได้ให้ความสนใจคือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันซึ่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้บริเวณผิวของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก

#### 4.1.2 การสร้างอุปกรณ์ตรวจนับ

ชั้นรูพรุนที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจนับในงานวิจัยนี้ จะเลือกใช้การสร้างด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชั้นรูพรุนให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น และสามารถควบคุมความหนาของชั้นรูพรุนได้อีกด้วย

##### ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์ตรวจนับ

##### 1. การเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

ใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น มีระนาบ (100) สภาพด้านทาน 1-2 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาของแผ่นซิลิคอนเท่ากับ 450 ไมโครเมตร

##### 2. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น

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

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

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

- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- ต้มในไตรโคโรเอททีลีน (trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดไขมัน

- ล้างด้วยอะซีโตน (acetone) ในเครื่องล้างความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว เป็นเวลาแก้วละ 5 นาที

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

##### 3. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้านหลังแผ่นซิลิคอน

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำขั้วด้านหลังของอุปกรณ์ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่องระเหยสารด้วยความร้อนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญญากาศ (vacuum evaporator) ซึ่งสามารถทำการเคลือบ โลหะอลูมิเนียมที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนได้ความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร

#### 4. กระบวนการซินเตอร์ริง

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้านหลังแผ่น ไปทำการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนให้ระหว่างกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการวางแผ่นซิลิคอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 L/min อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที

#### 5. การสร้างชั้นรูพรุน

โดยการนำเอาแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ข้างต้น ไปวางตรงตำแหน่งบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ลงไปในเซลล์ไฟฟ้าเคมี นำขั้วอิเล็กโตรดจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วลบให้กับขั้วอิเล็กโตรดที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้น มีผลทำให้ที่บริเวณของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความพรุนของรูพรุนก็คือ เงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ระหว่างกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน อันได้แก่

- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแอนโนไดซ์เซชัน
- เวลาที่ใช้ในการแอนโนไดซ์เซชัน

หลังจากกระบวนการแอนโนไดซ์เซชันเสร็จสมบูรณ์แล้ว จะได้ชั้นของรูพรุนเกิดขึ้นตรงบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นซิลิคอน

#### 6. การทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนหลังจากการสร้างชั้นรูพรุน

นำแผ่นซิลิคอนออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี ไปผ่านการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งสุดท้าย โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- แช่แผ่นซิลิคอนในแอลกอฮอล์เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดชะล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่ในชั้นรูพรุน

#### 7. การสร้างขั้วอลูมิเนียมด้านหน้าโดยการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสูญญากาศ

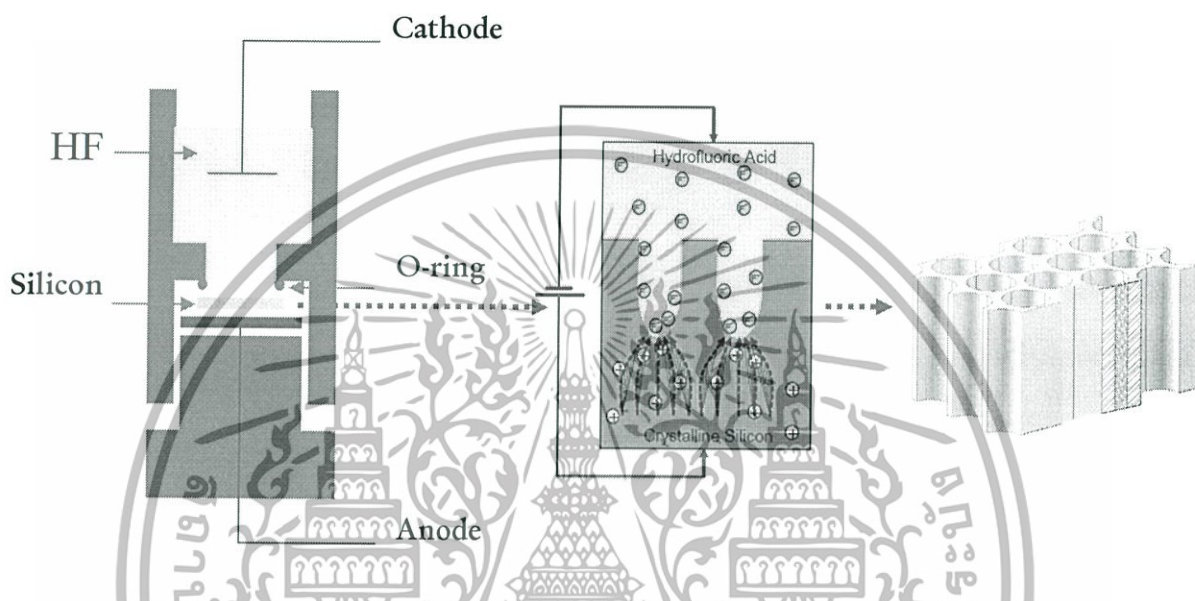
หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวของแผ่นซิลิคอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนบริเวณที่มีชั้นรูพรุน โดยใช้มาสก์สำหรับทำขั้วโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 8. กระบวนการซินเตอร์ริง

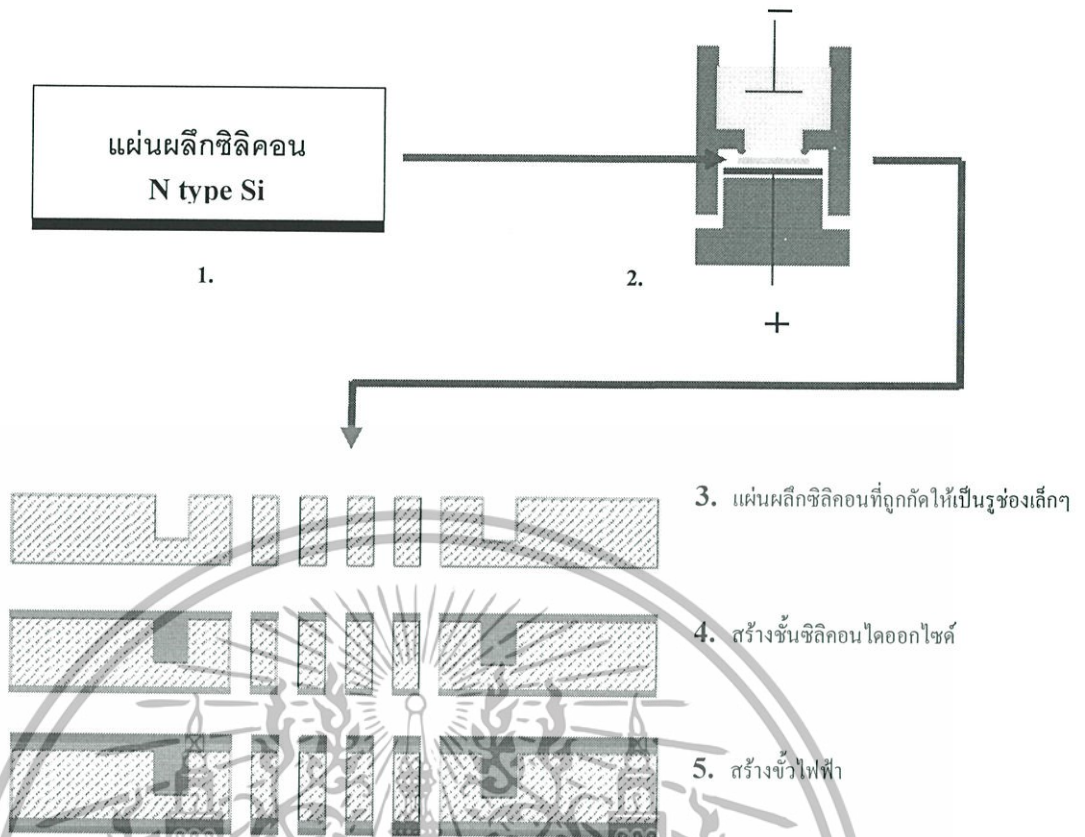
นำแผ่นซิลิคอนที่ทำขั้วลุ่มิเนียมด้านหน้าไปทำการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะลุ่มิเนียมที่สัมผัสกับเนื้อเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยการวางแผ่นซิลิคอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 L/min อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที

ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างช่องเล็กๆขึ้นโดยใช้วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยเนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกกัดเพื่อให้เกิดรูช่องเล็กๆ เกิดขึ้น



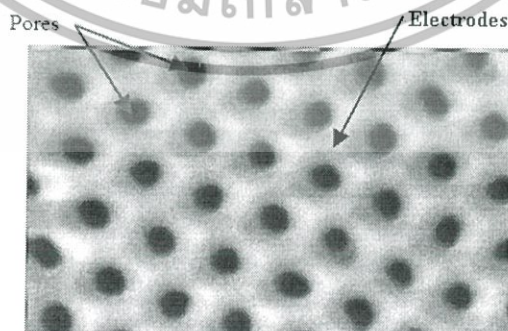
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี และภาพโครงสร้างของช่องแคบเล็กๆที่เกิดขึ้นในแผ่นผลึกซิลิคอน

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการ Oxidation มาใช้งานสร้างเป็นวัสดุปิดกั้นกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองในเซ็นเซอร์ตรวจจับ โดยกระบวนการสร้างและโครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของเซ็นเซอร์ตรวจจับชนิดนี้เป็นโครงสร้างอย่างง่าย และเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากการสร้างรูช่องแคบเล็กๆในแผ่นผลึกซิลิคอนนั้นสามารถสร้างได้ลงบนแผ่นซิลิคอนได้โดยตรง ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อนด้วยเทคนิคการกัดทางไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 4.3 กระบวนการสร้างและภาพตัดขวางของผลึกซิลิคอนและรูช่องในชั้นเซอรัตรวงนั้บ

โดยกระบวนการสร้างจะเริ่มต้นจากแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด N ระบาย 100 สภาพความต้านทาน ตั้งแต่ 0.01-30 โอห์ม-เซนติเมตร (การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด N มีผลต่อการสร้างรูช่องว่างที่มีขนาดที่แตกต่างกันออกไป) โดยจะนำแผ่นผลึกซิลิคอนไปสร้างรูช่องเล็กๆด้วยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการ Oxydation เพื่อสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ปกคลุมแผ่นผลึกซิลิคอน ขั้นตอนต่อไปจะทำการสร้างขั้วโลหะไฟฟ้าทั้งสองด้าน ในที่สุดก็จะได้โครงสร้างทั้งในส่วนของผลึกซิลิคอนที่มีขั้วอิเล็กโทรดเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน และรูช่องเล็กๆที่ได้จากการกัดทางไฟฟ้าเคมี ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพโครงสร้างด้านบนในส่วนที่เป็นรูช่องว่างของเซอรัตรวงนั้บเม็ดเล็อด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด

### 4.2.1 เทคนิคการหาความพรุนของชั้นรูพรุน

การวัดหาค่าความพรุนของชั้นรูพรุน ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน โดยค่าความพรุนของวัสดุใดๆ สามารถหาได้ดังนี้

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

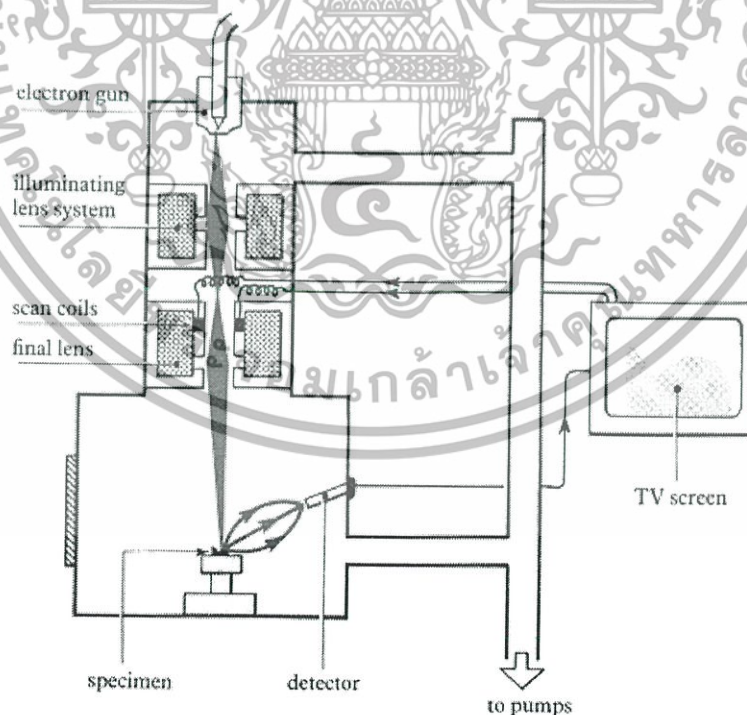
โดยที่  $m_1$  คือ น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นก่อนการเกิดรูพรุน

$m_2$  คือ น้ำหนักของวัสดุหลังการเกิดรูพรุน

$m_3$  คือ น้ำหนักของวัสดุที่เหลือหลังจากการลอกชั้นความพรุนออก

### 4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิว และศึกษาโครงสร้างของชั้นรูพรุน เครื่อง SEM นี้มีจุดเด่นอยู่ที่กำลังขยายสูงถึง 20 ถึง 500,000 เท่า จึงสามารถศึกษาพื้นผิวที่มีขนาดเล็กได้ดี โดยส่วนประกอบของเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 การทำงานของเครื่อง SEM จะเริ่มจาก แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ให้อิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง เลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 kV โดยอิลลูมิเนตเลนส์ (illuminating lens system) ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิวของวัสดุ คลายกับการกวาดรูปบนจอโทรทัศน์ และเลนส์ตัวสุดท้ายทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากสแกนคอยล์ให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ก่อนถึงตัววัสดุ เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัสดุจะให้สัญญาณออกมา ซึ่งสัญญาณต่างๆ จะถูกตรวจจับและถูกนำไปแสดงผลที่จอภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลอง และผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการทดลองในการสร้างชั้นรูพรุน และผลการตรวจนับ ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

#### 5.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกในการสร้างชั้นรูพรุน

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 ในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการเอโนไลซ์เซชัน

##### 5.1.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์

ทำการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการเอโนไลซ์เซชัน โดยใช้ เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47.8%) ต่อน้ำบริสุทธิ์ เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ จะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนรวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การสร้างชั้นรูพรุน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์เป็น 4:1 โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1 สังเกตได้ว่า ขณะทำการสร้างชั้นรูปพรุนจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนเป็นจำนวนมากที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ส่งผลทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของชั้นรูปพรุน แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 พื้นผิวของชั้นรูปพรุนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์เป็น 4:1 เกิดชั้นรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

### 5.1.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอล

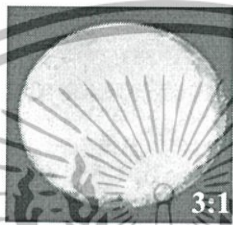
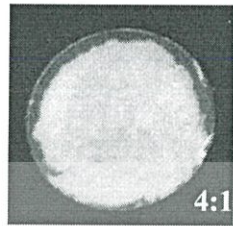
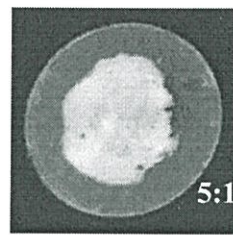
ทำการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดเซชัน โดยใช้ เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47.8%) ต่อเอทานอล (100%) เป็น 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 และ 1:1 โดยปริมาตรตามลำดับ ได้ช่วยลดการเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การสร้างชั้นรูพรุน อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร

จากรูปที่ 5.3 สังเกตได้ว่าขณะทำการสร้างชั้นรูพรุนจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนเป็นจำนวนน้อย ส่งผลทำให้ชั้นรูพรุนที่ได้มีความสม่ำเสมอมากกว่าชั้นรูพรุนที่ได้จากอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากเอทานอลไปช่วยลดแรงตึงผิวของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำให้ลดจำนวนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่ บริเวณผิวหน้าของแผ่นซีลิกอนซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถเข้าถึงผิวหน้าของแผ่นซีลิกอนได้ดี จึงได้ชั้นรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 พื้นผิวของชั้นรูปพรุนที่อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.4 สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วน 4:1 มีความสม่ำเสมอมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ พร้อมทั้งมีโครงสร้างที่ไม่เปราะบางแตกหักง่าย ซึ่งที่อัตราส่วน 3:1, 2:1, 1:1 มีโครงสร้างที่เปราะบางแตกหักง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการสร้างชั้นรูพรุน

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



รูปที่ 5.5 พื้นผิวของชั้นรูพรุนที่เวลาในการสร้างต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.5 สังเกตได้ว่าเมื่อใช้เวลานานขึ้นสีของชั้นพอร์ซเซิลิคอนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน เนื่องจากใช้เวลาในการกัดเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของรูพรุนจึงถูกกัดนานขึ้นส่งผลทำให้ความพรุนของชั้นรูพรุนมีเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้สีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน

### 5.2.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นรูพรุนด้วยเครื่อง SEM

ทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของชั้นรูพรุนที่สร้างโดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ ซึ่งได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 5.6-5.13



รูปที่ 5.6 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

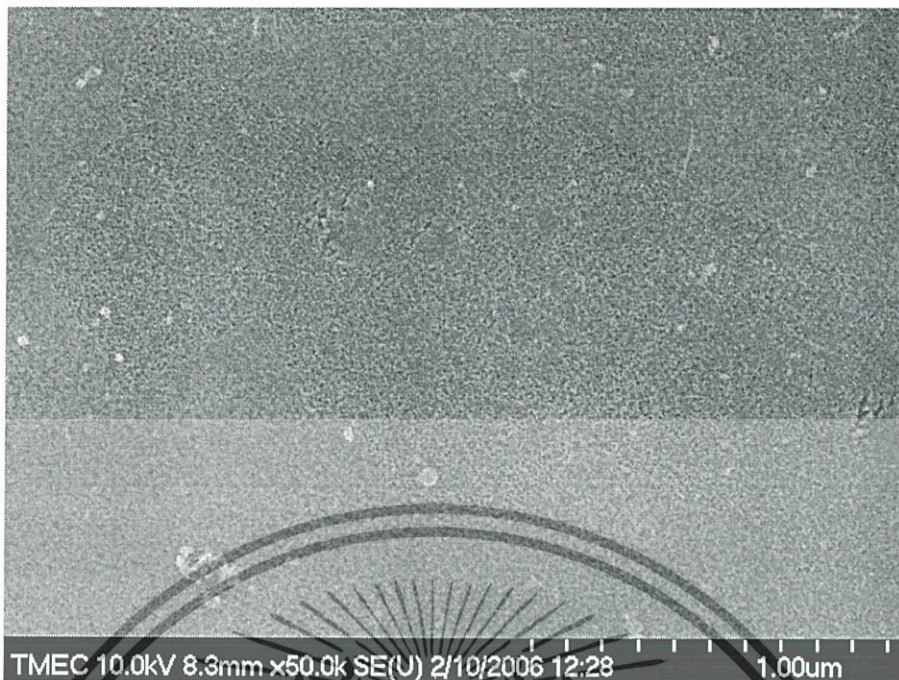


รูปที่ 5.7 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที



รูปที่ 5.8 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

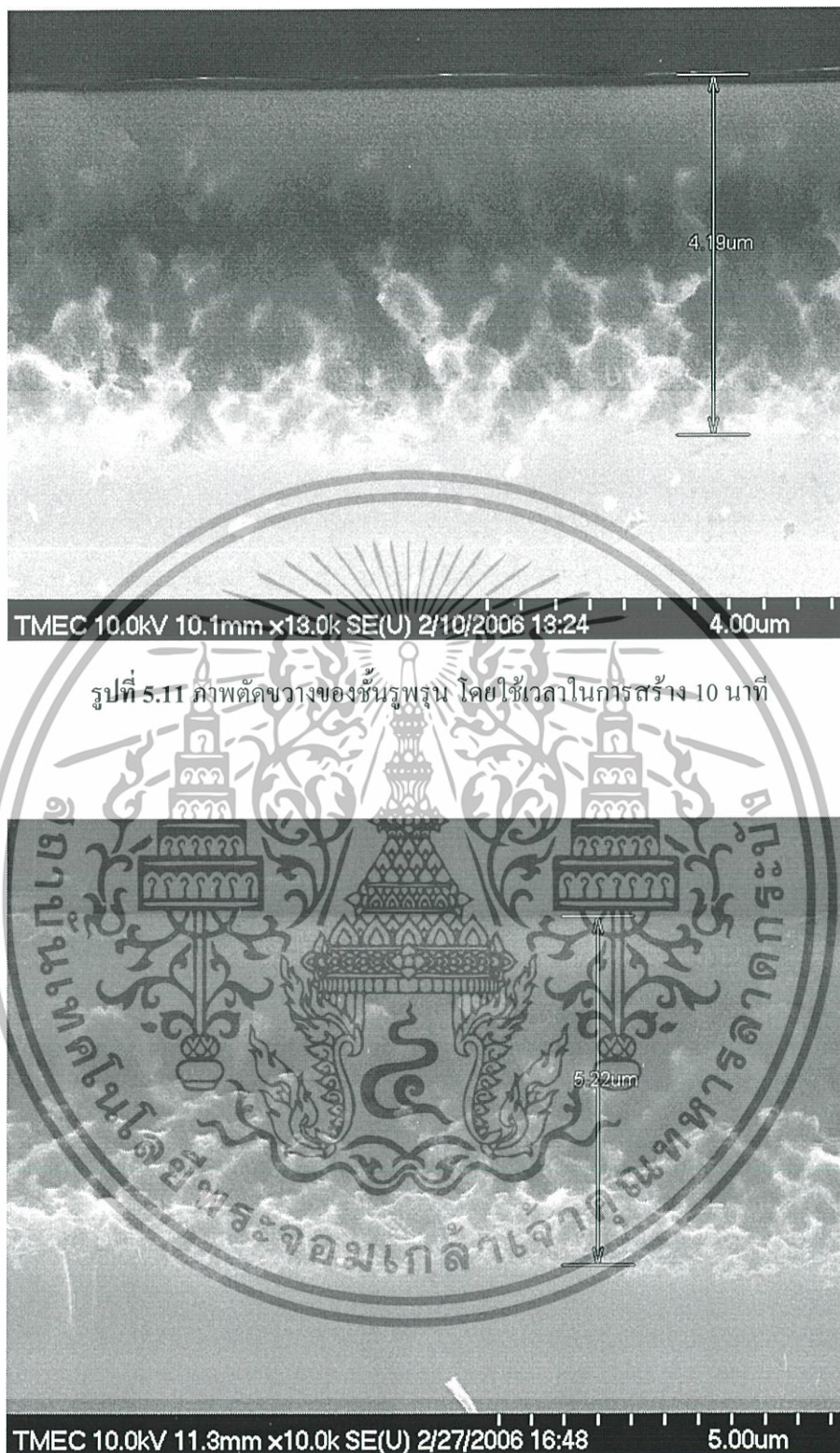


รูปที่ 5.9 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที



รูปที่ 5.10 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 5 นาที

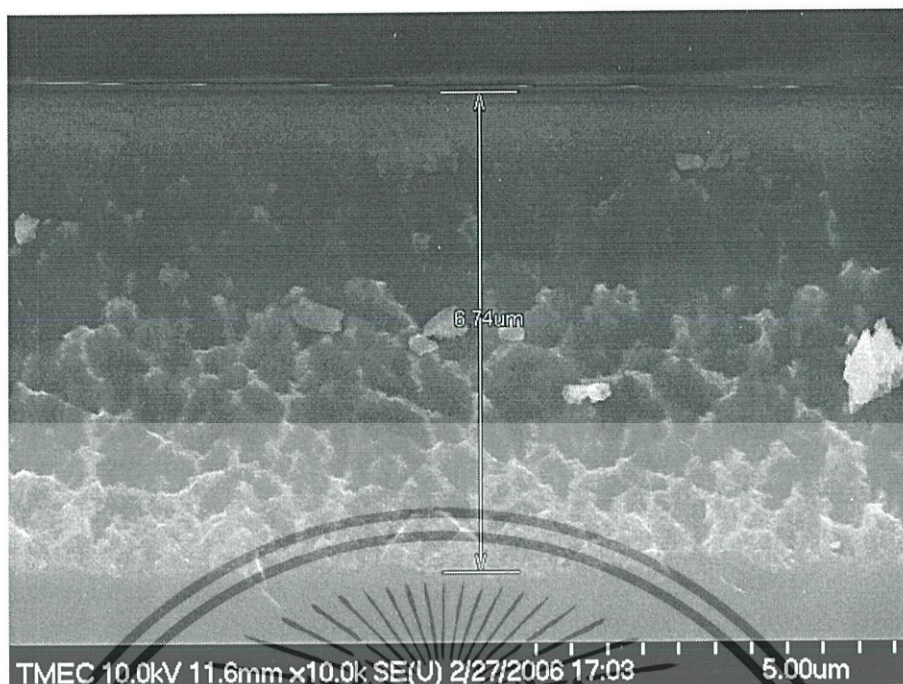
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 10 นาที

รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



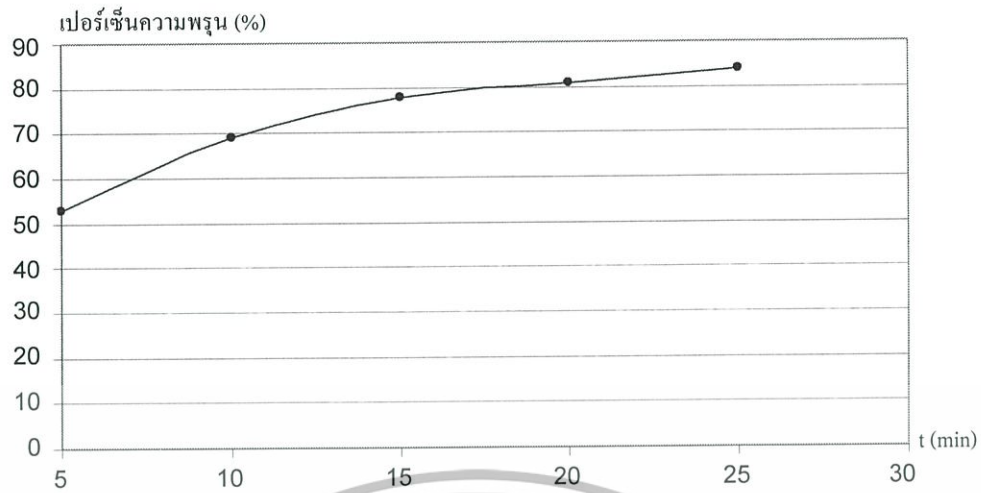
รูปที่ 5.13 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้เวลาในการสร้าง 20 นาที

จากรูปที่ 5.6-5.9 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้พื้นผิวของชั้นรูพรุนถูกกัดและทำให้รูพรุนของชั้นรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากรูปที่ 5.10-5.13 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นรูพรุนมีความหนาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลานานในการแอนโนไดซ์เซชันมากขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการกัดชั้นรูพรุนมากขึ้น ส่งผลทำให้รูพรุนของชั้นรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น และความหนาของชั้นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น

### 5.2.2 การศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นรูพรุน

ทำการศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นรูพรุนที่สร้างโดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ โดยอ้างอิงความพรุน และความหนา จากรูปที่ 5.6 ถึง 5.13 และคำนวณหาค่าความพรุนจากสมการเปอร์เซ็นต์ความพรุน โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.1) แสดงดังรูปที่ 5.14-5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นรูพรุนกับเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นรูพรุนกับเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน

จากรูปที่ 5.14-5.15 เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นรูพรุนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มขึ้น และมีผลทำให้ชั้นรูพรุนมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงว่าเวลาในการแอโนไดซ์เซชันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งเปอร์เซ็นต์ความพรุนและความลึกของชั้นรูพรุนด้วย

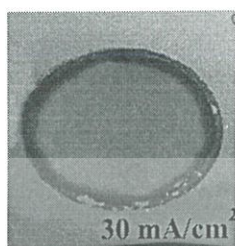
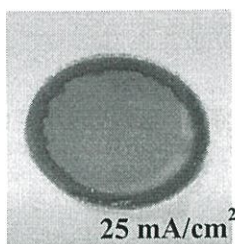
### 5.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูพรุน

การทดลองนี้ทำการศึกษาถึง ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน 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  $30 \text{ mA/cm}^2$  ได้ชั้นรูพรุน แสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 พื้นผิวของชั้นรูพรุน ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

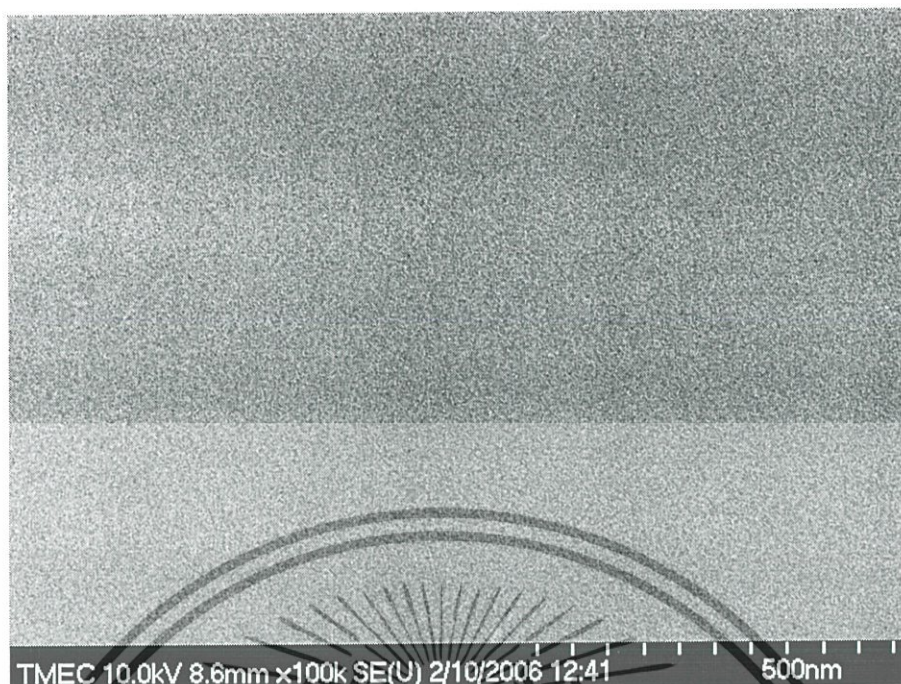


รูปที่ 5.16 (ต่อ) พื้นผิวของชั้นรูพรุนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.16 สังเกตได้ว่าเมื่อใช้เวลานานขึ้นสีของชั้นรูพรุนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน เนื่องจากการใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการกัดเพิ่มมากขึ้น โครงสร้างของชั้นรูพรุนจึงถูกกัดเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ความพรุนของชั้นพอร์ซซีลิกอนมีเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สีพื้นผิวเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำตาลเข้มไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน

### 5.3.1 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างของชั้นรูพรุนด้วยเครื่อง SEM

ทำการศึกษาลักษณะ โครงสร้างของชั้นรูพรุนที่สร้างโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup>, 10 mA/cm<sup>2</sup>, 15 mA/cm<sup>2</sup> และ 20 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ ซึ่งได้นำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 5.17-5.23

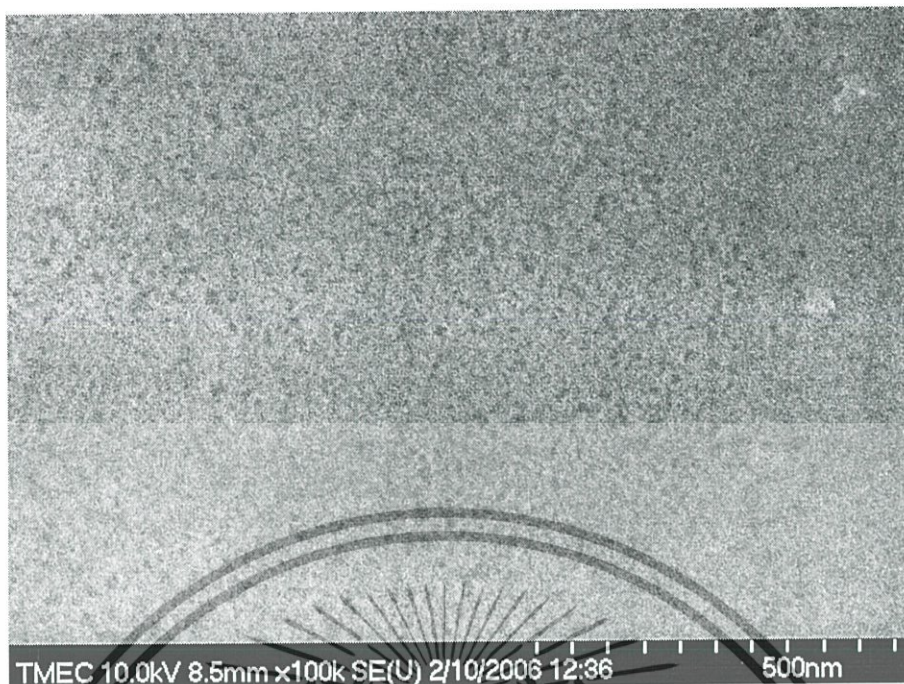


รูปที่ 5.17 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 5.18 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

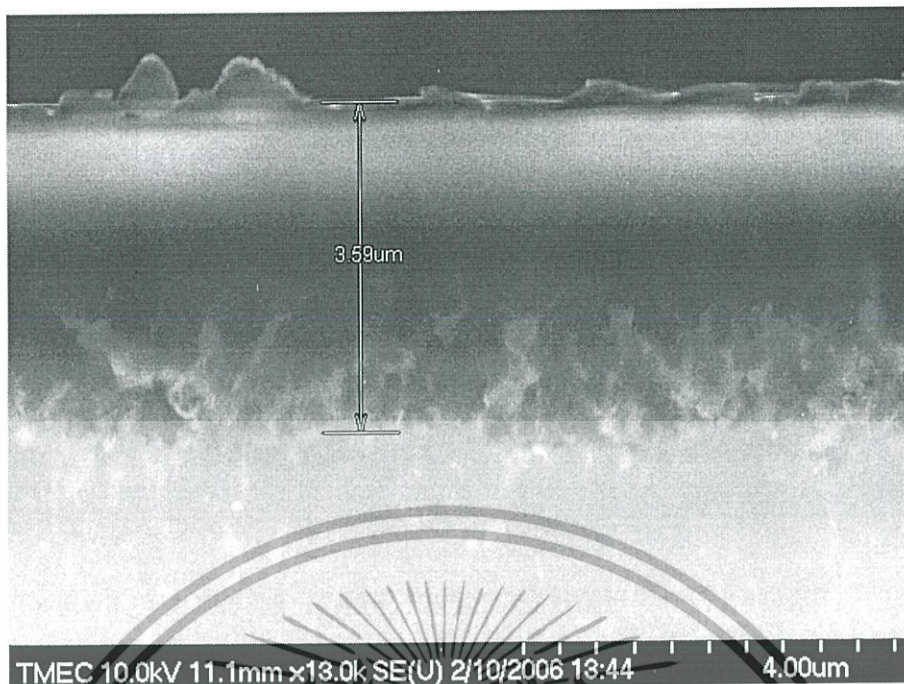


รูปที่ 5.19 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15 mA/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 5.20 ภาพพื้นผิวของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

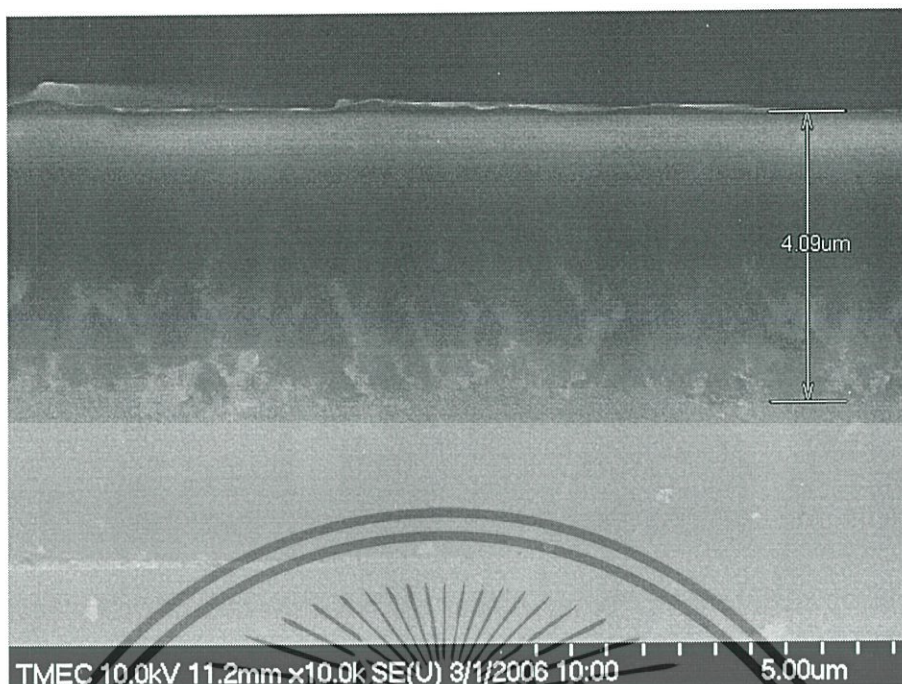


รูปที่ 5.21 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 5.22 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



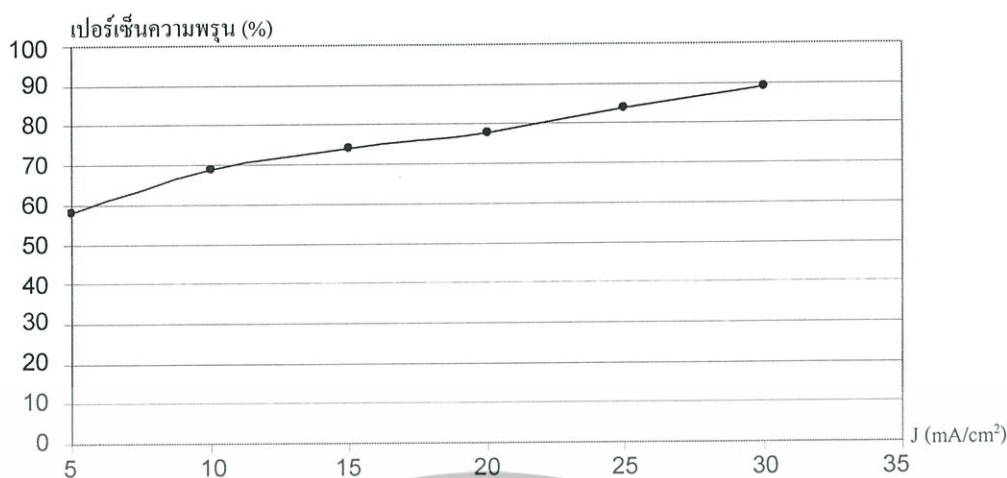
รูปที่ 5.23 ภาพตัดขวางของชั้นรูพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20 mA/cm<sup>2</sup>

จากรูปที่ 5.17-5.20 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดเซชันจะมีผลทำให้พื้นผิวของชั้นรูพรุนถูกกัดและทำให้รูพรุนของชั้นรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากรูปที่ 5.21-5.23 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดเซชันจะมีผลทำให้ความหนาของชั้นรูพรุนยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดเซชันมากขึ้น ทำให้พาหะไอออนชนิดลบขณะทำการกัดมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ความหนาของชั้นรูพรุนยังคงมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการแอนโนไดเซชันใช้เวลานานเท่ากัน

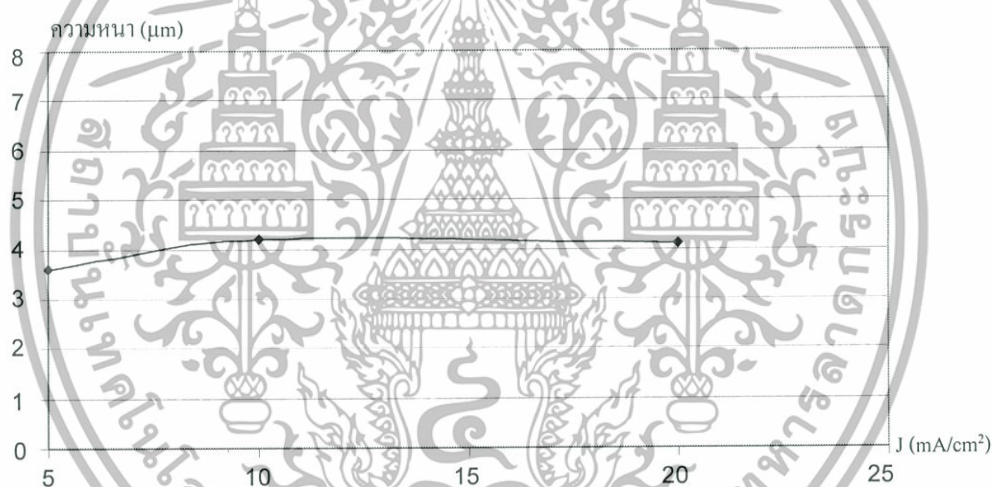
### 5.3.2 การศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นรูพรุน

ทำการศึกษาความพรุน และความลึกของชั้นรูพรุนที่สร้างโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup>, 10 mA/cm<sup>2</sup>, 15 mA/cm<sup>2</sup> และ 20 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ โดยอ้างอิงความพรุน และความหนาจากรูปที่ 5.17 ถึง 5.23 และคำนวณหาความพรุนจากสมการเปอร์เซ็นต์ความพรุนโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2.1) แสดงดังรูปที่ 5.24-5.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นรูปพรุนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนไคซ์เซชัน



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นรูปพรุนกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนไคซ์เซชัน

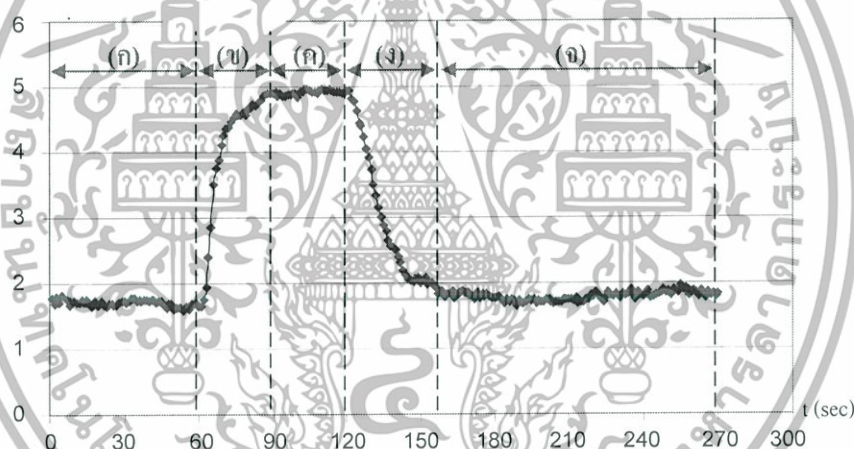
จากรูปที่ 5.24-5.25 เมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูปพรุนด้วยวิธีการเอโนไคซ์เซชันจะมีผลทำให้ชั้นรูปพรุนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มขึ้น แต่ความหนาของชั้นรูปพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนไคซ์เซชันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความพรุนชั้นรูปพรุนแต่ไม่มีผลกับความหนาของชั้นรูปพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของชั้นรูปพรุนในอุปกรณ์ตรวจนับ

การทดลองนี้ศึกษาถึง การตอบสนองต่อการเปิด-ปิด โดยพิจารณาช่วงในการตรวจนับต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.26 ซึ่งสามารถอธิบายช่วงในการตรวจนับต่างๆ ได้ดังนี้

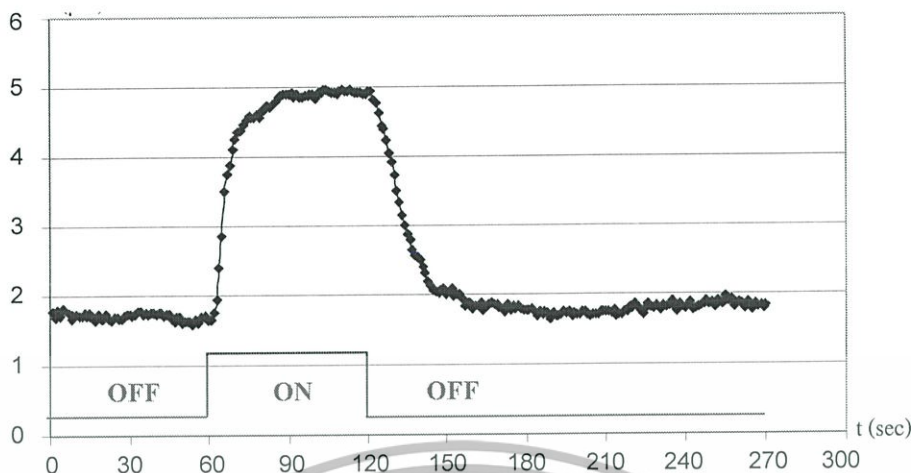
- กระแสไฟฟ้าช่วงก่อนเปิด เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดอนุภาคขนาดเล็กเข้ามาในระบบ
- กระแสไฟฟ้าช่วงเปิด เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดอนุภาคขนาดเล็กเข้ามาในระบบ แล้วเกิดการเพิ่มขึ้นของความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้
- กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิมตัว เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดอนุภาคขนาดเล็กเข้ามาในระบบแล้วเกิดการคงที่ของความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้
- กระแสไฟฟ้าช่วงการปิด เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่ทำการปิดอนุภาคขนาดเล็กเข้ามาในระบบ แล้วเกิดการลงของความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้
- กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม เป็นช่วงที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าระหว่างที่เปิดก๊าซในโตรเจน แล้วเกิดการตกลงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมเหมือนในตอนแรก



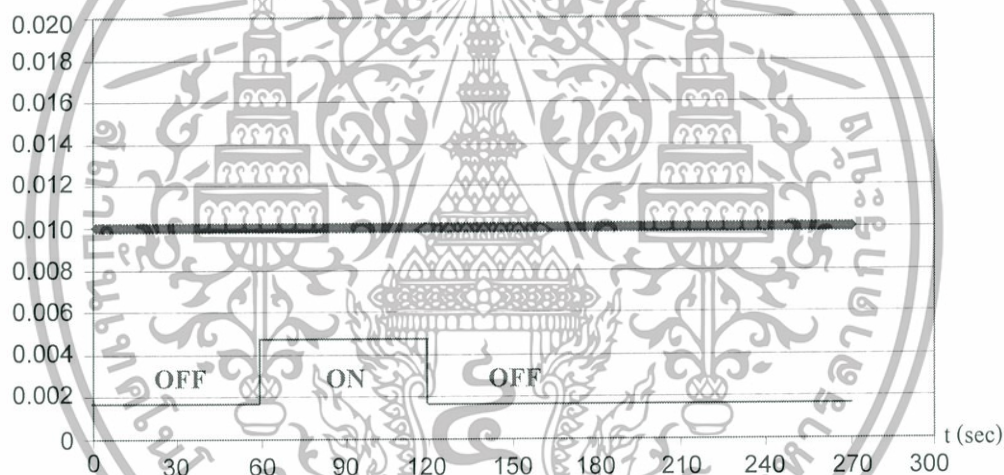
รูปที่ 5.26 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตรวจวัดของชั้นรูปพรุน

- (ก) กระแสไฟฟ้าช่วงก่อนเปิด
- (ข) กระแสไฟฟ้าช่วงเปิด
- (ค) กระแสไฟฟ้าช่วงเกิดการอิมตัว
- (ง) กระแสไฟฟ้าช่วงการปิด
- (จ) กระแสไฟฟ้าช่วงกลับมาจุดเริ่มต้นเดิม

ทำการทดลองวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิด ปิด ของอุปกรณ์ที่มีชั้นรูปพรุน ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นรูปพรุน แสดงดังรูปที่ 5.27-5.28



รูปที่ 5.27 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ที่มีชั้นรุกรุน



รูปที่ 5.28 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นรุกรุน

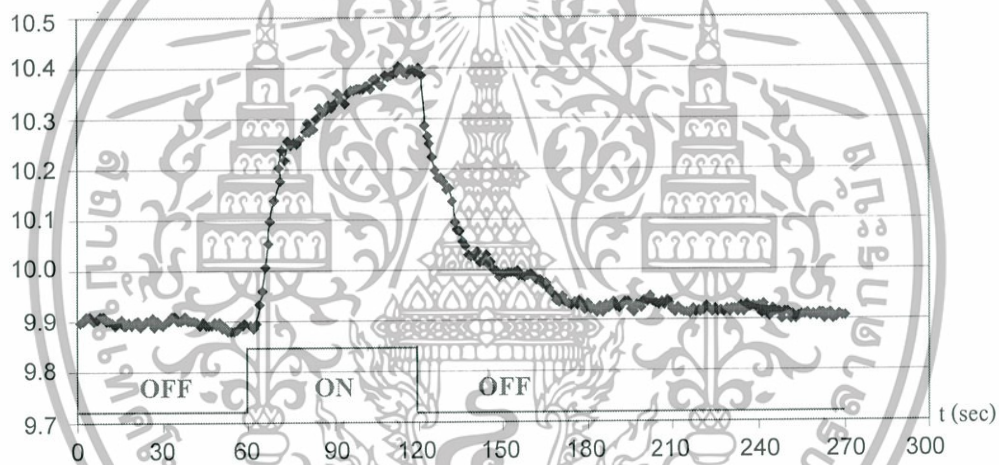
จากรูปที่ 5.27 พบว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นรุกรุนมีการตอบสนองต่อการตรวจวัด แต่จากรูปที่ 5.28 พบว่าอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นรุกรุนไม่มีการสนองต่อการตรวจวัด ซึ่งแสดงว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นรุกรุนสามารถนำไปใช้ในการตรวจนับอนุภาคขนาดเล็กได้ จึงได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบในการสร้างชั้นรุกรุนที่มีต่ออุปกรณ์ตรวจนับ ดังหัวข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการแอโนไดซ์เซชันต่ออุปกรณ์ตรวจนับ

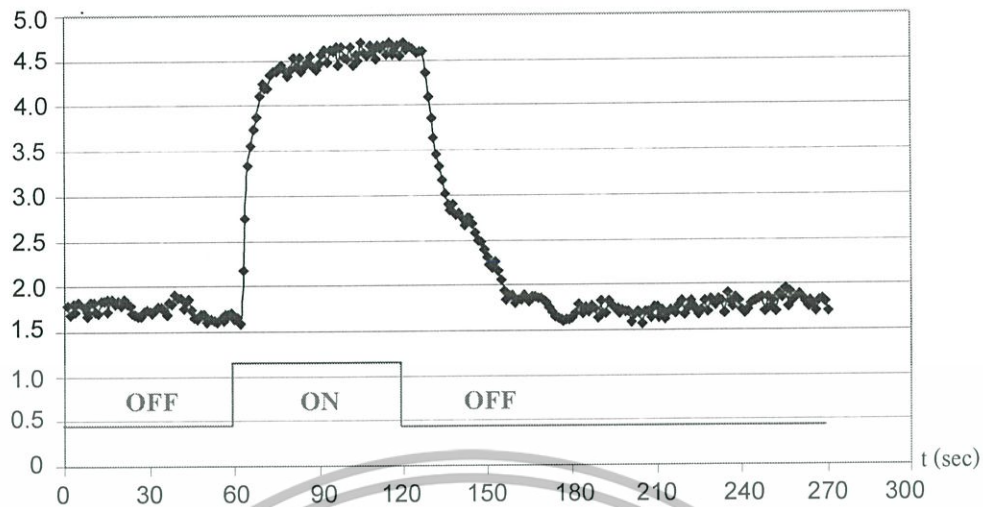
การทดลองนี้ศึกษาถึง ผลของเวลาในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชัน โดยใช้ อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  ใช้เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ แล้ว ทำการต่อขั้วเพื่อทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิดอนุภาคนาขนาดเล็กเข้ามาในระบบ 60 วินาที ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล  $1 \text{ l/min}$  แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ ดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ตรวจนับ ที่สร้างชั้นรูพรุนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  เวลา 5 นาที (เปอร์เซ็นต์ ความพรุนประมาณ 53% ความหนาแน่นประมาณ  $2.12 \text{ }\mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.29



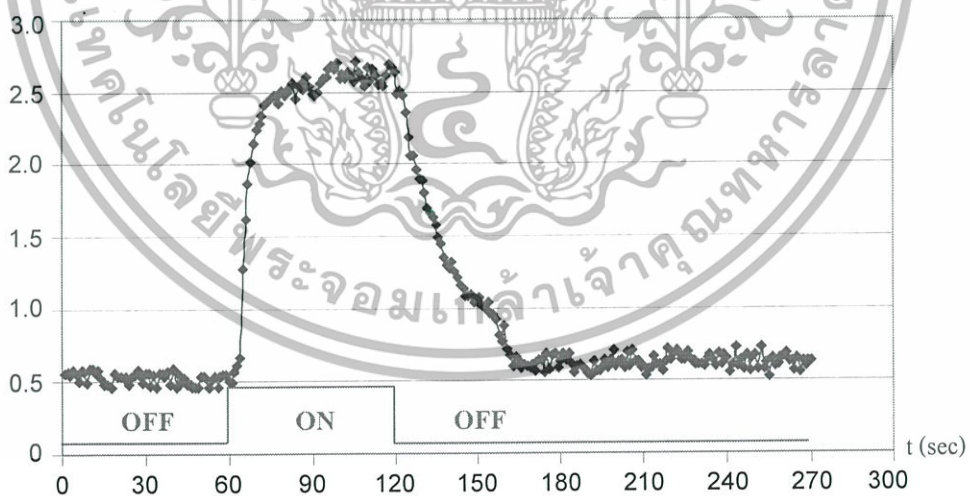
รูปที่ 5.29 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ ที่ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 5 นาที

- อุปกรณ์ตรวจนับ ที่สร้างชั้นรูพรุนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  เวลา 10 นาที (เปอร์เซ็นต์ ความพรุนประมาณ 69% ความหนาแน่นประมาณ  $4.19 \text{ }\mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ  
ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 10 นาที

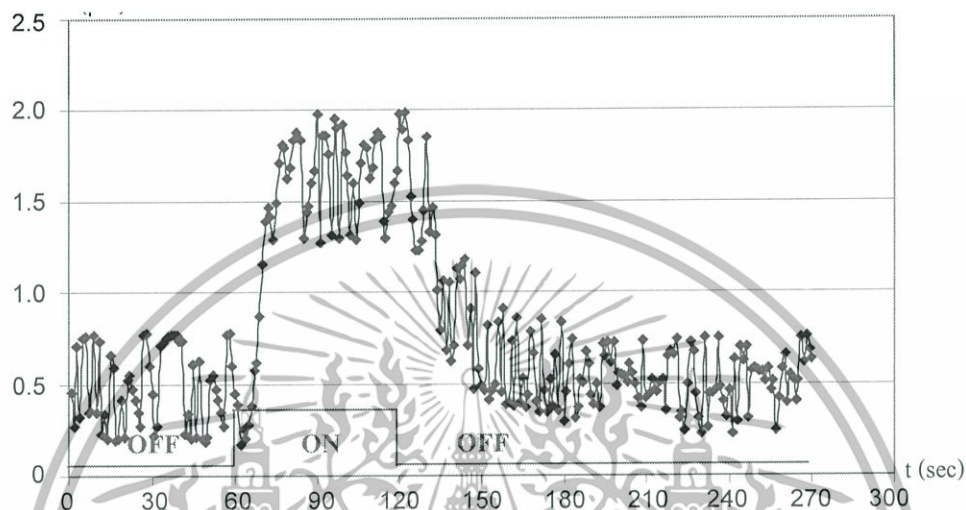
- อุปกรณ์ตรวจนับ ที่สร้างขึ้นรูปทรงแท่ง โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> เวลา 15 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 78% ความหนาแน่นประมาณ 5.22 μm) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ  
ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 15 นาที

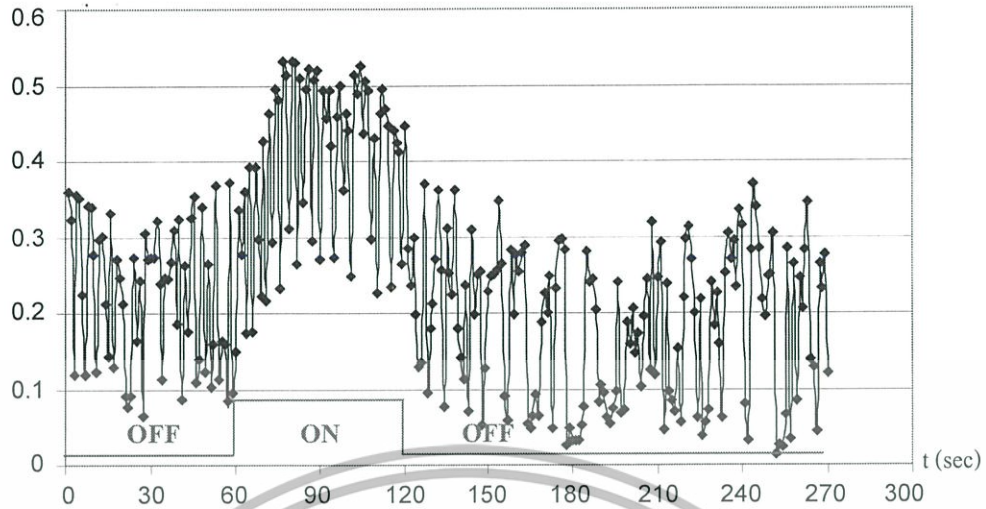
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์ตรวจจับ ที่สร้างชั้นรูปพรุนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  เวลา 20 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 81% ความหนาประมาณ  $6.74 \mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.32



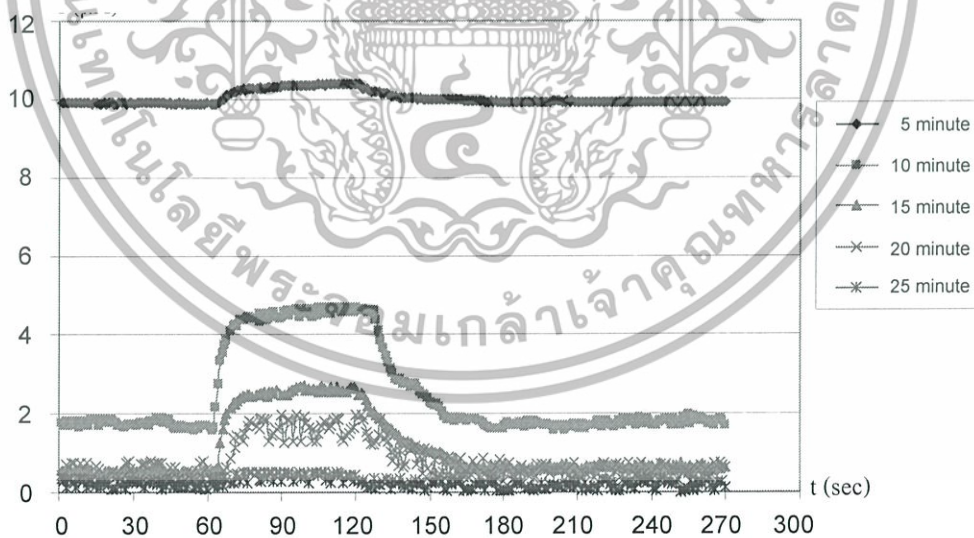
รูปที่ 5.32 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ใช้เวลาในการแอโนไดซ์เซชัน 20 นาที

- อุปกรณ์ตรวจจับ ที่สร้างชั้นรูปพรุนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  เวลา 25 นาที (เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 84%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.33



รูปที่ 5.33 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ  
ที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 25 นาที

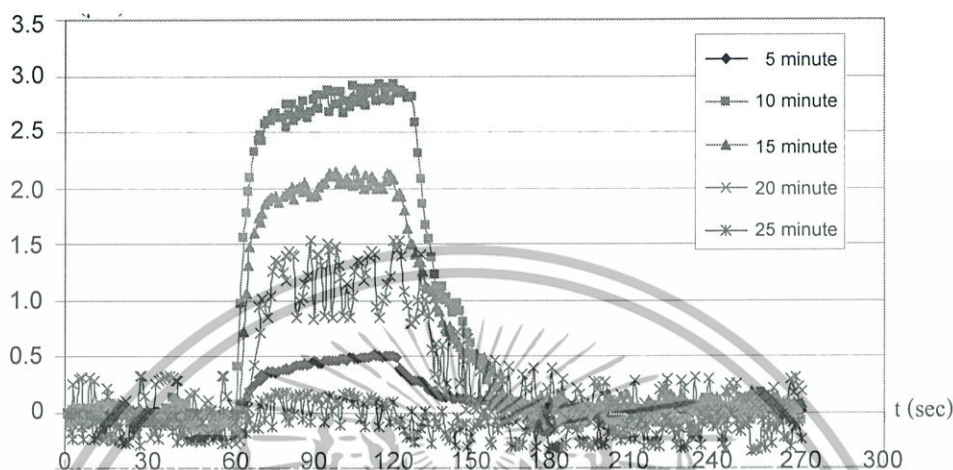
จากรูปที่ 5.29 – 5.33 จึงได้ทำการเปรียบเทียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้รูปทรงที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับในกราฟเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.34 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ  
ที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชันต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ โดยใช้รูปทรงที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชัน 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ตามลำดับ ที่ระดับกระแสไฟฟ้าตอนเริ่มต้นเดียวกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชันต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 5.35

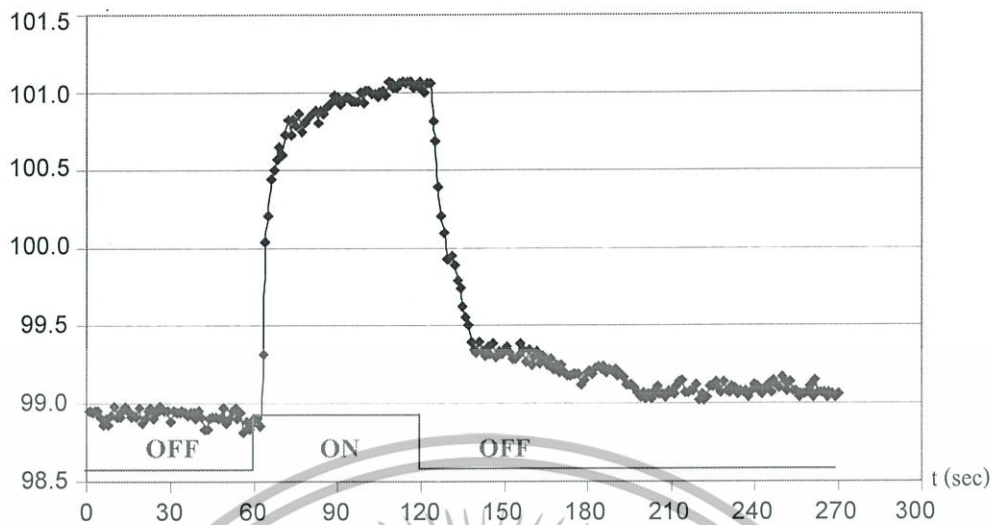


รูปที่ 5.35 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ ที่ใช้เวลาในการแอนโดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน

#### 5.4.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโดซ์เซชันต่อ อุปกรณ์ตรวจจับ

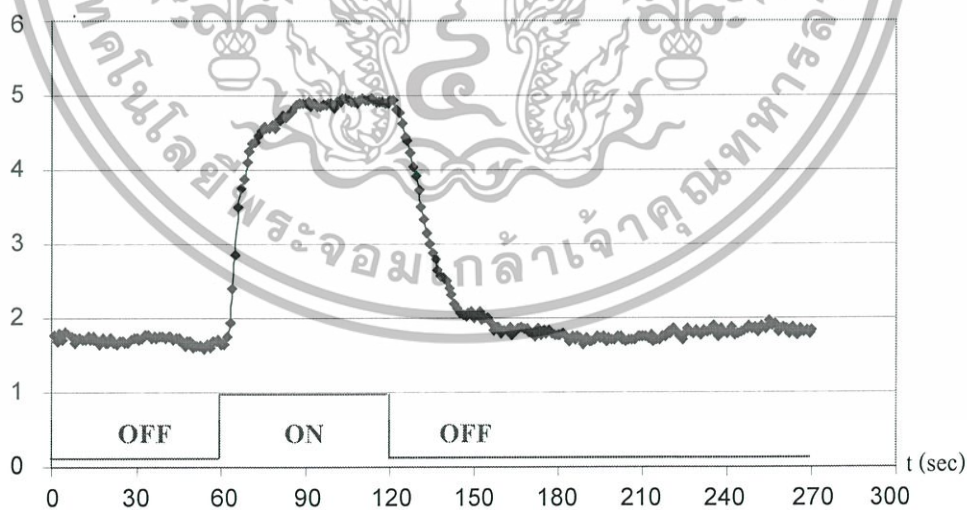
การทดลองนี้ศึกษาถึง ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูปทรงด้วยวิธีการ แอนโดซ์เซชัน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup>, 10 mA/cm<sup>2</sup>, 15 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup>, 25 mA/cm<sup>2</sup> และ 30 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ แล้วทำการต่อขั้วเพื่อทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อ เวลาในการเปิด ปิด ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล 1 l/min แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ ดังต่อไปนี้

- อุปกรณ์ตรวจจับ ที่สร้างชั้นรูปทรงโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm<sup>2</sup> (ความพรุน ประมาณ 58% ความหนาประมาณ 3.59 μm) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.36



รูปที่ 5.36 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ  
ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $5 \text{ mA/cm}^2$

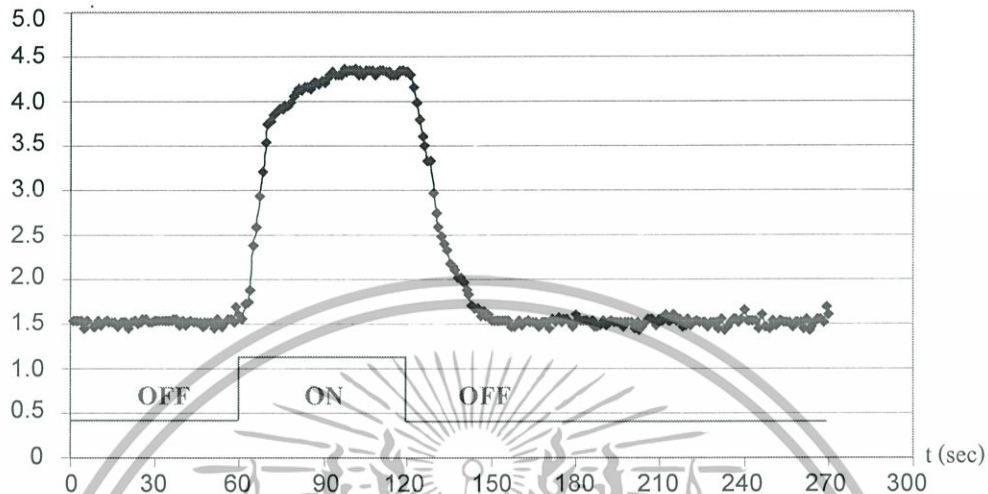
- อุปกรณ์ตรวจนับ ที่สร้างชั้นรูพรุน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 69% ความหนาประมาณ  $4.19 \mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ  
ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $10 \text{ mA/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์ตรวจจับ ที่สร้างชั้นรูพรุน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $15 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 74%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.38

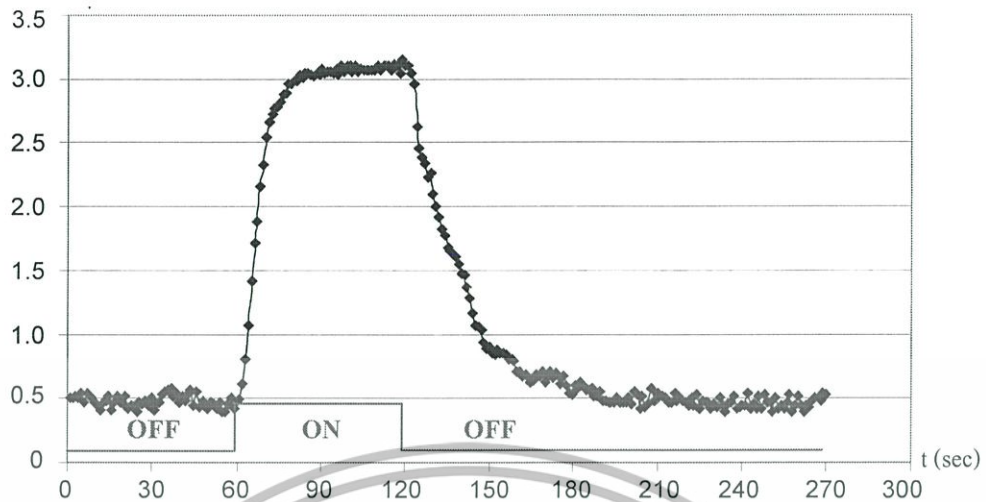


รูปที่ 5.38 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ

ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $15 \text{ mA/cm}^2$

- อุปกรณ์ตรวจจับ ที่สร้างชั้นรูพรุน โดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $20 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 78% ความหนาแน่นประมาณ  $4.09 \mu\text{m}$ ) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.39

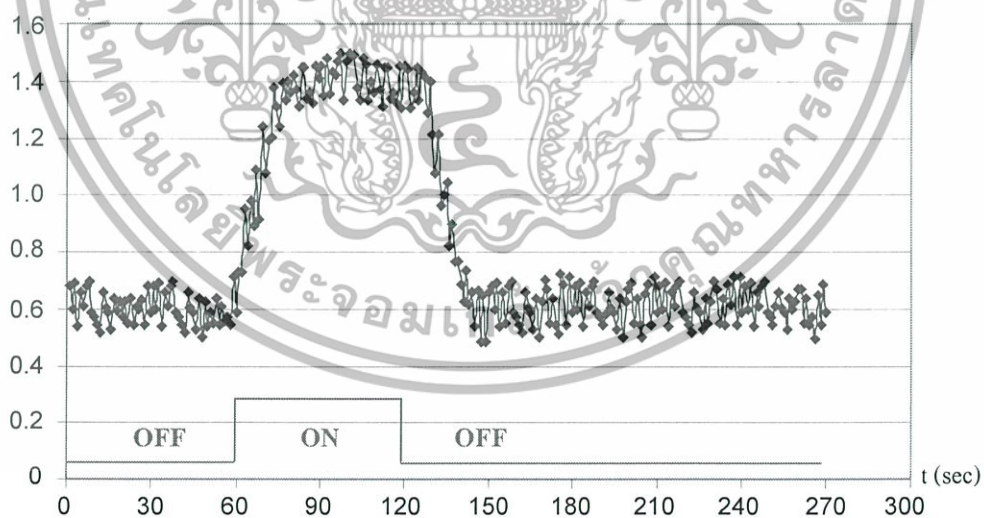
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.39 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ

ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $20 \text{ mA/cm}^2$

- อุปกรณ์ตรวจจับ ที่สร้างขึ้นรูปพรุนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $25 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 84%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดแสดงดังรูปที่ 5.40

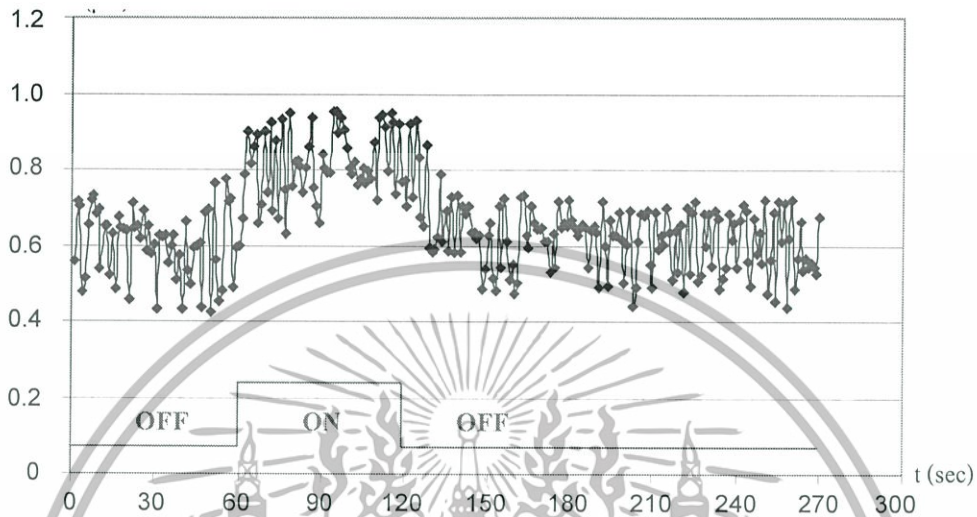


รูปที่ 5.40 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจจับ

ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $25 \text{ mA/cm}^2$

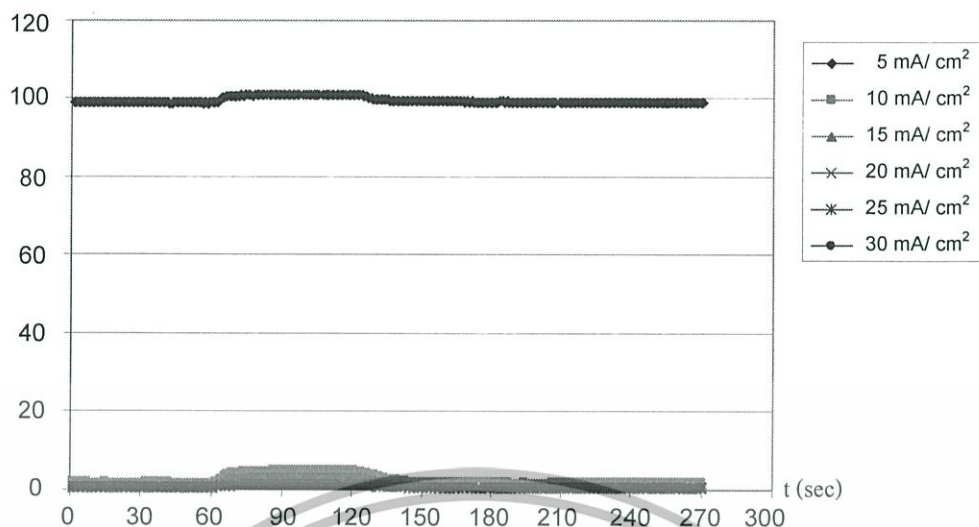
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุปกรณ์ตรวจนับ ที่สร้างชั้นรูพรุนโดยใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $30 \text{ mA/cm}^2$  (ความพรุนประมาณ 89%) นำมาวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด แสดงดังรูปที่ 5.41



รูปที่ 5.41 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $30 \text{ mA/cm}^2$

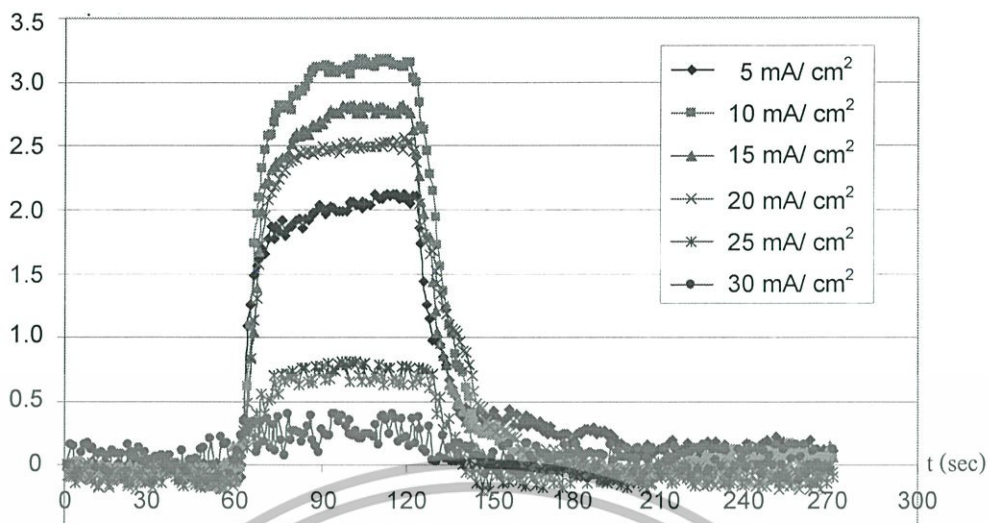
จากรูปที่ 5.36 – 5.41 จึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้รูพรุนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชัน  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ ในกราฟเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.42 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าในต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ  
ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการเอโนโดซ์เซชันต่างๆ กัน

ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิด ของอุปกรณ์ตรวจนับ  
โดยใช้รูพรุนที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$   
และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  ตามลำดับ ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน เพื่อทำการเปรียบเทียบดูปริมาณความ  
ต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการเอโนโดซ์เซชันต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.43 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอโนไดซ์เซชันต่างๆ กัน ที่ระดับอ้างอิงเดียวกัน

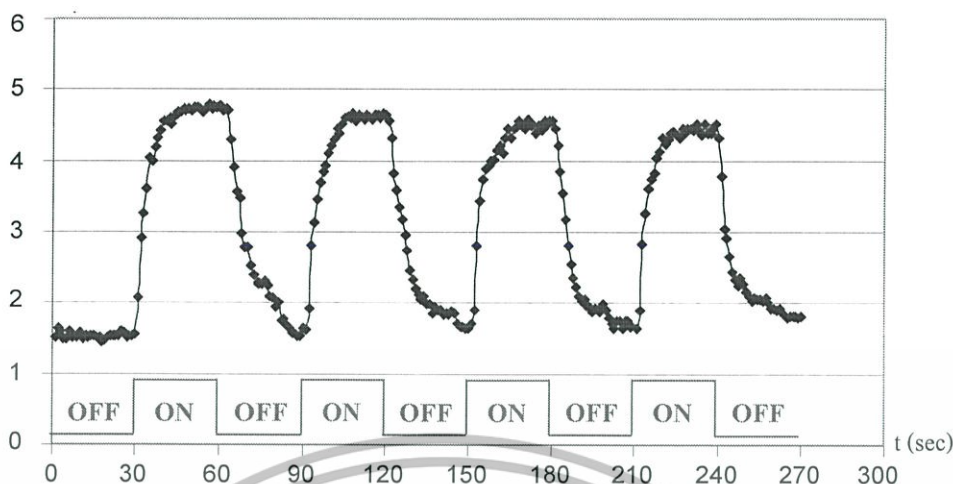
## 5.5 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้ชั้นรูพรุน

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

### 5.5.1 การทดลองเพื่อศึกษาอุปกรณ์ตรวจนับต่อการตรวจนับแบบต่อเนื่อง

การทดลองนี้ศึกษาถึง การตรวจนับแบบต่อเนื่องของอุปกรณ์ตรวจนับ โดยใช้ชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอโนไดซ์เซชันที่ อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  แล้วทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิด ปิด ต่อไปเรื่อยๆ 4 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการไหล  $1 \text{ l/min}$  แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 5.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



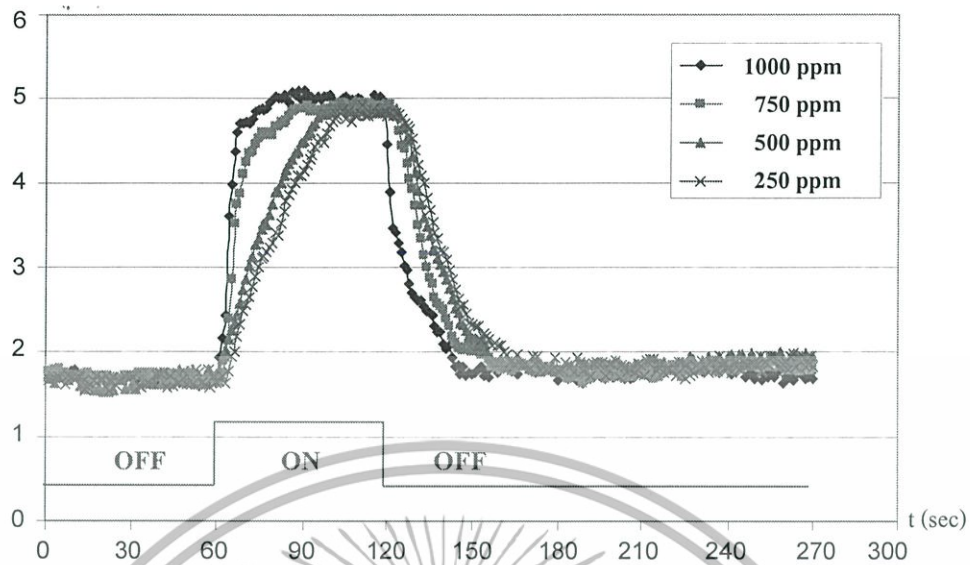
รูปที่ 5.44 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับ  
ที่ทำการวัดแบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 5.44 พบว่า เมื่อทำการตรวจนับแบบต่อเนื่อง ปริมาณความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงการตรวจนับจะมีค่าที่สอดคล้องกัน ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้เซ็นเซอร์สามารถทำการตรวจนับแบบต่อเนื่องได้

#### 5.5.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นต่ออุปกรณ์ตรวจนับ

การทดลองนี้ศึกษาถึง ผลของความเข้มข้น (part per million : ppm) ต่ออุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้เซ็นเซอร์ด้วยวิธีการแอมโอมิเตอร์ที่ อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลเป็น 4:1 โดยปริมาตร เวลา 10 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $10 \text{ mA/cm}^2$  วัดลักษณะสมบัติความต้านทานไฟฟ้าต่อเวลาในการเปิด ปิด ที่อุณหภูมิห้อง แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงเป็น 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm และ 1000 ppm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.45 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลาการเปิด-ปิดของอุปกรณ์ตรวจนับที่ความเข้มข้นต่างกัน

พิจารณาจากข้อมูลทั้งหมดข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm, 1000 ppm จะส่งผลทำให้เวลาในการเพิ่มขึ้นของความต้านทานไฟฟ้าจนเกิดการอิ่มตัวในการตรวจนับจะใช้เวลาประมาณ 45 วินาที, 40 วินาที, 30 วินาที และ 20 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เวลาสั้นลง และทำให้เวลาในการลดลงของความต้านทานไฟฟ้าจนกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมจะใช้เวลาประมาณ 50 วินาที, 45 วินาที, 40 วินาที และ 20 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เวลาสั้นลงเช่นกัน ส่วนปริมาณความต้านไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนเกิดการอิ่มตัวจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้เซ็นเซอร์สามารถทำการตรวจนับที่ความเข้มข้นต่างๆ กันได้

เมื่อทำการศึกษาถึงความไวในการตรวจนับกันนั้น จะพิจารณาค่าความไวในการตรวจนับโดยใช้สมการที่ (6.1)

$$S = I_E / I_N \quad (6.1)$$

โดยที่  $S$  คือ ความไวในการตรวจนับ

$I_E$  คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าขณะทำการตรวจนับ

$I_N$  คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าก่อนทำการตรวจนับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างของชั้นรูพรุน การสร้างชั้นรูพรุน ด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันเพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านการตรวจนับเม็ดเลือด โดยมีโครงสร้าง อุปกรณ์ตรวจนับแบบประกอบด้วย ฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นทีที่สร้างชั้นรูพรุนอยู่บนผิวหน้า และมี ขั้วโลหะที่เป็นอนุภาคนิยมอยู่บนชั้นรูพรุน ซึ่งเป็น โครงสร้างที่ง่าย เหมาะที่จะนำไปใช้สร้างเป็นวงจร รวมต่อไปในอนาคต

ชั้นรูพรุนที่สร้างด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 3 แบบ โดยส่วนแรก คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ผสมกับน้ำบริสุทธิ์ เปรียบเทียบกับเอทานอลที่อัตราส่วน 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  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  จากนั้นนำชั้นรูพรุนที่ได้มาทดสอบความสม่ำเสมอ หากค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน และความลึกของชั้นรูพรุน

จากการทดสอบความสม่ำเสมอ พบว่าชั้นรูพรุนที่สร้างจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับน้ำบริสุทธิ์มีความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงทำการสร้างชั้นรูพรุนที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับเอทานอล พบว่าชั้นรูพรุนที่ได้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากเอทานอลไปช่วยลดแรงตึงผิวของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกทำให้ลดจำนวน ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถเข้าถึงผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนได้ดี จึงได้ชั้นรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ โดยอัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกต่อเอทานอลที่เหมาะสม เป็น 4:1 โดยปริมาตร ทำให้ได้ชั้นรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอและไม่เปราะบางแตกหักง่าย

เมื่อทำการทดลองถึงผลของเวลาในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันจะส่งผลทำให้ชั้นรูพรุนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น และมีความลึกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น และทำการทดลองถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชัน พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชันจะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่ความลึกของชั้นรูพรุนยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชันมากขึ้น ทำให้พาหะโฮลบริเวณผิวซิลิคอนขณะทำการกักมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในการแอนโนไดซ์เซชันนั้นใช้เวลาเท่าเดิม แต่จากการทดลองข้างต้นยังไม่สามารถสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ว่า เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูพรุนเท่าใด ถึงจะเหมาะสมที่จะนำมาตรวจนับ จึงได้ทำการทดลองหาค่าเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการตรวจนับ อุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้ชั้นรูพรุนที่สร้างด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือ ระยะเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันเป็น 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที และ 25 นาที ส่วนที่สอง คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชันเป็น  $5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $25 \text{ mA/cm}^2$  และ  $30 \text{ mA/cm}^2$  จากนั้นนำอุปกรณ์ตรวจนับมาทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจนับของชั้นรูพรุน

จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อการตรวจนับของอุปกรณ์ที่มีชั้นรูพรุนเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นรูพรุน พบว่าอุปกรณ์ที่มีชั้นรูพรุนมีการตอบสนองต่อการตรวจนับ แต่อุปกรณ์ที่ไม่มีชั้นรูพรุนไม่มีการตอบสนองต่อการตรวจนับ แล้วทำการทดลองถึงผลของเวลาในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันต่อการตรวจนับ พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้เวลาในการแอนโนไดซ์เซชัน 10 นาที ใช้เวลาในการอ้อมตัวในการตรวจนับประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการตกกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งเป็นเวลาในการแอนโนไดซ์เซชันที่เหมาะสมที่สุด และทำการทดลองถึงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการสร้างชั้นรูพรุนด้วยวิธีการแอนโนไดซ์เซชันต่อการตรวจนับ พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชัน  $10 \text{ mA/cm}^2$  ใช้เวลาในการอ้อมตัวประมาณ 30 วินาที และใช้เวลาในการกลับมาจุดเริ่มต้นเดิมประมาณ 40 วินาที ซึ่งเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการแอนโนไดซ์เซชันที่เหมาะสมที่สุด

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

จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจนับ โดยใช้ชั้นรูพรุน พบว่าเมื่อทำการตรวจนับแบบต่อเนื่องปริมาณความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงการตรวจนับจะมีค่าที่สอดคล้องกัน และอุปกรณ์ตรวจนับ โดยใช้ชั้นรูพรุนนี้ สามารถทำการตรวจนับที่ความเข้มข้นต่างๆ กันได้

อุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้ชั้นรูพรุนในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างแบบง่ายๆ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นรูพรุนเมื่อมีการตรวจนับ แต่อุปกรณ์ตรวจนับโดยใช้ชั้นรูพรุนนี้มีข้อเสียอยู่ที่มีขั้วไฟฟ้าอยู่บนชั้นรูพรุนส่งผลทำให้รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชั้นรูพรุนมีค่าความต้านทานที่สูง ซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นอย่างมาก จึงควรสร้างให้ขั้วไฟฟ้าอยู่บนเนื้อซิลิคอนเพื่อช่วยลดค่าความต้านทานที่รอยสัมผัสลง

## 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] I. Schechter, M. Ben-Chorin and Kux, "Gas sensing properties of porous silicon," Anal. Chem. 67, pp. 3727-3732, 1995.
- [6] M. Gratzel, "TiO<sub>2</sub> Photocatalytic purification and treatment of water and air," Proc. First Intern. Conf., pp. 23, 1992.
- [7] Z.M. Rittersma, "Recent achievement in miniaturized humidity sensor," Sensors and Actuators , Vol. 96, pp:196-210, 2002.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Seong-Jeen Kin, Sang-Hoon Lee, "Organic vapor sensing by current response of porous silicon layer," IOP Publishing Ltd., pp. 3505-3509, 2001.
- [13] 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.
- [14] Canham L. T., "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafer," Appl. Phys. Lett., Vol. 57, 1046-8, 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] W. Lang, P. Steiner and H. Sandmaier, "Porous silicon : a novel material for microsystem," Sensor and actuators, A 21-23, 835-9, 1995.
- [16] Leigh canham, "Properties of porous silicon," IEE Inspec, pp.1-43, 1997.
- [17] 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.
- [18] C. Tsai, K.H. Li, D.S. Kinosky, 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.
- [19] 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.
- [20] H.F. Wolf, "Semiconductors willey-interscience a division of John & Sons," pp. 50, 1971.
- [21] H. Takagi, M. Mitome, R. Yano and T. Nakagiri, "Microwave plasma depositon," Solid State Phys, Vol. 27, pp. 875, 1992.
- [22] Y. Kanemitsu, T. Ogawa, K. Shiraishi and K. Takeda, "Nanocrystalline: Laser breakdown," Phy. Rev., B48 , pp. 4883, 1993.
- [23] T. Kawaguchi and S. Miyazima, Japan J., "Laser breakdown in pure SiH<sub>4</sub>," Appl. Phys. Vol. 32, pp. L215, 1993.
- [24] R.E. Hummel, A. Morrone, M. Ludwing and S.S. Chang, "High-frequency spark discharge" Appl. Phys. Lett., Vol. 63, pp. 2771, 1993.
- [25] H.M. Ludwig, E. E. Hummel and M. Stora, "Thin Solid Films," Vol. 255, pp. 103, 1995.
- [26] Z. Gaburro, N. Daldosso and L. Pavesi, "Porous silicon," Dipartimento di Fisica, Università di Trento, Via Sommarive 14, I-38050.
- [27] Y. Kanemitsu, "Light emission from porous silicon and related materials," Physics reports, Vol. 263, No. 1, pp.8, 1995.
- [28] T.E. Jenkin, "Semiconductor science growth and characterization techniques," pp. 177.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

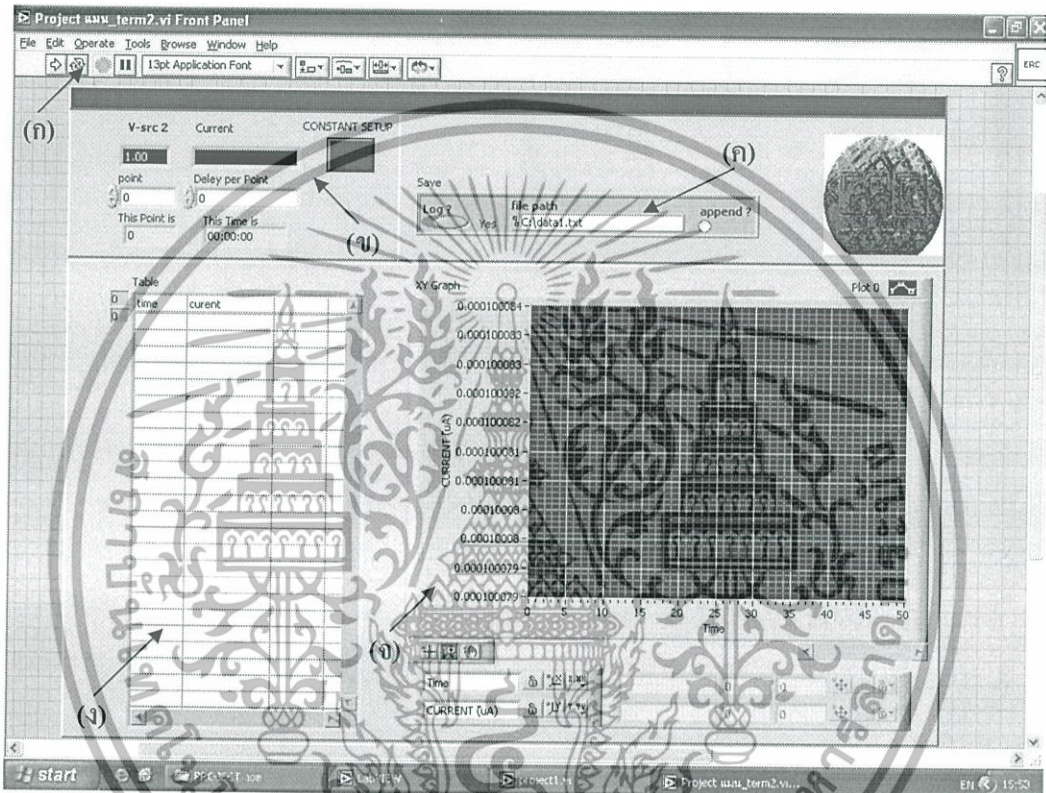
- [29] Y. Kang and J. Jorne, "Porous silicon formation : Morphological Stability Analysis," Appl. Phys. Lett., Vol. 62, No. 8, pp. 2224 – 2226, 1993.
- [30] W. Lang, P. Steiner, H. Sandmaier, "Porous silicon: a novel for Microsystems," Sensor and Actuators A51, pp. 31-36, 1995.
- [31] V. Lehmann and U. Gosele, "Porous silicon formation : A Quantum wire effect," Appl. Phys. Lett., Vol. 58, No. 8, pp. 856 – 858, 1991.
- [32] J. Singh, "Semiconductor optoelectronics physics and technology", McGraw-hill international edition, pp. 339, 1992.
- [33] Roland N. Horne, Henry J. Ramey, Jr., Shubo Shang, Antonio Correa, John Hornbrook, "Improving models of vapor-dominated geothermal fields: The effects of adsorption," New Zealand Geothermal Workshop, pp. 1-6, 1994.
- [34] Greg Thiele, "Characterization of ceramic materials : Por-size distribution," American Ceramic Society Bulletin, Vol. 84, No. 8, 2005.
- [35] Erica J. Wanless and Hugo K. Christenson, "Interaction between surfaces in ethanol : Adsorption, capillary condensation, and solvation forces," Chem. Phys. pp. 2460-4267, 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### โปรแกรมที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้าต่อเวลา

#### ก.1 โปรแกรมที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสต่อเวลา



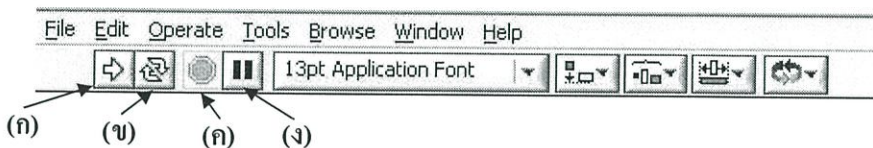
รูปที่ ก.1 ภาพหน้าจอของของโปรแกรมที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสต่อเวลา โดย

- (ก) ส่วนโปรแกรม LabVIEW
- (ข) ส่วนการตั้งค่าการทำงาน
- (ค) ส่วนบันทึกผล
- (ง) ส่วนตาราง
- (จ) ส่วนแสดงกราฟ

จากรูปที่ ก.1 สามารถแบ่งโปรแกรมออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

1. ส่วนโปรแกรม LabVIEW เป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมการทำงานหลักของโปรแกรมที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสต่อเวลา แสดงดังรูปที่ ก.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



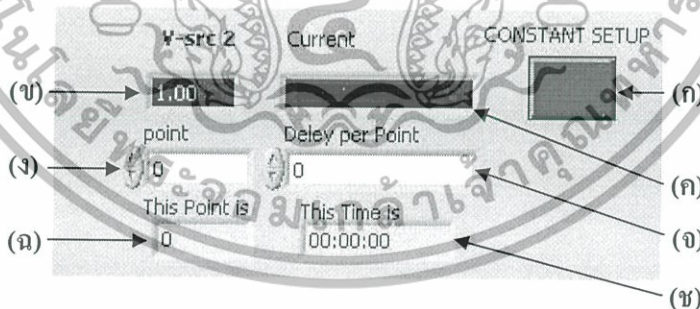
รูปที่ ก.2 ภาพส่วนโปรแกรม LabVIEW โดย

- (ก) สั่งให้โปรแกรมทำงานจนครบรอบ
- (ข) สั่งให้โปรแกรมที่เขียนขึ้นทำงานไปเรื่อยๆ
- (ค) สั่งให้โปรแกรมหยุดการทำงาน
- (ง) สั่งให้โปรแกรมหยุดการทำงานชั่วคราว

ปุ่มในการใช้งานหลักๆ ของโปรแกรมมีดังนี้

- ปุ่ม (ก) จะเป็นการสั่งให้โปรแกรมที่เขียนขึ้นทำงานจนครบรอบ หรือจนกว่าจะครบเงื่อนไขจึงออกจากโปรแกรม
- ปุ่ม (ข) จะเป็นการสั่งให้โปรแกรมที่เขียนขึ้นทำงานไปเรื่อยๆ จนกว่าจะมีการกดปุ่ม (ค) หรือปุ่ม (ง) หากโปรแกรมทำงานครบรอบ หรือครบตามเงื่อนไขแล้ว โปรแกรมที่เขียนขึ้นจะยังไม่ออกจากโปรแกรม แต่จะทำงานวนซ้ำไปเรื่อยๆ
- ปุ่ม (ค) จะเป็นการสั่งให้โปรแกรมหยุดการทำงาน และสามารถทำงานใหม่อีกครั้งเมื่อกดปุ่ม (ก)
- ปุ่ม (ง) จะเป็นการสั่งให้โปรแกรมหยุดการทำงานชั่วคราว และสามารถทำงานต่อจากเดิมเมื่อกดปุ่ม (ง)

2. ส่วนตั้งค่าการทำงานของโปรแกรมวัดลักษณะสมบัติกระแสต่อเวลา แสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 ภาพส่วนตั้งค่าการทำงานของโปรแกรม

- (ก) ปุ่มสั่งยืนยันการการป้อนค่าต่างๆ
- (ข) ช่องกำหนดแรงดัน
- (ค) ช่องแสดงค่าของกระแสที่วัดได้
- (ง) ช่องกำหนดจำนวนจุดของการวัด
- (ฉ) ช่องกำหนดเวลาห่างระหว่างแต่ละจุด
- (ช) ช่องแสดงจุดขณะทำการวัด
- (ช) ส่วนแสดงเวลาขณะทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนต่างๆ ในการตั้งค่าการทำงานของโปรแกรมวัดลักษณะสมบัติกระแสต่อเวลา มีดังนี้

- ปุ่ม (ก) จะเป็นการสั่งยืนยันการการป้อนค่าต่างๆ ผู้การทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสต่อแรงดัน

- ช่อง (ข) จะเป็นส่วนกำหนดแรงดันคงที่ให้กับวงจรเพื่อทำการวัดค่ากระแสที่เวลาต่างๆ

- ช่อง (ค) จะเป็นส่วนแสดงค่าของกระแสที่วัดได้

- ช่อง (ง) จะเป็นส่วนกำหนดจำนวนจุดของการวัดหรือจำนวนครั้งของการวัดค่า

- ช่อง (จ) จะเป็นส่วนกำหนดเวลาห่างระหว่างแต่ละจุดที่ต้องการวัดมีหน่วยเป็นมิลลิวินาที

- ช่อง (ฉ) จะเป็นส่วนแสดงว่า เวลาขณะนั้นกำลังวัดจุดที่เท่าใด

- ช่อง (ช) จะเป็นส่วนแสดงเวลาขณะที่ทำการวัด

### 3. ส่วนบันทึกผล

ส่วนนี้จะช่วยในการบันทึกข้อมูลที่วัดได้ โดยการบันทึกจะต้องกดปุ่ม Log ? ไปที่ Yes แล้วกำหนดตำแหน่งและชื่อไฟล์ที่เราต้องการบันทึก แสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ภาพส่วนบันทึกข้อมูล

### 4. ส่วนตาราง

ส่วนนี้จะแสดงข้อมูลที่วัดได้ออกมาเป็นตารางให้ทราบข้อมูล โดยข้อมูลที่แสดงออกมานี้ จะแสดงเมื่อการทำงานของโปรแกรมสิ้นสุดลงแล้ว ซึ่งค่าในตารางจะมี 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นเวลา และส่วนที่เป็นค่าที่วัดได้

### 5. ส่วนแสดงกราฟ

ส่วนนี้จะแสดงผลของข้อมูลออกมาเป็นกราฟเพื่อให้สะดวกแก่การสังเกตค่า และสามารถดูรายละเอียดของข้อมูลที่วัดออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข**  
**ค่าคงที่ทางฟิสิกส์**

ตารางที่ ข.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ค่าคงที่ของพลังค์	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$	J-sec
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	$c$	$3 \times 10^8$	m/sec
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	$q$	$1.602 \times 10^{-19}$	C
ค่าคงที่โบสตันน์	$k$	$1.38 \times 10^{-23}$	J/K
เปอร์มิติวิตีในสุญญากาศ	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-14}$	F/cm
เปอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ (Si)	$\epsilon_s$	$11.8 \epsilon_0$	F/cm
สภาพคล่องของอิเล็กตรอน (Si)	$\mu_n$	1350	$\text{cm}^2/\text{V-sec}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้