

การสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
โดยวิธีอโนไดเซชันสำหรับใช้เป็นบิตแม่แบบ

Synthesis of Nanotube Titanium Dioxide by Anodization
Method for Bit Pattern Media



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)
ภาควิชาเทคโนโลยีระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์
โดยวิธีอโนไดเซชันสำหรับใช้เป็นบิตแม่แบบ

Synthesis of Nanotube Titanium Dioxide by Anodization
Method for Bit Pattern Media



T147149



กรรวิ วิรันดร
ธิตี แสงอินทร์

b00268228

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 147149
วันเดือนปี 3 ก.ค. 2560

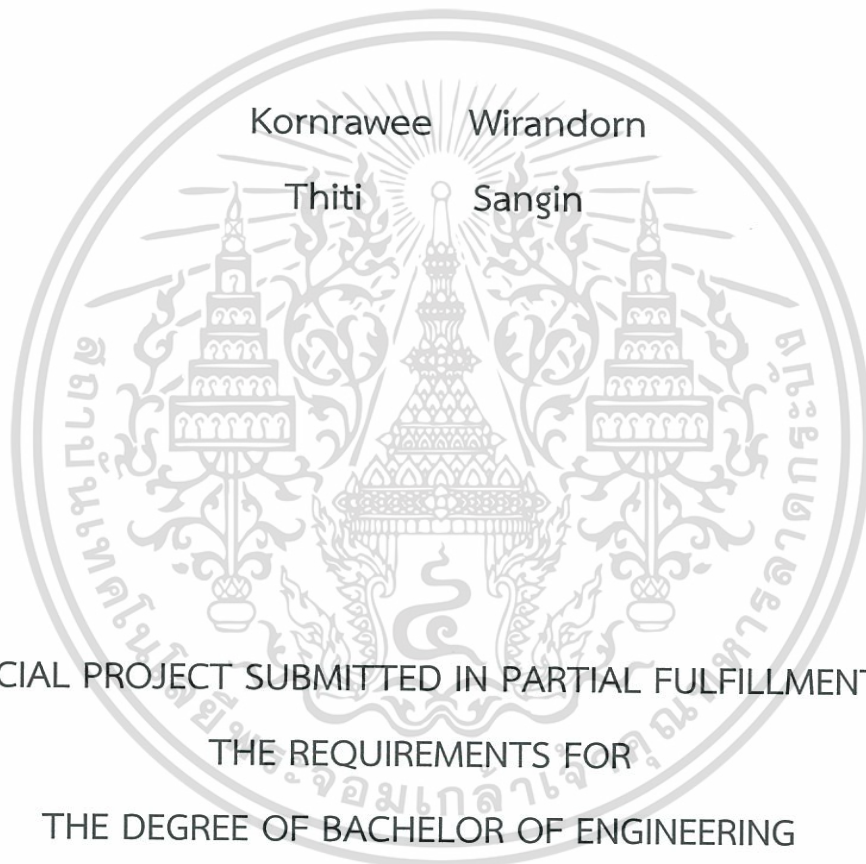
b. 12844216
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)
ภาควิชาเทคโนโลยีระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Synthesis of Nanotube Titanium Dioxide by Anodization
Method for Bit Pattern Media



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR

THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
(MANUFACTURING SYSTEM ENGINEERING)

DEPARTMENT OF MANUFACTURING SYSTEM TECHNOLOGY
COLLEGE OF ADVANCED MANUFACTURING INNOVATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีอโนไดเซชัน
สำหรับใช้เป็นบิตแม่แบบ

Synthesis of Nanotube Titanium Dioxide by Anodization
Method for Bit Pattern Media

ชื่อนักศึกษา

นางสาว กรรวิ วีรันดร รหัสนักศึกษา 55120002

นาย ธิติ แสงอินทร์ รหัสนักศึกษา 55120018

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา

เทคโนโลยีระบบการผลิต





ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ราชศักดิ์ คักदानุภาพ

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
(สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร
บัณฑิต วิศวกรรมระบบการผลิต ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อนรรฆพล แสนทน ประธานกรรมการ	
ดร.วรวิทย์ มรรคเจริญ กรรมการ	
ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร กรรมการ	
ผศ.ดร.ราชศักดิ์ คักदानุภาพ อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีอโนไดเซชัน สำหรับใช้เป็นขั้วแม่แบบ
ชื่อนักศึกษา	นางสาว กรรวี วิรันดร รหัสนักศึกษา 55120002 นาย ธิติ แสงอินทร์ รหัสนักศึกษา 55120018
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	เทคโนโลยีระบบการผลิต
คณะ	วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีการอโนไดเซชันสำหรับใช้เป็นขั้วแม่แบบ ในกระบวนการสังเคราะห์จะใช้แผ่นไทเทเนียมและแท่งแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนดและแคโทด ตามลำดับ โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย ethylene glycol, ammonium fluoride และน้ำปราศจากไอออน โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของค่าความต่างศักย์ในช่วง 20, 25 และ 30 โวลต์ ที่มีต่อสมบัติของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ค่ากระแสไฟฟ้าจะถูกบันทึกด้วยโปรแกรม Labview ผ่านอุปกรณ์ NI DAQ จากผลการทดลองพบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอโนไดเซชัน ส่งผลโดยตรงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ตลอดจนค่ามุมสัมผัส ผลจากภาพกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดได้แสดงให้เห็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นตามค่าความต่างศักย์ในช่วง 30 ถึง 70 nm ความยาวท่อเปลี่ยนไปจาก 1.3 – 2.4 μm และค่ามุมของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง จาก 110° เป็น 92° อย่างไรก็ตามเราพบปัญหาในการจัดเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้เป็นขั้วแม่แบบได้ จึงเสนอแนะแนวทางโดยการทำให้พื้นผิวตั้งต้นมีความเรียบและมีความบริสุทธิ์มากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียงตัวให้มีความที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์, อโนไดซ์เซชัน, ไทเทเนียมไดออกไซด์

Title	Synthesis of Nanotube Titanium Dioxide by Anodization Method for Bit Pattern Media
Students	Miss Kornrawee Wirandorn 55120002 Mr. Thiti Sangin 55120018
Degree	Bachelor of engineering
Department	Manufacturing System Technology
Faculty	College of Advanced Manufacturing Innovation
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Asst.Prof.Dr. Rachsak Sakdanuphab

Abstract

In this project, TiO₂ nanotubes were fabricated by anodization technique for a template of bit pattern media. For fabrication process, titanium sheet and graphite electrode were used as anode and cathode, respectively. An electrolyte contains ethylene glycol, ammonium fluoride and de-ion water. Anodization voltages are varied between 20, 25, and 30 V and current was recorded by NI data acquisition during fabrication process. The effects of anodization voltage on TiO₂ nanotube diameter and length, as well as contact angle were investigated. The scanning electron microscope images show that increasing voltage enhances TiO₂ nanotube diameter from 30 to 70 nm and length from 1.3 to 2.4 μm . And, the contact angle of TiO₂ nanotube decreases with the anodization voltage from 110° to 92°. However, a problem of uniformity was found on the TiO₂ nanotube which could not be used for the template of bit pattern media. We suggest to replace substrate with smoother and higher purity titanium substrate for increasing the uniformity.

Keywords : Titaniumdioxide nanotube , Anodization , Titaniumdioxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำงานวิจัยโครงการขอขอบพระคุณบุคคลดังต่อไปนี้ที่ช่วยให้งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จ
ลุล่วงได้ด้วยดี

อาจารย์ ผศ.ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยและแนะนำประสบการณ์จากการ
ทำงานที่ได้สะสมมา เพื่อเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัย

อาจารย์ ดร.วรวุฒิ มรรคเจริญ อาจารย์ ผศ.ดร.อนรรฆพล แสนทน และอาจารย์ ดร.วิไลลักษณ์
ศิริวงศ์รังสรร อาจารย์ผู้ร่วมประเมิณผลงานวิจัย และให้คำแนะนำต่างๆให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มาก
ยิ่งขึ้น

พี่ วรมน แหล่งหล้า ที่ให้คำปรึกษาและให้ความรู้เกี่ยวกับการทำโน้ตบุ๊กเซชัน ตลอดจนถึงตอนการทำ
การทดลองต่างๆ

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนในการศึกษา คอยให้กำลังใจในการ
ทำงานวิจัยนี้ จนผ่านสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กัรรวี
ฉิติ

วิรันดร
แสงอินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูปภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขต	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
2.1 กระบวนการแอโนไดเซชัน	2
2.2 กลไกการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂ Nanotube)	3
2.2.1 การก่อตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์	4
2.2.2 เกิดหลุมขนาดเล็กบนชั้นฟิล์มออกไซด์	4
2.2.3 การขยายตัวของรูพรุน	5
2.2.4 การเกิดช่องระหว่างรูพรุน	5
2.2.5 การเกิดเป็นท่ออย่างสมบูรณ์	6
2.3 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide Property)	6
2.3.1 คุณสมบัติเฉพาะ	7
2.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล	7
2.3.3 ด้านความปลอดภัย	7
2.3.4 ประโยชน์ไทเทเนียมไดออกไซด์	7
2.3.5 ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งตามโครงสร้างของผลึก	9

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผล	9
2.4.1 Scanning Electron Microscope	9
2.4.2 Atomic Force Microscope	12
2.4.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction :XRD)	13
2.4.4 Field Emission Scanning electron Microscope (FESEM)	15
2.5 โปรแกรม Labview	17
2.5.1 ข้อดี	18
2.5.2 หลักการเขียนแบบ DATA FLOW	18
2.5.3 ส่วนประกอบต่างๆ ใน LabVIEW	19
2.5.4 ระบบ DAQ บน PC	22
2.6 Hole บนแผ่น Platter media	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 กำหนดการและระยะเวลาในการดำเนินงาน	25
3.2 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	26
3.2.1 ส่วนของการออกแบบ	26
3.2.2 ส่วนของการทดลอง	26
3.3 ส่วนของการทดลอง	26
3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย	26
3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.3.3 เทคโนโลยีที่ใช้ในการทำวิจัย	27
3.3.4 เครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัย	28
3.4 หลักการและวิธีการดำเนินงาน	28
3.4.1 การออกแบบฝาครอบปีกเกอร์	28
3.4.2 การออกแบบและสร้างโปรแกรมสำหรับอ่านและบันทึกค่ากระแส	29
3.4.3 สร้างฝาครอบปีกเกอร์ตามแบบที่ทำการออกแบบไว้	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.4 วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการอโนไดเซชัน	32
3.4.5 นำชิ้นงานไปตรวจสอบการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	33
3.4.6 สรุปการทดลอง	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	34
4.1 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองโดยใช้เวลา 105 นาที	34
4.1.1 ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์	34
4.1.2 ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์	35
4.1.3 ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์	35
4.2 พื้นผิวของชิ้นงานก่อนและหลังอโนไดซ์ด้วยกล้องไมโครสโคป	36
4.2.1 ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์	36
4.2.2 ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์	37
4.2.3 ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์	38
4.3 ภาพแสดงลักษณะการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM	38
4.3.1 ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์	38
4.3.2 ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์	39
4.3.3 ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์	40
4.4 แสดงภาพการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง FESEM	41
4.4.1 ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์	41
4.4.2 ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์	41
4.4.3 ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์	41
4.5 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจองท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ของชิ้นงาน จากเครื่อง FESEM	42
4.5.1 ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์	42
4.5.2 ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์	42
4.5.3 ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเส้นผ่านศูนย์กลาง	43
4.6 แสดงความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากเครื่อง SEM	44
4.6.1 ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์	44
4.6.2 ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์	44
4.6.3 ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์	45
4.6.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความยาวท่อTiO ₂	45
4.7 แสดงมุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิก	46
4.7.1 ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์	46
4.7.2 ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์	47
4.7.3 ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์	47
4.7.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและมุมของน้ำ ของบนผิวชิ้นงาน	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผลการทดลอง	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ประวัติผู้เขียน	53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงกำหนดการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยทั้งหมด	25
4.1 แสดงผลการทดลอง	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	2
2.2 ปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้นในขั้วแอโนดและขั้วแคโทด	3
2.3 กลไกการเกิดท่อไทเทเนียมไดออกไซด์	3
2.4 การก่อตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์	4
2.5 เกิดหลุมขนาดเล็กบนชั้นฟิล์มออกไซด์	5
2.6 การขยายตัวของรูพรุน	5
2.7 การเกิดช่องระหว่างรูพรุน	6
2.8 การเกิดเป็นท่ออย่างสมบูรณ์	6
2.9 ชนิดของไทเทเนียม	9
2.10 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM	10
2.11 การทำงานของเครื่อง SEM	11
2.12 การทำงานของเครื่อง AFM	12
2.13 ตัวอย่างเครื่องที่ใช้หลักการของ XRD	14
2.14 การทำงานของ XRD	15
2.15 ภาพที่ได้จากห้ววัดแบบต่างๆ	17
2.16 Block Diagram เครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW	19
2.17 Front Panel ของ Labview	20
2.18 Block Diagram ของ Labview	21
2.19 Block Diagram ของ Labview ที่มีการทำงานจริง	21
2.20 ตัวอย่าง Block Diagram Node	22
2.21 ส่วนประกอบของระบบ DAQ	23
2.22 แสดงอัตราส่วนระยะห่างระหว่างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	24
3.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย	27
3.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.3 เทคโนโลยีที่ใช้ในการทำวิจัย	28

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แบบร่างหน้าตาของฝาครอบปีกเกอร์	28
3.5 แผนผังความคิด (flow chart) การออกแบบโปรแกรม	29
3.6 หลักการทำงานของโปรแกรม	30
3.7 ฝาครอบปีกเกอร์	31
3.8 ด้ามจับชิ้นงาน	31
3.9 การประกอบฝาครอบปีกเกอร์กับด้ามจับชิ้นงาน	32
3.10 การทำความสะอาดชิ้นงานก่อนทำการทดลองด้วยอะซิโตน	32
3.11 การทำการอโนไดซ์	33
3.12 การทำความสะอาดชิ้นงานหลังทำการทดลอง	33
4.1 กราฟความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์	34
4.2 กราฟความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์	35
4.3 กราฟความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์	35
4.4 พื้นผิวชิ้นงานก่อนและหลังอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์	36
4.5 พื้นผิวชิ้นงานก่อนและหลังอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์	37
4.6 พื้นผิวชิ้นงานก่อนและหลังอโนไดซ์ที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์	37
4.7 การเกิดท่อนบนพื้นผิวด้วยเครื่องAFMที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์	38
4.8 การเกิดท่อนบนพื้นผิวด้วยเครื่องAFMที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์	39
4.9 การเกิดท่อนบนพื้นผิวด้วยเครื่องAFMที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์	39
4.10 การเกิดท่อนบนพื้นผิวด้วยกล้องFESEM ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์	40
4.11 การเกิดท่อนบนพื้นผิวด้วยกล้องFESEM ที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์	40
4.12 การเกิดท่อนบนพื้นผิวด้วยกล้องFESEM ที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์	41
4.13 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์	41
4.14 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์	42
4.15 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์	42
4.16 กราฟความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเส้นผ่านศูนย์กลาง	43
4.17 ความยาวของท่อที่เกิดขึ้นที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ความยาวของท่อที่เกิดขึ้นที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์	44
4.19 ความยาวของท่อที่เกิดขึ้นที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์	44
4.20 กราฟความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความยาวของท่อ	45
4.21 มุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงานที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์	45
4.22 มุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงานที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์	46
4.23 มุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงานที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์	47
4.24 ความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับมุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงาน	48



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความต้องการความจุและพื้นที่ของการเก็บบันทึกข้อมูล เพิ่มมากขึ้นและต้องการรูปทรงขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่กะทัดรัดและสะดวกในการพกพา ผู้จัดทำจึงสนใจที่จะเพิ่มความเป็นระเบียบของการเรียงตัวของชั้นฟิล์มแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยอาศัยแม่แบบที่แน่นอนเพื่อให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีรูปทรงเท่าเดิม ด้วยการสร้างบิตแม่แบบจากการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นแม่แบบสำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มแม่เหล็กและเพิ่มพื้นที่ต่อการจัดเก็บข้อมูลเก็บข้อมูลสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อออกแบบระบบที่ใช้ในการทำ Anodization ให้มีประสิทธิภาพ
- 1.2.2 เพื่อเขียน Software ในการเก็บบันทึกผลการทดลองแทนการจดบันทึกด้วยมือเปล่า
- 1.2.3 เพื่อสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟิล์มบางไทเทเนียม สำหรับใช้เป็นบิตแม่แบบในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

1.3 ขอบข่ายการทำงาน

ทำการสร้างอุปกรณ์ Hardware และเขียน Software ขึ้นเพื่อทำการเตรียมการทำ Anodize เพื่อทำการศึกษาเงื่อนไขในการทดลอง เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย ที่ส่งผลต่อสมบัติของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำการวิเคราะห์สมบัติของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องทำอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope :SEM) และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope : AFM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ทำการวัดค่ามุมสัมผัสที่พื้นผิวชิ้นงาน

1.4 ผลที่คาดหวังว่าจะได้รับ

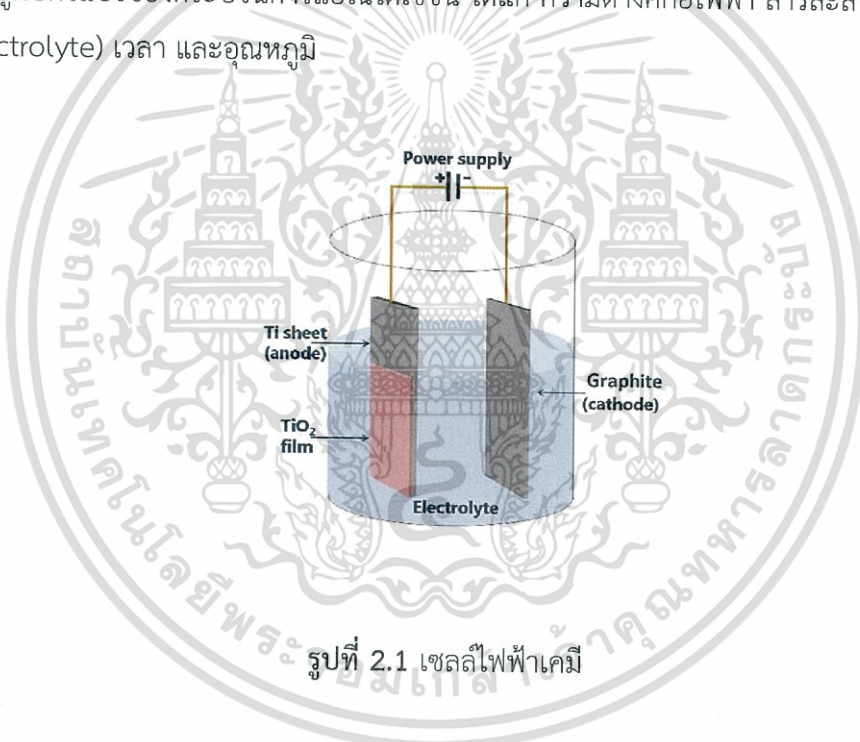
สามารถสร้างระบบ Anodization Hardware และ Software เพื่อให้การทดลองและสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับใช้เป็นบิตแม่แบบในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการอโนไดเซชัน (Anodization process)

กระบวนการอโนไดเซชัน (Anodization process) เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ใช้หลักการ อิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) โดยจะทำการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จะทำให้เกิดการสังเคราะห์ฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) ขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของโลหะ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เพื่อป้องกันการผุกร่อนและปรับสภาพผิวหน้าของโลหะ โดยชั้นฟิล์มออกไซด์จะมีความหนาแน่นหรือหนาขึ้นอยู่กับตัวแปรของกระบวนการแอโนไดเซชัน ได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เวลา และอุณหภูมิ



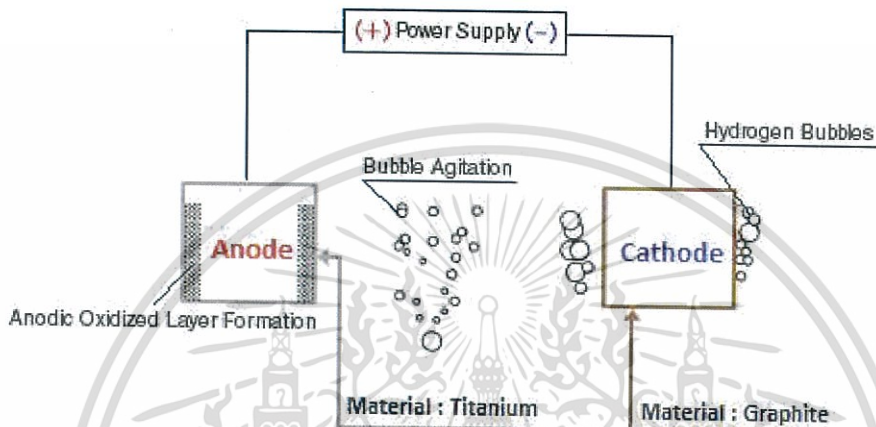
รูปที่ 2.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดเซชันประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (dc power supply) โดยมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วบวกเชื่อมกับโลหะไทเทเนียม (Ti) กระทำตัวเป็นขั้วแอโนด (Anode) ส่วนขั้วลบเชื่อมกับแกรไฟต์ (Graphite) กระทำตัวเป็นขั้วแคโทด (Cathode) ตามรูปประกอบที่ 2.1 โดยทั้ง 2 ขั้วแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่มีการให้ความต่างศักย์ที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบ โดยที่ไอออนบวก (H^+) เคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดและไอออนลบ (O^-) เคลื่อนที่ไปจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดและที่ผิวโลหะจะพบว่าไอออนของออกซิเจน (O^-) ที่สูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนให้กับอะตอมโลหะ และ ส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะกับโลหะกลายเป็น ชั้นฟิล์มออกไซด์ อิเล็กตรอนที่สูญเสียไปจะเคลื่อนที่ผ่านแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไปยังขั้วลบ และ ทำปฏิกิริยากับ ไอออนของไฮโดรเจน (H^+) ก่อให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนบริเวณขั้วแคโทด ตามรูปประกอบ 2.2

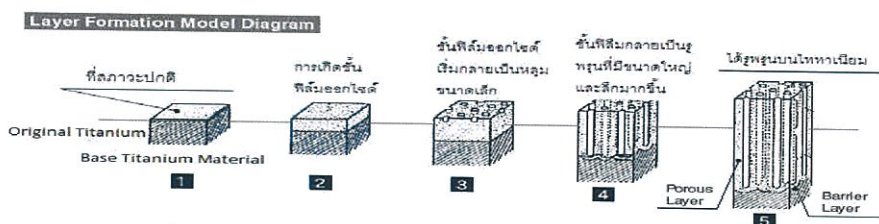
Anodize Process Diagram



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้นในขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

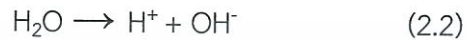
ลักษณะของฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจมีลักษณะเป็นรูพรุนหรือชั้นฟิล์มบาง (Barrier layer) เป็นผลมาจากองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดซ์เซชัน ถ้าอิเล็กโทรไลต์มีสมบัติ เป็นกลาง ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มบาง แต่ถ้าใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีความเป็นกรด ฟิล์มออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนหรือท่อนาโนโดยเฉพาะอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยไอออนของฟลูออไรด์ (F^-) หรือคลอไรด์ (Cl^-) โดยไอออนเหล่านี้ ส่งผลให้ชั้นฟิล์มออกไซด์เกิดเป็นโครงสร้างของท่อนาโนที่จัดเรียงเป็นแถว

2.2 กลไกการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 Nanotube)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การโตของชั้นฟิล์มออกไซด์ที่พื้นผิวโลหะ เนื่องจากโลหะทำปฏิกิริยากับ ไอออนของ ออกซิเจน (O^{2-}) หลังจากชั้นฟิล์มออกไซด์ชั้นแรกก่อตัวขึ้น ไอออนเหล่านี้จะเคลื่อนจากชั้น ออกไซด์ไปยังรอยต่อระหว่างโลหะกับออกไซด์เพื่อที่จะทำปฏิกิริยากับโลหะ ขั้นตอนของการ เกิดชั้นฟิล์มออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มติดแน่นบนผิว (Compact film) เป็นไปตามรูป ประกอบที่ 2.4 และเป็นไปตามสมการต่อไปนี้



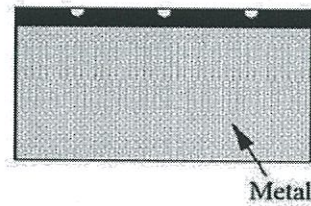
ดังนั้นปฏิกิริยาทั้งหมดที่ก่อตัวเป็นฟิล์มออกไซด์ ตามสมการ



รูปที่ 2.4 การก่อตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์

2.2.2 ภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มออกไซด์ ไอออนของฟลูออไรด์ (F^-) เริ่มมีการเคลื่อนที่ภายในชั้นฟิล์มออกไซด์ โดยไอออนของฟลูออไรด์จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ (Ti^{4+}) ดังสมการที่ 5 ในขั้นตอนนี้การสลายตัวเนื่องจากสนามไฟฟ้าส่งผลต่อการสลายตัวของฟิล์มออกไซด์หลังจากนั้นจะเริ่มมีหลุมขนาดเล็กก่อตัวขึ้นเนื่องจากการสลายตัวเฉพาะที่ของฟิล์มตามรูป ประกอบที่ 2.5และเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

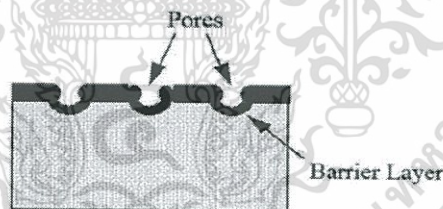




รูปที่ 2.5 เกิดหลุมขนาดเล็บบนชั้นฟิล์มออกไซด์

2.2.3 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยให้เกิดการสลายตัวของออกไซด์ที่รอยต่อระหว่างออกไซด์กับ อิเล็กโทรไลต์ ในขณะเดียวกันไอออนของออกซิเจนอิสระ (O^{2-}) จะเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อระหว่างโลหะกับออกไซด์เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะทำให้หลุมขนาดเล็กเกิดการเพิ่มขนาดขึ้น กลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่และความหนาแน่นของรูพรุนเพิ่มขึ้นผลจากการที่มีสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่บริเวณกันของรูพรุนนั้นทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มบางตามรูปประกอบที่

2.6

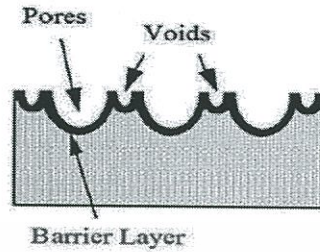


รูปที่ 2.6 การขยายตัวของรูพรุน

2.2.4 การสลายตัวทางเคมีของโลหะหรือออกไซด์โดยอิเล็กโทรไลต์ชนิดกรดซึ่งการสลายตัวทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ส่งผลให้ฟิล์มออกไซด์เกิดเป็นท่อขนาดนาโนได้ดีกว่าการเกิดเป็นโครงสร้างรูพรุนขนาดนาโน และ เมื่ออัตราการโตของออกไซด์ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับออกไซด์ และอัตราการสลายตัวของออกไซด์ที่รอยต่อบริเวณกันของรูพรุนกับอิเล็กโทรไลต์ที่อัตราที่เท่ากัน ภายหลังจากนั้นความหนาของชั้นฟิล์มบางจะไม่มีเปลี่ยนแปลงใดๆเกิดขึ้นถึงแม้ว่าไอออนอิสระจะเคลื่อนที่ไปยังโลหะทำให้

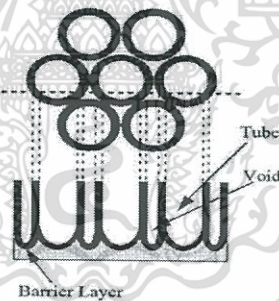
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เป็นเอกสารการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้การสลายตัวของออกไซด์ และการโตของออกไซด์เพิ่มขึ้นในเวลาเดียวกันบริเวณรอบๆรูพรุนจะเกิดช่องว่างขึ้นมาตามรูปประกอบที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดช่องระหว่างรูพรุน

2.2.5 ภายหลังจากนั้นเมื่อช่องว่างและท่อเกิดขึ้นอย่างสมดุลจนกลายเป็นโครงสร้างท่อขนาดนาโนความยาวของท่อจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราของการกัดกร่อน ทางเคมีไฟฟ้า มีค่าเท่ากับอัตรา การสลายตัวทางเคมี ตามรูปประกอบที่ 2.8 [1]



รูปที่ 2.8 การเกิดเป็นท่ออย่างสมบูรณ์

2.3 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide Property)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide:TiO₂) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้า คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ไททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic anhydride) และไททานีย (Titania) ไทเทเนียมเป็นแร่ที่ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1791 ในเหมืองแร่ เหมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ โดยนักธรณีวิทยาชื่อ William Gregor ใช้สัญลักษณ์การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนคือ Ti มีเลขอะตอม 22 มีคุณสมบัติแข็งแรง ทนต่อสภาพกัดกร่อนของคลอรีน น้ำทะเล และกรดต่าง ได้ดี ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่ิลเมนไนต์ (ilmenite) หรือ ลิวโซซีน (leucocene) โดยทำให้บริสุทธิ์ได้โดยวิธี rutile beach sand

2.3.1 คุณสมบัติเฉพาะ

- มวลโมเลกุล 79.9 กรัม/โมล
- ความหนาแน่น 3.84-4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- จุดเดือด 2,500 องศาเซลเซียส
- จุดหลอมเหลว 1,850 องศาเซลเซียส
- ไม่ละลายน้ำ

2.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกล

- สถานะภาพเป็นของแข็งสีขาว
- พื้นที่ผิว 50 ตารางเมตร/กรัม
- ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 นาโนเมตร
- ความหนาแน่น 130 กรัม/ลิตร
- ความถ่วงจำเพาะ 0.7 กรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร
- กำลังแรงกด 680 MPa
- Poisson's Ratio 0.27
- Shear Modulus 90 GPa

2.3.3 ด้านความปลอดภัย

- การกินจากอุบัติเหตุ (Ingestion) มีความเป็นอันตรายต่ำ
- การสูดดม (Inhalation) ทำให้เกิดอาการคัน และอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ หายใจ
- การสัมผัสผิวหนัง (Skin) มีความเป็นอันตรายต่ำ สามารถล้างออกได้
- การสัมผัสนัยน์ตา (Eyes) มีความเป็นอันตรายต่ำ มีอาการแสบ คันเล็กน้อย สามารถล้างออกได้

2.3.4 ประโยชน์ไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบันไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มาก มักใช้ในรูปของผลึกแบบรูไทล์ (rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิด อนาเทส (anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงชั้นสูงการนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่างๆได้แก่

1. ใช้สำหรับสารให้สี

อุตสาหกรรมสีที่เกี่ยวข้อง มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมของสีทาบ้าน ด้วยคุณสมบัติให้สารสีขาว สามารถดูดกลืน และหักเหช่วงแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้สูง ขนาดอนุภาคเล็ก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้ปกปิดรอยร้าว รอยตำหนิได้ดี และทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง ทนต่อแสง และความร้อน รวมถึงใช้เป็นส่วนผสมของสีสำหรับงานพิมพ์งานศิลปะ เนื่องจากมีคุณสมบัติให้สีขาวสว่าง

2. ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์

มักใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมแก้ว กระจก และอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผา การผลิตสุขภัณฑ์ การผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมโลหะสำหรับการเคลือบผิวโลหะ อุตสาหกรรมกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษเพื่อลดการทะลุผ่านของแสง ด้วยคุณสมบัติที่สามารถยึดเกาะ และเคลือบติดผิวได้ง่าย มีความทนทานต่อการกัดกร่อน รวมถึงคุณสมบัติที่กล่าวในข้างต้น นอกจากนี้ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับเคลือบผิวผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตและลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้

3. เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบเพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไวสีย้อม (Dye sensitized solar cell)

4. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้ามักจะใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อทำเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยคุณสมบัติที่มีค่าคงที่ทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูง

5. ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง

เครื่องสำอางบางยี่ห้อมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนผสมสำหรับทำหน้าที่ให้ผิวงlistening สีขาว มีคุณสมบัติทึบแสง สามารถสะท้อน และหักเหแสงได้สูง และสะท้อนรังสียูวีได้ดี ไม่เป็นอันตรายต่อผิว ผลิตภัณฑ์ที่พบใช้เป็นส่วนผสมมาก ได้แก่ ครีมบำรุงผิว ครีมกันแดด แป้งรองพื้น และทาทับ เป็นต้น ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษ

- ใช้เป็นสารดูดซับ โดยใช้งานในด้านการบำบัดมลพิษทางอากาศ และมลพิษทางน้ำ ทำหน้าที่เป็นสารตัวดูดซับมลพิษ

- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสง และความร้อน จะแตกตัวให้สาร และรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำและอากาศ รวมถึงการกำจัดและต้านเชื้อจุลินทรีย์

2.3.5 ชนิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งตามโครงสร้างของผลึก ได้แก่

1. รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (tetragonal) ซึ่งเป็นชนิดที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติมีความคงทนและเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง
2. อนาเทส (anatase) โครงสร้างแบบเทตระโกนัล (tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง ที่ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์
3. บรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เป็นชนิดที่พบน้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ ตามรูปประกอบที่ 2.9 [2]



รูปที่ 2.9 ชนิดของโครงสร้างไทเทเนียม

2.4. เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผล

2.4.1 Scanning Electron Microscope (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน)

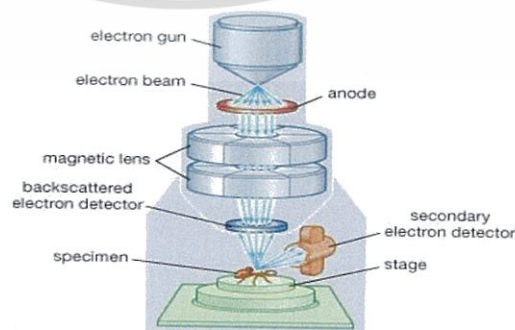
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายตาประเภทกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็น ได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มได้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีชื่อ "ภาษาอังกฤษ" คำเต็มว่า SCANNING ELECTRON MICROSCOPE และโดยทั่วไปแล้วผู้ที่คุ้นเคยกับอุปกรณ์ชนิดนี้มักจะเรียกชื่อย่อเป็น "ภาษาอังกฤษว่า" SEM (ออกเสียงว่าเอสอีเอ็ม)

1. ส่วนประกอบพื้นฐาน

- Electron gun (แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน) อยู่ด้านปลายบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110 volts หรือ 220 volts เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง

เอกสารนี้เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 KV ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Electromagnetic lens (เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน) ใช้ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
- Scan coil (ขดลวดควบคุมการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอน) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบ บนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการ
- Specimen Chamber (ช่องใส่ตัวอย่าง) เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่างๆ เพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่าgoniometer stage
- Collector & scintillator (อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมนทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุบวกขนาด 30-250 โวลต์เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยา ระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง
- Imaging photographic devices (อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ) ทำหน้าที่ปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและ ภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนแปลงสัญญาณอิเล็กตรอน ให้เป็นแสงไฟฟ้การสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภท ท่อนำแสงในลักษณะของแสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด photons นี้ไป อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ (CRT) ที่ติดตั้งไว้บน console unit ตามรูปประกอบที่ 2.10



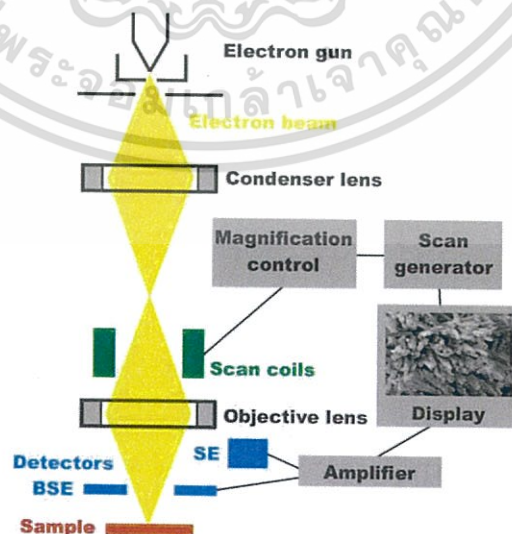
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลักการทำงาน

ลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพเป็นสุญญากาศ โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่าและปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วย aperture หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน โดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกเรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) จะทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์สุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆซึ่งพื้นผิวของตัวอย่างที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณต่างๆขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆเหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นได้แก่

- สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image: SEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานต่ำ 3 ถึง 5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับไมล์ิกไม่เกิน 10 นาโนเมตร โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ
- สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image: BEI) หรือกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้อะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน และการกระเจิงกลับซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตรโดยเกิดกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ตามรูปประกอบที่ 2.11 [3]



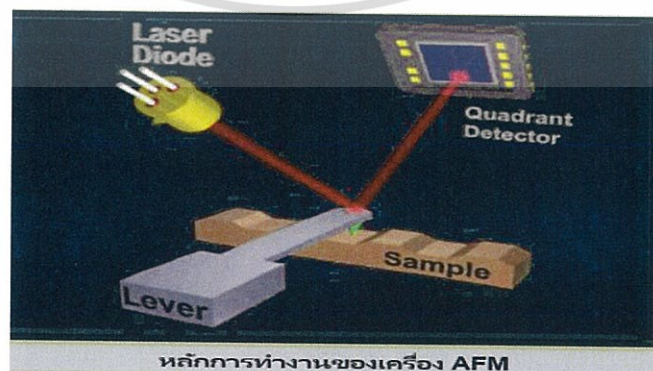
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกา **รูปที่ 2.11** หลักการทำงานของเครื่อง SEM ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 Atomic Force Microscope (กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน หรือ SPM ประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ในการถ่ายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร หรือถ่ายภาพอะตอมของสสารได้ โดยที่กล้อง AFM จะมีลักษณะการทำงานที่พิเศษเฉพาะตัวคือจะใช้หัววัดขนาดเล็กวัดแรงผลักรวมและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวสัมผัสกับพื้นผิววัตถุ เพื่อมาสร้างเป็นภาพของพื้นผิวของวัตถุนั้นได้ โดยที่กล้อง AFM สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพขยายในระดับนาโนเมตรของวัตถุที่นำไฟฟ้าและวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้า ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แผ่นฟิล์มบางคอลลอยด์ อนุภาคนาโนในเครื่องสำอาง เซลล์แบคทีเรีย ชิ้นงานที่เป็นผงระดับนาโนในเครื่องสำอาง เซลล์แบคทีเรีย ชิ้นงานที่เป็นผงระดับนาโนโดยสามารถบอกความสูงต่ำของพื้นผิวในรูปแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ

1. หลักการทำงาน

การผ่านแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคานทำให้คานโก่งอตัว ทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอม ที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอริเตอร์ เช่นเดียวกันกับเครื่อง STM (และโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลักรวม เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันอีกด้วย) ตามรูปประกอบที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การทำงานของเครื่อง AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การประยุกต์ใช้

วิธีการทำงานของเครื่อง AFM ที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

- การสัมผัสแบบต่อเนื่อง เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานของโพรบที่ไว้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มีได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง
- การสัมผัสแบบไม่ต่อเนื่อง เป็นการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (คล้ายกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะๆ นั้นเอง) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นไม่คงที่หรือไม่แม่นยำได้ [4]

2.4.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction :XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ ดีเอ็นเอ โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น ผู้ผลิตได้พัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคนี้ให้มีความสามารถมากยิ่งขึ้นและใช้งานได้ง่ายขึ้น ทำให้เอื้อประโยชน์สำหรับนักวิทยาศาสตร์ที่จะนำไปใช้ปรับปรุง พัฒนา หรือยกระดับการวิเคราะห์ วิจัย หรือตรวจสอบในระดับสูงขึ้นไป

1. หลักการพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg

$$n\lambda = 2d\sin \theta \quad (2.6)$$

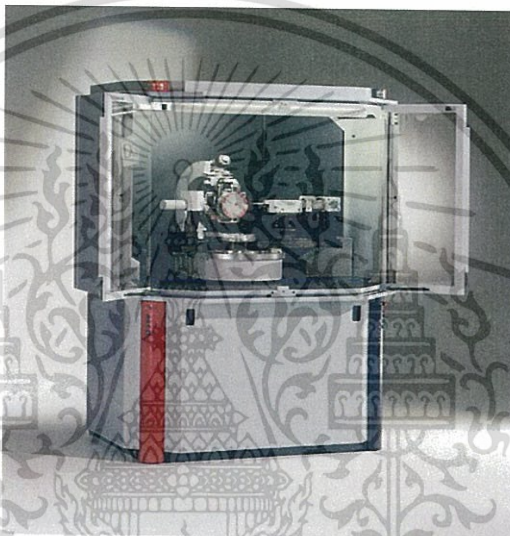
โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots$, λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์,

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก และ θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

ในขั้นตอนแรกนั้นต้องทำการปลูกผลึกที่สนใจแล้วนำผลึกที่ได้ไปแช่ในโตรเจนเหลว ผลึกที่แช่แข็งนี้จะปลด radiation damage ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลและลดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนไหวของอนุภาคภายในผลึก ผลึกจะถูกวางในเครื่อง diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ ค่าความเข้มที่มุมต่างๆ จากนั้นข้อมูลจะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า diffractogram ซึ่งแต่ละพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิดด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และคุณสมบัติเชิงกลอย่างมากมาย



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างเครื่องที่ใช้หลักการของ XRD

2. เทคนิค

เทคนิคที่ใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคต่างกัน ได้แก่ -Single-Crystal Methods

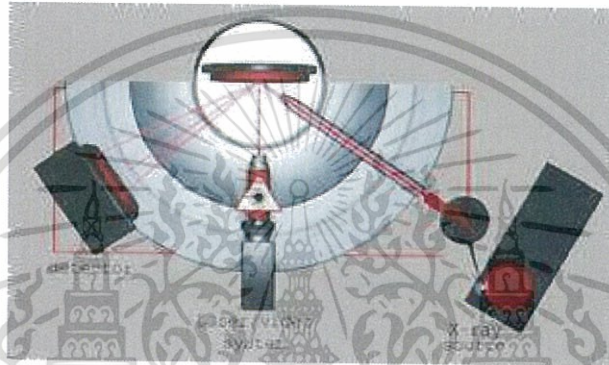
โดยหลักแล้วเทคนิคนี้ใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างอะตอม (ความสมมาตร ตำแหน่ง ช่องว่าง เป็นต้น) ซึ่งวิธีการดั้งเดิมนั้น (Laue method) จะใช้ผลึกติดอยู่กับที่และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เมื่อฉายลำรังสีให้ตกลงบนผลึกเดี่ยว จะทำการบันทึกผลการเลี้ยวเบนลงบนแผ่น Photographic plate ซึ่งใช้ในการบันทึกค่าความเข้มและตำแหน่งของรังสีที่เกิดการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันนั้นจะทำให้ผลึกเกิดการหมุนและอาศัยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของกล้องก้าวข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดปริมาณของรังสีที่เลี้ยวเบนจากวิธีการดั้งเดิม วิธีการนี้จะใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวแต่อาศัยการเปลี่ยนมุม θ โดยการเคลื่อนที่ของผลึกซึ่งอยู่บนแท่นหมุน แล้วใช้ diffractometer และคอมพิวเตอร์ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บรวบรวมและจัดการข้อมูล ซึ่งจะให้ผลที่มีความแม่นยำมากกว่า

- Powder Methods

เบื้องต้นแล้ววิธีการนี้จะใช้ในการระบุแร่ธาตุ โดยจะใช้บอกร่องประกอบและตรวจวัดความสัมพันธ์ของธาตุที่มีอยู่ในสารผสม เช่นเดียวกับ Single-Crystal Methods คือ แต่เดิมนั้นจะใช้เทคนิคของการถ่ายภาพในการบันทึกข้อมูลการเลี้ยวเบน แต่ในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า X-ray Powder Diffractometer และยังสามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมตัวอย่างผลึกแล้วไม่สามารถใช้วิธีการแรกในการตรวจวัดได้ [5]



รูปที่ 2.14 การทำงานของ XRD

2.4.4 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) เป็นเครื่องมือที่สำคัญประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กในระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัย และการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กในระดับไมโคร หรือ นาโนได้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ อีกทั้ง FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่นๆเพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction; EBSD) นอกจากนี้ FESEM ยังสามารถประยุกต์โดยเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลายขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron Beam Lithography) จะเห็นได้ว่า FESEM เป็นเครื่องมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค

1. คุณสมบัติ

Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ซึ่งเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) มี resolution สูงถึง 1.2 nm ที่ 30 kV เหมาะสำหรับงานทางวิทยาศาสตร์ ภายภาพ ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 kV ง่ายต่อการใช้งานเพราะควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบสุญญากาศในระบบลำอิเล็กตรอนใช้ sputter-ion pump ส่วนห้องชิ้นงาน (sample chamber) ใช้ diffusion pump หัววัดหลักสำหรับการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของระบบซึ่งประกอบด้วย 3 หัววัด

2. ประเภทของหัววัด

สัญญาณภาพที่ได้จาก FESEM แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของภาพที่ได้ จากหัววัดที่ต่างกัน ได้แก่

- Secondary Electron Image (SEI)

- Backscattered Electron Image (BEI)

- Transmission Electron Image (TEI)

- Secondary Electron Image (SEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Secondary Electron Detector (SED) ที่รับเอาพลังงานจาก secondary electron ที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของชิ้นงานเมื่อถูกลำอิเล็กตรอนชนมาประมวลผล ภาพที่ได้แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน (Morphology) ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 kV ตามประเภทของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้สูงถึงประมาณ 1,000,000 เท่า ภายใต้อาการการใช้งานที่เหมาะสม โดยทั่วไปการใช้งานปกติมักจะได้กำลังขยายถึงประมาณ 300,000 เท่า และยังสามารถเลือกโหมดป้องกันการสะสมของประจุบนชิ้นงานโดยใส่ความต่างศักย์ไปยังชิ้นงาน เพื่อไล่ประจุสะสม

- Backscattered Electron Image (BEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Backscattered Electron Detector (BED) ที่รับเอาพลังงานจาก Backscattered Electron ที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานมาประมวลผล โดยสัญญาณที่ได้ในแต่ละบริเวณจะแปรตามเลขอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(atomic number, Z) ในเนื้อสารบริเวณนั้นๆ ภาพที่ได้ จึงมีความสว่าง เข้มหรืออ่อนตาม เลขอะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อสาร (atomic contrast) BEI จึงสามารถ แสดงภาพที่แยกแยะความแตกต่างของแต่ละบริเวณที่มีธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันได้ หัววัด BED เป็นแบบ retractable สั่งการให้เลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งเหนือชิ้นงานในระหว่าง ใช้งานและเลื่อนออกเมื่อไม่ได้ใช้ งานได้เพื่อความปลอดภัยของหัววัด

- Transmission Electron Image (TEI) เป็นสัญญาณภาพซึ่งมีความสำคัญมากหาได้จาก Transmission Electron Detector (TED) อาศัยหลักการของ Transmission Electron Microscope (TEM) ประยุกต์ติดตั้งในระบบของ FESEM โดย TED จะอยู่ในตำแหน่งใต้ ชิ้นงานเพื่อรับพลังงานจาก transmission electron ที่ทะลุผ่านชิ้นงาน ศักย์เร่งอิเล็กตรอน ที่ตั้งไว้สำหรับระบบนี้เป็นค่าสูงสุดคือ 30 kV และชิ้นงานจะต้องเตรียมด้วยเครื่องมือเฉพาะ เพื่อให้ ชิ้นงานมีขนาดบางเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านไปยัง TED ได้ ภาพที่ได้จะ แสดงถึงรูปร่างโครงสร้าง ภายในของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้ถึงประมาณ 300,000 เท่า [6]



รูปที่ 2.15 ภาพที่ได้จากหัววัดแบบต่างๆ

2.5 โปรแกรม Labview

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งเป็น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LABVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือจะเรียกย่อๆ ว่า VI ซึ่ง หมายถึงเครื่องมือวัดเสมือน ดังตัวอย่าง จากรูปนี้เป็น Oscilloscope ที่ได้ทำการสร้างขึ้นบนหน้าจอ คอมพิวเตอร์โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่สร้างเพื่อนามาใช้ในด้านกรวัดและเครื่องมือวัด สำหรับงานทางวิศวกรรม LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งหมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้าง เครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรรม ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรมนี้ก็คือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัด อย่างมีประสิทธิภาพ และในตัวของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ใช้ช่วยในการวัดมากมายและแน่นอนที่สุด โปรแกรมนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่างๆ

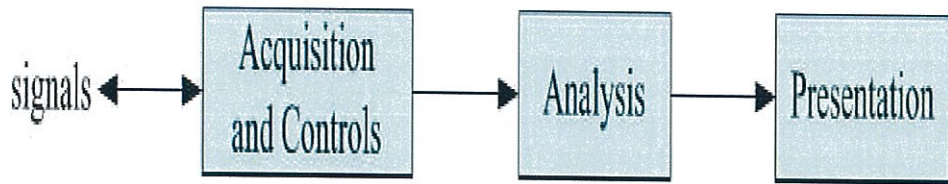
2.5.1 ข้อดี

1 โปรแกรม LabVIEW นี้เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) โดยสมบูรณ์ นั่นคือไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใดๆ ทั้งสิ้น และที่สำคัญลักษณะภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้เราจะเรียกว่าเป็นภาษารูปภาพหรือเรียกอีกอย่างว่าภาษา G (Graphical Language) ซึ่งจะแทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดอย่างที่เราค้นเคยกับภาษาพื้นฐาน เช่น C, BASIC หรือ FORTRAN ด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด ซึ่งแม้ว่าในเบื้องต้นอาจจะสับสนอยู่บ้าง แต่เมื่อคุ้นเคยกับการใช้โปรแกรมนี้แล้วเราจะพบว่า LabVIEW นี้มีความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนโปรแกรมลงไปได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆเพื่อใช้ในการวัดค่าจากอุปกรณ์และใช้ในการควบคุม

2 ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ของเราเมื่อรวมกับ LabVIEW และ อุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Card) แล้วสามารถเปลี่ยนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลของเราให้กลายเป็นเครื่องมือวัดในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น Oscilloscope, Multi-meter, Function Generator, Strain meter Thermometer หรือเครื่องมือวัดอื่นๆ ตามที่เราต้องการ ทำให้สามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการทำการวัดและเครื่องมือวัดได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งจุดนี้เองที่เป็นที่มาของชื่อ เครื่องมือวัดเสมือนจริง (Virtual Instrument)

2.5.2 หลักการเขียนแบบ DATA FLOW

เนื่องจาก LabVIEW ใช้ลักษณะการเขียนแบบ Block Diagram ซึ่งวิศวกรส่วนใหญ่มีความคุ้นเคยอยู่แล้ว จึงเป็นการง่ายที่จะทำความเข้าใจและนำไปพัฒนาใช้ต่อไปได้ และถ้าหากเราจำได้ถึงขั้นตอนการเขียนโปรแกรมว่าก่อนที่จะเขียนโปรแกรม จะต้องเขียน Flow Chart ให้เสร็จสิ้นก่อน หลังจากตรวจสอบ Flow Chart เรียบร้อยแล้วเราจึงนำไปเขียนโปรแกรม ซึ่งจะมีความสะดวกมากขึ้น LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุมทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบตามที่ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ



รูปที่ 2.16 Block Diagram เครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW

1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนรับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบในที่นี้คือคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบอาจมาจากการ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า)
2. Analysis หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วจะผ่านฟังก์ชันในการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสิ่งที่วัดได้และใช้งานได้
3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลเฉพาะที่วัดได้โดยไม่ต้องจำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์กับเวลา หรือ Spectrum Analysis จะแสดงสัญญาณในรูปแบบคลื่นหรือการพิมพ์ออกมาเป็นรายงานหรือเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์

2.5.3 ส่วนประกอบต่างๆ ใน LabVIEW

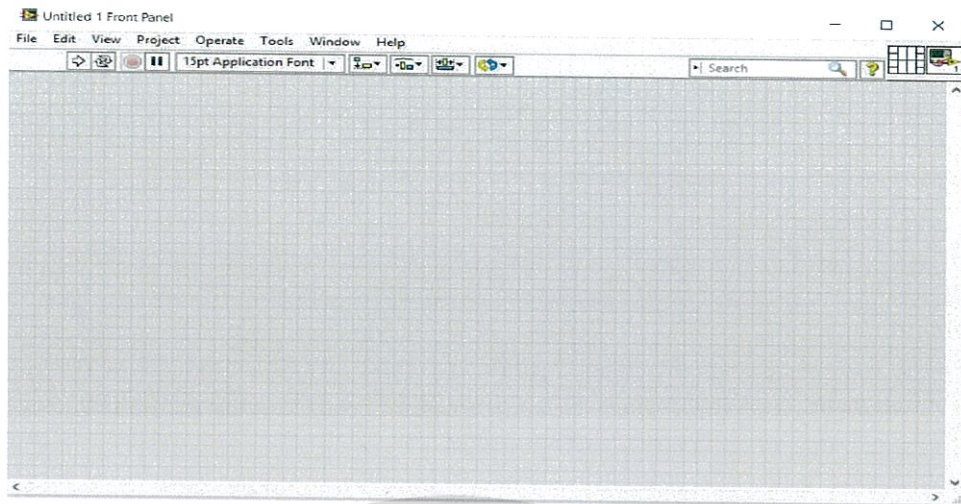
โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดย LabVIEW เราจะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้งานจะเหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรม ในขณะที่เดียวกันหลังจากของอุปกรณ์เสมือนจริงเหล่านั้นจะเป็นการทำงานของ ฟังก์ชัน, Subroutines และโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป สำหรับ VI หนึ่งๆ จะประกอบด้วย ส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ

- Front Panel
- Block Diagram

ทั้งสองส่วนนี้จะประกอบกันขึ้นมาเป็นอุปกรณ์เสมือนจริงและจะมี ลักษณะและหน้าที่ของ ส่วนประกอบทั้งสองมีดังต่อไปนี้

1. Front Panel หรือหน้าปัทม์ จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (หรือที่นิยมเรียก User Interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัทม์ของของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดต่างๆ ไป โดยทั่วไปจะประกอบด้วย สวิตช์เปิดเปิด, ปุ่มปิด, ปุ่มกด จอแสดงผลหรือแม้แต่ค่าที่ผู้ใช้สามารถกำหนด สำหรับผู้ที่คุ้นเคยกับการเขียนโปรแกรมประเภท Visual ทั้งหลายคงจะเข้าใจกันดีว่า Front Panel นี้จะเปรียบเสมือนเป็น

GUI ของโปรแกรมหรือ VI นั่นเอง ตามรูปประกอบที่ 2.17



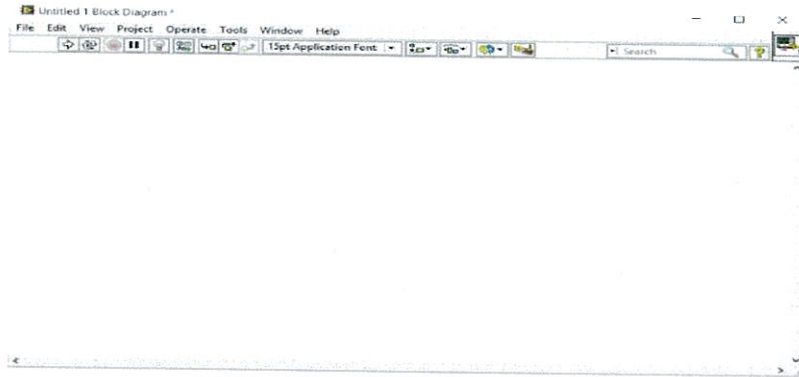
รูปที่ 2.17 Front Panel ของ Labview

Object ที่อยู่บน Front Panel จะมีอยู่สามประเภท คือ

- Control คือประเภทที่รับค่าจากผู้ใช้ (Input) ซึ่งผู้ใช้สามารถพิมพ์ค่าลงไป หรือใช้เมาส์คลิก เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าได้ เช่น ปุ่มหมุน ปุ่มเลื่อน สวิตช์ เป็นต้น
- Indicators คือประเภทที่ใช้แสดงค่าต่างๆเท่านั้น (Output) ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น กราฟ มิเตอร์ LED
- Decorations เป็น Object ที่ไม่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมและcode บน Block Diagram เลย แต่มีไว้เพื่อความสวยงามเป็นระเบียบของ Front panel เท่านั้นนั่นเอง ลักษณะของ Front Panel แสดงดังรูปต่อไปนี้

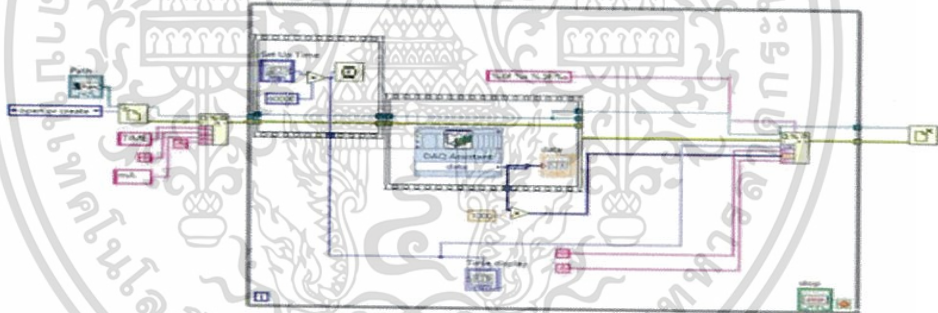
2. Block Diagram เพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้น เราอาจจะมอง Block Diagram นี้เป็นเสมือนกับ Source Code หรือโปรแกรมของ LabVIEW ซึ่งปรากฏว่าอยู่ในรูปของภาษา G ซึ่ง Block Diagram นี้ถือว่าเป็น Executable Program คือสามารถที่จะทำงานได้ทันทีและข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ LabVIEW จะมีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ทำให้โปรแกรมจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาดในโปรแกรมเท่านั้นโดยผู้ใช้สามารถที่จะดูรายละเอียดของความผิดพลาดแสดงให้เห็นได้ตลอดเวลาทำให้การเขียนโปรแกรมนั้นง่ายขึ้นมาก ตามรูปประกอบที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 Block Diagram ของ Labview

ส่วนประกอบภายใน Block Diagram นี้จะประกอบด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนเหล่านี้ ซึ่งจะปรากฏในรูปของ Block เราจะได้รับการต่อสาย (Wire) สำหรับ Block ที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block เหล่านี้ ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการและแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ต่อไป



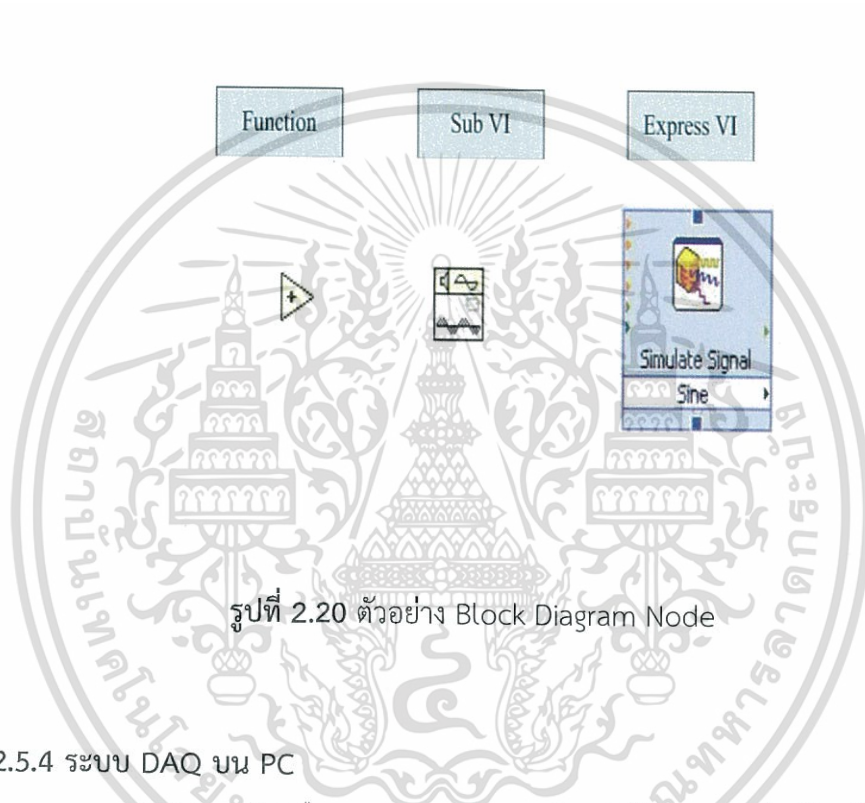
รูปที่ 2.19 Block Diagram ของ Labview ที่มีการทำงานจริง

Block Diagram Node

- Node คือรูป Icon ที่อยู่บน Block Diagram ซึ่งมี Input และ/หรือ Output และจะทำงานตามหน้าที่เมื่อมีการรันโปรแกรม โดนแบ่งเป็นสามชนิดหลัก
- Function คือ Node ที่มีหน้าที่พื้นฐานของคอมพิวเตอร์ ซึ่งเราไม่สามารถที่จะเจาะเข้าไปดู รายละเอียดภายในได้อีก เช่น การบวก การคูณ
- SubVIs หรือในภาษาทางซอฟต์แวร์อาจจะเรียกว่า Subroutine หรือ Subprogram คือ โปรแกรมย่อยที่ถูกเขียนขึ้นมาเพื่อถูกนำมาเรียกใช้ในอีกโปรแกรมหนึ่ง เราสามารถเปิดเข้าไปดู front panel และ block diagram ได้เมื่อ double click ที่ Icon ของมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

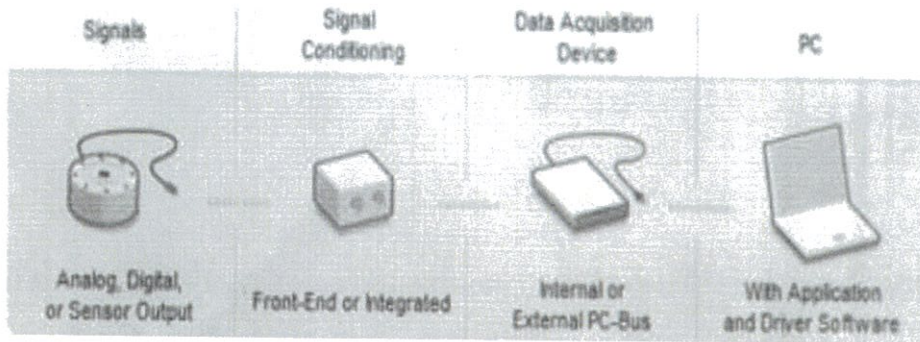
- Express VIs เป็น subVIs ประเภทพิเศษคือเมื่อเราเลือก Express VI มาวางบน Block Diagram มันจะปรากฏหน้าต่าง Configuration ขึ้นมาเพื่อให้เราเข้าไปป้อนค่า Parameters ต่าง ตามต้องการและเมื่อเราป้อนค่าเสร็จ มันก็จะสร้างโค้ดไว้ภายในอัตโนมัติตามที่เราได้ตั้งค่าไว้ ซึ่งความสามารถของ Express VI นี้ทำให้เราแทบไม่จำเป็นต้องต่อสาย Input เลย เพราะ Parameter ทั้งหมดได้ถูกสร้างขึ้นมาแล้วถูกเก็บไว้ภายในเรียบร้อยแล้ว จึงทำให้การเขียน LabVIEW ง่ายและเร็วขึ้นมาก สิ่งกีดขวางๆ Express VI จะมี Icon ขนาดใหญ่ที่มีพื้นหลังเป็นสีฟ้า ตามรูปประกอบที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวอย่าง Block Diagram Node

2.5.4 ระบบ DAQ บน PC

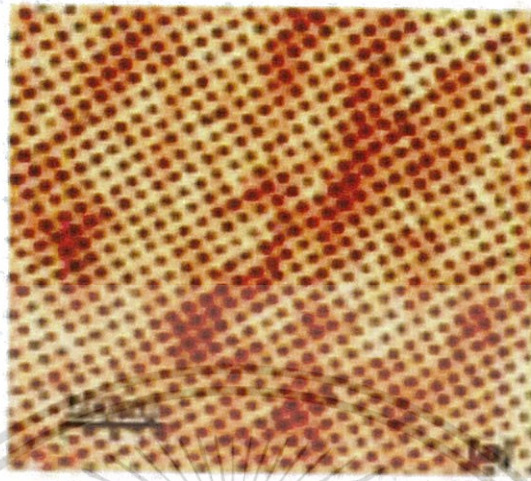
ระบบ DAQ บน PC คือกระบวนการในการอ่านค่าสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วนำไปเก็บไว้ใน หน่วยความจำบน PC เพื่อการวัดวิเคราะห์ที่ จัดเก็บ หรือแสดงผลต่อไป ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการ สร้าง VI ของแต่ละแอปพลิเคชัน ซึ่งระบบ PC จะมีส่วนประกอบอยู่ 4 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนของแหล่งสัญญาณ ส่วนฮาร์ดแวร์, Signal, Conditioning ส่วนอุปกรณ์ของซอฟต์แวร์ PC ตามรูปประกอบที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของระบบ DAQ

สัญญาณที่เราจะวัดอาจเป็นสัญญาณอนาล็อก (+หรือ-10V หรือ 4-20 mA.) หรือสัญญาณดิจิทัลหรืออาจมาจากเซ็นเซอร์ ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะถูกต่อสายเข้าไปในส่วนฮาร์ดแวร์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Signal conditioning ซึ่งจะทำหน้าที่ในการปรับปรุงสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะวัดด้วยฮาร์ดแวร์ DAQ ต่อไป เช่น ถ้ามีสัญญาณมีขนาดเล็กเกินไป ก็จะต้องขยายให้ใหญ่ขึ้น หรือสัญญาณเข้ามาใหญ่เกินไปก็ต้องลดทอนสัญญาณให้เล็กลง เป็นต้น (ถ้าสัญญาณมีลักษณะเหมาะสมแล้วเราก็ไม่จำเป็นต้องนำ Signal conditioning มาใช้ทุกครั้งเสมอไป) สำหรับฮาร์ดแวร์ DAQ แบบพื้นฐานจะสามารถวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง + หรือ -10V เท่านั้น ซึ่งฮาร์ดแวร์นี้จะถูกติดตั้งบน PC ที่มีไดรฟ์เวอร์และมีแอปพลิเคชันที่เขียนด้วยซอฟต์แวร์สำหรับพัฒนาระบบเช่น LABVIEW [7]

2.6 Hole บนแผ่น Platter media



รูปที่ 2.22 แสดงอัตราส่วนระยะห่างระหว่างท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

จากภาพที่ 2.22 แสดงอัตราส่วนของ hole บนแผ่น platter จากอัตราส่วนตามรูปภาพที่ขนาดพื้นที่ 200 nm จะมี hole อยู่จำนวน 5 hole ซึ่งจากข้อมูลนี้สามารถนำมาหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของ hole แต่ละจุดได้ ซึ่งจะทำให้เราสามารถนำค่าที่ได้มาประมาณค่าของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับฮาร์ดดิสก์ได้ โดยเราสามารถหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้จากการเทียบสัดส่วนจากสเกลตามรูปภาพ โดยจากรูปภาพ ที่ขนาดความยาว 200 nm มี hole เกิดขึ้นจำนวน 5 hole เมื่อเราทำการวิเคราะห์ค่าตามสเกลโดยอาศัยการประมาณค่า จะได้ค่าของช่องว่างระหว่าง hole แต่ละ hole เท่ากับ 40 nm จากข้อมูลเบื้องต้นเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการประมาณขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางตามสเกลที่ได้จากรูปจะสามารถบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณที่เหมาะสมกับการนำมาใช้อ้างอิงการศึกษาการสังเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นบิตแม่แบบในฮาร์ดดิสก์ได้ เพื่อให้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริงมากที่สุด [8]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีการอโนดixeชัน สำหรับใช้เป็นขั้วแม่แบบ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะสัญญาณของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)

3.1 กำหนดการและระยะเวลาในการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 แสดงกำหนดการและระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยทั้งหมดจนแล้วเสร็จ

ลำดับ	การดำเนินงาน	วันที่ดำเนินงาน
1.	หาอาจารย์ที่ปรึกษาและคิดหัวข้อโครงการพิเศษ	3 ส.ค. 2558 – 12 ส.ค. 2558
2.	เสนอหัวข้อโครงการพิเศษต่ออาจารย์ที่ปรึกษา	13 ส.ค.2558
3.	ศึกษา/ค้นคว้า ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษที่สนใจ	14 ส.ค. 2558 – 31 ส.ค. 2558
4.	ศึกษาและออกแบบขั้นตอนการทดลองจากวรรณกรรมและกรอบแนวคิดต่างๆ	2 ก.ย.2558 – 10 ก.ย. 2558
5.	ออกแบบ Hardware และ Software ที่ใช้ในการศึกษาโครงการพิเศษ	12 ก.ย.2558 – 24 ก.ย. 2558
6.	จัดซื้ออุปกรณ์ตามที่ออกแบบ	25 ก.ย.2558 – 26 ก.ย. 2558
7.	ลงมือสร้าง Hardware และ Software ตามที่ออกแบบ	27 ก.ย.2558 – 6 ต.ค. 2558
8.	ทดลอง ตรวจสอบและแก้ไข ข้อบกพร่อง	7 ต.ค. 2558 -10 ต.ค. 2558
9.	ส่งรูปเล่มบทที่ 1-3	13 ต.ค. 2558 – 19 พ.ย. 2558
10.	นำเสนอความคืบหน้าในส่วนของการออก Hardware และ Software	27 พ.ย. 2558
11.	ลงมือทำการทดลอง	5 ม.ค.2559 – 26 มี.ค.2559
12.	บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง	27 มี.ค.2559 – 5 เม.ย.2559
13.	สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	6 เม.ย.2559 – 23 เม.ย.2559
14.	นำเสนอโครงการพิเศษ	19 พ.ค. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการพิเศษ

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการออกแบบ และ ส่วนของการทดลอง

3.2.1 ส่วนของการออกแบบ

1. ส่วน Hardware จะออกแบบเพื่อความเสถียรและความสะดวกในการทดลอง โดยทำฝาครอบปีกเกอร์ เพื่อให้ปีกเกอร์เป็นระบบปิดและมีแท่งของปากจระเข้ 2 แท่งเพื่อความสะดวกในการหนีบชิ้นงานและกำหนดระยะห่างระหว่างกันไว้คงที่ เพื่อให้ทำการแลกเปลี่ยนอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีความเสถียร

2. ส่วนของ Software เลือกใช้โปรแกรม Labview ในการรับค่าจากกระแสจากเครื่อง DAQ Multimeter และ บันทึกค่ากระแสจากการทดลอง ในเวลาต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ แทนการนั่งจดบันทึกค่าเอง

3.2.2 ส่วนของการทดลอง

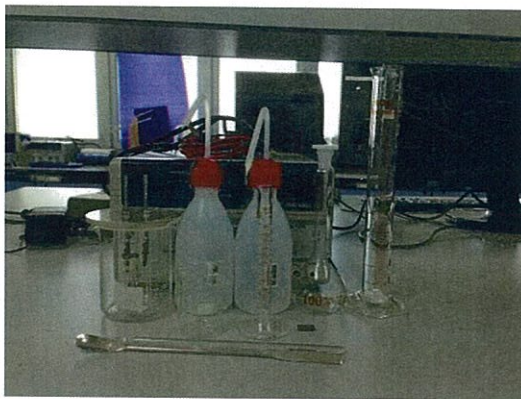
การเพิ่มความจุของ Hard Disk Drive โดยสร้าง pattern ให้กับตัวจานแม่เหล็ก ซึ่ง Bit ปกติจะเรียงต่อกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งทำให้ใช้พื้นที่เยอะ จึงทำให้ความจุน้อย เราจึงทำการสร้าง Template เพื่อใช้สำหรับกำหนดรูปร่างของสารที่ใช้เคลือบให้เป็นระเบียบเพื่อลดพื้นที่ในการเรียงตัวลง ซึ่งจะทำให้ Hard Disk Drive มีความจุเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

1. ปีกเกอร์ขนาด 250 ml
2. ปีกเกอร์ขนาด 50 ml
3. ขวดแก้วรูปชมพูนขนาด
4. กระบอกตวง 10 ml
5. กระบอกตวง 100 ml
6. ขวดบีบน้ำ 2 ขวด
7. แท่งแก้วคนสาร
8. ช้อนตักสาร
9. Power supply
10. ปากจระเข้
11. แท่งแกรไฟต์
12. แผ่นไทเทเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. Ethylene glycol
2. Acetone
3. Ammonium Fluoride
4. De-ionized Water



รูปที่ 3.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

1. DAQ Multimeter
2. โปรแกรม Labview
3. โปรแกรม Solidwork

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เทคโนโลยีที่ใช้ในการทำวิจัย

3.3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัย

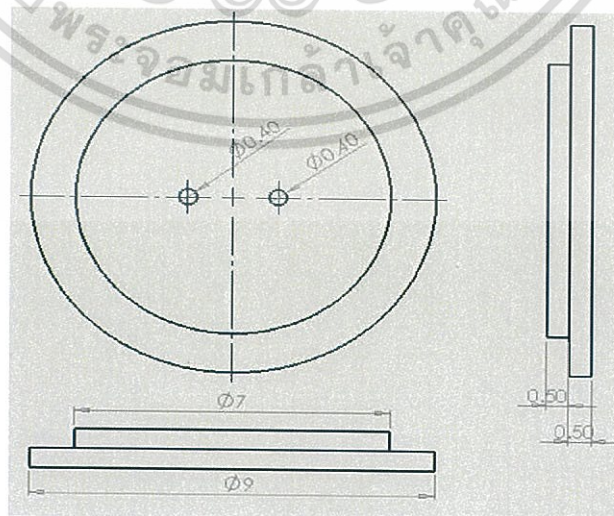
1. Scanning Electron Microscope (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน)
2. Atomic Force Microscope (กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม)

3.4 หลักการและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 ทำการออกแบบฝักรอบปีกเกอร์

1. ทำการวัดขนาดของปีกเกอร์ เพื่อทำการกำหนดขนาดต่างๆ
2. ทำการออกแบบและจำลองภาพชิ้นงานในรูปแบบ 3 มิติ จากขนาดที่วัดจริงโดยใช้

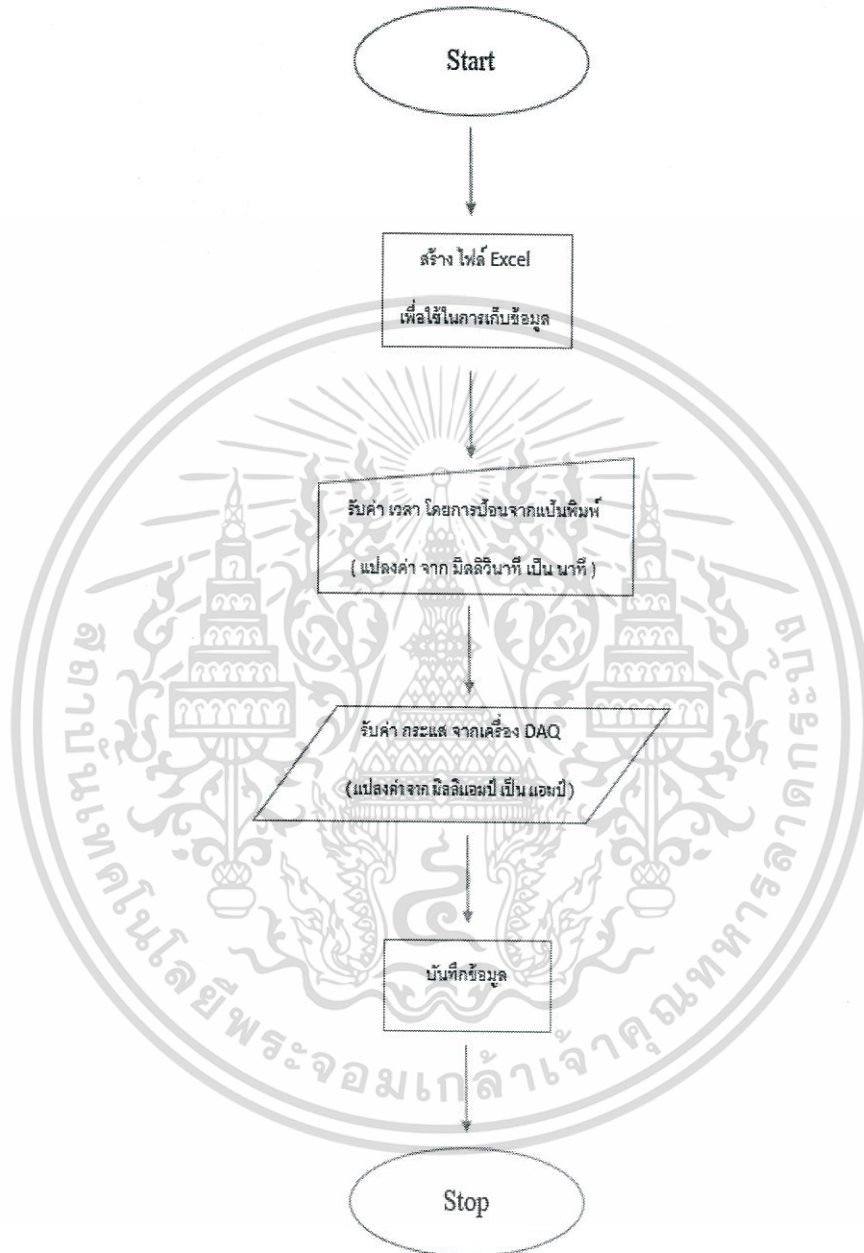
โปรแกรม Solidwork



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.4 แบบร่างหน้าตาของฝักรอบปีกเกอร์นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

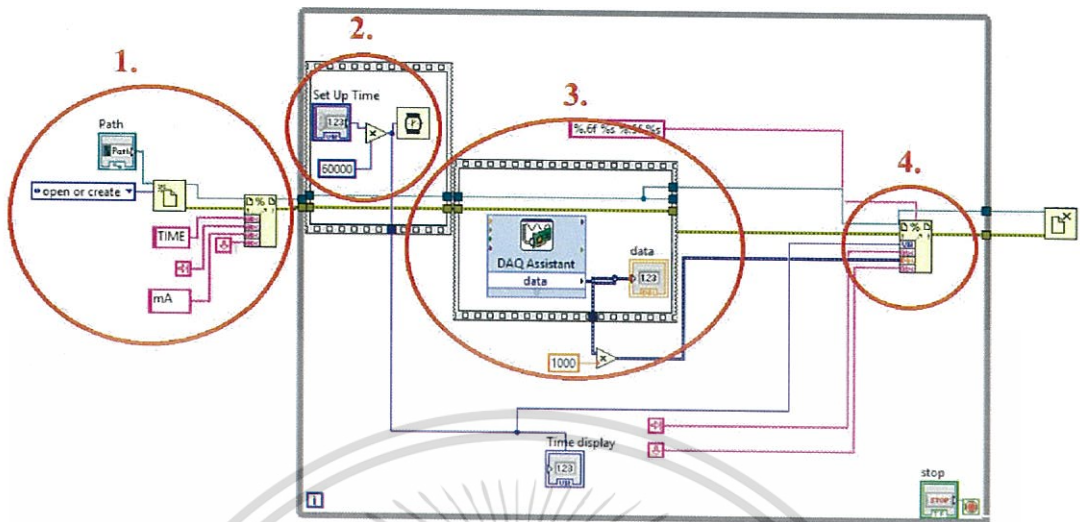
3.4.2 ทำการออกแบบและสร้างโปรแกรมสำหรับอ่านและบันทึกค่ากระแส

1. ออกแบบแผนผังความคิด (flow chart)



รูปที่ 3.5 แสดงแผนผังความคิด (flow chart) การออกแบบและสร้างโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 หลักการทำงานของโปรแกรม

2 เขียนโปรแกรมบันทึกค่ากระแสโดยใช้โปรแกรม Labview

หลักการทำงานของโปรแกรมในรูปที่ 3.28 เป็นดังนี้

วงกลมที่ 1. ส่วนของการเลือกโฟลเดอร์ที่ใช้เก็บข้อมูล/สร้างไฟล์เพื่อเก็บข้อมูล ในส่วนของ TIME จะเป็นการกำหนดว่าจะเก็บข้อมูลกี่วินาที เวลาในส่วนของ mA จะเป็นการกำหนดว่าจะเก็บข้อมูลกี่ครั้ง

วงกลมที่ 2. ส่วนของการกำหนดค่า เวลา จากแป้นพิมพ์ ซึ่งเวลาในที่นี่จะบ่งบอกถึงระยะเวลาระหว่างการบันทึกค่าในแต่ละครั้ง โดยในการบันทึกค่าเราจะทำการแปลงหน่วยจาก มิลลิวินาที เป็น นาที

วงกลมที่ 3. ส่วนของการรับค่ากระแสที่วัดได้ จากเครื่อง DAQ Multimeter เราจะทำการดึงเอาข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละเวลา มาแสดงค่าและเตรียมทำการบันทึกต่อไป โดยเราจะต้องทำการแปลงหน่วยของกระแส จาก แอมป์ เป็น มิลลิแอมป์

วงกลมที่ 4. ส่วนของการบันทึกค่า เราจะทำการนำข้อมูลที่ได้รับจากเครื่อง DAQ Multimeter มาทำการบันทึกลงในไฟล์และโฟลเดอร์ ตามที่ถูกระบุไว้ในวงกลมที่ 1 และเราสามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 สร้างฝากรอบปีกเกอร์ตามแบบที่ทำการออกแบบไว้

1. สร้างส่วนของฝากรอบปีกเกอร์และทำการเจาะรู



รูปที่ 3.7 ฝากรอบ

2. สร้างส่วนของด้ามจับชิ้นงานจากน็อตตัวผู้ ขนาด 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.8 ด้ามจับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 นำด้ามจับชิ้นงานมาประกอบเข้ากับฝาครอบจะได้ฝาครอบบีกเกอร์ออกมา



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานหลังประกอบเสร็จ

3.4.4 วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการอโนไดเซชัน

การสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการอโนไดเซชันที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20, 25 และ 30 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 45 นาที โดยมีรายละเอียดดังนี้

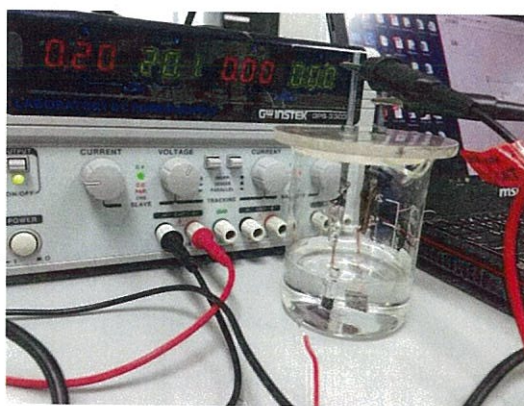
1. ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ จากนั้นทำการเป่าให้แห้ง



รูปที่ 3.10 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน

2. ทำการอโนไดซ์ชิ้นงานโดยให้ไทเทเนียมต่อเข้ากับขั้วบวก (Anode) และต่อแกรไฟต์เข้ากับขั้วลบ (Cathode) ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20, 25 และ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การต่อวงจรเพื่อทำไอโนไซด์ขึ้นงาน

3. นำชิ้นงานออกจากบีกเกอร์แล้วทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วทำการเป่าให้แห้ง



รูปที่ 3.12 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำเปล่า

3.4.5 นำชิ้นงานไปตรวจสอบการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

โดยเครื่องมือที่ใช้ทำการตรวจสอบมี 3 ประเภทดังนี้

1. Scanning Electron Microscopy (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน)
2. Atomic Force Microscope (กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม)
3. Field Emission Scanning Electron Microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.4.6 สรุปผลการทดลอง ชิ้นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

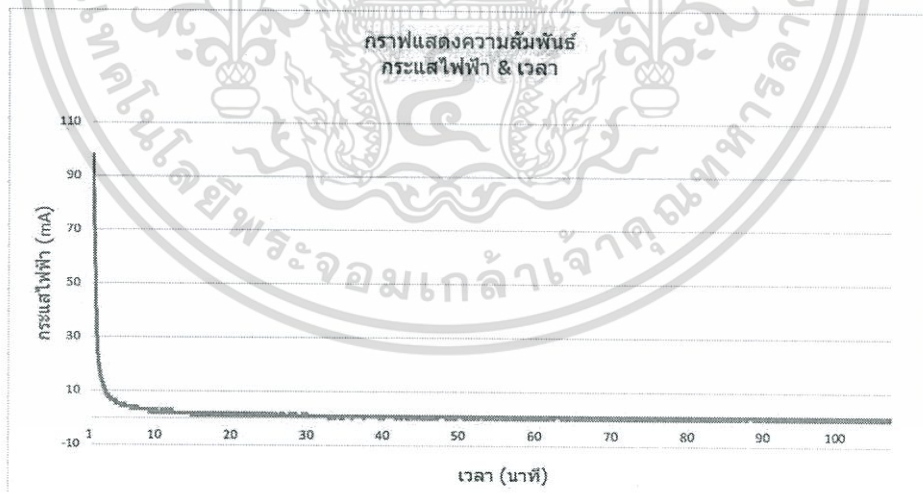
จากการศึกษาและวิจัยการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยวิธีการอโนไดเซชัน สำหรับใช้เป็นขั้วแอโนด เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่เกิดขึ้น ซึ่งได้ทำการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ผลการทดลอง

4.1 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองโดยใช้เวลา 105 นาที

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากทำอโนไดเซชันโดยการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้า 20 , 25 , และ 30 โวลต์ให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยชิ้นงานคือแผ่นไทเทเนียมอยู่ที่ขั้วบวกกระทำตัวเป็นขั้วแอโนด และ แท่งแกรไฟต์อยู่ที่ขั้วลบกระทำตัวเป็นขั้วแคโทด

4.1.1 ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์

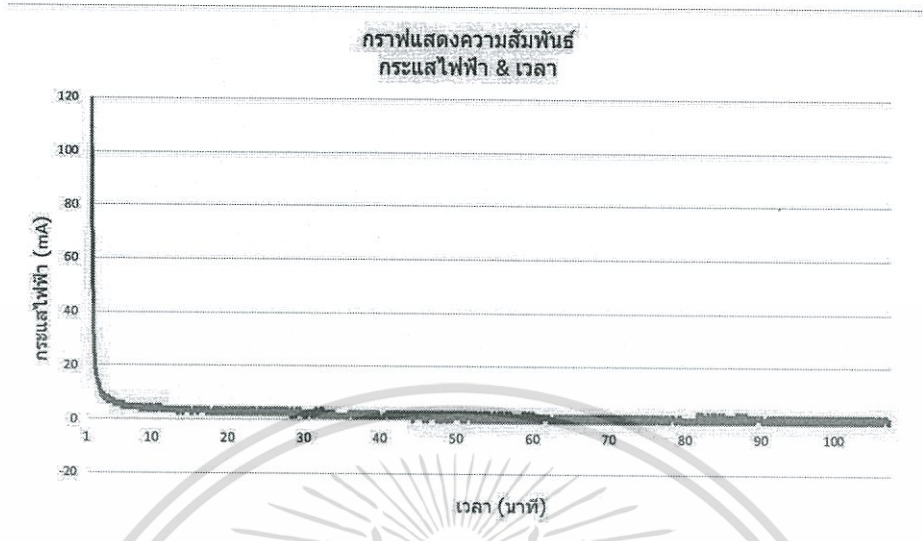


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์

จากกราฟรูปที่ 4.1 จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 97.83 mA และ ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ - 0.37929 mA ที่เวลา 32 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

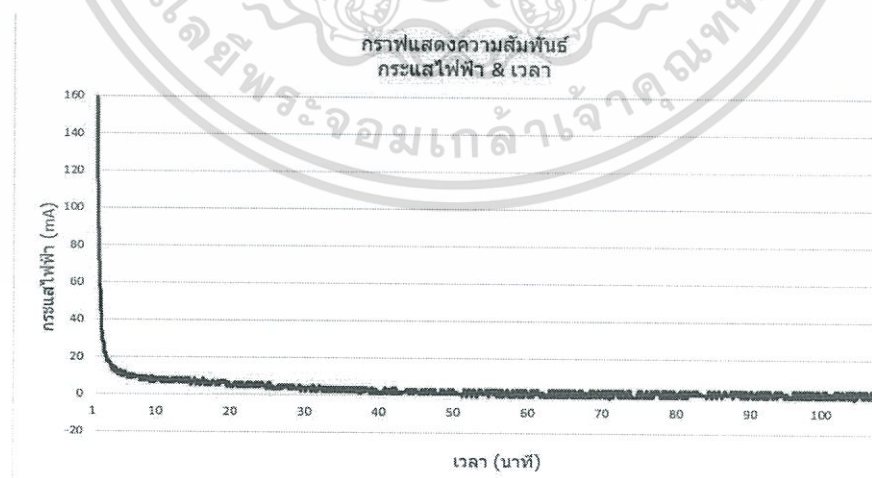
4.1.2 ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์

จากกราฟรูปที่ 4.2 จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 122.38 mA และ ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ -0.37929 mA ที่เวลา 43 นาท

4.1.3 ค่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

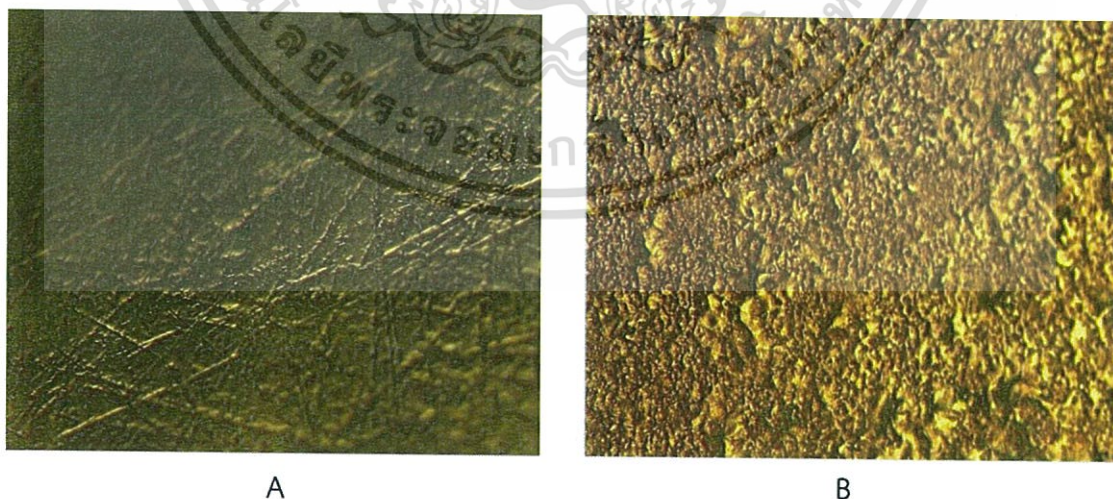
จากกราฟรูปที่ 4.3 จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับ 184.88 mA และ ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ - 0.37929 mA ที่เวลา 50 นาที

จากการทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลาในการทำการอโนไดซ์เซชันแล้วจะพบว่าที่วินาทีแรกของการทำงานกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นงานได้รับจากแหล่งจ่ายนั้นจะมีค่าสูงมาก คือ 97.83 mA , 122.38 mA และ 184.88 mA ตามลำดับ และหลังจากเวลาผ่านไปเพียงไม่กี่นาทีที่ค่ากระแสนั้นก็จะลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่งที่กระแสไฟฟ้านั้นมีการขยับเพิ่มสูงขึ้นและลดลงสลับกันไปเป็นคลื่นเราจะสามารถบอกได้ว่าที่จุดที่กระแสไฟฟ้าลดลงและขยับเพิ่มขึ้นนี้เองจะเป็นจุดที่มีโอกาสที่จะเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวของชิ้นงาน

4.2 พื้นผิวของชิ้นงานก่อนและหลังอโนไดซ์ด้วยกล่องไมโครสโคป

เนื่องจากพื้นผิวดั้งต้นของแผ่นไทเทเนียมที่จะใช้ในการอโนไดซ์ที่ค่าความต่างศักย์ 20, 25 และ 30 โวลต์ มีผลต่อลักษณะการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จึงนำชิ้นงานมาสองเพื่อดูลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องไมโครสโคปที่กำลังขยาย 100 เท่า ก่อนการทำอโนไดซ์เพื่อทำการตรวจสอบความเรียบบนผิวชิ้นงานและตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงานหลังการทำอโนไดซ์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวชิ้นงานก่อนและหลังการทำอโนไดซ์

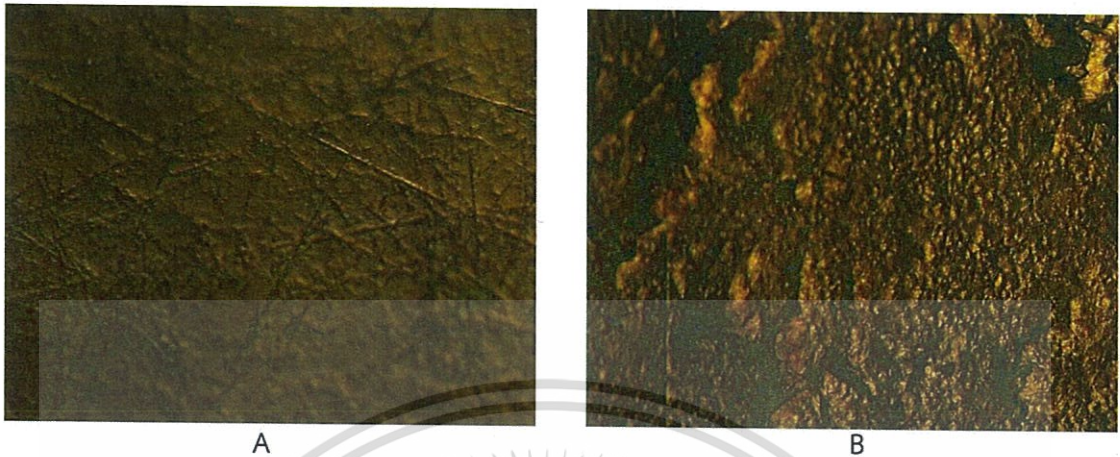
4.2.1 ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์



รูปที่ 4.4 แสดงพื้นผิวของชิ้นงานก่อนและหลังอโนไดซ์ของชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2. ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์



รูปที่ 4.5 แสดงพื้นผิวของชิ้นงานก่อนและหลังโหนดซ์ของชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์

4.2.3 ค่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์



รูปที่ 4.6 แสดงพื้นผิวของชิ้นงานก่อนและหลังโหนดซ์ของชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์

จากการนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องไมโครสโคป จะเห็นได้ว่าลักษณะของพื้นผิวของแผ่นไทเทเนียมมีการเปลี่ยนแปลงไปหลังการทำโหนดซ์ โดยแผ่นไทเทเนียมก่อนการทำโหนดซ์จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบและไม่ขรุขระ แต่เมื่อนำแผ่นไทเทเนียมไปทำการโหนดซ์จะพบว่าแผ่นไทเทเนียมมีพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้นและพื้นผิวมีความหยาบ ไม่สม่ำเสมอซึ่งอาจเกิดมาจากการทำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองซึ่งส่งผลให้พื้นผิวของชิ้นงานนั้นแตกต่างไปจากเดิมซึ่งก็

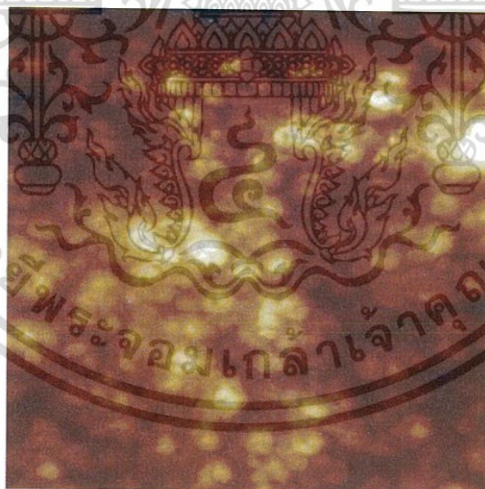
เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากถ้าพื้นผิวของชิ้นงานตั้งต้นมีความเรียบมากและไม่ขรุขระเมื่อนำชิ้นงานไปทำการอโนไดซ์แล้วชิ้นงานภายหลังการทำอโนไดซ์นั้นจะยังคงมีความเรียบมากพอที่จะทำให้การจัดเรียงตัวของท่ออยู่ในระดับที่น่าพอใจ ในทางตรงกันข้ามถ้าชิ้นงานตั้งต้นมีพื้นผิวที่ไม่เรียบและขรุขระมาก ภายหลังจากการทำอโนไดซ์ชิ้นงานจะยังคงมีความขรุขระมากยิ่งขึ้น และจะทำให้การจัดเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์และไม่เป็นระเบียบเท่าที่ควร

4.3 ภาพแสดงลักษณะการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM

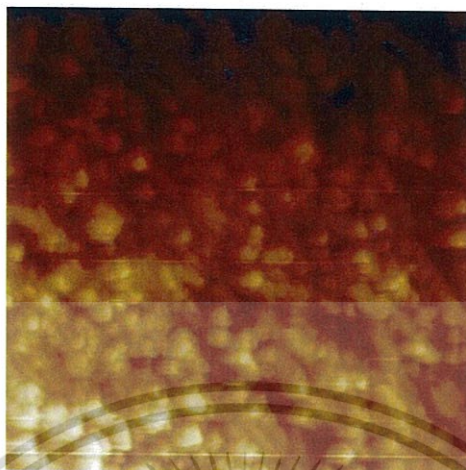
เนื่องจากท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นมีระดับที่เล็กมากและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นในการตรวจสอบผลของการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นจึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ในการตรวจสอบลักษณะการเกิดของชิ้นงานที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์, 25 โวลต์ และ 30 โวลต์

4.3.1 ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์



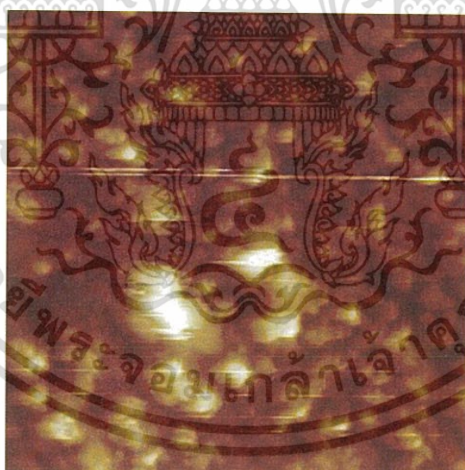
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการเกิดท่อนาโนTiO₂บนพื้นผิวด้วยเครื่องAFMที่ความต่างศักย์20โวลต์

4.3.2 ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการเกิดท่อนาโน TiO_2 บนพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM ที่ความต่างศักย์ 25 โวลต์

4.3.3 ค่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะการเกิดท่อนาโน TiO_2 บนพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM ที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์

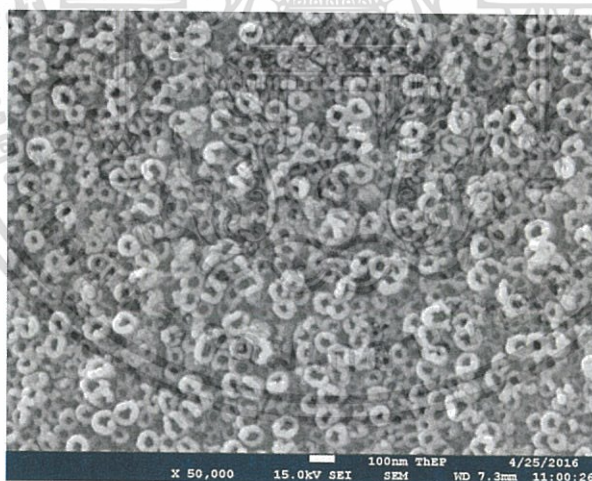
จากการนำชิ้นงานไปส่องดูลักษณะการเกิดของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) จากภาพจะเห็นได้ว่ามีส่วนที่มีลักษณะคล้ายท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ 25 โวลต์ และ 30 โวลต์ แสดงว่าชิ้นงานมีการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นแต่การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) จะเป็นการส่องบนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวของชิ้นงานแบบเบื้องต้นเพื่อจะตรวจสอบว่าชิ้นงานนั้นมีการเกิดขึ้นของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นจริงก่อนที่จะนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) อีกครั้งหนึ่งเพื่อวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมที่เกิดขึ้นและวัดขนาดความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ต่อไป

4.4 แสดงภาพการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง FESEM

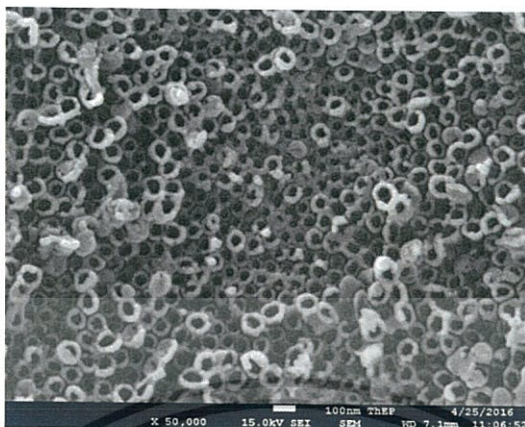
จากการนำชิ้นงานมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) เพื่อเป็นตรวจสอบเบื้องต้นว่าชิ้นงานเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไม่ จากภาพที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) จะเห็นได้ว่าการเกิดของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เราจึงนำชิ้นงานมาส่องแบบละเอียดอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้เห็นภาพรวมของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ชัดเจนขึ้นด้วยกล้อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ที่กำลังขยาย 50000 เท่า

4.4.1 ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์



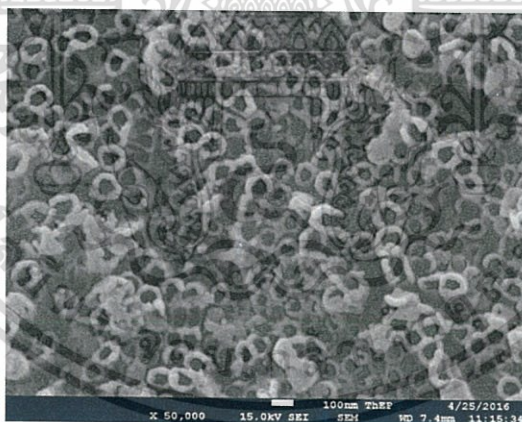
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการเกิดท่อไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวด้วย กล้อง FESEM ของชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์

4.4.2 ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะการเกิดท่อโทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM ของชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์

4.4.3 ค่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์



รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการเกิดท่อโทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM ของชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์

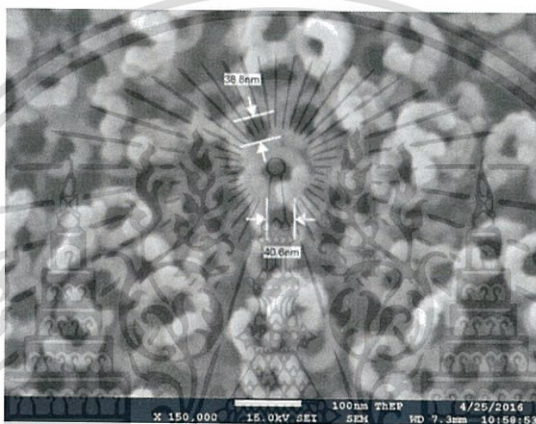
จากการนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ที่กำลังขยาย 50000 เท่า จะพบว่าภาพโดยรวมของท่อนาโนโทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีความชัดเจน และสามารถมองเห็นลักษณะสัณฐานและการจัดเรียงตัวของท่อนาโนโทเทเนียมได้ชัดเจนกว่าการส่อง

ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไทเทเนียมไดออกไซด์ของชิ้นงาน จากเครื่อง FESEM

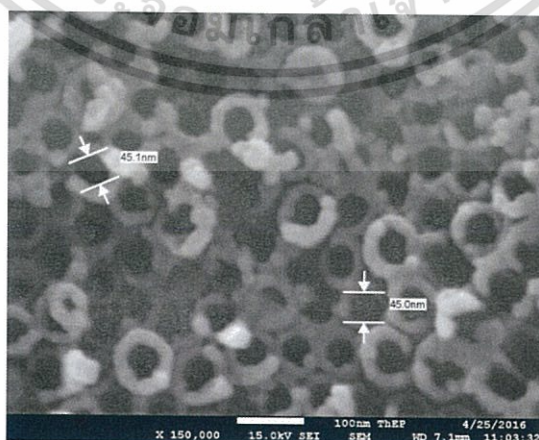
เมื่อเรานำชิ้นงานที่ได้ไปส่องด้วยกล้องกล้อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ที่กำลังขยาย 50000 เท่า ภาพที่ได้มีความชัดเจนมากและสามารถนำมาวิเคราะห์หาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของท่อที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์, 25 โวลต์ และ 30 โวลต์

4.5.1 ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์



รูปที่ 4.13 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่เกิดขึ้นซึ่งค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 30nm – 40nm

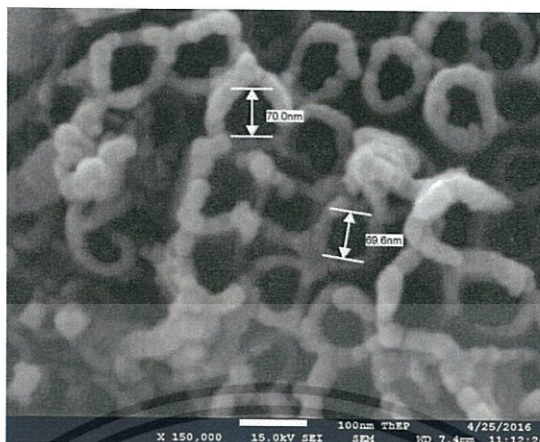
4.5.2 ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์



รูปที่ 4.14 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่เกิดขึ้นซึ่งค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 40nm–50nm

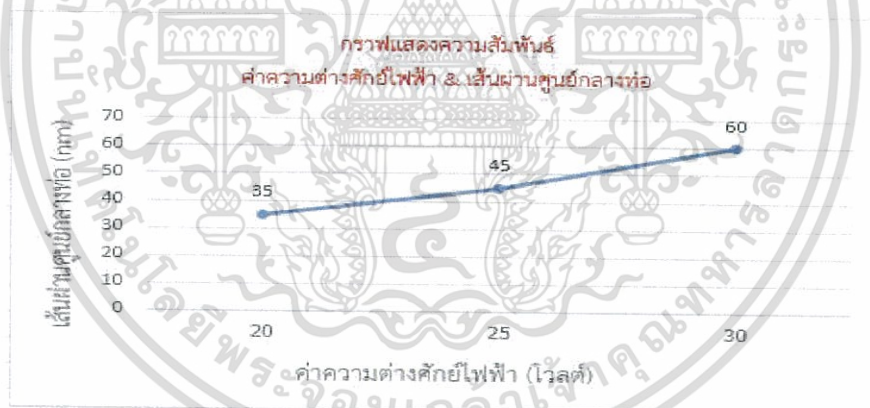
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ค่าความต่างศักย์ที่30โวลต์



รูปที่ 4.15 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่เกิดขึ้นซึ่งค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 50nm – 70nm

4.5.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและเส้นผ่านศูนย์กลาง

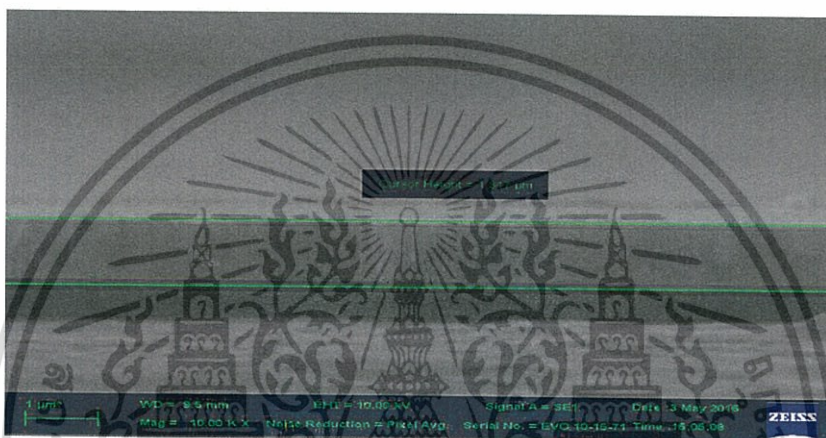
จากการทำโนโดซิสโดยใช้ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ , 25 โวลต์ และ 30 โวลต์ ผลที่ได้คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีขนาดเฉลี่ยคือ 35 nm , 45 nm และ 60 nm ตามลำดับโดยจากผลที่ได้นี้จะเป็นตัวบ่งบอกว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และความหนาของผนังท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการทำโนโดซิสซึ่งถ้าเราต้องการให้ท่อนาโนไทเทเนียมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหรือผนังที่กว้างขึ้นก็จะต้องใช้ค่าความต่างศักย์ที่มากขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 แสดงความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากเครื่อง SEM

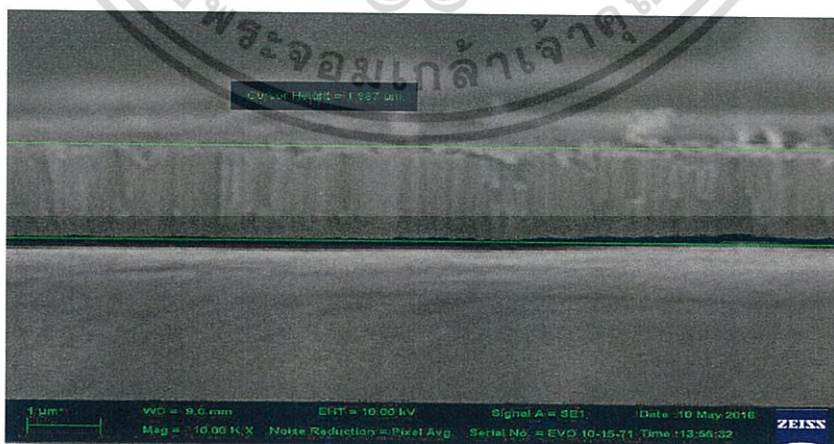
เมื่อเราทราบว่าชิ้นงานมีการเกิดท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นจริง เราจะสามารถวัดหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ดังนั้นเราจึงสามารถระบุความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ด้วยเช่นกันโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในการวัดหาค่าความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

4.6.1 ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์



รูปที่ 4.17 แสดงความยาวของท่อที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $1.1 \mu\text{m} - 1.4 \mu\text{m}$ ด้วยเครื่อง SEM

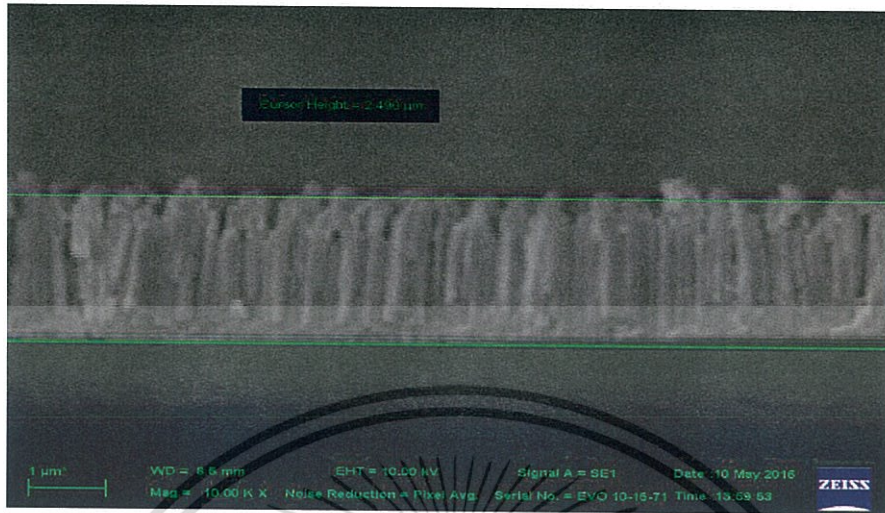
4.6.2 ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์



รูปที่ 4.18 แสดงความยาวของท่อที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $1.7 \mu\text{m} - 1.8 \mu\text{m}$ ด้วยเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ค่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์



รูปที่ 4.19 แสดงความยาวของท่อที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $2.3 \mu\text{m}$ – $2.5 \mu\text{m}$ ด้วยเครื่อง SEM

4.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความยาวของท่อ TiO_2



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความยาวของท่อ TiO_2

จากการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ส่องหาความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะพบว่าเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยการใช้ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ , 25 โวลต์ และ 30 โวลต์ ผลที่ได้คือ ความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีขนาดเฉลี่ยคือ $1.75 \mu\text{m}$, $2.05 \mu\text{m}$ และ $2.25 \mu\text{m}$ ตามลำดับโดยจากผลที่ได้นี้จะเป็นตัวบ่งบอกความยาวของท่อนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการทำโนโดซ์โดย ยิ่งความต่างศักย์ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาและการเคลื่อนที่ของไอออนอิสระไปยังชั้นงานได้ดีขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ความลึกของชั้นงานมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นถ้าเราต้องการให้ท่อนาโนไทเทเนียมมีความยาวที่เพิ่มมากขึ้นจึงต้องใช้ค่าความต่างศักย์ที่มากขึ้นตามไปด้วย

4.7 แสดงมุมของน้ำบนพื้นผิวชั้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิก

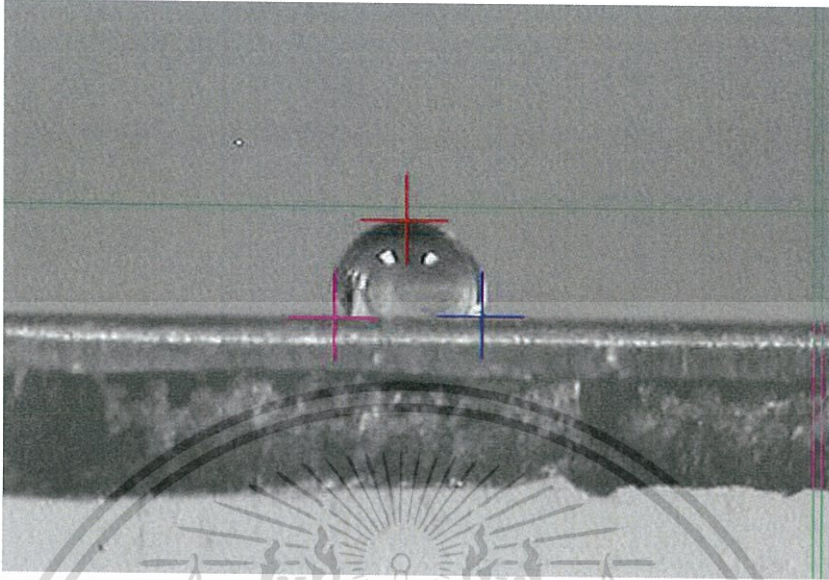
คุณสมบัติหนึ่งของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ คือคุณสมบัติไฮโดรโฟบิก เป็นคุณสมบัติของพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ สามารถวัดความเป็นไฮโดรโฟบิกได้จากการวัดมุมของน้ำบนพื้นผิวชั้นงาน ดังนั้นเราจึงสนใจที่จะทดสอบคุณสมบัตินี้ของชั้นงานที่ทำการโนโดซ์ด้วยค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ , 25 โวลต์ และ 30 โวลต์

4.7.1 ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์



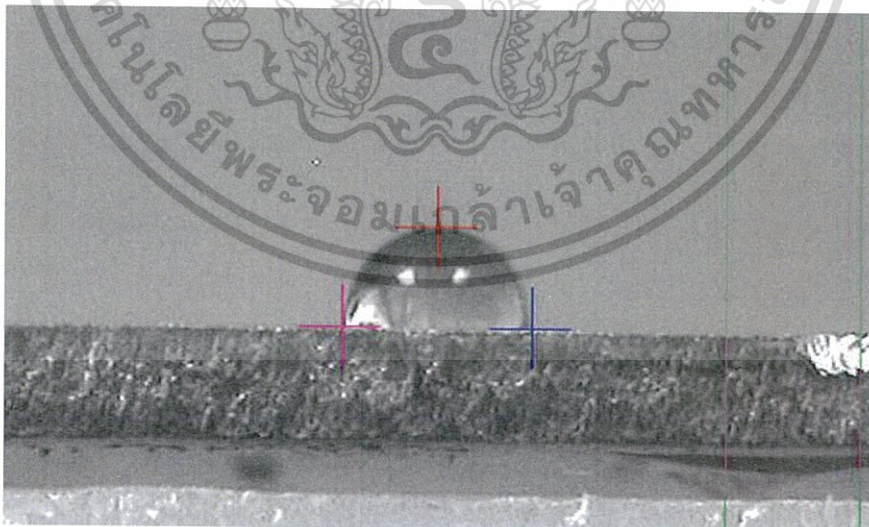
รูปที่ 4.21 แสดงมุมของน้ำบนพื้นผิวชั้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิก ได้ค่าเฉลี่ยมุม คือ 116 องศา

4.7.2 ค่าความต่างศักย์ที่ 25 โวลต์



รูปที่ 4.22 แสดงมุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิก ได้ค่าเฉลี่ยมุม คือ 104 องศา

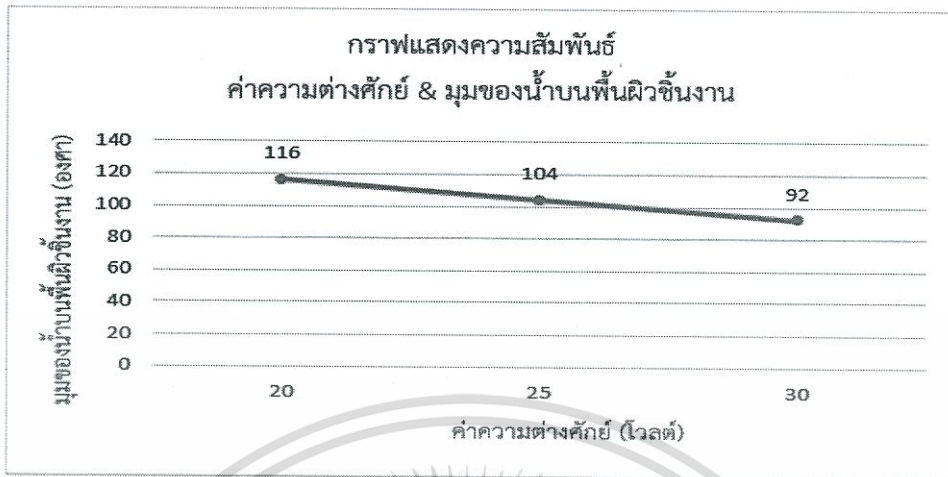
4.7.3 ค่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์



รูปที่ 4.23 แสดงมุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณสมบัติความเป็นไฮโดรโฟบิก ได้ค่าเฉลี่ยมุม คือ 92 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและมุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงาน



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและมุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงาน

จากการทดสอบความเป็นไฮโดรโฟบิก โดยการวัดค่ามุมของน้ำบนพื้นผิวของชิ้นงานที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ , 25 โวลต์ และ 30 โวลต์ พบว่าชิ้นงานที่มีค่าความต่างศักย์น้อยจะมีความเป็นไฮโดรโฟบิกมากกว่าชิ้นงานที่มีค่าความต่างศักย์สูงซึ่งค่าความเป็นไฮโดรโฟบิกนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆได้เช่น สีสทาบ้าน , ครีมกันแดด และ เซนเซอร์ต่างๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลกาทดลอง

ผลการทดลอง ความต่างศักย์	ช่วงของเส้นผ่าน ศูนย์กลางของท่อ (nm)	ช่วงของความยาวท่อ (μm)	มุมของน้ำบนพื้นชิ้นงาน (องศา)			
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
20 V	30 - 40	1.1 - 1.4	114.54	114.01	118.06	116
25 V	40 - 50	1.7 - 1.8	105.61	101.39	104.28	104
30 V	50 - 70	2.3 - 2.5	93.37	85.23	94.88	92

ตารางแสดงผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ , 25 โวลต์ และ 30 โวลต์ จากตารางที่ 4.1 คือตารางแสดงค่าทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกล่าวคือ การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนานาโทเทเนียมไดออกไซด์ , การหาความยาวของท่อไทเทเนียมไดออกไซด์ และการหาค่าเฉลี่ยมุมของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ วิธีการอโนไดเซชัน โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วได้แก่ ขั้วบวกเชื่อมกับโลหะไทเทเนียม กระทำตัวเป็นแอโนด ขั้วลบเชื่อมกับแท่งแกรไฟต์กระทำตัวเป็นขั้วแคโทด โดยทั้ง 2 ขั้วแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากการศึกษาและการทดลองพบว่าการจัดเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะเริ่มมีการจัดเรียงตัวเป็นรูปร่างของท่อและจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบที่ความต่างศักย์ตั้งแต่ 10 โวลต์ขึ้นไปและจะเป็นระเบียบมากขึ้นตามค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นเราจึงสนใจที่จะทำการทดลองที่ค่าความต่างศักย์ 10 โวลต์ และ 15 โวลต์ และนำมาตรวจสอบผลที่ได้คือ ไม่พบโครงสร้างลักษณะคล้ายท่อบนพื้นผิวของชิ้นงานจึงสามารถสรุปได้ว่าที่ความต่างศักย์นี้ไม่ส่งผลให้เกิดท่อนาโนไทเทเนียม ดังนั้นจึงเลือกที่จะใช้งานที่ความต่างศักย์ที่มากขึ้นก็คือ 20 โวลต์ , 25 โวลต์ และ 30 โวลต์ จากการจัดจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ผลที่ได้คือ อาจเกิดขึ้นฟิล์มออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน หรือ ท่อขนาดนาโน โดยจากการศึกษาข้อมูลอ้างอิงจากแหล่งต่างๆสรุปได้ว่าขนาดท่อนาโนที่เราสนใจอยากได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 27 – 30 nm และปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ คือ ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าจากการศึกษางานวิจัย พบว่าค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ คณะผู้จัดทำจึงสนใจที่จะทดลองและศึกษาตัวแปรดังกล่าว เพื่อให้ได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ตามที่ต้องการจากการทดลองเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ 3 ค่า คือ 20, 25 และ 30 โวลต์ พบว่าที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วง 30 – 40 nm ที่ค่าความต่างศักย์ 25 โวลต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วง 40 – 50 nm และค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วง 50 – 70 nm จะเห็นได้ว่าที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับช่วงที่ต้องการมากที่สุด จึงสรุปได้ว่าค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีความเหมาะสมต่อการสังเคราะห์ท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วง 27–30 nm แต่อย่างไรก็ตามการที่จะนำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองนี้มาประยุกต์ใช้ในการจัดระเบียบการเรียงตัวของ grain บนแผ่น platter นั้นยังไม่สามารถทำได้เนื่องจากลักษณะของท่อที่ได้นี้ การจัดเรียงตัวของท่อยังไม่เป็นระเบียบมากพอและยังขาดความสม่ำเสมอทั้งของพื้นผิวและของเส้นผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางที่อดังนั้นจึงควรต้องได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติมในส่วนของพื้นผิวชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้ ออกมาีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในแผ่น platter ได้จริงตามที่คาดหวัง ในอนาคตต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาเรื่องความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงตัวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ อาจ มีสาเหตุมาจากความบริสุทธิ์ของชิ้นงานตั้งต้นที่นำมาใช้ในการทดลองและความเรียบของชิ้น งานที่ นำมาทำการเอ็โนไคซ์ซึ่งจะเกี่ยวข้องกั้ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงาน

2. การจัดวางชิ้นงานระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับชิ้นงานในขั้นตอนการทำเอ็โนไคซ์ ควรจัดวางให้ ทั้งสองส่วนนี้ขนานกันในแนวตั้งเพื่อให้การไหลของประจุลบเป็นไปอย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ



เอกสารอ้างอิง

- [1] วรมน แผล่งหล้า . 2559 กลไกการเกิดท่อ . กรุงเทพมหานคร . เอกสารอัดสำเนา
- [2] SATAPORN . 2559 . “แนะนำสารไทเทเนียมไดออกไซด์” กรุงเทพมหานคร . เอกสารอัดสำเนา
- [3] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัย มหิดล . 2559 . Scanning Electron Microscope (SEM) . [Online].Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [4] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัย มหิดล . 2559 . Atomic Force Microscope (กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม) [Online].Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [5] คอลีเยาะ บาเหะ . 2559 . ปฏิบัติการ เทคนิค ยะลา . เอกสารอัดสำเนา
- [6] Anonymous . 2559 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) . [Online] Available : <http://thep-center.org/src2/files/eq/fesem.pdf>
- [7] บัณฑิตมหาวิทยาลัย สยาม. 2559. โปรแกรม Labview. [Online].Available : http://www.researchsystem.siam.edu/image/coop/DESIGN_AND_CONSTRUCTION_OF_ELECTRICAL_MEASUREMENT_USING_LABVIEW_PROGRAM/ch2.pdf
- [8] ELIZABETH A.DOBISZ , ZVONOMIR Z.BANDIC , TSAI – WEI WU , AND THOMAS ALBRECHT . 2559 Patterned Media : Nanofabrication Challenges of Future Disk Drives . [Online].Available . http://ieeexplore.ieee.org/ieee_pilot/articles/96jproc-11/jproc-EDobisz-2007600/article.html
- [9] ดนัย กิจชัยนุกูล . 2559 . เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด . [Online]. Available : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf>
- [10] ทรงวุฒิ หล้าขอด และ พิพัฒน์ แซ่โค้ว . 2557. “เครื่องวัดพลังงานโดย DAQ ทำงานร่วมกับ Labview.” ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
- [11] ชาคริต พันธุ์นิกุล และ วชิรวิทย์ ภัคดียิ่ง . 2553 . “การศึกษากระบวนการอะโนไดเซชันเพื่อผลิตแม่พิมพ์นาโนอลูมิเนียมออกไซด์.” ขอนแก่น. เอกสารอัดสำเนา.
- [12] กนกวรรณ แก้วคุณ , อภิพงษ์ พุฒคำ และ อัจฉรา อิมคำ . 2559. “การสังเคราะห์และตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุผสมแอโรเจล-โครงข่ายโลหะอินทรีย์ที่มีความพรุนระดับนาโนเมตร.” เอกสารอัดสำเนา.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] ยุพดี เผ่าพันธุ์ . 2559 . “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน.” กรุงเทพมหานคร. เอกสารอัดสำเนา.
- [14] นิรนาม . 2559 . “นาโนพอร์สซิลิคอน.” เอกสารอัดสำเนา.
- [15] Craig A. Grimes and Gopal K. Mor . 2009. TiO₂ Nanotube Array. [Online]. Available: www.springer.com.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวกรรวิ วิรันดร
 วัน เดือน ปีเกิด 20 ตุลาคม พ.ศ.2536
 ที่อยู่ 124 หมู่ที่ 2 ต.เมืองเก่า อ.พนมสารคาม จ.ฉะเชิงเทรา 24120
 E-mail : Kornrawee.wi@gmail.com Tel : 087-5194603

ชื่อ-นามสกุล นายธิติ แสงอินทร์
 วัน เดือน ปีเกิด 6 กันยายน พ.ศ.2537
 ที่อยู่ 30/1 หมู่ที่ 1 ต.สามชุก อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130
 E-mail : jaysangin18@gmail.com Tel : 089-4481851

๐๙๑๗๑

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้