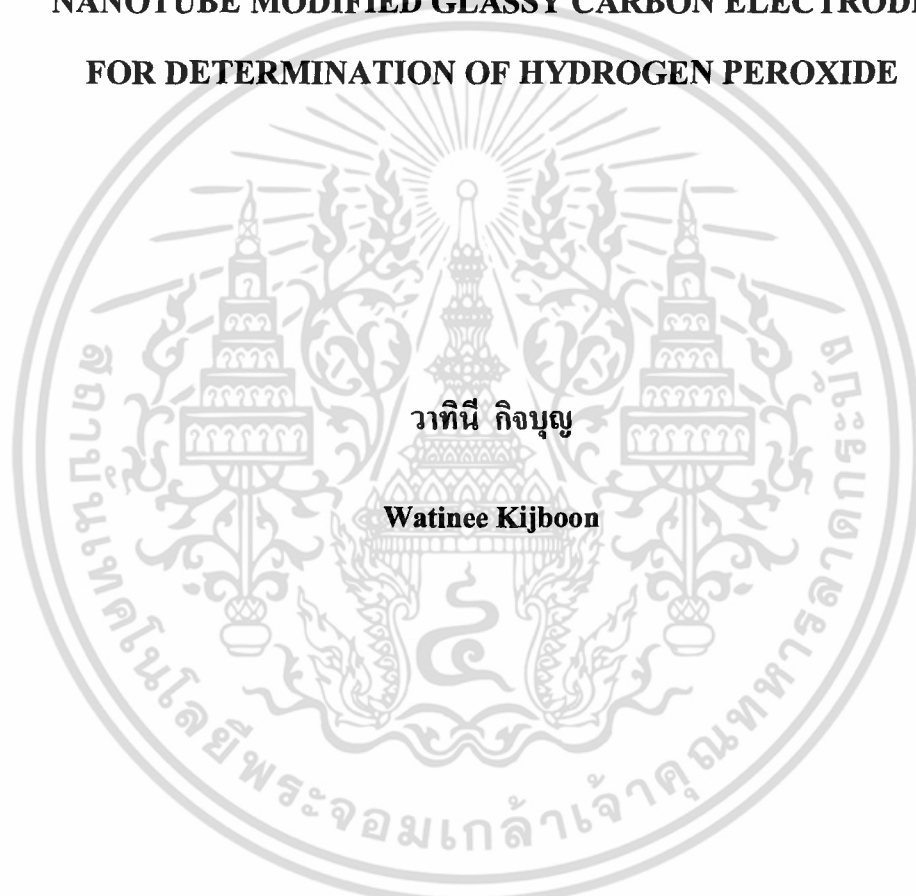


การสังเคราะห์และการศึกษาคุณลักษณะของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์
ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ปรับแต่งบนหน้าขั้วไฟฟ้า
กลาสติคาร์บอนสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF COPPER
MANGANESE OXIDE WITH MULTI-WALL CARBON
NANOTUBE MODIFIED GLASSY CARBON ELECTRODE
FOR DETERMINATION OF HYDROGEN PEROXIDE**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-012-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF COPPER
MANGANESE OXIDE WITH MULTI-WALL CARBON
NANOTUBE MODIFIED GLASSY CARBON ELECTRODE
FOR DETERMINATION OF HYDROGEN PEROXIDE**



Watinee Kijboon

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-SC-M-012-002**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์และการศึกษาคุณลักษณะของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปรับแต่งบนหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
Synthesis and Characterization of Copper Manganese oxide With Multi-wall Carbon Nanotube Modified Glassy Carbon Electrode for Determination of Hydrogen Peroxide

นักศึกษา

นางสาววาทีณี กิจบุญ

รหัสประจำตัว

52651104

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.เสาวภาคย์	ธีราทรง	เสาวภาคย์
ดร.ณัฐวุฒิ	เชิงชั้น	ณัฐวุฒิ
ผศ.ดร.วินัย	นุตมากุล	วินัย
รศ.ดร.สุวรรณ	ไชยสิทธิ์	สุวรรณ

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 26 มีนาคม พ.ศ. 2555 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการหลังใหม่



คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภณี ธนะบริพัตน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 21 เดือน 3 พ.ศ. 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์และการศึกษาคุณลักษณะของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปรับแต่งบนหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
นักศึกษา	นางสาววาทีณี กิจบุญ
รหัสนักศึกษา	52651104
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยได้ปรับแต่งขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน (GCE 5 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร × 2 มิลลิเมตร) ด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ($\text{CuMn}_2\text{O}_4/\text{MWCNTs}$) สำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. โดยทำการศึกษาคุณลักษณะของขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction ; XRD) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope ; FE-SEM) ในการทดสอบคุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าได้ใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีและแอมเพอโรเมตรี นอกจากนี้ได้ศึกษาสถานะในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNTs/GCE}$ เป็นขั้วไฟฟ้าทำงานและเปรียบเทียบกับ CuO/MWCNT/GCE , $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{MWCNT/GCE}$. จากการศึกษาวิเคราะห์ CuO/MWCNT/GCE , $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{MWCNT/GCE}$, $\text{CuMn}_2\text{O}_4/\text{MWCNT/GCE}$ พบว่าขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิดสามารถตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงความเป็นเส้นตรง 20 -380 ไมโครโมลาร์ และให้ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดเท่ากับ 170.00 ไมโครโมลาร์ 166.00 ไมโครโมลาร์ 104.04 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ จากงานวิจัยนี้พบว่าขั้วไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถตรวจวัดได้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไปได้

คำสำคัญ : ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน, แมงกานีสออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์, มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Thesis Title	Synthesis and Characterization of Copper manganese oxide with Multi-wall carbon nanotube modified Glassy carbon electrode for Determination of Hydrogen peroxide
Student	Watinee Kijboon
Student ID	52651104
Program	Master of Science
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Suwan Chaiyasith

ABSTRACT

An electrochemical electrode for the detection of hydrogen peroxide (H_2O_2) was presented based on glassy carbon electrode (GCE 5 mm \times 5 mm \times 2 mm) compatible copper manganese oxide and multi – wall carbon nanotube ($CuMn_2O_4$ /MWCNT/GCE). In preliminary study, we investigated characteristic of electrode by using X-ray Diffraction (XRD) and Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM). The electrochemical behaviors of the sensor were studied by cyclic voltammetry (CV) and amperometry. Discussion will be made on optimization and analytical performance of the method by using the $CuMn_2O_4$ /MWCNTs comparison with CuO /MWCNTs/GCE, Mn_3O_4 /MWCNTs/GCE are possibly useful as working electrode for determination of H_2O_2 . The CuO /MWCNTs, Mn_3O_4 /MWCNTs and $CuMn_2O_4$ /MWCNTs electrodes exhibit the same a linear range for the detection of H_2O_2 between 20 -380 μM ., and detection limit of 170.00 μM , 166.00 μM , 104.04 μM , respectively at a signal-to-noise ratio of 3. The low detection limit, wide liner range and high sensitivity of the sensor make it valuable for further application.

Keywords: Glassy carbon electrode, Manganese oxide, Copper oxide, Multi-wall carbon nanotube, Hydrogen peroxide.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.เสาวภาคย์ ชีราทรง ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ณัฐวุฒิ เชิงชั้น และผศ.ดร.วินัย นุตมากุล กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบและแก้ไข พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ในด้านวิชาการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ รศ.ดร.วิญญู เพชรภา วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ และพี่น้องญาติมิตรที่ให้ความรักให้ การศึกษาและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา สำหรับประโยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วาทีณี กิจบุญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คอปเปอร์.....	4
2.2 คอปเปอร์ออกไซด์.....	5
2.3 แมงกานีส.....	7
2.4 แมงกานีสออกไซด์.....	8
2.5 คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	9
2.5.1 ประวัติคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	9
2.5.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์.....	10
2.5.3 วิธีการสังเคราะห์.....	10
2.5.3.1 การเคลือบโดยไอเชิงเคมี.....	10
2.5.3.2 อาร์คดิซาร์จ.....	11
2.5.3.3 ระเหยด้วยเลเซอร์.....	12
2.5.4 คุณสมบัติและการประยุกต์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	13
2.6 ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน.....	15
2.7 ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน.....	16
2.8 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า.....	19
2.9.1 การถ่ายเทมวลในสารละลาย	19
2.9.1.1 ไมเกรชัน.....	19
2.9.1.2 การแพร่.....	20
2.9.1.3 คอนเวกชันหรือการพา	21
2.9.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า	22
2.9.3 การกำจัดออกซิเจน	23
2.9.4 เทคนิคโวลแทมเมตรี	25
2.9.4.1 การควบคุมศักย์ไฟฟ้าในเทคนิคโวลแทมเมตรี	25
2.9.4.2 เซลล์โวลแทมเมตรีประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าและสารละลาย อิเล็กโทรไลต์	25
2.9.4.3 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	27
2.9.4.5 เทคนิคโครโนแอมเพอโรเมตรี	31
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	41
3.1 สารเคมี	41
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	42
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน.....	42
3.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน.....	43
3.5 การเตรียมสาร	44
3.5.1 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์.....	44
3.6 การล้างมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์	44
3.7 การสังเคราะห์คอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์....	44
3.7.1 การสังเคราะห์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์...44	
3.7.2 การสังเคราะห์คอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์....44	
3.7.3 การสังเคราะห์คอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอน นาโนทิวบ์.....	45
3.8 การปรับแต่งขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน.....	46
3.9 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9.1 ศึกษาโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์.....	47
3.9.2 ศึกษาลักษณะรูปร่างของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	47
3.10 ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่ง.....	47
3.10. ทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	47
3.11 ทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งขึ้นสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	47
3.11.1 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	48
3.11.2 ศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	48
3.11.3 ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมตรี.....	48
3.11.4 ศึกษาอัตราการสแกน.....	48
3.11.5 ศึกษาขีดจำกัดในการตรวจพบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	49
3.11.6 ค่าการทำซ้ำ.....	49
3.11.7 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า.....	49
3.11.8 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	49
3.11.9 การวิเคราะห์ค่าร้อยละการกลับคืน.....	50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	51
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้.....	51
4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์.....	51
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะรูปร่างของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	53
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งได้.....	57
4.2.1 ผลการศึกษาไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งขึ้นสำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..59	
4.3.1 ผลการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....59	
4.3.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่างๆ สำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....60	
4.3.3 ผลการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี.....62	
4.3.4 ผลการศึกษ้อัตราการสแกน.....64	
4.3.5 ผลการศึกษาค่าจำกัดในการตรวจพบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....66	
4.3.6 ผลการศึกษาค่าความเที่ยง.....68	
4.3.7 ผลการศึกษายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า.....69	
4.3.8 ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละการกลับคืน.....70	
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....72	
เอกสารอ้างอิง.....74	
ภาคผนวก ก.....79	
ภาคผนวก ข.....80	
ภาคผนวก ค.....82	
ภาคผนวก ง.....83	
ภาคผนวก จ.....85	
ประวัติผู้เขียน.....87	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า กลศาสตร์ และทางเคมีที่สำคัญของคาร์บอนนาโนทิวบ์	14
2.2 การประยุกต์ใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวบ์	14
2.3 แสดงชนิดและคุณสมบัติ	16
4.1 แสดงค่าต่างๆของการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	67
4.2 แสดงค่าการทำซ้ำโดยใช้ขั้ว CuMn_2O_4 -MWCNT/GCE	68
5.1 แสดงการสรุปรงานวิจัยที่สังเคราะห์คอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	73
ก.1.การเตรียมฟอสเฟตบัพเฟอร์ค่าพีเอชต่างๆ	79
ค.1.แสดงค่าการทำซ้ำโดยใช้ขั้ว CuMn_2O_4 -MWCNT/GCE เพื่อหา %RSD	82
ง.1.แสดงค่าร้อยละของการกลับคืน	83
จ.1.แสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณของขั้วไฟฟ้าที่ ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์	85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของแร่ทองแดงหรือคอปเปอร์	5
2.2 ลักษณะโครงสร้างของคิวพริสออกไซด์	6
2.3 ลักษณะโครงสร้างของคิวพริคออกไซด์	6
2.4 ลักษณะของแมงกานีสแร่ pyrolusite	8
2.5 ลักษณะโครงสร้างของแมงกานีสออกไซด์	8
2.6 รูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนในวัสดุชนิดต่างๆ	9
2.7 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบต่างๆ	10
2.8 กระบวนการตกสะสมไอเคมีเพื่อสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	11
2.9 กระบวนการอาร์คิสซาร์จ	12
2.10 กระบวนการระเหยด้วยเลเซอร์	12
2.11 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	17
2.12 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สถานะแก๊สและของแข็ง	17
2.13 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน	20
2.14 การพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่	21
2.15 การพามวลจากชั้นสารละลายไปยังหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการพา	22
2.16 รูปแบบแสดงกระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า	22
2.17 โวลแทมโมแกรมของสารละลาย 0.1 โมลาร์ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) (a) สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัวไปด้วยอากาศทำให้เห็น รูปคลื่น (Wave) ของออกซิเจน (b) มีการไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายบางส่วน (c) มีการไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายทั้งหมด	24
2.18 แสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าใช้งานที่สามารถทนได้ของวัสดุที่ใช้ทำขั้วชนิดต่างๆกับ อิเล็กโทรไลต์ช่วย ชนิดต่างๆ	27
2.19 (ก) โวลแทมโพรแกรมของไซคลิกโวลแทมเมทรี (ข) ไซคลิกโวลแทมโมแกรม	27
2.20 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แสดงวิธีการหาความสูงพีค เมื่อ i_p , E_p คือ ความสูงและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันตามลำดับ ส่วน i_{pa} , E_{pa} คือ ความสูงกระแสและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยา ออกซิเดชัน ตามลำดับ	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 แสดงความสัมพันธ์ของโคร โนแอมเพอโรเมทรี (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับระยะทางที่เวลาต่างๆ (c) กราฟแสดงกระแสที่อ่านได้.....	31
3.1 ลายสกรีนชั้นต่างๆ ตามลำดับ	43
4.1 ภาพ XRD ของอนุภาคต่างๆ (ก) MWCNT, CuO, CuO-MWCNT (ข) MWCNT, Mn ₃ O ₄ , Mn ₃ O ₄ -MWCNT (ค) MWCNT, CuO-MWCNT, Mn ₃ O ₄ -MWCNT, CuMn ₂ O ₄ -MWCNT	52
4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (ก) MWCNT (ข) CuO (ค) Mn ₃ O ₄ (ง) CuO-MWCNT (จ) Mn ₃ O ₄ -MWCNT (ฉ) CuMn ₂ O ₄ -MWCNT	56
4.3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งต่างๆ สำหรับตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 และโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกนที่ 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	58
4.4 (ก) ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้ว CuMn ₂ O ₄ -MWCNT/GCE ที่ค่าพีเอชต่างๆสำหรับการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับค่าพีเอชต่างๆ	60
4.5 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าต่างๆ สำหรับตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	61
4.6 แอมเพอโรแกรมเปรียบเทียบระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างๆด้วยศักย์ไฟฟ้า +0.500 โวลต์.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	
ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้า $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ ในสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 ที่อัตราการสแกน(a) 10,(b) 25,(c) 50,(d) 100,(e) 250, (f) 500 และ (g) 1000 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์	64
4.8 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับอัตราการสแกน (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับปริมาตรที่ส่งอัตราการสแกน ของสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0.....	65
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับวันในการตรวจวัด สารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 ของขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$	69

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

mm	มิลลิเมตร
A	แอมแปร์
Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
CV	ไซคลิกโวลแทมเมตรี
GCE	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน
MWCNT/GCE	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับแต่งด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
CuO/GCE	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับแต่งด้วยคอปเปอร์ออกไซด์
Mn ₃ O ₄ /GCE	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับแต่งด้วยแมงกานีสออกไซด์
CuO-MWCNT/GCE	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับแต่งด้วยคอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
Mn ₃ O ₄ -MWCNT/GCE	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับแต่งด้วยแมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
CuMn ₂ O ₄ -MWCNT/GCE	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
LOD	ค่าขีดจำกัดของการตรวจพบ
LOQ	ค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ
mM	ความเข้มข้นในหน่วยมิลลิโมลาร์
μ M	ความเข้มข้นในหน่วยไมโครโมลาร์
μ A	ไมโครแอมแปร์
mA	มิลลิแอมแปร์
SD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
RSD	ร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
V	โวลต์
V	อัตราการสแกน (mV/s) หรือ (V/s)
sec	วินาที
%	เปอร์เซ็นต์
E	ศักย์ไฟฟ้า (V)
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm ² /s)
I _p	ค่ากระแสพีค

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

C.E	ข้าวไฟฟ้าช่วย
W.E	ข้าวไฟฟ้าใช้งาน
R.E	ข้าวไฟฟ้าอ้างอิง
XRD	เครื่องมือวัดค่าการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย รวมทั้งทางด้านการแพทย์ ทางด้านอาหาร ทางด้านเกษตรกรรมและการวิเคราะห์ทางด้านสิ่งแวดล้อม [1] เป็นต้น การตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับอุตสาหกรรมบางประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่มีการฟอกสี เช่น การผลิตยาข้อมผม อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นสารฟอกขาวโดยคุณภาพของการฟอกจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยตรง นอกจากนี้กรรมควบคุมมลพิษยังกำหนดให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเคมีภัณฑ์ที่มีความอันตรายและต้องควบคุมปริมาณไม่ให้เกินตามที่กรรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ [2] และการที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปนเปื้อนอยู่ในน้ำหรือดิน หากมนุษย์ได้สัมผัสหรือสูดดมเข้าไปจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย หากมีการสัมผัสทางการหายใจหรือกลืนกินเข้าไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีฤทธิ์กัดกร่อนก่อให้เกิดอาการเจ็บคอ ไอ หายใจติดขัด ปวดท้องและอาเจียน หากสัมผัสทางผิวหนังจะเกิดผื่นแดงและปวดแสบปวดร้อน [3] บริเวณแหล่งน้ำที่อยู่ใกล้เคียงกับอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงต้องมีการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อควบคุมความเป็นพิษให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเสมอ [4] ในทางการแพทย์มักจะทำการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในร่างกายเพื่อบ่งบอกถึงปริมาณอนุมูลอิสระ ซึ่งหากร่างกายมีการผลิตอนุมูลอิสระออกมามากเกินไปจะก่อให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อต่างๆ ในร่างกายได้ [5] ในทางอุตสาหกรรมอาหารการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถบ่งบอกถึงความสดของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ได้ [6]

ในปัจจุบันการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการโครมาโทกราฟี [7] เคมีลูมิเนสเซนส์ [8] และเคมีไฟฟ้า [9] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นิยมใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เนื่องจากข้อดีหลายด้านเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ เช่น โดยทำเป็นระบบอัตโนมัติได้ง่าย รวมทั้งสามารถทำให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด สามารถออกแบบให้เป็นเครื่องมือสำหรับตรวจวัดในภาคสนามได้ จากข้อดีดังกล่าวนี้ทำให้เกิดความสนใจศึกษาการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า

สำหรับวิธีการเคมีไฟฟ้าได้มีการใช้เทคนิคหลากหลายวิธีในการปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนลงบนขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน เช่น โซล-เจล (Sol-gel) [10] การพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) [11] การสังเคราะห์โดยให้โมเลกุลหน่วยวางตัวเข้าด้วยกันอย่างเป็นระเบียบด้วยตนเอง (self-assembly) [12] การตรึงสารชีวภาพบนขั้วไฟฟ้า (Biosensor) [13] และการเคลือบ (coating)

[14] ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ซึ่งวัสดุที่นำมาปรับแต่งบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นจะใช้นุภาคนาโนออกไซด์ เช่น นิกเกิลออกไซด์ [15] ซิงค์ออกไซด์ [16] และโคบอลต์ออกไซด์ [17] เป็นต้น การบอมนาโนทิวป์เป็นวัสดุที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันเป็นรูปท่อทรงกระบอกปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ในขณะที่ความยาวของท่ออาจสูงถึงในระดับไมโครเมตรหรือมากกว่านั้น ด้วยเหตุนี้วัสดุนิดนี้จึงมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ที่สูงกว่าวัสดุนิดอื่น ๆ ก่อนข้างมาก มีคุณสมบัติพิเศษหลายด้าน เช่น ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์การกีฬา เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า และยังสามารถนำมาปรับแต่งบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ [18-19] ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเพื่อตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นโดยใช้คอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนนาโนทิวป์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสร้างขั้ว CuO-MWCNTs/GCE, ขั้ว Mn_3O_4 -MWCNTs/GCE และขั้ว $CuMn_2O_4$ -MWCNTs/GCE สำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
2. สังเคราะห์ CuO-MWCNTs, Mn_3O_4 -MWCNTs และ $CuMn_2O_4$ -MWCNTs ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. ศึกษาคุณลักษณะของ CuO-MWCNTs, Mn_3O_4 -MWCNTs และ $CuMn_2O_4$ -MWCNTs
4. ทดสอบการใช้ขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์กับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมแมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์
2. เตรียมคอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์
3. เตรียมคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์
4. การเตรียมขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับแต่งด้วยแมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์
5. การเตรียมขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์
6. การเตรียมขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การศึกษาลักษณะทางกายภาพของ CuO-MWCNTs, Mn₃O₄-MWCNTs และ CuMn₂O₄-MWCNTs โดยใช้ XRD และ FE-SEM.
8. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้ว CuO-MWCNTs/GCE, ขั้ว Mn₃O₄-MWCNTs/GCE และขั้ว CuMn₂O₄-MWCNTs/GCE ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี
9. การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
10. ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่สร้างขึ้นสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคแอมเพโรเมทรี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ปริมาณสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่น้อย
2. ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สร้างขึ้นมีสัญญาณในการวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากกว่าขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนเปล่า
3. เป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาและพัฒนาการสร้างขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอปเปอร์ (Copper) [20-22]

คอปเปอร์หรือทองแดง (Copper) เป็นโลหะชนิดแรกๆ ที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้งาน จากหลักฐานพบว่า มนุษย์รู้จัก การถลุงทองแดงขึ้นมา ใช้ทำเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ มาตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ แม้ว่าทองแดงจะมีปริมาณน้อยมาก ในเปลือกโลก (เพียง 0.0001%) เมื่อเทียบกับโลหะอื่นอย่างเหล็ก (5%) หรืออลูมิเนียม (8%) แต่ทองแดงเป็นโลหะมีตระกูล ซึ่งสามารถพบได้ทั้งในรูปอิสระและในรูปสารประกอบ ซึ่งสามารถถลุงออกมาเป็น โลหะได้ง่าย การถลุงทองแดงปัจจุบัน จะนำสินแร่ทองแดง เช่น แร่ชาลโคไซต์ (Chalcocite, Cu_2S) แร่ชาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite, $CuFeS_2$) เป็นต้น มาเผาในอากาศ จะได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ประมาณ 97-99% จากนั้นจึงนำมาผ่าน กระบวนการแยกด้วยกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อให้ได้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99%

ประโยชน์ของทองแดง ที่เราค้นเคยกกันคิดที่สุดในสมัยนี้ก็คือ การนำมาใช้ทำลวดส่งกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ เนื่องจากทองแดงเป็น โลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีเป็นอันดับสองรองจากเงิน แต่ราคาถูกกว่าเงินมาก การที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้ดี ช่วยลดพลังงานที่สูญเสียไป ในรูปของความร้อน ขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสายไฟ และยังช่วยป้องกันอันตราย จากการไหม้ของสายไฟอีกด้วย นอกจากนี้ ทองแดงยังเป็นส่วนผสมสำคัญของ โลหะผสมหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (ทองแดงผสมกับสังกะสี) ส่างริด (ทองแดงผสมกับดีบุก) โมเนล (ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และแมงกานีส) รวมทั้งยังใช้ผสมในเงินและทอง เพื่อเพิ่มความแข็งของโลหะมีค่าเหล่านั้น สำหรับใช้ทำเครื่องประดับและเหรียญตราต่างๆ

จุดเด่นอีกอย่างหนึ่งของทองแดงก็คือ ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก แม้ในสภาวะกัดกร่อนอย่างรุนแรง เช่น ในน้ำทะเล จากการสำรวจซากเรือที่จมอยู่ใต้ทะเล ตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 16 ครั้งหนึ่งพบว่ามี รอก (pulley) ที่ทำจากทองแดง ยังสามารถใช้งานได้ดี สมบัติพิเศษอีกประการหนึ่งคือ ทองแดงเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเล็กๆ หลายชนิด จึงถูกนำมาใช้เป็นปลอกหุ้มแผ่นไม้ ที่ใช้ต่อเรือเดินทะเลเพื่อป้องกันไม่ให้แมลงหรือเพรียงทำลายไม้ รวมทั้งทำเป็นท่อน้ำดื่ม สารประกอบทองแดงบางชนิด เช่น จูนสี (blue vitriol) หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ($Cu(H_2O)_4SO_4 \cdot 4H_2O$) ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ โรคและเชื้อราในแหล่งน้ำ การใช้ทองแดงในการกำจัดสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ในแหล่งน้ำดังกล่าวนี้ ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์แต่อย่างใด หากว่า ร่างกายไม่ได้รับทองแดงเป็นปริมาณมาก จนเกินกว่าที่จะขับออกได้ทัน



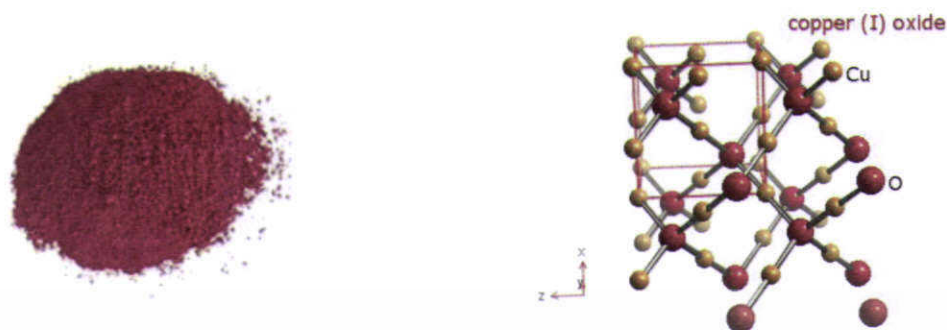
รูปที่ 2.1 ลักษณะของแร่ทองแดงหรือคอปเปอร์

2.2 คอปเปอร์ออกไซด์ (Copper oxide)

คอปเปอร์ออกไซด์เป็นจะอยู่ในรูปคอปเปอร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งคอปเปอร์ออกไซด์มี 2 แบบ คือ คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ (Copper (I) oxide) และ คอปเปอร์ (II) ออกไซด์ (Copper (II) oxide) คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า คิวพรัสออกไซด์ (Cuprous oxide) ส่วนคอปเปอร์ (II) ออกไซด์ เป็นที่รู้จักกันในรูปคิวพริกออกไซด์ (Cupric oxide) ทั้งสองถูกใช้เป็นเม็ดสีและสามารถใช้เป็นอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ (semiconductors) ได้ ถึงแม้จะมีส่วนประกอบแตกต่างกันเล็กน้อย

คิวพรัสออกไซด์มีสูตรทางเคมีว่า Cu_2O มีลักษณะเป็นสีแดงและไม่ละลายในน้ำหรือไม่ละลายสารอินทรีย์ ในธรรมชาติคอปเปอร์ออกไซด์จะพบในหินที่เป็นแร่คิวพไรต์ (cuprite) อย่างไรก็ตามในการผลิตของคิวพรัสออกไซด์จะพบในธรรมชาติ เพราะฉะนั้นมันสามารถผลิตขึ้นเองได้ที่อุณหภูมิสูงๆ หรือภายใต้ความดันออกซิเจนสูง

คิวพรัสออกไซด์สามารถใช้เป็นเม็ดสี ยาฆ่าเชื้อรา และสารป้องกันเฟรียง นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการสัมผัสกับคอปเปอร์ออกไซด์ชนิดนี้เป็นอันตรายต่อการสูดดมหายใจเข้าไปแม้ว่าเป็นเพียงลมหายใจสั้นๆ ก็เป็นอันตรายได้ การไอจะเกิดแผลและระบบทางเดินหายใจ ถ้ากินเข้าไปจะเกิดการระคายเคืองของบริเวณกระเพาะอาหารและลำไส้ เกิดอาการอาเจียนและท้องร่วง



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของคิวพรอสออกไซด์

คิวพรอสออกไซด์ (CuO) จะมีลักษณะเป็นสีดำ มีจุดหลอมเหลว 2193 องศาฟาเรนไฮต์ (1200 องศาเซลเซียส) คอปเปอร์ออกไซด์ถูกใช้เป็นตัวสีในการเคลือบดิน จะมีหลายสี เช่น สีแดง สีนํ้าเงิน และสีเขียว นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิต คิวพราโมเนียมไฮดรอกไซด์ (cuprammonium hydroxide) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทำไหมสังเคราะห์ (rayon) บางครั้งยังเป็นอาหารเสริมให้สัตว์

คอปเปอร์ออกไซด์ชนิดนี้เป็นอันตราย หากสูดดมคิวพรอสออกไซด์เข้าไปเกิดอาการระคายเคืองต่อปอด คิวพรอสออกไซด์กับคิวพรอสออกไซด์ยังสามารถทำให้เกิดไข้คว้นโลหะอาการคล้ายไข้หวัด คิวพรอสออกไซด์สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสีผิวและทำให้เกิดปัญหาการมองเห็น เช่น คิวพรอสออกไซด์เป็นพิษเมื่อกินก่อให้เกิดอาการ เช่น อาเจียนและปวด



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของคิวพริกออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แมงกานีส (Manganese) [23-24]

แมงกานีสเป็นโลหะชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสีชาวล้ำยเงิน แข็ง และเปราะ พบได้ในธรรมชาติ แต่จะเกิดร่วมกับธาตุอื่นๆ ได้หลายรูป ดังนั้น ถ้าต้องการโลหะแมงกานีสจึงต้องถลุงอีกที แร่แมงกานีสที่เกิดในธรรมชาติที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอยู่ในรูป Oxide และ carbonate ที่สำคัญที่สุดคือ MnO_2 หรือ pyrolusite

ประโยชน์ของแมงกานีส

1. ในทางโลหกรรม โดยนำมาผสมกับเหล็ก เพื่อให้เหล็กนั้นมีความเหนียว ยืดหยุ่น และคงทนยิ่งขึ้น เช่น รางรถไฟ หัวชุด เหล็กทุบ ฯลฯ นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์ในการทำเหล็กบริสุทธิ์ยิ่งขึ้น
2. ใช้ในทางอโลหะกรรม ได้แก่
 - อุตสาหกรรมประกอบด้านหินไฟฉาย
 - อุตสาหกรรมเคมีบางประเภท เช่น ในการเตรียมต่างทึบทิมซึ่งใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ โรค ยารักษาเนื้อไม้ให้คงทนถาวรเตรียมสารที่ใช้ในการฟอกหนัง ย้อมหนังและใช้ผสมเข้าไปในอาหารไก่
 - การผลิตวัสดุภัณฑ์เคมี จำต้องใช้แร่แมงกานีสเป็นตัวยุติ เช่น การทำสี ฟูสังเคราะห์ผสมในการทำอิฐแมงกานีสจะทำให้อิฐทนความร้อนสูง เป็นต้น

ทางเข้าสู่ร่างกาย แมงกานีส สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ได้แก่

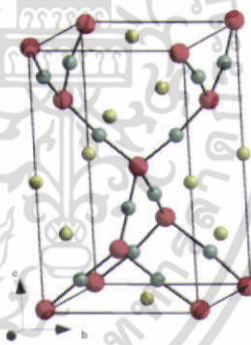
1. ทางจมูก โดยสูดหายใจ เอาผงหรือไอระเหยของแมงกานีสเข้าสู่ปอด แล้วกระจายไปทั่วร่างกาย ซึ่งเป็นทางเข้าที่สำคัญที่สุด
2. ทางปาก โดยการรับประทานเข้าไป ส่วนมากพบได้น้อยมาก มักจะเป็นอุบัติเหตุปะปนกับอาหาร น้ำดื่ม
3. ทางผิวหนัง แมงกานีสบางส่วนสามารถดูดซึมเข้าทางผิวหนังได้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของแมงกานีสและแร่ pyrolusite

2.4 แมงกานีสออกไซด์ (Manganese (II, III) oxide)

แมงกานีสออกไซด์ (Manganese (II, III) oxide) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรทางเคมี Mn_3O_4 แมงกานีสมีอยู่ในรูปออกซิเดชันสองแบบคือ +2 และ +3 และสูตรทางเคมีที่เขียนกันในบางครั้งเป็น MnO , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 ที่พบในธรรมชาติเป็นแร่ hausmannite



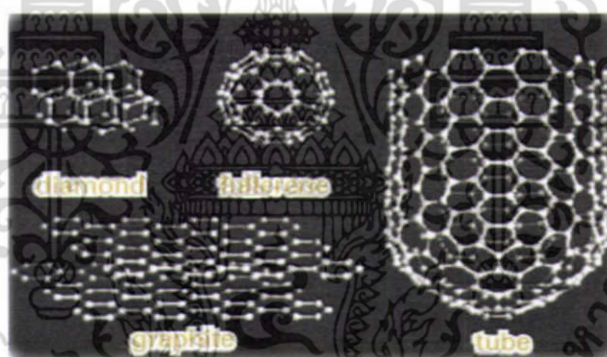
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของแมงกานีสออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbonnanotubes; CNTs) [18-19]

2.5.1 ประวัติคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube)

เป็นที่ทราบกันดีว่าอะตอมของคาร์บอนสามารถเรียงร้อยต่อกันได้หลายรูปแบบ ซึ่งการร้อยต่อกันในแต่ละรูปแบบจะส่งผลทำให้เกิดวัสดุที่แตกต่างกัน เช่น หากอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันเป็นตาข่าย 3 มิติ แบบทรงแทงสี่เหลี่ยม (tetrahedral) ก็จะทำให้ได้วัสดุที่มีคุณค่าและความแข็งแรงสูงที่เรารู้จักกันดีก็คือ “เพชร (diamond)” แต่ถ้าอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันในแนวระนาบเป็นรูปวงแหวน 6 เหลี่ยม (hexagonal) โดยแต่ละอะตอมของคาร์บอนจะยึดเกาะอยู่กับอะตอมของคาร์บอนอื่นอีก 3 อะตอม เราจะเรียกระนาบนี้ว่า “แกรไฟีน (graphene)” ซึ่งระนาบของคาร์บอนหรือแกรไฟีนนี้จะไม่อยู่เดี่ยวๆ ถ้าหากแกรไฟีนมาอยู่รวมกันเป็นชั้นๆ เราก็จะได้วัสดุที่เรียกว่า “แกรไฟต์ (graphite)” นอกจากเพชรและแกรไฟต์แล้ว อะตอมของคาร์บอนยังสามารถมาอยู่รวมกันได้อย่างไม่เป็นระเบียบหรือไม่มีผลึกในโครงสร้างเกิดเป็นวัสดุที่เรียกว่า “ถ่าน (charcoal)” แต่ถ้าอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันเป็นรูปทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล เราจะเรียกโครงสร้างนี้ว่า “ฟูลเลอรีน (fullerene)”



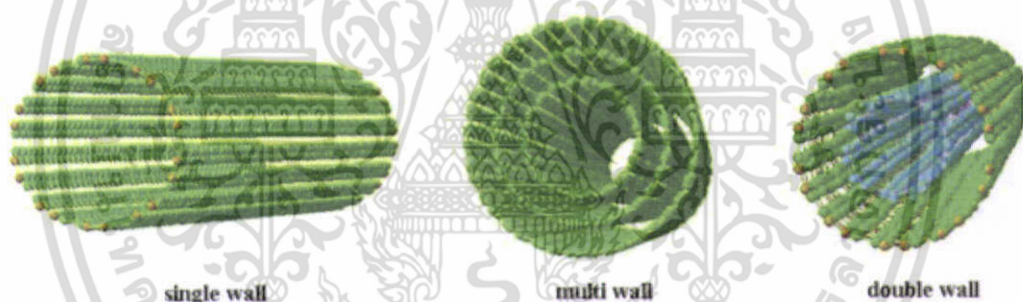
รูปที่ 2.6 รูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนในวัสดุชนิดต่างๆ

นอกจากวัสดุต่างๆ ข้างต้นแล้ว อะตอมของคาร์บอนยังสามารถรวมตัวกันเกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก เรียกว่าวัสดุชนิดใหม่นี้ว่า “คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube; CNT)”

คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนมาเรียงต่อกันเป็นรูปท่อทรงกระบอกปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ในขณะที่ความยาวของท่ออาจสูงถึงในระดับไมโครเมตรหรือมากกว่านั้น ด้วยเหตุนี้วัสดุชนิดนี้จึงมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ที่สูงกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ ค่อนข้างมาก

2.5.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดย Dr.Sumio Iijima ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ค้นพบในช่วงแรกนั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อหลายชั้นวางซ้อนกัน (มีท่อเล็กวางอยู่ภายในช่องว่างของท่อใหญ่) เรียกคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดนี้ว่า “คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube; MWNT)” อีก 2 ปีต่อมาก็ได้มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว (single-walled carbon nanotube; SWNT) ขึ้น แม้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ให้นักวิทยาศาสตร์ยังคงมีความเข้าใจเกี่ยวกับวัสดุชนิดนี้น้อยมาก แต่เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นนี้สามารถผลิตได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นจึงมีความสำคัญในเชิงการค้าสูงกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว ปัจจุบันคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นที่ผลิตจำหน่ายส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่มีจำนวนผนัง 2 ชั้น เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนัง 2 ชั้น (double-walled carbon nanotube; DWNT)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบต่างๆ

2.5.3 วิธีสังเคราะห์

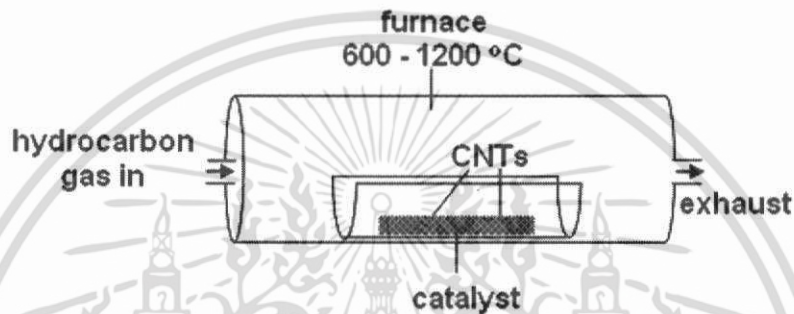
การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ทั้งในด้านของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณ คุณภาพ และความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ โดยทั่วไปแล้วอาจแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้แก่

2.5.3.1 การเคลือบโดยไอเชิงเคมี (Chemical vapor deposition; CVD)

โดยการผ่านไอหรือแก๊สของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

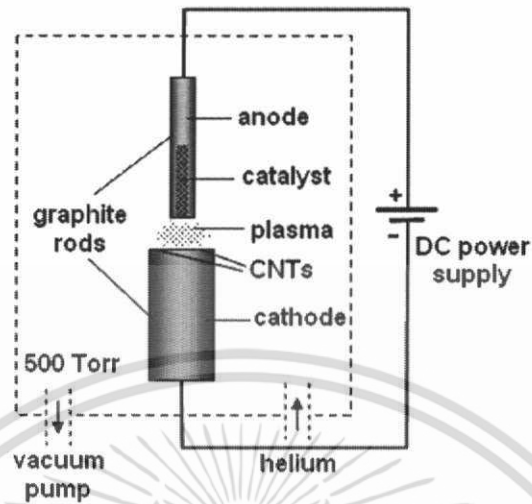
ดัน เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณตั้งแต่ 600-1200 °C ซึ่งต้องมีอนุภาคนาโนของโลหะคะตะลิสต์อยู่บริเวณนั้นด้วย ทำให้โมเลกุลของแก๊สให้แตกตัว (Decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอน โดยการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลของแก๊ส สัดส่วนอะตอมของธาตุ C:O:H ในระบบ การคุมขนาดของอนุภาคคะตะลิสต์ และระยะเวลาในการสังเคราะห์ สามารถกำหนดขนาด ความยาว ทิศทางการเติบโต และตำแหน่งที่ต้องการปลูกของท่อนาโนคาร์บอนได้ แต่อาจมีข้อเสียที่ปริมาณ ข้อบกพร่องหรือความไร้ระเบียบของโครงสร้างสูง ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้มักเป็นท่อ โค้งงอ



รูปที่ 2.8 กระบวนการตกตะกอนไอเคมีเพื่อสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

2.5.3.2 อาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge)

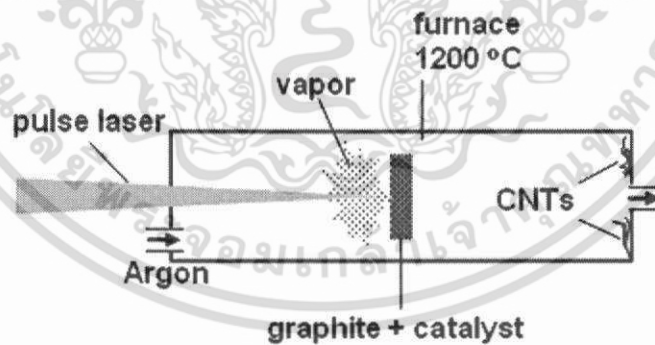
ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 20-200 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 20-40 โวลต์ ตกคร่อม แท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางจ่อใกล้ๆ กัน โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายแท่งประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรือ อาร์กอน ที่ความดันต่ำระหว่าง 100-500 Torr จนทำให้เกิดเป็นสถานะพลาสมา และมีอุณหภูมิสูงบริเวณระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้แท่งแกรไฟต์ระเหย กลายเป็นไอแล้วมีการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอน บริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (Cathode) การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอน สามารถทำได้โดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะคะตะลิสต์ปริมาณเล็กน้อย เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือ โคบอลต์ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode)



รูปที่ 2.9 กระบวนการอาร์คิสซาร์จ

2.5.3.3 ระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)

วิธีนี้จะใช้พัลส์แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ผสมกับผงโลหะคะตะลิสต์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ที่ความดันต่ำประมาณ 500 Torr และอุณหภูมิ 1200 °C เทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์คิสซาร์จ ซึ่งจะได้ปริมาณและคุณภาพของท่อนาโนคาร์บอนดีกว่า แต่มีข้อเสียที่จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์กำลังสูง และมีราคาแพงมาก



รูปที่ 2.10 กระบวนการระเหยด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNTs) มีคุณสมบัติเด่นหลายประการด้วยกัน เช่น เป็นได้ทั้งตัวนำและกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูง เบาล และมีความยืดหยุ่นที่ดี ตามปกติแล้วคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเสถียรภาพที่ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถจัดยึดโมเลกุลและดูคก้าซได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการสังเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของทิวบ์ เช่น ชนิด (SWCNTs และ MWCNTs) เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของทิวบ์ เป็นต้น

การประยุกต์ใช้งาน ได้แก่

แหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ : เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวที่น้อยมากๆ อีกทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี และมีความเสถียรภาพที่ดี มีความสามารถในการจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้น จึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ได้และนำไปประยุกต์ในอุปกรณ์ต่างๆ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ : เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีโครงสร้างที่เทียบเท่ากับ 1 มิติ จึงทำให้การนำไฟฟ้าในคาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นแบบ ballistic กล่าวคือ ไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ จึงสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีในวงจรรานาอิเล็กทรอนิกส์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นเซมิคอนดักเตอร์อีกด้วย

นาโนโพรบและเซนเซอร์ : เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีขนาดระดับนาโนเมตรและมีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถทำเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้อีกด้วย

การกักเก็บพลังงาน : เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กระดับนาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวที่เรียบ ลักษณะโครงสร้างพิเศษของคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้เป็นสิ่งที่สร้างความสนใจให้กับนักวิจัยที่จะนำมาใช้ในการเก็บ H_2 เพื่อใช้เป็นพลังงาน

เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ : คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถเป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ ได้ เนื่องจากมีค่า Young's modules สูงถึง 1 TPa และยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า กลศาสตร์ และทางเคมีที่สำคัญของคาร์บอนนาโนทิวบ์

ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 – 2 nm
พื้นที่ผิว	1,500 m ² /g
ความหนาแน่น	1.3 -1.4 g/cm ³
Tensile Strength	>60 GPa (ประมาณ 50 เท่าของเหล็กแรงๆ แต่มีน้ำหนักแค่ประมาณ 1/6 เท่า)
ความยืดหยุ่น	เมื่อถูกงอก็สามารถคืนกลับสู่สภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย
การทนต่อความร้อน	ในสุญญากาศ ~2,800 °C ในอากาศ :~ 750 °C
การนำความร้อน	MWCNTs : > 3,000 W/m.K SWCNTs : คาดประมาณ 6,000 W/m.K (มากกว่าเพชรและกราไฟต์ 2,000 W/m.K)
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	~ 10 ⁹ G A/cm ² (ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง)
การปลดปล่อยอิเล็กตรอน	สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่ 1-3 V/μm
การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี	ตามปกติจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ มีเสถียรภาพที่ดี

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวบ์

สาขาที่ประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ที่สำคัญ
วัสดุศาสตร์	เป็นส่วนผสมของวัสดุอื่นๆ เพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ, เซรามิกส์, เป็นตัวนำไฟฟ้าให้กับวัสดุผสม
อิเล็กทรอนิกส์	ทรานซิสเตอร์โคโอด, ตัวนำไฟฟ้าในนาโนอิเล็กทรอนิกส์
นาโนเทคโนโลยี	ใช้เป็น probe ใน STM, AFM, MEMS, เครื่องสร้างอุปกรณ์ MEMS
พลังงาน	กักเก็บ H ₂ , ไอออน, ซูเปอร์คาปาซิเตอร์, ขั้วในแบตเตอรี่
เคมี	ก๊าซเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง, ใช้เป็นวัสดุในสารอินทรีย์, ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี, ใช้เป็นตัวกรองทางด้านสิ่งแวดล้อม
การแพทย์	ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเวชภัณฑ์, เครื่องมือแพทย์
เป็นตัวปล่อยอิเล็กตรอน	เครื่องฉายอิเล็กตรอนขนาดเล็ก, display (FED), หลอดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน [25]

ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์สาร โดยมีลักษณะคล้ายกับขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทั่วไปคือ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสามขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งใช้ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิงใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีนลงบนวัสดุรองรับที่มีลักษณะเป็นแผ่นผิวเรียบ เช่น กระดาษ เซรามิกส์ หรือแผ่นพอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคการพิมพ์สกรีนทำให้สามารถผลิตขั้วไฟฟ้าได้ที่ละมากๆ พร้อม ๆ กันได้

ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนสามารถนำมาทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าเพื่อให้มีคุณสมบัติได้อย่างหลากหลาย เพื่อให้สามารถนำไปใช้ตรวจวัดสารต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยปัจจุบันนี้ได้มีการศึกษาการใช้งานปรับปรุงขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน เพื่อใช้งานทางด้านต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้การปรับแต่งขั้วไฟฟ้าใช้งานด้วยวิธีต่างๆ เช่น การผสมสารที่ต้องการปรับปรุงลงไปที่หมึกสกรีนโดยตรงหรือการใช้พอลิเมอร์ตรึงสารที่ต้องการเคลือบไว้บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนจะถูกออกแบบมาให้มีขนาดเล็กและเพื่อให้ใช้แบบได้ครั้งเดียวแล้วทิ้งหรือใช้กับเครื่องมือแบบพกพาได้โดยการเสียบแล้วใช้งานได้ทันที

ข้อดีขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

1. ช่วยลดการปนเปื้อนจากการรบกวนของสารตัวอย่างที่วัดก่อนหน้า เนื่องจากเป็นขั้วชนิดใช้แล้วทิ้ง
2. ราคาถูก เนื่องจากส่วนประกอบที่ใช้ทำขั้ว มีราคาไม่แพงมาก เช่น แผ่นพีวีซี และหมึกใช้ที่สกรีนขั้ว ก็ใช้ในปริมาณที่น้อยด้วย
3. ใช้งานง่ายและให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว
4. มีการทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากขั้วไฟฟ้าจะทำงานสัมผัสกับสารโดยตรง ซึ่งไม่มีฉนวนมาบัง

จากการที่ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนสามารถปรับปรุงได้หลากหลายเช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้าที่ใช้งานทั่วไปและรวมกับข้อดีของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนดังกล่าวมาแล้ว การนำขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน ไปประยุกต์แล้วเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานแล้วนั้น สามารถทำได้ตรวจวัดได้หลากหลายด้าน เช่น ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการแพทย์และด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ทำให้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก

2.7 ขั้วไฟฟ้ากลาสสิคาร์บอน (Glassy carbon electrode)[26-27]

กลาสสิคาร์บอนหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคาร์บอนคล้ายแก้ว สามารถสร้างเป็นรูปร่าง ขนาดที่แตกต่างกันและส่วนที่ไม่เป็นคาร์บอนกราไฟต์จึง (non-graphitizing carbon) ที่ผสมผสานคุณสมบัติของแก้วและเซรามิกส์กับชนิดของกราไฟต์ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดจะทนทานต่ออุณหภูมิสูง (7 โอห์ม) มีความหนาแน่นต่ำ มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ มีแรงเสียดทานต่ำ ความต้านทานต่อความร้อนต่ำมาก และความต้านทานทางเคมีและความดันก๊าซและของเหลว กลาสสิคาร์บอนใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรดในทางไฟฟ้า เช่นเดียวกับอุณหภูมิสูงของคูซิเบลและเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์บางอย่างทางการแพทย์

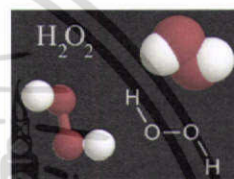
กลาสสิคาร์บอนมีโครงสร้างไอโซโทริปิกและมีความแข็งพอๆ กับกระจกซึ่งต่างจากแกรไฟต์ที่ชั้นแกรไฟต์ไม่ได้เรียงซ้อนกันเหมือนกระดาษเรียบๆ แต่เรียงเหมือนกับกระดาษที่ขยำแล้ว

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดและคุณสมบัติ

ชนิดและคุณสมบัติ	กลาสสิคาร์บอน	แกรไฟต์	แก้วไฟแร็กซ์
ความหนาแน่น (g/CC)	1.51	1.85	2.20
ความเป็นรูพรุน (%)	1.0 – 3.0	20 - 30	-
ความแข็ง	100 - 110	30 - 60	-
ทนทานต่อการหักงอ (MPa)	147	49	64
ค่าโมดูลัส (MPa)	29,500 - 32,400	6,800 – 9,800	68,700
ค่าความกระแทก (kgf.cm/cm ²)	2.1 – 3.6	2.1 – 3.1	1.8 – 2.3
สภาพความต้านทานไฟฟ้า (μ ohm.m)	42	11	10 ²²
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($\times 10^{-6}/^{\circ}$ C)	2.0 ~ 2.2	4.2	0.3
การนำความร้อน (W/mk)	5.8	114	1.4
แก๊สซึมผ่านได้ (cm ² /sec)	10 ⁻¹⁰ ~ 10 ⁻¹²	10 ~ 10 ⁻¹	10 ⁻¹⁰ ~ 10 ⁻¹²
ปริมาณซีเถ้า (ppm)	น้อยกว่า 5	น้อยกว่า 5	-

2.8 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) [28-29]

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มีชื่อเรียกตามระบบ IUPAC ว่า Hydrogen peroxide มีลักษณะเป็นของเหลวสีฟ้าจาง มีความหนืดมากกว่าน้ำเพียงเล็กน้อย เมื่อเจือจางมีลักษณะใส ไม่มีสี มีสมบัติเป็นตัว oxidizing ที่แรง และมีประสิทธิภาพในการฟอกสีเป็นอย่างมาก ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค disinfectant, antiseptic, oxidizer และใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ขับเคลื่อนในจรวด ในธรรมชาติไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้เองในร่างกายซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์ในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด (โดยเฉพาะกระบวนการหายใจแบบแอโรบิก) กระบวนการที่เกิดจากเอนไซม์จำพวก peroxidases ซึ่งมีความปลอดภัยไม่เป็นอันตรายและสลายตัวได้ง่ายเมื่อมีความเข้มข้นต่ำๆ

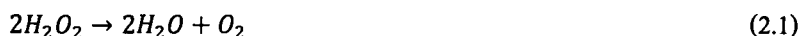


รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สถานะแก๊สและของแข็ง

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีโครงสร้างโดยทั่วไปอยู่สองรูปแบบดังรูปที่ 2.11 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีคุณสมบัติแตกต่างจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บริสุทธิ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทั่วไปไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะหาได้ในรูปของสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ สามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามร้านขายยาใช้เป็นน้ำยาสำหรับล้างแผล หน่วยของความเข้มข้นที่นิยมใช้อีกหน่วยสำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือหน่วย Volume ซึ่งหมายถึงปริมาตรของแก๊สออกซิเจน เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถสลายตัวได้เป็นน้ำและแก๊สออกซิเจน ดังสมการ



การสลายตัวที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยเช่น Fe^{3+} หรือ Ti^{3+} กลไกการสลายตัวจะแตกต่างกันออกไปโดยเกิด free radicals เช่น $HO\cdot$ (hydroxyl) และ $HOO\cdot$ ร่วมด้วย ซึ่ง H_2O_2 ร่วมกับ Fe^{2+} เรียกว่า Fenton's reagent โดยทั่วไปไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6% จะมีความเข้มข้น 20-volume หมายความว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 volume จะให้ออกซิเจน 20 volume ดังนั้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 20-volume concentration จะเท่ากับ 1.667 mol/dm^3 (โมลาร์)

การนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาใช้ประโยชน์

1. ใช้ในงานฟอกขาวกระดาษหรือฟอกผ้า
2. ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคแทนคลอรีนซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าคลอรีน
3. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นระหว่าง 3 เปอร์เซ็นต์ ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ สามารถใช้ร่วมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในการฟอกสีผม
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ใช้สำหรับล้างแผลทำความสะอาดล้างเนื้อเยื่อที่ตายแล้ว

อย่างไรก็ตามการศึกษาล่าสุดชี้ให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำลายเซลล์ผิวที่เกิดใหม่ถูกดูดซึมโดยผิวหนังและทำให้เกิดสภาวะเส้นเลือดฝอยอุดตัน จะปรากฏเป็นสีขาวชั่วคราวที่ผิวหนังเมื่อสัมผัสกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่ำใช้สำหรับทำให้สุนัขอาเจียน

2.9 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Methodologies) [30-32]

เคมีไฟฟ้าเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าหรือปริมาณกระแสไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยทั่วไปประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2-3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) และขั้วไฟฟ้าช่วย (auxiliary electrode หรือ counter electrode)

โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าทางเคมีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการอาศัยคุณสมบัติการเกิดปฏิกิริยาของสารดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) คือ ปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนดังแสดงในสมการ



โดย O เป็นสารออกซิไดซ์และ R เป็นสารรีดิวซ์

2. ปฏิกิริยา heterogenous คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารที่ละลายในตัวทำละลาย ด้วยกระบวนการถ่ายเทมวล (mass transfer) และอิเล็กตรอน ดังสมการดังต่อไปนี้



โดย O เป็นสารออกซิไดซ์และ R เป็นสารรีดิวซ์

2.9.1 การถ่ายเทมวลในสารละลาย (mass transfer)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวถูกควบคุมด้วยกระบวนการถ่ายเทมวลของสารซึ่งประกอบด้วย 3 ลักษณะ ดังนี้

2.9.1.1 ไมเกรชัน (migration)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายโดยไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบและไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก ดังรูปที่ 2.13 ความเร็วของการเคลื่อนที่เข้าหา หรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ศักย์ไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผล

ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์นั้น เพิ่มหรือลดไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนอื่นที่มีประจุชนิดเดียวกับไอออนที่ต้องการอยู่ในสารละลายด้วยจะเกิดการแย่งกันเคลื่อนแบบไมเกรชัน ทำให้การไหลของกระแสในวงจรนั้นเนื่องจากไอออนที่ต้องการลดลงไปด้วย ในเชิงวิเคราะห์สามารถอาศัยธรรมชาติของการแย่งการเคลื่อนแบบไมเกรชันนี้ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของไอออนสารวิเคราะห์ให้เป็นไปตามกลไกที่ต้องการเท่านั้น ยกตัวอย่าง เช่น การที่สะพานเกลือเป็นสารละลายของ KCl ที่มีความเข้มข้นมากกว่าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ 50-100 เท่า ทำให้ทั้ง K^+ และ Cl^- แย่งเคลื่อนเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้า แทนไอออนที่ต้องการวิเคราะห์เกิดผลดีคือ ทำให้ไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน แต่เคลื่อนที่แบบการแพร่แทน เป็นต้น หลักการง่ายๆ ของการแพร่ที่นี้ได้ถูกนำไปใช้ในเทคนิควิธีการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ต้องการหลีกเลี่ยงหรือป้องกัน ไม่ให้เกิดไมเกรชันกับไอออนที่ต้องการ ซึ่งจะได้เห็นตัวอย่างในเทคนิควิธีการวิเคราะห์อื่นๆ ที่จะกล่าวต่อไป



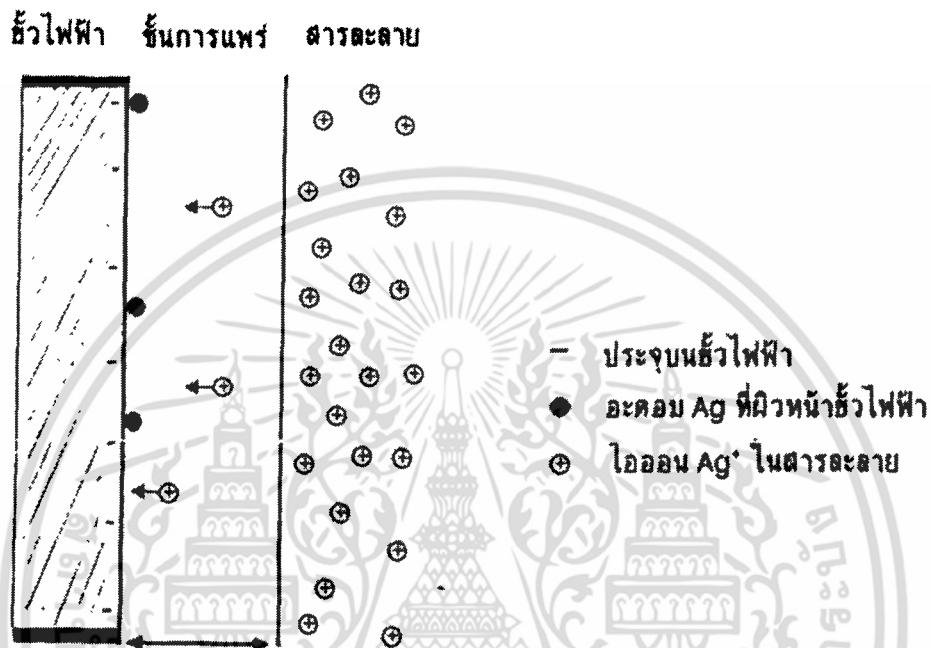
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน

2.9.1.2 การแพร่ (diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จนกว่าไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น อัตราความเร็วของการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น การพอกพูนของซิลเวอร์ที่ขั้วแคโทด ดังใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

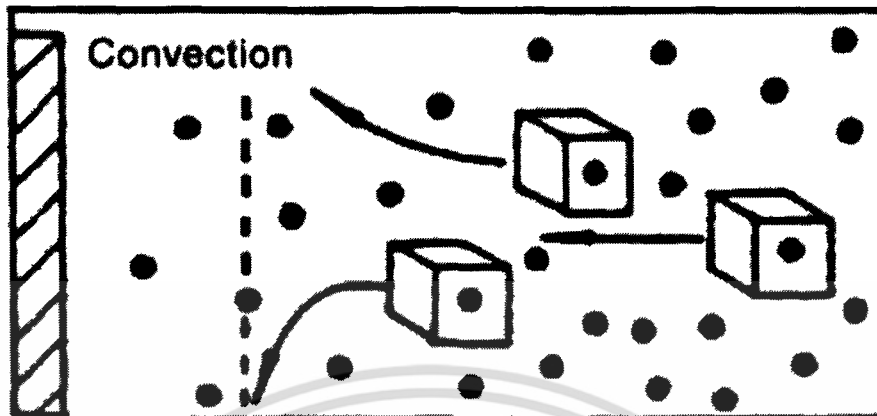
รูปที่ 2.14 ในสารละลายซึ่งประกอบด้วย Ag^+ ในความเข้มข้นที่มากกว่าที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จึงเกิดการแพร่ของ Ag^+ ไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ายังความเข้มข้นของ Ag^+ ในสารละลายและที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าต่างกันมาก การแพร่นี้ยิ่งเกิดอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.14 การพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่

2.9.1.3 คอนเวกชันหรือการพา (convection)

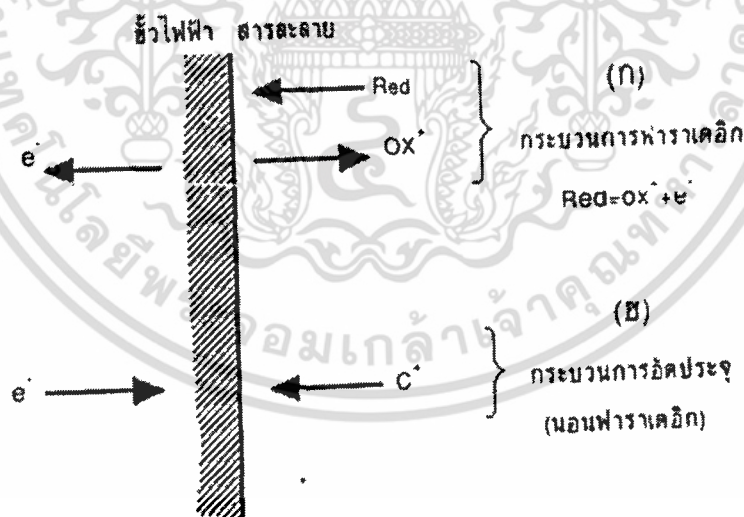
การที่ไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าอันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลายหรือด้วยกลไกภายนอก เช่น โดยการคนหรือเขย่าสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนตัวของไอออนภายในสารละลาย กลไกการนำพาไอออนจากสารละลายเข้าหรือออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทั้งสามรูปแบบที่ได้กล่าวไปแล้วนี้ สามารถเกิดขึ้นเองกับไอออนในสารละลายหรือถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการขึ้นกับเทคนิคของการวิเคราะห์นั้นๆ ดังได้กล่าวยกตัวอย่างในการกำหนดให้เกิดไมเกรชันของไอออนในสะพานเกลือหรือการกวนสารละลายเพื่อให้เกิดคอนเวกชันช่วยให้การเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าได้เร็วขึ้นเป็นต้น



รูปที่ 2.15 การพามวลจากชั้นสารละลายไปยังหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการพา

2.9.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ไม่ว่าไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์จะถูกนำพาจากสารละลายมายังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างกลไกใดก็ได้กล่าวมาแล้วก็ตาม กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ตรงผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นไปได้ในอย่างน้อยหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ดังนี้คือ



รูปที่ 2.16 รูปแบบแสดงกระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและคายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ซึ่งเป็นไปตามกฎ

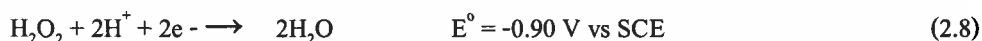
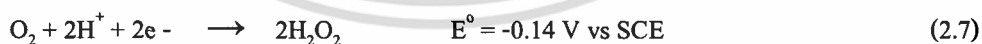
ของฟาราเดย์ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า “กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process)” ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการฟาราเดอิกที่อิเล็กโทรด ทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า นั้นได้ เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic current)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้า ไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงบริเวณรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงช่วงขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า “กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic process)” กระแสช่วงขณะที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic current)

สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า แต่ขึ้นกับสถานะของการวิเคราะห์ว่ามีเทอร์โมไดนามิกส์หรือจลนศาสตร์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า นั้นได้หรือไม่เพียงใด

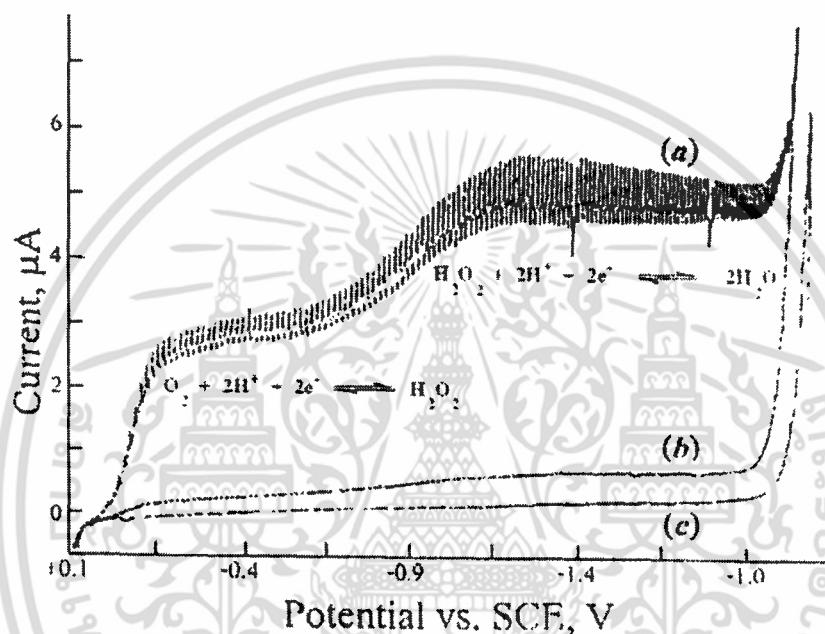
2.9.3 การกำจัดออกซิเจน

โดยปกติแล้วออกซิเจนมีอยู่ทั่วไปในบรรยากาศในรูปแก๊สและละลายอยู่ในสารละลาย สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ออกซิเจนจะสามารถละลายได้ในตัวทำละลายทุกชนิด เช่น น้ำ ออกซิเจนสามารถละลายในน้ำได้ดี (ประมาณ 10^{-3} โมลาร์) ซึ่งออกซิเจนที่อยู่ในสารละลายจะเป็นสารที่รบกวนต่อการวิเคราะห์ เพราะจะเกิดกระแสเนื่องจากการแพร่อยู่สองส่วน ส่วนแรกออกซิเจนในสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันใน โมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมีศักย์ไฟฟ้าครึ่งคลื่นเท่ากับ -0.14 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง SCE) และส่วนที่สอง ซึ่งเป็นส่วนที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ได้น้ำ โดยจะเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.9 โวลต์



ผลจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนทั้งสองปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงศักย์ไฟฟ้า 0 ถึง -1 โวลต์ โดยเฉพาะที่ศักย์ไฟฟ้า -0.14 โวลต์นั้นถือว่าต่ำมาก ซึ่งทำให้เกิดกระแสแคโทดิกได้ไม่น้อยกว่า 5 ไมโครแอมแปร์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นยังสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับสาร

อื่นๆ ในสารตัวอย่างได้ด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องกำจัดออกซิเจนออกจากสารละลายที่จะทำการตรวจวัดก่อน โดยการผ่านแก๊สเฉื่อยที่บริสุทธิ์ เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สอาร์กอนลงไป ในสารละลาย ที่จะทำการวัดประมาณ 10-15 นาที ก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์และผ่านแก๊สปกคลุมบรรยากาศบริเวณเหนือสารตัวอย่างตลอดการวิเคราะห์ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการละลายของออกซิเจนลงไป ในสารละลายตัวอย่างขณะทำการวิเคราะห์



รูปที่ 2.17 โวลแทมโมแกรมของสารละลาย 0.1 โมลาร์ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) (a) สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์อิ่มตัวไปด้วยอากาศทำให้เห็นรูปคลื่น (Wave) ของออกซิเจน (b) มีการไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายบางส่วน (c) มีการไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายทั้งหมด

2.9.4 เทคนิคโวลแทมเมตรี

2.9.4.1 การควบคุมศักย์ไฟฟ้าในเทคนิคโวลแทมเมตรี

การควบคุมศักย์ไฟฟ้าในเทคนิคโวลแทมเมตรีคือ การให้ศักย์ไฟฟ้าแก่เซลล์ไฟฟ้าและวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งเทคนิคนี้จะต่างจากเทคนิคโพเทนชิอเมตรี คือ มีการใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) ส่วนมากมักเป็นขั้วไฟฟ้าแพลตินัม (platinum wire auxiliary electrode) นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับเทคนิคนี้มักเป็นขั้วไฟฟ้าจุลภาค (microelectrode) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดโพลาไรเซชันที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน เทคนิคที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้โวลแทมเมตรี คือ

1. Chronoamperometry
2. Current-Sample Polarography
3. Pulse Voltammetry
 - Normal Pulse Voltammetry
 - Differential Pulse Voltammetry
 - Square-Wave Voltammetry
 - Staircase Voltammetry
4. AC Polarography
5. Linear Sweep Polarography
6. Cyclic Voltammetry
7. Stripping Voltammetry
 - Anodic Stripping Voltammetry
 - Cathodic Stripping Voltammetry
 - Potentiometric Stripping Analysis

2.9.4.2 เซลล์โวลแทมเมตรีประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์

อิเล็กโทรไลต์ช่วย (Supporting electrolyte) คือ สารประกอบอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เติมลงไป สารละลายตัวอย่างในการวิเคราะห์ โดยเติมในปริมาณที่มากกว่าสารตัวอย่างประมาณ 50 – 100 เท่า อิเล็กโทรไลต์ช่วยต้องไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง แต่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการทำให้ไอออนเคลื่อนที่ในสารละลายแบบการแพร่ป้องกันการเกิดไมเกรชันและช่วยลดความต้านทานของเซลล์ นอกจากนี้การเลือกชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมบางชนิดจะสามารถทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ได้ด้วย

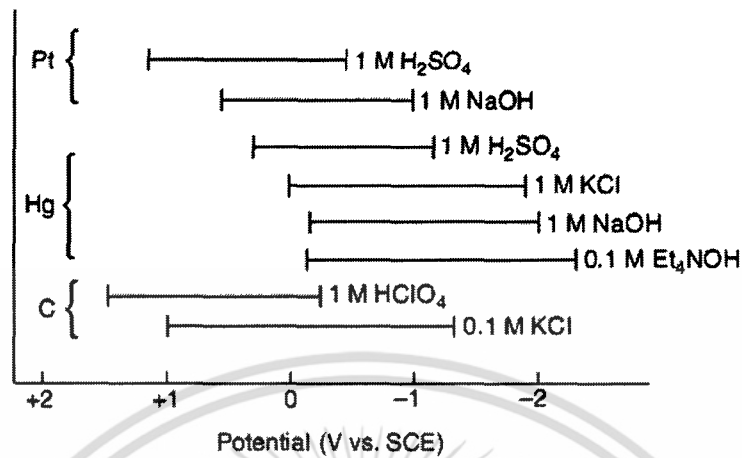
ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วย ทั้งหมดจุ่มอยู่ในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไว้เพื่อเทียบศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากวงจรเป็นค่าของความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว จึงเรียกได้ว่าเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative potentials) การใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะมีค่าศักย์ที่แน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าในวงจรไม่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ดีต้องมีส่วนประกอบคงตัวเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงง่ายเก็บได้นานและไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) จะมีคุณสมบัติเฉพาะคือ ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเป็นขั้วที่ถ่ายเทไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าใช้งานผ่านสารละลายเพื่อให้อาตรตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาเคมี ขั้วไฟฟ้าช่วยมักมีพื้นที่ผิวมาก ๆ เพื่อให้การนำไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ดีและควรมีความเสถียรในช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานได้ กว้างนำไฟฟ้าได้ดี เช่น แพลทินัม หรือ กลาสคาร์บอน

ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) โดยทั่วไปนิยมกำหนดให้มีขนาดเล็กเพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารตัวอย่างน้อยๆ ทำให้เกิดสถานะโพลาไรเซชันตลอดการวิเคราะห์ มักใช้ขั้วไฟฟ้าที่เฉื่อย เช่น แพลทินัมหรือทอง ไพรโกลดิกกราฟต์ กลาสคาร์บอนหรือปรอท

สำหรับการวิเคราะห์โดยโวลแทมเมทรี่นั้น ขั้วไฟฟ้าใช้งานมีผลโดยตรงอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ดีควรจะให้ค่าสัญญาณรบกวนที่สูงรวมทั้งมีการตอบสนองที่คงที่เชื่อถือได้ตลอดอายุการใช้งานสิ่งที่ควรพิจารณาในการเลือกวัสดุใช้ทำขั้วไฟฟ้าใช้งาน คือ ลักษณะของปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ และกระแสพื้นในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งาน ปัจจัยย่อยอื่นๆ ที่นำมาพิจารณา เช่น ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานได้ ค่าการนำไฟฟ้า ราคา ความยากง่ายในการหา ความเป็นพิษ เป็นต้น



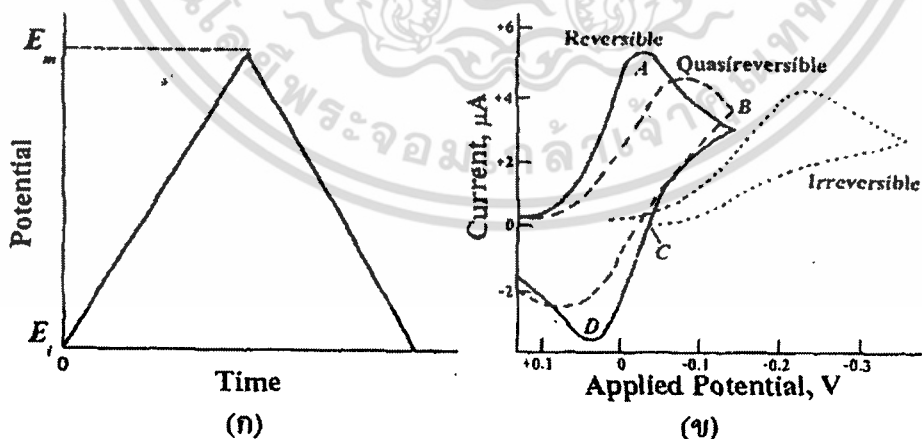
รูปที่ 2.18 แสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าใช้งานที่สามารถทนได้ของวัสดุที่ใช้ทำขั้วชนิดต่างๆกับอิเล็กโทรไลต์ช่วย ชนิดต่างๆ

2.9.4.3 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกแก่ขั้วไฟฟ้าและปราศจากการคนสารละลาย ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับตัวรีดอกซ์หรือตัวออกซิไดส์ในสารละลาย เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่วงจรในลักษณะที่เป็นสามเหลี่ยมดัง

รูปที่ 2.19 (ก)

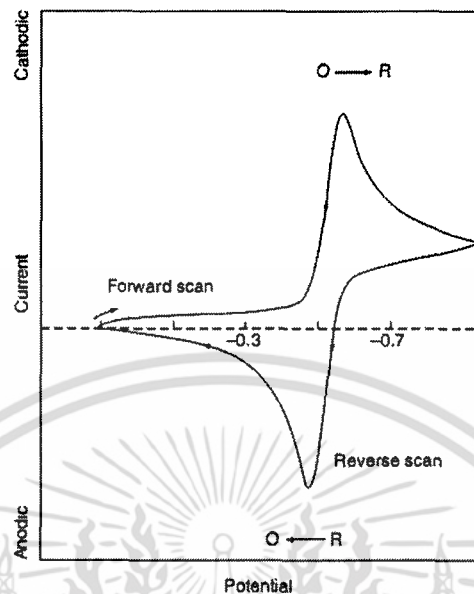


รูปที่ 2.19 (ก) โวลเทจโปรแกรมของไซคลิกโวลแทมเมตรี (ข) ไซคลิกโวลแทมโมแกรม

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น จากนั้นจะค่อยๆ ลดต่ำลงด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน ซึ่งโวลแทมโมแกรมที่ได้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.19 (ข) เมื่อเริ่มสแกนศักย์ไฟฟ้าก็จะเริ่มมีกระแสเกิดขึ้นเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าจนถึงจุดยอดของสามเหลี่ยมก็จะมีกระแส เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นสูงสุด (กรณีที่ให้ศักย์ไฟฟ้าจากบวกไปลบ) เรียกว่า พีค และเมื่อลดศักย์ไฟฟ้าลงด้วยอัตราเร็วเท่าเดิม กระแสก็จะค่อยๆ ลดลงจนถึงต่ำสุด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาในทิศทางตรงกันข้ามและลักษณะของกระแสที่ได้จะมีพีคคล้ายกับพีคแรก แต่มีทิศทางตรงกันข้ามเฉพาะในกรณีของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (Reversible) แต่จะไม่เกิดพีคถ้าปฏิกิริยานั้นผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ส่วนปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ไม่สมบูรณ์ (Quasireversible) จะได้พีคที่มีลักษณะก้ำกึ่งระหว่างพีคของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้และปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้

ในการคำนวณหาค่ากระแสที่วัดได้จากโวลแทมโมแกรม ทำได้โดยการหาความสูงพีค ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งสามารถหาความสูงได้โดยการลากเบสไลน์ (Baseline) แล้ววัดส่วนสูงที่สุดมาถึงเส้นเบสไลน์ ส่วนกระแสพีคที่วัดได้ (i_p) คำนวณได้จากสมการของ Randles-Sevcik ดังสมการ (2.9) ซึ่งใช้กับปฏิกิริยาที่ผันกลับได้

ส่วนตำแหน่งศักย์พีค (E_p) และความสูงของกระแสพีค (i_p) ของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ไม่สมบูรณ์ และปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ โดยใช้สมการ (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ



รูปที่ 2.20 โพลิกลิคโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แสดงวิธีการหาความสูงพีค
เมื่อ i_p , E_p คือ ความสูงและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันตามลำดับ ส่วน i_{pa} , E_{pa} คือ ความ
สูงกระแสและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามลำดับ

$$i_p = 2.69 \times 10^5 n^{3/2} A C D^{1/2} v^{1/2} \quad (2.9)$$

เมื่อ i_p = กระแสพีค (A)
 n = จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา
 C = ความเข้มข้นของสารในสารละลายบัลค์ (mol/cm³)
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร (cm²/s)
 V = อัตราการสแกน (V/s)
 A = พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า (cm²)

$$E_p = E^o - \frac{RT}{\alpha n_a F} \left[0.78 - \ln \frac{k^o}{D^{1/2}} + \ln \left(\frac{\alpha n_a F v}{RT} \right)^{1/2} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยนประจุ
 n_a = จำนวนอิเล็กตรอนในการแลกเปลี่ยนประจุ
 k^o = ค่าคงที่อัตรามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ} \quad i_p = 2.99 \times 10^5 n(\alpha n_a) A C D^{1/2} \nu^{1/2} \quad (2.11)$$

เมื่อนำค่า i_p มาเขียนพลอตกับค่า $V^{1/2}$ ซึ่งถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่ากระบวนการนี้เป็นแบบ Diffusion-control คือกระแสที่ได้จากปฏิกิริยา ซึ่งเป็นกระแสที่ถูกควบคุมโดยการแพร่หมายความว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เร็ว จนไม่ได้เป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา แต่ไอออน โมเลกุล หรืออนุภาคของ Electroactive species เคลื่อนที่จากชั้นสารละลายบัลค์ (Bulk solution) โดยการแพร่เข้าสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจะแพร่ช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากระแสที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ การแพร่เข้ามาของ ไอออน โมเลกุล หรืออนุภาคของ Electroactive species ดังกล่าว ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ Diffusion-control

ในกรณีที่มีการเกิดสารผลิตภัณฑ์ หรือมี Electroactive species ติดอยู่ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า กระแสฟลิกที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$i_p = \frac{n^2 F^2 A \Gamma \nu}{4RT} \quad (2.12)$$

เมื่อ i_p = กระแสฟลิก (A)

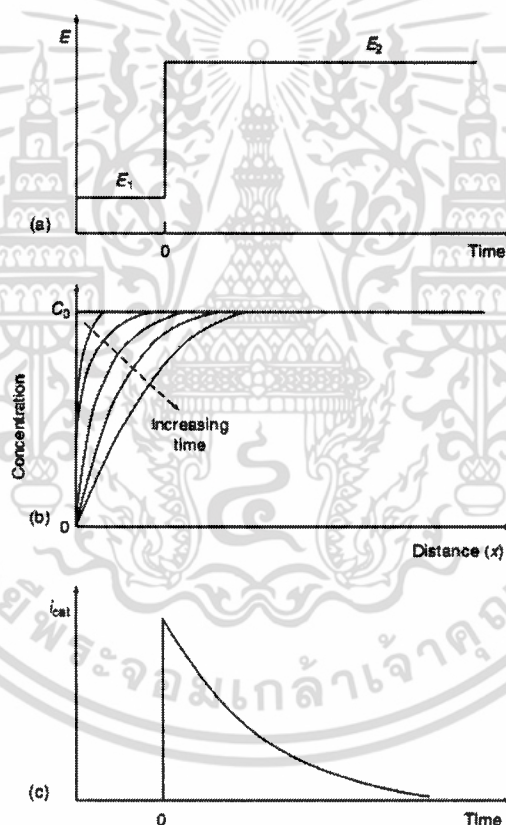
Γ = ปริมาณฟิล์มเชิงเส้นพื้นที่ผิว (mol/cm^2)

เมื่อนำค่า i_p มาเขียนพลอตกับค่า V ถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่ากระบวนการเป็นแบบ Surface-control หมายความว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นจนกลายเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยา เพราะ ไอออน โมเลกุล หรืออนุภาคของ Electroactive species ที่เคลื่อนที่ได้เร็วพอๆ กับการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจึงถูกควบคุม โดยความเร็วของปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า จึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ Surface-control

การแยกฟลิกว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Diffusion-control หรือว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Surface-control ทำได้โดยการพลอตกราฟระหว่าง $\log i_p$ กับ $\log V$ ซึ่งจะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแล้วพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟ ซึ่งถ้าเส้นกราฟมีความชันเท่ากับ 0.5 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Diffusion-control ส่วนถ้าเส้นกราฟมีความชันเท่ากับ 1 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Surface-control แล้วถ้ากราฟมีความชันเท่ากับ 1 ที่อัตราสแกนต่ำและมีความชันเท่ากับ 0.5 ที่อัตราสแกนสูงหมายความว่า ปฏิกิริยาเป็นแบบผสมระหว่าง Surface-control กับ Diffusion-control

2.9.4.5 เทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี

โครโนแอมเพอโรเมทรีเป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงานในลักษณะคงที่ โดยจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แก่ขั้วไฟฟ้าใช้งานจากค่าตรงจุดที่เกิด faradaic reaction เริ่มจากจุดศักย์ไฟฟ้าที่ความเข้มข้นของ electro active species ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามีผลเป็นศูนย์ดังรูปที่ 2.21 (a) ใช้ขั้วไฟฟ้าอยู่กับที่และปราศจากการกวนสาร การเคลื่อนที่ของมวลภายใต้สภาวะนี้จะมีเพียงการแพร่ กราฟของปริมาณกระแสที่ได้จะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนความเข้มข้นอย่างต่อเนื่องที่ละน้อยๆ ในบริเวณใกล้เคียงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า รวมถึงการค่อยๆ แผ่ขยายออกชั้นการแพร่พร้อมๆ กับ reactant ที่ลดลงที่ละน้อยๆ และดังนั้นผลที่แสดงความเข้มข้นจะเห็นว่าค่อยๆ ลดลงเทียบกับเวลาที่ผ่านไปดังรูปที่ 2.21 (b) ตามนี้แล้วกระแสไฟฟ้าที่ planar electrode ลดลงเทียบกับเวลาที่ผ่านไปดังรูปที่ 2.21 (c)



รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ของโครโนแอมเพอโรเมทรี (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและเวลา (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับระยะทางที่เวลาต่างๆ (c) กราฟแสดงกระแสที่อ่านได้

ซึ่งเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์เรียกว่า สมการ Cottrell equation

$$i(t) = \frac{nFAACD^{1/2}}{\pi^{1/2}t^{1/2}} = kt^{-1/2} \quad (2.13)$$

เมื่อ i คือ กระแสการแพร่ มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

n คือ จำนวนของอิเล็กตรอน

F คือ ค่าคงที่ Faraday มีหน่วยเป็น $Cmol^{-1}$

A คือ พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

C คือ ความเข้มข้น มีหน่วยเป็นโมลาร์

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ มีหน่วยเป็น $cm^2 s^{-1}$

t คือ เวลา มีหน่วยเป็นวินาที

ดังนั้น $it^{1/2}$ คงที่ มักอยู่ในเทอม“Cottrell behavior.” ซึ่งเบี่ยงเบนไปจากพฤติกรรมที่ปรากฏที่ระยะเวลายาวนาน (มากกว่า 100 วินาที) เป็นผลจากการพาตามธรรมชาติ หรือเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าจุลภาค (Microelectrodes) ที่มีอัตราส่วนเส้นรอบวงต่อพื้นที่ผิวสูง ในกรณีหลังเป็นกรณีกระแส (เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้น) ที่ขึ้นกับเวลา ที่ได้ที่เวลา $t > 0.1$ s เนื่องจากมีรัศมีของการแพร่ที่กว้าง

ขั้วไฟฟ้าแบบ Spherical electrodes ก็ใช้หลักในการพิจารณาลำๆกัน ซึ่งค่ากระแสที่ตอบสนองจะเป็นไปตามขั้นของศักย์ไฟฟ้าซึ่งจะมีทั้งส่วนที่เป็น time-dependent ดังแสดงส่วนที่เป็น time-independent ดังสมการ

$$i(t) = nFAD_0C_0(b)/(\pi D_0 t)^{1/2} + nFAD_0C_0/r \quad (2.14)$$

สำหรับค่า t น้อยๆ ($t < 50$ ms) สัญญาณของ โคร โนแอมเพอ โรเมทริก จะมีสัญญาณพื้นของการอัดกระแสรวมอยู่ด้วย

$$i_c = \frac{E}{R_s} e^{-t/RC_{dl}} \quad (2.15)$$

(การอัดกระแสไฟฟ้าจะเหมือนที่เกิดขึ้น เมื่อเราจ่ายศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในวงจรแบบอนุกรม (series RC circuit)) กระแสการอัดประจุนี้จะลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งเป็นสัญญาณตอบสนองให้เราเห็นแม้ไม่มี electroactive species ก็ตาม

โคร โนแอมเพอ โรเมทรี นิยมใช้สำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ electro active species หรือวัดพื้นที่ผิวของหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน และใช้งานทางด้านวิเคราะห์ทดสอบสารชีวภาพ เช่นกลูโคส

ในเลือด หรืองานทางด้านเอนไซม์ (จะกล่าวรายละเอียดต่อไป) โคร โนแอมเพอโรเมทรียังสามารถประยุกต์ใช้ในการศึกษากลไกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า โคร โนแอมเพอโรเมทรียังสามารถบันทึกค่าประจุ (บันทึกประจุเทียบกับเวลา charge-time dependence) ซึ่งสามารถทำได้โดยรวบรวมค่ากระแสที่ได้จากศักย์ไฟฟ้าต่างๆและทำการปรับแก้ค่าให้ถูกต้อง โดยเพิ่มค่าประจุเนื่องจาก double-layer charging (Q_{dl}) และค่าประจุที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับ (Q_i)

$$Q = \frac{2nFACD^{1/2}t^{1/2}}{\pi^{1/2}} + Q_{dl} + Q_i \quad (2.16)$$

ซึ่งเทคนิคการวัดประจุเรียกว่า Chronocoulometry ซึ่งสามารถใช้สำหรับวัดปริมาณตัวทำปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับอยู่ (เนื่องจากสามารถที่จะแยกค่าประจุที่เกิดขึ้นโดยการดูดซับและ solution species) การสร้างกราฟของประจุ (Q) เทียบกับเวลา $t^{1/2}$ เรียกว่า Anson plot ค่าของจุดตัดแกนที่เวลาเท่ากับศูนย์ก็คือค่าของประจุมรวม (Q_{dl} และ Q_i) ที่เกิดจาก double-layer charging และปฏิกิริยาการดูดซับ ซึ่งสามารถประมาณค่าจุดตัดแกนที่ได้นี้แล้วนำไปหักลบเพื่อปรับแก้ค่าเป็นการหักลบค่าของสารละลาย blank solution ออกไปได้ทำให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานที่ใช้การตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Wei Zhao, Huicai Wang และคณะ [33] ได้ศึกษาวิธีการสร้างตัวเซ็นเซอร์ในตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยอาศัยพัฒนาจากหลักการของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/ซิลเวอร์ นาโนพาร์ทิเคิล นาโนไฮบริด (Multi-wall carbon nanotube/silver nanoparticle nanohybrids: MWCNT/Ag nanohybrids) ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทอง ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/ซิลเวอร์ นาโนพาร์ทิเคิล นาโนไฮบริด จะมาจากแนวความคิดที่มีประสิทธิภาพในการประพืดตัวของกลุ่มคาร์บอนซิลที่เกี่ยวกับการทำงานมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Multi-wall carbon nanotubes: MWCNTs) โดยอนุภาคนาโนของโลหะเงินจะถูกสร้างขึ้นจากสารละลายซิลเวอร์ในเตรดที่มีน้ำและยึดติดอย่างทันทีทันใดทำให้พื้นผิวมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์นูนออกมาในสภาวะอุณหภูมิห้อง โดยปราศจากสารรีดิวซ์หรือการทำฉายรังสีและรูปแบบผลิตภัณฑ์ของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/ซิลเวอร์ นาโนพาร์ทิเคิลนาโนไฮบริด จะสังเกตได้จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) และสมบัติศักย์ไฟฟ้าเคมีของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/ซิลเวอร์ นาโนพาร์ทิเคิลนาโนไฮบริดที่ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทอง ซึ่งจะแสดงลักษณะพิเศษ โดยการตรวจวัดศักย์เคมีไฟฟ้า และผลจากการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าตัวเซ็นเซอร์นี้มีความสามารถเป็นตัวเร่งสำหรับเกิดปฏิกิริยา

รีดักชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งผลของตัวเซ็นเซอร์นั้นสามารถตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 0.05–17 มิลลิโมลาร์ ด้วยค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 5×10^{-7} โมลาร์ ที่อัตราส่วนระหว่างค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เท่ากับ 3 และสภาพไวของสัญญาณสามารถคำนวณได้เท่ากับ 1.42 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.2 โวลต์ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่ามีความเที่ยงตรงที่ดี มีความเสถียรที่ยาวนานและปราศจากสิ่งรบกวนของกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid (AA)) กรดยูริก (Uric acid (UA)) และอะเซตามิโนเฟน (Acetaminophen (AP))

Yali Li และคณะ [34] ส่วนผสมของอนุภาคนาโนของโลหะทองคำ (Gold nanoparticles: AuNPs) ที่เป็นสารตัวกลาง ซึ่งเป็นตัวรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนแมงกานีสไดออกไซด์ (Manganese dioxide nanoparticles: Nano-MnO₂) สำหรับการพัฒนาตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี (Chronoamperometry) โดยส่วนผสมนี้จะเตรียมได้จากการผสมโดยตรงของกรดซิตริก อนุภาคนาโนของโลหะทองคำ พอลิ(อัลลิลเอไมด์ไฮโดรคลอไรด์) (Poly(allylamine hydrochloride): PAH) และอนุภาคนาโนแมงกานีสไดออกไซด์ ซึ่งจะใช้เทคนิควิธีการเตรียมอนุภาคนาโนของโลหะที่รวมตัวเอง (Electrostatic self-assembly) แล้วตัวเซ็นเซอร์นี้จะแสดงศักย์ไฟฟ้าเคมีได้อย่างดีเยี่ยมในช่วง 7.80×10^{-7} โมลาร์ ถึง 8.36×10^{-4} โมลาร์ ที่ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 4.68×10^{-8} โมลาร์ (ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3) ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลการทำงานร่วมกันระหว่างความสามารถตัวเร่งปฏิกิริยาของอนุภาคนาโนแมงกานีสไดออกไซด์และความสามารถในการนำไฟฟ้าของอนุภาคนาโนของโลหะทองคำ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้จริงสำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในยาเสพติดได้ด้วย

Xiandong Zeng และคณะ [35] ได้ศึกษาดีเอ็นเอ-คอปเปอร์ (II) ที่จับซ้อนโดยถูกนำไปทำการพอกพูนทางไฟฟ้า (Electrodeposit) บนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน ซึ่งกีดกันขั้วดีเอ็นเอ-คอปเปอร์ (II)/กลาสคาร์บอน (DNA-Cu²⁺/GC) จะเป็นตัวเซ็นเซอร์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยไม่ใช้เอนไซม์ และเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry; CV) ในของขั้วดีเอ็นเอ-คอปเปอร์ (II)/กลาสคาร์บอนจะแสดงระลอกของพีคปฏิกิริยารีดอกซ์ของคอปเปอร์ (II)/คอปเปอร์ (I) นอกจากนั้นเทคนิคการพอกพูนทางไฟฟ้าของขั้วดีเอ็นเอ-คอปเปอร์ (II) จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมสมบัตการเป็นตัวเร่งเคมีไฟฟ้าอย่างดีเยี่ยมและมีความเสถียรภาพที่ดี ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งผลของความเข้มข้นของคอปเปอร์ (II) จะส่งผลต่อเวลาในการพอกพูนทางไฟฟ้าและการกำหนดเงื่อนไขบางอย่าง เช่น ค่าพีเอช การให้ศักย์ไฟฟ้าในการตอบสนองกระแสไฟฟ้าของขั้วดีเอ็นเอ-คอปเปอร์ (II)/กลาสคาร์บอนไปยังไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะให้สัญญาณการ

ตอบสนองเป็นเส้นตรง ของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในช่วง 8.0×10^{-7} โมลาร์ ถึง 4.5×10^{-3} โมลาร์ ด้วยความไวสูง -40.25 ไมโครแอมแปร์เมตรต่อโมลาร์ ที่ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 2.5×10^{-7} โมลาร์ และเวลาในการตอบสนองเท่ากับ 4 วินาที นอกจากนี้ ยังเป็นเซ็นเซอร์ที่มีความเที่ยงตรงที่ดี มีความเสถียรภาพที่นาน และไม่เกิดสัญญาณที่รบกวนด้วย

Malinauskas A., Araminaite R. และคณะ [36] ความเสถียรของพราสเซียน บลู (Prussian blue) ในการตรวจวัดโดยโครโนแอมเพอโรเมทรีสำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แสดงให้เห็นการยับยั้งความเร็วของการตรวจวัดที่พีเอช 7.3 ดำเนินการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า 0.0 โวลต์กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ เริ่มอัตราขึ้นแรกที่ 1.2×10^{-2} และ 2.8×10^{-29} ต่อนาที สำหรับ ตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.20 และ 0.74 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ แต่ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 5.5 จะยับยั้งการดำเนินงานขั้นที่สองให้ช้าลง โคบอลต์เฮกซะไซยาโนเฟอเรต มีความเสถียรต่อปฏิกิริยาอิเล็กโทรคะตะไลติก (Electrocatalytic reduction) ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.74 มิลลิโมลาร์ ของการยับยั้งการดำเนินงานขั้นแรกในช่วง 3.3×10^{-3} ต่อนาที ในสารละลาย พีเอช 7.3 ที่ 0.0 โวลต์ เป็นเวลา 8.5 วินาที ซึ่งช้ากว่าพราสเซียนบลู สำหรับความเสถียรทั้ง 2 ขั้วตรวจวัด จึงเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นไบโอเซนเซอร์

Abdollah Salimi, Rahman Hallaj และคณะ [37] ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนโดยอนุภาคนาโนของโคบอลต์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมจากสารละลายโคบอลต์คลอไรด์โดยการทำการพอกพูนทางไฟฟ้า จะอยู่ในรูปของฟิล์มโคบอลต์ไฮดรอกไซด์ที่เคลือบอยู่บนขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน ตรวจสอบชั้นฟิล์มด้วยไซคลิกโวลเทมเมทรีพบว่ามีความเสถียรต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ และเมื่อนำไปตรวจสอบปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรีได้กระแสเท่ากับ 0.75 โวลต์ เมื่อใช้ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิงในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7.5 มีขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 0.4 นาโนเมตร ความไวเท่ากับ 4.86 ไมโครแอมแปร์ต่อไมโครต่อตารางเซนติเมตรและเวลาการตอบสนองดีขึ้น 95 เปอร์เซ็นต์

Sudeshna Chandra และคณะ [38] อนุภาคนาโนของโลหะโรเดียมเตรียมโดยใช้การสังเคราะห์ N,N – bis – succinamide ของเคนไดเมอร์ที่มีความเสถียร อนุภาคนาโนโรเดียมมีรูปทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 2 นาโนเมตร อนุภาคนาโนโรเดียมหุ้มเคนไดเมอร์ (dendrimer Rh – encapsulated nanoparticles ; Rh - DENs) ถูกตรึงบนขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนและ electrocatalytic activity ที่มีต่อการลดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกตรวจสอบโดยใช้ไซคลิกโวลเทมเมทรีและโครโนแอมเพอโรเมทรี Rh – DENs ปรับแต่งด้วยขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนพบได้ดีใน electrocatalytic activity สำหรับ

ปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความมั่นคงของระบบกระแสแคโทดิกของการปรับแต่งขั้วไฟฟ้าที่ -0.3 โวลต์ (vs SCE) ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7.0) แสดงความเป็นเส้นตรงของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ $8 - 30$ ไมโครโมลาร์ กับการตรวจสอบและความไวของ 5 ไมโครโมลาร์ และ 0.03103×10^{-6} ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ.

2.10.2 การสังเคราะห์คอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนนาโนทิวบ์

Xinhuang Kang และคณะ [39] กลุ่มของนาโนคอปเปอร์เคลือบบนชั้นฟิล์มของแนฟฟิออน-ซอลูบิไรซ์ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Nafion-solubilized multiwall carbon nanotube: CNTs) โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าแล้วนำไปปรับแต่งผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจากกลาสคาร์บอนที่เรียกว่า คอปเปอร์คาร์บอนนาโนทิวบ์คอมโพสิตเซ็นเซอร์ (Cu-CNTs composite sensor: Cu-CNTs-GCE) ซึ่งใช้ตรวจวัดกลูโคสโดยไม่ใช้เอนไซม์และมีการศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction: XRD) ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry: CV) และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (Electrochemical impedance spectroscopy: EIS) โดยผลทดลองการตรวจวัดกลูโคส จะสามารถตรวจได้ในช่วงความเข้มข้น $7.0 \times 10^7 - 3.5 \times 10^3$ โมลาร์ ด้วยสภาพไว 17.76 ไมโครแอมแปร์เมตรต่อโมลาร์ ที่ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 2.1×10^7 โมลาร์ ภายในเวลาเพียง 5 วินาที ซึ่งคุณสมบัติที่ได้คือ ความไวในการตรวจวัดสูง เสถียรภาพสูง ความเที่ยงตรงในการตรวจวัดที่และตอบสนองได้เร็ว ไม่เกิดสัญญาณรบกวนด้วย โดยจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปทำระบบแอมเพอโรเมตริก ไบโอเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดกลูโคสในตัวอย่างเลือดได้

Christopher Batchelor-McAuley และคณะ [40] ได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงขั้ว 2 ชนิด ซึ่งขั้วชนิดแรกจะใช้ขั้วแอตจ์-เพลน ไพโรไลติกแกรไฟต์ (Edge-plane pyrolytic graphite) โดยอาศัยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Multi-walled carbon nanotubes) และปรับปรุงขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพอกพูนด้วยความดันไอทางเคมี (Chemical vapour deposition: cvd-MWCNTs) ซึ่งภายในจะประกอบด้วยอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์และขั้วชนิดที่สองจะใช้ขั้วเบส-เพลน ไพโรไลติกแกรไฟต์ (Basal-plane pyrolytic graphite) ที่ถูกตรึงด้วยอนุภาคคอปเปอร์ (II) ออกไซด์แล้วปรับปรุงขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคเดียวกันกับขั้วชนิดแรกและจะนำทั้งสองขั้วมาทำการตรวจวัดกลูโคสด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี โดยจากการทดลองจะมีการตรวจวัดสารตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งจะแสดงความเฉื่อยของซับสเตรทที่จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าเมื่อมีความเข้มข้นของกลูโคสที่สูงเพิ่มขึ้นและยังจะพบข้อบกพร่อง ซึ่งจะแสดงตรงที่ขอบของแผ่นแกรไฟต์หรือส่วนปลายสุดของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (โดยกรณีนี้จะเกิดขึ้นบ่อย) ดังนั้น

มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เป็นฉับตรงจะไม่เหมาะสำหรับการวัดกลุโคสด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี

Hui-Xia และคณะ [41] ได้ศึกษาอนุภาคนาโนคอปเปอร์บนผนังมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNT) โดยง่ายและมีประสิทธิภาพในการเริ่มผ่านทางของ polyelectrolyte (polyethylenimine or poly(sodium 4-styrene sulfonate)) ประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่มีโวลเลนตัมบน MWCNT การสร้างลักษณะเฉพาะของนาโนคอมโพสิตโดยทำการศึกษาใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน ทรามมิสชัน อิเล็กตรอนไมโครสโคปี เลือกพื้นที่โดยใช้อิเล็กตรอนดิฟแฟรคชัน เอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนไมโครสโคปี การวิเคราะห์ด้วยความร้อนและอินดักทีลิตีคูเปลดพลาสติก ผลการทดลองจะเห็นว่าอนุภาคนาโนคอปเปอร์มีการกระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวของ MWCNT อนุภาคนาโนสามารถปรับแต่งอย่างง่ายบนขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน โดยใช้ polyelectrolyte เป็นตัวเชื่อม สำหรับขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งเพื่อตรวจสอบกลุโคสด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีและโครโนแอมเพอโรเมตรี อนุภาคนาโนแสดงการตอบสนองได้ดีโดยไม่ใช้เอนไซม์ในการตรวจวัดกลุโคสของอัลคาไลน์และสามารถเป็นระบบเซ็นเซอร์ได้

Min-Jung Song และคณะ [42] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโนแบบดอกไม้คอปเปอร์ออกไซด์ที่ตรวจสอบในการประยุกต์ใช้เอนไซม์น้อยๆในระบบเซ็นเซอร์โดยใช้เทคนิคแอมเพอโรเมตรีในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แผ่นฟิล์มบางอนุภาคนาโนแบบดอกไม้คอปเปอร์ออกไซด์จะอยู่ในรูปแบบปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีของพอยด์คอปเปอร์ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มัลและใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานของวัสดุที่ไม่ใช้เอนไซม์ในระบบเซ็นเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายใต้สภาวะที่เป็นอัลคาไลน์ ความไวของระบบเซ็นเซอร์กับขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโนแบบดอกไม้เท่ากับ 88.4 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิโมลาร์เซนติเมตรกับช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 4.25×10^{-5} ถึง 4×10^{-2} โมลาร์ และขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 0.167 ไมโครโมลาร์ ($S/N = 3$) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าที่ดีในอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรและคุณสมบัติที่มีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโนแบบดอกไม้ไม่มีประสิทธิภาพการทำงานที่สมบูรณ์และมีความไวสูงสำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีเอนไซม์ในระบบเซ็นเซอร์

Xinhuang Kang และคณะ [43] ได้ศึกษาอนุภาคนาโนคริสตัลคอปเปอร์โดยใช้เทคนิคการพอกพูนทางไฟฟ้าบนแผ่นฟิล์มบางของแนฟฟิออนสารละลายมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ปรับแต่งด้วยขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน ได้สร้างเซ็นเซอร์คอปเปอร์ – คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจสอบกลุโคสกับตัวที่ไม่ใช้เอนไซม์ สำหรับทรานสมิสชันอิเล็กตรอนไมโครสโคปีและเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน

ใช้สำหรับคุณลักษณะของการกระจายตัวอนุภาคนาโนคริสเตอ์คอปเปอร์ผสมกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ คอปเปอร์ – คาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกตรวจสอบด้วยลักษณะทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีและอิเล็กโทรเคมีคัลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี ในการศึกษาเบื้องต้นแสดงเซ็นเซอร์ที่ไม่ใช้เอนไซม์ทำงานร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าที่เกิดในปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลูโคสในสภาวะที่เป็นอัลคาไลน์ เซ็นเซอร์ที่ใช้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์กลูโคสในตัวอย่างซีรัมในเลือด เนื่องจากอิเล็กตรอนมีจำนวนมากในกระบวนการออกซิเดชัน ซึ่งเห็นได้ว่าค่าไคเนติกมีค่าคงที่สูงและการดำเนินงานของขั้วไฟฟ้าที่ไม่เปลี่ยนแปลง ช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจสอบกลูโคสเท่ากับ 7.0×10^{-7} ถึง 3.5×10^{-3} โมลาร์ โดยมีความไวสูงเท่ากับ 17.76 ไมโครแอมแปร์มิลลิโมลาร์ ซิดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 2.1×10^{-7} โมลาร์ และเวลาในการตอบสนองอย่างรวดเร็วภายใน 5 วินาที ผลการทดลองยังพบว่าเซ็นเซอร์เป็นระบบที่สามารถตรวจวัดได้ดีและใช้ในระยะเวลาและกำจัดวัฏจักรได้

Xiuying Wang และคณะ [44] ได้ทำการศึกษาวัสดุนาโนคาร์บอนนาโนทิวบ์ปรับแต่งด้วยอนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ อนุภาคนาโนคอปเปอร์ไดออกไซด์ และอนุภาคนาโนคอปเปอร์ โดยวิธีง่ายและการเผาจนกลายเป็นผงที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยการใส่ปริมาณของสารละลายแอมโมเนียและการแช่เพื่อควบคุมผลิตภัณฑ์ จากการปรับแต่งได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุนาโนคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรเคมีคัลแฟร็กชัน สเปกตรัมอินฟราเรด สแกนนิ่งอิเล็กตรอนและทรานซิมิตชันอิเล็กตรอนไมโครสโคปี ตรวจสอบการดูดซับผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคยูวี

2.10.3 การสังเคราะห์เมงกานีสไดออกไซด์ร่วมกับคาร์บอนนาโนทิวบ์

Sang-Bok Ma และคณะ [45] ได้ทำการศึกษา bimesite ชนิดของเมงกานีสไดออกไซด์ที่เคลือบบนคาร์บอนนาโนทิวบ์โดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์และไอออนของเปอร์เมงกานีส ตัวเก็บประจุของ MnO_2/CNT นาโนคอมโพสิตในสารละลายอิเล็กโทรไลต์อินทรีย์ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงกว้าง 1 แอมแปร์ เป็น 250 เฮิร์ตซ์ เทียบกับ 139 มิลลิแอมแปร์เฮิร์ตซ์ บนพื้นฐานทั้งหมดของวัสดุอิเล็กโทรดที่มีตัวกระตุ้นอิเล็กโทรดในวัสดุนั้น ตัวเก็บประจุของ MnO_2 ใน MnO_2/CNT นาโนคอมโพสิตสูงถึง 580 เฮิร์ตซ์ (320 มิลลิแอมแปร์เฮิร์ตซ์) ซึ่งแสดงการใช้ไฟฟ้าที่ดีของ MnO_2 นอกจากนี้ CNTs เป็นตัวที่รับประจุได้สูงของ MnO_2/CNT นาโนคอมโพสิตมาก การทดสอบคุณลักษณะโดยใช้เครื่อง X-ray absorption near-edge structure (XANES) แสดงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของ MnO_2/CNT นาโนคอมโพสิต หลังจากการใช้ heat-treatment

Sang-Bok Ma และคณะ [14] ศึกษาการสังเคราะห์เมงกานีสไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยวิธีการแช่อย่างง่ายของคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์เมงกา

เน็ต กระบวนการสังเคราะห์ตรวจสอบ โดยการสัศย์ไฟฟ้ารีดักชันและค่าพีเอชของสารละลายและการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิซิบิลของสารละลายไอออนเปอร์แมงกานต นอกจากนี้ยังพบว่า CNTs ยังทำหน้าที่เป็นตัว reducing agent และ substrate ที่ต่างชนิดกันของ MnO_2 ในสารละลาย $KMnO_4$ ในการศึกษาคุณลักษณะของ CNTs ก่อนและหลังการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้เทคนิค สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี แสดงการพอกพูนของชั้น MnO_2 และชั้นที่ไม่มี CNT ในพีเอช 7 แต่เป็นแท่งนาโนของ MnO_2 พีเอช 1 และได้ใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อยืนยันชนิดของ MnO_2 เป็น bimesite และเทคนิค ราแมนสเปกโตรสโคปี สำหรับการทนความร้อนของ CNT นั้น ทำการวิเคราะห์โดย thermogravimetric analysis แสดงการเคลือบอย่างสม่ำเสมอของ MnO_2

Jiang Yang และคณะ [46] ศึกษาการไม่ใช้เอนไซม์กลูโคสเซ็นเซอร์ที่ได้พัฒนาโดยใช้ potentiostatically electrodepositing จากสารละลายตั้งต้นผสมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ในการศึกษาลักษณะทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและไซคลิกโวลแทมเมทรี ในระบบเซ็นเซอร์ได้แสดงค่าการนำไฟฟ้าสูงที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Glc(ระบบเซ็นเซอร์กลูโคส) ใน 0.1 โมลาร์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายอัลคาไลน์หลังจากปรับแต่งด้วยอนุภาคนาโนคิวคอปเปอร์ การตอบสนองอย่างรวดเร็วของระบบเซ็นเซอร์คือ (<1 s) และความไวต่อการตอบสนอง 1096 ไมโครแอมแปร์มิลลิโมลาร์เซนติเมตร ช่วงความเป็นเส้นตรงมากกว่า 7.5 มิลลิโมลาร์ และค่าขีดจำกัดการตรวจวัด 1.0 ไมโครโมลาร์ (สัญญาณการตอบรับ/S/N =3) ความจำเพาะเจาะจงต่อ Glc มีมากกว่าในการตรวจสอบหาความเข้มข้นของ Glc ในซีรัมเลือดของมนุษย์

Bin Xu และคณะ [47] ในรายงานนี้ได้ศึกษาระบบเซ็นเซอร์ที่มีความไวสูงของแอมเพอโรเมทริกบนพื้นฐานแมงกานีสไดออกไซด์ปรับแต่งด้วย vertically aligned multi-walled carbon nanotubes ($MnO_2/VACNTs$) เพื่อหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ได้สร้างขั้วไฟฟ้าโดยวิธีการพอกพูนไฟฟ้าสำหรับรูปร่างคุณลักษณะของอนุภาคนาโนคอมโพสิตใช้เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปี สเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานและเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน สำหรับเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โครโนแอมเพอโรเมทรีและอิเล็กโตรเคมีคัลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบทางเคมีไฟฟ้าของคุณสมบัติขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโน $MnO_2/VACNTs$ คอมโพสิต สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโน $MnO_2/VACNTs$ คอมโพสิต ในบอเรนดัมเฟออร์ค่าพีเอช 7.8 ความเข้มข้น 0.20 โมลาร์ ขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโน $MnO_2/VACNTs$ คอมโพสิตแสดงสมการเชิงเส้น $R^2 = 0.998$ ในความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 1.2×10^{-6} โมลาร์ ถึง 1.8×10^{-3} โมลาร์ ความไวต่อการตอบสนองสูงเท่ากับ 1.08×10^6 ไมโครแอมแปร์โมลาร์เซนติเมตร และขีดจำกัดการตรวจวัด 8.0×10^{-7} โมลาร์ (S/N

=3) ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโน $\text{MnO}_2/\text{VACNTs}$ คอมโพสิต ทนทานสูงต่อเกลืออินทรีย์ทั่วไป และสารชีวโมเลกุลบางชนิดเช่น กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดยูริก และ D-(+) กลูโคส ฯลฯ นอกจากนี้ระบบเซ็นเซอร์อยู่บนพื้นฐานขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโน $\text{MnO}_2/\text{VACNTs}$ คอมโพสิต ถูกนำมาใช้สำหรับการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในนมกับความแม่นยำสูงแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ประโยชน์ที่มีประสิทธิภาพดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Disodium hydrogen phosphate; Na_2HPO_4) มวลโมเลกุล 141.96 g/mol ความบริสุทธิ์ 99% บริษัท Carlo Erba.
2. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate; KH_2PO_4) มวลโมเลกุล 136.09 g/mol ความบริสุทธิ์ 99.5% บริษัท Carlo Erba.
3. ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas; N_2) ความบริสุทธิ์ 99.999% (v/v) บริษัท TIG, Thailand.
4. โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride; KCl) มวลโมเลกุล 74.55 g/mol ความบริสุทธิ์ 99.0-100.5% บริษัท Analytical Univer.
5. มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Multi-walled carbon nanotube; MWCNT เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 110 – 170 นาโนเมตร ยาว 5 – 9 ไมโครเมตร) บริษัท Sigma-Aldrich.
6. แมงกานีส (II) อะซิเตตเตตระไฮเดรต (Manganese (II) acetate tetrahydrate; $(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2\text{Mn}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) มวลโมเลกุล 245.09 g/mol ความบริสุทธิ์ $\geq 99\%$ บริษัท Sigma-Aldrich.
7. โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (Potassium hexacyanoferrate; $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) มวลโมเลกุล 329.26 g/mol ความบริสุทธิ์ 99% บริษัท MERCK.
8. คอปเปอร์ (II) อะซิเตตโมโนไฮเดรต (Copper (II) acetate monohydrate; $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) มวลโมเลกุล 199.65 g/mol ความบริสุทธิ์ $>99\%$ บริษัท Carlo Erba.
9. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) ความเข้มข้น 30% (w/v) บริษัท Fisher Scientific.UK.
10. เอ็น, เอ็น-ไดเมทิลฟอมาไมด์ (N, N-dimethylformamide; DMF) ความบริสุทธิ์ 99.8% บริษัท Carlo Erba.
11. สารละลายแอมโมเนีย (Ammonia solution; $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 30% บริษัท Carlo Erba.
12. เอทานอล (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ความหนาแน่น 0.79 g/cm³ มวลโมเลกุล 46.07 g/mol ความบริสุทธิ์ 99.5% บริษัท Carlo Erba.
13. กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3) ความเข้มข้น 70% บริษัท AJAX Finechem.
14. กรดซัลฟูริก (Sulphuric acid; H_2SO_4) ความเข้มข้น 98% บริษัท Mallinckrodt.
15. อลูมิเนียมออกไซด์ (Alumimum oxide; Al_2O_3) มวลโมเลกุล 101.94 g/mol บริษัท BDH Laboratory Supplies.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) มวลโมเลกุล 36.46 g/mol ความบริสุทธิ์ 36.5% (v/v) บริษัท Carlo Erba.
17. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) มวลโมเลกุล 40.00 g/mol ความบริสุทธิ์ 98% (w/w) Analytical reagent บริษัท RANKEM.

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน
2. ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน
3. เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า (Autolab Potentiostat) รุ่น PGSTAT20 บริษัท Ecochemie, Switzerland.
4. เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic bath) รุ่น Tramsonic 570/H บริษัท ELMA
5. คู่มือสารเคมี
6. เครื่องชั่งละเอียด 5 ตำแหน่ง (5-Decimal balance); Sartorius Germany รุ่น BP 210 D บริษัท Scientific Promotion ประเทศไทย
7. เครื่องทำน้ำปราศไออน รุ่น Milli-Q (Milford, MA, USA)
8. เครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมแท่งกวน รุ่น 728 Stirrer บริษัท Ecochemie ประเทศไทย
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (Thai Microelectronics Center, TMEC)
10. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD) รุ่น Bruker AXS Model D8 Discover ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11. เครื่องวัดพีเอช Methrohm รุ่น 716 DMS Titrino ของบริษัท Ecochemie ประเทศไทย
12. ไมโครปิเปตต์ (Micropipette) ของบริษัท Vipro

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

1. หมึกซิลเวอร์: Electrodag 479SS, Acheson USA
2. หมึกคาร์บอน: Electrodag PF-407C, Acheson USA
3. หมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คัลโรด: Electrodag 7019, Acheson
4. หมึกพิมพ์สีน้ำเงิน เบอร์ PAB 626: Chaiyabon Brother (Thailand)
5. แผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดแข็ง (PVC Rigid Sheet) หนา 0.4 มิลลิเมตร
6. ยางซิลิโคน
7. ผ้าสกรีนเบอร์ 140T
8. เฟรมสกรีนสำหรับพิมพ์สกรีนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

เตรียมแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC Rigid sheet) โดยตัดให้มีขนาดตามต้องการของเฟรมสกรีน (4×4 นิ้ว) เช็ดแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ให้สะอาดจากนั้นล้างด้วยเอทานอล ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์มาทำการสกรีนชั้นต่างๆ ตามลำดับ ดังนี้

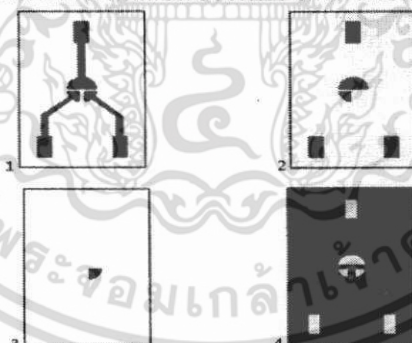
1. ทำการสกรีนลายขั้วนำไฟฟ้า (Conducting track) ด้วยหมึกซิลเวอร์ (Silver Ink) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายในหมึกซิลเวอร์ (Silver Ink)

2. ทำการสกรีนลายขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) และลายขั้วนำไฟฟ้า (Conducting track) ด้วยหมึกคาร์บอน (Carbon Ink) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายในหมึกคาร์บอน (Carbon Ink)

3. ทำการสกรีนลายขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ด้วยหมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver/Silver chloride Ink) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายในหมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver/Silver chloride Ink)

4. ทำการสกรีนลายฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ด้วยหมึกพิมพ์สีน้ำเงินเบอร์ PAB 626 นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายในหมึกพิมพ์สีน้ำเงิน

หมายเหตุ: ก่อนใช้งานทำการคัดเลือกขั้วไฟฟ้า โดยการเช็คลายวงจรด้วยมัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.1 ลายสกรีนชั้นต่างๆ ตามลำดับ

1. ลายของเส้นวงจรสกรีนด้วยหมึกเงิน
2. ชั้นของหมึกคาร์บอน
3. ชั้นของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงสกรีนด้วยหมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
4. ชั้นของฉนวนไฟฟ้าสกรีนด้วยหมึกพิมพ์สีน้ำเงิน เบอร์ PAB 626

ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนคือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Ag/AgCl electrode) และ ขั้วไฟฟ้าช่วย (carbon ink). ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเตรียมสาร

3.5.1. การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.10 โมลาร์ ที่มีค่าพีเอช (pH) 7.0 ด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) วิธีการเตรียมดังภาคผนวก ก.

3.6 การล้างมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ซังมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 5.00 กรัม เติมกรดไนตริกต่อกรดซัลฟูริกในอัตราส่วน 60:20 นำไปกระจายตัวด้วยเครื่อง ultrasonic bath เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นใช้น้ำปราศจากไอออนล้างให้ได้ค่าพีเอช 7.0 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.7 การสังเคราะห์คอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.7.1 การสังเคราะห์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ซังแมงกานีส (II) อะซิเตตเตรไฮเดรต 0.06 มิลลิกรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 5.00 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน เติมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 1.00 มิลลิลิตร จากนั้นซังมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 10 มิลลิกรัม เติมในน้ำปราศจากไอออน 5.00 มิลลิลิตร จะได้สารแขวนลอยของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ นำมาผสมรวมกับสารละลายแมงกานีส (II) อะซิเตตเตรไฮเดรต ให้เข้ากัน นำของผสมไปกระจายตัวด้วยเครื่อง ultrasonic bath เป็นเวลา 30 นาที แล้วแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 17 ชั่วโมง สารที่ได้จะตกตะกอน ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ค่าพีเอช 7.0 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผงที่ได้นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก็จะได้ออกไซด์ของแมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.7.2 การสังเคราะห์คอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ซังคอปเปอร์ (II) อะซิเตตโมโนไฮเดรต 0.04 มิลลิกรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 5.00 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน เติมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 1.00 มิลลิลิตร จากนั้นซังมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 10 มิลลิกรัม เติมในน้ำปราศจากไอออน 5.00 มิลลิลิตร จะได้สารแขวนลอยของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ นำมาผสมรวมกับสารละลายคอปเปอร์ (II) อะซิเตตโมโนไฮเดรต ให้เข้ากัน นำของผสมไปกระจายตัวด้วยเครื่อง ultrasonic bath เป็นเวลา 30 นาที แล้วแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 17 ชั่วโมง สารที่ได้จะตกตะกอน ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ค่าพีเอช 7.0 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผงที่ได้นำไปเผา

ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก็จะได้ผงของคอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.7.3 การสังเคราะห์คอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ชั่งแมงกานีส (II) อะซิเตตเตรไฮเดรต 0.06 มิลลิกรัม และชั่งคอปเปอร์อะซิเตต 0.04 มิลลิกรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 10.00 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน เติมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 1.00 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 10 มิลลิกรัม เติมในน้ำปราศจากไอออน 5.00 มิลลิลิตรจะได้สารแขวนลอยของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ นำมาผสมรวมกับสารละลายคอปเปอร์ (II) อะซิเตต โมโนไฮเดรตและแมงกานีส (II) อะซิเตตเตรไฮเดรต ให้เข้ากัน นำของผสมไปกระจายตัวด้วยเครื่อง ultrasonic bath เป็นเวลา 30 นาที แล้วแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 17 ชั่วโมง สารที่ได้จะตกตะกอน ล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ค่าพีเอช 7.0 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผงที่ได้นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก็จะได้ผงของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.8 การปรับแต่งขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน

1. นำผ้าสักกะหลาดตรึงบนแผ่นกระจกนาฬิกาแล้วฉีดน้ำปราศจากไอออนให้เปียกทั่วผ้าสักกะหลาด เทผงซัลฟิวเรียมออกไซด์ลงไปเล็กน้อย นำขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนมาขัดโดยหมุนขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนตามเข็มนาฬิกาประมาณ 1 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนซ้ำให้แห้ง หลังจากนั้นนำไป sonicated ในน้ำปราศจากไอออนประมาณ 1 นาที เพื่อล้างผงซัลฟิวเรียมออกไซด์ออกให้หมดก่อนนำไปใช้งาน

2. ชั่งคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มา 1.00 มิลลิกรัม ในสารละลายเอี้น, เอี้น-ไดเมทิลฟอมาไมด์หรือดีเอ็มเอฟ 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกระจายตัวโดยใช้เครื่อง ultrasonic bath เป็นเวลา 30 นาที

3. นำสารแขวนลอยในข้อ 2. มา 10.00 ไมโครลิตร หยดบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนขนาด 5 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร × 2 มิลลิเมตร แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการใช้งาน

4. สำหรับแมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และคอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เตรียมเหมือนกัน

สรุปขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่ง ดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode)

- 1.1 GCE
- 1.2 CuO/GCE
- 1.3 Mn_3O_4 /GCE
- 1.4 MWCNT/GCE
- 1.5 CuO-MWCNT/GCE
- 1.6 Mn_3O_4 -MWCNT/GCE
- 1.7 $CuMn_2O_4$ -MWCNT/GCE

2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl Electrode)

3. ขั้วไฟฟ้าช่วยคาร์บอนอิงค์ (Carbon ink Electrode)

3.9 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้

3.9.1 ศึกษาโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

นำมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ คอปเปอร์ออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ คอปเปอร์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มาศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

3.9.2 ศึกษาลักษณะรูปร่างของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

นำมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ คอปเปอร์ออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ คอปเปอร์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มาศึกษาลักษณะรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.10 ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่ง

ทำการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งแล้วเพื่อใช้ตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.10.1 ทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยการวัดกระแสไฟฟ้าเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ

สารละลายที่ใช้ คือ 10.0 มิลลิโมลาร์ โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 และโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ อัตราการสแกนที่ 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

3.11 ทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ศึกษาการใช้งานขั้วไฟฟ้าปรับแต่งสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีและเทคนิคแอมเพอโรเมทรี

3.11.1 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะศึกษาโดยการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ด้วยขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$

3.11.2 ศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ทำการศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่ง โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สำหรับตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

3.11.3 ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมตรี (Linear range)

ทำการศึกษาช่วงความเข้มข้นความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมตรี ที่ศักย์ไฟฟ้า +0.500 โวลต์ ทำการปิเปตต์สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 จำนวน 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งต่างๆ ปั่นกวนสารละลายตลอดเวลาขณะทำการทดลอง เมื่อถึงวินาทีที่ 25 ปิเปตต์สารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร เติมทุกๆ 25 วินาที จนถึงเวลา 500 วินาที

3.11.4 ศึกษาอัตราการสแกน

การศึกษ้อัตราการสแกนจะศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าอัตราการสแกนที่ให้แกขั้วไฟฟ้าใช้งาน สารละลายคือสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราการสแกน 10, 25, 50, 100, 250, 500 และ 1000 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

3.11.5 ศึกษาขีดจำกัดในการตรวจพบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Limit of detection)

การศึกษาศักยภาพในการตรวจพบ (Limit of detection) สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยวัดกระแสไฟฟ้าของสารละลายแบบลงค์ (ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0) ทั้งหมด 5 ครั้ง ($n=10$) และนำข้อมูลจากกราฟมาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดในการตรวจพบ

3.11.6 ค่าการทำซ้ำ (Reproducibility)

การศึกษาค่าการทำซ้ำ (Reproducibility) ทำการปิเปตต์สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 จำนวน 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ ปั่นกวนสารละลายตลอดเวลาขณะทำการทดลอง เมื่อถึงวินาทีที่ 25 ปิเปตต์สารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร เติมทุกๆ 25 วินาที จนถึงเวลา 500 วินาที และทำซ้ำ 5 ซ้ำ

3.11.7 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า (Life time)

การศึกษายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ +0.500 โวลต์ ทำการปิเปตต์สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 จำนวน 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ ปั่นกวนสารละลายตลอดเวลาขณะทำการทดลอง เมื่อถึงวินาทีที่ 25 ปิเปตต์สารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร เติมทุกๆ 25 วินาที จนถึงเวลา 500 วินาที และทำซ้ำในวันที่ 0, 7, 15, 20, 30, 60

3.11.8 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสารตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง และน้ำยาข้อมผสม 2 ตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาตรวจวัดด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ +0.500 โวลต์ ทำการปิเปตต์สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 จำนวน 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ ปั่นกวนสารละลายตลอดเวลาขณะทำการทดลอง เมื่อถึงวินาทีที่ 25 ปิเปตต์สารตัวอย่างลงไป 10.00 ไมโครลิตร พอถึงวินาทีที่ 50 ปิเปตต์สารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร เติมทุกๆ 25 วินาที จนถึงเวลา 500 วินาที

3.11.9 การวิเคราะห์ค่าร้อยละการกลับคืน (%Recovery)

การคำนวณหาค่าร้อยละการกลับคืนของการวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากสารตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง และน้ำยาข้อมผสม 2 ตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาตรวจวัดด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ +0.500 โวลต์ ทำการปิดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 จำนวน 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงใน บีกเกอร์ที่มีขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ ปั่นกวนสารละลายตลอดเวลาขณะทำการทดลอง เมื่อถึง วินาทีที่ 25 ปิดเตีสารตัวอย่างลงไป 10.00 ไมโครลิตร พอถึงวินาทีที่ 50 ปิดเตีสารละลาย มาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร เดิม ทุกๆ 25 วินาที จนถึงเวลา 500 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

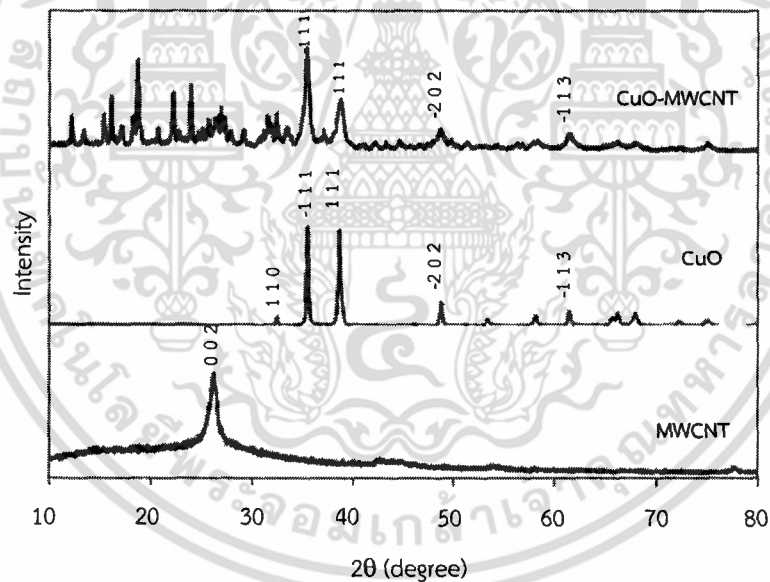
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้

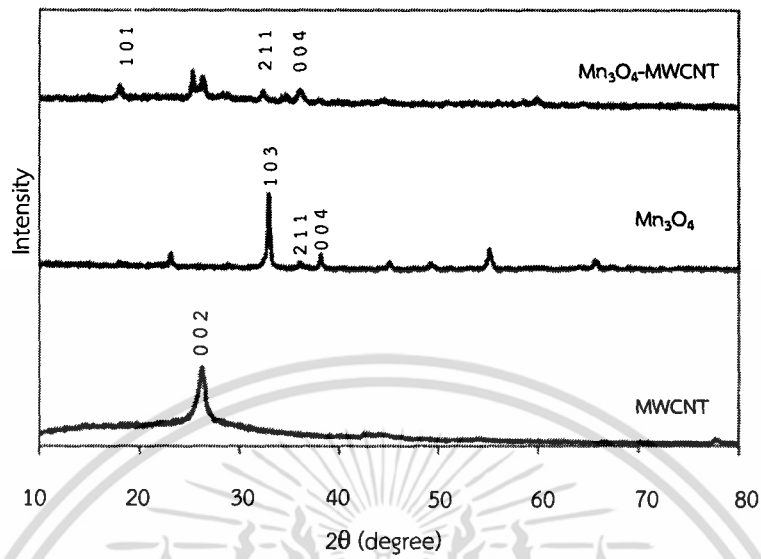
4.1.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ คอปเปอร์ออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะดังรูปที่ 4.1

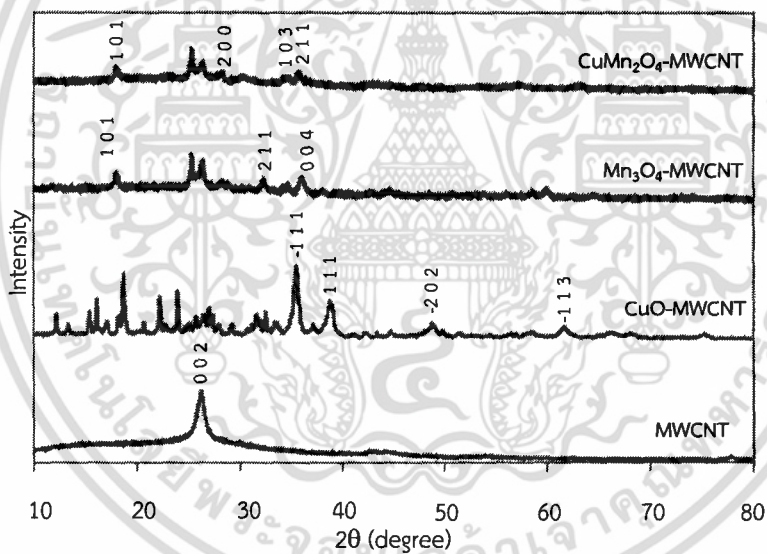


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.1 ภาพ XRD ของอนุภาคต่างๆ

(ก) MWCNT, CuO, CuO-MWCNT

(ข) MWCNT, Mn_3O_4 , Mn_3O_4 -MWCNT

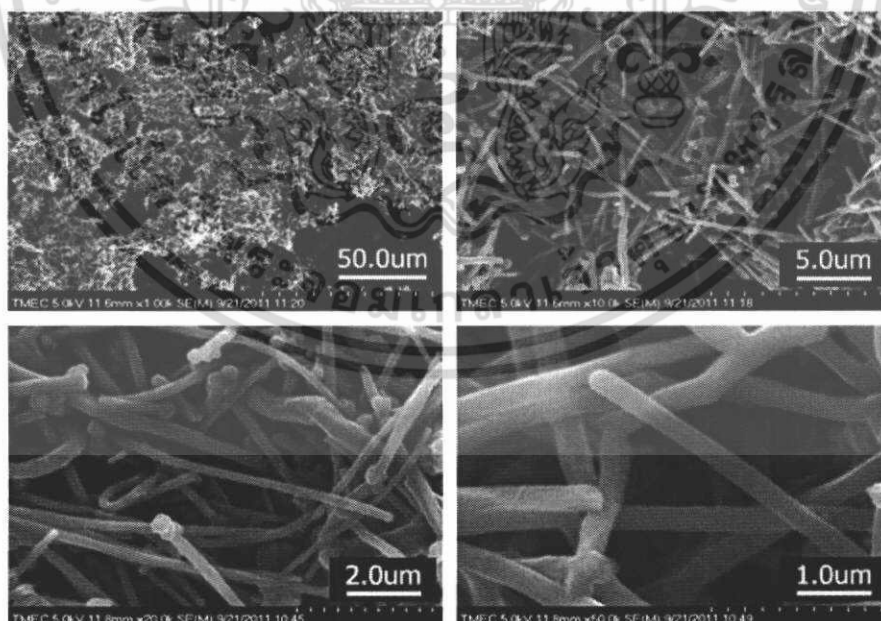
(ค) MWCNT, CuO-MWCNT, Mn_3O_4 -MWCNT, $CuMn_2O_4$ -MWCNT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 (ก) จะเห็นได้ว่าฟีด MWCNT มีมุมตกกระทบ 2 θ เท่ากับ 26.24° (0 0 2) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบแกรไฟต์ ฟีด CuO มีมุมตกกระทบ 2 θ เท่ากับ 32.50° (1 1 0), 35.54° (-1 1 1), 38.68° (1 1 1), 48.81° (-2 0 2), 61.56° (-1 1 3) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบมอนอคลินิก (monoclinic) ฟีด CuO-MWCNT มีมุมตกกระทบ 2 θ เท่ากับ 35.54° (-1 1 1), 38.68° (1 1 1), 48.81° (-2 0 2), 61.56° (-1 1 3) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบมอนอคลินิก (monoclinic) (ข) ฟีด Mn₃O₄ มีมุมตกกระทบ 2 θ เท่ากับ 32.98° (1 0 3), 36.13° (2 1 1), 38.25° (0 0 4) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) ฟีด Mn₃O₄-MWCNT มีมุมตกกระทบ 2 θ เท่ากับ 18.03° (1 0 1), 32.98° (2 1 1), 36.13° (0 0 4) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) (ค) ฟีด CuMn₂O₄-MWCNT มีมุมตกกระทบ 2 θ เท่ากับ 18.01° (1 0 1), 30.33° (2 0 0), 34.76° (1 0 3), 36.03° (2 1 1) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเทตระโกนอล (Tetragonal)

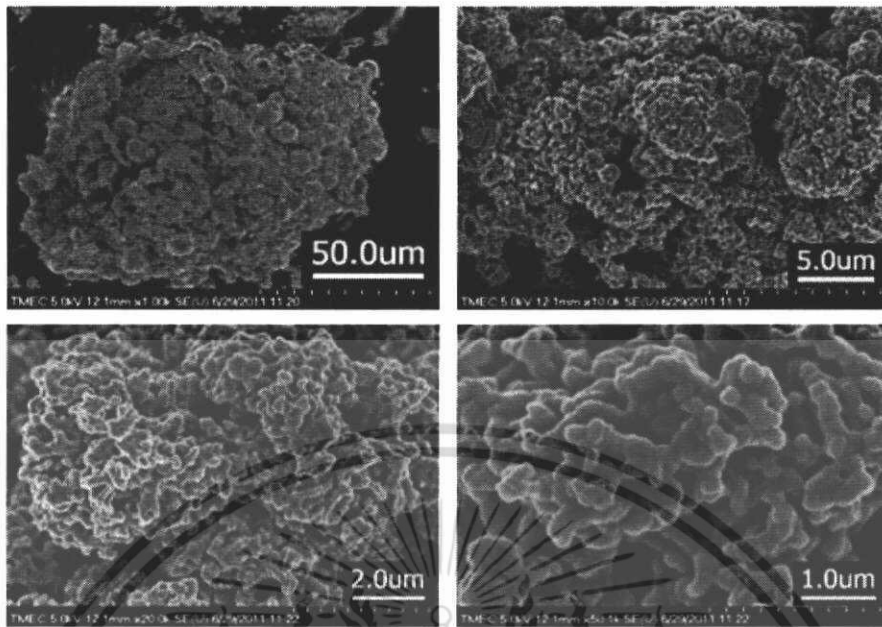
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะรูปร่างของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ คอปเปอร์ออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ และคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ มีลักษณะดังรูปที่ 4.2

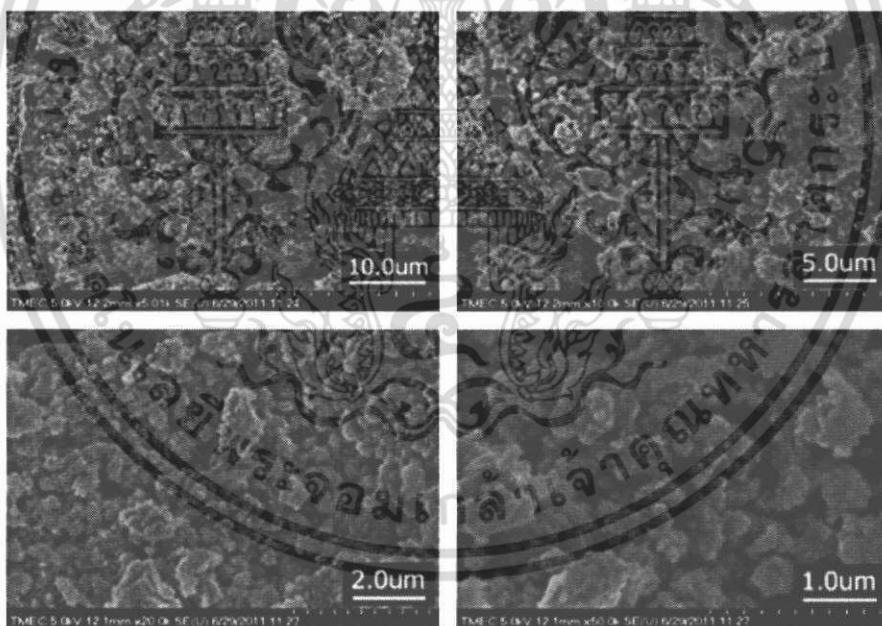


(ก) ภาพ FE-EM ของ MWCNT กำลังขยาย 1000, 10000, 20000 และ 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

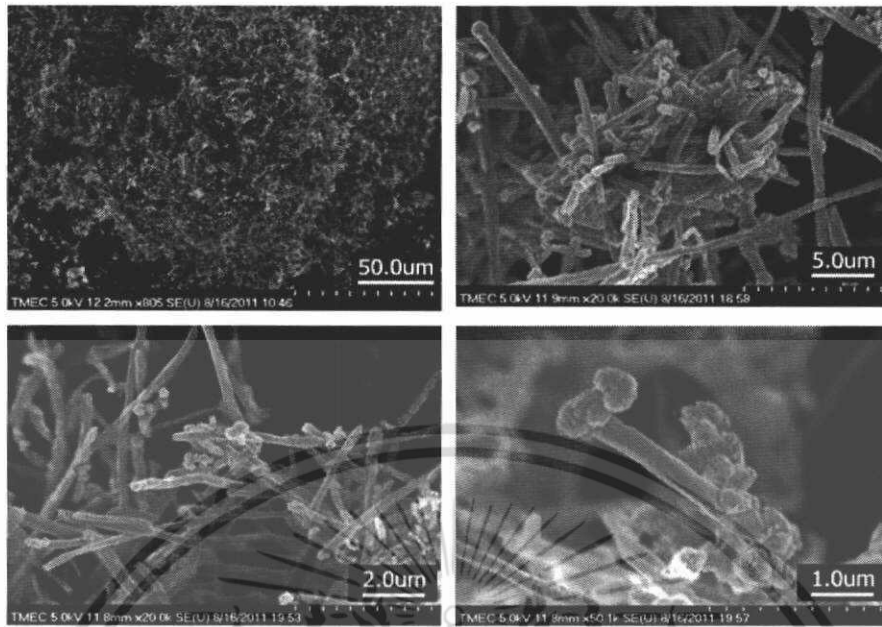


(ข) ภาพ FE-SEM ของ CuO กำลังขยาย 1000, 10000, 20000 และ 50000 เท่า

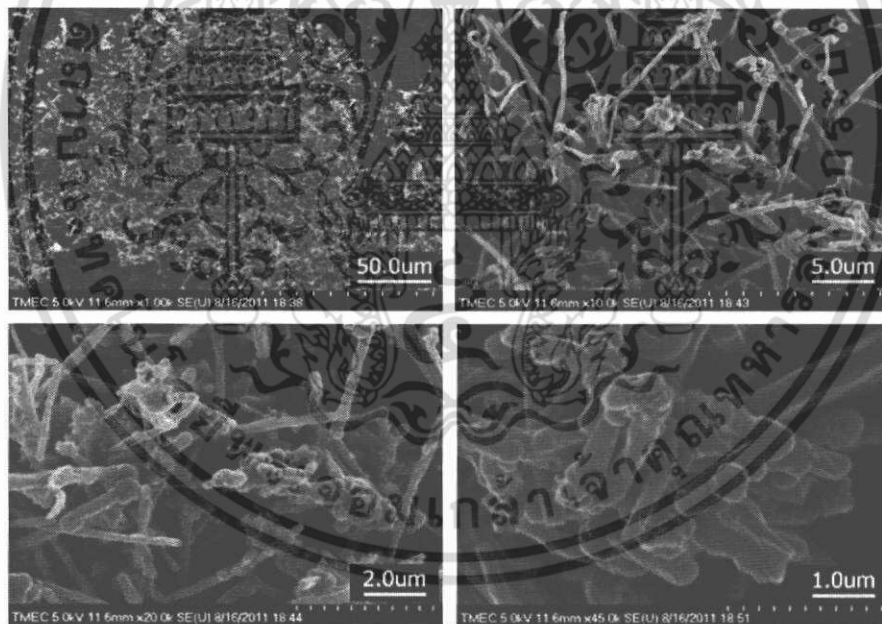


(ค) ภาพ FE-SEM ของ Mn₃O₄ กำลังขยาย 1000, 10000, 20000 และ 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

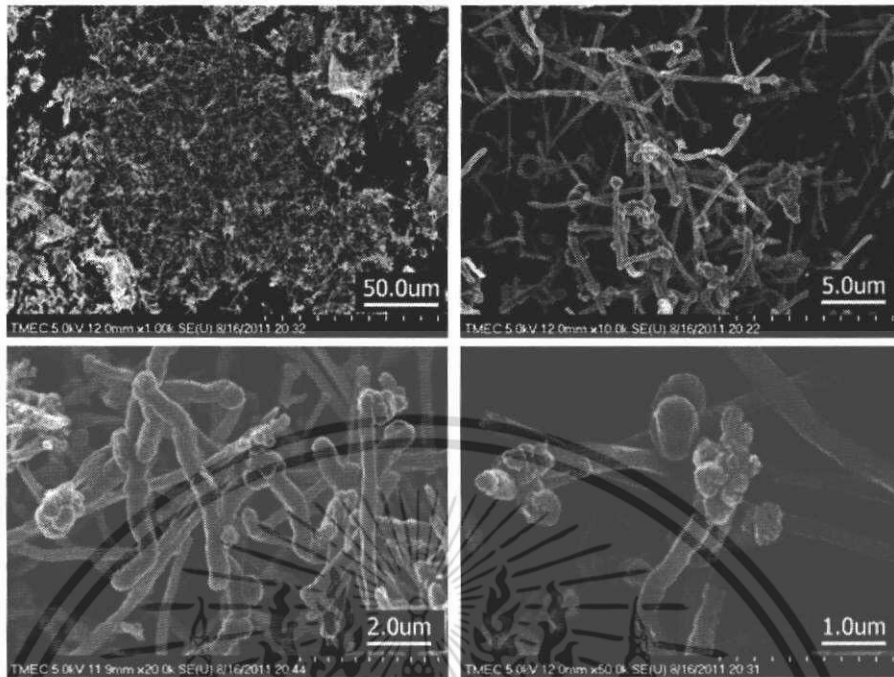


(ง) ภาพ FE-SEM ของ CuO-MWCNT กำลังขยาย 1000, 10000, 20000 และ 50000 เท่า



(จ) ภาพ FE-SEM ของ Mn_3O_4 -MWCNT กำลังขยาย 1000, 10000, 20000 และ 50000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) ภาพ FE-SEM ของ $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT}$ กำลังขยาย 1000, 10000, 20000 และ 50000 เท่า

รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (ก) MWCNT (ข) CuO (ค) Mn_3O_4 (ง) CuO-MWCNT (จ) $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{-MWCNT}$ (ฉ) $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT}$

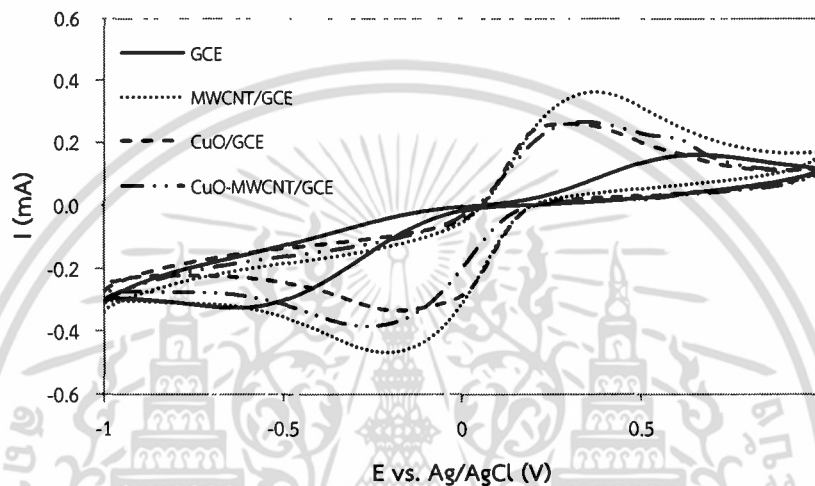
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า (ก) MWCNT นั้นเป็นท่อที่มีความเส้นตรงไม่โค้งไม่งอหลังจากล้างมัลติวอลส์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ข) CuO นั้นจับตัวเป็นกลุ่มก้อนไม่มีความเป็นผลึก (ค) Mn_3O_4 นั้นจับตัวเป็นกลุ่มก้อนไม่มีความเป็นผลึก (ง) CuO-MWCNT นั้นจับตัวเป็นก้อนอยู่บนมัลติวอลส์คาร์บอนนาโนทิวบ์และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (จ) $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{-MWCNT}$ นั้นจับตัวเป็นก้อนอยู่บนมัลติวอลส์คาร์บอนนาโนทิวบ์และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (ฉ) $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT}$ นั้นจับตัวเป็นก้อนอยู่บนมัลติวอลส์คาร์บอนนาโนทิวบ์และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

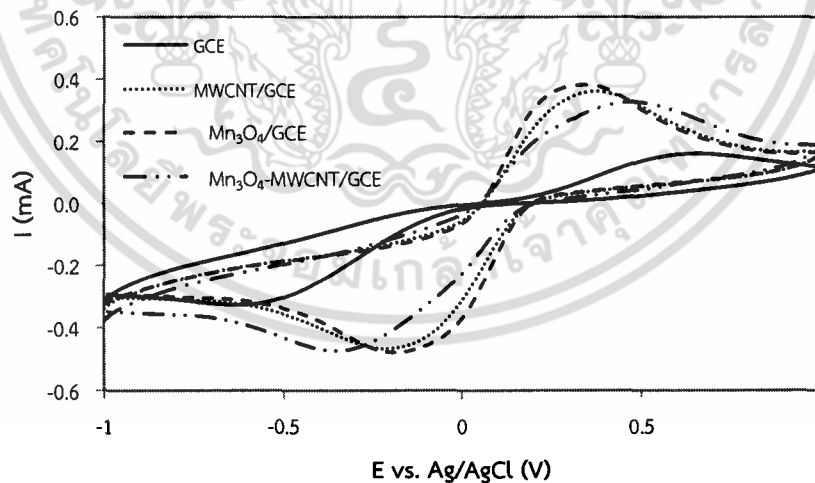
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งได้

4.2.1 ผลการศึกษาไซคลิกโวลแทมเมตรี

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งต่างๆ ในสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3

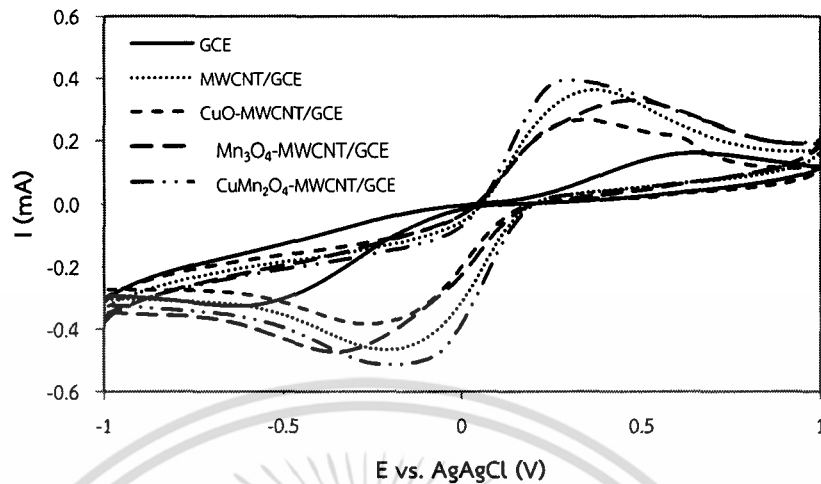


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

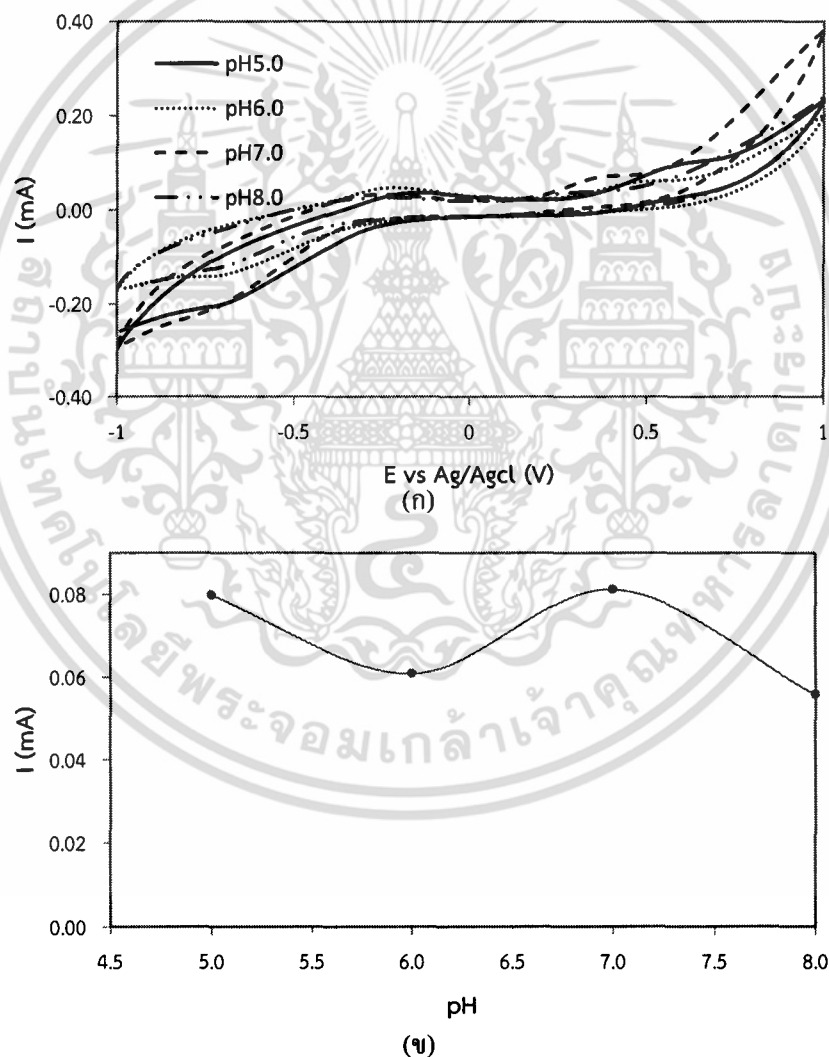
รูปที่ 4.3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งต่างๆ สำหรับตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 และโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.0 โมลาร์ โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกนที่ 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งพบว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ เมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสของพีคที่ได้จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมแสดงให้เห็นว่าขั้ว MWCNT/GCE สูงกว่า ขั้ว GCE, ขั้ว CuO-MWCNT/GCE ให้กระแสสูงกว่าขั้ว CuO/GCE, ขั้ว Mn_3O_4 /GCE สูงกว่าขั้ว Mn_3O_4 -MWCNT/GCE และ ขั้ว $CuMn_2O_4$ -MWCNT/GCE ให้กระแสสูงกว่าขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งและขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน เมื่อพิจารณาแล้วจึงเลือกขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพราะให้กระแสสูงกว่าขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยอื่นๆ

4.3 ผลการทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.3.1 ผลการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลจากการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ โดยเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอช 5.0, 6.0, 7.0 และ 8.0 โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ดังรูปที่ 4.4 (ก)



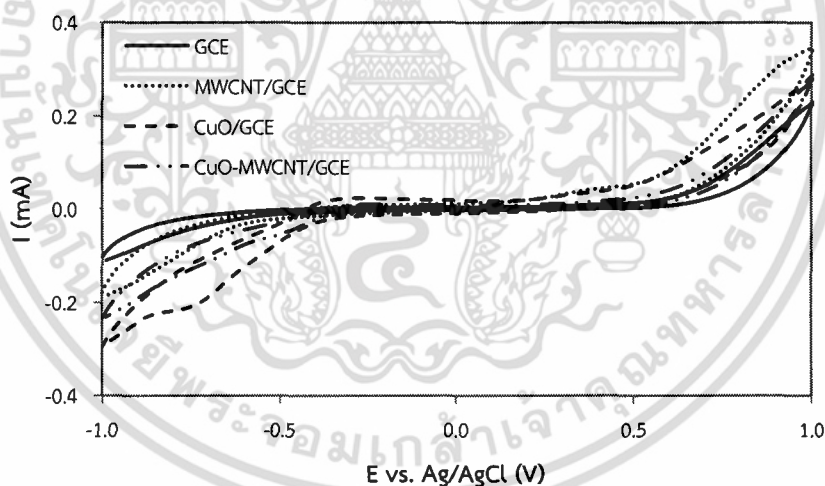
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 (ก) ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ ที่ค่าพีเอชต่างๆ สำหรับการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับค่าพีเอชต่างๆ

จากการพิจารณาไชคลิกโวลแทมโมแกรมค่าพีเอชต่างๆ ให้พีคออกซิเดชันและรีดักชันของสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์มีค่าความเป็นกลางจะให้กระแสออกซิเดชันสูงกว่าแล้วนำมาพลอตความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับค่าพีเอชพบว่าค่าพีเอชที่ 7.0 ให้กระแสที่สูงที่สุด ค่าพีเอชนี้เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

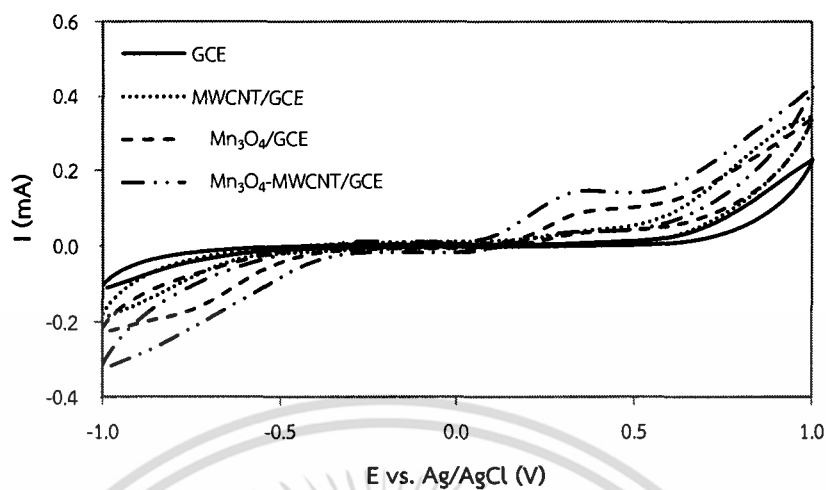
4.3.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าต่างๆ สำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลจากการศึกษาการเปรียบเทียบการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งต่างๆ โดยใช้เทคนิคไชคลิกโวลแทมเมตรี ดังรูปที่ 4.5

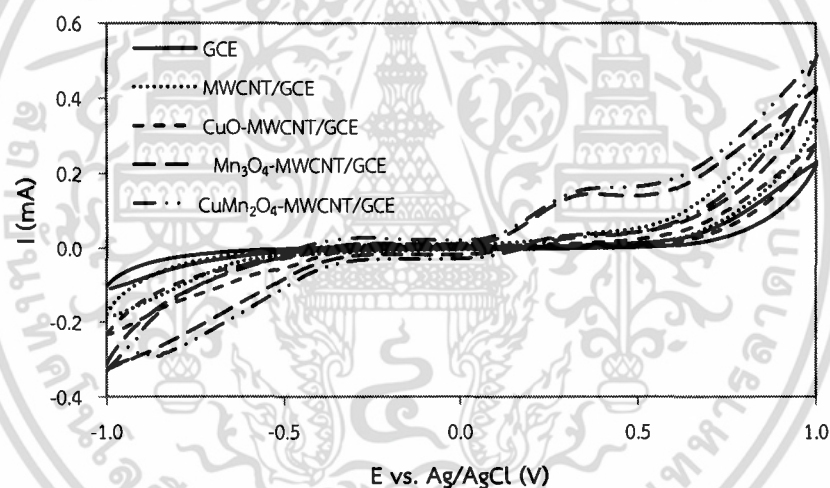


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

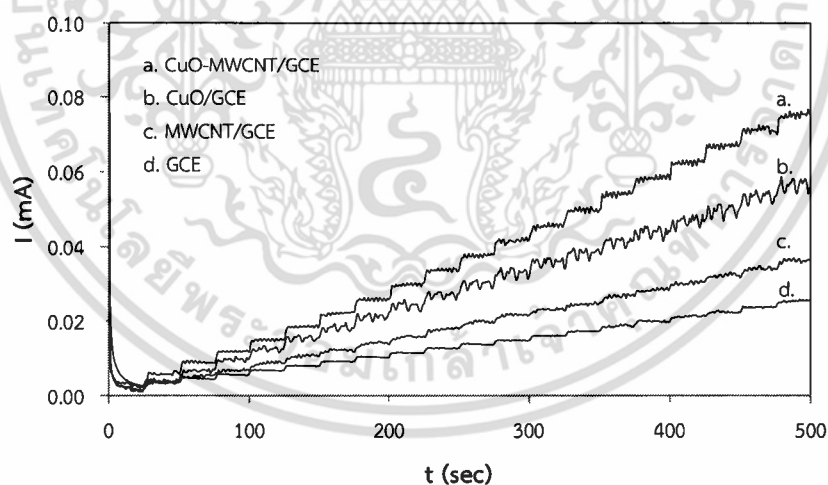
รูปที่ 4.5 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าต่างๆ สำหรับตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

จากกราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรม แสดงความสัมพันธ์ของกระแสกับศักย์ไฟฟ้า พบว่า (ก) ขั้ว MWCNT ให้กระแสที่สูงกว่าขั้ว GCE, ขั้ว CuO/GCE, ขั้ว CuO-MWCNT/GCE เนื่องจากเป็นดัวนาไฟฟ้าได้ดี (ข) ขั้ว $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ ให้กระแสสูงกว่าขั้ว GCE, MWCNT/GCE, ขั้ว $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{/GCE}$

เนื่องจาก Mn_3O_4 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ MWCNT เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี (ก) ขั้ว $CuMn_2O_4$ -MWCNT/GCE ให้กระแสสูงกว่าขั้ว GCE, ขั้ว MWCNT/GCE, ขั้ว CuO-MWCNT/GCE, ขั้ว Mn_3O_4 -MWCNT/GCE เนื่องจากสารทั้ง 3 ตัวเมื่อผสมกันแล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ประมาณ +0.350 โวลต์ ในการทดลองด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีจึงใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ +0.500 โวลต์ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาได้อย่างเต็มที่และจะได้สัญญาณที่มาก

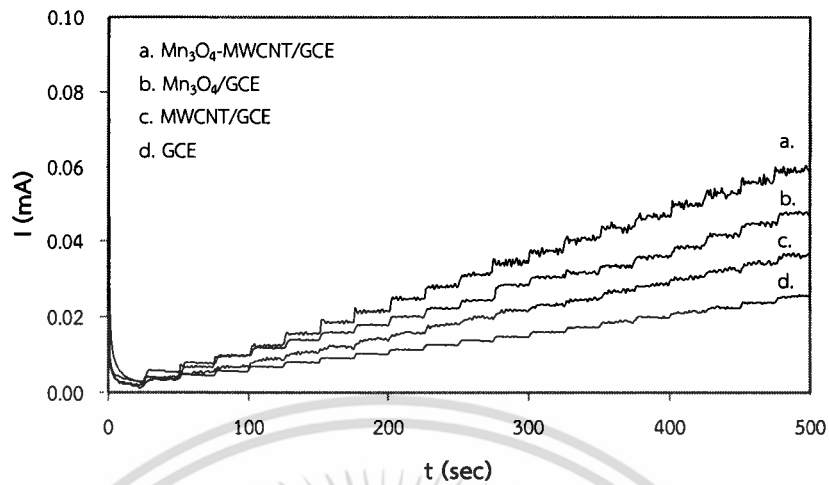
4.3.3 ผลศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี (Linear range)

ผลจากการศึกษาช่วงความเข้มข้นความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ +0.500 โวลต์ ทำการเปิดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 จำนวน 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งต่างๆ ปั่นกวนสารละลายตลอดเวลาขณะทำการทดลอง เมื่อถึงวินาทีที่ 25 เปิดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร เดิมทุกๆ 25 วินาที จนถึงเวลา 500 วินาที ดังรูปที่ 4.6

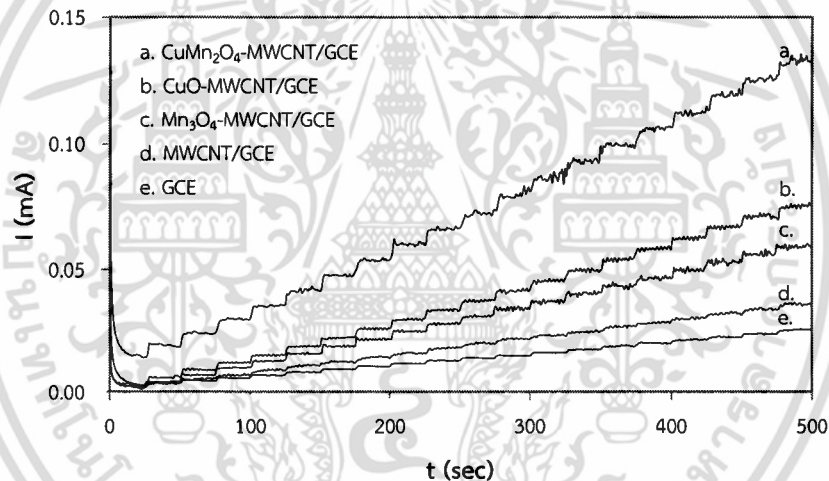


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



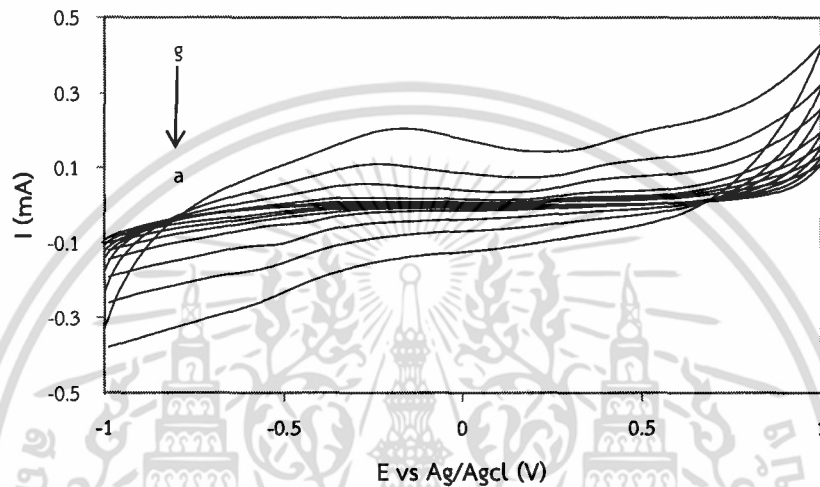
(ค)

รูปที่ 4.6 แอมเพอโรแกรมเปรียบเทียบระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างๆด้วยศักย์ไฟฟ้า +0.500 โวลต์

จากแอมเพอโรแกรม จะเห็นได้ว่าขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งขึ้นนั้นให้กระแสที่สูงกว่าขั้วไฟฟ้า GCE เมื่อนำค่ากระแสมาพลอตกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะได้ช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟช่วงตั้งแต่ 20 – ไม่ต่ำกว่า 380 ไมโครโมลาร์ จึงสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งขึ้นด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ค่ากระแสสูงที่สุดกว่าขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งอื่นๆ และขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนเปล่า และพบว่าขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ จะมีความไวมากที่สุด ดังตารางที่ 4.1

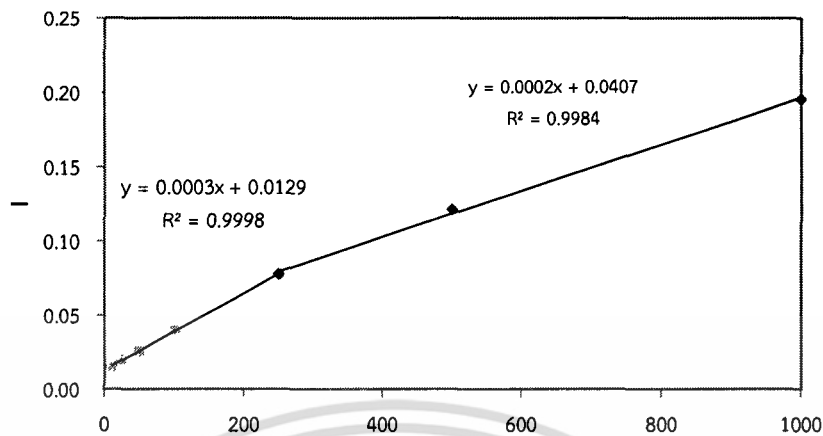
4.3.4 ผลการศึกษาอัตราการสแกน

ผลจากการศึกษาอัตราการสแกนของสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ค่าพีเอช 7.0 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์เมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังรูปที่ 4.7

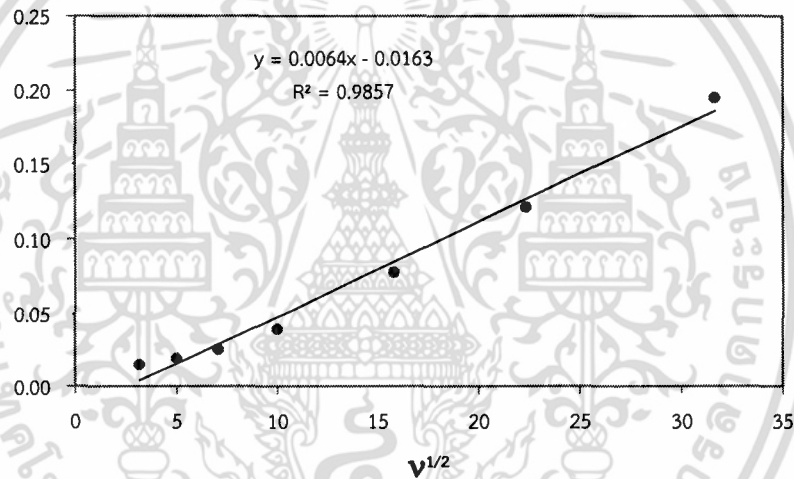


รูปที่ 4.7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้า $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ ในสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 ที่อัตราการสแกน (a) 10, (b) 25, (c) 50, (d) 100, (e) 250, (f) 500 และ (g) 1000 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์

เมื่อพิจารณาจากกราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าพีคการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามอัตราการสแกนเมื่อนำค่ากระแสที่ได้มาพลอตกับอัตราการสแกนถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่าเกิดกระบวนการเป็นแบบ Surface-control ดังรูปที่ 4.8 (ก) แต่เมื่อนำค่ากระแสพลอตกับรากที่สองของอัตราการสแกนถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบ Diffusion-control ดังรูปที่ 4.8 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับอัตราการสแกน (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับรากที่สองอัตราการสแกน ของสารละลายมาตรฐาน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0

จากรูปที่ 4.8 ขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งขึ้นมานั้นสารผลิตภัณฑ์จะติดอยู่ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ 2.12 ในบทที่ 2 ดังนั้นขั้วไฟฟ้าที่เราปรับแต่งขึ้นเมื่อพิจารณาจากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับอัตราการสแกนดังรูปที่ 4.8 (ก) และรูปที่ 4.8 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับรากที่สองอัตราการสแกน เมื่อพลอตค่ากระแสกับอัตราการสแกนจะให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งแนวโน้มความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์นี้บอกให้ทราบว่ากระแสที่วัดได้เป็นกระแสที่

เกิดแบบ surface control คือปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดช้าจนกลายเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยา เพราะว่าไอออน โมเลกุลหรืออนุภาคของ Electroactive species ที่เคลื่อนที่ได้เร็วพอๆ กับการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจึงถูกควบคุม โดยความเร็วของปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

4.3.5 ผลการศึกษาขีดจำกัดในการตรวจพบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Limit of detection)

ผลการศึกษาขีดจำกัดในการตรวจวัด (Limit of detection) ของการตรวจพบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยทำการหาค่าจากกราฟมาตรฐาน นำค่ากระแสที่ได้มาหาค่าสัญญาณรบกวน ซึ่งคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและนำค่าความเข้มข้นและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไปคำนวณหาขีดจำกัดในการตรวจพบสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าต่างๆของการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่ง	ช่วงความเข้มข้น (μM)	ความชัน ($\text{mA}/\mu\text{M}$)	ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์ (R^2)	ร้อยละของค่า เบี่ยงเบนมาตรฐาน สัมพันธ์ (%RSD)	ขีดจำกัดในการ ตรวจพบ(LOD ; μM)	ขีดจำกัดของ การวัดเชิง ปริมาณ (LOQ ; μM)
GCE	20 -380	59.96	0.9839	1.44	136.00	454.00
MWCNT/GCE	20 -380	90.42	0.9993	2.70	90.99	303.31
Mn_3O_4 /GCE	20 -380	114.19	0.9957	1.10	228.00	760.00
CuO/GCE	20 -380	144.78	0.9998	4.56	50.78	169.27
Mn_3O_4 -MWCNT/GCE	20 -380	278.83	0.9977	2.50	166.00	553.00
CuO-MWCNT/GCE	20 -380	196.00	0.9976	1.53	170.00	568.00
CuMn_2O_4 -MWCNT/GCE	20 -380	318.64	0.9991	0.98	104.04	346.79

4.3.6 ผลการศึกษาความเที่ยง

ผลการศึกษาความเที่ยง ทำการปิเปตต์สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 จำนวน 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ ปั่นกวนสารละลายตลอดเวลาขณะทำการทดลอง เมื่อถึงวินาทีที่ 25 ปิเปตต์สารละลายมาตรฐาน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร เดิมทุกๆ 25 วินาที จนถึงเวลา 500 วินาที และทำซ้ำ 5 ครั้ง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

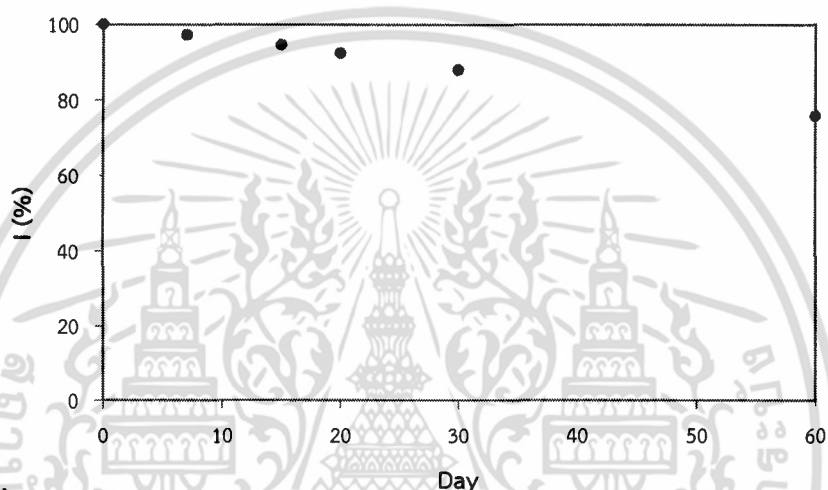
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการทำซ้ำโดยใช้ขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$

H_2O_2 (μM)	% RSD* (n=10)	H_2O_2 (μM)	% RSD* (n=10)
Blank	4.64	200	0.74
20	0.99	220	0.63
40	0.66	240	0.90
60	0.62	260	0.81
80	0.40	280	0.74
100	0.67	300	0.52
120	0.86	320	0.68
140	0.67	340	0.80
160	0.63	360	0.46
180	0.35	380	0.63

หมายเหตุ. %RSD* แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค.

4.3.7 ผลการศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า

ผลจากการศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี สักยไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ +0.500 โวลต์ ทำการเปิดเต้าสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 จำนวน 5.00 มิลลิลิตร ปั่นกวนสารละลายตลอดเวลาขณะทำการทดลอง เมื่อถึงวันที่ที่ 25 ปีเปิดเต้าสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร จากนั้นทำ ทุกๆ 25 วินาที จนถึงเวลาที่กำหนดไว้และทำซ้ำเป็นช่วงเวลา 0, 7, 15, 20, 30, 60 วัน ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับวันในการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 ของขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$

จากรูปที่ 4.9 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับวัน พบว่าในเวลา 60 วันของการทดสอบอายุการใช้งานของขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ นั้นจะให้เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงเรื่อยๆ จึงสรุปได้ว่าเมื่อทำการทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นสามารถเก็บไว้มากกว่า 60 วัน จากแนวโน้มของกราฟรูปที่ 4.9 นั้นคาดว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ได้น่าจะมากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นขั้ว $\text{CuMn}_2\text{O}_4\text{-MWCNT/GCE}$ นั้นควรมีอายุการใช้งานประมาณ 60 วัน

4.3.8 ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละการกลับคืน

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากสารตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง และน้ำยาข้อมผสม 2 ตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาตรวจวัดด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ +0.500 โวลต์ จากการคำนวณค่าร้อยละการกลับคืนของสารตัวอย่าง ได้ค่าร้อยละการกลับคืนของสารตัวอย่างน้ำยาล้างแผลตัวอย่างที่ 1 อยู่ในช่วง 90.47 – 110.41% น้ำยาล้างแผลตัวอย่างที่ 2 อยู่ในช่วง 96.28 – 115.20% น้ำยาข้อมผสมตัวอย่างที่ 3 อยู่ในช่วง 98.84 – 107.83% และน้ำยาข้อมผสมตัวอย่างที่ 4 อยู่ในช่วง 98.15 – 103.29% ตามลำดับ ซึ่งแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และการศึกษาการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7.0 โดยการใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี พบว่าขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ +0.500 โวลต์ ขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นให้กระแสที่สูงสุดเนื่องจากคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำให้เกิด การถ่ายโอนมวลอิเล็กตรอน (Electron transfer reaction) ได้ดี

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดีฟแฟรค โทมิเตอร์และเครื่องอิเล็กตรอนจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่ามีการกระจายตัวของคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์บนมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์อย่างสม่ำเสมอ

การศึกษานหาสภาวะที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งขึ้นด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีนั้น สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมคือ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ค่าพีเอช 7.0 ในการหาอัตราการสแกนนี้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งขึ้นนั้นเกิดแบบกระบวนการ Surface control ขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น ความสัมพันธ์ช่วงความเป็นเส้นตรง $y = 0.0319x - 5 \times 10^{-6}$ ($R^2=0.991$) ช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 20 – ไม่น้อยกว่า 380 ไมโครโมลาร์ จิตจำกัดในการตรวจพบ 104.04 ไมโครโมลาร์ (S/N=3) จิตกำจัดของการวัดเชิงปริมาณ 346.79 ไมโครโมลาร์ อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถเก็บใช้งานได้ประมาณ 60 วัน ขั้วไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มาตรวจวัดตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0094, 0.0717, 0.9165 และ 0.0026 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ค่าร้อยละ

ของการกลับคืนอยู่ในช่วง 90.47 – 110.41%, 96.28 – 115.20% , 98.84 – 107.83% และ 98.15 – 103.29% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงการยอมรับตาม AOAC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงการสรุปงานวิจัยที่สังเคราะห์คอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Electrode	Analyte	Linear range	Detection limit	References
Cu/GCE	H ₂ O ₂	$2 \times 10^{-3} - 0.27 \mu\text{M}$.	$2 \times 10^{-4} \mu\text{M}$.	48
Cu-CNTs/GCE	Glucose	0.7 to 3500 μM .	0.21 μM .	43
CuO flower/Cu	H ₂ O ₂	4.25 to 40,000 μM .	0.167 μM .	42
Mn-complex/SWCNTs/GCE	H ₂ O ₂	1 μM to 1,500 μM .	692 μM .	49
MnO ₂ /grapheme oxide/GCE	H ₂ O ₂	5- 600 μM .	0.8 μM .	50
MnO ₂ -AuNP/GCE	H ₂ O ₂	0.78 to 836 μM .	0.0468 μM .	51
HRP-QY-MNS/GCE	H ₂ O ₂	0.10 to 32 μM .	0.078 μM .	52
MWCNT/GCE	H ₂ O ₂	20 to 380 μM .	90.99 μM .	Thesis
Mn ₃ O ₄ /GCE	H ₂ O ₂	20 to 380 μM .	228.00 μM .	
CuO/GCE	H ₂ O ₂	20 to 380 μM .	50.78 μM .	
Mn ₃ O ₄ -MWCNT/GCE	H ₂ O ₂	20 to 380 μM .	166.00 μM .	
CuO-MWCNT/GCE	H ₂ O ₂	20 to 380 μM .	170.00 μM .	
CuMn ₂ O ₄ -MWCNT/GCE	H ₂ O ₂	20 to 380 μM .	104.04 μM .	

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shaojun Yao, Junhui Xu, Ying Wang, Xiaoxia Chen, Yanxia Xu, Shengshui Hu, "A highly sensitive hydrogen peroxide amperometric sensor based on MnO₂ nanoparticles and dihexadecyl hydrogen phosphate composite film", *Analytica Chimica Acta* 557 (2006) 78-84.
- [2] ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [Online]. Available: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=44>; Search: April, 30 2012.
- [3] ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [Online]. Available: <http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/addict/precursor/Hydrogen%20peroxide.html>; Search: April, 30 2012.
- [4] ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [Online]. Available: <http://www.chemtrack.org/Product-Detail.asp?ID=FD4400375&NAME=HYDROGEN%20PEROXIDE%2035%20%20V%20ALSAN%20SP>; Search: April, 30 2012.
- [5] Nuttakaan Leelarungrayub. "Effects of physical therapy on biochemical markers in pediatric patients with lung infection". Chiang Mai: Chiang Mai University, Biochemical markers 2001. 130 p. (T E18039).
- [6] Lanqun Mao, Fang Xu, Qi Xu, Litong Jin "An Amperometric Xanthine Oxidase Biosensor based on Xanthine Oxidase for Monitoring Hypoxanthine in Cell Culture Media" *Analytical Biochemistry* 292, 94-101 (2001).
- [7] Razuvaev G.A., Osanova N.A, Brilkina T.G, Zinovjeva T.I, Sharutin V.V "Alkyloxy-and silyloxy-derivatives of P^v and Sb^v", *Journal of Organometallic Chemistry*, 99 (1975) 93-106.
- [8] Glatzle D, Frigg M, "Acetyl-coenzyme a carboxylase activity in whole blood and its dependency on the biotin status of chickens" *Biochemical and Biophysical Research Communications* 66 (1975) 368-374.
- [9] Xiang-Min Miao, Ruo Yuan, Ya-Qin Chai, Yin-Tao Shi, Yan-Yu Yuan, "Direct electrocatalytic reduction of hydrogen peroxide based on nafion and copper oxide nanoparticles modified Pt electrode" *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 612 (2008) 157-163.

- [10] Aurobind S.V., Amirthalingam K.P., Gomathi H., “Sol–gel based surface modification of electrodes for electro analysis”, *Advances in Colloid and Interface Science*. 121 (2006) 1–7.
- [11] Dun Zhang, Dahe Chi, Takeyoshi Okajima, Takeo Ohsaka, “Catalytic activity of dual catalysts system based on nano- manganese oxide and cobalt octacyanophthalocyanine toward four-electron reduction of oxygen in alkaline media”, *Electrochim.Acta* 52 (2007) 5400–5406.
- [12] Rochael J. Collins and Chaim N. Sukenik, “Sulfonate-functionalized siloxane-anchored selfassembled monolayers”, *Langmuir* 11 (1995) 2322–2324.
- [13] Peng Wang, Shengqi Li and Jinqing Kana. “A hydrogen peroxide biosensor based on Polyaniline/FTO”. *Sensors and Actuators B*, 137, (2009): 662–668.
- [14] Sang-Bok Ma, Kyun-Young Ahn, Eun-Sung Lee, Ki-Hwan Oh, Kwang-Bum Kim “Synthesis and characterization of manganese dioxide spontaneously coated on carbon nanotubes”, *Carbon* 45 (2007) 375-382.
- [15] Abdollah Salimi, Ensiyeh Sharifi, Abdollah Noorbakhsh, Saied Soltanian, “Immobilization of glucose oxidase on electrodeposited nickel oxide nanoparticles: direct electron transfer and electrocatalytic activity”, *Biosensors and Bioelectronics*. 22 (2007) 3146–3153.
- [16] Jianfeng Zang, Chang Ming Li, Xiaoqiang Cui, Jianxiong Wang, Xiaowei Sun, Hua Dong, Chang Q. Sun, “Tailoring zinc oxide nanowires for high performance amperometric glucose sensor”, *Electroanalysis* 19 (2007) 1008–1014.
- [17] Abdollah Salimi, Rahman Hallaj, Saied Soltanian, Hussein Mamkhezri, “Nanomolar detection of hydrogen peroxide on glassy carbon electrode modified with electrodeposited cobalt oxide nanoparticles”, *Analytica Chimica Acta* 594 (2007) 24–31.
- [18] ดร.พงษ์ธร แซ่ฮุย และ ภูงค์ ทับทอง วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง” ปีที่ 4 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม – กันยายน 2553
- [19] ท่อนาโนคาร์บอน [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/ท่อนาโนคาร์บอน>. ; Search: April, 30 2012.
- [20] “NanoTechnology” [Online]. Available: <http://nanotechme.blog.mthai.com/2009/12/28/webpage-10>. ; Search: Desember, 16 2009.
- [21] “Nanocopper” [Online]. Available: http://www.3tawandaeng.com/html/detail_nano%20Copper.html. ; Search: January, 10 2010.

- [22] “Nano copper” [Online]. Available: <http://www.tnpair.com/index.php?mo=3&art=331668>
Search: January, 10 2010.
- [23] Bin Xu, Min-Ling Ye, Yu-Xiang Yu, Wei-De Zhang, A highly sensitive hydrogen peroxide amperometric sensor based on MnO₂-modified vertically aligned multiwalled carbon nanotubes, *Analytica Chemica Acta* 674 (2010) 20-26.
- [24] แมงกานีส [Online]. Available: http://www.si.mahidol.ac.th/Th/division/ophs/admin/knowledges_files/21_34_1.pdf. ; Search: April, 30 2012.
- [25] Weerachon Phoohinkong. “Screen-printed electrode modified with nano-ZnO dispersed on polyaniline nanowires biosensor for determination of hydrogen peroxide”. Master of Science. Bangkok: King Mongkut’s Institute Of Technology Ladkrabang, 2010.
- [26] กลาสติคาร์บอน [Online]. Available: <http://www.2spi.com/catalog/mounts/glassy-vitreous-carbon-glass-substrates.php>. ; Search: April, 30 2012.
- [27] กลาสติคาร์บอน [Online]. Available: http://www.glassycarbonstore.com/glassycarbon_properties.html. ; Search: April, 30 2012.
- [28] MATERIAL SAFETY DATA SHEET Hydrogen Peroxide (20 to 40%) MSDS Ref. No: 7722-84-1-3 Version: US/Canada Date Approved: 06/10/2002 Revision No: 6
- [29] Jones C. W. and Clark J. H. 1999. Applications of Hydrogen Peroxide and Derivatives: (RSC Clean Technology Monographs) the Royal Society of Chemistry.
- [30] รศ.คณิตา ตังคณานุรักษ์ เคมี่วิเคราะห์ สำนักพิมพ์โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [31] รศ.เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ เคมี่วิเคราะห์เชิงไฟฟ้า สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [32] Skoog D.A. and Leary J.J. Principle and Applications of Electrochemistry. 4th ed. Fort Worth: Saunder College. (1992): 535-564.
- [33] Wei Zhao, Huicai Wang, Xia Qin, Xinsheng Wang, Zixia Zhao, Zhiying Miao, Lili Chen, Miaomiao Shan, Yuxin Fang and Qiang Chen. “A novel nonenzymatic hydrogen peroxide sensor based on multi-wall carbon nanotube/silver nanoparticle nanohybrids modified gold electrode”. *Talanta*. 80, (2009): 1029–1033.
- [34] Yali Li, Jia Zhang, Hui Zhu, Fan Yang and Xiurong Yang. “Gold nanoparticles mediate the assembly of manganese dioxide nanoparticles for H₂O₂ amperometric sensing”. *Electrochimica Acta*, 55, (2010): 5123–5128.
- [35] Xiandong Zeng, Xiaoying Liu, Bo Kong, Ying Wang and WanzhiWei. “A sensitive

- nonenzymatic hydrogen peroxide sensor based on DNA-Cu²⁺ complex electrodeposition onto glassy carbon electrode". *Sensors and Actuators B*, 133 (2008): 381–386.
- [36] Malinauskas A., Araminaite R., Mickeviciute G., Garjonyte R., "Evaluation of operational stability of Prussian blue-and cobalt hexacyanoferrate-based amperometric hydrogen peroxide sensor for biosensing application". *Materials Science and Engineering C* 24 (2004):513-519.
- [37] Abdollah Salimi, Rahman Hallaj "Nanomolar detection of hydrogen peroxide on glassy carbon electrode modified with electrodeposited cobalt oxide nanoparticles". *Analytica Chimica Acta* 594 (2007): 24–31.
- [38] Sudeshna Chandra, K.S. Lokesh, Anja Nicolai, Heinrich Lang. "Dendrimer-rhodium nanoparticle modified glassy carbon electrode for amperometric detection of hydrogen peroxide", *Analytica Chimica Acta* 632 (2009) 63–68.
- [39] Xinhuang Kang, Zhibin Mai, Xiaoyong Zou, Peixiang Cai and Jinyuan Mo. "A sensitive nonenzymatic glucose sensor in alkaline media with a copper nanocluster/multiwall carbon nanotube-modified glassy carbon electrode". *Analytical Biochemistry* 363 (2007): 143–150.
- [40] Christopher Batchelor-McAuley, Gregory G. Wildgoose, Richard G. Compton, Lidong Shao and Malcolm L.H. Green. "Copper oxide nanoparticle impurities are responsible for the electroanalytical detection of glucose seen using multiwalled carbon nanotubes". *Sensors and Actuators B*, 132, (2008): 356–360.
- [41] Hui-Xia Wu, Wei-Man Cao, Yan Li, Gang Liu, Ying Wen, Hai-Feng Yang, Shi-Ping Yang "In situ growth of copper nanoparticles on multiwalled carbon nanotubes and their application as non - enzymatic glucose sensor materials", *Electrochimica Acta* 55 (2010) 3734-3740.
- [42] Min-Jung Song, Sung Woo Hwang, Dongmok Whang, "Non-enzymatic electrochemical CuO nanoflowers sensor for hydrogen peroxide detection", *Talanta* 80 (2010) 1648-1652.
- [43] Xinhuang Kang, Zhibin Mai, Xiaoyong Zou, Peixiang Cai, Jinyuan Mo, "A sensitive nonenzymatic glucose sensor in alkaline media with a copper nanocluster/multiwall carbon nanotube-modified glassy carbon electrode", *Analytical Biochemistry* 363 (2007) 143-150.
- [44] Xiuying, Feng Zhang, Balying Xia, Xingfu Zhu, Jiasheng Chen, Shilun Qiu, Ping Zhang,

- Jixue Li, "Controlled modification of multi-walled carbon nanotube with CuO, Cu₂O and Cu nanoparticles", *Solid State Sciences* 11 (2009) 655-659.
- [45] Sang-Bok Ma, Kyung-Wan Nam, Won-Sub Yoon, Xiao-Qing Yang, Kyun-Young Ahn, Ki-Hwan Oh, Kwang-Bum Kim "Electrochemical properties of manganese oxide coated onto carbon nanotubes for energy-storage applications", *Journal of Power Sources* 178 (2008) 483-489.
- [46] Jiang Yang, Wei-De Zhang, Sundaram Gunasekaran "An amperometric non-enzymatic glucose sensor by electrodepositing copper nanocubes onto vertically well-aligned multi-walled carbon nanotube array", *Biosensors and Bioelectronics* 26 (2010) 279-284.
- [47] Bin Xu, Min-Ling Ye, Yu-Xiang Yu, Wei-De Zhang, "A highly sensitive hydrogen peroxide amperometric sensor based on MnO₂-modified vertically aligned multiwalled carbon nanotubes", *Analytica Chimica Acta* 674 (2010) 20-26.
- [48] Le Wn-Zhi, Liu You- Qin "Preparation of nano-copper oxide modified glassy carbon electrode by a novel film plating/potential cycling method and its characterization", *Sensor and actuator B* 141 (2009) 147-153.
- [49] Abdollah Salimi, Monierosadat Mahdioun, Abdollah Noorbakhsh, Amir Abdolmaleki, Raouf Ghavami "A novel non-enzymatic hydrogen peroxide sensor based on single walled carbon nanotube-manganese complex modified glassy carbon electrode", *Electrochimica acta* 56 (2011) 3387-3394.
- [50] Limiao Li, Zhifeng Du, Shuang Liu, Quanyi Hao, Yanguo Wang, Qihong Li, Taihong Wang "A novel nonenzymatic hydrogen peroxide sensor based on MnO₂/grapheme oxide nanocomposite", *Talanta* 82 (2010) 1637- 1641.
- [51] Yali Li, Jia Zhang, Hui Zhu, Fan Yang, Xiurong Yang "Gold nanoparticles mediate the assembly of manganese dioxide nanoparticles for H₂O₂ amperometric sensing", *Electrochimica acta* 55 (2010) 5123-5128.
- [52] Xiushuang Yang, Xu Chen, Xiong Zhang, Wensheng Yang, David G.Evans "Direct electrochemistry and electrocatalysis with horseradish peroxidase immobilized in polyquaternium-manganese oxide nanosheet nanocomposite films", *Sensor and actuator B* 134 (2008) 182-188.

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ก.1 การเตรียมสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ชั่งไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตมา 17.799 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ก.2 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตมา 13.609 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตรเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ตาราง ก.1.การเตรียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ค่าพีเอชต่างๆ

เตรียมตามอัตราส่วนดังนี้ ให้ A : KH_2PO_4 B : Na_2HPO_4

pH	A : KH_2PO_4	B : Na_2HPO_4 (100-A)	pH	A : KH_2PO_4	B : Na_2HPO_4 (100-A)
5.0	99.2	0.8	6.6	65.3	34.7
5.2	98.4	1.6	6.8	53.4	46.6
5.4	97.3	2.7	7.0	41.3	58.7
5.6	95.5	4.5	7.2	2.6	97.4
5.8	92.8	7.2	7.4	19.7	80.3
6.0	88.9	11.1	7.6	12.8	87.2
6.2	83.0	17.0	7.8	7.4	92.6
6.4	75.4	24.6	8.0	3.7	96.3

อ้างอิงมาจาก Tables for the Laboratory Merck Buffer solutions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

ข.1 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาไนด์เรตความเข้มข้น 10.0 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ค่าพีเอช 7.0 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมเฮกซะไซยาไนด์เรตมา 0.08231 กรัม ใส่บีกเกอร์ละลายด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ค่าพีเอช 7.0 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตรให้ได้ 25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาไนด์เรตความเข้มข้น 10.0 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ค่าพีเอช 7.0 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ข.2 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H₂O₂)

เนื่องจากในขวดของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเข้มข้น 30% (w/v) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สารละลาย 100 มิลลิลิตร มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 30 กรัม

สารละลาย 1000 มิลลิลิตร มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 300 กรัม

มวลโมเลกุลของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 34.02 กรัม/โมล

ดังนั้น จะได้ว่าจำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ $\frac{300}{34.02}$ โมลต่อลิตร

เท่ากับ 8.82 โมลาร์

การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

จากสมการ $C_1V_1 = C_2V_2$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (8.82 โมลาร์)

V_1 ปริมาตรของสารที่ต้องแบ่งมาใช้ในการเตรียม (25 มิลลิลิตร)

C_2 เป็นความเข้มข้นที่ต้องการเตรียม (100 มิลลิโมลาร์)

V_2 ปริมาตรที่ต้องการเตรียม

จากสมการจะได้ว่า

$$8.82 \text{ M} \times V_1 = 0.100 \text{ M} \times 25 \text{ ml}$$

$$V_1 = 0.283 \text{ ml}$$

ดังนั้นจะได้ว่าเมื่อต้องการเตรียมสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์จะต้อง ปิเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 283 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

คำนวณค่าการทำซ้ำ

ตารางที่ ก.1. แสดงค่าการทำซ้ำโดยใช้ขั้ว CuMn_2O_4 -MWCNT/GCE เพื่อหา %RSD

ความเข้มข้น H_2O_2 (μM)	\bar{X}	SD	%RSD
Blank	1.05×10^{-5}	4.89×10^{-7}	4.64
20	1.61×10^{-5}	1.60×10^{-7}	0.99
40	2.29×10^{-5}	1.52×10^{-7}	0.66
60	3.01×10^{-5}	1.85×10^{-7}	0.62
80	3.76×10^{-5}	1.51×10^{-7}	0.40
100	4.50×10^{-5}	3.02×10^{-7}	0.67
120	5.26×10^{-5}	4.50×10^{-7}	0.86
140	6.02×10^{-5}	4.04×10^{-7}	0.67
160	6.78×10^{-5}	4.30×10^{-7}	0.63
180	7.56×10^{-5}	2.65×10^{-7}	0.35
200	8.36×10^{-5}	6.18×10^{-7}	0.74
220	9.18×10^{-5}	5.82×10^{-7}	0.63
240	1.00×10^{-4}	8.99×10^{-7}	0.90
260	1.09×10^{-4}	8.78×10^{-7}	0.81
280	1.17×10^{-4}	8.73×10^{-7}	0.74
300	1.26×10^{-4}	6.60×10^{-7}	0.52
320	1.35×10^{-4}	9.18×10^{-7}	0.68
340	1.43×10^{-4}	1.14×10^{-6}	0.80
360	1.52×10^{-4}	6.97×10^{-7}	0.46
380	1.61×10^{-4}	1.01×10^{-6}	0.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

แสดงค่าร้อยละของการกลับคืนตามข้อกำหนด AOAC

ตาราง ง.1. แสดงค่าร้อยละของการกลับคืน

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น ตัวอย่าง (mM)	ที่เติม H ₂ O ₂ (mM)	ความเข้มข้นตัวอย่าง + สารมาตรฐาน (mM)	ค่าร้อยละของการ กลับคืน (%)
1	0.0094	0.3000	0.3406	110.41
	0.0094	0.7000	0.6427	90.47
	0.0094	2.4000	2.3895	99.17
2	0.0717	0.3000	0.4173	115.20
	0.0717	0.6000	0.6494	96.28
	0.0717	2.6000	2.6084	97.56
3	0.9165	0.3000	1.2400	107.83
	0.9165	0.8000	1.7096	99.14
	0.9165	2.8000	3.6839	98.84
4	0.0026	0.3000	0.3125	103.29
	0.0026	0.6000	0.6060	100.56
	0.0026	2.8000	2.7507	98.15

วิธีคำนวณหาค่าร้อยละของการกลับคืนได้จากสมการ

$$\% \text{Recovery} = \frac{C_{\text{spiked sample}} - C_{\text{sample}}}{C_{\text{standard}}} \times 100$$

$C_{\text{spiked sample}}$ = ความเข้มข้นของspiked sample

C_{sample} = ความเข้มข้นของตัวอย่าง

C_{standard} = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%Recovery = \frac{0.3406 - 0.0094}{0.3000} \times 100$$

$$= 110.4\%$$

ตาราง ค.1 ตารางแสดงค่าร้อยละของการกลับคืนที่เป็นที่ยอมรับตามข้อกำหนด AOAC

ความเข้มข้นของสารที่ทำกรวิเคราะห์	ค่าร้อยละของการคืนกลับ
100%	98-102
> 10%	98-102
> 1%	97-103
> 0.1%	95-105
100 ppm	90-107
10 ppm	80-110
1 ppm	80-110
100 ppb	80-110
10 ppb	60-115
1 ppb	40-120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ)

ศึกษาขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณของข้าวไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากข้อที่ 4.3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับค่ากระแสที่วัดได้ พบว่าได้สมการเชิงเส้นและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ $y = 0.0319x - 5 \times 10^{-6}$ และ $R^2 = 0.9991$ ตามลำดับ

ตารางที่ จ.1 แสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณของข้าวไฟฟ้าที่ปรับแต่งด้วยคอปเปอร์แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ความเข้มข้น (ไมโครโมลาร์)	y_i	\hat{y}	$y_i - \hat{y}$	$(y_i - \hat{y})^2$
20	4.04×10^{-6}	1.39×10^{-6}	2.65×10^{-6}	7.04×10^{-12}
40	8.86×10^{-6}	7.76×10^{-6}	1.09×10^{-6}	1.20×10^{-12}
60	1.48×10^{-5}	1.41×10^{-5}	6.57×10^{-7}	4.31×10^{-13}
80	2.02×10^{-5}	2.05×10^{-5}	-2.73×10^{-7}	7.44×10^{-14}
100	2.65×10^{-5}	2.69×10^{-5}	-3.78×10^{-7}	1.43×10^{-13}
120	3.26×10^{-5}	3.33×10^{-5}	-6.57×10^{-7}	4.32×10^{-13}
140	3.87×10^{-5}	3.96×10^{-5}	-9.70×10^{-7}	9.42×10^{-13}
160	4.48×10^{-5}	4.60×10^{-5}	-1.25×10^{-6}	1.55×10^{-12}
180	5.09×10^{-5}	5.24×10^{-5}	-1.44×10^{-6}	2.08×10^{-12}
200	5.75×10^{-5}	5.88×10^{-5}	-1.30×10^{-6}	1.69×10^{-12}
220	6.37×10^{-5}	6.51×10^{-5}	-1.39×10^{-6}	1.92×10^{-12}
240	7.13×10^{-5}	7.15×10^{-5}	-1.82×10^{-7}	3.31×10^{-14}
260	7.81×10^{-5}	7.79×10^{-5}	2.56×10^{-7}	6.54×10^{-14}
280	8.44×10^{-5}	8.42×10^{-5}	1.17×10^{-7}	1.37×10^{-14}
300	9.08×10^{-5}	9.06×10^{-5}	1.40×10^{-7}	1.95×10^{-14}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

320	9.86×10^{-5}	9.70×10^{-5}	-5.12×10^{-8}	2.62×10^{-15}
340	1.04×10^{-4}	1.03×10^{-4}	7.53×10^{-7}	5.67×10^{-13}
360	1.11×10^{-4}	1.10×10^{-4}	8.85×10^{-7}	7.84×10^{-13}
380	1.17×10^{-4}	1.16×10^{-4}	1.33×10^{-6}	1.78×10^{-12}

โดยที่ y_i คือ ค่ากระแสที่อ่านได้จากเครื่องมือตรวจวัด

\hat{y} คือ ค่ากระแสที่ควรเป็นโดยการคำนวณจากสมการเชิงเส้น

จากตารางที่ ง. 1 เมื่อได้ค่าผลรวมของผลต่างของค่ากระแสที่อ่านได้จากเครื่องมือตรวจวัดและค่ากระแสที่ควรเป็นยกกำลังสอง นำค่าผลรวมดังกล่าวมาคำนวณหาค่า $S_{y/x}$

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{(n - 2)}}$$

จากสมการสามารถคำนวณค่า $S_{y/x}$ เท่ากับ 1.11×10^{-6} ซึ่งสามารถคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณได้จากสมการ

$$\text{LOD} = y_{\text{intercept}} + 3 S_{y/x}$$

$$\text{LOQ} = y_{\text{intercept}} + 10 S_{y/x}$$

จากสมการคำนวณค่า LOD และ LOQ ได้เท่ากับ -1.67×10^{-6} และ 6.07×10^{-6} เมื่อนำค่าดังกล่าวที่ได้แทนค่ากลับค่า y ในสมการเชิงเส้นจะได้ขีดจำกัดของการตรวจพบเท่ากับ 104.04 ไมโครโมลาร์ และขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณเท่ากับ 346.79 ไมโครโมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาววาทีณี กิจบุญ
วัน เดือน ปีเกิด	14 เมษายน 2530
ที่อยู่	14 ถ.ราษฎร์อำนวย ต.โนนเวียง อ.เมืองน่าน จ.น่าน 55000
ประวัติการศึกษา	2552 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2551	ฝึกงานที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, MTEC : National Metal and Materials Technology Center, Thailand.
พ.ศ. 2553	นำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ paccon 2011 ในหัวข้อ “PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF MANGANESE DIOXIDE AND COPPER OXIDE/MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE NANOCOMPOSITES MODIFIED GLASSY CARBON ELECTRODE FOR DETERMINATION OF HYDROGEN PEROXIDE” จังหวัดกรุงเทพฯ ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้