สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าฉลาดกระบัง

การสร้างปลายของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตน ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

นางสาวธีรนันท์ พิมพิศาล
นางสาวเพ็ญพร ตั้งจริยธรรม
นางสาววลีพร บุษบงษ์

วพ.
ธ626ก
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 81589
วัน,เดือน,ปี 19 มี.ย. 2551

.b 11934864
.i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fabrication of Tungsten Needle Tip for Liquid Metal Ion Source by Electrochemical Etching Method

Miss. Teeranan Phimphisan

Miss. Penporn Tungjaritam

Miss. Waleeporn Bussabong

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree

of Bachelor of Science

Department of Applies Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การสร้างปลายของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

นักศึกษา นางสาวธีรนันท์ พิมพิศาล
นางสาวเพ็ญพร ตั้งจริยธรรม
นางสาววลีพร บุษบงษ์

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ **คณะวิทยาศาสตร์**

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ – เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ. ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์	
กรรมการ	ดร. ปิติพร ถนอมงาม	
กรรมการ	รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
กรรมการที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา	

.....

(รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การสร้างปลายของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี
นักศึกษา	นางสาวธีรนันท์ พิมพิศาล นางสาวเพ็ญพร ตั้งจริยธรรม นางสาววลีพร บุษบงษ์
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ **คณะวิทยาศาสตร์**
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้เป็นการสร้างปลายของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ลวดทังสเตนถูกจุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งบรรจุในภาชนะสเตนเลส โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงผ่านเส้นลวดทังสเตน ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะกัดให้เส้นลวดขาดเกิดเป็นปลายแหลมขึ้น จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 4 โมล กระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ เส้นลวดทังสเตนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 ไมโครเมตร จะถูกกัดให้เป็นปลายแหลมที่มีรัศมีความโค้งของส่วนปลายประมาณ 5 ไมโครเมตร มุมยอดประมาณ 20 องศา และมีอัตราส่วนระหว่างความยาวของปลายต่อความกว้างของฐาน (aspect ratio) เท่ากับ 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project	Fabrication of Tungsten Needle Tip for Liquid Metal Ion Source by Electrochemical Etching Method
Name	Miss. Teeranan Phimphisan Miss. Penporn Tungjaritam Miss. Waleeporn Bussabong
Department	Applied Physics **Faculty of Science**
Program	Applied Physics – Science and Industry Instrumentation
Academic Year	2007
Special Project co-advisor	Asst.Prof.Dr.Warawoot Thowladda

ABSTRACT

This special project proposes a method of fabrication of tungsten needle tip for liquid metal ion source by electrochemical etching technique. Tungsten wire was immersed in sodium hydroxide aqueous solution. The solution was filled in stainless steel container. A direct current was supplied for electropolishing to cut a neck portion of the wire and needle tip was formed. The sodium hydroxide solution at different concentrations and different values of dc constant current were used to etch a 300 micrometer diameter tungsten wire. The experiment reveal that at concentration of 4 mole and 11 mA dc constant current the radius of curvature of the needle tip was found to be 5 micrometer approximately. The apex angle and the aspect ratio of the needle tip were approximately 20 degree and 0.6 respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายๆท่าน ด้วยกัน ผู้เขียนขอขอบคุณ

ครอบครัว	ที่คอยให้กำลังใจ ห่วงใย สนับสนุนด้านการศึกษา และ ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดจนสำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา	ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ซึ่งถ่ายทอดวิชาการความรู้ด้านวิชาการ และให้โอกาสในการทำโครงงาน ตลอดจนอนุเคราะห์อุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปฏิบัติ ทำให้โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี, พี่อมร, พี่เดี่ยว	ที่ช่วยเป็นที่ปรึกษาด้านการทดลอง ให้ความสะดวกในการทดลองโครงงาน และกรุณาหาอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนถ่ายทอดวิชาความรู้ทางด้านวิชาการ และความแนะนำ จนโครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
เพื่อนๆ ทุกคน	ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำโครงงาน จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอคุณพระศรีรัตนตรัยจงดลบันดาลให้ท่านทั้งหลายจงประสบแต่ความสุขตลอดไป

นางสาวธีรนันท์ พิมพิศาล
นางสาวเพ็ญพร ตั้งจริยธรรม
นางสาววลีพร บุษบงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 บทนำ	4
2.2 นิยามของอิเล็กโทรไลซิส	5
2.3 กฎของฟาราเดย์	9
2.4 การคำนวณค่าความเข้มข้น	11
2.5 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี	12
2.6 เซลไฟฟ้าเคมี	13
2.7 การสร้างปลายเข็มจากลวดทังสเตนโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	13
2.8 พารามิเตอร์ของปลายเข็ม	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการศึกษาการสร้างปลายเข็มของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	16
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	17
3.3 ขั้นตอนการสร้างปลายเข็มของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 วิธีศักย์ไฟฟ้าคงที่

4.1.1 กำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบสเตนเลส 26

4.1.2 กำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน 34

4.2 วิธีกระแสไฟฟ้าคงที่ 41

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 การทดลองได้แบ่งเงื่อนไขเป็น 2 เงื่อนไข ดังต่อไปนี้

5.1.1 กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ (constant voltage) 56

5.1.2 กำหนดค่ากระแสคงที่ (constant current) 59

5.2 เปรียบเทียบภาชนะที่ใช้ในการบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ลักษณะ 66

เอกสารอ้างอิง 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย 3

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าต่างๆของลักษณะของปลายเข็มที่วัดได้จากโปรแกรม 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 โครงสร้าง (ซ้าย) และลักษณะของส่วนปลายเข็ม (ขวา) ของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลว 1
รูปที่ 2.1 เครื่องมือที่ใช้แยกสารละลายด้วยไฟฟ้า 4
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่อิเล็กโทรดระหว่างการทำอิเล็กโทรไลซิสของ NaCl โดยแบตเตอรี่เป็นเป็นตัวทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองไม่ได้สามารถเกิดขึ้นได้ 5
รูปที่ 2.3 รูปร่างของทังสเตนเมื่อทังสเตนถูกออกซิไดส์ 14
รูปที่ 2.4 รูปร่างของทังสเตนเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา(กระแสมีค่าเป็นศูนย์) 14
รูปที่ 2.5 การวัดพารามิเตอร์ค่าต่างๆของปลายเข็ม 15
รูปที่ 3.1 ลักษณะของปลายเข็ม 16
รูปที่ 3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบโปรแกรมได้ (Programmable Power Supply) 17
รูปที่ 3.3 Digital Multimeter ที่ทำหน้าที่เป็น Ampmeter 18
รูปที่ 3.4 ลวดทังสเตนขนาด 300 ไมครอน 18
รูปที่ 3.5 แท่นวางอุปกรณ์ 19
รูปที่ 3.6 เครื่องล้างด้วยระบบอัลตราโซนิค 19
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์ 20
รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งสาร 20
รูปที่ 3.9 ภาชนะบรรจุสารละลายสเตนเลส 21
รูปที่ 3.10 ภาชนะบรรจุสารละลายเทฟลอน 21
รูปที่ 3.11 การต่อวงจรไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อใช้สร้างปลายเข็ม 22
รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดลอง 23
รูปที่ 3.13 วิธีกำหนดระดับของปลายเข็มที่จุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 24
รูปที่ 4.1 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 27
รูปที่ 4.2 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 28
รูปที่ 4.3 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล 29
รูปที่ 4.4 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 29
รูปที่ 4.5 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล 30
รูปที่ 4.6 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4.5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล 31
รูปที่ 4.7 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล 32
รูปที่ 4.9 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5.5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล 33
รูปที่ 4.10 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 6 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล 33
รูปที่ 4.11 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2 โวลต์ ความเข้มข้น 2 โมล 34
รูปที่ 4.12 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2.5 โวลต์ ความเข้มข้น 2 โมล 35
รูปที่ 4.13 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 35
รูปที่ 4.14 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล 36
รูปที่ 4.15 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 37
รูปที่ 4.16 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 38
รูปที่ 4.17 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 39
รูปที่ 4.18 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 40
รูปที่ 4.19 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 40
รูปที่ 4.20 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 6 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล 41
รูปที่ 4.21 กระแสไฟฟ้า 4 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 42
รูปที่ 4.22 กระแสไฟฟ้า 5 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล 43
รูปที่ 4.23 กระแสไฟฟ้า 5 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล 44
รูปที่ 4.24 กระแสไฟฟ้า 6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 45
รูปที่ 4.25 กระแสไฟฟ้า 6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล 45
รูปที่ 4.26 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล 46
รูปที่ 4.27 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 47
รูปที่ 4.28 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล 47
รูปที่ 4.29 กระแสไฟฟ้า 9 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 48
รูปที่ 4.30 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล 49
รูปที่ 4.31 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 50
รูปที่ 4.32 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.33 กระแสไฟฟ้า 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 51

รูปที่ 4.34 กระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 52

รูปที่ 4.35 กระแสไฟฟ้า 13 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 53

รูปที่ 4.36 กระแสไฟฟ้า 14 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล 54

รูปที่ 4.37 กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล 55

รูปที่ 5.1 (a) ลักษณะปลายเข็มที่ต้องการ
(b) ลักษณะของปลายเข็มที่แรงดันคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 56

รูปที่ 5.2 ความกว้างฐานของปลายเข็มมีขนาด 296 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 57

รูปที่ 5.3 ความสูงของปลายเข็มมีขนาด 85 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 57

รูปที่ 5.4 มุมฐานของปลายเข็มมีขนาด 74 องศา ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 58

รูปที่ 5.5 มุมบนของปลายเข็มมีขนาด 48 องศา ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 58

รูปที่ 5.6 รัศมีของปลายเข็มมีขนาด 12 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 59

รูปที่ 5.7 (a) รูปลักษณะปลายเข็มที่ต้องการ
(b) รูปลักษณะของปลายเข็มกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล 60

รูปที่ 5.8 ความกว้างฐานของปลายเข็มมีค่า 295 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล 60

รูปที่ 5.9 ความสูงของปลายเข็มมีขนาด 163 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล 61

รูปที่ 5.10 มุมฐานของปลายเข็มมีขนาด 69 องศา ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.11 มุมบนของปลายเข็มมีขนาด 20 องศา ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล 62

รูปที่ 5.12 รัศมีของปลายเข็มมีขนาด 5 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 62

รูปที่ 5.13 (a) รูปลักษณะปลายเข็มที่ต้องการ (b) รูปลักษณะของปลายเข็มกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 63

รูปที่ 5.14 ความกว้างฐานของปลายเข็มมีค่า 292 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 63

รูปที่ 5.15 ความสูงของปลายเข็มมีขนาด 200 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 64

รูปที่ 5.16 มุมฐานของปลายเข็มมีขนาด 71 องศา ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 64

รูปที่ 5.17 มุมบนของปลายเข็มมีขนาด 23 องศา ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 65

รูปที่ 5.18 รัศมีของปลายเข็มมีขนาด 5 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล 65

รูปที่ 5.19 (a) ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบสแตนเลส, (b) ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน 66

รูปที่ 5.20 แรงดันไฟฟ้า 4 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมล (a) ลักษณะขอบของปลายเข็มที่ใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (b) แบบสแตนเลส, (b) ลักษณะขอบของปลายเข็มที่ใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน 67

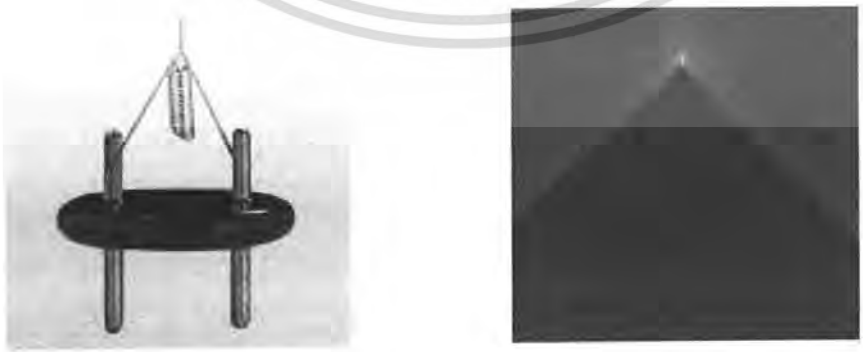
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ

แหล่งกำเนิดไอออน (ion source) คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ผลิตลำอนุภาคที่มีประจุที่เรียกว่าลำไอออน แหล่งกำเนิดไอออนเป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่ในเครื่องมือวิทยาศาสตร์หลายชนิด เช่น เครื่องวิเคราะห์มวล (mass spectrometer) และเครื่องเร่งอนุภาค เป็นต้น นอกจากนี้ ยังเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบวิเคราะห์พื้นผิว เช่น ระบบวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค secondary ion mass spectroscopy (SIMS) และ Rutherford back-scattering spectroscopy (RBS) เป็นต้น รวมทั้งการใช้แหล่งกำเนิดไอออนในการทำความสะอาดพื้นผิววัสดุด้วยกระบวนการ ion sputtering และการยิงฝังอนุภาค (ion implantation) ในกระบวนการโด๊ปสาร (doping) เป็นต้น

แหล่งกำเนิดไอออนที่สามารถกำเนิดลำไอออนที่มีความหนาแน่นกระแสสูงระดับ 10^8 A/cm^2 และมีลำไอออนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งเหมาะที่จะใช้ในการกัดผิววัสดุและการยิงฝังอนุภาคให้มีรูปแบบตามต้องการนั้น ได้แก่แหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลว (liquid metal ion source) แหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้มีโลหะปลายแหลมที่มีลักษณะเฉพาะเป็นส่วนประกอบสำคัญ ส่วนของปลายแหลมนี้จะถูกเคลือบด้วยโลหะเหลวซึ่งโดยทั่วไปได้แก่แกลเลียม (gallium, Ga) ในการใช้งานจะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 5-10 kV จะทำให้อะตอมของแกลเลียมหลุดออกจากส่วนปลายของเข็มในสภาพของไอออน โครงสร้างและส่วนปลายแหลมของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้าง (ซ้าย) และลักษณะของส่วนปลายเข็ม (ขวา)
ของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาการสร้างส่วนปลายแหลมของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลว จากการศึกษาพบว่าลักษณะของปลายเข็มที่แหลมหรือกล่าวว่าปลายแหลมที่มีรัศมีความโค้งต่ำ จะทำให้แหล่งกำเนิดไอออนมีประสิทธิภาพสูงคือสามารถกำเนิดไอออนที่มีความหนาแน่นกระแสสูงโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าในการดึงไอออนออกจากปลายเข็มต่ำ ในขณะที่ปลายเข็มที่มีลักษณะป้านหรือมี aspect ratio (อัตราส่วนระหว่างความยาวของปลายเข็มกับเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด) ต่ำ

การสร้างปลายของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตนให้แหลมนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ ทำปลายให้แหลมโดยวิธีการฝน และทำปลายให้แหลมโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) ในโครงงานพิเศษนี้เลือกใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยจุ่มปลายของลวดทังสเตนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 ไมโครเมตร ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ที่บรรจุในภาชนะโลหะ เมื่อป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเส้นลวดและภาชนะโลหะ ปฏิกิริยาจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีระหว่างลวดทังสเตน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะกัดปลายของเส้นลวดให้ขาดออกเกิดเป็นปลายแหลมขึ้น

ลักษณะของปลายแหลมที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย รวมทั้งศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ โครงงานพิเศษนี้จะทำการทดลองเพื่อหาค่าความเข้มข้นสารละลายและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดปลายแหลมที่ลักษณะที่ทำให้แหล่งกำเนิดไอออนมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูง ปลายแหลมของเส้นลวดที่ได้จะถูกสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์และบันทึกภาพไว้ เมื่อได้ปลายแหลมที่มีลักษณะตามต้องการแล้วและสามารถทำซ้ำได้ จากนั้นจึงทำการวัดรัศมีความโค้งของปลายเข็มและมุมลาดเอียงของปลายเข็ม นอกจากนี้จะทำการวัดความยาวของปลายเข็มเพื่อคำนวณค่า aspect ratio ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการสร้างปลายแหลมของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับลวดทังสเตน
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ปลายแหลมที่มีลักษณะตามต้องการและสามารถทำซ้ำได้
3. เพื่อวัดพารามิเตอร์ที่บ่งบอกลักษณะของปลายแหลม ได้แก่ รัศมีความโค้งของปลายเข็ม มุมลาดเอียงของปลายเข็มและ aspect ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการสร้างปลายของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี
2. ศึกษากระบวนการทางไฟฟ้าเคมีระหว่างทังสเตนกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
3. ศึกษาการคำนวณค่าความเข้มข้นของสารละลาย เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการเคมี
4. ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถทำให้ได้ปลายของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตนมีลักษณะตามที่ต้องการ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้ ตลอดจนระยะของเส้นลวดที่ต้องจุ่มลงในสารละลาย
5. ทำการวัดพารามิเตอร์ที่บ่งบอกลักษณะของปลายแหลม ได้แก่ รัศมีความโค้งของปลายเข็ม มุมลาดเอียงของปลายเข็มและ aspect ratio

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2550								พ.ศ. 2551	
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←	→								
2. ทำการทดลองกัดปลายลวดทังสเตนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี			←	—	—	—	—	→		
3. รวบรวมผลการทดลองที่ได้และสรุปผล									←	→
4. เขียนรายงานผลการทดลอง										← →

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

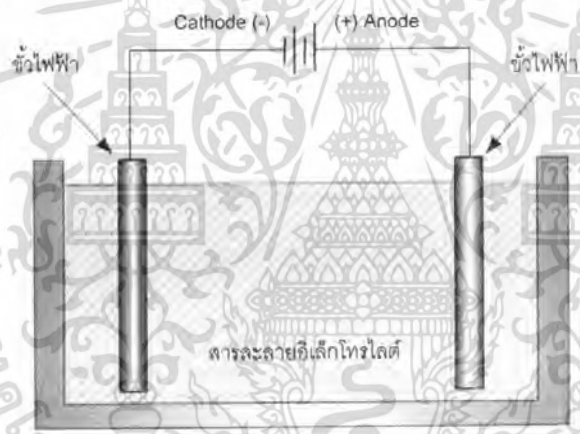
1. ทำให้ทราบถึงหลักการและกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching)
2. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างปลายของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวจากลวดทังสเตน
3. ทำให้ได้รับความรู้เพิ่มเติมจากการวิเคราะห์ข้อมูลตลอดจนทฤษฎีที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับโครงงานพิเศษนี้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านที่เกี่ยวข้องได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) คือกระบวนการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอกเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ตัวอย่างเช่น อิเล็กโตรไลซึม และการชุบ (ขบวนการที่ผ่านกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี) เครื่องมือที่ใช้แยกสารละลายด้วยไฟฟ้าเรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรไลต์ หรืออิเล็กโทรไลติกเซลล์ ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า ภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เช่น เซลล์ไฟฟ้า หรือ แบตเตอรี่



รูปที่ 2.1 เครื่องมือที่ใช้แยกสารละลายด้วยไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.1 เป็นรูปเครื่องมือที่ใช้แยกสารละลายด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

ขั้วไฟฟ้า (Electrode) : แผ่นตัวนำที่จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วต่อกับเซลล์ไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ แบ่งเป็นแอโนด และ แคโทด

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : สารละลายที่นำไฟฟ้าได้ เพราะมีไอออนบวกและไอออนลบ

ไอออนบวก, ion (+) : วิ่งไปให้อิเล็กตรอนที่ขั้วลบ เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จึงเรียกขั้วลบว่า แคโทด และเรียกไอออนบวกว่า แคตไอออน (cathion)

ไอออนลบ, ion (-) : วิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วบวกเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเรียกขั้วบวกว่า แอโนด และเรียก ไอออนลบว่า แอนไอออน (Anion)

ดังนั้น ที่ Anode มี Anion คือ ไอออนลบ และที่ Cathode มี Cathion คือ ไอออนบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวกซึ่งก็คือแอโนด และปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วลบซึ่งก็คือแคโทด

2.2 นิยามของอิเล็กโทรไลซิส

อิเล็กโทรไลซิส หรือ การแยกสลายด้วยไฟฟ้า (electrolysis) คือ กระบวนการที่พลังงานไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ปกติเกิดขึ้นเองไม่ได้ ตรงข้ามกับปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นได้เองทำให้พลังงานเคมีเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า หลักการของอิเล็กโทรไลซิสเป็นเช่นเดียวกันกับกระบวนการที่เกิดขึ้นในเซลล์กัลวานิกในที่นี้จะกล่าวถึงตัวอย่างของอิเล็กโทรไลซิส 3 ตัวอย่างซึ่งอาศัยหลักการข้างต้น

รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่อิเล็กโทรดระหว่างการทำอิเล็กโทรไลซิสของ NaCl โดยแบตเตอร์รี่เป็นตัวทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองไม่ได้สามารถเกิดขึ้นได้

2.2.1 อิเล็กโทรไลซิสของโซเดียมคลอไรด์

โซเดียมคลอไรด์เป็นสารประกอบไอออนิก เมื่อหลอมเหลวก็จะแยกสลายด้วยไฟฟ้าได้เกิดเป็นโลหะโซเดียมและไฮดรอกไซด์ รูปที่ 2.2 เป็นแผนภาพง่ายๆ แสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง เซลล์อิเล็กโทรไลติก (electrolytic cell) ประกอบด้วยอิเล็กโทรดคู่หนึ่งต่ออยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ แบตเตอรี่ทำหน้าที่เป็น "เครื่องสูบอิเล็กตรอน" ดันให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแคโทด ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และดึงอิเล็กตรอนออกมาจากแอโนด ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาที่อิเล็กโทรดทั้งสองคือ

แอโนด (ออกซิเดชัน) : $2Cl^- \rightarrow Cl_2(g) + 2e^-$

แคโทด (รีดักชัน) : $2Na^+ + 2e^- \rightarrow 2Na(l)$

รวม : $2Na^+ + 2Cl^- \rightarrow 2Na(l) + Cl_2(g)$

โลหะโซเดียมบริสุทธิ์และแก๊สคลอรีนส่วนใหญ่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการนี้

2.2.2 อิเล็กโทรไลซิสของน้ำ

น้ำในบีกเกอร์ภายใต้สภาวะปกติ (1 atm และ $25^\circ C$) ไม่อาจแยกสลายออกเป็นแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนได้เองเพราะปฏิกิริยานี้มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระเป็นบวกมาก :

$$2H_2O(l) \rightarrow 2H_2(g) + O_2(g) \qquad \Delta G^\circ = 474.4kJ$$

อย่างไรก็ตาม เราอาจทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้โดยแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าในเซลล์ เซลล์นี้ประกอบด้วยอิเล็กโทรด 1 คู่ ทำด้วยโลหะเฉื่อย เช่น แพลทินัมจุ่มอยู่ในน้ำ เมื่อต่ออิเล็กโทรดเข้ากับแบตเตอรี่จะพบว่าไม่เกิดอะไรขึ้นเพราะในน้ำบริสุทธิ์มีไอออนไม่มากพอที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ (ที่ $25^\circ C$ น้ำบริสุทธิ์มี H^+ และ OH^- เพียง 1×10^{-7} โมล)

2.2.3 อิเล็กโทรไลซิสของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ

ตัวอย่างนี้ซับซ้อนกว่า 2 ตัวอย่างที่ผ่านมาแล้วเนื่องจากสารละลายของโซเดียมคลอไรด์มีสารที่ถูกออกซิไดซ์หรือถูกรีดิวซ์ได้หลายชนิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อาจเกิดขึ้นที่แอโนดได้แก่

(1) $2H_2O(l) \rightarrow O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^-$

(2) $2Cl^-(aq) \rightarrow Cl_2(g) + 2e^-$

จากค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานที่ $25^\circ C$ จะได้

$$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^- \rightarrow 2H_2O(l) \qquad E^0 = 1.23V$$

$$Cl_2(g) + 2e^- \rightarrow 2Cl^-(aq) \qquad E^0 = 1.36V$$

ศักย์รีดักชันมาตรฐานของ (1) และ (2) ไม่ได้ต่างกันมากนักแต่จะเห็นว่า H_2O ถูกออกซิไดส์ที่แอโนดได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่า แก๊สที่เกิดขึ้นที่แอโนดคือ Cl_2 ไม่ใช่ O_2 ในการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรไลซิส บางครั้งเราพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ต้องใช้สำหรับปฏิกิริยาหนึ่งๆ อาจสูงกว่าที่คำนวณได้จากศักย์อิเล็กโทรด ศักย์ไฟฟ้าส่วนเกินที่ต้องเพิ่มเข้าไปในการทำให้เกิดอิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กโทรไลซิส เรียกว่า ศักย์เกินตัว (overvoltage) ศักย์เกินตัวของการเกิด O_2 มีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติจึงเกิดแก๊ส Cl_2 แทน O_2

ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นที่แคโทดได้แก่

(3) $Na^+(aq) + e^- \rightarrow Na(s)$ $E^0 = -2.71V$

(4) $2H_2O(l) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$ $E^0 = -0.83V$

(5) $2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow H_2(g)$ $E^0 = 0.00V$

ปฏิกิริยา (3) มีศักย์รีดักชันมาตรฐานเป็นลบมาก จึงไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ ภายใต้สภาวะมาตรฐาน ปฏิกิริยา (5) ควรเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าปฏิกิริยา (4) อย่างไรก็ตาม ที่ pH 7 (ในสารละลาย NaCl) ปฏิกิริยาทั้งสองอาจเกิดขึ้นได้ง่ายพอๆ กัน เรามักถือว่าปฏิกิริยาที่แคโทดคือปฏิกิริยา (4) เพราะ H^+ มีความเข้มข้นต่ำ (ประมาณ 1×10^{-7} โมล) เกินกว่าที่จะทำปฏิกิริยา (5) เกิดขึ้นได้ง่ายๆ

ดังนั้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการแยกสลายสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าคือ

แอโนด (ออกซิเดชัน) : $2Cl^-(aq) \rightarrow Cl_2(g) + 2e^-$

แคโทด (รีดักชัน) : $2H_2O(l) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$

รวม : $2H_2O(l) + 2Cl^-(aq) \rightarrow H_2(g) + Cl_2(g) + 2OH^-(aq)$

จากปฏิกิริยารวมจะเห็นว่าความเข้มข้นของ Cl^- ไอออนลดลงระหว่างการ ทำอิเล็กโทรไลซิส แต่ความเข้มข้นของ OH^- เพิ่มขึ้น ดังนั้น นอกจากจะได้ H_2 กับ Cl_2 เป็นผลิตภัณฑ์แล้ว เมื่อนำสารละลายที่เหลือไประเหยให้แห้งก็จะได้ NaOH เป็นผลพลอยได้ที่เป็นประโยชน์อีกด้วย

2.2.4 ประโยชน์ของการแยกสลายด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวมาแล้วเป็นเรื่องหนึ่งที่ได้เอากระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ ยังมีประโยชน์อื่นอีกที่เกิดจากการแยกสลายด้วยไฟฟ้า เช่น การเตรียมสาร และการทำให้สารบริสุทธิ์

เนื่องจากการแยกสลายด้วยไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้ธาตุหรือสารบางอย่างที่ขั้วไฟฟ้า จึงเป็นวิธีใช้เตรียมสาร การแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีเตรียมแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนทางอุตสาหกรรมในประเทศที่พลังงานไฟฟ้าราคาถูก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วทางอุตสาหกรรมจะเตรียมออกซิเจนจากอากาศเหลว ธาตุบางชนิด เช่น โซเดียม และแมกนีเซียม เป็นธาตุที่ว่องไวมาก จัดเป็นตัวรีดิวซ์อย่างแรง (มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำ) เราไม่สามารถเตรียมธาตุดังกล่าวจากสารประกอบของมันโดยวิธีรีดิวซ์ด้วยการเคมี การเตรียมโซเดียมในอุตสาหกรรมใช้วิธีแยกสลายโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลวด้วยไฟฟ้า ได้โลหะโซเดียมที่แคโทด

$$Na^+ + e^- \rightarrow Na$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นยังได้แก๊สคลอรีนเป็นผลผลิตอีกอย่างหนึ่งทางแอโนดซึ่งทำด้วยแกรไฟต์ การเตรียมโลหะแมกนีเซียมทางอุตสาหกรรมก็ปฏิบัติทำนองเดียวกัน โดยใช้วิธีแยกสลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่หลอมเหลวด้วยไฟฟ้าในเซลล์ซึ่งมีเหล็กเป็นแคโทดและแกรไฟต์เป็นแอโนด ได้โลหะแมกนีเซียมและแก๊สคลอรีน

$$Mg^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Mg$$

$MgCl_2$ ที่นำมาแยกสลายด้วยไฟฟ้านั้น เตรียมจาก $Mg(OH)_2$ ซึ่งได้มาด้วยการทำให้น้ำทะเลเป็นเบสด้วยปูนดิบ แมกนีเซียมเป็นโลหะที่ใช้มากในปัจจุบันเนื่องจากมีน้ำหนักเบา นอกจากแมกนีเซียมอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กันมาก เช่น ใช้ทำเครื่องครัว เครื่องตกแต่งบ้าน โลหะเจือของอะลูมิเนียมมักใช้ทำส่วนประกอบของโครงสร้างที่ต้องการความเบา เราไม่สามารถเตรียมโลหะอะลูมิเนียมโดยวิธีรีดิวซ์สารประกอบของอะลูมิเนียม วิธีทางอุตสาหกรรม คือ แยกสลายแร่บอกไซด์ ซึ่งเป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมโดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า

สารประกอบบางชนิด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นผลผลิตทางอุตสาหกรรมจากกระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า การแยกสลายสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าได้แก๊สไฮโดรเจนที่แคโทดและแก๊สคลอรีนที่แอโนด ที่แคโทดนั้น นอกจาก H_2 แล้วยังได้ OH^- อีกด้วย เมื่อการแยกสลายด้วยไฟฟ้าดำเนินเรื่อยไป ความเข้มข้นของ Na^+ และ OH^- ในสารละลายเพิ่มขึ้น ในที่สุดถ้าเอาสารละลายไประเหยก็จะได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้แยกสารโซเดียมคลอไรด์ในการเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์มีหลายแบบด้วยกัน ออกแบบให้ทำการแยกโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้สะดวกและไม่มีโซเดียมคลอไรด์ปนมามากนัก แก๊สคลอรีนเป็นผลผลิตอีกอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมการเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์

ประโยชน์การแยกสลายด้วยไฟฟ้าอีกประการหนึ่งคือ ใช้ในการทำสารให้บริสุทธิ์ เช่น ต้องการทำทองแดงบริสุทธิ์จากทองแดงที่ยังไม่บริสุทธิ์นัก ในการถลุงโลหะทองแดงจากสินแร่ ได้ทองแดงที่ยังไม่บริสุทธิ์ มีโลหะอื่น เช่น เหล็ก ทองคำ เงิน แพลทินัม เจือปนบ้างเล็กน้อย เรียกทองแดงถลุงนี้ว่า บลิสเตอร์คอปเปอร์ การทำทองแดงบริสุทธิ์ใช้กระบวนการแยกสลายด้วยไฟฟ้า เอาบลิสเตอร์คอปเปอร์แท่งสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ทำเป็นแอโนด และแผ่นทองแดงบริสุทธิ์แผ่นบางๆ ทำเป็นแคโทด ใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นอิเล็กโทรไลต์ เมื่อผ่านกระแสไฟลงไปโดยใช้ความต่างศักย์พอเหมาะ ทองแดงและธาตุเจือปนอื่นๆในบลิสเตอร์คอปเปอร์ที่ถูกออกซิไดส์ง่ายกว่าทองแดง (เช่นเหล็กและสังกะสี) จะละลายออกจากแอโนดลงไปในสารละลาย และโลหะทองแดงไปเกาะเป็นทองแดงบริสุทธิ์ที่แคโทด ส่วนธาตุเจือปน เช่น เงิน ทองคำ แพลทินัม จะไม่ถูกออกซิไดส์และหลุดตกลงไปกองที่ก้นเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กฎของฟาราเดย์

ระหว่างเกิดการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ไฟฟ้าผ่านลงไปในอิเล็กโทรไลต์ และทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับปฏิกิริยารีดักชันที่แอโนดและคาโทด เราสามารถวัดปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในอิเล็กโทรไลต์และปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองได้ และทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์กัน เพราะปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทดและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนดเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งโดยเฉพาะในแต่ละปฏิกิริยา เช่น ในการแยกสลายสารละลายซิลเวอร์ไนเทรต ไอออนของเงิน 1 ไอออนรับอิเล็กตรอน 1 ตัวแล้วให้อะตอมของเงิน 1 อะตอม

$$Ag^{+} + e^{-} \rightarrow Ag$$

Ag^{+} และอิเล็กตรอนสัมพันธ์กันทางปริมาณ เรากล่าวได้ว่าจำนวนโมลของ Ag^{+} สัมพันธ์กับจำนวนโมลของอิเล็กตรอน Ag^{+} 1 โมล สามารถรับอิเล็กตรอน 1 โมลไปเป็น Ag 1 โมล หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า อิเล็กตรอน 1 โมล สามารถรีดิวซ์ Ag^{+} 1 โมล ให้ Ag 1 โมล

ถ้าเป็นไอออนของทองแดง ปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นดังนี้

$$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu$$

อิเล็กตรอน 1 โมล รีดิวซ์ Cu^{2+} จำนวน 0.5 โมล ให้ Cu จำนวน 0.5 โมล ถ้าเราทราบประจุทั้งหมดที่อิเล็กตรอน 1 โมลมีอยู่ เราก็จะได้ปริมาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับปริมาณมวลสาร

การวัดกระแสไฟฟ้านั้น เราวัดกันด้วยหน่วยแอมแปร์ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ (A) ลงไปในสารละลายซิลเวอร์ไนเทรต 1 วินาที ให้เงินแยกออกมาหนัก 0.001118 กรัม

ส่วนปริมาณไฟฟ้าวัดกันเป็นคูลอมบ์ 1 คูลอมบ์ (C) คือปริมาณไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ส่งผ่านวัตถุใดๆเป็นเวลา 1 วินาที

ปริมาณไฟฟ้าเป็นคูลอมบ์ = กระแสเป็นแอมแปร์ × เวลาเป็นวินาที

กระแสไฟฟ้าจะผ่านจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ต้องมีความต่างศักย์ หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า หน่วยของความต่างศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเรียกว่าโวลต์ 1 โวลต์ (V) คือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุดบนตัวนำที่มีกระแสขนาด 1 แอมแปร์ไหลผ่านทำให้เกิดมีพลังงาน 1 วัตต์ระหว่างจุดสองจุดนั้น

ใน ค.ศ. 1834 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กับปริมาณสารที่เกิดขึ้นในการแยกสลายด้วยไฟฟ้า และได้กล่าวว่า

1) ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นปฏิภาคกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ปริมาณสารแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยการผ่านไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเป็นปฏิภาคกับน้ำหนักสมมูลของสาร

ข้อความข้างบนนี้ เป็นกฎการแยกสลายด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์

จากกฎของฟาราเดย์ข้อแรก เราพบว่า น้ำหนักของสารหนึ่งสารใดที่เกิดขึ้นโดยการแยกสลายด้วยไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลาย ถ้าปริมาณไฟฟ้า 1 C แยกสารออกมาไฟฟ้าหนัก x กรัม ไฟฟ้า 5 C ก็จะได้สาร 5x กรัม

จากกฎของฟาราเดย์ข้อสอง ซึ่งกล่าวว่าน้ำหนักของสารแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อผ่านไฟฟ้าปริมาณเท่ากัน จะเป็นปฏิภาคกับน้ำหนักสมมูลของสารดังนี้ ธาตุต่างๆอย่างละ 1 สมมูลเกิดจากไฟฟ้าจำนวนเท่ากัน

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ในการที่ไอออนของเงิน 1 โมล เปลี่ยนเป็นอะตอมของเงิน 1 โมล ที่แคโทดได้นั้น ต้องการอิเล็กตรอน 1 โมล มารีดิวซ์ไอออนจำนวนนั้น เราคิดปริมาณไฟฟ้าจากอิเล็กตรอน 1 โมลได้ดังนี้

อิเล็กตรอน 1 อนุภาค มีประจุ 1.602×10^{-19} C

อิเล็กตรอน 1 โมล หรือ 6.023×10^{23} อนุภาค มีประจุ 96489 C หรือประมาณ 96500 C

ปริมาณไฟฟ้า 96500 คูลอมบ์นี้เรียกว่า หนึ่งฟาราเดย์ (F) ไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจำนวน 1 สมมูลเท่ากัน

จากปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันต่อไปนี้

$$Ag^{+} + e^{-} \rightarrow Ag$$
$$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu$$
$$Al^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Al$$
$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$$

$$2Cl^{-} \rightarrow Cl_2 + 2e^{-}$$
$$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^{+} + 4e^{-}$$

จะเห็นว่า ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ (หรือ 1 โมล อิเล็กตรอน) ทำให้เกิดสารที่ขั้วไฟฟ้า คือ Ag จำนวน 1 โมล หรือ 1 สมมูล, Cu จำนวน 0.5 โมล หรือ 1 สมมูล, Al จำนวน 1/3 โมล หรือ 1 สมมูล, H_2 จำนวน 0.5 โมล หรือ 1 สมมูล, Cl จำนวน 0.5 โมล หรือ 1 สมมูล, และ O_2 จำนวน ¼ โมล หรือ 1 สมมูล น้ำหนักกรัมสมมูลของสารในกรณีนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักกรัมโมลหารด้วยจำนวนอิเล็กตรอนที่รับมาหรือที่เสียไปต่อสาร 1 โมลที่ขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งฟาราเดย์เป็นปริมาณไฟฟ้าที่รีดิวซ์สาร 1 สมมูลที่แคโทด หรือออกซิไดส์สสาร 1 สมมูลที่แอโนด ถ้าคิดตามน้ำหนักเป็นกรัม ไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ให้เงินหนัก 107.9 กรัม ทองแดง 31.77 กรัม อะลูมิเนียม 8.99 กรัม ไฮโดรเจน 1.008 กรัม คลอรีน 35.45 กรัม และออกซิเจน 8 กรัม

2.4 การคำนวณค่าความเข้มข้น

2.4.1 การคำนวณค่าความเข้มข้นในหน่วยของโมล

โมลเป็นหน่วยแสดงจำนวนอนุภาคของสาร สารใดๆ 1 โมล จะประกอบด้วยอนุภาคจำนวน 6.02×10^{23} อนุภาค (ซึ่งหมายถึง เลขอาโวกาโดร) หน่วยของจำนวนขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาค ได้แก่ โมเลกุล, อะตอม, อิเล็กตรอน, ไอออน ดังนี้

อะตอมใดๆ 1 โมล มีจำนวนอะตอม 6.02×10^{23} อะตอม เช่น ฮีเลียม (He) 1 โมล มีจำนวนอะตอม 6.02×10^{23} อะตอม

ไอออนใดๆ 1 โมล มีจำนวนไอออน 6.02×10^{23} ไอออน เช่น โซเดียมไอออน $\left(Na^{+}\right)$ 1 โมล มีจำนวนไอออน 6.02×10^{23} ไอออน

อิเล็กตรอน 1 โมล มีจำนวนอิเล็กตรอน 6.02×10^{23} อิเล็กตรอน เป็นต้น

ดังนั้น สารใดๆ 1 โมล มีจำนวนอนุภาค 6.02×10^{23} อนุภาคเสมอ

การบอกปริมาณสารเคมีใดๆ ถ้าต้องการบอกปริมาณของอนุภาคในสารนั้นๆ ซึ่งอนุภาคมีขนาดเล็ก และมีจำนวนมาก จึงต้องใช้หน่วยจำนวนให้ใหญ่ขึ้นเพื่อความสะดวก จึงกำหนดหน่วยแสดงจำนวนอนุภาคต่างๆเป็นโมล (Mole) ขึ้นโดยใช้สัญลักษณ์ Mol หรือ N

การคำนวณค่าความเข้มข้น

$$\text{โมลโมเลกุล (Mol)} = \frac{g}{M}$$

เมื่อ g คือ มวลของสารในหน่วยกรัม

M คือ มวลโมเลกุลของสาร

2.4.2 การคำนวณค่าความเข้มข้นในหน่วยของนอร์มัล (Normal solution ,N)

Normal solution (N) คือ สารละลายซึ่งประกอบด้วย ตัวถูกละลาย 1 gram equivalent (gEW) ของตัวถูกละลายต่อสารละลาย 1 ลิตร gEW คือผลรวมของน้ำหนักโมเลกุล (MW) ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัม (g) ต่อ valency ของสารละลาย เราสามารถอธิบายคำว่า valency ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดไฮโดรคอริก (HCl) มีไฮโดรเจนไอออน 1 ตัว ที่สามารถแทนที่ได้ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) มีไฮโดรเจนไอออน 2 ตัว ที่สามารถแทนที่ได้และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มีไฮโดรเจนไอออน 3 ตัว ที่สามารถแทนที่ได้ valency ของกรดเหล่านี้

HCl	Valency = 1
H_2SO_4	Valency = 2
H_3PO_4	Valency = 3

- สารละลาย HCl 1 N มีค่า MW = 36.5, EW = 36.5/1 ดังนั้น HCl 1 N จะมี 36.5 กรัม/ลิตร เช่นเดียวกับในกรณีของ HCl 1 M

- สารละลาย H_2SO_4 1 N มี MW = 98, EW = 98/2 = 49 ดังนั้น 1 N จะมี 49 กรัม/ลิตร

- สารละลาย H_3PO_4 1 N มี MW = 98, EW = 98/3 = 32.7 ดังนั้น 1 N จะมี 32.7 กรัม/ลิตร

ในกรณีของอัลคาไล จะอธิบายคำว่า Valency ได้จาก

NaOH มี 1 OH , $Ca(OH)_2$ มี 2 OH จะได้

NaOH	Valency = 1
$Ca(OH)_2$	Valency = 2

- สารละลาย NaOH 1 N มี MW = 40, EW = 40 ดังนั้น NaOH 1 N ควรจะ เท่ากับ 36.5 กรัม/ลิตร เช่นเดียวกับในกรณีของ NaOH 1 M

- สารละลาย Ca $(OH)_2$ 1 N มี MW = 74, EW = 74/2 = 37 ดังนั้น Ca(OH) 1 N จะมี 37 กรัม/ลิตร

2.5 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (electrochemical reaction)

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีหรือปฏิกิริยาสมดุลรีดอกซ์จัดเป็นปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารที่เข้าทำปฏิกิริยากัน โดยกำหนดดังนี้

- สารที่ให้อิเล็กตรอนออกมา เรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (reductant หรือ reducing agent) เกิดในครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตัวรีดิวซ์เมื่อให้อิเล็กตรอนออกมาจะมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น
- สารที่รับอิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวออกซิไดส์ (oxidant หรือ oxidizing agent) เกิดในครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน ตัวออกซิไดส์เมื่อให้อิเล็กตรอนออกมาจะมีเลขออกซิเดชันลดลง

ตัวรีดิวซ์และตัวออกซิไดส์จะต้องมีการให้และรับอิเล็กตรอนในจำนวนเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าแต่ละครึ่งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกันโดยที่ครึ่งปฏิกิริยารีดักชันจะมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารที่เข้าทำปฏิกิริยากันจะให้พลังงานออกมาในรูปของพลังงานไฟฟ้าและในทางกลับกันกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถนำมาสร้างเซลล์ไฟฟ้าเคมี

2.6 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) หรือเซลล์โวลตาอิก (Voltaic cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยารีดอกซ์แล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นหรือกล่าวว่าเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า
2. เซลล์อิเล็กโทรไลติก (electrolytic cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ผ่านกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปภายในเซลล์ไฟฟ้าจึงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ หรือกล่าวว่าเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี

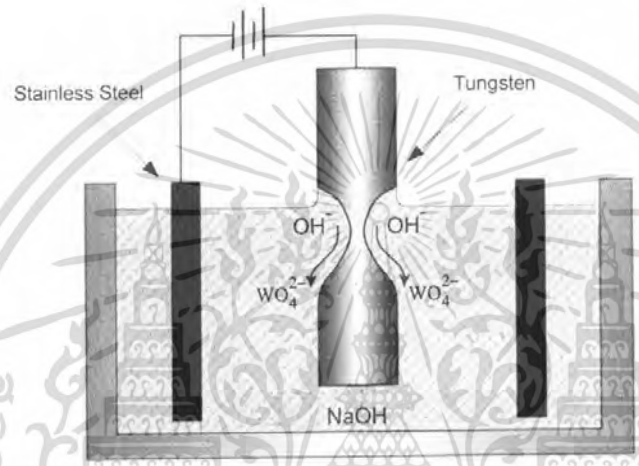
ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าทั้งสองประเภท จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด (electrode) ที่ทำหน้าที่ให้และรับอิเล็กตรอน ขั้วไฟฟ้าที่มีการให้อิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเรียกว่าแอโนด (anode) ขั้วไฟฟ้าที่มีการรับอิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชันเรียกว่าแคโทด (cathode)

2.7 การสร้างปลายเข็มจากลวดทังสเตนโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

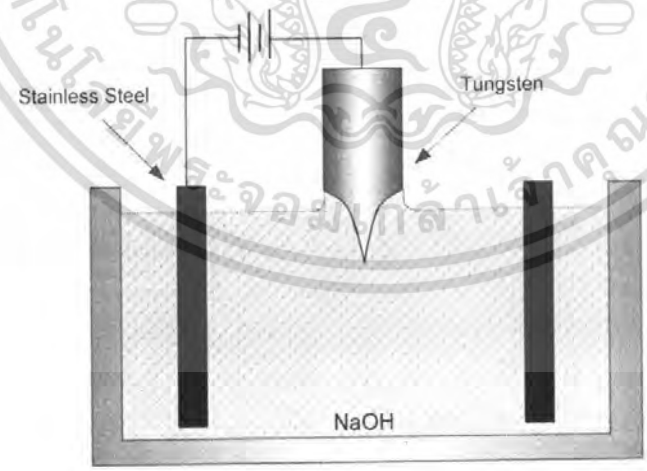
การสร้างปลายเข็มจากลวดทังสเตนโดยกระบวนการกัดด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ทำโดยการจุ่มส่วนปลายของลวดทังสเตนลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การจุ่มเส้นลวดทังสเตนลงในสารละลายนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาใด ๆ จนกว่าจะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกให้กับลวดทังสเตน โลหะทังสเตนซึ่งมีสถานะออกซิเดชันเป็น 0 จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกรดทังสติก (tungstic acid, H_2WO_4) ซึ่งจะสลายตัวเป็น WO_4^{2-} โดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ OH^- (OH^- เกิดจากการสลายตัวของ NaOH ในน้ำ) ในขณะที่ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งมีสถานะออกซิเดชันเป็น +1 จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วลบเกิดเป็นฟองของแก๊สไฮโดรเจนผลุดขึ้นที่บริเวณขั้วลบ ถึงแม้ว่าอะตอมของทังสเตนในไอออนนี้จะมีสถานะออกซิเดชันเป็น +6 แต่ก็อยู่ในรูปของไอออนลบของ WO_4^{2-} จึงถูกดึงดูดด้วยสนามไฟฟ้าให้อยู่ล้อมรอบบริเวณของขั้วบวกของลวดทังสเตน และทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ OH^- เข้าทำปฏิกิริยากับลวดทังสเตนส่วนที่จมอยู่ในสารละลายต่อไปได้ เป็นผลให้ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นได้ที่บริเวณผิวของสารละลายจุดที่สัมผัสกับเส้นลวด (meniscus) เท่านั้น เป็นผลให้เส้นลวดถูกกัดให้มีลักษณะเป็นคอคอด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อปฏิกิริยาดำเนิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปจนกระทั่งคอคอดบางลงมากจนเส้นลวดขาดออกจากกันในที่สุด เกิดเป็นปลายลวดที่แหลมมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การขาดเส้นลวดนี้สังเกตได้จากกระแสไฟฟ้าในวงจรลดลงอย่างมาก จากนั้นจะต้องหยุดการป้อนกระแสไฟฟ้าทันที มิฉะนั้นส่วนของปลายแหลมที่ยังจุ่มอยู่ในสารละลายบางส่วนจะถูกกัดต่อไปทำให้ปลายเข็มมีความแหลมลดลงได้



รูปที่ 2.3 รูปร่างของทังสเตนเมื่อทังสเตนถูกออกซิไดส์



รูปที่ 2.4 รูปร่างของทังสเตนเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา(กระแสมีค่าเป็นศูนย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้โดยสมการทางเคมีดังนี้

Anode : Oxidation reaction

$$W(s) + 6OH^- \rightarrow WO_3(s) + 6e^- + 3H_2O$$
$$WO_3(s) + OH^- \rightarrow WO_4^{2-}(aq) + 3H_2O$$

Cathode : Reduction reaction

$$6H_2O(\ell) + 6e^- \rightarrow 3H_2(g) + 6OH^-(aq)$$

Overall : Redox reaction

$$W(s) + 2OH^- + 2H_2O \rightarrow WO_4^{2-}(aq) + 3H_2(g)$$

2.8 พารามิเตอร์ของปลายเข็ม

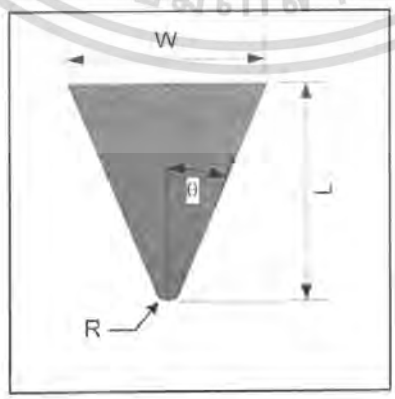
รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างลักษณะของปลายเข็ม การบ่งบอกลักษณะเฉพาะของปลายเข็มนิยมบอกด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ความยาวของปลายเข็ม (L) ความกว้างของเส้นลวด (W) รัศมีความโค้งของปลายเข็ม (R) และ Aspect Ratio ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างความยาวของปลายเข็มต่อความกว้างของลวดทังสเตน

$$\text{Aspect Ratio} = L / W$$

เมื่อ L คือ ความยาวของปลายเข็ม

W คือ ความกว้างของลวดทังสเตน

R คือ รัศมีความโค้งของปลายเข็ม (Radius of curvature)



รูปที่ 2.5 การวัดพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ ของปลายเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างปลายเข็มของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching) จากโลหะทังสเตน โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวทำปฏิกิริยารีดักชัน- ออกซิเดชันกับโลหะทังสเตน ซึ่งปลายเข็มที่เราต้องการมีรูปร่างลักษณะดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ลักษณะของปลายเข็ม

3.1 ขั้นตอนการศึกษาการสร้างปลายเข็มของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

จากการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องการสร้างปลายเข็มของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี เพื่อสร้างปลายเข็มให้ได้ลักษณะตามต้องการ เราจำเป็นที่จะต้องศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสร้างปลายเข็มนี้ ซึ่งในส่วนของการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แรงดันหรือกระแสไฟฟ้า พารามิเตอร์เหล่านี้จะทำให้เส้นลวดขาดเกิดเป็นปลายแหลมในลักษณะที่แตกต่างกันและใช้เวลาที่แตกต่างกัน

การทดลองในโครงงานพิเศษนี้แบ่งวิธีการทดลองเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่

1. วิธีศักย์ไฟฟ้าคงที่ (constant voltage method)
2. วิธีกระแสไฟฟ้าคงที่ (constant current method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าฉาดกระบัง

โดยวิธีศักย์ไฟฟ้าคงที่ จะกำหนดให้แหล่งจ่ายไฟของเซลล์ไฟฟ้าเคมีทำงานในโหมดแรงดันไฟฟ้าคงที่ (constant voltage source) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความเข้มข้นระหว่าง 2 – 5 โมล ที่ความเข้มข้นของสารละลายแต่ละค่า จะทำการศึกษาโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วง 2 – 6 โวลต์

ส่วนวิธีกระแสไฟฟ้าคงที่ จะกำหนดให้แหล่งจ่ายไฟของเซลล์ไฟฟ้าเคมีทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าคงที่ (constant current source) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าความเข้มข้นระหว่าง 3 – 5 โมล ที่ความเข้มข้นของสารละลายแต่ละค่า จะทำการศึกษาโดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ช่วง 5 – 20 mA

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การสร้างปลายเข็มของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในโครงงานพิเศษนี้ ต้องอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.2.1 Programmable Power Supply รุ่น PSM-6003

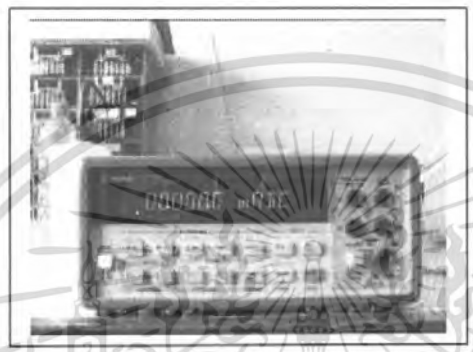
แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในโครงงานพิเศษนี้เป็นแบบโปรแกรมได้ สามารถกำเนิดแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 60 โวลต์ จ่ายกระแสได้สูงสุด 3 A สามารถโปรแกรมให้ทำงานในโหมดศักย์ไฟฟ้าคงที่หรือกระแสไฟฟ้าคงที่ได้ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบโปรแกรมได้ (Programmable Power Supply)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
81589

3.2.2 Digital Multimeter รุ่น 34401A

การวัดกระแสในวงจรไฟฟ้าเคมีซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมี กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรจะถูกวัดโดย Digital Multimeter ที่ตั้งการทำงานในโหมด Ampmeter มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Digital Multimeter ที่ทำหน้าที่เป็น Ampmeter

3.2.3 ลวดทังสเตน

เป็นวัสดุที่ใช้ทำปลายเข็มของการทดลองนี้เป็นลวดทังสเตนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 ไมครอน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 ลวดทังสเตนขนาด 300 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 แท่นวางอุปกรณ์

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้การทดลองจะวางอยู่บนแท่นที่สามารถปรับความสูงได้อย่างแม่นยำด้วยไมโครมิเตอร์ ทำให้สามารถกำหนดระยะความลึกในการจุ่มปลายของเส้นลวดลงในสารละลายได้อย่างแม่นยำ แท่นวางอุปกรณ์นี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 แท่นวางอุปกรณ์

3.2.5 เครื่องล้างระบบอัลตราโซนิค

ในการทดลองเส้นลวดทังสเตนจะต้องถูกทำความสะอาดทั้งก่อนและหลังการกัดด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี สำหรับโครงงานพิเศษนี้เส้นลวดจะถูกล้างทำความสะอาดตามขั้นตอนในอ่างอัลตราโซนิค ดังแสดงในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 เครื่องล้างด้วยระบบอัลตราโซนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 กล้องจุลทรรศน์

ปลายของเส้นลวดที่ผ่านกระบวนกัดจนมีความแหลมแล้วจะถูกสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายระหว่าง 18 ถึง 110 เท่า กล้องจุลทรรศน์นี้สามารถต่อเข้ากับกล้องถ่ายภาพดิจิตอลความละเอียดสูงเพื่อบันทึกภาพของปลายเข็มได้ ภาพของปลายเข็มจะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาขนาดต่อไป ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์

3.2.7 เครื่องชั่งสาร

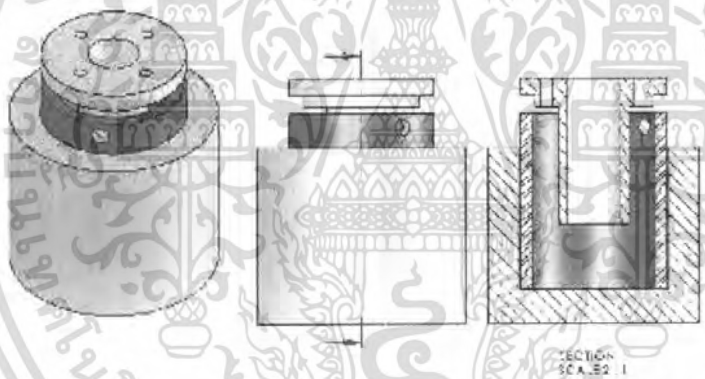
เครื่องชั่งทำหน้าที่ในการชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีความเข้มข้นตามต้องการ เครื่องชั่งที่ใช้ในการทดลองมีความละเอียด 10 mg มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8 ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 3.9 ภาชนะบรรจุสารละลายสเตนเลส



รูปที่ 3.10 ภาชนะบรรจุสารละลายเทฟลอน

3.3 ขั้นตอนการสร้างปลายเข็มของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.1.1 คำนวณน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์

คำนวณจากสมการ $g/M = CV/1000$

เมื่อ g คือ น้ำหนักของสารในหน่วยกรัม

M คือ มวลโมเลกุลของสาร

C คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

V คือ ปริมาตรของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างเช่น ต้องการค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล ปริมาตร 40 มิลลิลิตร โดยมวลโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าคือ 40 กรัม ดังนั้นน้ำหนักของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ

$$g/M = CV/1000$$

$$g/40 = (4 \times 40)/1000$$

$$g = (40 \times 4 \times 40)/1000$$

$$g = 6.4 \text{ กรัม}$$

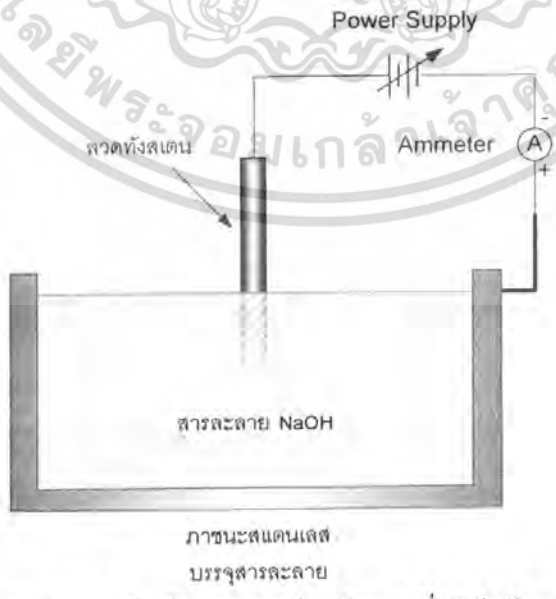
3.3.1.2 นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปชั่งให้ได้ค่าน้ำหนักตามที่เราคำนวณในข้อ 1

3.3.1.3 เตรียมน้ำปริมาตร 40 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ จากนั้นนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เตรียมไว้มาใส่ลงในบีกเกอร์ และคนให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ละลาย

3.3.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดการคายความร้อน เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ภาชนะที่บรรจุสารละลายนั้นจะเย็นลง

3.3.2 ขั้นตอนการต่อวงจรของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

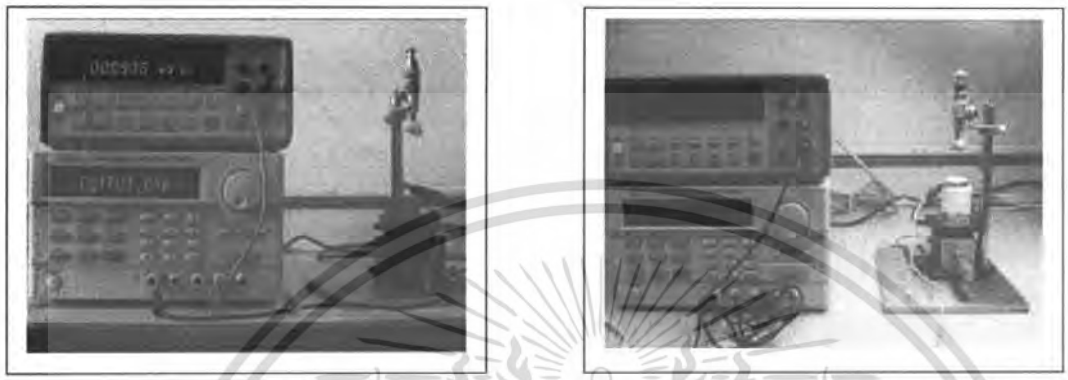
เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในการทดลองมีการต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้สำหรับ การสร้างปลายเข็มของแหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลวโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (power supply) เข้ากับเส้นลวดทังสเตน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 ไมโครเมตร ส่วนของขั้วลบต่อเข้ากับภาชนะสแตนเลสบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผ่านทางแอมมิเตอร์



รูปที่ 3.11 การต่อวงจรไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อใช้สร้างปลายเข็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบไปด้วย Power Supply, Digital Multimeter, แท่นวางอุปกรณ์, ภาชนะโลหะบรรจุสารละลาย, ลวดทังสเตน



(a) (b)

รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ที่นำมาทำการทดลอง

(a) ภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบสเตนเลส

(b) ภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน

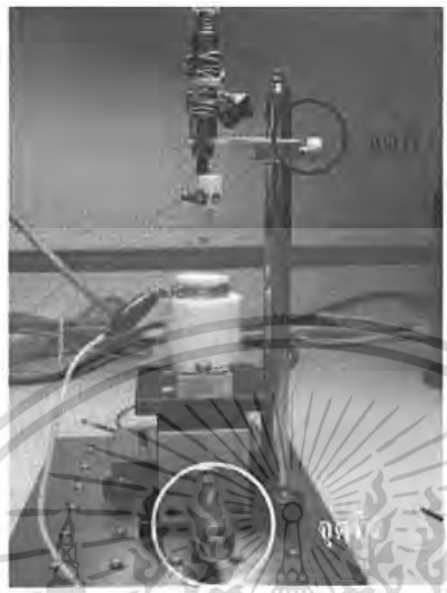
3.3.3 ขั้นตอนการทำความสะอาดลวดทังสเตนก่อนการทดลอง

ในการทดลองจะต้องนำลวดทังสเตนไปล้างด้วย Acetone และ Methanal โดยที่การล้างทำความสะอาดลวดทังสเตนทำโดยนำลวดทังสเตนใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย Acetone ปิดด้วย Aluminum Foil ให้สนิทแล้วนำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิคใช้เวลา 15 นาที ต่อจากนั้นเปลี่ยนสารละลาย Acetone เป็นสารละลาย Methanol แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิคใช้เวลา 15 นาที

3.3.4 การกำหนดความลึกของปลายเส้นลวดในสารละลาย

เพื่อให้ปลายเส้นลวดถูกจุ่มลงในสารละลายด้วยความลึกที่เท่ากันทุกครั้ง จะทำการทดลองดังขั้นตอนต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วิธีกำหนดระดับของปลายเข็มที่จุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เมื่อเราทำการติดตั้งอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วในการเลื่อนระดับของปลายเข็มที่จะจุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น

3.3.4.1 เราจะทำการเลื่อนจุดที่ 1 ลงมาให้ปลายเข็มใกล้กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.4.2 จากนั้นทำการหมุนไมโครมิเตอร์ (จุดที่2) ซึ่งเป็นไมโครมิเตอร์เพื่อเลื่อนระดับของปลายเข็มให้แตะกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.3.4.3 ทำการเริ่มปฏิกิริยาได้

3.3.4.4 เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด ทำการหมุนไมโครมิเตอร์ (จุดที่2) 4 รอบโดย 1 รอบของไมโครมิเตอร์จะมีค่า 0.5 มิลลิเมตร (เรากำหนดระยะที่ปลายเข็มจุ่มลงในสารละลาย 2 มิลลิเมตร

3.3.5 ขั้นตอนการทดลอง

นำลวดทังสเตนที่ล้างเรียบร้อยแล้วมาทำการทดลองโดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือในกรณีที่ 1 คือการกำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ ทำโดยการกำหนดค่าแรงดันไว้ที่ค่าหนึ่ง เมื่อทำการจ่ายค่าแรงดันจะเกิดปฏิกิริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมี เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดค่าของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีที่ 2 คือการกำหนดกระแสไฟฟ้าคงที่ ทำโดยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่ง เมื่อทำการจ่ายค่าแรงดันจะเกิดปฏิกิริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมี เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดค่าของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ลักษณะของปลายเข็มตามต้องการ จากนั้นทำการทดลองกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปลายเข็มตามต้องการอีกครั้ง เพื่อทดสอบลักษณะของปลายเข็มว่ามีลักษณะเหมือนเดิมทุกครั้งตามที่เราต้องการหรือไม่

3.3.6 ขั้นตอนการทำความสะอาดปลายเข็มหลังทำการทดลอง

เมื่อการทดลองสิ้นสุดนำลวดทังสเตนที่ได้ไปล้างด้วยสารละลาย Acetone ในเครื่องล้างระบบอัลตราโซนิคใช้เวลา 10 นาที เพื่อให้สารละลายที่เกาะอยู่บริเวณปลายเข็มหลุดออกไป จากนั้นนำเข็มที่ล้างเสร็จไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อดูลักษณะของปลายเข็มบันทึกภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองในโครงงานพิเศษนี้แบ่งวิธีการทดลองเป็น 2 วิธีหลักได้แก่ 1. วิธีศักย์ไฟฟ้าคงที่ จะกำหนดให้แหล่งจ่ายไฟของเซลล์ไฟฟ้าเคมีทำงานในโหมดแรงดันไฟฟ้าคงที่ (constant voltage source) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นระหว่าง 2 – 5 โมล ที่ความเข้มข้นของสารละลายแต่ละค่า จะทำการศึกษาโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วง 2 – 6 โวลต์ ซึ่งในวิธีศักย์ไฟฟ้าคงที่จะแบ่งออกเป็นอีก 2 เงื่อนไข คือ กำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบสเตนเลส และ กำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน 2. วิธีกระแสไฟฟ้าคงที่ จะกำหนดให้แหล่งจ่ายไฟของเซลล์ไฟฟ้าเคมีทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าคงที่ (constant current source) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นระหว่าง 3 – 5 โมล ที่ความเข้มข้นของสารละลายแต่ละค่า จะทำการศึกษาโดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ช่วง 5 – 20 mA ซึ่งวิธีกระแสไฟฟ้าคงที่นี้จะมีเพียงเงื่อนไขเดียว คือ กำหนดกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน

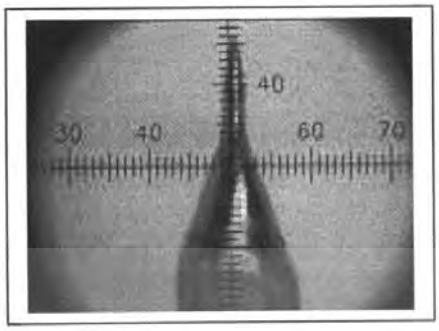
4.1 วิธีศักย์ไฟฟ้าคงที่ (constant voltage method)

4.1.1 กำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบสเตนเลส

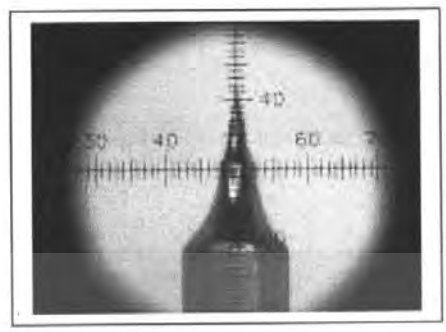
4.1.1.1 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะของเข็มส่วนใหญ่ที่ไม่มีคล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองได้มีลักษณะไม่สมมาตร ลักษณะปลายเข็มผิดรูปไปจากที่ต้องการมาก คือ ปลายเข็มมีลักษณะที่ยาวเหมือนดินสอและมีค่า Aspect Ratio สูง ซึ่งมีลักษณะของเข็มส่วนน้อยเท่านั้นที่คล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปที่ 4.1 (c) จะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองได้มีลักษณะสมมาตรจะมีเข็มบางส่วนที่เป็นมุมป้าน (ไม่เว้า) และมีค่า Aspect Ratio ต่ำ

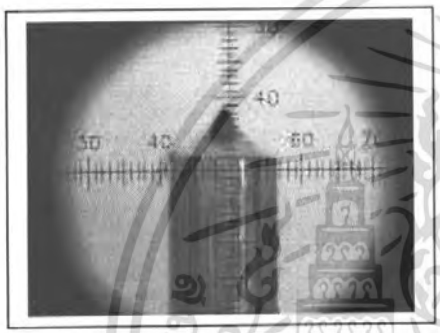
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



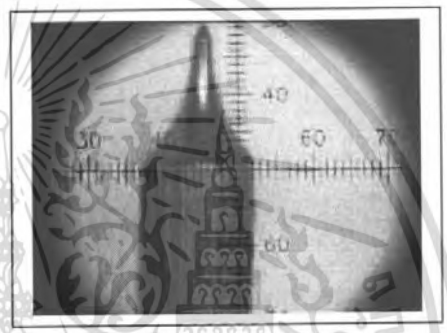
(a)



(b)



(c)

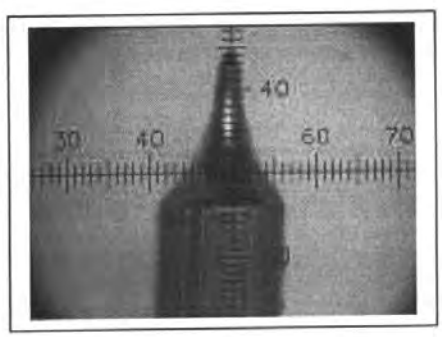


(d)

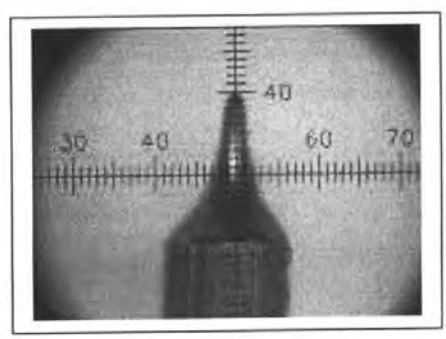
รูปที่ 4.1 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 15 นาที 7 วินาที, (b) ใช้เวลา 10 นาที 6 วินาที, (c) ใช้เวลา 13 นาที 25 วินาที, (d) ใช้เวลา 10 นาที 27 วินาที

4.1.1.2 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะของเข็มที่ไม่มีคล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองมีลักษณะไม่สมมาตร ปลายเข็มมีลักษณะผิดรูปไปจากที่ต้องการอย่างมาก คือ ปลายเข็มมีลักษณะที่ยาวและมีค่า Aspect Ratio สูง

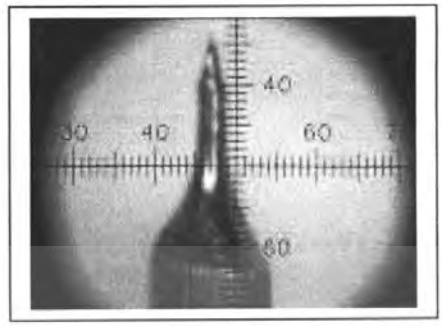


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

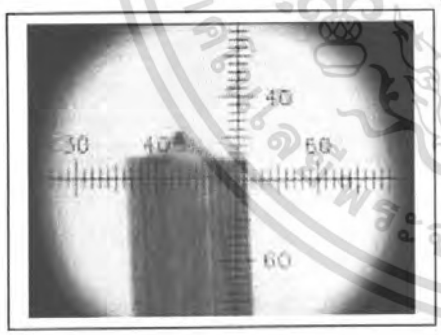


(c)

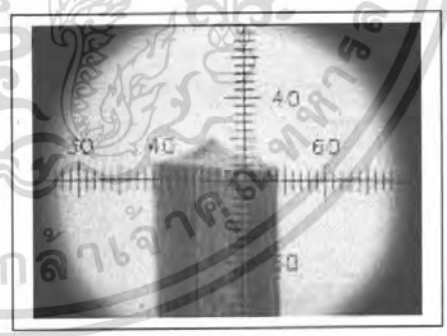
รูปที่ 4.2 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 10 นาที 57 วินาที, (b) ใช้เวลา 10 นาที 9 วินาที, (c) ใช้เวลา 10 นาที 10 วินาที

4.1.1.3 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล

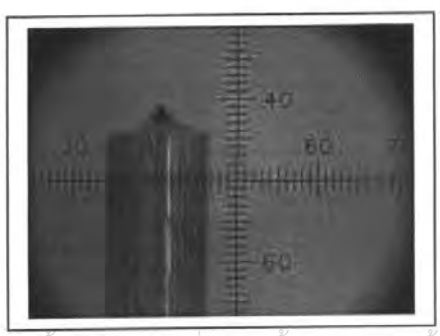
จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล มีลักษณะของเข็มส่วนมากที่คล้ายกับลักษณะเข็มที่เราต้อง ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองได้มีลักษณะสมมาตร จะมีเข็มบางส่วนที่เป็นมุมป้าน (ไม่เว้า) และมีค่า Aspect Ratio ต่ำ



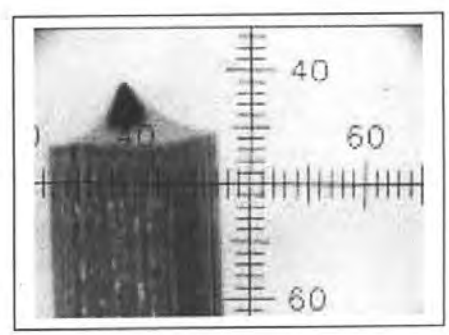
(a)



(b)

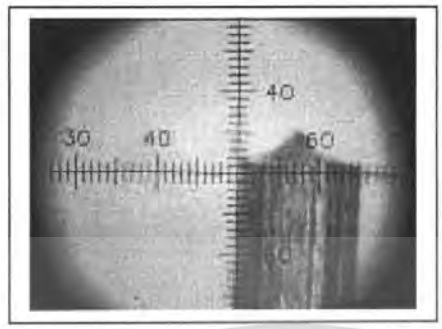


(c)



(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

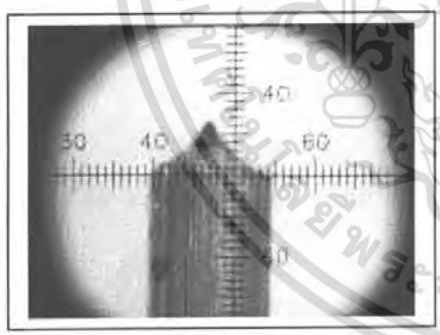


(e)

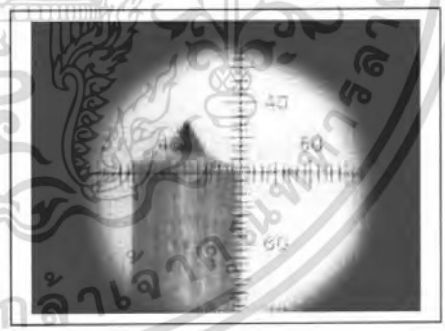
รูปที่ 4.3 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล: (a) ใช้เวลา 8 นาที 55 วินาที , (b) ใช้เวลา 9 นาที 35 วินาที, (c) ใช้เวลา 9 นาที14 วินาที, (d) ใช้เวลา 9 นาที, (e) ใช้เวลา 10 นาที

4.1.1.4 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะของเข็มบางส่วนที่คล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองส่วนใหญ่มีลักษณะสมมาตร จะมีเข็มบางส่วนที่เป็นมุมป้าน (ไม่เว้า) และมีค่า Aspect Ratio ต่ำ และมีเข็มบางส่วนมีขอบที่ไม่สมมาตร



(a)



(b)

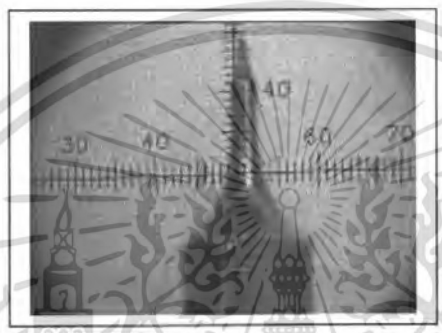
(c)

รูปที่ 4.4 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 12 นาที 14 วินาที, (b) ใช้เวลา 12 นาที 3 วินาที, (c) ใช้เวลา 6 นาที 5 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.5 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ที่ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล มีลักษณะของเข็มที่ไม่มีคล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองมีลักษณะไม่สมมาตร แต่จะมีลักษณะปลายเข็มที่ผิดรูปไปจากที่ต้องการมาก คือ ปลายเข็มมีลักษณะที่ยาวและมีค่า Aspect Ratio สูง



รูปที่ 4.5 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล ใช้เวลา 7 นาที 41 วินาที

4.1.1.6 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4.5 โวลต์ ที่ความเข้มข้น 4 โมล

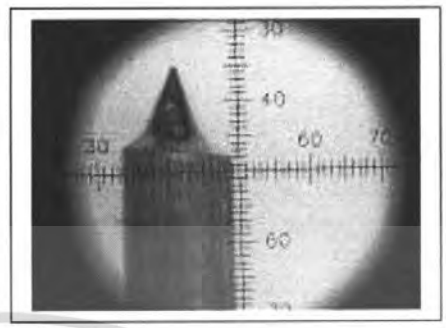
จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4.5 โวความเข้มข้น 4 โมล มีลักษณะของเข็มส่วนใหญ่ที่ไม่มีคล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลอง ได้มีลักษณะที่ไม่สมมาตร แต่จะมีลักษณะปลายเข็มที่ผิดรูปไปจากที่ต้องการมาก คือ ปลายเข็มมีลักษณะที่ยาวและมีค่า Aspect Ratio สูงซึ่งมีลักษณะของเข็มส่วนน้อยเท่านั้นที่คล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูป 2 รูปแรกจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองได้มีลักษณะที่สมมาตรจะมีเข็มบางส่วนที่เป็นมุมป้าน (ไม่เว้า) และมีค่า Aspect Ratio ต่ำ

(a)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(c)



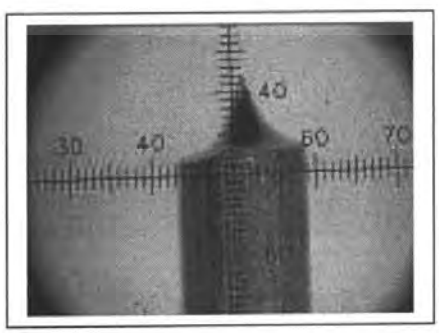
(d)

(e)

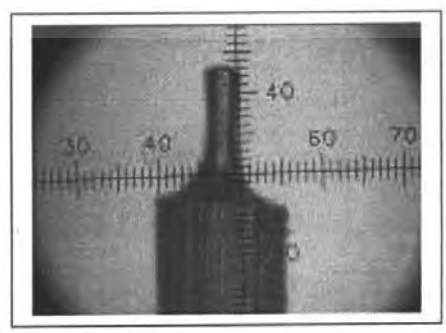
รูปที่ 4.6 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4.5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) ใช้เวลา 10 นาที 50 วินาที , (b) ใช้เวลา 7 นาที 44 วินาที, (c) ใช้เวลา 6 นาที 59 วินาที, (d) ใช้เวลา 7 นาที กระแส, (e) ใช้เวลา 6 นาที 35 วินาที

4.1.1.7 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล มีลักษณะขอบของเข็มที่ไม่สมมาตร ลักษณะปลายเข็มผิดรูปไปจากที่ต้องการอย่างมาก คือ ปลายเข็มมีลักษณะที่ยาวและมีค่า Aspect Ratio สูง

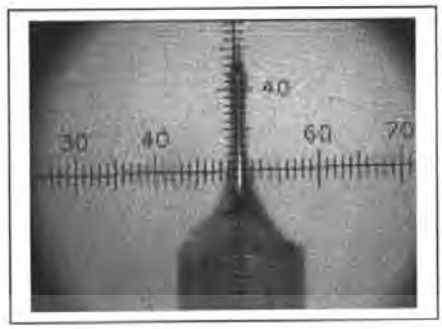


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

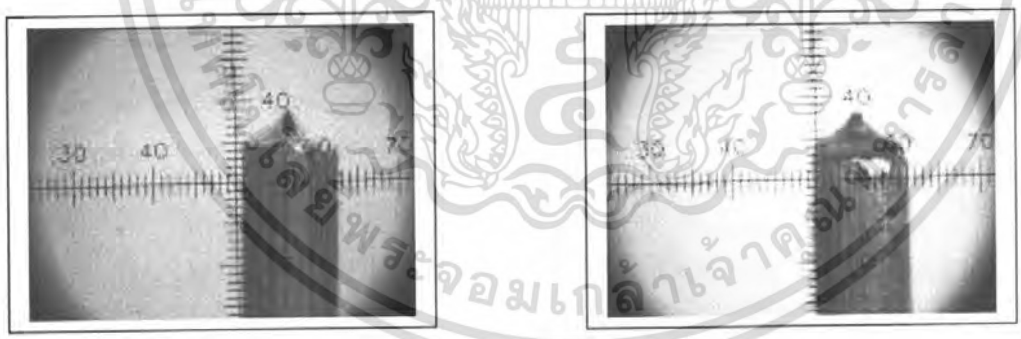


(c)

รูปที่ 4.7 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) ใช้เวลา 5 นาที 48 วินาที, (b) ใช้เวลา 7 นาที, (c) ใช้เวลา 16 นาที 20 วินาที

4.1.1.8 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ที่ความเข้มข้น 5 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล มีลักษณะของเข็มบางส่วนที่คล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองได้มีลักษณะที่ไม่สมมาตร จะมีเข็มบางส่วนที่เป็นมุมป้าน (ไม่เว้า) และมีค่า Aspect Ratio ต่ำ และมีเข็มบางส่วนมีขอบที่ไม่เรียบ



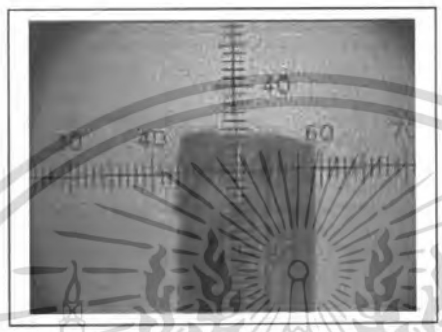
(a) (b)

รูปที่ 4.8 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล: (a) ใช้เวลา 7 นาที 40 วินาที , (b) ใช้เวลา 11 นาที 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.9 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5.5 โวลต์ ที่ความเข้มข้น 4 โมล

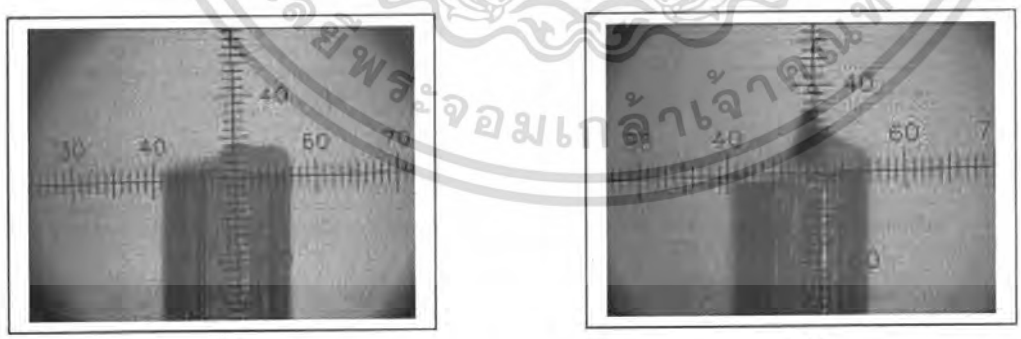
จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5.5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล มีลักษณะของเข็มที่ไม่มีคล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ปลายเข็มมีลักษณะเรียบกุด



รูปที่ 4.9 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5.5 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล (a) ใช้เวลา 10 นาที 53 วินาที

4.1.10 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 6 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 6 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล มีลักษณะของเข็มที่ไม่มีคล้ายกับลักษณะที่ต้องการ ซึ่งพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า ขอบของเข็มที่ทำการทดลองมีลักษณะ ไม่สมมาตร แต่จะมีลักษณะปลายเข็มที่ผิดรูปไปจากที่ต้องการอย่างมาก คือ ปลายเข็มมีลักษณะที่ยาวหรือเรียบกุด



(a) (b)

รูปที่ 4.10 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 6 โวลต์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) ใช้เวลา 6 นาที 38 วินาที , (b) ใช้เวลา 4 นาที 37 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 กำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน

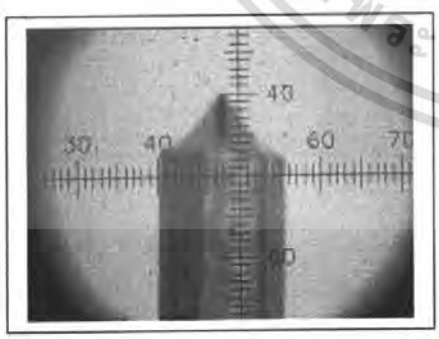
4.1.2.1 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2 โวลต์ ความเข้มข้น 2 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2 โวลต์ ความเข้มข้น 2 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่ไม่สมมาตร บริเวณการกัดเป็นขั้นๆจนถึงปลายเข็ม ลักษณะยาวสูง และมีค่า Aspect Ratio สูง

รูปที่ 4.11 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2 โวลต์ ความเข้มข้น 2 โมล เวลา 10 นาที 16 วินาที

4.1.2.2 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2.5 โวลต์ ความเข้มข้น 2 โมล

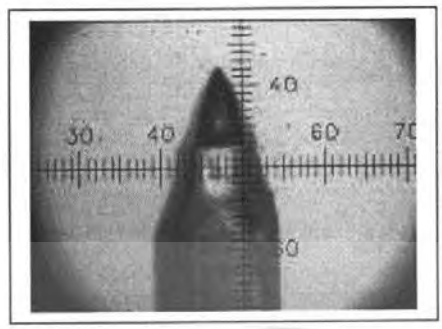
จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2.5 โวลต์ ความเข้มข้น 2 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่สมมาตร บริเวณการกัดเป็นขั้นๆจนถึงปลายเข็ม ลักษณะยาวสูง และมีค่า Aspect Ratio สูง



(a)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

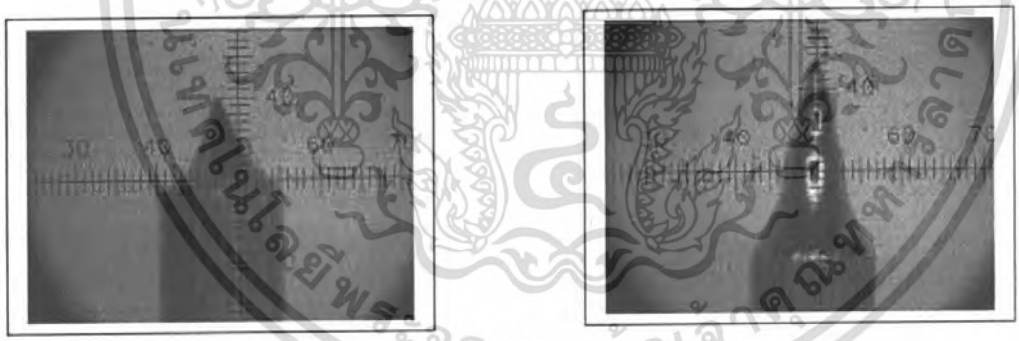


(c)

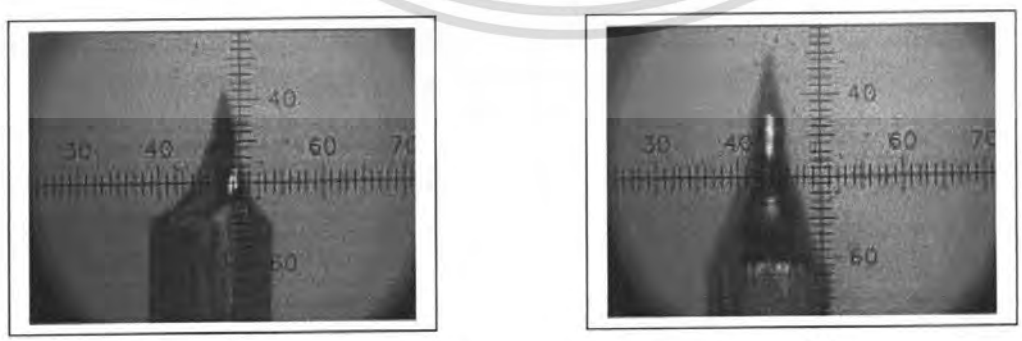
รูปที่ 4.12 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 2.5 โวลต์ ความเข้มข้น 2 โมล: (a) ใช้เวลา 26 นาที 28 วินาที (b) ใช้เวลา 16 นาที 54 วินาที (c) ใช้เวลา 15 นาที 30 วินาที

4.1.2.3 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบไม่เรียบและไม่สมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง



(a) (b)



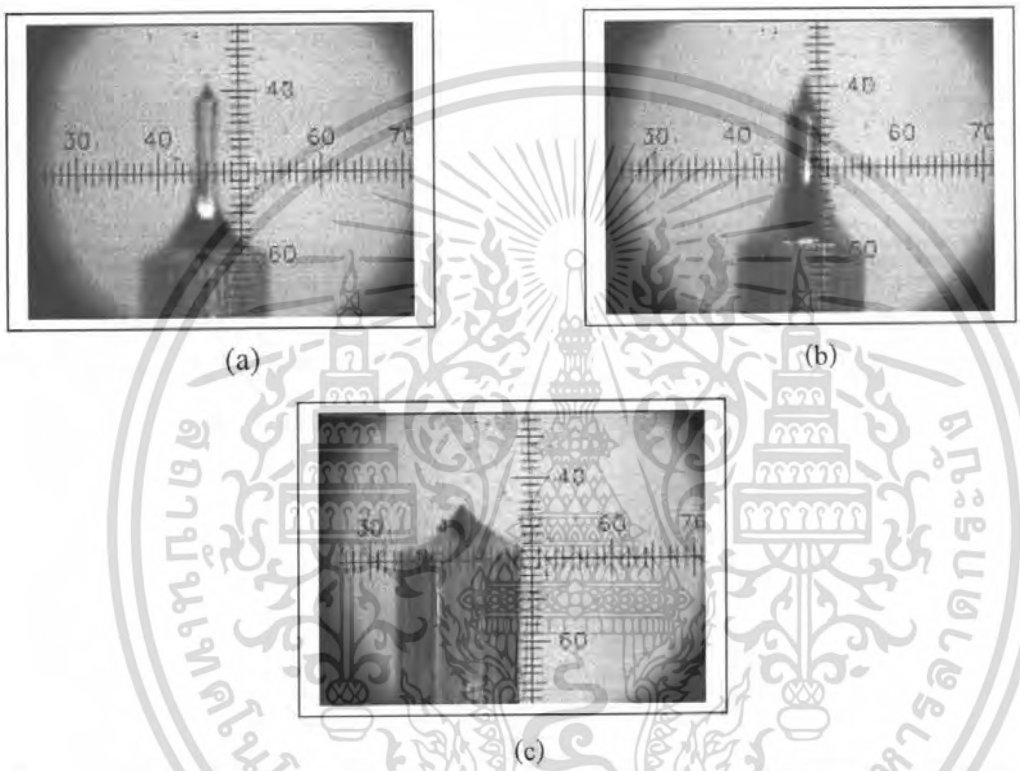
(c) (d)

รูปที่ 4.13 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 11 นาที 51 วินาที , (b) ใช้เวลา 10 นาที 4 วินาที, (c) ใช้เวลา 11 นาที 53 วินาที, (d) ใช้เวลา 10 นาที 15 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.4 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่คมเรียบสมมาตร ลักษณะการกัดเป็นสองขั้น ยาว ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง

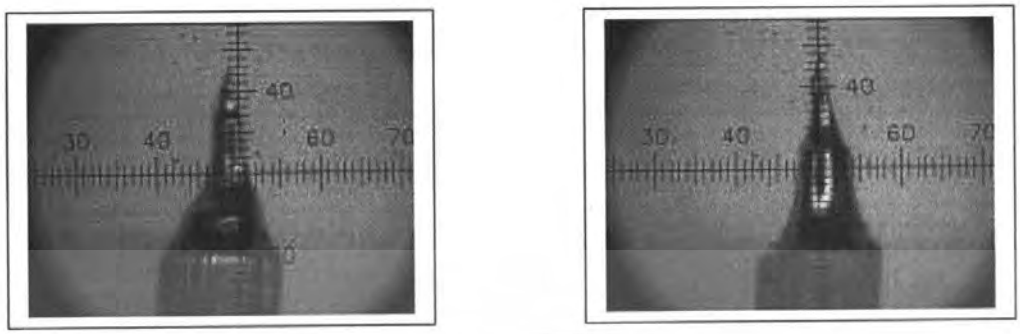


รูปที่ 4.14 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3 โวลต์ ความเข้มข้น 5 โมล: (a) ใช้เวลา 7 นาที 57 วินาที, (b) ใช้เวลา 7 นาที 32 วินาที , (c) ใช้เวลา 9 นาที 40 วินาที

4.1.2.5 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่คมเรียบแต่ไม่สมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว เป็นขั้นๆ ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



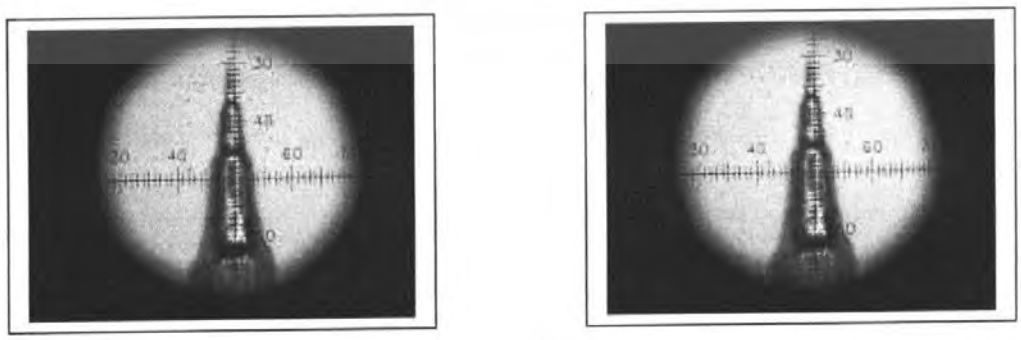
(a) (b)

(c)

รูปที่ 4.15 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 3.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 12 นาที, (b) ใช้เวลา 11 นาที 1 วินาที, (c) ใช้เวลา 9 นาที 35 วินาที

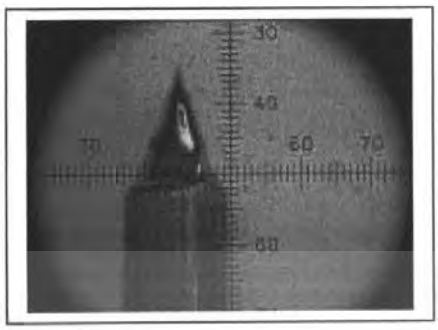
4.1.2.6 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่ไม่คมเรียบและไม่สมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว เป็นขั้นๆ ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง

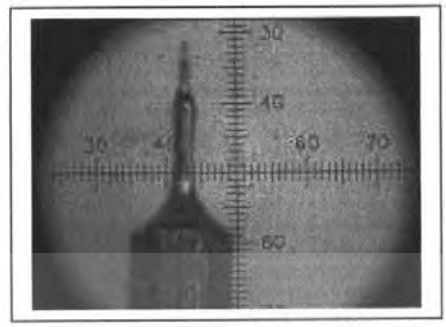


(a) (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)



(d)

รูปที่ 4.16 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 11 นาที 35 วินาที , (b) ใช้เวลา 9 นาที 15 วินาที, (c) ใช้เวลา 7 นาที 50 วินาที, (d) ใช้เวลา 10 นาที 47 วินาที

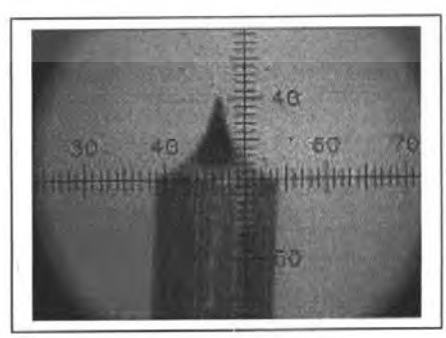
4.1.2.7 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่คมและสมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง จะมีบางส่วนที่มีลักษณะตามต้องการ คือขอบของเข็มคมเรียบ สมมาตร ปลายเข็มป้านและสั้น ค่า Aspect Ratio ต่ำ

(a)

(b)

(b)



(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

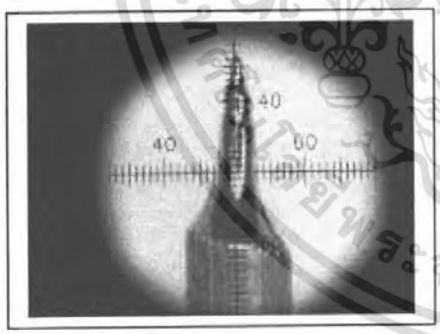
(e)

(f)

รูปที่ 4.17 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 4.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล : (a) ใช้เวลา 9 นาที 30 วินาที, (b) ใช้เวลา 9 นาที 39 วินาที, (c) ใช้เวลา 11 นาที 1 วินาที, (d) ใช้เวลา 10 นาที, (e) ใช้เวลา 10 นาที40 วินาที, (f) ใช้เวลา 10 นาที 7 วินาที

4.1.2.8 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

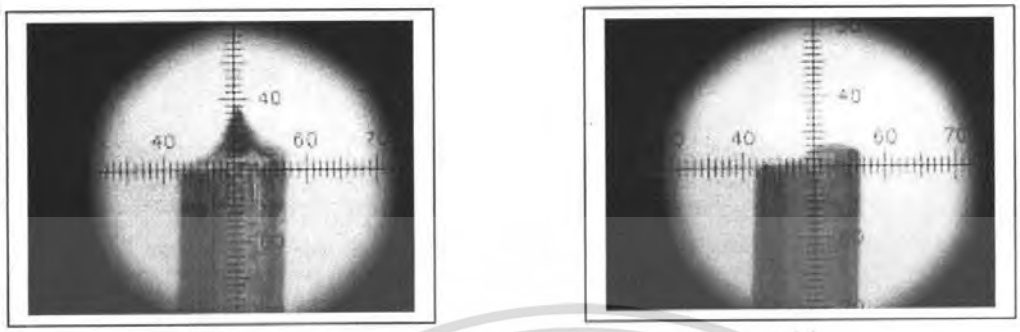
จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่คมแต่ไม่สมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง



(a)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

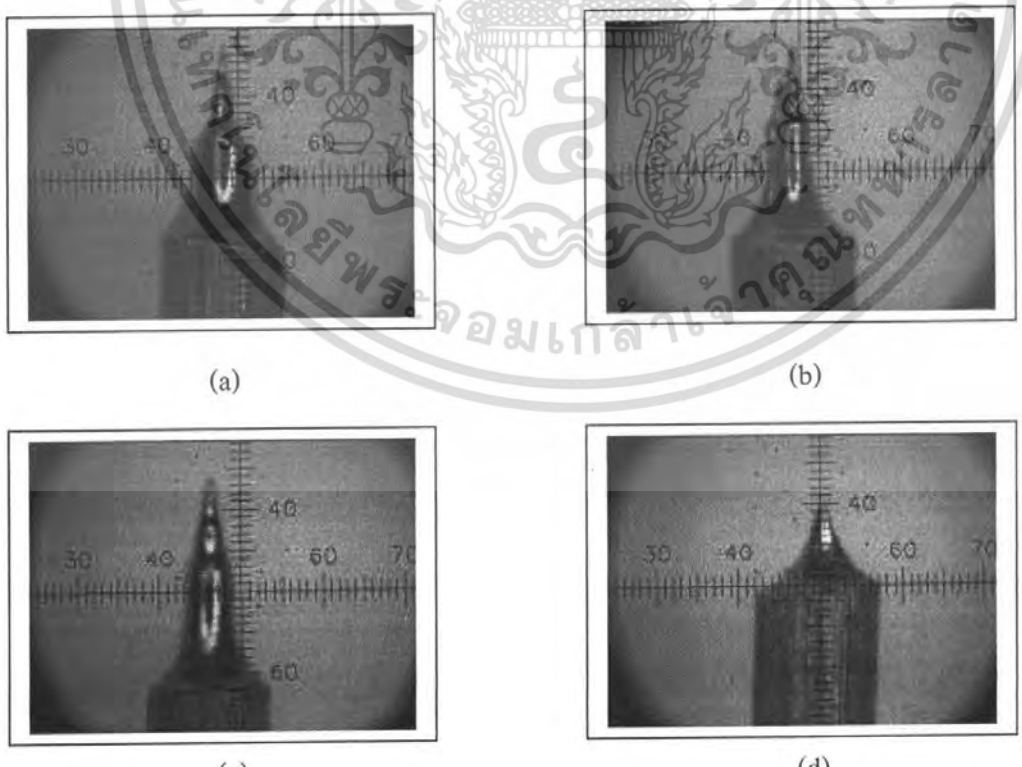


(c) (d)

รูปที่ 4.18 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 8 นาที 33 วินาที, (b) ใช้เวลา 10 นาที 7 วินาที, (c) ใช้เวลา 8 นาที 15 วินาที, (d) ใช้เวลา 15 นาที 17 วินาที

4.1.2.9 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่คมแต่ไม่สมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง



(a) (b)

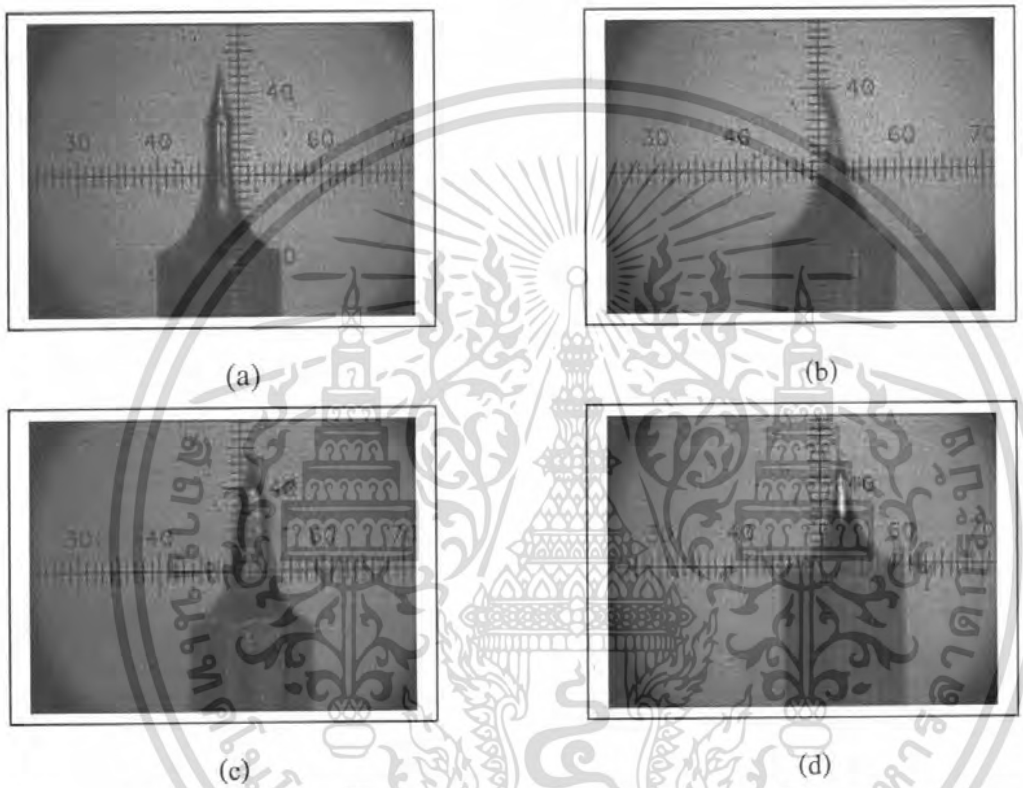
(c) (d)

รูปที่ 4.19 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 5.5 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 8 นาที 2 วินาที, (b) ใช้เวลา 9 นาที 44 วินาที, (c) ใช้เวลา 8 นาที 33 วินาที, (d) ใช้เวลา 8 นาที 33 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.10 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 6 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 6 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่คมเรียบและสมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง



(a) (b) (c) (d)

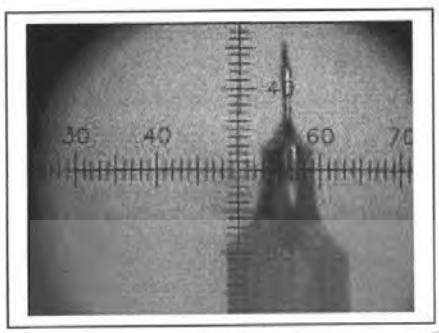
รูปที่ 4.20 แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร 6 โวลต์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) ใช้เวลา 7 นาที 20 วินาที, (b) ใช้เวลา 7 นาที 8 วินาที, (c) ใช้เวลา 7 นาที 6 วินาที, (d) ใช้เวลา 9 นาที 30 วินาที

4.2 วิธีกระแสไฟฟ้าคงที่ (constant current method) โดยใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน

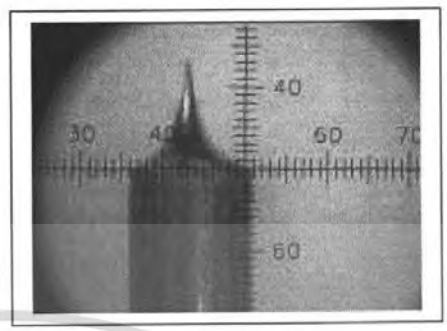
4.2.1 กระแสไฟฟ้า 4 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 4 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่คมเรียบไม่สมมาตร แต่ปลายของเข็มมีลักษณะยาว เป็นขั้นๆ ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

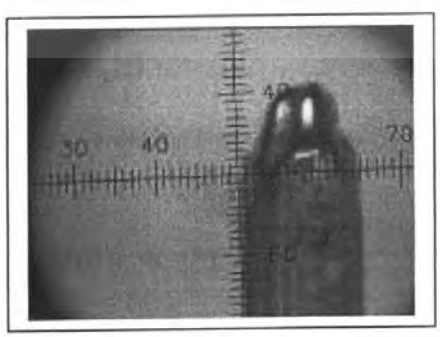
(c)

(d)

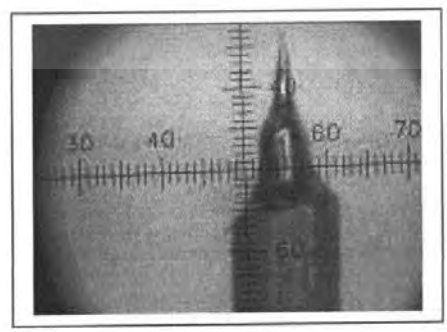
รูปที่ 4.21 กระแสไฟฟ้า 4 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 9.85 mA เวลา 6 นาที 18 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 9.0 mA เวลา7 นาที 52 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 9.9 mAเวลา 6 นาที 20 วินาที, (d) กระแสไฟฟ้า 9.0 mA เวลา 7 นาที 24 วินาที

4.2.2 กระแสไฟฟ้า 5 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 5 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล มีลักษณะของเข็มคือไม่สมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว เป็นขั้นๆ ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง

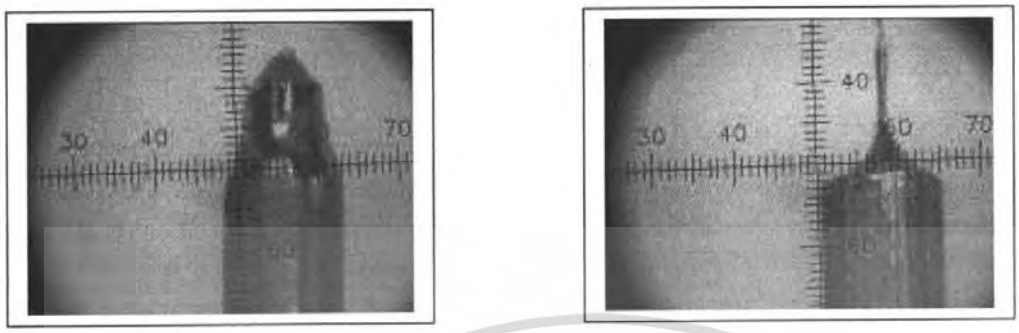


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) (d)

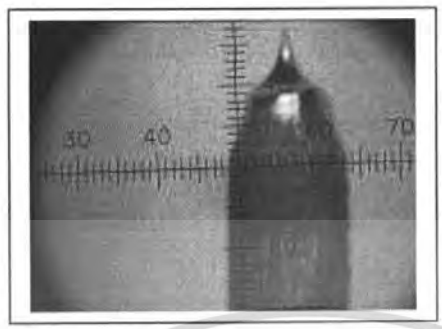
รูปที่ 4.22 กระแสไฟฟ้า 5 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) กระแส 11.4 mA เวลา 6 นาที 47 วินาที, (b) กระแส 11.7 mA เวลา 4 นาที 1 วินาที, (c) กระแส 11.8 mAเวลา 6 นาที 30 วินาที, (d) กระแส 11.8 mA เวลา 5 นาที 19 วินาที

4.2.3 กระแสไฟฟ้า 5 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 5 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเป็นขั้นๆและคุดสั้น ไม่ป้าน ขอบมีลักษณะเรียบ

(a) (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

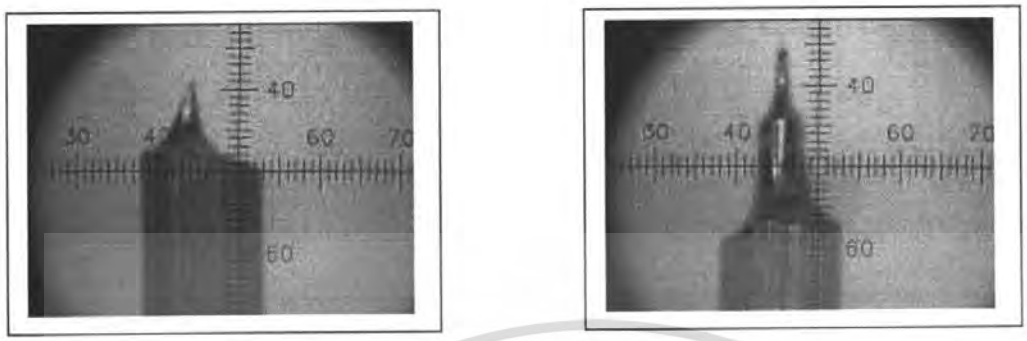
รูปที่ 4.23 กระแสไฟฟ้า 5 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 9.5 mA เวลา 8 นาที 32 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 9.3 mA เวลา16 นาที 2 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 9.4 mA เวลา 7 นาที 27 วินาที

4.2.4 กระแสไฟฟ้า 6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล ปลายเข็มมีลักษณะไม่ป้าน สูงและกุด ขอบมีลักษณะเรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง

(a) (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

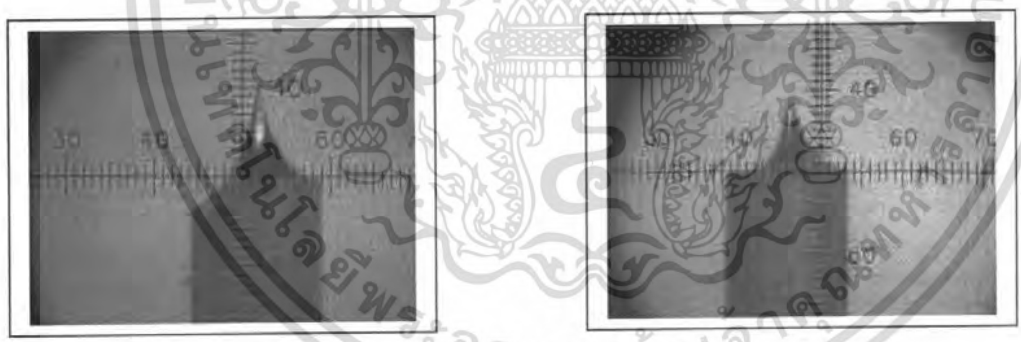


(c) (d)

รูปที่ 4.24 กระแสไฟฟ้า 6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 11 mA เวลา 6 นาที 30 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 11 mA เวลา 6 นาที 8 วินาที, (c) แรงดัน 1.4 V กระแสไฟฟ้า 11 mA เวลา 5 นาที 38 วินาที, (d) แรงดัน 1.4 V กระแสไฟฟ้า 11 mA เวลา 5 นาที 39 วินาที

4.2.5 กระแสไฟฟ้า 6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเว้า ไม่ป้าน สูง ขอบมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง



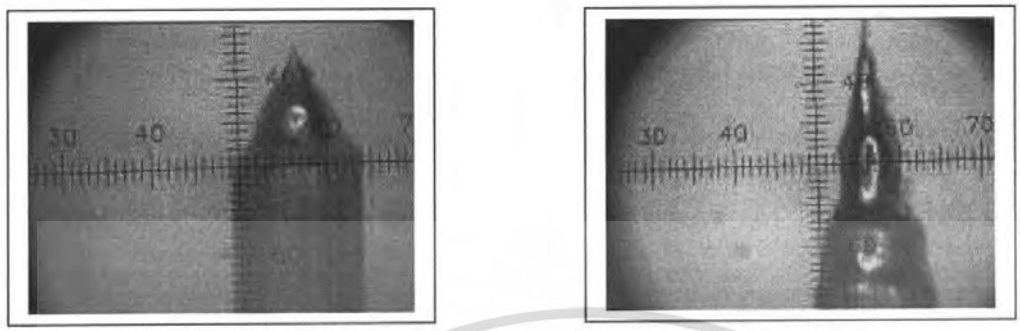
(a) (b)

รูปที่ 4.25 กระแสไฟฟ้า 6 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 11.2 mA เวลา 7 นาที 54 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 11 mA เวลา 6 นาที 33 วินาที

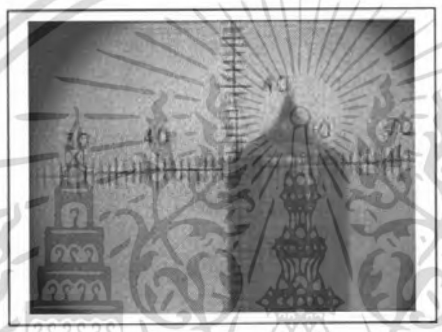
4.2.6 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ความเข้มข้น 3 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเป็นขั้นๆ ป้าน สูง ขอบมีลักษณะเรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

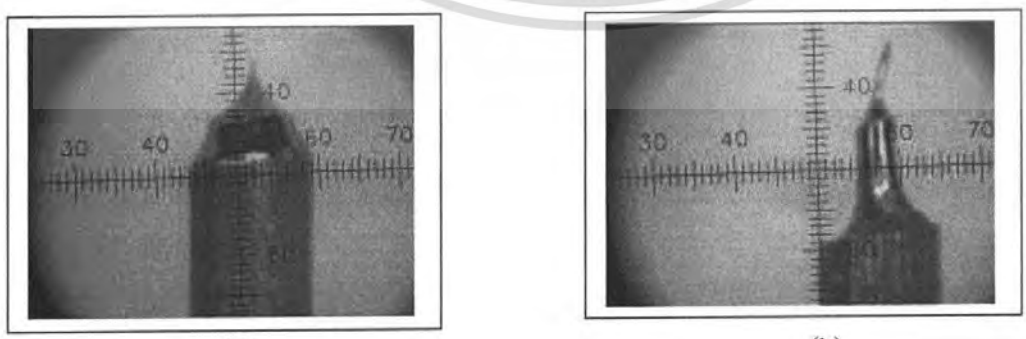


(c)

รูปที่ 4.26 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) กระแส 13.8 mA เวลา 4 นาที 32 วินาที, (b) กระแส 13.8 mA เวลา 4 นาที 25 วินาที, (c) กระแส 13.7 mA เวลา 5 นาที

4.2.7 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล มีลักษณะของเข็มคือไม่สมมาตร ปลายของเข็มมีลักษณะยาว เป็นขั้นๆ ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง



(a) (b)

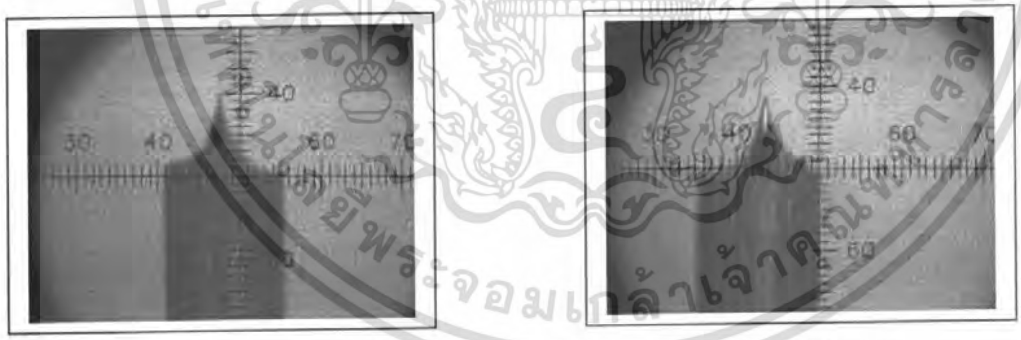
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(c)

รูปที่ 4.27 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 12.9 mA เวลา 5 นาที 30 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 13.1 mA เวลา 5 นาที 25 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 13 mA เวลา 5 นาที 46 วินาที

4.2.8 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเว้า ไม่ป้าน สูงเล็กน้อย ขอบมีลักษณะเรียบ สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง สามารถทำซ้ำได้ลักษณะเดิม



(a) (b)

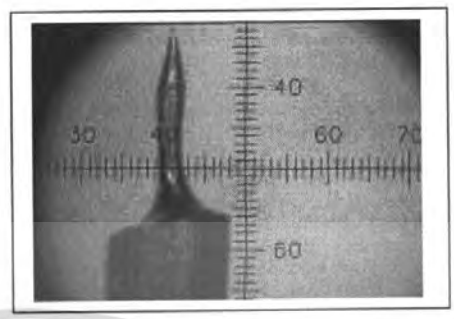
รูปที่ 4.28 กระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 12.3 mA เวลา 5 นาที 35 วินาที(b) กระแสไฟฟ้า 12.2 mA เวลา 5 นาที 58 วินาที

4.2.9 กระแสไฟฟ้า 9 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 9 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเป็นขั้นๆ ไม่ป้าน สูง ขอบมีลักษณะไม่เรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a)



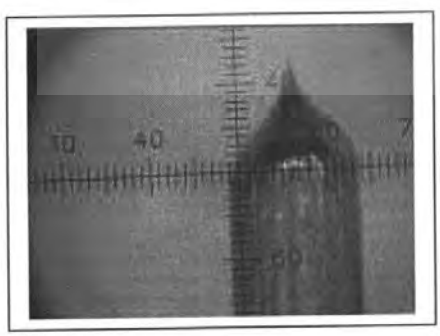
(b)

(c)

รูปที่ 4.29 กระแสไฟฟ้า 9 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 15.1 mA เวลา 4 นาที 6 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 14.7 mA เวลา 4 นาที 39 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 15 mA เวลา 4 นาที 26 วินาที

4.2.10 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ความเข้มข้น 3 โมล

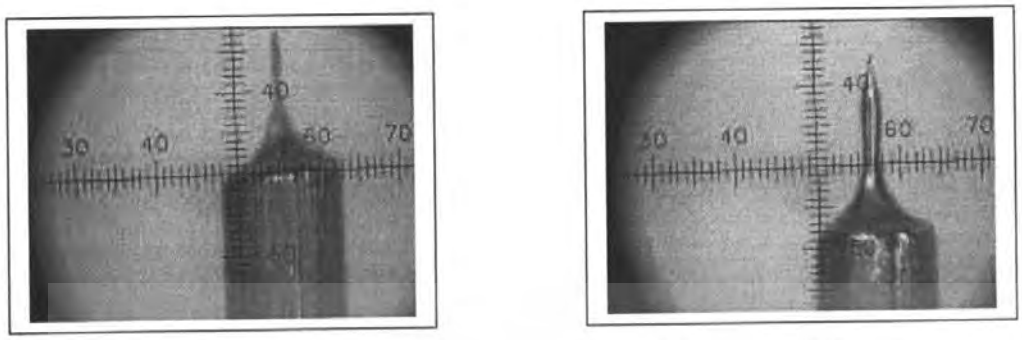
จากรูป กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเว้า ไม่ป้าน สูง ขอบมีลักษณะไม่เรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง



(a)

(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) (d)

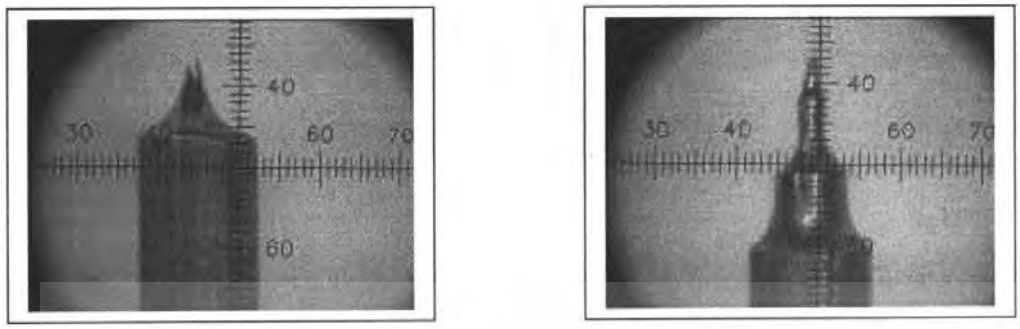
รูปที่ 4.30 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 3 โมล: (a) กระแส 17.2 mA เวลา 3 นาที 38 วินาที, (b) กระแส 16.9 mA เวลา 3 นาที 47 วินาที, (c) กระแส 17.1 mA เวลา 3 นาที 44 วินาที, (d) กระแส 17.1 mA เวลา 3 นาที 55 วินาที

4.2.11 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล มีลักษณะส่วนใหญ่ของเข็ม คือขอบที่คมเรียบแต่ปลายของเข็มมีลักษณะยาว เป็นขั้นๆ ไม่ตรงตามต้องการ และมีค่า Aspect Ratio สูง

(a) (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

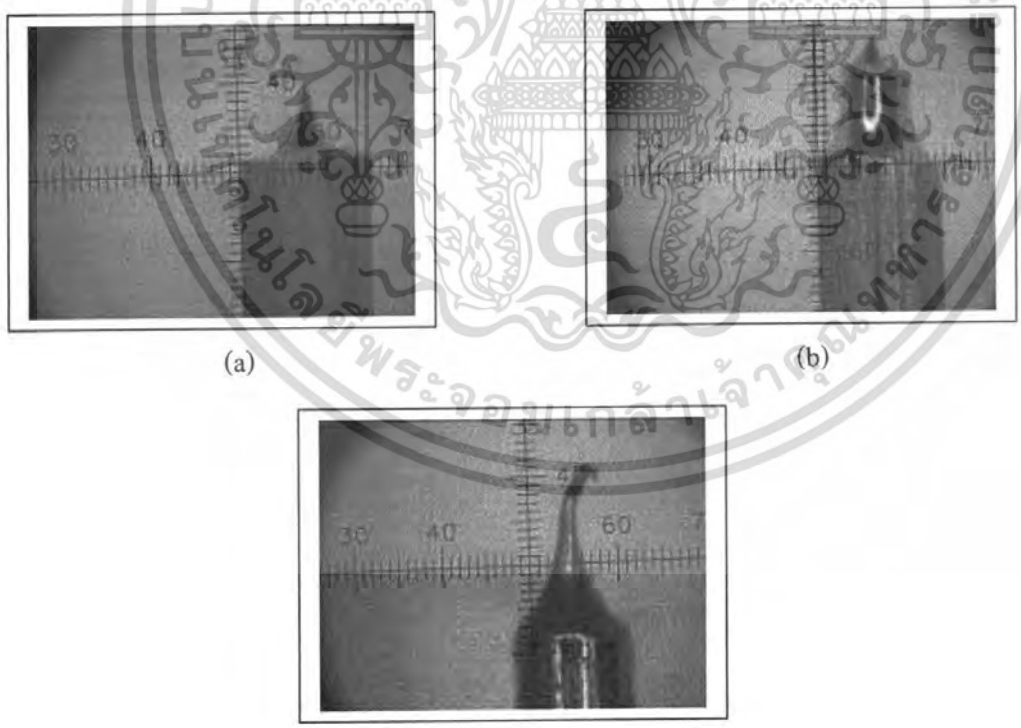


(c) (d)

รูปที่ 4.31 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 16 mA เวลา 3 นาที 32 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 15 mA เวลา 4 นาที 20 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 15.7 mA เวลา 3 นาที 51 วินาที, (d) กระแสไฟฟ้า 16 mA เวลา 4 นาที 4 วินาที

4.2.12 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเป็นขั้นๆ ไม่ป้าน สูง ขอบมีลักษณะเรียบ สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง



(a) (b)

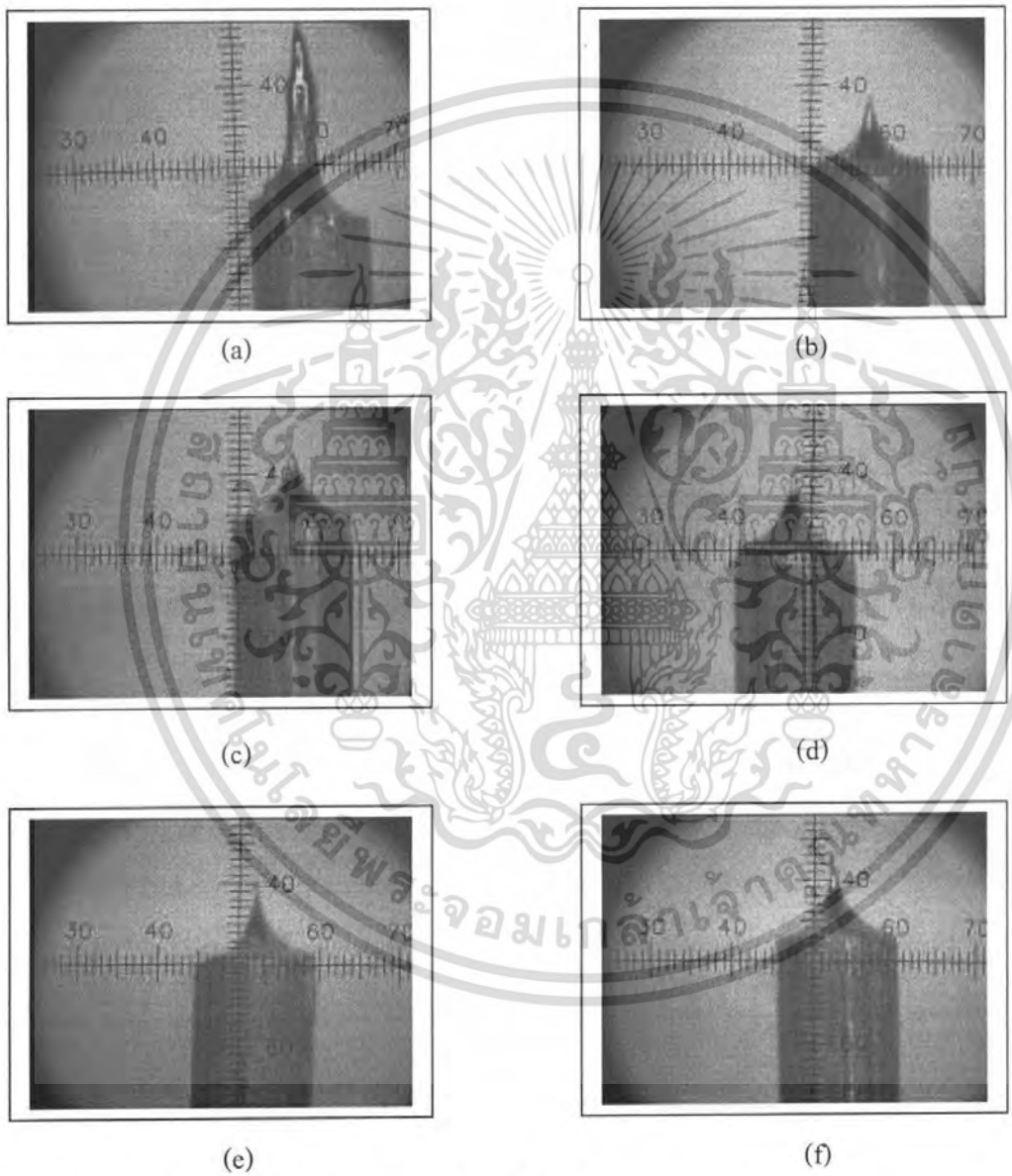
(c)

รูปที่ 4.32 กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 14.5 mA เวลา 4 นาที 41 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 14.5 mA เวลา 4 นาที 18 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 14.4 mA เวลา 4 นาที 45 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.13 กระแสไฟฟ้า 11 มิลลิแอมป์ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเว้า ไม่ป้าน สั้น ขอบมีลักษณะเรียบ สมมาตร มีค่า Aspect Ratio ต่ำ สามารถทำซ้ำได้ ลักษณะเดิม

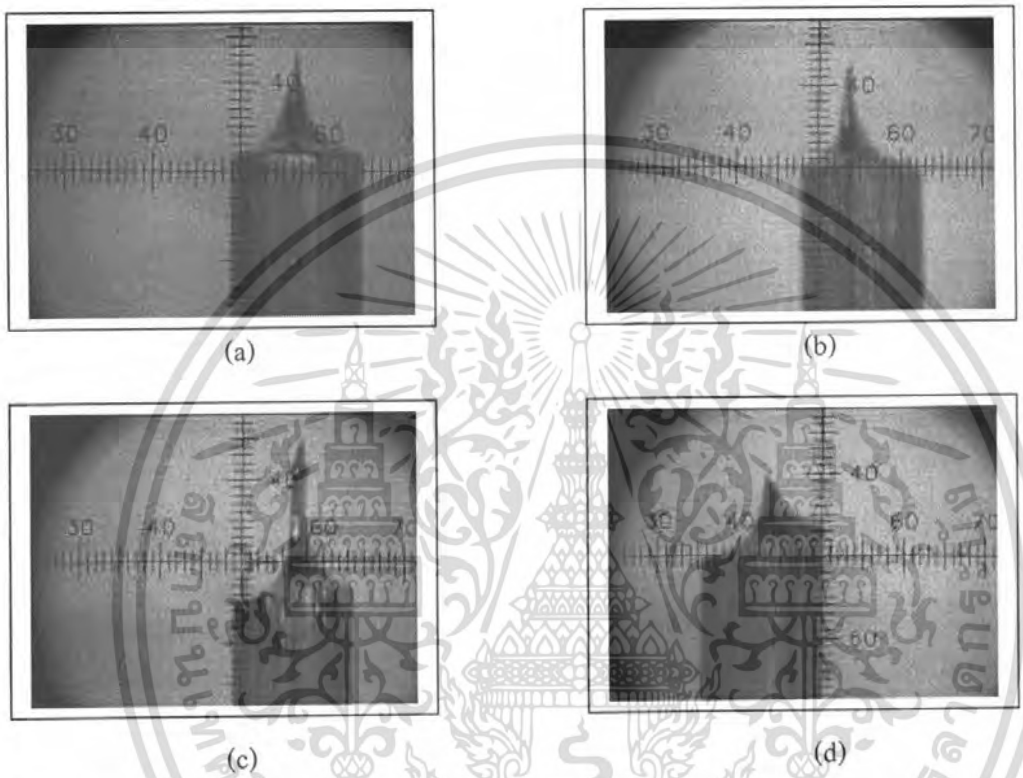


รูปที่ 4.33 กระแสไฟฟ้า 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล : (a) กระแสไฟฟ้า 17.4 mAเวลา 3 นาที 44 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 17.5 mAเวลา 4 นาที, (c) กระแสไฟฟ้า 17.4 mA เวลา 4 นาที 13 วินาที, (d) กระแสไฟฟ้า 17.4 mA เวลา 3 นาที 37 วินาที, (e) กระแสไฟฟ้า 16.7 mA เวลา 3 นาที 36 วินาที, (f) กระแสไฟฟ้า 17.2 mA เวลา 3 นาที 49 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.14 กระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเว้า ไม่ป้าน สูง ขอบมีลักษณะเรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง

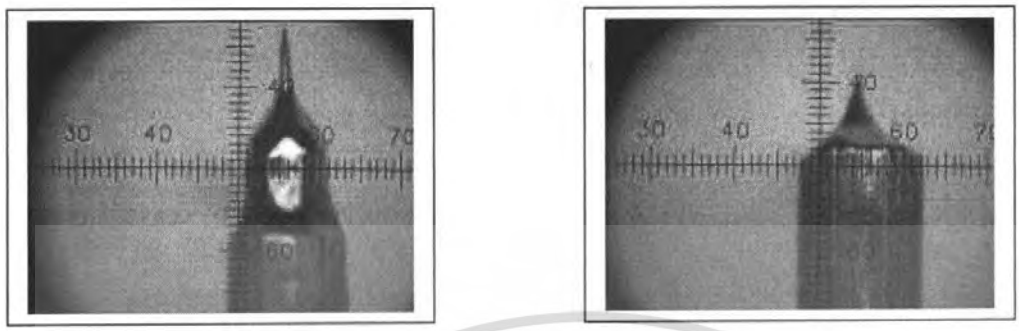


รูปที่ 4.34 กระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 18.9 mA เวลา 3 นาที 46 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 19.1 mA เวลา 3 นาที 46 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 18.9 mA เวลา 3 นาที 40 วินาที, (d) กระแสไฟฟ้า 18.9 mA เวลา 3 นาที 36 วินาที

4.2.15 กระแสไฟฟ้า 13 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 13 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล ปลายเข็มมีลักษณะเป็นขั้นๆ ไม่ป้าน สูง ขอบมีลักษณะเรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



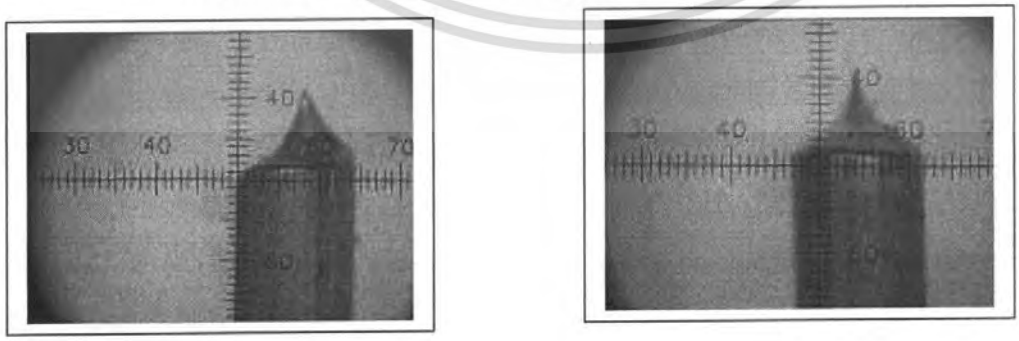
(a) (b)

(c) (d)

รูปที่ 4.35 กระแสไฟฟ้า 13 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 19.6 mA เวลา 3 นาที 4 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 19.8 mA เวลา 3 นาที 18 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 19.9 mA เวลา 2 นาที 58 วินาที, (d) กระแสไฟฟ้า 19.4 mA เวลา 3 นาที 35 วินาที

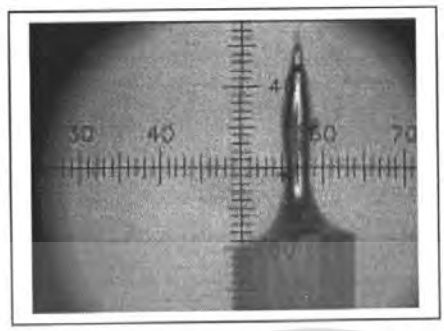
4.2.16 กระแสไฟฟ้า 14 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล

จากรูป กระแสไฟฟ้า 14 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล ปลายเข็มมีลักษณะส่วนใหญ่ป้านข้างเดียว สูง ขอบมีลักษณะเรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง



(a) (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

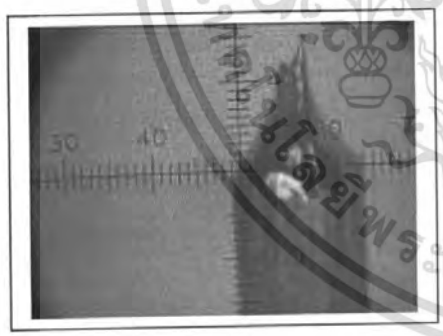


(c)

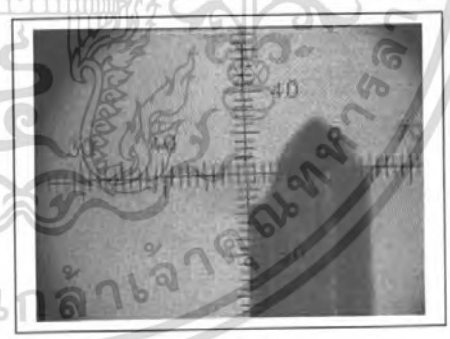
รูปที่ 4.36 กระแสไฟฟ้า 14 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 4 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 20.36 mA เวลา 3 นาที 38 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 21.8 mA เวลา 2 นาที 45 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 20.15 mA เวลา 3 นาที 11 วินาที

4.2.17 กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมป์ความเข้มข้น 5 โมล

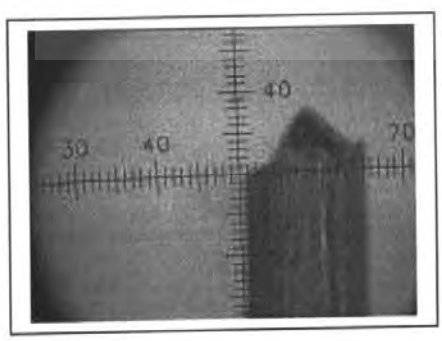
จากรูป กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล ปลายเข็มมีลักษณะป้านข้างเดียว อีกข้างหนึ่งมีลักษณะเว้า สั้น ขอบมีลักษณะไม่เรียบ ไม่สมมาตร มีค่า Aspect Ratio สูง



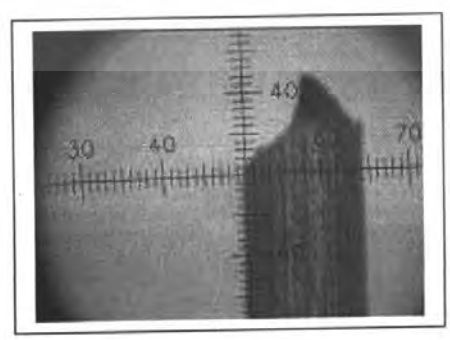
(a)



(b)



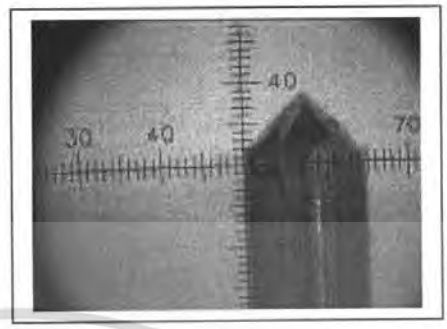
(b)



(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(e)



(f)

รูปที่ 4.37 กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้น 5 โมล: (a) กระแสไฟฟ้า 34.2 mA เวลา 1 นาที 40 วินาที, (b) กระแสไฟฟ้า 32.2 mA เวลา 2 นาที 6 วินาที, (c) กระแสไฟฟ้า 32.9 mA เวลา 2 นาที 24 วินาที, (d) กระแสไฟฟ้า 34.6 mA เวลา 2 นาที 31 วินาที, (e) กระแสไฟฟ้า 34.3 mA เวลา 2 นาที 21 วินาที, (f) กระแสไฟฟ้า 34.4 mA เวลา 2 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

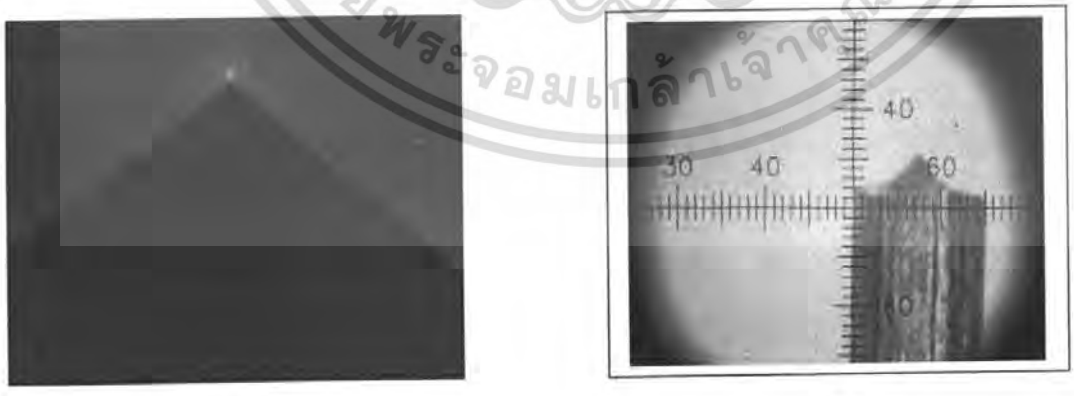
5.1 การทดลองได้แบ่งเงื่อนไขเป็น 2 เงื่อนไข ดังต่อไปนี้

5.1.1 กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ (constant voltage)

จากการทดลองจะได้ว่า เงื่อนไขโดยการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 3-5 โวลต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งแต่ 2-6 โมล และระยะของปลายเข็มที่จุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 2 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดลองพบว่า ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ และค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล จะให้ลักษณะของปลายเข็มตรงตามความต้องการมากที่สุด คือ ให้ค่า Aspect Ratio ต่ำ คือปลายเข็มมีลักษณะเป็นมุมป้านและขนาดของปลายเข็มมีความสูงสั้นกว่าขนาดความกว้างของลวดทังสเตน นอกจากนั้นเข็มยังมีลักษณะคมเรียบสมมาตร แต่มีปัญหาว่าไม่สามารถทำซ้ำได้ตามลักษณะเดิมทุกครั้ง

ค่า Aspect Ratio มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความสูงของปลายเข็มกับความกว้างของลวดทังสเตน ซึ่งจากการทดลองที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 3 โวลต์ และค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล สามารถคำนวณค่า Aspect Ratio ได้ประมาณ 0.3

เปรียบเทียบลักษณะรูปปลายเข็มที่ต้องการกับรูปลักษณะของปลายเข็มที่ได้จากการทดลองเป็นดังรูปข้างล่าง

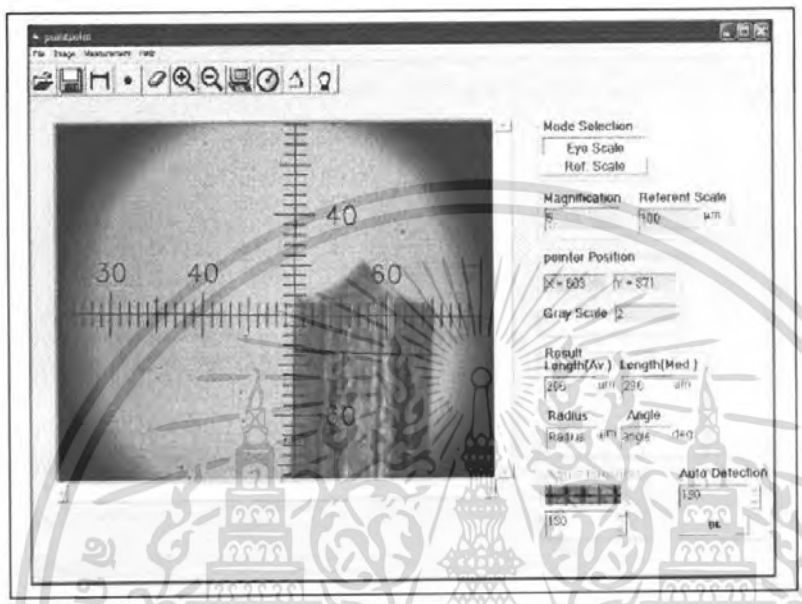


(a) (b)

รูปที่ 5.1 (a) ลักษณะปลายเข็มที่ต้องการ
(b) ลักษณะของปลายเข็มที่แรงดันคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

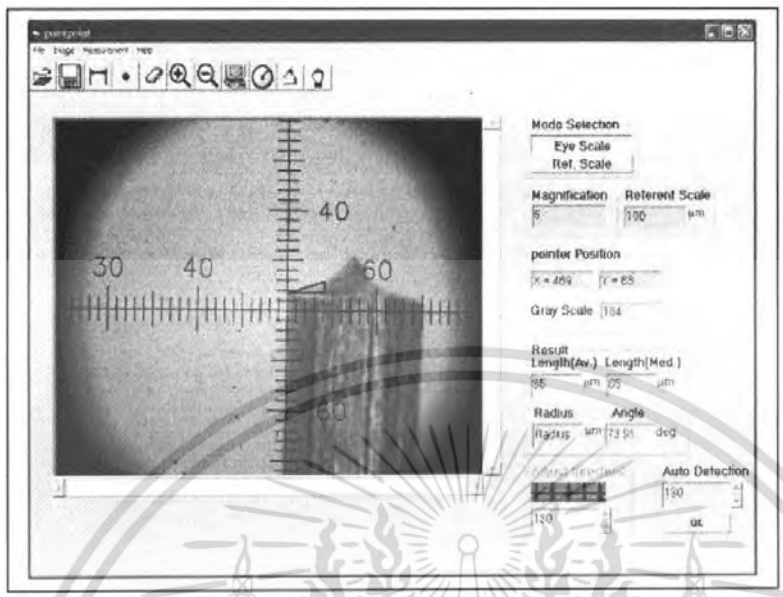
เมื่อนำรูปลักษณะปลายเข็มที่มีค่าแรงดัน 3 โวลต์ ที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล วัดด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่ามุมฐานและปลายเข็มได้ลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.2 ความกว้างฐานของปลายเข็มมีขนาด 296 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

รูปที่ 5.3 ความสูงของปลายเข็มมีขนาด 85 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

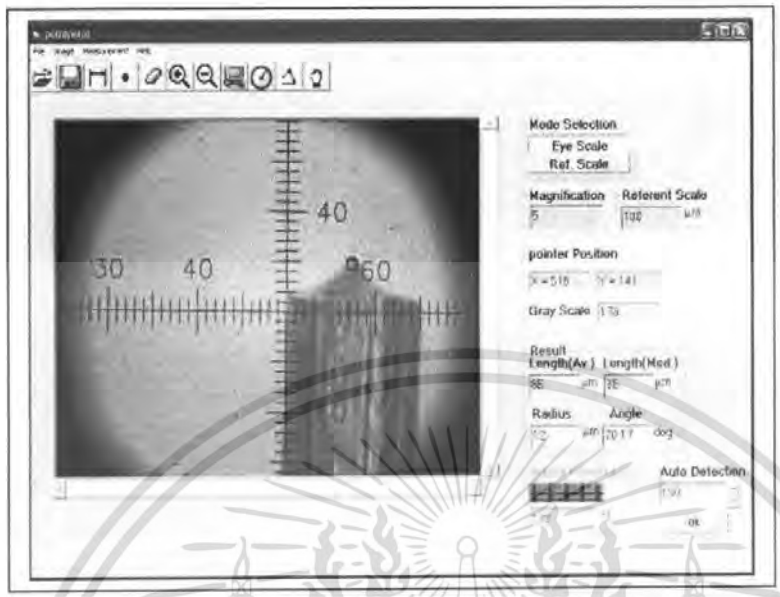
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 มุมฐานของปลายเข็มมีขนาด 74 องศา ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

รูปที่ 5.5 มุมบนของปลายเข็มมีขนาด 48 องศา ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 รัศมีของปลายเข็มมีขนาด 12 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

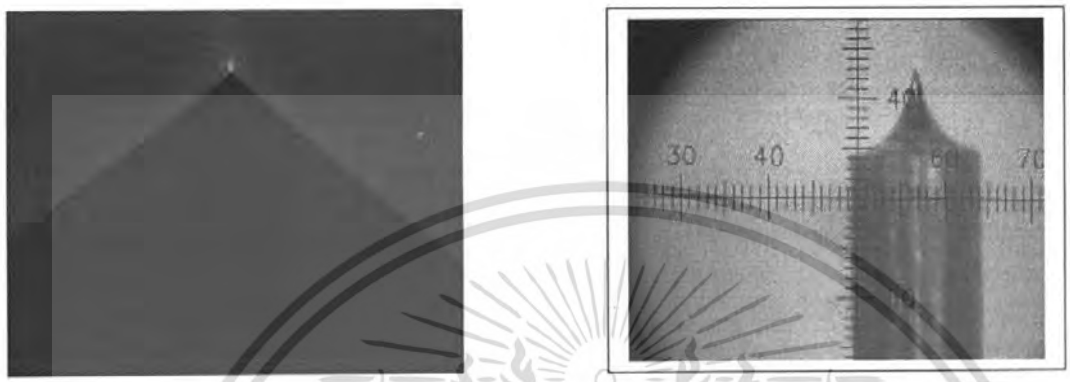
5.1.2 ทำการกำหนดค่ากระแสคงที่ (constant current)

จากการทดลอง เงื่อนไขโดยการกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 3 – 20 mA ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งแต่ 3-5 โมล และระยะของปลายเข็มที่จุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 2 มิลลิเมตร เมื่อทำการทดลองแล้วพบว่า ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล และ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล จะให้ลักษณะของปลายเข็มใกล้เคียงตามต้องการมากที่สุด นั่นก็คือปลายเข็มมีความสูงสั้นกว่าขนาดความกว้างของลวดทังสเตน เข็มมีลักษณะของมุมที่ไม่ป้านมากนัก ซึ่งจะให้ค่า Aspect Ratio ที่ไม่ต่ำมากนัก เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีที่ทำการกำหนดค่าแรงดันคงที่ ที่แรงดัน 3 โวลต์ และค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล ค่า Aspect Ratio ของกรณีการกำหนดค่าแรงดันจะให้ค่า Aspect Ratio ที่ต่ำกว่าซึ่งจะให้ผลได้ดีกว่า แต่เนื่องจากในกรณีของการกำหนดแรงดันไม่สามารถให้ผลที่ซ้ำแบบเดิมได้ จึงเป็นข้อเสียที่แก้ไขได้ยาก แต่ในกรณีที่ทำการกำหนดกระแสพบว่า สามารถให้ผลซ้ำแบบเดิมได้ จึงเป็นผลที่ดีกว่า

ค่า Aspect Ratio ที่ได้จากคำนวณของการทดลองที่ค่ากระแสไฟฟ้า 11 มิลลิแอมป์ และค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล มีค่าประมาณ 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

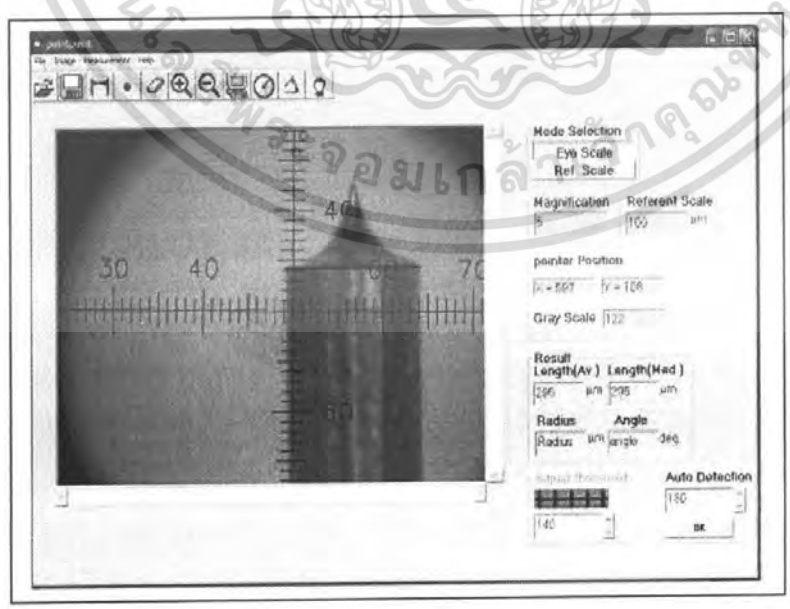
เปรียบเทียบลักษณะรูปปลายเข็มที่ต้องการกับรูปลักษณะของปลายเข็มที่ได้จากการทดลอง เป็นดังรูปข้างล่าง



(a) (b)

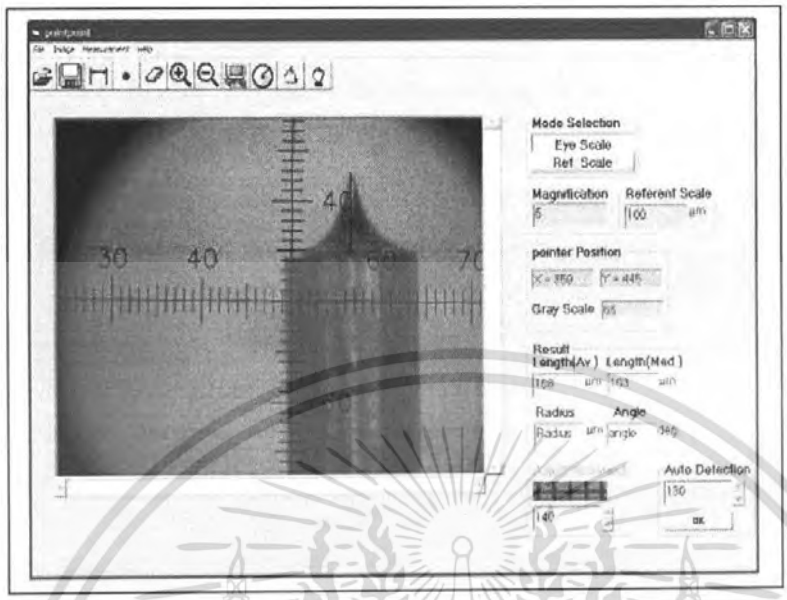
รูปที่ 5.7 (a) รูปลักษณะปลายเข็มที่ต้องการ
(b) รูปลักษณะของปลายเข็มกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล

เมื่อนำรูปลักษณะปลายเข็มกระแสไฟฟ้า 11 มิลลิแอมป์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล วัดด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่ามุมฐานและปลายเข็มได้ลักษณะดังต่อไปนี้

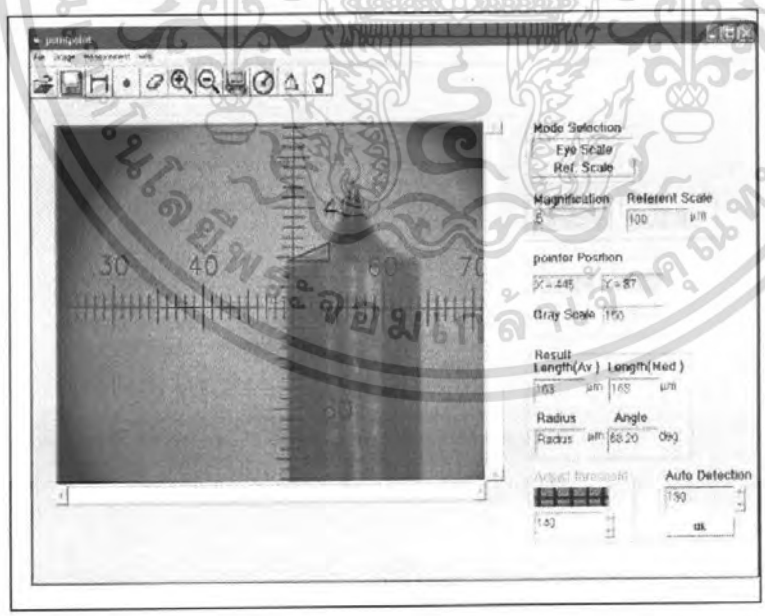


รูปที่ 5.8 ความกว้างฐานของปลายเข็มมีค่า 295 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

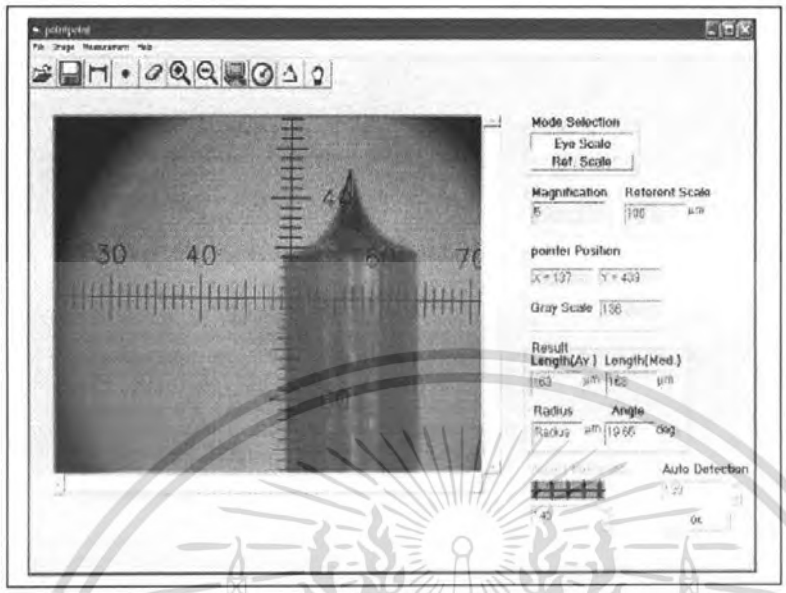


รูปที่ 5.9 ความสูงของปลายเข็มมีขนาด 163 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล

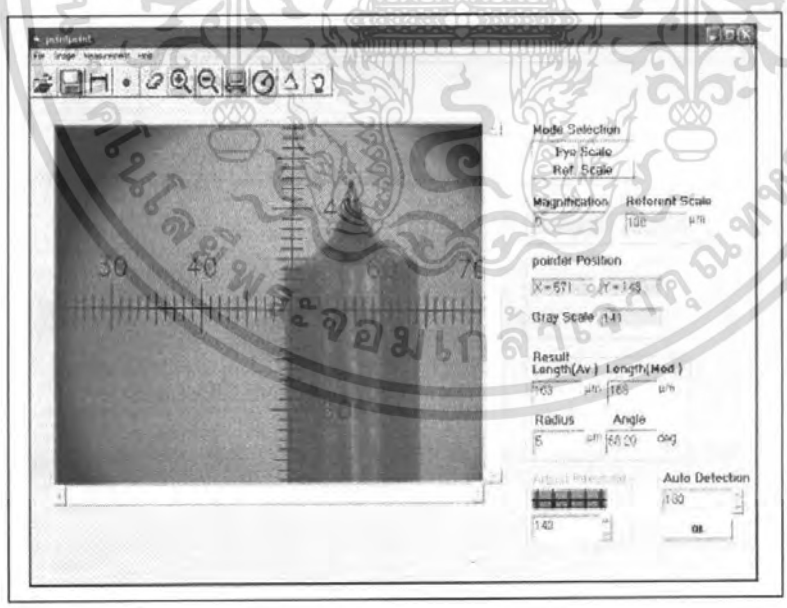


รูปที่ 5.10 มุมฐานของปลายเข็มมีขนาด 69 องศา ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 มุมบนของปลายเข็มมีขนาด 20 องศา ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล

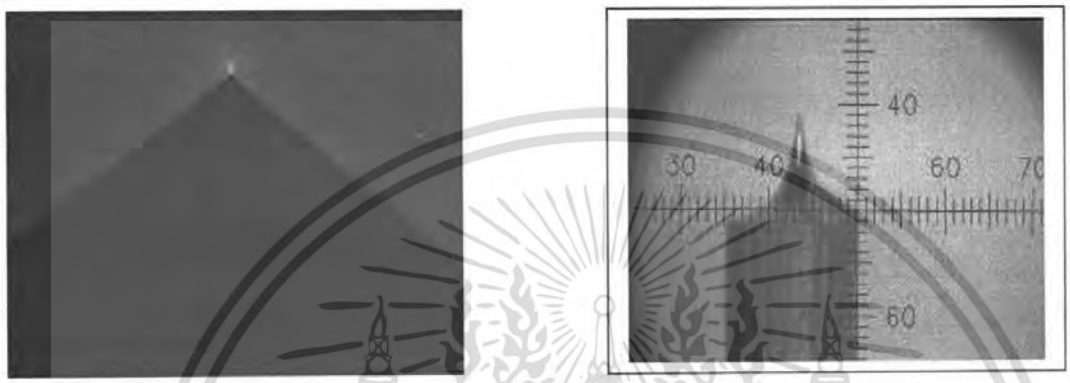


รูปที่ 5.12 รัศมีของปลายเข็มมีขนาด 5 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 11 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Aspect Ratio ที่ได้จากคำนวณของการทดลองที่ค่ากระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ และค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล มีค่าประมาณ 0.7

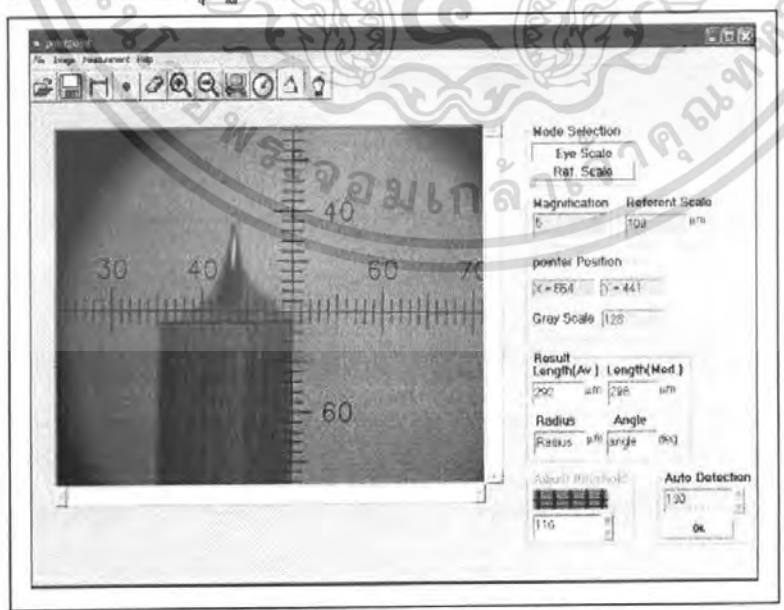
เปรียบเทียบลักษณะรูปปลายเข็มที่ต้องการกับรูปลักษณะของปลายเข็มที่ได้จากการทดลองเป็นดังรูปข้างล่าง



(a) (b)

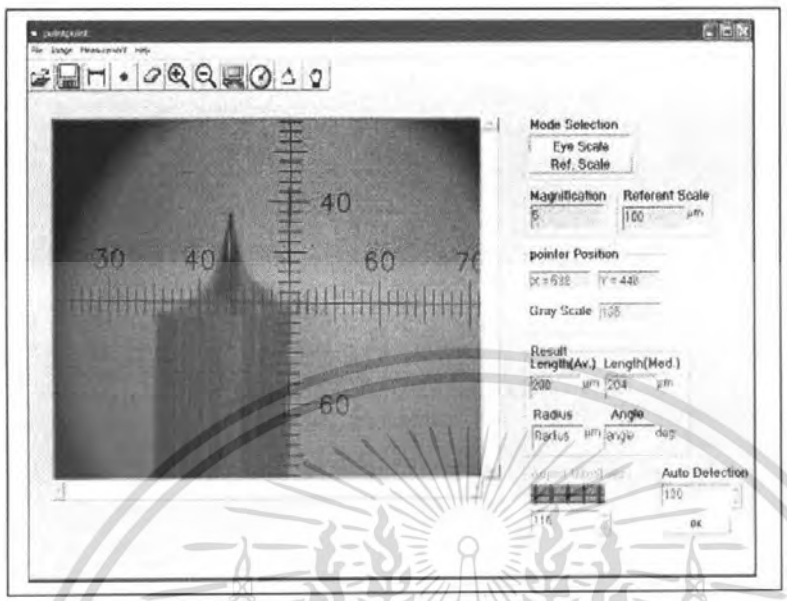
รูปที่ 5.13 (a) รูปลักษณะปลายเข็มที่ต้องการ
(b) รูปลักษณะของปลายเข็มกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

เมื่อนำรูปลักษณะปลายเข็มกระแสไฟฟ้า 7 มิลลิแอมป์ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล วัดด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่ามุมฐานและปลายเข็มได้ลักษณะดังต่อไปนี้

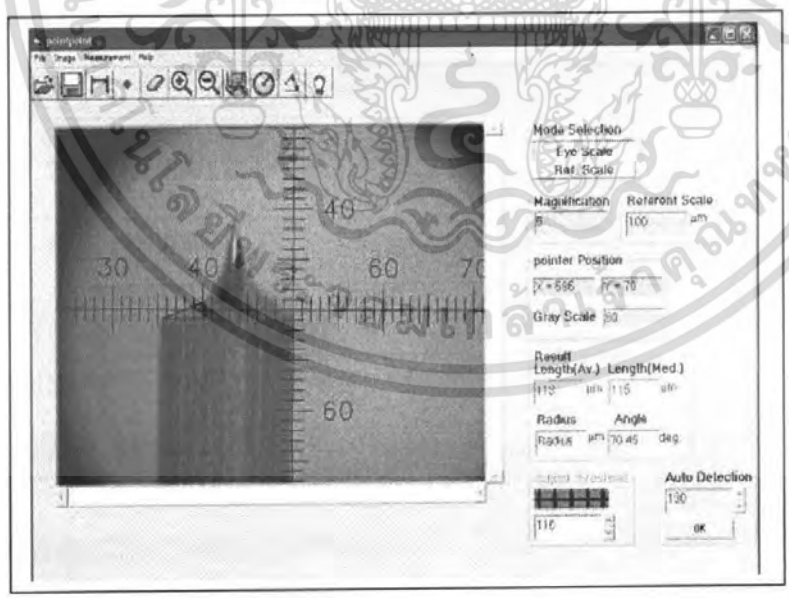


รูปที่ 5.14 ความกว้างฐานของปลายเข็มมีค่า 292 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

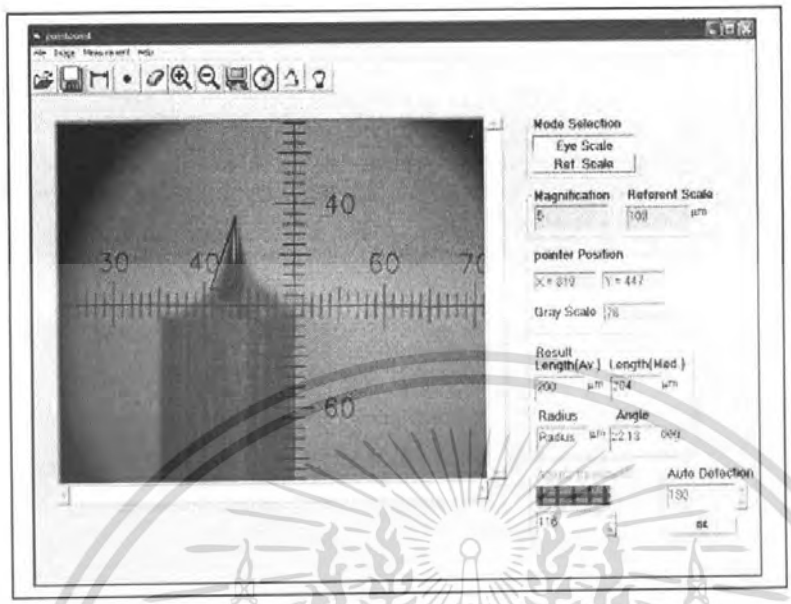


รูปที่ 5.15 ความสูงของปลายเข็มมีขนาด 200 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล



รูปที่ 5.16 มุมฐานของปลายเข็มมีขนาด 71 องศา ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 มุมบนของปลายเข็มมีขนาด 23 องศา ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

รูปที่ 5.18 รัศมีของปลายเข็มมีขนาด 5 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้าคงที่ 7 มิลลิแอมป์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าต่างๆของลักษณะของปลายเข็มที่วัดได้จากโปรแกรม

	Aspect ratio	L (μm)	θ_1	θ_2	R (μm)
ค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ ที่ 3 โวลต์ 5 โมล	0.3	85	74	48	12
ค่ากระแสคงที่ ที่ 11 มิลลิแอมป์4 โมล	0.6	163	63	20	5
ค่ากระแสคงที่ ที่ 7 มิลลิแอมป์ 5 โมล	0.7	200	71	23	5

θ_1 และ θ_2 คือ มุมฐานและมุมบนของปลายเข็มในหน่วย องศา ตามลำดับ

L คือ ความสูงของปลายเข็มในหน่วย ไมโครเมตร

R คือ รัศมีความโค้งของปลายเข็มในหน่วย ไมโครเมตร

5.2 ภาชนะที่ใช้ในการบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มี 2 ลักษณะ

(a) (b)

รูปที่ 5.19 (a) ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบสแตนเลส, (b) ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน

จากการทดลองพบว่า ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบสแตนเลสนั้น จะมีฟองของก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะ ทำให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดการกระเพื่อมเป็นผลให้ลักษณะขอบของปลายเข็มไม่เรียบ เราจึงทำการแก้ไขโดยการเปลี่ยนภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นแบบเทฟลอน ซึ่งสามารถช่วยกันไม่ให้ฟองของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนเข้ามารบกวนในขณะที่กำลังทำปฏิกิริยา จึงช่วยลดการกระเพื่อมของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากฟองอากาศจึงทำให้ปลายเข็มมีลักษณะเรียบมากขึ้น

เปรียบเทียบลักษณะของปลายเข็มจากภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 2 แบบ

(a) (b)

รูปที่ 5.20 แรงดันไฟฟ้า 4 โวลต์ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมล ; (a) ลักษณะขอบของปลายเข็มที่ใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบสแตนเลส, (b) ลักษณะขอบของปลายเข็มที่ใช้ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเทฟลอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2545. **เคมีสำหรับวิศวกร.** กรุงเทพฯ: เพ็ชรสกุล

รศ.ดร.นภดล **ไชยคำ**. 2001. **เคมีเล่ม 2.** กรุงเทพฯ: แมคกรอ-ฮิล อินเตอร์เนชั่นแนล เอ็นเตอร์ไพรส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้