

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การตรวจวัดโดพามีนด้วยชีวไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์
และชีวไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวเพสต์ที่ปรับปรุงด้วย
ซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอ์เรต(II)



T107725



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....107725
วัน,เดือน,ปี.....10 พ.ค. 2553

b. 12210894
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Determination of Dopamine Using Multi-Walled Carbon Nanotubes Paste
Electrode and Multi-Walled Carbon Nanotubes Paste Electrode Modified
with Silver Hexacyanoferrate(II)



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree
of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การตรวจวัดสารโดพามีนด้วยชีวไฟฟ้ามีลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสส์ และชีวไฟฟ้ามีลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสส์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(II)

นักศึกษา นายสุพรชัย สัจจสวัสดิ์
นางสาวสยมพร ชุมภูมิ่ง

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2548

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล	
กรรมการ	ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ	
กรรมการ	รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์	



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การตรวจวัดสารโดพามีนด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (II)
นักศึกษา	นายสุพรชัย สัจจสวัสดิ์ นางสาวสุมพร ชุมภูมิ่ง
ภาควิชา	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการตรวจวัดโดพามีนด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ (Multi-Walled Carbon Nanotubes Paste Electrode, MWNTs-E) และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (II) (Multi-walled Carbon Nanotubes Paste Electrode Modified with Silver Hexacyanoferrate, AgHCF/MWNTs-E) เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้ากลาสลิคาร์บอน (Glassy Carbon Electrode, GC-E) ในการศึกษาหาค่าประกอบที่เหมาะสมของเพสต์ใน MWNTs-E พบว่าอัตราส่วนของผนังคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อน้ำมันพาราฟิน เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก และเมื่อศึกษาปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุง MWNTs-E ได้ปริมาณที่เหมาะสมของซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตคือร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs-E, MWNTs-E และ GC-E ใช้ตรวจวัดโดพามีนสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 และจากการศึกษากระบวนการของ MWNTs-E และ AgHCF/MWNTs-E ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่ากระแสออกซิเดชันของ 1.0 mM โดพามีน เป็นสัดส่วนกับ $v^{1/2}$ อย่างเชิงเส้นในช่วง 0.01 – 0.5 V/s กระบวนการของขั้วไฟฟ้าทั้งสองเป็นแบบถูกควบคุมด้วยการแพร่ ในการตรวจวัดสารละลายด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี พบว่าขีดต่ำสุดของการตรวจวัดโดพามีนของ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E เท่ากับ 0.38, 1.02 และ 3.29 μM ตามลำดับ ส่วนช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดโดพามีนของ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E เท่ากับ 40 ถึง 800 μM ($R^2=0.9916$), 20 ถึง 800 μM ($R^2=0.9969$) และ 40 ถึง 200 μM ($R^2=1.00$) ตามลำดับ จากการศึกษาความเที่ยงของขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีพบว่า ร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Percentage of Relative Standard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deviation, % RSD) ของ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E เท่ากับ 11.69, 10.37 และ 17.93 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title Determination of Dopamine Using Multi-Walled Carbon Nanotubes Paste Electrode and Multi-Walled Carbon Nanotubes Paste Electrode Modified with Silver Hexacyanoferrate(II)

Student Mr. Supornchai Sutchasawat
Miss Sayumporn Chumphooming

Department Chemistry

Program Industrial Chemistry

Academic Year 2005

Thesis Advisor Assoc. Prof. Dr. Suwan Chaiyasith

ABSTRACT

This project focused on the determination of dopamine (DA) using a multi-walled carbon nanotubes paste electrode (MWNTs-E) and a multi-walled carbon nanotubes paste electrode modified with silver hexacyanoferrate (II) (AgHCF/MWNTs-E) compared with glassy carbon electrode (GC-E). Effect of composition ratio of MWNTs powder to paraffin oil in MWNTs-E at the highest response current of electrochemical determination of DA was selected at 70:30 (MWNTs Powder: Paraffin Oil, w/w) and 0.5% w/w AgHCF. The AgHCF/MWNTs-E and MWNTs-E were used for electroanalysis of DA in 0.1 M phosphate buffer pH 7.5 solution and then compared with a glassy carbon electrode (GC-E) in the same condition. The oxidation peak current of 1.0 mM DA linearly proportional to $V^{-1/2}$, with the range of 0.01 to 0.5 V/s indicated that the oxidation current was diffusion controlled by MWNTs-E and AgHCF/MWNTs-E surface. Differential pulse voltametric result showed the linear range of DA in MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E and GCE were 40-800 μM ($R^2=0.9916$), 20-800 μM ($R^2=0.9969$) and 40-200 μM ($R^2=1.00$) respectively. Limit of detection (S/N=3) for MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E and GC-E were 0.38, 1.02 and 3.29 μM respectively. The precision of MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E and GC-E were 11.69, 17.93 and 10.69 %RSD, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล และ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการสอบโครงการพิเศษที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้โครงการพิเศษนี้ สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เมธิญชัย ไชยสิทธิ์ ที่ให้กรุณาให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ คุณสุพจน์ ศิวาคม และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความสะดวกต่อการทำงานอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ พี่ไพโรจน์ จันทร์หอม, พี่โคภิชรัฐ เชื้อคำช้าง, พี่เกียรติศักดิ์ ดวงเงิน ตลอดจนพี่ทุกคนที่กรุณาแนะนำในทุก ๆ เรื่องที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการพิเศษเล่มนี้ ขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่เคารพรักยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้ ซึ่งมีค่ายิ่งต่อการดำรงชีวิตในอนาคต

นายสุพรชัย สัจจสวัสดิ์

นางสาวสยมพร ชุมภูมิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I-II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาของโครงการพิเศษ.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โดพามีน.....	4
2.2 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี.....	7
2.2.1 การแปรผลข้อมูล.....	10
2.2.2 ระบบที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้.....	10
2.2.3 ระบบที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ และกึ่งผันกลับได้.....	13
2.3 ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โพลาริกราฟี และดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี..	14
2.4 วัสดุสำหรับทำตัวตรวจวัด.....	16
2.4.1 พอลิเมอร์.....	16
2.4.2 ไมโอเซ็นเซอร์ที่บรรจุโลหะเชิงซ้อน.....	16
2.4.3 วัสดุซิลเจล.....	16
2.4.4 วัสดุขนาดนาโน.....	16
2.4.5 วัสดุประกอบ.....	17
2.4.6 ซีไอโอดี.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 คาร์บอนนาโนทิวบ์	17
2.5.1 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	20
2.5.1.1 วิธีการแบบ Arc Discharge.....	20
2.5.1.2 วิธีแบบ Laser Ablation.....	20
2.5.1.3 วิธีแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition).....	20
2.5.2 มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	20
2.6 ซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอไรต์.....	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 การดำเนินงานโครงการพิเศษ.....	25
3.1 สารเคมี	25
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	25
3.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	26
3.3.1 การทำความสะอาดมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	26
3.3.2 การสังเคราะห์ $Ag_3K[Fe(CN)_6]$	26
3.3.3 การสร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับการทดลอง.....	26
3.3.4 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเพลสต์ที่ทำขั้วไฟฟ้าต่อการตรวจวัด โดพามีน.....	28
3.3.4.1 การศึกษาปริมาณน้ำมันพาราฟินที่เหมาะสมของ ขั้วไฟฟ้า มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพลสต์	28
3.3.4.2 การศึกษาปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอไรต์ที่เหมาะสม ของขั้วไฟฟ้า $AgHCF/ MWNTs$ Paste	28
3.3.5 การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อการ ตรวจวัดโดพามีน.....	28
3.3.6 การศึกษาผลของอัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้าต่อการตรวจวัดโดพามีน....	29
3.3.7 การศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้า.....	29
3.3.7.1 ศึกษาช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้าต่อการ ตรวจวัดโดพามีน.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.7.2 สภาพไวของขั้วไฟฟ้า(Sensitivity).....	29
3.3.7.3 ขีดจำกัดความเข้มข้นในการวิเคราะห์ (Detection Limit).....	29
3.3.7.4 ความเที่ยงของขั้วไฟฟ้า (Precision).....	30
3.3.7.5 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า (Life Time).....	30
3.3.7.6 การวิเคราะห์ปริมาณโดพามีนในตัวอย่างยาโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ ด้วยเทคนิคไฟฟ้าเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	33
4.1 สมบัติของตะกอนซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่สังเคราะห์ได้.....	33
4.2 ศึกษาหาปริมาณองค์ประกอบที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟลด์	34
4.3 ปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่เหมาะสมในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟลด์สำหรับการตรวจวัดโดพามีน	38
4.4 การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดโดพามีน ด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟลด์ และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟลด์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต.....	42
4.5 ศึกษาผลของอัตราการสแกน.....	46
4.6 สมบัติของขั้วไฟฟ้า.....	50
4.6.1 การศึกษาสมบัติช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของความเข้มข้นกับกระแส ในการวิเคราะห์.....	50
4.6.1.1 ขั้วไฟฟ้ากาสซิลคาร์บอน.....	50
4.6.1.1.1 ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง.....	51
4.6.1.1.2 กระแสพื้นของขั้วไฟฟ้ากาสซิลคาร์บอน.....	52
4.6.1.1.3 ขีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้ากาสซิลคาร์บอน.....	53
4.6.1.2 ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟลด์	53
4.6.1.2.1 ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ VII จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.1.2.2 กระแสพื้นของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโน ทิวบ์เฟสท์	54
4.6.1.2.3 ซีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดต่ำสุดของการ วิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโน ทิวบ์เฟสท์	55
4.6.1.3 ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสท์ที่ปรับปรุงด้วย ซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II).....	56
4.6.1.3.1 ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสท์ที่ปรับปรุงด้วย AgHCF	56
4.6.1.3.2 กระแสพื้นของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโน ทิวบ์เฟสท์ที่ปรับปรุงด้วย AgHCF.....	57
4.6.1.3.3 ซีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดต่ำสุดของการ วิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโน ทิวบ์ที่ปรับปรุงด้วย AgHCF.....	58
4.6.2 การศึกษาความเที่ยงของขั้วไฟฟ้า.....	59
4.6.3 การศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า.....	61
4.7 การวิเคราะห์ปริมาณโคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ โวลแทมเมตรี.....	63
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่ากระแสสัญญาณพื้นของขั้วไฟฟ้ากาสลิสคาร์บอน จากการตรวจวัดสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์เข้มข้น 0.1 M พีเอช 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรีโดยอัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s.....	52
4.2 ค่ากระแสสัญญาณพื้นของ MWNTs-E จากการตรวจวัดสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์เข้มข้น 0.1 M พีเอช 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี โดยอัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s และตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง.....	55
4.3 แสดงค่ากระแสสัญญาณพื้นของขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs-E จากการตรวจวัดสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์เข้มข้น 0.1 M พีเอช 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี โดยอัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s และตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง	58
4.4 ค่ากระแสฟีกเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ%RSD ของขั้วไฟฟ้ากาสลิสคาร์บอน, ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสท์และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสท์ ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายบัพเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM พีเอช 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s.....	59
4.5 แสดงผลการตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคการเติมสารมาตรฐานโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี ด้วย GCE, MWNTs-E และขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs-E	63
4.6 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าทั้งสามชนิด (GC-E, MWNTs-E และ AgHCF/MWNTs-E)	65
ภาคผนวก ก.1 ศึกษาอัตราส่วนที่พาราฟินเหมาะสมในการสร้างขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสท์.....	71
ภาคผนวก ก.2 ค่ากระแสฟีก และความต่างศักย์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนจากการใช้ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสท์ที่มีปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตตั้งแต่ร้อยละ 0.1, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 และมีปริมาณน้ำมันพาราฟิน เท่ากับร้อยละ 30 ตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่เข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายบัพเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM พีเอช 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อIX างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ภาคผนวก ก.3 แสดงกระแสฟลักซ์ที่เกิดขึ้นในการตรวจวัดสารละลายโดพามีน 1 mM ที่อยู่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM ที่มีพีเอชตั้งแต่ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 และ 8.0 โดยใช้ MWNTs-E และ AgHCF/MWNTs-E ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราในการสแกน 50 mV/s.....	74
ภาคผนวก ก.4 ค่ากระแสฟลักซ์ และ ความต่างศักย์ของการเกิดปฏิกิริยา จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM พีเอช 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราในการสแกนตั้งแต่ 10 ถึง 500 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพลสต์	75
ภาคผนวก ก.5 แสดงค่ากระแสฟลักซ์ และความต่างศักย์จากการเกิดปฏิกิริยาจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM พีเอช 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราในการสแกน ตั้งแต่ 10 ถึง 500 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพลสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอไรต์.....	76
ภาคผนวก ก.6 แสดงค่ากระแสฟลักซ์จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 2.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M พีเอช 7.5 โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs-E, AgHCF/ MWNTsE และ GCE ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมทรี ใช้อัตราในการสแกน 50mV/s.....	77
ภาคผนวก ก.7 แสดงค่ากระแสฟลักซ์กับครั้งที่วัดของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM พีเอช 7.50 โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs-E, AgHCF/ MWNTs-E และ GCE ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีพัลส์ ใช้อัตราในการสแกน 50 mV/s	79
ภาคผนวก ก.8 แสดงค่ากระแสฟลักซ์จากการตรวจวัดสารละลายตัวอย่างโดพามีน จากการเติมสารมาตรฐานที่เข้มข้นต่างกัน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M พีเอช 7.5 โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs-E, AgHCF/MWNTsE และ GCE ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมทรี ใช้อัตราในการสแกน 50 mV/s.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อข้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของโดพามีน.....	4
2.2 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน.....	5
2.3 แผนภาพสัญญาณกระตุ้นในไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	7
2.4 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมทั่วไป.....	8
2.5 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมแบบต่างๆ.....	9
2.6 การแปรผลข้อมูลจากไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	10
2.7 การเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้า.....	11
2.8 โวลเทจโปรแกรมของดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลตาโรกราฟี.....	14
2.9 ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมโมแกรม.....	15
2.10 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWNT) ที่เกิดจากการ ม้วนแผ่นกราฟไฟต์ที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb)	18
2.11 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube).....	18
2.12 แสดงโครงสร้างของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และมัลติวอลล์คาร์บอน นาโนทิวบ์.....	19
3.1 ภาพองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้าสำหรับงานวิจัย.....	27
3.2 แสดงกราฟที่ได้จากพล็อตระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม และกระแส ฟลักซ์ที่เกิดขึ้น.....	32
4.1 ภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงตะกอนซิลเวอร์ เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต (II) ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	33
4.2 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าขั้วไฟฟ้า มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เคลือบที่มีปริมาณ น้ำมันพาราฟินร้อยละ 30 ใช้กำลังขยาย 15000 เท่า.....	34
4.3 แผนภูมิแท่งแสดงค่ากระแสแอนอดิกจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิก โวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกน 50 mVs โดยปริมาณน้ำมันพาราฟินเท่ากับร้อยละ 30(สูตรที่ 1), 35 (สูตรที่ 2) และ 40 (สูตรที่ 3) ตามลำดับ.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ XI จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.4	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ ขั้ว MWNTs-E ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินตั้งแต่ร้อยละ 30, 35 และ 40 เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s.....	36
4.5	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 30 เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s.....	36
4.6	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 35 เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s.....	37
4.7	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 40 เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s.....	38
4.8	ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) บริเวณผิวหน้าของ AgHCF/MWNTs-E ที่มีปริมาณ AgHCF 0.5 % และ ปริมาณน้ำมันพาราฟิน 30% ใช้กำลังขยาย 15,000 เท่า (จากรูปจะพบตะกอนสีขาวของ AgHCF กระจายอยู่บนเพสต์).....	38
4.9	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 0.1 %โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกน 50 mV/s	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.10	<p>ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 0.5 %โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s.....</p>	39
4.11	<p>ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 1.0 %โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s.....</p>	40
4.12	<p>ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 3.0 %โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s.....</p>	40
4.13	<p>ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 5.0%โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s.....</p>	41
4.14	<p>แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนทางไฟฟ้า.....</p>	43
4.15	<p>แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 4.5, 6.5, 7.5 และ 8.0</p>	43
4.16	<p>แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 4.5, 6.5, 7.5 และ 8.0.....</p>	44

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสที่ตรวจวัดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กระแสแอนอดิก) ของโดพามีน ในการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH ตั้งแต่ 4.5 ถึง 8.0 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 0.05 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้ามีลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์เป็นขั้วทำงาน และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl.....	45
4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ตรวจวัดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กระแสแอนอดิก) ของโดพามีน ในการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH ตั้งแต่ 4.5 ถึง 8.0 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 0.05 mV /s โดยใช้ขั้วไฟฟ้ามีลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรตเป็นขั้วทำงาน และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl.....	45
4.19	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) โดยใช้อัตราการสแกนตั้งแต่ 10, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 mV/s.....	47
4.20	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่ เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) โดยใช้อัตราการสแกนตั้งแต่ 10, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 mV/s	47
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟีกและอัตราการสแกนของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ -0.5 ถึง +0.5 V.....	48

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟลัก และ รากที่สองของอัตราการสแกน ของ การตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกน ศักย์ไฟฟ้า 50 mV/s โดยใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ -0.5 ถึง +0.5 V.....	48
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟลัก และ อัตราการสแกน ของการตรวจวัด สารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า 50 mV/s โดยใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ -0.5 ถึง +0.7 V.....	49
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟลัก และ อัตราการสแกน ของการตรวจวัด สารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า 50 mV/s โดยใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ -0.5 ถึง +0.7 V.....	49
4.25 แสดงกราฟมาตรฐาน จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีน โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสสิ คาร์บอน, มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เพสต์ ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s และใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี	50
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโดพามีน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 และสัญญาณกระแสจากการตรวจวัด โดพามีน เข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 2.00 mM ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ โวลแทมเมทรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสสิคาร์บอนเป็นขั้วทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) และใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s.....	51
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนของ ขั้วไฟฟ้ากลาสสิคาร์บอน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี.....	51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโดพามีน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 และกระแสจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 2.00 mM โดยใช้ MWNTs-E เป็นขั้วทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี และใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s	53
4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี.....	54
4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโดพามีน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 และสัญญาณกระแสจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 2.00 mM ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E เป็นขั้วทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s	56
4.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเพอร์เรต(II) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี.....	57
4.32	กราฟแสดงกระแสที่กจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสซิลคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s ซึ่งตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง.....	60
4.33	กราฟแสดงกระแสที่กจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s ซึ่งตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง.....	60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 กราฟแสดงกระแสฟลักจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพลสที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s ซึ่งวัดตรวจทั้งหมด 30 ครั้ง.....	61
4.35 แสดงอายุการใช้งานของ MWNTs-E จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s ใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (ตรวจวัดต่อเนื่องโดยไม่ได้ทำการขัดผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก่อนทำการตรวจวัด).....	62
4.36 แสดงอายุการใช้งานของ AgHCF/MWNTs-E จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s ใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (ตรวจวัดต่อเนื่องโดยไม่ได้ทำการขัดผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก่อนทำการตรวจวัด).....	62

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

CNTs	คาร์บอนนาโนทิวบ์
SWCNTs	ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
MWCNTs	มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
MWCNTs-E	ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสดี
AgHCF	ซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต
AgHCF/MWNTs-E	ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปรับปรุงด้วย ซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต
GC-E	ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน
DA	โดพามีน
nm	นาโนเมตร
mm	มิลลิเมตร
Ω	โอห์ม
A	แอมแปร์
mA	มิลลิแอมแปร์
nA	นาโนแอมแปร์
Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
CV	ไซคลิกโวลแทมเมตรี
E	ศักย์ไฟฟ้า (V)
V	โวลต์
I	กระแสไฟฟ้า
I_p	กระแสพีค
E_{app}	ศักย์ไฟฟ้าการเกิดปฏิกิริยา
g	กรัม
M	โมลาร์
mg	มิลลิกรัม
mM	มิลลิโมลาร์
mL	มิลลิลิตร
mol	โมล
mV/s	โวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n	จำนวนของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา
Ox	สารออกซิไดส์
Red	สารรีดิวซ์
RSD.	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
\bar{x}	ค่าเฉลี่ย
R.E.	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
SD.	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
v	อัตราการสแกน (V/s)
$v^{1/2}$	รากที่สองของอัตราการสแกน (V/s) ^{1/2}
μA	ไมโครแอมแปร์
μM	ไมโครโมลาร์
ppm	ส่วนในล้านส่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ [1]

หากถามว่าอวัยวะหรือส่วนที่สำคัญที่สุดในร่างกายของเราคืออะไร ส่วนใหญ่อาจจะตอบว่าหัวใจ แต่ที่จริงแล้วสมองต่างหากที่เป็นส่วนที่ควบคุมการทำงานของร่างกาย รวมทั้งอารมณ์ ความรู้สึกนึกคิด โดยที่สมองสามารถสร้างฮอร์โมนต่างๆ ให้เพียงพอต่อการนำไปใช้งานของร่างกาย หนึ่งในจำนวนสารที่สมองสร้างมาควบคุมการทำงานของร่างกายที่เราให้ความสนใจในการวิจัยนี้คือ สารโดพามีน (Dopamine) ซึ่งสารโดพามีนนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับโรคพาร์กินสัน (Parkinson) อย่างมาก

โรคพาร์กินสันเป็นที่รู้จักกันมานาน ระยะหลังคนดังระดับโลกก็เป็นโรคนี้กันหลายคน เช่น สมเด็จพระสันตะปาปา จอห์น ปอลที่ 2 ประธานาธิบดีโรนัลด์ เรแกน มูฮัมหมัดอาลี และดาราดังอีกหลายคน ในอดีตแพทย์เข้าใจว่าโรคพาร์กินสันนี้มีความผิดปกติที่ไขสันหลัง แต่ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันแน่นอนแล้วว่าพยาธิสภาพของโรคนี้เกิดขึ้นที่ในส่วนลึกๆ ของตัวสมองเอง โรคพาร์กินสันนี้เป็นโรคที่รู้จักกันครั้งแรกในวงการแพทย์ในปี พ.ศ.2360 (ค.ศ.1817) หรือเกือบ 200 ปีมาแล้ว โดยนายแพทย์เจมส์ พาร์กินสัน (Jame Parkinson)ชาวอังกฤษ เป็นผู้รายงานโรคพาร์กินสันเป็นคนแรก ซึ่งได้อธิบายกลุ่มอาการที่มีการสั่นของมือ และการเคลื่อนไหวน้อย ต่อมาปี ค.ศ.1960 ได้มีการค้นพบว่าเซลล์ของสมองไม่สามารถสร้างสาร Dopamine ได้อย่างเพียงพอ โรคพาร์กินสันจะมีปัญหาการเสื่อมของสมองส่วนนี้ทำให้การสร้างสาร Dopamine น้อยลง เซลล์สมอง (Neurone) ในส่วนที่เรียกว่า Substantia Nigra จะสร้างสารเคมีที่เรียกว่า Dopamine สารนี้จะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมไปยังสมองส่วนที่เรียกว่า Corpus Striatum ทำให้การทำงานของกล้ามเนื้อมีกำลังและประสานกันได้อย่างดี หากเซลล์สมองส่วนนี้ไม่สามารถสร้างสารดังกล่าวได้อย่างเพียงพอ การทำงานของกล้ามเนื้อจะไม่ประสานงานกัน มือจะกระตุก ไม่สามารถทำงานที่ต้องประสานงานของกล้ามเนื้อหลายๆมัด ปัจจุบันยังไม่สามารถรักษาอาการของโรคนี้ได้ แต่สามารถบำบัดอาการของโรคได้ด้วยการให้สารโดพามีนเข้าทางกระแสเลือด

เทคนิคการตรวจวัดปริมาณโดพามีนปัจจุบันมีหลายเทคนิค อาทิ เทคนิคทาง Chromatography [2-3], Spectrophotometry [4], Spectrofluorimetry [5] แต่มีข้อเสียคือ มีความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง ระยะเวลาการวิเคราะห์นาน เครื่องมือมีราคาแพง ส่วนเทคนิค Flow Injection Analysis [6] ความรวดเร็วในการวิเคราะห์สูง และสะดวกรวดเร็ว แต่เครื่องมือที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังมีราคาสูง ซึ่งยังมีอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้วัดปริมาณโดพามีนคือ เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า [7-13] เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เทคนิคนี้มีข้อดีกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้นคือ มีสภาพไวสูง, เครื่องมือใช้งานง่าย สะดวกรวดเร็ว เครื่องมือมีราคาถูกกว่า สำหรับเทคนิคทางเคมีไฟฟ้ามีด้วยกันหลายเทคนิค เทคนิคที่ผู้วิจัยมีความสนใจอย่างยิ่งคือ เทคนิคโวลแทมเมทรี เป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะสูง และสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างซ้ำได้ เพราะไม่มีการทำลายตัวอย่าง ส่วนประกอบหลักของขั้วไฟฟ้าประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้าใช้งานขนาดเล็ก การตรวจวัดโดพามีนในทางการแพทย์ ทำได้สะดวกรวดเร็วโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าใช้งานที่นิยมใช้ตรวจวัดโดพามีนโดยทั่วไปใช้ ขั้วไฟฟ้ากลาสสิคาร์บอน และขั้วกราไฟต์ แต่จะมีสภาพไว และสัญญาณรบกวนสูง ทำให้มีความสามารถในการตรวจวัดโดพามีนไม่ดีเท่าที่ควร จากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าเคมี [7] เพื่อใช้ตรวจวัดโดพามีนทางเคมีไฟฟ้า โดพามีนเป็นสารเคมีที่สำคัญในสมองเป็นสารที่เกิดออกซิเดชันได้ง่าย ดังนั้นวิธีการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าจะเป็นแบบแอโนดิกออกซิเดชัน ความเข้มข้นของโดพามีนในเส้นประสาทส่วนกลางมีความเข้มข้นน้อยกว่า 100 nM [14] ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ช่วยให้เกิด Catalysis ทางเคมีไฟฟ้าที่จำเพาะเจาะจงกับโดพามีน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาและพัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสารโดพามีน โดยใช้ผงมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงมาก มีเสถียรภาพทางเคมีสูง และใช้สารซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) ซึ่งเป็นสารเมดิเอเตอร์ทางอนินทรีย์ ซึ่งช่วยทำให้การส่งผ่านของอิเล็กตรอนบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าง่ายขึ้น โดยผู้ทำการวิจัยได้หวังว่า วัสดุทั้งสองจะทำให้การตรวจวัดโดพามีนมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่า ขั้วไฟฟ้าที่มีอยู่ในทางการค้า ซึ่งจะมีความไวไม่สูงมากและราคาค่อนข้างสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1.2.1 เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) สำหรับการตรวจวัดโดพามีน
- 1.2.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดโดพามีน ของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) ที่สร้างได้ และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้ากาสลิล คาร์บอน

1.3 ขอบเขตการศึกษาของโครงการพิเศษ

- 1.3.1 ศึกษาการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) สำหรับใช้ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าคาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์
- 1.3.2 ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ ที่ปรับปรุงด้วยเฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยเฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมของเพสต์สำหรับการตรวจวัดโดพามีน
- 1.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดโดพามีน ได้แก่ ค่าพีเอช และอัตราการสแกนด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี
- 1.3.4 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยเฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) ที่สร้างได้ กับขั้วไฟฟ้ากาสลิลคาร์บอน และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยเฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) ได้แก่ ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง, ความไวของการตรวจวัด, ความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้, ความเที่ยงของการตรวจวัด และการวิเคราะห์หาโดพามีนในตัวอย่าง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถสร้างขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับที่มีประสิทธิภาพสูงในการตรวจวัดโดพามีนได้
- 1.4.2 สามารถนำวิธีที่ศึกษามาใช้เป็นทางเลือกสำหรับการตรวจวัดโดพามีนได้ โดยใช้แทนเทคนิคอื่น ๆ ที่มีราคาแพง และอาจใช้เวลาในการวิเคราะห์นานกว่า
- 1.4.3 สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานในตัวตรวจวัดของระบบ Flow Injection Analysis (FIA) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้รวดเร็วยิ่งขึ้นในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์ตัวอย่างในปริมาณมากๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โดพามีน (Dopamine) [15-17]

ในทางการค้ามีสองชนิดคือ ชนิดที่อยู่ในรูปไฮโดรโบรไมด์และไฮโดรคลอไรด์ สำหรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไฮโดรคลอไรด์ เรียกตาม IUPAC คือ 3-Hydroxytyramine Hydrochloride มีสูตรโมเลกุล $C_8H_{11}NO_2 \cdot HCl$ มีน้ำหนักโมเลกุลคือ 189.64 g/mole สมบัติทางเคมีคือว่องไวต่อแสงและอากาศ (Air and Photosensitive) จึงจำเป็นต้องเก็บในที่แห้งและเย็น และต้องไม่โดนแสงเพื่อป้องกันการสลายตัว



ชื่อ IUPAC 4-(2-Aminoethyl)-1, 2-Benzenediol

ชื่อเรียกอื่นๆ เช่น 4-(2-Aminoethyl) Pyrocatechol, 3-Hydroxytyramine,

3,4-Dihydroxyphenethylamine, α -(3,4-Dihydroxyphenyl)- β -Aminoethane

สมบัติทางเคมี คือ ว่องไวต่อแสงและอากาศ (Air and Photosensitive) จึงจำเป็นต้องเก็บในที่แห้งและเย็น และต้องไม่โดนแสง เพื่อป้องกันการสลายตัว

สูตรโมเลกุล $C_8H_{11}NO_2$

มวลโมเลกุล 153.18

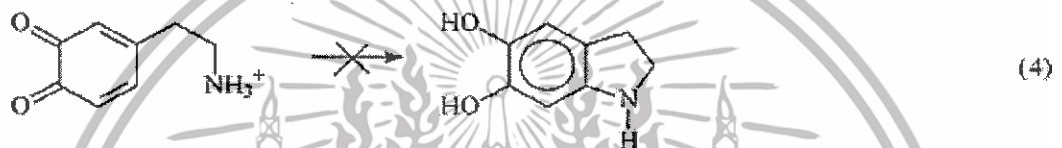
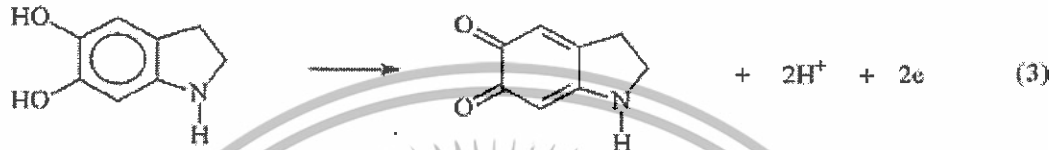
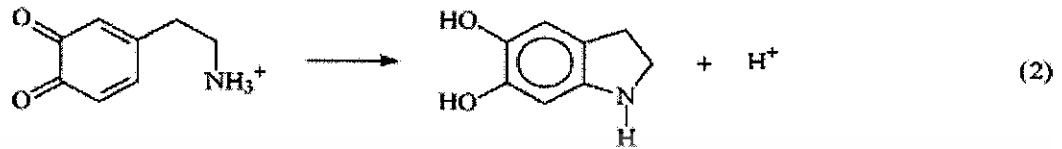
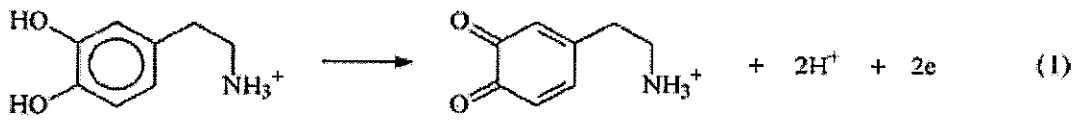
มีองค์ประกอบทางเคมีคือ C 62.73%, H 7.24%, N 5.14%, O 20.89%

ในทางการค้าโดพามีนจะอยู่ในรูปของแข็งมี 2 แบบคือ

1. อยู่ในรูป Hydrochloride $C_8H_{11}NO_2 \cdot HCl$ มวลโมเลกุล 189.64 จุดหลอมเหลว $241^\circ C$
2. อยู่ในรูป Hydrobromide $C_8H_{11}NO_2 \cdot HBr$ มวลโมเลกุล 234.10 จุดหลอมเหลว $210 - 214^\circ C$ ในงานวิจัยนี้ใช้โดพามีนที่อยู่ในรูป Hydrochloride

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน [14]

จากรูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาที่ 1 แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนได้อิเล็กตรอน 2 อิเล็กตรอน จากปฏิกิริยาที่ 1 สามารถเกิดปฏิกิริยาปัดวงแหวนดังปฏิกิริยาที่ 2 ทำให้เกิด Leucodopaminechrome ในสมการที่ 3 สามารถเกิดออกซิไดส์เป็น Dopaminechrome เมื่อ pH น้อยกว่า 7 ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อปัดวงได้ ดังสมการที่ 4

คุณสมบัติทางเภสัชวิทยาของยาโดพามีน

ชื่อยา Dopamine HCL รูปแบบและชนิดของยาในโรงพยาบาล Inopin® 250 mg/10 ml, Dopaminex 50 mg/5 ml

ข้อบ่งใช้

เพื่อเพิ่มความดันโลหิตในภาวะช็อกที่ไม่ใช่จากการขาดเลือด หรือขาดน้ำในร่างกาย และอาจใช้ในขนาดต่ำเพื่อเพิ่มเลือดไปเลี้ยงไต

ข้อห้ามใช้

1. ผู้ป่วยที่ Hypersensitive กับ Sulfites เพราะยามี Sodium Metabisulfite เป็น

ส่วนประกอบในการเป็น Antioxidant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผู้ป่วยที่มีอาการ Ventricular Fibrillation, Tacchyarhythmia Phaeochromocytoma

การเตรียมยา

ยาที่ทำการเจือจางแล้วจะมีความคงตัวได้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง และยาสลายตัวได้ง่ายในสภาวะที่เป็นด่าง

ปริมาณยาโดพามีนที่ใช้ในการรักษา

การให้ยาแก่ผู้ป่วยควรให้ทางเส้นเลือดดำใหญ่ และเมื่อต้องการหยุดยาควรค่อย ๆ ลดขนาดยาเพื่อป้องกันการเกิด Hypotension

เด็ก ต่ำสุด 1-20 mg/kg/min สูงสุดไม่เกิน 50 mg/kg/min

ผู้ใหญ่ ต่ำสุด 1-5 mg/kg/min สูงสุดไม่เกิน 20 mg/kg/min

ผลกระทบข้างเคียงที่สำคัญของยาโดพามีน

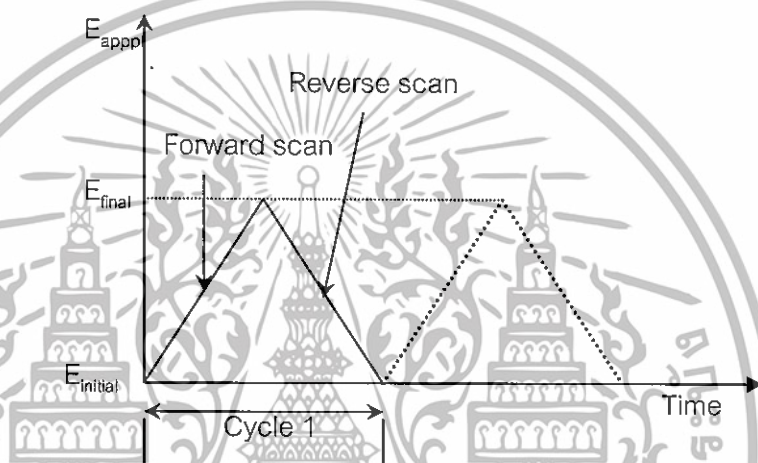
1. การชักนำให้มีการเต้นของหัวใจที่ผิดปกติทั้งแบบ Supraventricular และ Ventricular Arrhythmias
2. การเพิ่มความต้องการออกซิเจนของกล้ามเนื้อหัวใจ ซึ่งอาจทำให้อาการกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดรุนแรงขึ้น
3. ผลจากการกระตุ้น Alpha-1 Receptor ทำให้เกิดการขาดเลือดไปเลี้ยงอวัยวะส่วนปลาย โดยเฉพาะเมื่อใช้ยาในปริมาณสูงหรือในระยะยาว

สมบัติทางเคมีอื่น ๆ ที่สำคัญ คือ ว่องไวต่อแสงและอากาศ (Air and Photosensitive) จึงจำเป็นต้องเก็บในที่แห้งและเย็น และต้องไม่โดนแสง เพื่อป้องกันการสลายตัว จากการทดลองนี้อาศัยความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางไฟฟ้าของโดพามีน ในการตรวจวัดปริมาณโดพามีน

เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้มี 2 เทคนิค คือ ไซคลิกโวลแทมเมตรี และดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี

2.2 ไชคลิกโวลแทมเมตรี [18-21]

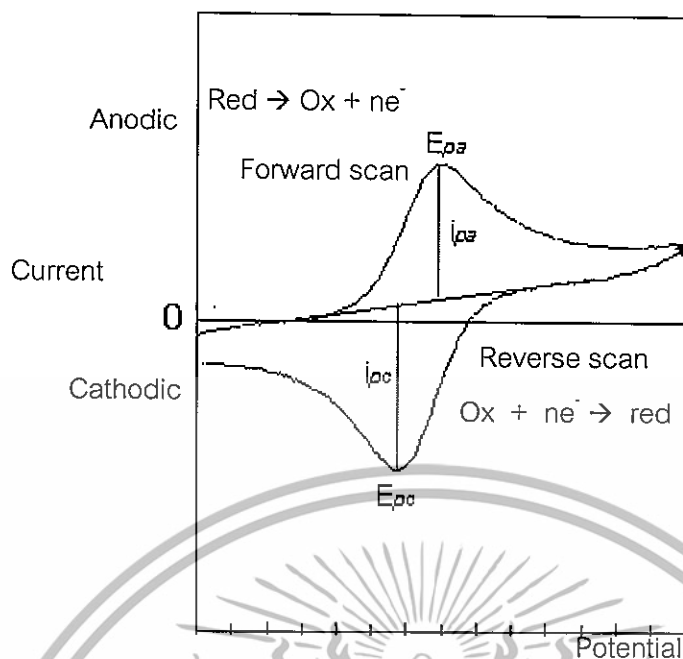
ไชคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry) เป็นการสแกนศักย์ไฟฟ้าเชิงเส้นตรงแบบคลื่นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2.3 ใช้กับระบบที่ใช้อิเล็กโทรดแบบนั่งขนาดเล็กในสารละลายที่ไม่มี การปั่นกววน ศักย์ไฟฟ้ารูปสามเหลี่ยมนี้สามารถให้วนได้ไม่จำกัดรอบหรือให้เพียงรอบเดียวขึ้นกับ ข้อมูลที่ต้องการตรวจหา ไชคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมากเพื่อใช้ในการ ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสารบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานตลอดจนใช้ในการ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าอื่น ๆ



รูปที่ 2.3 แผนภาพสัญญาณกระตุ้นในไชคลิกโวลแทมเมโทรแกรม

การบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทำงานโดยไชคลิกโวลแทมเมโทรแกรมเป็นการพล็อตระหว่างกระแสที่เกิดขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้ การตอบสนองที่อยู่ในรูปกระแสของการสแกนไปข้างหน้ามีลักษณะคล้ายคลื่นในโวลแทมเมตรีแบบกวาดเชิงเส้นตรง (Linear Sweep Voltammetry) พารามิเตอร์ที่สำคัญของการกระตุ้นแบบรอบและไชคลิกโวลแทมเมโทรแกรม ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Initial Potential, $E_{initial}$), ทิศทางการกวาดเริ่มต้น (Initial Sweep Direction, +/-), ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Potential, E_{max}), ศักย์ไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum Potential, E_{min}), ศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย (Final Potential, E_{final}), อัตราการสแกน (Scan Rate, v), ศักย์ไฟฟ้าที่แคโทดิกพีค (Cathodic Peak Potential, E_{pc}), ศักย์ไฟฟ้าที่แอนอดิกพีค (Anodic Peak Potential, E_{pa}), กระแสที่แคโทดิกพีค (Cathodic Peak Current, I_{pc}) และกระแสที่แอนอดิกพีค (Anodic Peak Current, I_{pa})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

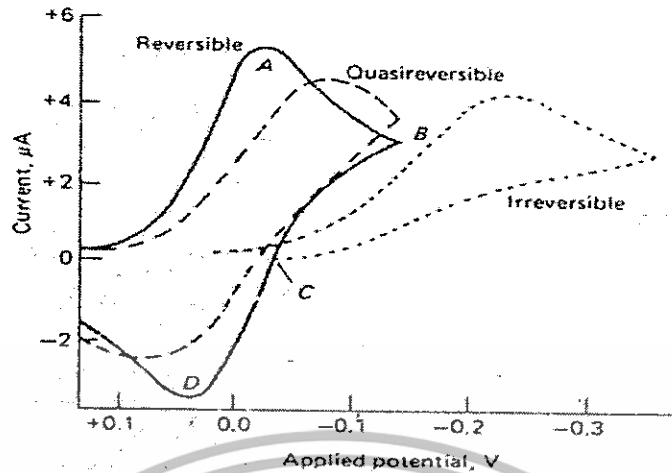


รูปที่ 2.4 โวลต์แอมป์ไซคลิกโวลแทมโมแกรมทั่วไป

เมื่อเริ่มสแกนศักย์ไฟฟ้าก็เริ่มมีกระแสเกิดขึ้น เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (ถึงยอดของสามเหลี่ยม) จะมีกระแสเนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นสูงสุดมีลักษณะเป็นพีกและเมื่อลดศักย์ไฟฟ้าด้วยอัตราเร็วเท่าเดิมกระแสก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงต่ำสุด เพราะเกิดปฏิกิริยาในทิศทางตรงกันข้าม (ผันกลับได้) มีลักษณะเป็นพีกเช่นกันแต่กลับทิศทางกัน การให้ศักย์ไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ มีความสัมพันธ์ดังสมการ 2.1

$$v = \frac{dE}{dt} \quad (2.1)$$

การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในเคมีไฟฟ้าโดยการให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางที่เป็นลบแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน สารที่อยู่ในรูปของออกซิไดส์ตอนเริ่มแรกในการให้ศักย์ไฟฟ้ายังไม่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจนกระทั่งให้ศักย์ไฟฟ้าใกล้จะถึง E° จะเริ่มเกิดกระแสแคโทดิกเกิดขึ้น ($Ox + ne^- \rightarrow Red$) เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางย้อนกลับจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ($Red \rightarrow Ox + ne^-$) และให้กระแสแอโนดิก ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.5 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมแบบต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.5 แสดงไชคคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาต่าง ๆ กราฟเส้นทึบ คือ กราฟของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ พีก A คือ แคโทดิกพีกของปฏิกิริยาซึ่งมีลักษณะเหมือนกับพีกที่เกิดขึ้นในลิเธียตริบโพลาริกราฟี ความสูงของพีกคือกระแสที่เกิดขึ้น เรียกว่า i_{pc} (Cathodic Current) เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าถึงค่าที่ทำให้ปฏิกิริยาเริ่มผันกลับ (จุด B) กระแสยังคงมีค่าเป็นบวกอยู่ เพราะยังมีกระแสเนื่องจากการแพร่ในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้น เมื่อลดศักย์ไฟฟ้าลง (ทำให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นลบน้อยลง) จนถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้กระแสมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงต่อไปอีก (ให้เป็นลบน้อยลง หรือเพิ่มความเป็นบวกมากขึ้น) จะส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น กระแสเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นรอบ ๆ ขั้วไฟฟ้าทำงานของไอออนที่โวลต์ลงเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้เกิดกระแสจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุดทำให้เกิดเป็นพีก D ขึ้นเรียกว่า แอนอดิกพีก ความสูงของพีกคือ กระแสที่เรียกว่า i_{pa} (Anodic Current) สำหรับปฏิกิริยาที่ผันกลับได้นี้จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างพีก A และพีก D เท่ากับ $2 \times 0.0282/n$ โวลต์ ถ้าหากพีกมีลักษณะสมมาตรกัน (Reversible) ความแตกต่างของตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า (ΔE_p) จะอยู่ในช่วง 57 – 60 mV

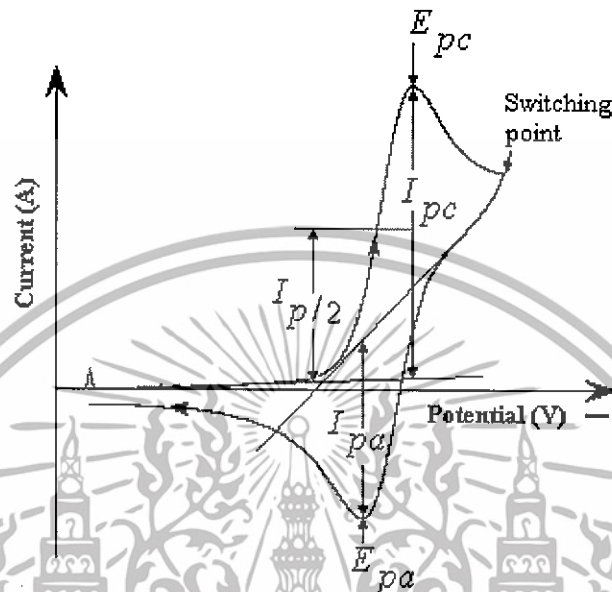
$$\Delta E_p = E_{p,a} - E_{p,c} = 0.059/n \text{ V} \quad (2.2)$$

เมื่อ $E_{p,a}$ แทน ตำแหน่งของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
 $E_{p,c}$ แทน ตำแหน่งของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การแปรผลข้อมูล

การแปรผลข้อมูลของไซคลิกโวลแทมโมแกรมซึ่งพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดสองค่า และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดสองค่า หรือค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากตำแหน่งแคโทดิกพีคและแอนโอดิกพีค ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.6 การแปรผลข้อมูลจากไซคลิกโวลแทมโมแกรม

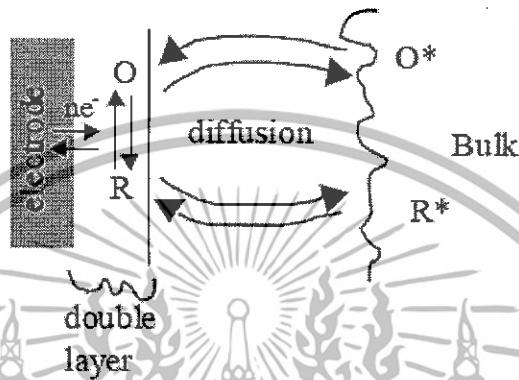
การวัดกระแส I_{pc} และ I_{pa} ที่เกิดขึ้นจากไซคลิกโวลแทมโมแกรมสามารถทำได้โดยต่อเส้นฐาน (Base Line) ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาแต่ละชนิดโดยการประมาณค่าแนวโน้มที่เป็นไปได้แล้ววัดระยะระหว่างส่วนยอดของพีคถึงฐาน สำหรับปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ไม่สมบูรณ์ (กราฟเส้นประจันในรูปที่ 2.5) และปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ (กราฟเส้นประจันในรูปที่ 2.5) สามารถทำการวิเคราะห์ได้จากการวัดค่ากระแส I_{pc} เท่านั้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อโวลแทมโมแกรมจึงทำให้วิธีการของไซคลิกโวลแทมโมแกรมหรือกลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษากลไกของปฏิกิริยาและอัตราเร็วในขบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์

2.2.2 ระบบที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible System)

ในระบบที่เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (Reversible Reaction) จะต้องเป็นระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อพิจารณาปฏิกิริยา $Ox + ne^- \leftrightarrow Red$ ตามรูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาของสารออกซิไดส์ที่อยู่ในรูป Ox รับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนอยู่ในรูป Red และเกิดการแพร่ของสารในชั้นการแพร่ของสารละลาย กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพร์นี้เรียกว่ากระแสแคโทดิก (Cathodic Current) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามจะเกิดปฏิกิริยาของสารรีดิวซ์ (Reduced) ที่อยู่ในรูป Red ให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนไปเป็น Ox กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร์นี้เรียกว่ากระแสแอนอดิก (Anodic Current) และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction)



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้า

กระแส I_p ที่วัดได้จากแคโทดิกพีคและแอนอดิกพีคจะมีขนาดเท่ากันซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นและรากที่สองของอัตราเร็วในการสแกนศักย์ไฟฟ้างวดสมการ 2.3

$$I_p = 2.69 \times 10^5 n^{3/2} A C D^{1/2} \nu^{1/2} \quad (2.3)$$

เมื่อ	I_p	แทน	กระแสพีค มีหน่วยเป็น A
	n	แทน	จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้อง
	A	แทน	พื้นที่ขั้วไฟฟ้า มีหน่วยเป็น cm^2
	C	แทน	ความเข้มข้น มีหน่วยเป็น mol cm^{-3}
	D	แทน	สัมประสิทธิ์ของการแพร่ มีหน่วยเป็น $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
	ν	แทน	อัตราสแกน มีหน่วยเป็น Vs^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบของ Nernst ปฏิกริยาที่ผันกลับได้ (Reversible) จะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. การแยกกันของ $\Delta E_p = E_{p,a} - E_{p,c}$ ต้องมีค่าเป็น $59/n$ mV ที่ 25°C
2. ค่าของ E_p ไม่ขึ้นอยู่กับการสแกน
3. i_p จะเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับค่า $v^{1/2}$
4. อัตราส่วนของพีค I_{pa}/I_{pc} ต้องมีค่าเท่ากับ 1
5. ค่าของ $E^0 = \frac{E_{pa} + E_{pc}}{2}$
6. ค่าของ $E_{p/2} = E_{1/2} \pm \frac{0.028}{2} v$

จากสมการ 2.3 ถ้านำค่า i_p มาพลอตกับค่า $v^{1/2}$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงนั้นแสดงว่ากระบวนการนี้เป็น Diffusion-Controlled และถ้าให้ค่า n , A , C และ D คงที่เมื่อใส่ \log ลงในสมการ 2.3 จะได้

$$\begin{aligned} \log i_p &= \log (2.69 \times 10^5 n^{3/2} ACD^{1/2}) + \log v^{1/2} \\ \log i_p &= 0.5 \log v \end{aligned} \quad (2.4)$$

จากสมการ 2.4 ถ้านำค่า $\log i_p$ มาพลอตกับค่า $\log v$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงและมีค่าชันเท่ากับ 0.5 ดังนั้นกระบวนการที่เกิดขึ้นแสดงว่าเป็น Diffusion-Controlled แต่ถ้าปฏิกริยาผันกลับไม่ได้จะไม่เกิดพีคเมื่อสแกนให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงเรียกว่า Irreversible และถ้าปฏิกริยาผันกลับได้ไม่สมบูรณ์ลักษณะพีคที่เกิดขึ้นจะไม่สมมาตรกันเรียกว่า Quasi-Reversible จะพบว่าค่า ΔE_p จะมากกว่า $0.059/n$ โวลต์ และจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการสแกน

ในกรณีที่มีสารตั้งต้นหรือสารผลิตภัณฑ์ติดอยู่ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากระแสของพีคที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ 2.4

$$i_p = n^2 F^2 C_{ads} v / 4RT \quad (2.5)$$

เมื่อ	F	แทน Faraday Constant มีหน่วยเป็น C mol^{-1}
	C_{ads}	แทน ความเข้มข้นของสารที่ติดอยู่ที่ผิวหน้า มีหน่วยเป็น mol cm^{-3}
	v	แทน อัตราการสแกน มีหน่วยเป็น Vs^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.5 ถ้านำค่า I_p มาพลอตกับค่า v จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงนั้นแสดงว่ากระบวนการนี้เกิดมีสารติดที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า และถ้าให้ n, F, C_{ads}, R และ T คงที่ เมื่อใส่ \log ลงในสมการ 2.5 จะได้

$$\log I_p = \log\left(\frac{n^2 F^2 C_{ads}}{4RT}\right) + \log v$$

$$\log I_p = \log v \quad (2.6)$$

จากสมการ 2.6 ถ้านำค่า $\log I_p$ มาพลอตกับค่า $\log v$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงและมีความชันเท่ากับ 1 ดังนั้นกระบวนการที่เกิดขึ้นแสดงว่าเป็นการดูดซับสารที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า

2.2.3 ระบบที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ และกึ่งผันกลับได้ (Irreversible and Quasi-Reversible System)

ในกระบวนการที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ (Irreversible Reaction) จะมีการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอนของการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าทำให้เกิดพีคเดียวและเกิดการเลื่อนของศักย์ไฟฟ้า โดยการเลื่อนของศักย์ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับค่าอัตราเร็วการสแกนศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.7

$$E_p = E^\circ - \frac{RT}{\alpha n_a F v} \left[0.780 + \ln\left(\frac{D^{1/2}}{k^\circ}\right) + \ln\left(\frac{\alpha n_a F v}{RT}\right) \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ	α	แทน	Transfer Coefficient
	k°	แทน	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการเคลื่อนที่อิเล็กตรอน
	n_a	แทน	จำนวนอิเล็กตรอนในขั้นตอนการกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการของกระบวนการขั้วไฟฟ้า (The Number of Electrons in the Rate-Determination Step of Electrode Process)
	E_p	แทน	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าของพีค(Peak Potential ; E_p) และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งพีค (Half-Peak

Potential ; $E_{p/2}$) ที่ 25 °C จะแตกต่างกันเท่ากับ $|E_p - E_{p/2}| = \frac{1.857RT}{\alpha F} = \frac{47.7}{\alpha} \text{ mV}$

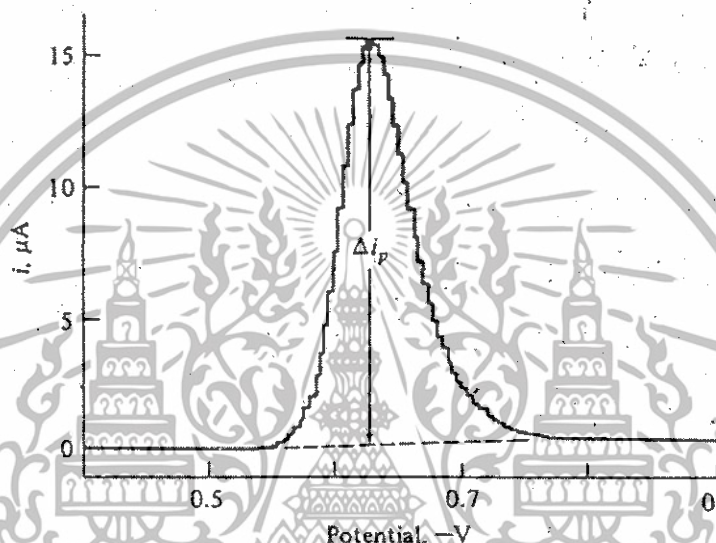
และปริมาณกระแสไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ 2.8

$$I_p = (2.99 \times 10^5) n(\alpha n_a)^{1/2} (ACD^{1/2}) v^{1/2} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างระหว่างกระแสที่วัดได้จากช่วงศักย์ไฟฟ้าทั้งสองจะถูกนำมาพลอตกราฟเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แกเซลล์ โพลาริแกรมที่ได้คืออนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของโพลาริแกรมตามปกติ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7 ความสูงของพีกคือ Δi_p จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย ตามสมการ 2.10

$$\Delta i_p = \frac{nFAD^{3/2}C}{\pi^{1/2}\delta^{1/2}} \left[\frac{e^{(nF\Delta E/2RT)} - 1}{e^{(nF\Delta E/2RT)} + 1} \right] \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.9 ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมโทรแกรม

การวิเคราะห์ปริมาณโดยวิธีดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โพลาริกราฟีสามารถทำได้โดยวิธีเติมสารมาตรฐานเช่นเดียวกับวิธีของพัลส์โพลาริกราฟีโดยการเพิ่มขนาดของพัลส์ของศักย์ไฟฟ้า (เพิ่ม ΔE) จะทำให้วิธีการวิเคราะห์ที่มีความไวสูงขึ้นแต่ความสามารถในการแยกของพีกเมื่อมีสารหลายตัวผสมกันลดลง ถ้าการวิเคราะห์มีสปีชีส์ที่สนใจอยู่เพียงตัวเดียวในสารละลาย พัลส์ของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ควรมีขนาดระหว่าง 50 – 100 mV เพื่อทำให้มีความไวสูงที่สุด แต่ถ้ามีสปีชีส์ที่สนใจตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ขนาดของพัลส์ควรลดลงเหลือ 5 – 10 mV เพื่อทำให้การแยกดีขึ้น วิธีของดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โพลาริกราฟี ยังคงเป็นเทคนิคและวิธีการที่ใช้ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC potential) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาปริมาณของสารได้ในปริมาณน้อยกว่าที่วิธีโพลาริกราฟีธรรมดาจะทำได้ ถ้าขั้วไฟฟ้าทำงานเป็นขั้วของแข็งที่อยู่หนึ่งหรือขั้วของแข็งที่หมุนได้ จะเรียกว่าพัลส์โวลแทมเมตรี (Pulse Voltammetry) หรือดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี (Differential Pulse Voltammetry)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วัสดุสำหรับทำตัวตรวจวัด (Material for Sensors) [22]

ในเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าจะมีการเลือกวัสดุสำหรับทำตัวตรวจวัดที่หลากหลาย สำหรับหลักการเลือกวัสดุนั้นขึ้นกับคุณสมบัติของสารที่จะวิเคราะห์ (Analyte) และสิ่งรบกวนการวิเคราะห์ (Interference) วัสดุสำหรับทำตัวตรวจวัดมีหลายประเภท ได้แก่

2.4.1 พอลิเมอร์ (Polymers)

พอลิเมอร์เป็นสารชนิดแรกที่ถูกใช้ในการปรับปรุงตัวตรวจวัด (Sensor) พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความหลากหลาย เนื่องจากมีหลายชนิด สำหรับวัตถุประสงค์ที่มีการเลือกใช้ก็แตกต่างกันไป เช่น เพิ่มความไวของตัวตรวจวัด, ปรับปรุงความจำเพาะเจาะจง, เป็นตัวยึดจับสารอื่นๆที่ต้องการให้ยึดติดบนตัวตรวจวัด (Immobilizer) เป็นต้น

2.4.2 ไบโอสเซนเซอร์ที่บรรจุโลหะเชิงซ้อน (Biosensing Material Containing Metal Complex)

กลุ่มวัสดุที่สำคัญที่ถูกใช้ในการผลิตไบโอสเซนเซอร์ คือสารพวกพอลิเมอร์ที่จะบรรจุโลหะโคออร์ดิเนชันต่างๆ (เช่น Os, Ru, Ni เป็นต้น) วัสดุพวกนี้สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ง่าย และควรมีสมบัติเป็นตัวเร่งได้ดี ตัวอย่างเช่น Cytochrome, Peroxidase และ HRP เป็นต้น

2.4.3 วัสดุซิล-เจล (Sol-Gel Materials)

การขึ้นรูปแบบนี้จะถูกนำไปใช้ขึ้นรูปสารจำพวกแก้วและเซรามิกส์ โดยเริ่มต้นจะทำให้สารประเภทโลหะหรือออกไซด์ของโลหะที่มีสถานะที่เป็นของแข็งกลายเป็นสารละลายเหลว จากนั้นให้ความร้อนสูงเพื่อให้ซิลเจลแห้งกลายเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่ง สำหรับตัวอย่างของการขึ้นรูปตัวตรวจวัดด้วยเทคนิคซิลเจล เช่น การผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงในซิลิกาซิล หรือไทเทเนียมออกไซด์ซิล หลังจากผ่านความร้อนแล้วจะทำให้เกิดฟิล์มบางของของผสม ซึ่งวิธีนี้อาจมีการประยุกต์เอาเอนไซม์, เมดิเอเตอร์, ผงกราฟไฟต์ หรือสารเติมแต่งอื่นๆอยู่บนตัวตรวจวัดได้ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังสามารถพัฒนาตัวตรวจวัดด้วยการ โดปวัสดุอื่นๆลงซิลเจลฟิล์มได้หรืออาจทำเป็นตัวตรวจวัดชนิดที่มีฟิล์มหลายๆชั้น (Multi-Layer)

2.4.4 วัสดุนาโน (Nanomaterial)

ตั้งแต่มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปี ค.ศ. 1991 วัสดุนาโนก็เริ่มมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ในงานวิจัยในด้านตัวตรวจวัดพบว่าความสามารถในด้านการควบคุมขนาดและโครงสร้างของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของวัสดุระดับนาโนจะดีถ้ามีพื้นที่ผิวของอนุภาคมากขึ้น ในปัจจุบันเทคนิคการสังเคราะห์และการกำหนดโครงสร้างในวัสดุระดับนาโนมีการพัฒนาไปมากจนได้วัสดุระดับนาโนที่มีความบริสุทธิ์สูง กำลังการผลิตสูงและต้นทุนต่ำ วัสดุนาโนที่นิยมใช้กันในงานไบโอสเซนเซอร์และเซ็นเซอร์ประกอบด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์ ฟิล์มนาโนคริสตัล ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 วัสดุประกอบ (Composite Material)

วัสดุประกอบที่ใช้กันในงานไบโอเซ็นเซอร์และเซ็นเซอร์จะประกอบด้วยสองส่วนเป็นอย่างน้อย คือ ส่วนที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า (Electronic Conductor) ซึ่งจะมีสถานะเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นผงและอีกส่วนคือสารที่ทำให้องค์ประกอบแรกซึ่งเป็นผงยึดเกาะกันได้ (ซึ่งเรียกว่า Binding Agent) สำหรับในบางการใช้งานอาจมีการใส่สารเพื่อปรับปรุงตัวไฟฟ้าหรือเรียกว่า Modifier เช่น เอนไซม์ (Enzyme) หรือตัวเร่งทางอนินทรีย์ (Inorganic Catalyst) เป็นต้น สำหรับการเลือกอนุภาคผงสำหรับทำตัวตรวจวัดคือ ต้องพิจารณาจากสมบัติทางเคมีไฟฟ้านั้นคือ ต้องให้กระแสรบกวนและกระแสปั่นด้า (Low Noise and Background) ส่วนสัญญาณนั้นจะต้องสูง (High Signal) ส่วนการเลือกสาร Binding Agent จะเลือกชนิดที่มีสมบัติเฉื่อยทางเคมีและไม่เป็นสารประเภทว่องไวทางไฟฟ้า (Electro-Inactive) นอกจากนี้ควรมีการระเหยได้ยาก และไม่ละลายในสารละลายที่ตรวจวัด สำหรับตัวอย่างของ Binding Agent ได้แก่ สารพวกอะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอะโรมาติก และ น้ำมันซิลิโคน

2.4.6 ซีโอไลต์ (Zeolites)

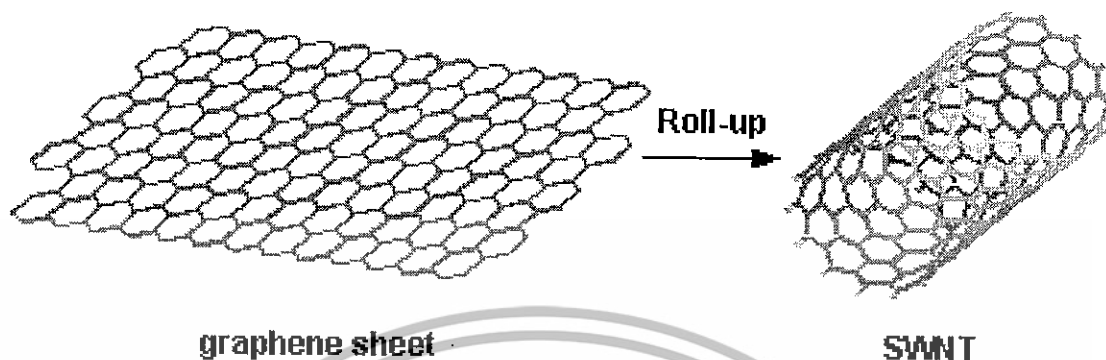
ซีโอไลต์เป็นเป็นสารประกอบจำพวกไฮเดรต อะลูมิโนซิลิเกต (Hydrated Aluminosilicate, $(M^{n+})_x(AlO_2)_m(SiO_2)_y \cdot n(H_2O)$) เป็นสารที่จะต้องให้ปรับปรุงตัวตรวจวัดในรูปของวัสดุประกอบเพราะอนุภาคของมันเองนำไฟฟ้าได้ไม่ดี โดยจะต้องนำไปกระจายตัวในเมทริกซ์เฟสที่มีการนำไฟฟ้าที่ดีสำหรับประโยชน์ของซีโอไลต์คือ ทำให้ความเจาะจงในการตรวจวัดดีขึ้นเพราะซีโอไลต์จะมีรูพรุนซึ่งเลือกดูดซับสารแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน

นอกจากวัสดุเหล่านี้ยังมีวัสดุจำพวกอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง แต่ในงานวิจัยครั้งนี้จะใช้วัสดุที่จะนำมาทำตัวไฟฟ้าคือ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และ ซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต จึงขออธิบายเฉพาะสมบัติของวัสดุที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เพิ่มเติม คือ คาร์บอนนาโนทิวบ์และซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(II)

2.5 คาร์บอนนาโนทิวบ์ [23-24]

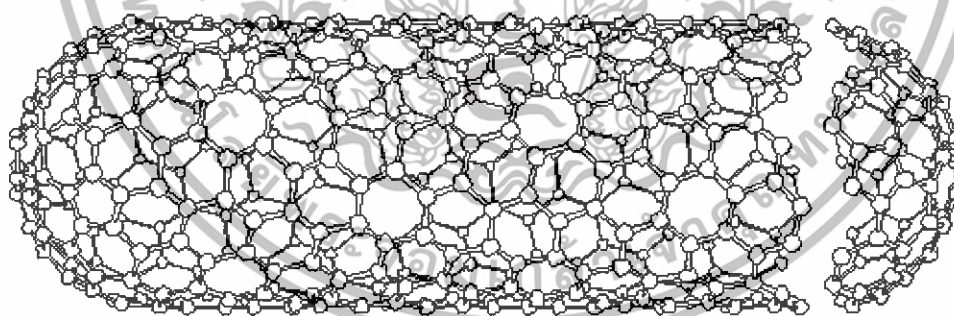
คาร์บอนนาโนทิวบ์มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดนาโนเมตร (ประมาณตั้งแต่ 1-50 นาโนเมตร) และมีลักษณะเป็นท่อกลวงยาวจนถึง 10 ไมโครเมตร ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์อัตราความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางถึงหลายพันเท่า คาร์บอนนาโนทิวบ์มีธาตุคาร์บอนที่เป็นธาตุเดียวกันกับเพชรและถ้ำถ่าน มีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอยู่ 4 ตัวจึงมีความแข็งแรงและคงทน ในขณะที่กราฟไฟต์ (Graphite) มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอยู่เพียง 3 ตัว และเรียงตัวเป็นแผ่นคล้ายกับรังผึ้ง (Honeycomb) และผงซีเถ้าหรือถ่านจากการเผาไหม้ จะมีโครงสร้างคล้ายกราฟไฟต์แต่เรียง

ตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ถ้านำแผ่นกราฟไฟต์ที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้งม้วนเข้าเป็นท่อ จะได้คาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ (SWNT) ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb) [25]

เนื่องจากเมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวก็จะมากขึ้นเมื่อเทียบกับในปริมาตรรวมหรือมวลที่เท่าเดิม ดังนั้นปรากฏการณ์ที่ต้องเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิว เช่น การเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เราเรียกว่า Catalyst ซึ่งถ้าหากมีพื้นที่ผิวมากขึ้น การทำปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวที่มากขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นด้วย



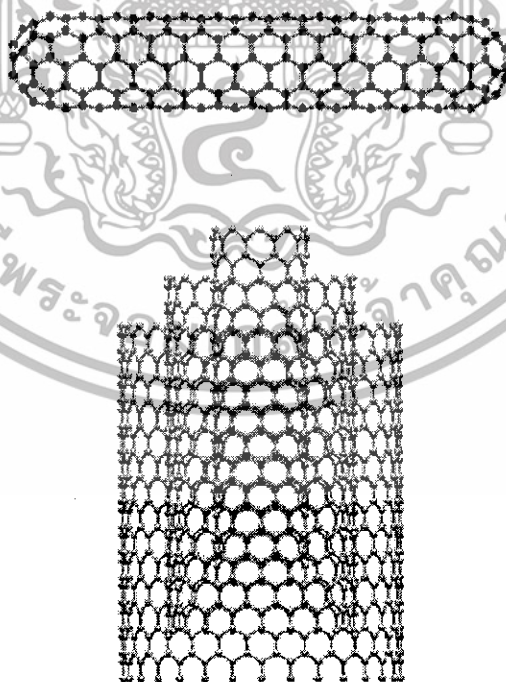
รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon Nanotube) [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้ ถ้าถูกจัดเรียงให้เป็นแนวตรง ก็จะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า แต่ถ้าโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกบิดไม่ให้เป็นแนวตรง จะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำขึ้นมา ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถจะถูกบังคับให้มีสถานะนำหรือไม่นำกระแสได้โดยใช้สนามไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัตินี้ที่ทำให้สามารถนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาสร้างทรานซิสเตอร์ได้ และประกอบกับความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าคาร์บอนนาโนทิวบ์ดีกว่าตัวนำทุกชนิด อย่างไรก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติทางกลคือ มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นมาก ทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเหล็กถึง 20 เท่า และมีความแข็งแรงทนต่อการบิดเบี้ยวมากกว่าเหล็กถึง 10 เท่า

การใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ การที่มีคุณสมบัติเป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าและสารกึ่งตัวนำ เราจึงนำมาทำเป็นทรานซิสเตอร์ คือ นำมาเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ก็จะสามารถสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูงมาก [24] และมีความต้านทานที่ต่ำมาก แถมยังมีความสมบัติควอนตัม (Quantum) คือ สามารถควบคุมการไหลเคลื่อนอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง อาจจะเป็นกลุ่ม จนกระทั่งเป็นอิเล็กตรอนทีละตัวได้

ปัจจุบันมีการสร้างนาโนทิวบ์จากธาตุชนิดอื่นๆ มากมาย เช่น ซิลิคอน แกลเลียมอาเซไนต์ เป็นต้น เรียกว่า ลวดนาโน (Nanowire) เพราะว่ามันกลวงเหมือนนาโนทิวบ์ คาร์บอนนาโนทิวบ์มีผนังชั้นเดียว เรียกว่า Single-Walled Carbon Nanotubes (SWNTs) ยังมีแบบที่เป็นท่อที่มีผนังหลายชั้นซ้อนกันคล้ายเอาท่อเล็กซ้อนในท่อใหญ่ เรียกว่า Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWNTs)



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (บน) และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ล่าง) [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNTs) [22]

CNTs สามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน

2.5.1.1 วิธีการแบบ Arc Discharge เป็นวิธีเริ่มแรกในการสังเคราะห์ C_{60} Fullerenes เป็นการสร้าง Plasma ให้เกิดขึ้นระหว่างขั้วคาร์บอนโดยการป้อนกระแสไฟ ซึ่ง CNTs จะเกิดการก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว วิธีนี้ทั้งที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่ง (SWCNTs) และที่ไม่ใช้โลหะเป็นตัวเร่ง (MWCNTs) วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ CNTs ที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก

2.5.1.2 วิธีแบบ Laser Ablation ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ Smalley วิธีนี้ใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงกระทบกับแท่งคาร์บอนผสมโลหะที่อยู่ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200°C ทำให้เกิดคาร์บอนแก๊สและคาร์บอนอะตอมที่ร้อนขึ้น CNTs ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้จะแตกต่างจาก วิธี Arc Discharge ตรงที่ให้ CNTs ที่มีความบริสุทธิ์ที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามวิธี Laser Ablation นี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

2.5.1.3 วิธีแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition) คือการแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น แก๊สมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง $400\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาด และความยาวของทิวบ์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวบ์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้

2.5.2 มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Multi-walled Carbon Nanotubes, MWNTs)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ MWNTs เนื่องจากมีสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ดี ค่าการนำไฟฟ้าสูง และไม่ไวต่อสารที่วิเคราะห์ ส่วนสาเหตุที่ไม่เลือก SWNTs เพราะว่าราคาแพงกว่ามาก และสังเคราะห์ยาก ในการทำให้ MWNTs บริสุทธิ์จะประยุกต์จากวิธีของ Wang, Z. และคณะ [7] สาเหตุของที่ต้องล้างคาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อกำจัดโลหะที่ปนมาตอนสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั่นเอง

2.6 ซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (Silver Hexacyanoferrate(II)) [28]

ตัวย่อ AgHCF

สูตรโมเลกุล $\text{AgK}_3[\text{Fe}(\text{II})(\text{CN})_6]$

มวลโมเลกุล 574.690 g/mole

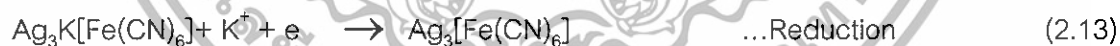
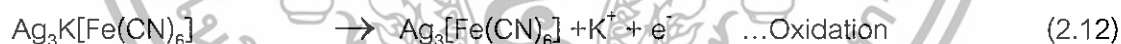
สมบัติทางกายภาพ สถานะเป็นของแข็ง สีฟ้าอ่อน

การละลายน้ำ พบว่าไม่ละลายน้ำ

ซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(II) สามารถสังเคราะห์ได้ตามวิธีของ Jayasri, D. และ Narayanan, S. S. [28] โดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(II) เป็นสารตั้งต้น โดยอัตราส่วนโดยโมลของ ซิลเวอร์ไอออนเป็นสามเท่าของไซยาโนเฟอร์เรต(II)ไอออน หลังจากผสมสารทั้งสองแล้วจะได้ตะกอนสีขาวอมฟ้า ซึ่งไม่ละลายในน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดตามสมการดังนี้



$\text{Ag}_3\text{K}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ถูกใช้เป็นเมดิเอเตอร์สำหรับตรวจวัด Butylated Hydroxyanisole (BHA) โดยใช้ AgHCF ผสมใน Graphite Wax โดย AgHCF สามารถเป็นตัวเร่งให้ BHA เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เพราะว่าตัว AgHCF นั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนผิวหน้าของตัวตรวจวัดทำให้ช่วยรับส่งอิเล็กตรอนแก่ BHA ดังสมการ



งานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ $\text{Ag}_3\text{K}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ เพื่อเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน โดยผู้ทดลองหวังว่า $\text{Ag}_3\text{K}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ จะช่วยให้สัญญาณการตรวจวัดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้ามีลดีวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nagaraja, P. และคณะ [4] ตรวจวัดโดพามีนไฮโดรคลอไรด์โดยใช้เทคนิคทางสเปกโทรโฟโตรีโอมเมทรีโดยการเปลี่ยนโดพามีนให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ของ Catechol (มีสีแดง) ซึ่งความยาวคลื่นของการดูดกลืนที่ตรวจวัดเท่ากับ 500 nm จากการตรวจวัดพบว่ามีช่วงการแปรผันตรง 0.02 ถึง 2.8 $\mu\text{g/ml}$ และค่า Molar Absorbivity เท่ากับ $3.6 \times 10^4 \text{ l mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ส่วน % Recovery เท่ากับ 98.85 % ส่วน % RSD. เท่ากับ 0.98 %

Wang, H.Y. และคณะ [5] ศึกษาสมบัติทางฟลูออโรเมทรีของโดพามีนในตัวทำละลายหลายๆ พบว่า เมทานอลเป็นตัวทำละลายที่ทำให้เกิดการคายฟลูออเรสเซนส์ได้ดีที่สุด โดยความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่กระตุ้นให้เกิดฟลูออเรสเซนส์เท่ากับ 279 nm และความยาวคลื่นของการคายฟลูออเรสเซนส์อยู่ที่ 315 nm สำหรับค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์จะอยู่ในช่วงที่เป็นกรดถึงกลาง ส่วนในช่วงที่สารละลายเป็นด่างพบว่าโดพามีนเกิดการออกซิเดชันกลายเป็นสาร Dopamine Otho-Quinine ซึ่งไม่สามารถให้แสงฟลูออเรสเซนส์ได้ จึงไม่เหมาะที่จะวิเคราะห์โดพามีนในสภาวะต่าง จากการตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคฟลูออโรเมทรีเปรียบเทียบกับเทคนิคโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง พบว่าเทคนิคทั้งสองให้ความถูกต้องสอดคล้องกัน แต่ว่าเทคนิคฟลูออโรเมทรีมีความรวดเร็วในการวิเคราะห์มากกว่า สำหรับเทคนิคฟลูออโรเมทรีมีขีดจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ 0.082 $\mu\text{g/ml}$ (0.533 μM) โดยช่วงการแปรผันตรงของการตรวจวัดเท่ากับ 0.10 - 3.50 $\mu\text{g/ml}$ (0.653-22.8 μM) จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโดพามีน พบว่าได้ % RSD. (n=10) เท่ากับ 1.41

โคภินธุ์ เชื้อคำช้าง [8] ศึกษาใช้ขั้วไฟฟ้าพลาสติกคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ตรวจวัดโดพามีน พบว่าสารละลายที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดโดพามีนมากที่สุดคือ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7.5 และจากการตรวจวัดโดพามีนพบว่าโดพามีนเกิดการสลายตัวได้ง่ายและให้ตะกอนสีดำหากเก็บไว้เป็นเวลานาน ซึ่งแก้ไขได้โดยการตรวจวัดโดพามีนที่เตรียมใหม่ๆ และเก็บสารละลายโดพามีนในที่พ้นแสง สำหรับปัญหาของการใช้ขั้วไฟฟ้าพลาสติกคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์พบว่า สมบัติของขั้วไฟฟ้าในการเตรียมแต่ละครั้งไม่ค่อยคงที่ เพราะมีปัญหาด้านการควบคุมความหนาและตำแหน่งของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์บนขั้วไฟฟ้าพลาสติกคาร์บอน ส่วนขีดจำกัดของการตรวจวัดพบว่าได้เท่ากับ 0.021 ppm (0.11 μM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wang, J. และคณะ [9] ใช้ช่วงกลาสคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ตรวจวัด 3,4-Dihydroxyphenylacetic Acid (DOPAC) ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.1 M HAc-NaAc pH 4.4 ด้วยเทคนิคทางโวลแทมเมตรี ช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 1.0×10^{-6} ถึง 1.2×10^{-4} M ขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit) เท่ากับ 4.0×10^{-7} M การเกิด ปฏิกิริยาเคมีของ DOPAC ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นแบบ Diffusion-Controlled จากผลการทดลองพบว่า DOPAC ใช้อิเล็กตรอน 2 อิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็น o-Quinone โดยปฏิกิริยา Dimerization ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา Dimerization ที่คำนวณได้เท่ากับ $2.10 \times 10^3 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Yan, X.X. และคณะ [10] ในงานวิจัยได้ศึกษาปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของ L-Dopa โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี แอมเปโรเมทรี, โครโนแอมเปโรเมทรี และโครโนคูลอมบิเมทรี การปรับปรุงขั้วไฟฟ้าด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ช่วยให้ L-Dopa เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าดีขึ้น ค่ากระแสของ L-Dopa ที่ตรวจวัดโดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมตรีช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 5.0×10^{-7} ถึง 2.0×10^{-5} mol/L ปฏิกิริยาเคมีของ L-Dopa ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นแบบ Diffusion-Controlled ขีดจำกัดในการตรวจวัด (Detection Limit) เท่ากับ 3.0×10^{-7} mol/L

Wu, K. และคณะ [11] ใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ตรวจวัดโดพามีนและ Serotonin (5-HT) ได้พร้อมกัน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.0 ขณะที่ขั้วกลาสคาร์บอนเปลือย (Bare-GC) ไม่สามารถตรวจวัดโดพามีนและ Serotonin (5-HT) ได้พร้อมกัน ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการทำซ้ำที่ดี

Chicharro, M. และคณะ [12] ใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ชนิดท่อสั้น (1-5 μm) และชนิดยาว (5-20 μm) ซึ่งทั้งสองชนิดมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 20-50 nm เป็นตัวตรวจวัด (Detector) ในเทคนิค Capillary Electrophoresis เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เพสต์ พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ช่วยปรับปรุงให้ค่าขีดต่ำสุดของการตรวจวัดต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์เพสต์ ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าแบบเดิม โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำให้กระแสสัญญาณสูงขึ้น และกระแสรบกวนต่ำลง จากผลทางไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่าอัตราส่วนของเพสต์ที่เหมาะสมคือ 55.0 % CNTs และ 45.0 % Mineral Oil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zhao, G.C. และคณะ [13] ปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนสำหรับตรวจวัด H_2O_2 โดยใช้ Cytochrome c (Cyt c) เป็นเมดิเอเตอร์ และใช้ MWNTs เป็นสารปรับปรุงการนำไฟฟ้า จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีพบว่า สารที่ใช้ในการปรับปรุงทั้งสองชนิดช่วยลดความต้านทานระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารละลายอย่างมาก และเมื่อใช้ตรวจวัด H_2O_2 ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.0 ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี พบว่ามีช่วงการแปรผันตรงของการตรวจวัด H_2O_2 เท่ากับ 2 - 420 μM ขีดจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ 1.02 μM ส่วน % RSD. เท่ากับ 2% ส่วนขั้วเปลี่ยนไม่มีกระแสฟลักเกิดขึ้น

Jayasri, D. และ Narayanan, S.S. [28] ใช้ขั้วไฟฟ้ากราไฟต์เพสต์ ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) ในการตรวจวัดสาร Butylated Hydroxyanisole (BHA) โดยการสังเคราะห์ซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต จะให้สารละลาย ซิลเวอร์ในเทรตผสมกับสารละลายเฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) โดยซิลเวอร์ในเทรตที่ใช้ มีปริมาณโดยเป็น 3 เท่าของ เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต(II) จากการตรวจวัดด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีพบว่า ช่วงการแปรผันตรงของการตรวจวัด BHA 7.4×10^{-6} ถึง 8.3×10^{-4} M ขีดจำกัดของการตรวจวัด เท่ากับ 1.79×10^{-4} M และค่าความเที่ยงของขั้วไฟฟ้า (RSD.) เท่ากับ 1.3%

Wang, F. และคณะ [29] ปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน โดยใช้ฟิล์มบางจาก MWNTs และ Dihexadecyl Hydrogen Phosphate เพื่อใช้ตรวจวัด Acyclovir จากการตรวจวัด Acyclovir โดยใช้เทคนิคโครโนคูโลเมทรี (Chronocoulometry, CC) พบว่าขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วย MWNTs และ Dihexadecyl ทำให้เกิดการออกซิเดชันทางไฟฟ้าของ Acyclovir ดีกว่าขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนเปลือย โดยขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงดังกล่าวมีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดเท่ากับ 0.08-10.0 μM ส่วนขีดจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ 0.03 μM

บทที่ 3

การดำเนินงานโครงการพิเศษ

3.1 สารเคมี

1. Dopamine/3-Hydroxytyramine Hydrochloride, $C_8H_{11}NO_2$ (98.5%, Analytical Grade, Fluka)
2. Potassium Hexacyanoferrate(II) Trihydrate, $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ (99%, Analytical Grade, Merck)
3. Potassium Hexacyanoferrat(III), $K_3[Fe(CN)_6]$ (99%, Analytical Grade, Merck)
4. Potassium Monohydrogen Phosphate, K_2HPO_4 (99%, Analytical Grade, Carlo Erba)
5. Silver Nitrate, $AgNO_3$ (99.9%, Analytical Grade, Carlo Erba)
6. Phosphoric Acid, H_3PO_4 (87%(w/v), Analytical Grade, Carlo Erba)
7. Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWNTs (95%, Department of Physics, Chiangmai University)
8. Hydrochloric Acid, HCl (37%, Analytical grade, Carlo Erba)
9. Distillated Water
10. Paraffin Oil (Merck)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง 663 VA Stand Voltammetric Analyzer (Metrohm, Herisau, Switzerland) ที่ประกอบด้วย Potentiostat (Autolab PG.STAT 20, 2)
2. เครื่องไทเทรตอัตโนมัติรุ่น 716 DMS Titrino ที่ประกอบด้วยเครื่อง 728 Stirrer (Metrohm) พร้อมขั้วไฟฟ้า Combination pH Electrode (Switzerland)
3. เครื่องทำน้ำปราศจากไอออน รุ่น Milli – Q (Milford, MA, USA)
4. เครื่องอัลตราโซนิก (รุ่น Eltrosonic Type 0.7 profi, USA)
5. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Tokyo Rikkakai co., Ltd. Type A-3s, Japan)
6. ท่อเพฟลอนเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6 mm.
7. เกลียวไนหรือเกลียวตัวเมียทำจากขารองแผ่นปรินท์
8. ตู้อบสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ขั้วไฟฟ้าช่วย Glassy Carbon (Metrohm, Switzerland)
10. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl (Metrohm, Switzerland)
11. Scanning Electron Microscope (SEM) (รุ่น LEO1455VP, England)

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การทำความสะอาดมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์(MWNTs)

จะนำวิธีการทำความสะอาดมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ของ Wang, Z. และคณะ [7] มาประยุกต์ใช้ โดยชั่ง MWNTs ให้ได้ใกล้เคียง 3.0 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริก 2.0 M ปริมาตร 160 mL แล้วนำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultrasonic โดยทำการสั่นเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองแยก MWNTs ออกจากสารละลายโดยใช้เครื่องกรองแบบลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วทำการล้าง MWNTs ด้วยน้ำปราศจากไอออน จนได้สารละลายที่ผ่านการกรองมีค่า pH ใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำปราศจากไอออน (ประมาณ 8.0) โดยทำการทดสอบโดยนำน้ำที่ผ่านการกรองมาวัดค่า pH ด้วยเครื่องวัด pH เมื่อได้ MWNTs ที่ปราศจากกรดแล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากอบแล้วเก็บไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นก่อนนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้า

3.3.2 การสังเคราะห์ $Ag_3K[Fe(CN)_6]$

ใช้วิธีการโดยประยุกต์จากวิธีของ Jayasri, D. และ Narayanan, S. S. [28] โดยการเตรียมสารละลายของ $AgNO_3$ เข้มข้น 0.30 M ปริมาตร 10 mL และ $K_4[Fe(CN)_6]$ เข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 10 mL จากนั้นเทสารละลาย 0.3 M $AgNO_3$ ลงใน 0.1 M $K_4[Fe(CN)_6]$ จะเกิดตะกอนสีฟ้าอ่อน จากนั้นกวนเบาๆ แล้วทิ้งไว้ 5 นาที จึงนำมาล้างตะกอนโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 และน้ำปราศจากไอออนหลายๆ ครั้ง เพื่อให้ปราศจากไอออนของ K^+ และ NO_3^- จากนั้นจึงทิ้งไว้ให้แห้งในอุณหภูมิห้อง แล้วเก็บไว้ในขวดสีชา

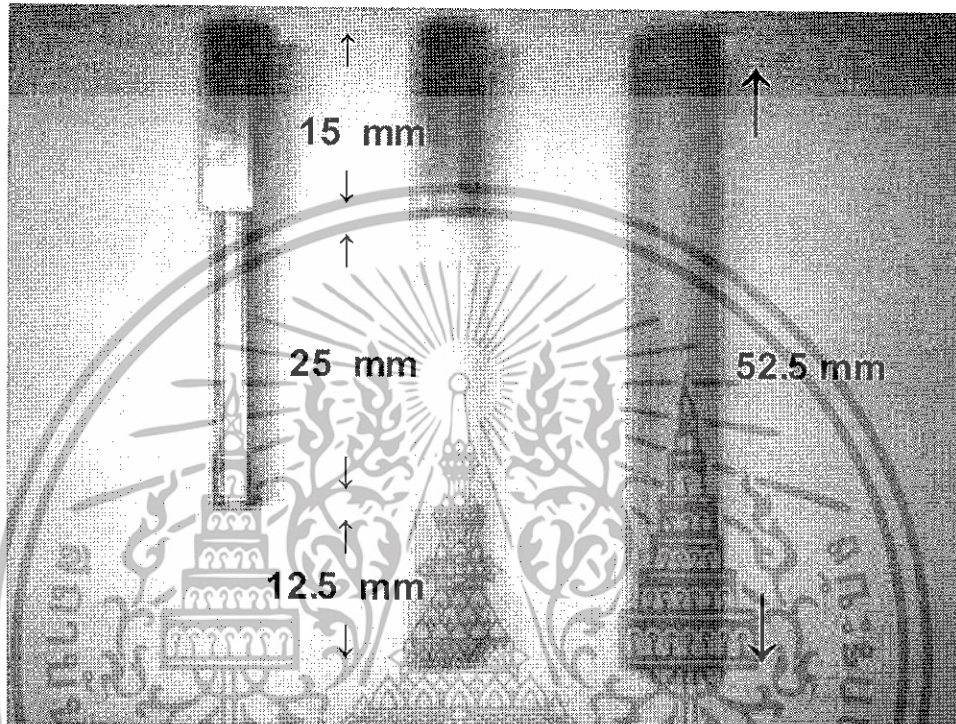
3.3.3 การสร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับใช้ในการทดลอง

3.3.3.1 ทำการกลึงลดขนาดเกลียวตัวเมียสำหรับงานรองแผ่นปริ้นท์ ซึ่งมีความยาว 40 mm, ลักษณะภายนอกเป็นหกเหลี่ยม การกลึงจะกลึงเพียงด้านเดียวให้เหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4.0 mm ลึกเข้าไป 25 mm ส่วนอีกด้านไม่ต้องทำการกลึง ซึ่งด้านที่ไม่ได้กลึงจะใช้สำหรับต่อกับเกลียวตัวผู้ของเครื่อง Voltammetric Analyzer (ภายหลังจากกลึงแล้ว ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งยังคงเป็นหกเหลี่ยมเหมือนเดิม อีกด้านหนึ่งจะมีลักษณะเป็นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 4.0 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในคงเดิม)

3.3.3.2 ตัดท่อเทฟลอนให้มีความยาว 37.5 mm จากนั้นนำเกลียวตัวเมีย (ในข้อ 3.3.3.1) มาเสียบเข้าไปในท่อเทฟลอน จะได้ลักษณะดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพองค์ประกอบของหัวไฟฟ้าสำหรับงานวิจัย (เกลียวตัวเมียสำหรับทำหัวไฟฟ้า(ซ้าย), หัวไฟฟ้า MWNTs-paste(กลาง)และหัวไฟฟ้ากลาสคาร์บอน(ขวา))

3.3.3.3 นำผงมัลดีวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ผสมกับน้ำมันพาราฟิน และซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ตามอัตราส่วนที่ต้องกรวดโดยการคลุกเคล้าทั่วกันแล้วนำมาบรรจุในท่อเทฟลอนให้แน่น จากนั้นขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษสีขาวที่เรียบ แล้วทิ้งไว้ให้วัสดุประกอบภายในแข็งตัวอย่างน้อย 5 ชม.

หมายเหตุ

สำหรับวิธีการใช้หัวไฟฟ้า เพื่อปัญหากระแสฟลักดลงหลังการตรวจวัดเนื่องจากเกิดฟิล์มของสารเคมีในตัวอย่าง ผู้ทดลองจึงใช้วิธีขัดผิวหน้าหัวไฟฟ้าเบาๆ ด้วยกระดาษสำหรับถ่ายเอกสารที่ยังไม่ผ่านการใช้งานมาก่อน จากนั้นล้างหัวไฟฟ้าด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วซับหน้าหัวไฟฟ้าด้วยกระดาษทิชชูให้แห้งก่อนนำไปตรวจวัดทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเพสต์ที่ทำขั้วไฟฟ้าต่อการตรวจวัดโดพามีน

3.3.4.1 การศึกษาปริมาณน้ำมันพาราฟินที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้า MWNTs paste

ใช้ปริมาณของผสมในการทำขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.25000 g เท่ากันทุกสูตร แต่ปรับปริมาณน้ำมันพาราฟินให้ต่างกันคือ ร้อยละ 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำขั้วทั้งสามไปตรวจวัดสารละลายโดพามีนในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s และช่วงในการสแกนเท่ากับ -0.5 ถึง +0.5 V เปรียบเทียบกระแสที่เกิดขึ้นจากขั้วไฟฟ้าที่มีส่วนผสมของปริมาณน้ำมันพาราฟินต่างกันทั้งสามขั้วไฟฟ้าแล้วเลือกขั้วไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าแอนอดิกมากที่สุด เพื่อนำไปตรวจวัดโดพามีนเปรียบเทียบกับ AgHCF/ MWNTs-E และ GC-E

3.3.4.2 การศึกษาปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอไรต์ที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้า AgHCF/ MWNTs Paste

ใช้ปริมาณของผสมในการทำขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.2500 g เท่ากันทุกสูตร และคงที่ปริมาณน้ำมันพาราฟินเท่ากับสูตรที่ทำให้กระแสไฟฟ้าแอนอดิกสูงสุด (ได้จากข้อ 3.3.3) แต่ปรับปริมาณ AgHCF ให้เท่ากับร้อยละ 0.1, 0.5, 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก แล้วนำขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 สูตรมาทำการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 M ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s และช่วยในการสแกนเท่ากับ -0.5 ถึง +0.5 V แล้วเลือกขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรองด้วย AgHCF ที่ให้กระแสแอนอดิกสูงสุด เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.3.5 การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดโดพามีน

ทำการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM ที่มี pH 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 และ 8.0 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s และช่วยในการสแกนเท่ากับ -0.5 ถึง +0.5 V โดยวัดซ้ำ 3 ครั้งต่อค่า pH และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกระแสแอนอดิกที่เกิดขึ้นในแต่ละความเข้มข้น แล้วเลือกค่า pH ที่เหมาะสมจากค่า pH ที่ทำให้กระแสแอนอดิกที่สูงที่สุด (วิธีการเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH ต่างๆ ทำได้โดยการ หยดสารละลาย 1.0 M H_3PO_4 ลงในบีกเกอร์ซึ่งมีสารละลาย 0.1 M K_2HPO_4 จนมีค่าพีเอชที่ต้องการ โดยใช้เครื่องไทเทรตอัตโนมัติวัดค่า pH)

3.3.6 การศึกษาผลของอัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้าต่อการตรวจวัดโดพามีน

ทำการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM โดยเลือกใช้ค่า pH ที่เหมาะต่อการวัดโดพามีนมาตรวจวัด (ได้จากการทดลอง 3.3.5) โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs Paste และขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs Paste (เลือกขั้วไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบเหมาะสมจากข้อ 3.3.4) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ช่วงในการสแกนเท่ากับ -0.5 ถึง +0.5 V โดยใช้อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกันคือ 10, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 mV/s บันทึกค่ากระแสแอนอดิก และศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน แล้วนำข้อมูลไปพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า I_p กับ ค่าอัตราการสแกน (v) และ พลอตค่า I_p กับ ค่ารากที่สองของอัตราการสแกน ($v^{1/2}$)

3.3.7 การศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้า

3.3.7.1 ศึกษาช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้าต่อการตรวจวัดโดพามีน (Linearity Range)

เลือกใช้ค่า pH ที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดโดพามีนจากข้อ 3.3.5 เพื่อตรวจวัดโดพามีนเข้มข้นตั้งแต่ 0.005, 0.010, 0.020, 0.040, 0.100, 0.240, 0.480, 0.800, 1.000, 2.000 mM ด้วยเทคนิคโพเทนชิโวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกนที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.6 ด้วยขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs-paste, MWNTs-paste และ GCE โดยเลือกใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -0.5 ถึง +0.5 จากนั้นพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอนอดิก และความเข้มข้นของโดพามีนในสารละลาย ของทั้งสามขั้วไฟฟ้า แล้วเลือกช่วงที่ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดโดพามีนจากกราฟมาตรฐานเป็น Linearity range ของแต่ละขั้วไฟฟ้า

3.3.7.2 ศึกษาสภาพไวของขั้วไฟฟ้า (Sensitivity)

หาความชันของกราฟการตอบสนองเชิงเส้นที่ได้จากการตรวจวัดในข้อ 3.3.7.1 ความชันที่ได้จากการตอบสนองเชิงเส้นโดยใช้ขั้วทำงานแต่ละชนิดจะเป็นสภาพไวของขั้วไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ (ความชันได้จากสัมประสิทธิ์นำหน้าค่าความเข้มข้นในสมการที่ได้จากการพลอตกราฟระหว่างความเข้มข้นกับกระแสที่จากโปรแกรม Microsoft Excel)

3.3.7.3 ขีดจำกัดความเข้มข้นในการวิเคราะห์ (Detection Limit)

ตรวจวัดกระแสพื้นของการตรวจวัดโดพามีน โดยทำการตรวจวัดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 M ที่มี pH เท่ากับที่เลือกในข้อ 3.3.5 ทั้งหมด 10 ครั้ง แล้วเลือกกระแสพื้น 3 ค่า ต่อการตรวจวัดหนึ่งครั้ง ทำให้ได้ค่ากระแสพื้นจากการทดลองทั้งหมด 30 ค่า (ควรเลือกกระแสพื้นในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนคือ +0.8 ถึง +1.6 V) แล้วนำค่ากระแสพื้นดังกล่าวไปคำนวณหาค่าขีดจำกัดในการวิเคราะห์ โดยนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสพื้นทั้ง 30 ค่า คูณด้วย 3 แล้วหารด้วยค่าของความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัด (เท่ากับ sensitivity) ที่ได้จากข้อ 3.3.7.1 ดังสมการ

$$\text{Detection Limit } (\mu\text{M}) = 3 (\text{S.D.}) / \text{Sensitivity}$$

หมายเหตุ : จะได้ Detection Limit ที่ค่า S/N (Signal/ Noise) เท่ากับ 3.0

3.3.7.4 การศึกษาความเที่ยงของขั้วไฟฟ้า (Precision)

การศึกษาความเที่ยงในการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทำได้โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E, MWNTs-E และ GC-E ตรวจวัดสารละลายโดพามีน เข้มข้น 0.1 M ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M โดยใช้ค่า pH ที่เลือกจาก ข้อ 3.3.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกนที่เลือกได้จากข้อ 3.3.6 และใช้ช่วงในการสแกน -0.5 ถึง +0.5 ทำการตรวจวัดซ้ำ 30 ครั้งต่อขั้วไฟฟ้า(ก่อนตรวจวัดทุกครั้งต้องทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าโดยใช้วิธีในข้อ 3.3.3.3) แล้วหาค่า %RSD (Percent of Relative Standard Deviation, เปอร์เซ็นต์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า

$$\%RSD = (SD / \bar{x}) \times 100$$

โดย SD. (Standard Deviation) หรือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระแสที่ได้จากการตรวจวัดทั้ง 30 ครั้ง

\bar{x} (Average) หรือค่ากระแสเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดทั้ง 30 ครั้ง

3.3.7.5 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า (Life Time)

นำขั้วไฟฟ้า MWNTs และ AgHCF-MWNTs มาตรวจวัดสารละลายโดพามีน เข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH เท่ากับที่เลือกจากข้อ 3.3.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีโดยใช้อัตราการสแกนที่เลือกจากข้อ 3.3.6 ทำการทดลองวัดซ้ำโดยไม่ต้องขัดทำความสะอาดผิวหน้าขั้วไฟฟ้าหลังจากการตรวจวัด บันทึกกระแสที่เกิดขึ้นจนกระทั่งกระแสลดต่ำลงน้อยกว่า 50 % ของกระแสที่ได้จากการตรวจวัดครั้งแรก จำนวนครั้งที่ตรวจวัดจนทำให้กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จะเป็นครึ่งชีวิตของขั้วไฟฟ้า (Half Life)

3.3.7.6 การวิเคราะห์ปริมาณโดพามีนในตัวอย่างยาโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี

ตรวจวัดยาโดพามีนที่บรรจุในหลอดยา ซึ่งเป็นโดพามีนชนิดไฮโดรคลอไรด์ (Dopamine Hydrochloride) ระบุความเข้มข้น 250 mg/10 mL (หรือ 25,000 ppm) โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs paste และ AgHCF-MWNTs paste ตรวจวัดเทียบกับ GCE ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกนที่เหมาะสมในข้อ 3.3.6 และค่า pH ที่เลือกในข้อ 3.3.5 โดยใช้วิธีการเติมสารละลายมาตรฐาน สำหรับรายละเอียดการวิเคราะห์สารละลายตัวอย่างโดพามีนไฮโดรคลอไรด์มีดังนี้

1. การเตรียมสารละลายโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ตัวอย่าง (เข้มข้นประมาณ 2,500 ppm/0.013182 M) ปิเปตสารละลายตัวอย่างโดพามีน (ซึ่งระบุความเข้มข้น 25,000 ppm หรือ 0.13182 M) 2.50 ml ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 25 ml แล้วเติม สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M ใช้พีเอชที่เหมาะสมในการตรวจวัดจาก ข้อ 3.3.5 จนถึงขีดบอกริมาตร จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน แล้วเก็บไว้ในตู้เย็น อุณหภูมิต่ำกว่า 4 °C (ป้องกันการสลายตัว)
2. เตรียมสารละลายมาตรฐานโดพามีน 1,000 ppm (0.052731 M) ซึ่งผงโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ (98.5%) 0.1015 g ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 ml แล้วเติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M ซึ่งมี pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัดโดพามีน (เลือกไว้ จาก ข้อ 3.3.5) ลงในบีกเกอร์ดังกล่าว 50 ml คนให้เข้ากันแล้วเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml และเพื่อให้มั่นใจว่าโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ให้เหลือตกค้างในบีกเกอร์น้อยที่สุด จะใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์กลั้วบีกเกอร์ครั้งละ 5 ml แล้วเทลงในขวดวัดปริมาตรจนถึงขีดบอกริมาตร (0.052731 M)
3. การเติมสารละลายมาตรฐานโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ลงในสารตัวอย่างปิเปตสารละลายโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ตัวอย่างซึ่งเข้มข้นประมาณ 2,500 ppm (เตรียมไว้แล้วในข้อ (1.)) ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 ml ขวดละ 0.25 ml จำนวน 5 ขวด จากนั้นปิเปตสารละลายมาตรฐานโดพามีนเข้มข้น 1,000 ppm (เตรียมไว้แล้วในข้อ (2.)) ลงในขวดวัดปริมาตรดังกล่าว 0, 1.0, 2.0, 4.0 และ 10.0 ml ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ลงในขวดวัดปริมาตรทุกขวดจนถึงขีดบอกริมาตร ทำให้ได้ความเข้มข้นของโดพามีนจากสารมาตรฐานในขวดวัดปริมาตรเท่ากับ 0, 210.93, 421.85, 843.70, 2109.26 μ M ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่เตรียมได้ในข้อ (3.) ด้วยเทคนิคไฟฟ้าเคมีแบบโพลาไรซ์ไวลแอมเพอเมทรี ใช้อัตราการสแกนที่เหมาะสมในข้อ 3.3.6 โดยเริ่มสแกนในช่วง -0.5 ถึง $+0.5$ V แล้วนำค่ากระแสฟีก และ ความเข้มข้นของโดพามีนที่เติมมาพลอตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และหาสมการเส้นตรงเพื่อหาความเข้มข้นของตัวอย่าง จากสมการเส้นตรง $y = (mx) + c$

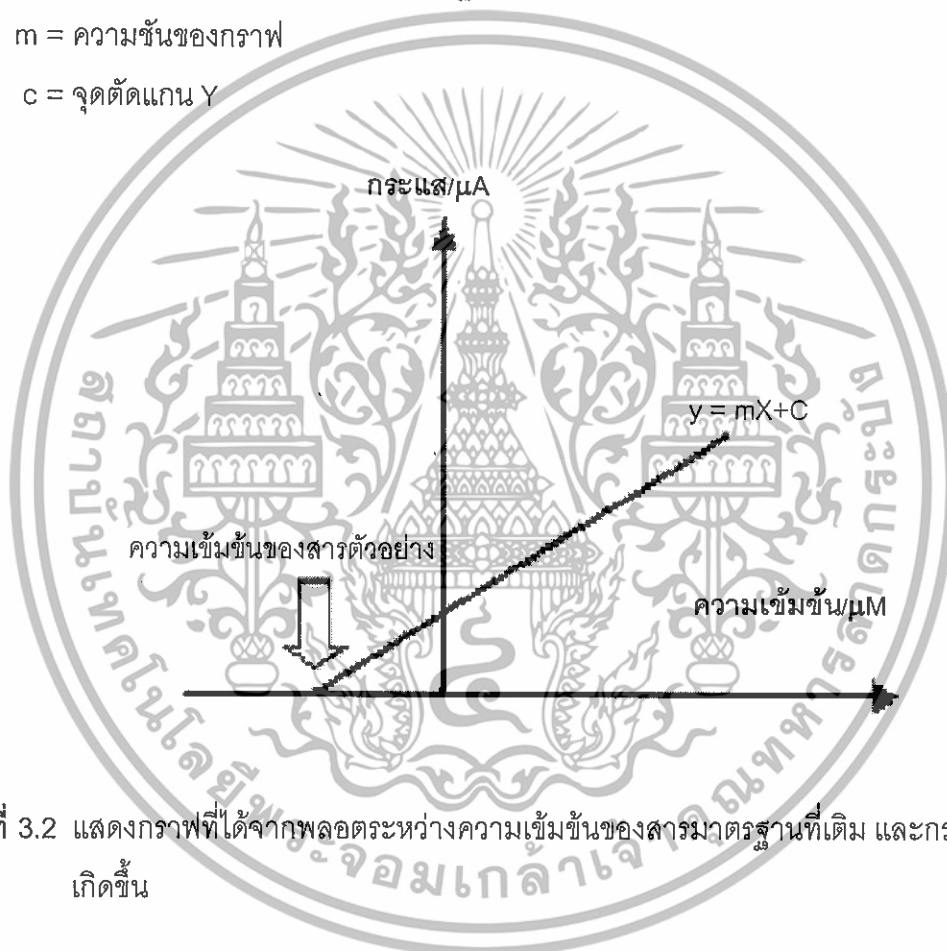
ให้

y = กระแสฟีกที่เกิดขึ้นจากการตรวจวัด (μA)

x = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ที่เติมลงในตัวอย่าง (μM)

m = ความชันของกราฟ

c = จุดตัดแกน Y



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟที่ได้จากพลอตระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติม และกระแสฟีกที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 3.2 ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง หาจากจุด $(x, 0)$ หรือจุดตัดแกน y

$$\text{ที่จุดตัดแกน } y; \quad y = 0$$

$$= (mx) + c$$

$$x = -c / m = -(\text{ความเข้มข้นของตัวอย่างโดพามีน})$$

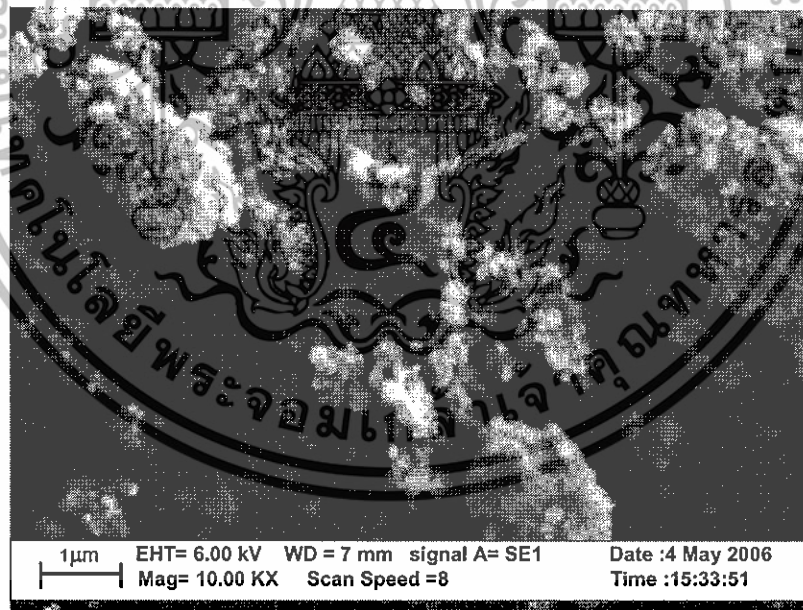
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 สมบัติของตะกอนซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรตที่สังเคราะห์ได้

ตะกอนของซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต (AgHCF) ที่สังเคราะห์ได้ เป็นผงสีฟ้าอ่อน เมื่อทดลองเทลงในน้ำปราศจากไอออน พบว่าไม่ละลาย และไม่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ แสดงว่าหากนำไปใช้เป็นเมดิเอเตอร์แล้ว มีข้อดีคือไม่หลุดออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าง่าย เพราะไม่ละลายในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ แต่สิ่งที่น่าเป็นห่วงคือเมื่อเก็บไว้ในที่มีแสงจะทำให้ตะกอนกลายเป็นสีเทา และเมื่อโดนอากาศจะพบว่าสีเข้มมากขึ้นเรื่อยๆจนกลายเป็นสีเทาเช่นกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเก็บ ตะกอน AgHCF และขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรตไว้ในขวดสีชาซึ่งหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อป้องกันแสง และเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันอากาศ ซึ่งจากวิธีนี้ทำให้ตะกอนของ AgHCF คงสภาพเดิมได้ยาวนาน (จากการสังเกตพบว่าไม่เปลี่ยนสีตั้งแต่เริ่มสังเคราะห์จนเวลาผ่านไปนาน 3 สัปดาห์ยังคงสีเดิมหากเก็บให้พ้นแสงในโถดูดความชื้น)



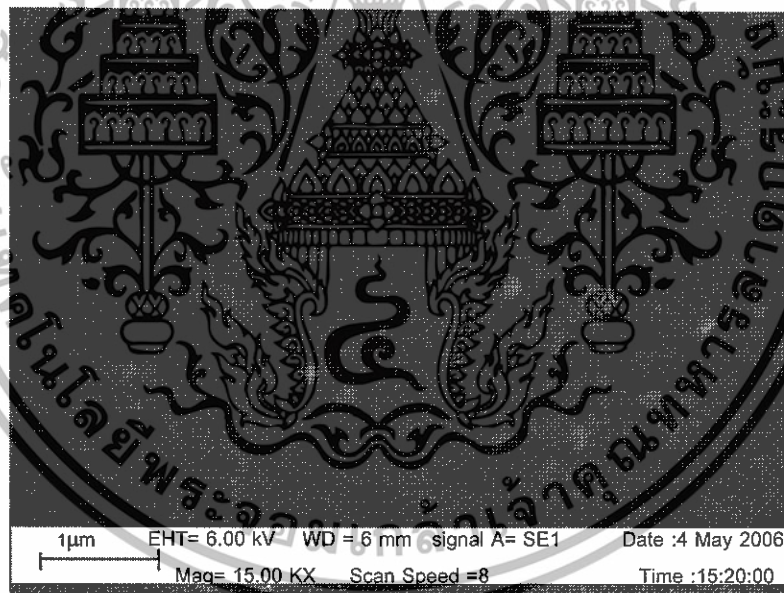
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงตะกอนซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต (II) ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 พบว่าตะกอนซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตมีขนาดไม่ค่อยสม่ำเสมอ นั้นเป็นเพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาของซิลเวอร์ในเทรตกับโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตสูงมาก ซึ่งอาจลดปัญหานี้โดยการทดสอบละลายซิลเวอร์ในเทรตลงในสารละลายของโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตอย่างช้าๆ และคนสารละลายเบาๆจนเกิดตะกอนเพื่อให้ได้ตะกอนขนาดเล็กสม่ำเสมอขึ้น

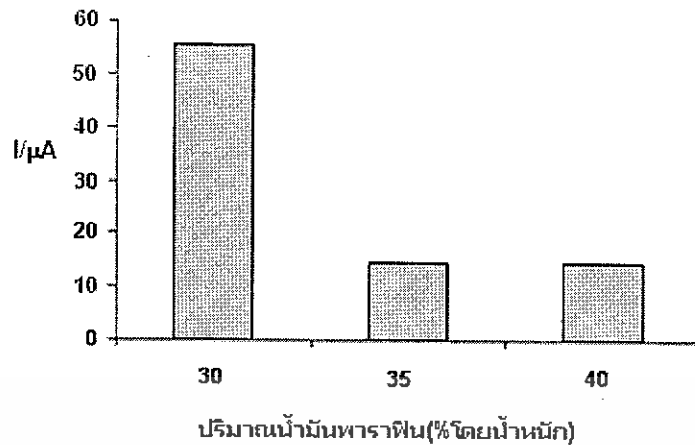
4.2 ศึกษาหาปริมาณองค์ประกอบที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ (MWNTs-E)

จากภาพถ่าย SEM ที่ผิวหน้า MWNTs-E (รูปที่ 4.2) จะพบความขรุขระ (แต่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า) ซึ่งหากนำมาใช้งาน อาจเกิดการยึดติดของสารที่วัดได้ง่าย ดังนั้นหากนำมาใช้งานจะต้องมีการทำความสะอาดผิวหน้าทุกครั้งก่อนตรวจวัด ซึ่งผู้ทดลองได้ใช้วิธีการขัดผิวหน้าทุกครั้งด้วยกระดาษทรายที่สะอาด (กระดาษถ่ายเอกสารที่ยังไม่เคยใช้งาน) ซึ่งวิธีดังกล่าวจะแก้ไขการลดลงของกระแสฟลักเนื่องจากกรเกิดฟิล์มของสารที่ตรวจวัดยึดเกาะที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้



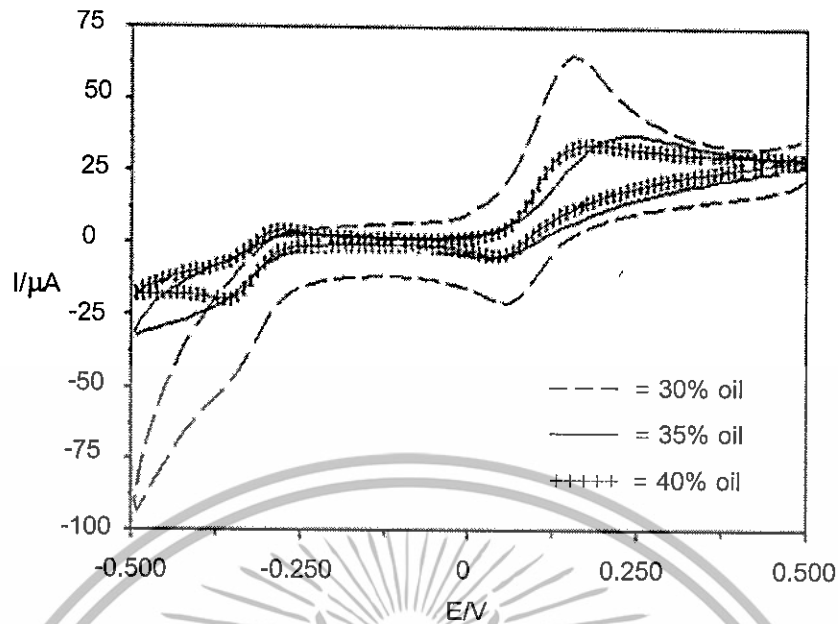
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าขั้วไฟฟ้า มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 30 ใช้กำลังขยาย 15000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

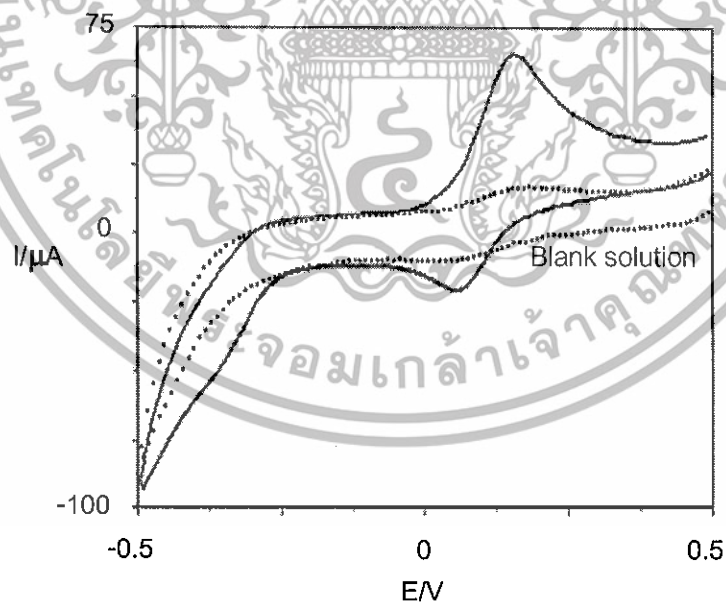


รูปที่ 4.3 แผนภูมิแท่งแสดงค่ากระแสแอโนดิกจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s โดยปริมาณน้ำมันพาราฟินเท่ากับร้อยละ 30 (สูตรที่ 1), 35 (สูตรที่ 2) และ 40 (สูตรที่ 3) ตามลำดับ

จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีน 1.0 mM ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีโดยใช้ MWNTs-E ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินตั้งแต่ร้อยละ 30, 35 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าสารโดพามีนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.1 - 0.2 V โดยที่ปริมาณน้ำมันพาราฟินมากขึ้นจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาที่เป็นบวกมากขึ้น และปริมาณน้ำมันพาราฟินที่มากขึ้นค่ากระแสพีคจะลดลง นั่นเป็นเพราะว่าน้ำมันพาราฟินเป็นสารที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าซึ่งเมื่อมีปริมาณสูงขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าส่งผ่านที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ายากขึ้นด้วย และจากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าควรใช้ปริมาณน้ำมันพาราฟินให้น้อยที่สุด แต่ไม่ควรใช้น้ำมันพาราฟินต่ำกว่าร้อยละ 30 เพราะถ้าใช้ปริมาณน้ำมันพาราฟินต่ำกว่าร้อยละ 30 จะได้เพลตที่ร่วนเกินไปทำให้ยากต่อการอัดลงไปในท่อเทฟลอน และทำให้การกระจายของน้ำมันพาราฟินไม่ทั่วถึงทั้งเพลต และจากการศึกษาโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดโดพามีนที่ pH 7.5 พบว่าโดพามีนจะเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับได้เพียงบางส่วน (Quasi Reversible Reaction) โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่ารีดักชัน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกันในทุกขั้วไฟฟ้า แม้จะใช้ปริมาณน้ำมันพาราฟินต่างกันก็ตาม (ดูรูปที่ 4.4 ประกอบ)

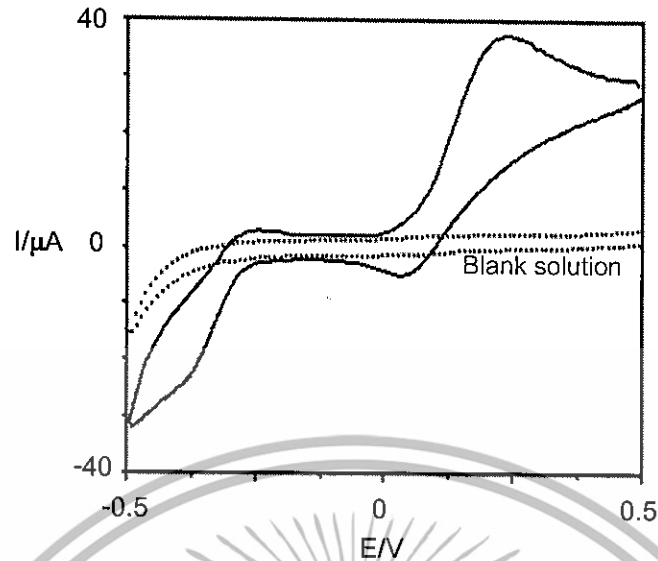


รูปที่ 4.4 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ ขั้วไฟฟ้า MWNTs paste ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินตั้งแต่ร้อยละ 30, 35 และ 40 เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s

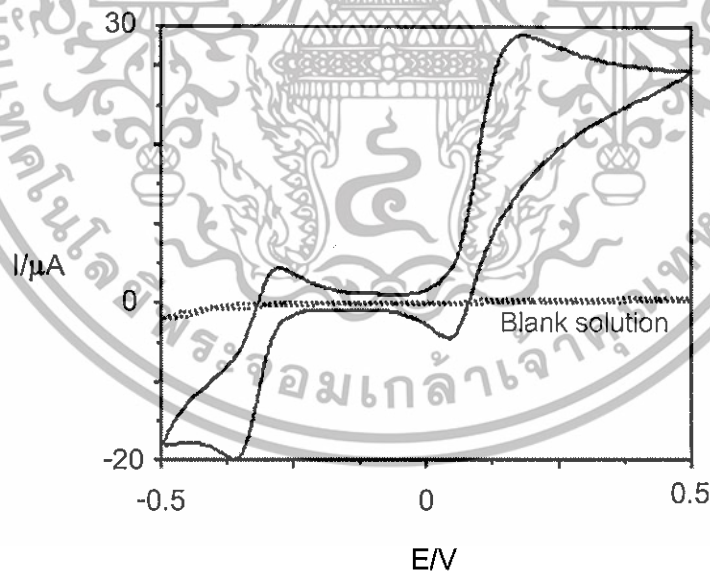


รูปที่ 4.5 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs paste ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 30 เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ ขั้วไฟฟ้า MWNTs paste ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 35 เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s



รูปที่ 4.7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ ขั้วไฟฟ้า MWNTs paste ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 40 เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนเกิดที่ประมาณ 1.80 V โดยสังเกตว่าถ้าปริมาณน้ำมันพาราฟินมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ศักย์สูงขึ้นเล็กน้อย และมีกระแสที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะน้ำมันพาราฟินทำให้การนำไฟฟ้าของเพสต์ลดลง

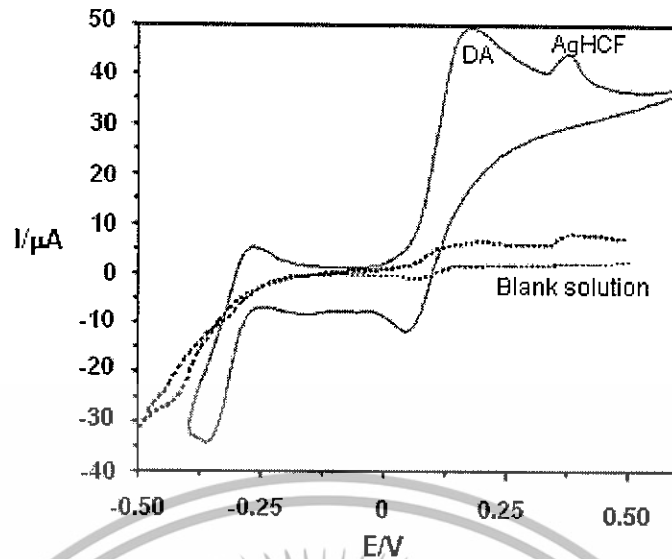
4.3 ปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่เหมาะสมในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์สำหรับการตรวจวัดโดพามีน

จากรูปถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) (ดูรูปที่ 4.8 ประกอบ) แสดงผิวหน้าของ AgHCF/MWNTs-E พบว่ามีตะกอนของซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (มีลักษณะเป็นอนุภาคสีขาว) กระจายอยู่บนผิวของ MWNTs Paste (มีสีดำ) และสังเกตว่าเพสต์มีลักษณะขรุขระมากกว่าผิวหน้าของ MWNTs-E ที่ไม่มี AgHCF นั่นเป็นเพราะตะกอนของ AgHCF ไม่เข้ากับน้ำมันพาราฟิน ซึ่งต่างจาก MWNTs ที่จับตัวกันดีเมื่อมีน้ำมันพาราฟิน ดังนั้นจึงทำให้เพสต์ของ MWNTs-E มีความสม่ำเสมอกว่าเพสต์ของ AgHCF/MWNTs-E ซึ่งมีลักษณะร่วนและไม่ค่อยสม่ำเสมอ

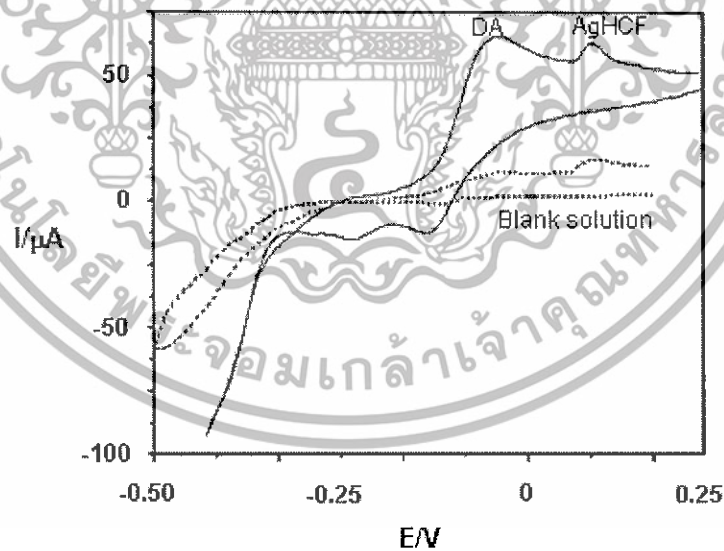


รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) บริเวณผิวหน้าของ AgHCF/MWNTs-E ที่มีปริมาณ AgHCF 0.5 % และ ปริมาณน้ำมันพาราฟิน 30 % ใช้กำลังขยาย 15,000 เท่า (จากรูปจะพบตะกอนสีขาวของ AgHCF กระจายอยู่บนเพสต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

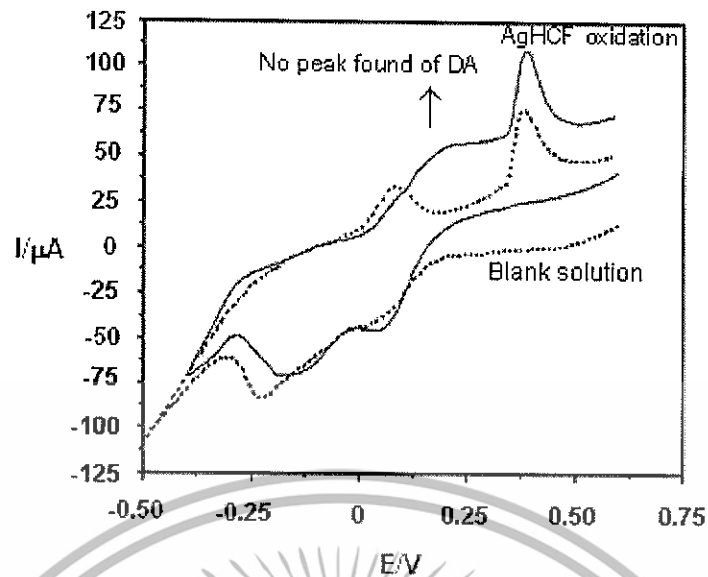


รูปที่ 4.9 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 0.1 % โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

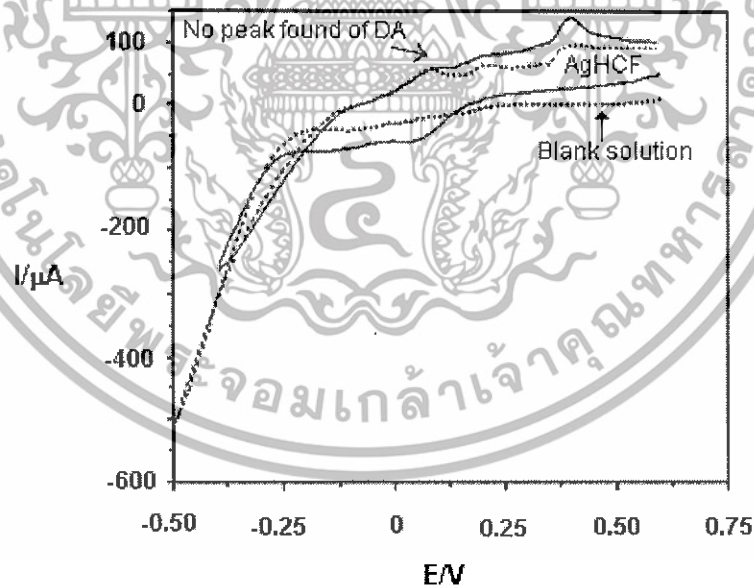


รูปที่ 4.10 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 0.5 % โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

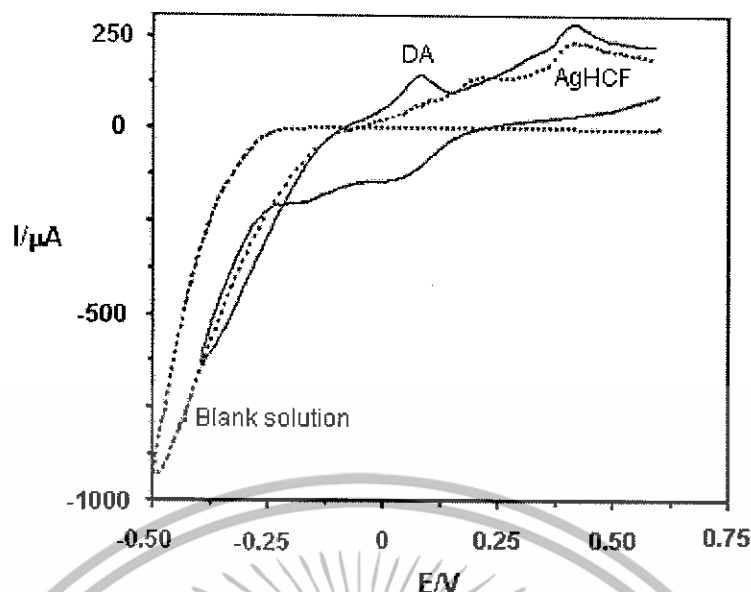


รูปที่ 4.11 โพลติกรวมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 1.0 % โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s



รูปที่ 4.12 โพลติกรวมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 3.0 % โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่มี AgHCF 5.0% โดยน้ำหนัก เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs paste ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 30 คงที่ แต่เปลี่ยนสัดส่วนของซิลเวอร์เฮกซะไธยานิเฟอไรต์เป็นร้อยละ 0.1, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักของเพลสต์ (ดูรูปที่ 4.9 ถึง 4.13 ประกอบ) เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยใช้ขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ใช้อัตราในการสแกนเท่ากับ 50 mV/s พบว่า ปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไธยานิเฟอไรต์ที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดโดพามีนเท่ากับร้อยละ 0.5 ส่วนเหตุผลที่เลือกปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไธยานิเฟอไรต์เท่ากับร้อยละ 0.5 เพราะเหตุผลดังต่อไปนี้

ปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไธยานิเฟอไรต์เท่ากับร้อยละ 1.0 และ 3.0 (ดูรูปที่ 1.11 และ 1.12) โดยน้ำหนักของเพลสต์ พบว่าเกิดการรบกวนการวิเคราะห์ของซิลเวอร์เฮกซะไธยานิเฟอไรต์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.5 ถึง 0.15 V จนเกิดพีกการหลอมทับตำแหน่งพีกที่เกิดการปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ +0.1 ถึง +0.2 V ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดโดพามีนได้ จึงไม่เลือกใช้อัตราส่วนนี้ในการตรวจวัดโดพามีน

ปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไธยานิเฟอไรต์เท่ากับร้อยละ 5.0 (ดูรูปที่ 4.13) โดยน้ำหนักของเพลสต์ พบว่าไม่เกิดการรบกวนของซิลเวอร์เฮกซะไธยานิเฟอไรต์ต่อการวิเคราะห์โดพามีน เพราะที่เกิดตำแหน่งพีกของซิลเวอร์เฮกซะไธยานิเฟอไรต์ได้เบี่ยงไปทางศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้นจนตำแหน่งฟลักที่ที่เกิดขึ้นไม่เกิดการหลอมทับฟลักที่เกิดจากปฏิกิริยาของโดพามีน แม้จะมีกระแสฟลักจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตสูงก็ตาม แต่เหตุที่ไม่เลือกอัตราส่วนนี้สำหรับการปรับปรุงขั้วมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ก็เพราะว่าเกิดกระแสฟลักที่ไม่คงตัวทำให้ความแม่นยำในการวัดไม่ดี สำหรับเหตุผลที่กระแสฟลักไม่คงตัวน่าจะเกิดจาก ปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่สูงเกินไปทำให้เกิดเพสต์ที่ร่วนเนื่องจากความเข้ากันไม่ได้ระหว่างผลึกซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตกับ น้ำมันพาราฟิน ซึ่งต่างจากมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ จะยึดจับกับน้ำมันพาราฟินได้ดีกว่า เหตุนี้เองทำให้อัตราส่วนเพสต์เกิดการสูญเสียซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ออกไปจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าขณะทำการตรวจวัด ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำการตรวจวัดได้เนื่องจากอัตราส่วนของขั้วไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนั่นเอง

สำหรับปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตเท่ากับร้อยละ 0.1 (ดูรูปที่ 4.9) และ 0.5 (ดูรูปที่ 4.10) ของเพสต์ พบว่ามีกระแสที่เกิดจากซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตน้อยจนไม่เกิดการหลอมทับฟลักของโดพามีน แต่เหตุที่เลือก ปริมาณซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตร้อยละ 0.5 เพราะขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่มีซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ร้อยละ 0.1 ให้ลักษณะฟลักใกล้เคียงกับ ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์มากจนไม่เห็นความแตกต่าง ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงไม่เลือกที่จะศึกษาอัตราส่วนนี้ โดยเลือกที่จะศึกษาเปรียบเทียบ ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ อัตราส่วนที่มีซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ร้อยละ 0.5 กับ ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์แทน

สำหรับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต [28] มีดังนี้

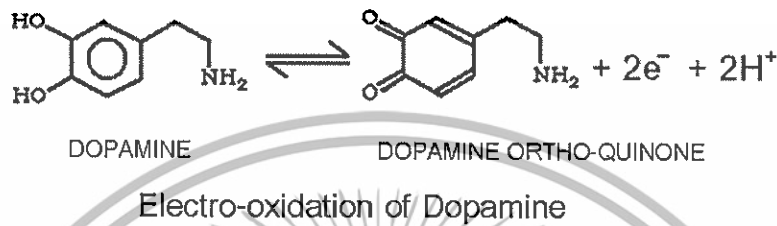


4.4 การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดโดพามีน ด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

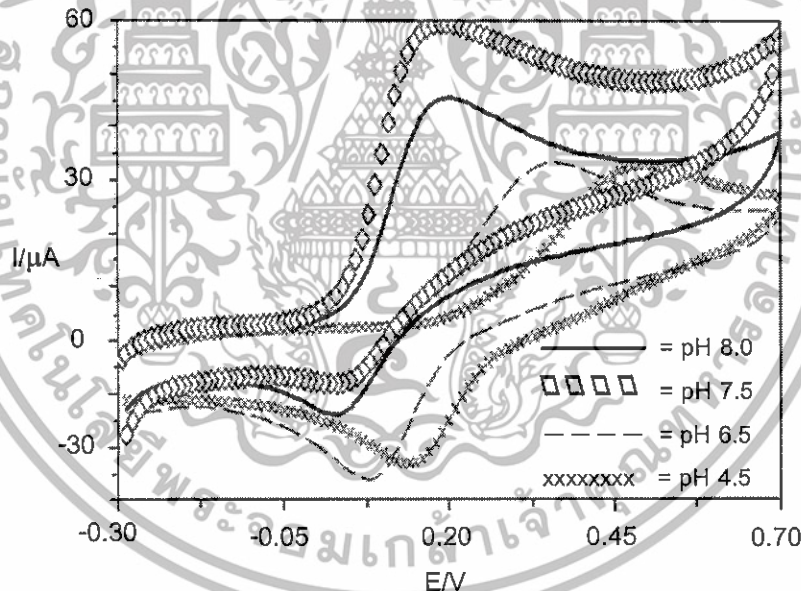
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของสารละลายและกระแสจากการเกิดออกซิเดชัน (กระแสแอนอดิก) ของโดพามีนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีพบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดโดพามีนมีค่าเท่ากับ 7.5 เท่ากันทั้งสองขั้วไฟฟ้า ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ เมื่อสารละลายเป็นเบสจะทำให้โปรตอนในสารละลายลดลงทำให้สมดุลไปทางขวาของสมการเคมีในรูปที่ 4.14 ทำให้กระแสแอนอดิกสูงขึ้นแต่ถ้าสารละลายมีความเป็นกรดสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันร่วมด้วยจึงพบว่ามีการเกิดแคโทดิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงขึ้นในการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ pH ต่ำกว่า 7.0 สำหรับเหตุผลที่สารละลายโดพามีน pH 8.0 มีกระแสแอนอดิกเกิดขึ้นต่ำกว่าที่ pH 7.0 น่าจะเป็นเพราะว่าที่ pH 8.0 ทำให้เกิดการออกซิเดชันง่ายจนเกิดการสลายตัวก่อนนำมาตรวจวัด ซึ่งสังเกตได้จากสารละลายเกิดตะกอนดำเมื่อทิ้งสารละลายไว้นานๆ ทำให้ไม่เลือก pH 8.0 เป็น pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัดโดพามีนเนื่องจากอาจทำให้การตรวจวัดผิดพลาดได้



รูปที่ 4.14 แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนทางไฟฟ้า[14]



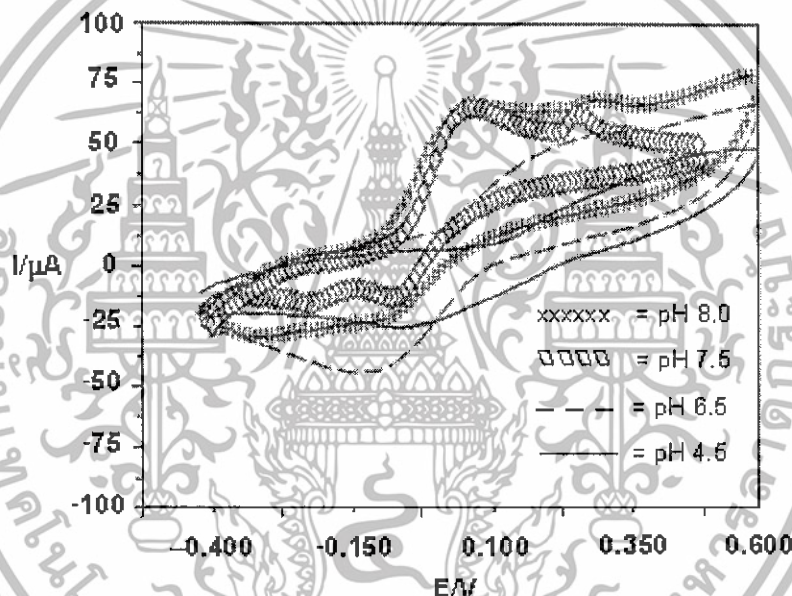
รูปที่ 4.15 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ใช้อัตรา
การสแกน 50 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้า
อ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 4.5, 6.5, 7.5
และ 8.0

ในการตรวจวัดโดพามีนในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอชต่างกัน โดย
ใช้ MWNTs-E (รูปที่ 4.15 และ 4.16 ประกอบ) พบว่าที่เมื่อโดพามีนอยู่ในสารละลายฟอสเฟต
บัฟเฟอร์ที่มีสภาวะเป็นด่าง (ดูไซคลิกโวลแทมโมแกรมในรูป 4.15 ที่ใช้ ค่าพีเอชของฟอสเฟต

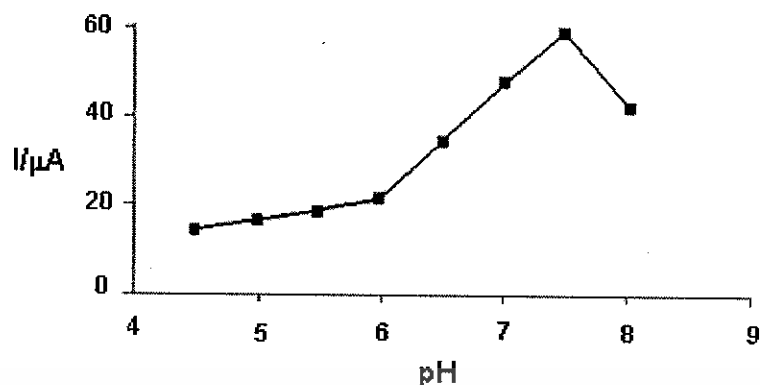
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัพเฟอร์เท่ากับ 7.5 และ 8.0) จะเกิดกระแสแอนอดิกที่สูงและ จะเกิดกระแสแคโทดิกเล็กน้อยซึ่งผลการทดลองจะเป็นไปในทางตรงกันข้ามเมื่อโดพามีนอยู่ในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ที่มีสภาวะเป็นกรด (ดูไซคลิกโวลแทมโมแกรมในรูป 4.15 ที่ใช้ พีเอช 4.5 และ 6.5 ประกอบ) แสดงว่าโดพามีนจะเกิดการออกซิเดชันได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง และ เกิดรีดักชันได้ในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ciszewski, A และคณะ [14] (ดูสมการในรูป 4.14 ประกอบ)

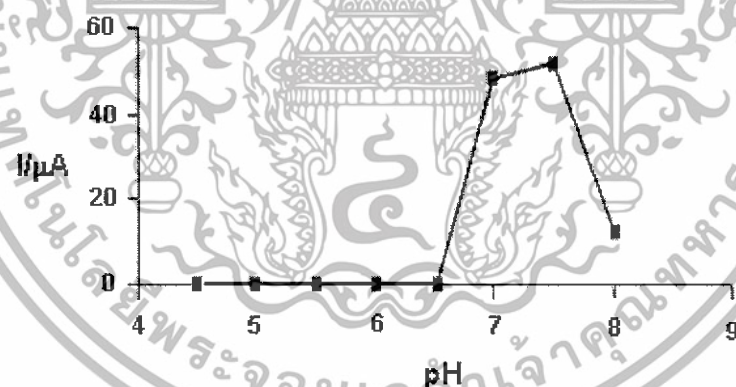
สำหรับผลของค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ต่อการตรวจวัดโดพามีน โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E (ดูรูปที่ 4.17) พบว่าให้ผลการทดลองสอดคล้องกับ การใช้ MWNTs-E ตรวจวัด โดยให้กระแสแอนอดิกสูงสุดที่พีเอช 7.5 เช่นกัน (ดูรูปที่ 4.18 ประกอบ)



รูปที่ 4.16 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ใช้อัตรา
การสแกน 50 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน
(ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์เข้มข้น 0.1 M
pH 4.5, 6.5, 7.5 และ 8.0



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสที่ตรวจวัดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กระแสแอนอดิก) ของโดพามีน ในการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH ตั้งแต่ 4.5 ถึง 8.0 ด้วยเทคนิคไซคลิก โวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 0.05 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้ามีลติวอลด์ คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสดีเป็นขั้วทำงาน และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ตรวจวัดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กระแสแอนอดิก) ของโดพามีน ในการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH ตั้งแต่ 4.5 ถึง 8.0 ด้วยเทคนิคไซคลิก โวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 0.05 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้ามีลติวอลด์ คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสดีที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรตเป็นขั้วทำงาน และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ศึกษาผลของอัตราการสแกน

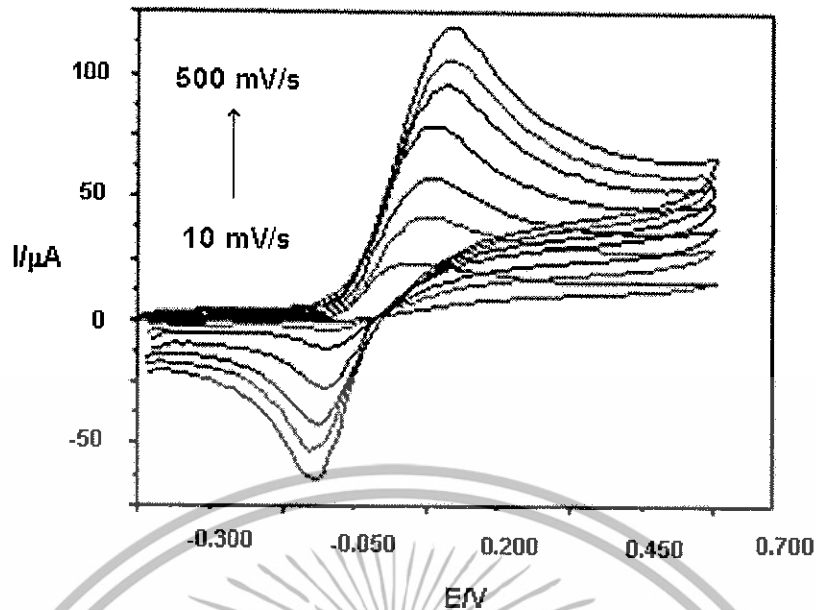
จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E (ดูรูปที่ 4.19 และ 4.21 ประกอบ) และ AgHCF/MWNTs-E (ดูรูปที่ 4.20 และ 4.22 ประกอบ) เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน และใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เป็น Ag/AgCl โดยใช้อัตราการสแกนตั้งแต่ 10, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 mV/s พบว่าได้ไซคลิกโวลแทมโมแกรม ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ สังเกตว่าเมื่อเพิ่มอัตราการสแกนจะทำให้เกิดศักย์ของการเกิดปฏิกิริยาเลื่อนไปในทางที่เป็นบวกมากขึ้น และกระแสฟีกจะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อทำการพลอตระหว่างค่ากระแสและอัตราในการสแกนพบว่าได้กราฟที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้งทั้งสองขั้วไฟฟ้า (ดูรูป 4.21 และ 4.23 ประกอบ) และเมื่อพลอตระหว่างค่ารากที่สองของอัตราการสแกนและกระแสฟีก จะได้กราฟเส้นตรงทั้งสองขั้วไฟฟ้า (ดูรูป 4.22 และ 4.24 ประกอบ) จากการทดลองที่ได้พบว่าได้ผลสอดคล้องกับสมการ 2.8 ซึ่งทำให้ทราบว่ากระบวนการของขั้วไฟฟ้าทั้งสองถูกควบคุมโดยการแพร่ (Diffusion Controlled)

$$I_p = (2.99 \times 10^5) n(\alpha n_a)^{1/2} (ACD^{1/2}) \nu^{1/2} \quad (2.8)$$

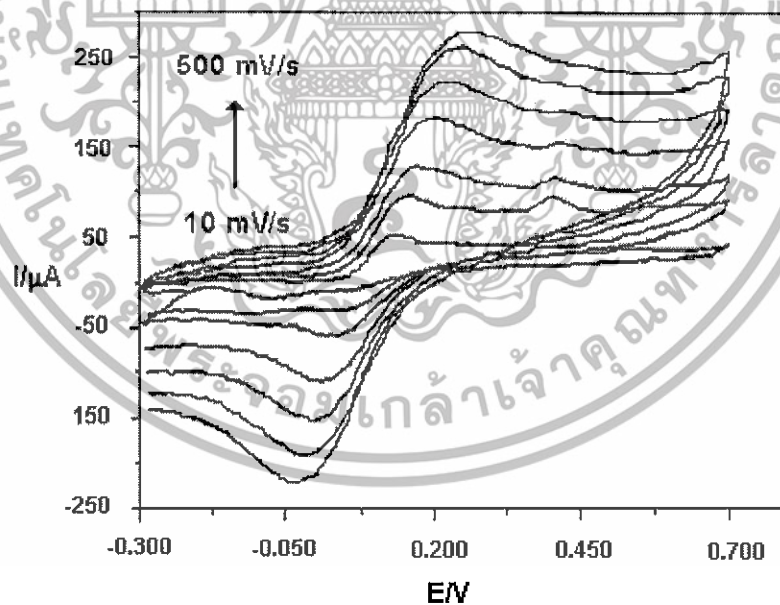
โดย

- | | | |
|----------|-----|---|
| I_p | แทน | กระแสฟีก มีหน่วยเป็น A |
| n | แทน | จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้อง |
| α | แทน | Transfer Coefficient |
| n_a | แทน | จำนวนอิเล็กตรอนในขั้นตอนการกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการของขั้วไฟฟ้า (The Number of Electrons in the Rate-Determination Step of Electrode Process) |
| A | แทน | พื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า มีหน่วยเป็น cm^2 |
| C | แทน | ความเข้มข้น มีหน่วยเป็น mol cm^{-3} |
| D | แทน | สัมประสิทธิ์ของการแพร่ มีหน่วยเป็น $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ |
| ν | แทน | อัตราการสแกน มีหน่วยเป็น Vs^{-1} |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

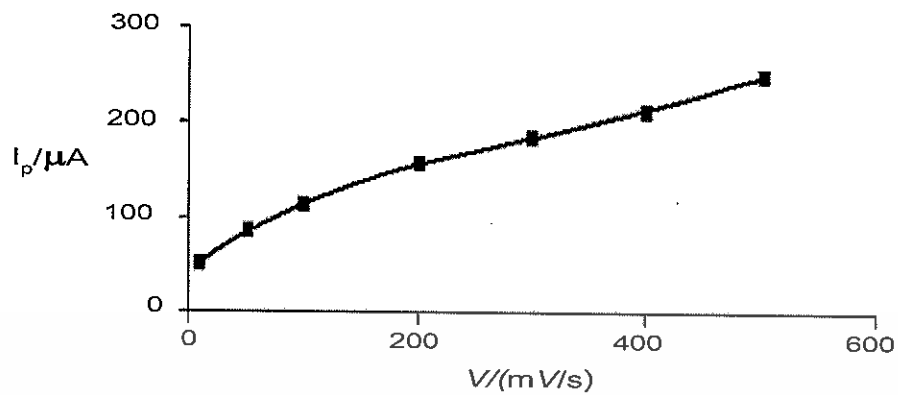


รูปที่ 4.19 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ใน ฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) โดยใช้อัตราการสแกนตั้งแต่ 10, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 mV/s

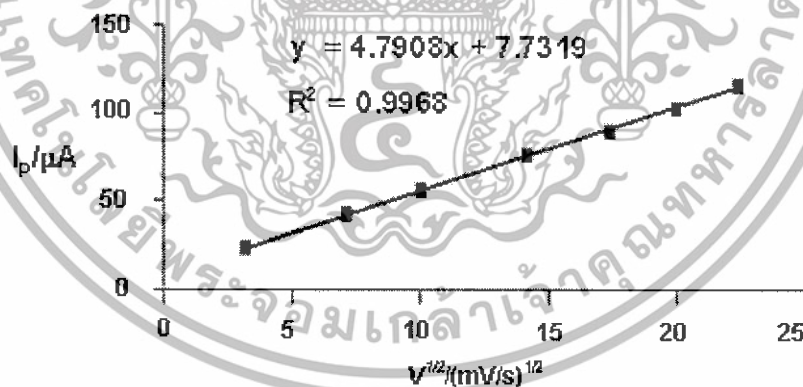


รูปที่ 4.20 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ใน สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E ที่เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) โดยใช้อัตราการสแกนตั้งแต่ 10, 50, 100, 200, 300, 400 และ 500 mV/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

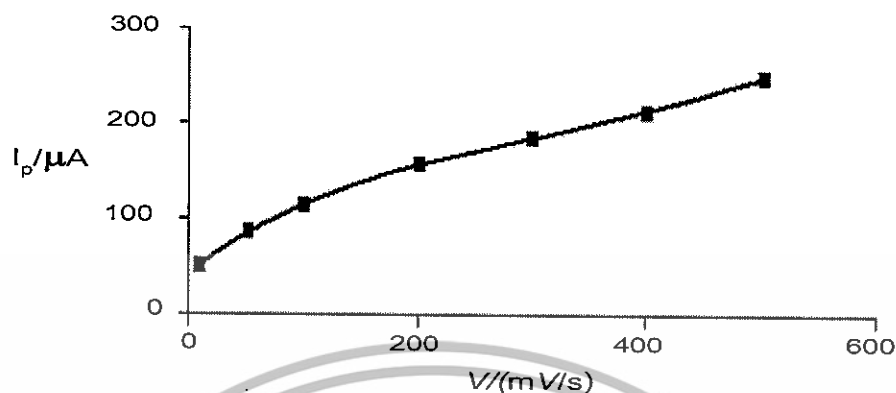


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟีกและอัตราการสแกนของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ -0.5 ถึง +0.5 V

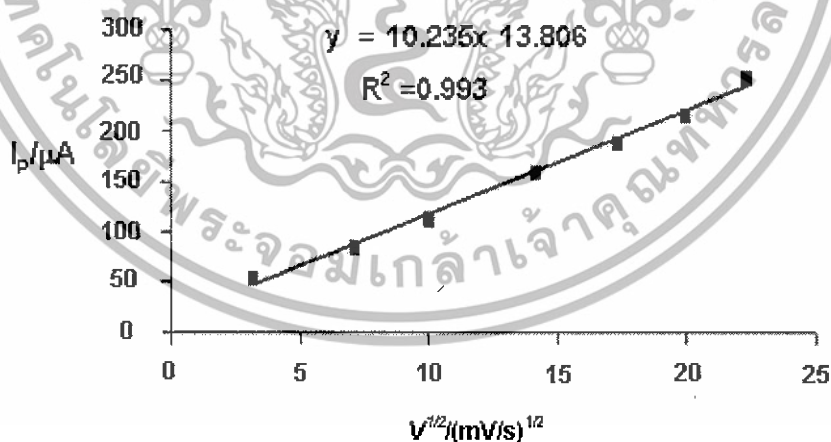


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟีก และ รากที่สองของอัตราการสแกน ของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ใช้อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า 50 mV/s โดยใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ -0.5 ถึง +0.5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟีก และ อัตราการสแกน ของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ใช้อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า 50 mV/s โดยใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ -0.5 ถึง +0.7 V

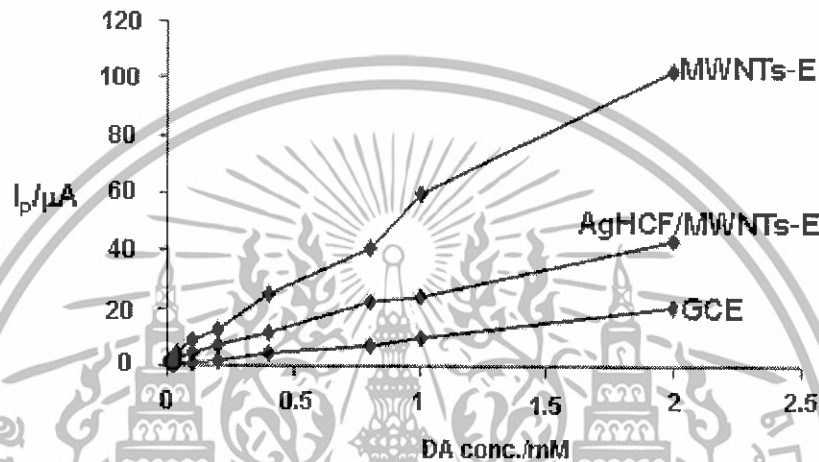


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฟีก และ อัตราการสแกน ของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ใช้อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า 50 mV/s โดยใช้ช่วงในการสแกนศักย์ไฟฟ้า ตั้งแต่ -0.5 ถึง +0.7 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. 6 สมบัติของขั้วไฟฟ้า

จากการใช้ขั้วไฟฟ้า GCE, MWNTs-E และ AgHCF/MWNTs-E ตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโดพามีนเข้มข้น ตั้งแต่ 0.005 mM ถึง 2.000 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี โดยเริ่มสแกนตั้งแต่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -0.6 ถึง 0.6 V จากนั้นพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกระแสจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน กับ ความเข้มข้นของโดพามีนได้ดังรูปที่ 4.25

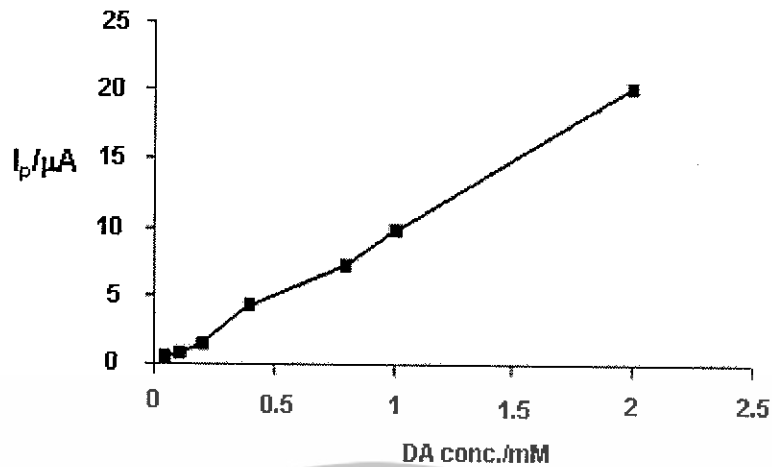


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟมาตรฐาน จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีน โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสสิคาร์บอน, มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสดี และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสดี ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอไรต์ โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s และใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี

4.6.1 การศึกษาสมบัติช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของความเข้มข้นกับกระแสในการวิเคราะห์

4.6.1.1 ขั้วไฟฟ้ากลาสสิคาร์บอน (GCE)

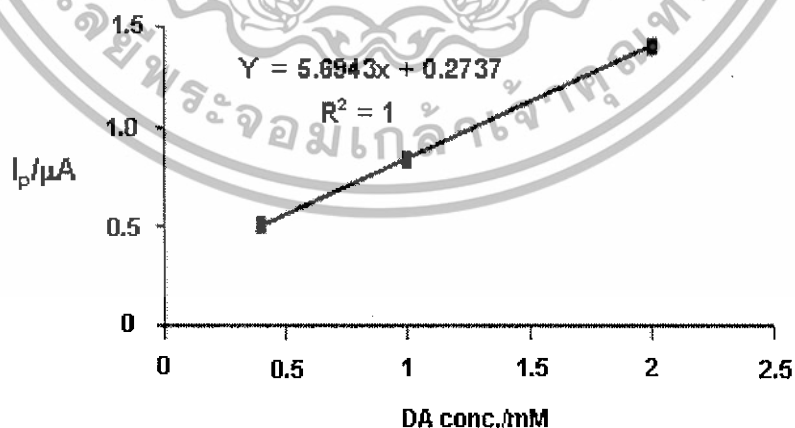
จากการใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสสิคาร์บอนตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโดพามีนเข้มข้น ตั้งแต่ 0.005 mM ถึง 2.000 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี โดยเริ่มสแกนตั้งแต่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -0.6 ถึง 0.6 V และสแกนด้วยอัตราการสแกน 50 mV/s ออกซิเดชันของโดพามีน กับ ความเข้มข้นของโดพามีนได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโดพามีน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 และสัญญาณกระแสจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 2.00 mM ด้วยเทคนิคฟิโพรเรโนเซียลพัลส์โวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนเป็นขั้วทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) และใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s

4.6.1.1.1 ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง

ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนมีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงที่อยู่ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 40 ถึง 200 μM โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ $y = 5.694x + 0.2737$ ซึ่ง ความชันเท่ากับ 5.6924 $\mu A/mM$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 1.000 (ดูรูป 4.27 ประกอบ)



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนของขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน ด้วยเทคนิคฟิโพรเรโนเซียลพัลส์โวลแทมเมตรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.1.2 กระแสพื้นของขั้วไฟฟ้ากลาสลิคาร์บอน

การศึกษากระแสพื้นของขั้วไฟฟ้ากลาสลิคาร์บอน จะใช้ขั้วกลาสลิคาร์บอน ตรวจวัดสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ทั้งหมด 30 จุด ซึ่งค่ากระแส ทั้ง 30 ค่า แสดงดังตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 แสดงค่ากระแสสัญญาณพื้นของขั้วไฟฟ้ากลาสลิคาร์บอน จากการตรวจวัด

สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมตรี ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl โดยอัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s

ครั้งที่ตรวจวัด	$I_p/\mu A$	ครั้งที่ตรวจวัด	$I_p/\mu A$
1	0.00502	17	0.00145
2	0.00548	18	0.00288
3	0.00763	19	0.00385
4	0.0356	20	0.00313
5	0.00305	21	0.00212
6	0.00611	22	0.00127
7	0.00383	23	0.00871
8	0.00615	24	0.00288
9	0.00488	25	0.0116
10	0.00692	26	0.00288
11	0.00145	27	0.00145
12	0.00163	28	0.00111
13	0.00848	29	0.00416
14	0.00417	30	0.00612
15	0.00423	SD.	0.006253
16	0.00826	Average	0.005549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.1.3 ขีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ของ ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน

Detection Limit = $(3 \times \text{SD.}) / \text{Slope}$ และ Quantification Limit = $(10 \times \text{SD.}) / \text{Slope}$
โดย SD. = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณจาก Background (วัด 30 ครั้ง)
และ Slope = ความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง
ดังนั้นขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนจากการทดลองสามารถตรวจวัดโดพามีนได้ต่ำสุด

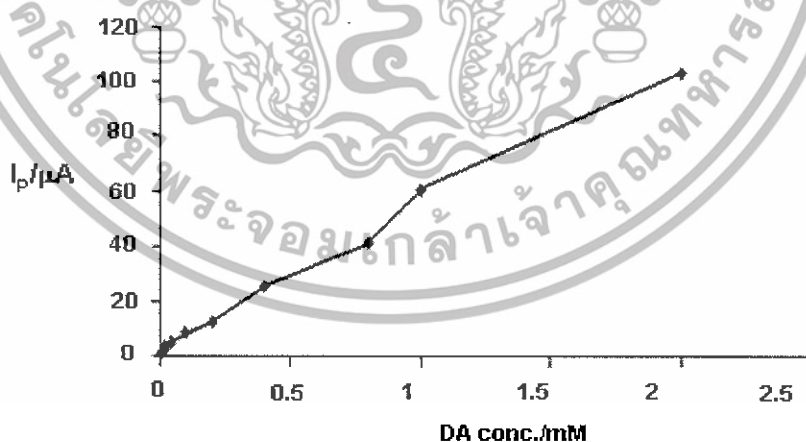
$$\begin{aligned} (\text{Detection Limit}) &= (3 \times 0.006253 \times \mu\text{A}) / (5.6946 \mu\text{A}/\text{mM}) = 0.003294 \text{ mM} \\ &= 3.294 \mu\text{M} \end{aligned}$$

และ ขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์

$$\begin{aligned} (\text{Quantification Limit}) &= (10 \times \text{SD.}) / \text{Slope} \\ &= (10 \times 0.006253 \times \mu\text{A}) / (5.6946 \mu\text{A}/\text{mM}) \\ &= 10.981 \mu\text{M} \end{aligned}$$

4.6.1.2 ขั้วไฟฟ้ามีลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟส (MWNTs-E)

จากการใช้ขั้วไฟฟ้ามีลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโดพามีนเข้มข้น ตั้งแต่ 0.005 mM ถึง 2.000 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมตรี โดยเริ่มสแกนตั้งแต่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -0.6 ถึง 0.6 V ใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s จากนั้นพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกระแสจากการปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน กับ ความเข้มข้นของโดพามีนได้ดังรูปที่ 4.28

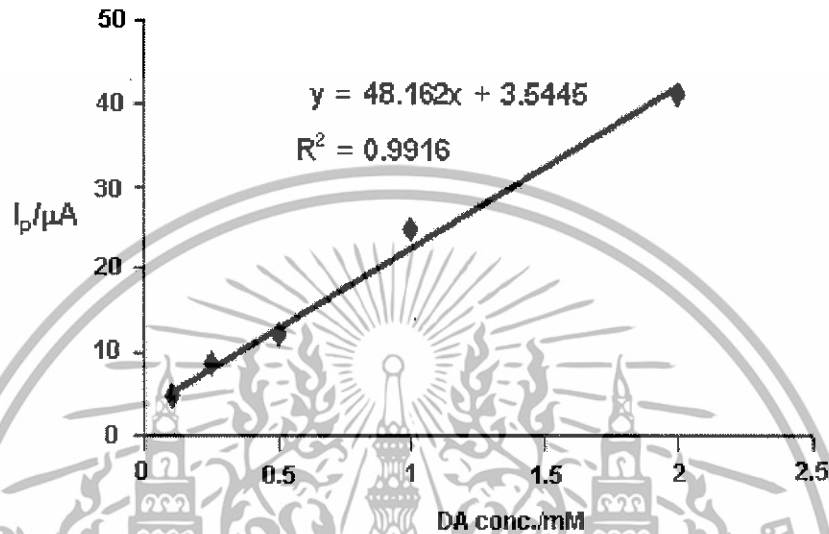


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโดพามีน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 และกระแสจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 2.00 mM โดยใช้ MWNTs-E เป็นขั้วทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมตรี และใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2.1 ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง

ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสต์ มีความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงที่อยู่ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 40 ถึง 800 μM โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ $y = 48.16x + 3.5445$ ซึ่งความชันเท่ากับ 48.16 $\mu\text{A}/\text{mM}$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9916 ดูรูป 4.29 ประกอบ



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสต์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี

4.6.1.2.2 กระแสพื้นของขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟสต์

การศึกษากระแสพื้นของขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน จะใช้ขั้วกลาสคาร์บอนตรวจวัดสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ทั้งหมด 30 จุดซึ่งค่ากระแสทั้ง 30 ค่า แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสสัญญาณพื้นของ MWNTs-E จากการตรวจวัดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s และตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ตรวจวัด	Ip/μA	ครั้งที่ตรวจวัด	Ip /μA
1	0.0107	17	0.0108
2	0.00534	18	0.029
3	0.00997	19	0.0127
4	0.00534	20	0.0151
5	0.00326	21	0.0175
6	0.00591	22	0.0114
7	0.0192	23	0.0113
8	0.0153	24	0.00763
9	0.0125	25	0.00804
10	0.00582	26	0.00717
11	0.00504	27	0.00916
12	0.0175	28	0.00478
13	0.0119	29	0.00453
14	0.0075	30	0.0103
15	0.0153	Average	0.0113
16	0.0183	SD.	0.006223

4.6.1.2.3 ขีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ของ ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เฟส

Detection Limit = $(3 \times \text{SD.}) / \text{Slope}$ และ Quantification Limit = $(10 \times \text{SD.}) / \text{Slope}$

โดย SD. = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณจาก Background

และ Slope = ความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง

ดังนั้นขั้วไฟฟ้า MWNTs paste จากการทดลองสามารถตรวจวัดโดพามีนได้ต่ำสุด

$$\begin{aligned} (\text{Detection Limit}) &= (3 \times 0.006223 \times \mu\text{A}) / (48.162 \mu\text{A}/\text{mM}) = 0.0003870 \text{ mM} \\ &= 0.3870 \mu\text{M} \end{aligned}$$

และ ขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Quantification Limit) = $(10 \times \text{SD.}) / \text{Slope}$

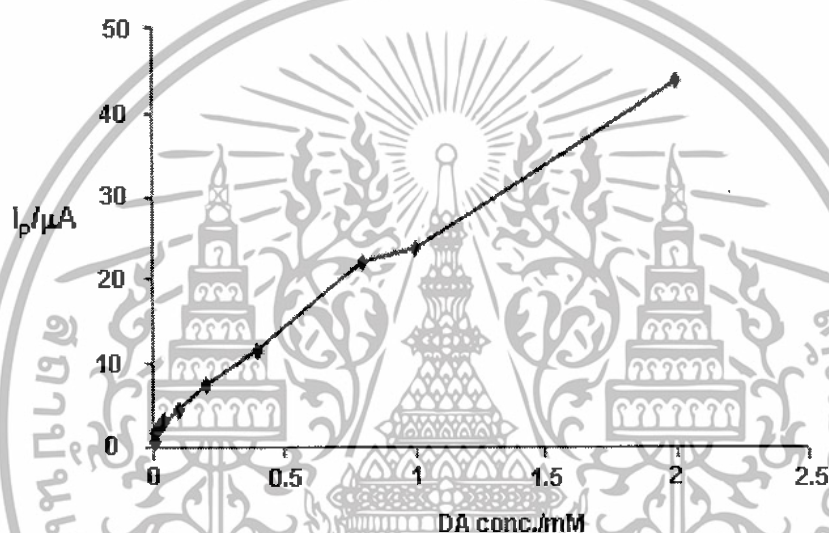
$$= (10 \times 0.006223 \times \mu\text{A}) / (48.162 \mu\text{A}/\text{mM})$$

$$= 1.290 \mu\text{M}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.3 ขั้วไฟฟ้ามีลิวอลด์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยเฮกซะไซยาโนเฟอเรต (AgHCF/MWNTs-E)

จากการใช้ขั้วไฟฟ้ามีลิวอลด์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วย AgHCF ตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโดพามีนเข้มข้น ตั้งแต่ 0.005 mM ถึง 2.000 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแควร์โวลแทมเมตรี โดยเริ่มสแกนตั้งแต่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -0.6 ถึง 0.6 V โดยใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s จากนั้นพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณกระแสจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน กับ ความเข้มข้นของโดพามีนได้ดังรูปที่ 4.30



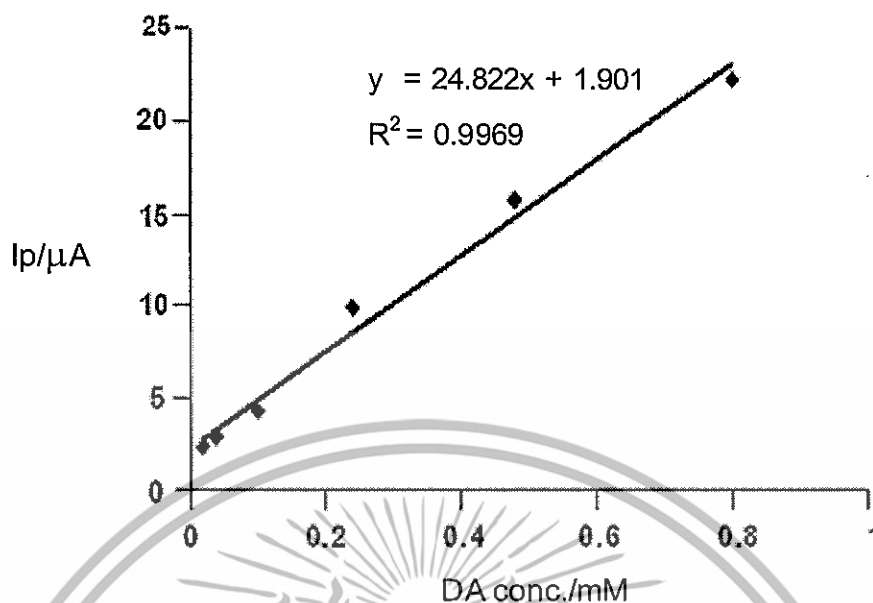
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโดพามีน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 และสัญญาณกระแสจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 2.00 mM ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแควร์โวลแทมเมตรี โดยใช้ AgHCF/MWNTs-E เป็นขั้วทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

4.6.1.3.1 ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้ามีลิวอลด์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยเฮกซะไซยาโนเฟอเรต

ขั้วไฟฟ้ามีลิวอลด์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงที่อยู่ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 20 ถึง 800 μM โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$y = 24.822x + 1.901$$

ซึ่งความชันเท่ากับ 24.822 $\mu\text{A}/\text{mM}$ และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9969 ดูรูปที่ 4.31 ประกอบ



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนของ ขั้วไฟฟ้ามีลวดคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต(II) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแควร์โวลเทมเมทรี

4.6.1.3.2 กระแสพื้นของขั้วไฟฟ้ามีลวดคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปรับปรุงด้วยเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

ในการศึกษากระแสพื้นของขั้วไฟฟ้า จะใช้ AgHCF/ MWNTs-E ตรวจวัดสารละลายบีเฟอโรฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ทั้งหมด 30 จุดซึ่งค่ากระแสทั้ง 30 ค่า แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากระแสสัญญาณพื้นของ AgHCF/MWNTs-E จากการตรวจวัด

สารละลายฟอสเฟตบีเฟอโรเข้มข้น 0.1 M pH 7.5 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแควร์โวลเทมเมทรี โดยอัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s และตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง

ครั้งที่ตรวจวัด	Ip/ μ A	ครั้งที่ตรวจวัด	Ip/ μ A
1	0.0221	17	0.0156
2	0.0158	18	0.0194
3	0.0183	19	0.0245
4	0.01837	20	0.0195
5	0.0122	21	0.0296
6	0.00569	22	0.0186
7	0.0151	23	0.00845
8	0.0199	24	0.0209
9	0.0325	25	0.0324
10	0.0209	26	0.00648
11	0.0345	27	0.0208
12	0.00993	28	0.03809
13	0.0264	29	0.0339
14	0.0159	30	0.0265
15	0.0176	Average	0.0204
16	0.0126	SD.	0.008443

4.6.1.3.3 ขีดจำกัดในการตรวจวัดและขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้า มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปรับปรุงด้วยเฮกซะไทยาโนเฟอไรต์

Detection Limit = $(3 \times \text{SD.}) / \text{Slope}$ และ Quantification Limit = $(10 \times \text{SD.}) / \text{Slope}$

โดย SD. = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณจาก Background

และ Slope = ความชันของกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง

ดังนั้น ขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs-E จากการทดลองสามารถตรวจวัดโดพามีนได้ต่ำสุด

$$(\text{Detection Limit}) = (3 \times 0.008443 \times \mu\text{A}) / (24.822 \mu\text{A}/\text{mM})$$

$$= 1.020 \mu\text{M}$$

และ ขีดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Quantification Limit)

$$= (10 \times \text{SD.}) / \text{Slope}$$

$$= (10 \times 0.008443 \times \mu\text{A}) / (24.822 \mu\text{A}/\text{mM})$$

$$= 3.401 \mu\text{M}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 การศึกษาความเที่ยงของขั้วไฟฟ้า (Precision)

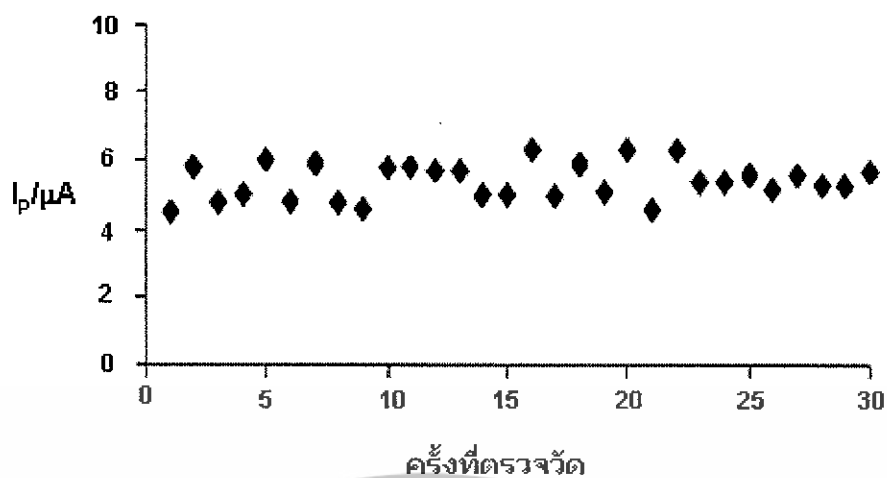
จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน, มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s ทั้งหมด 30 ครั้งพบว่าได้ ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 ค่ากระแสฟีกเฉลี่ย, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ %RSD ของขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน, ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ และขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

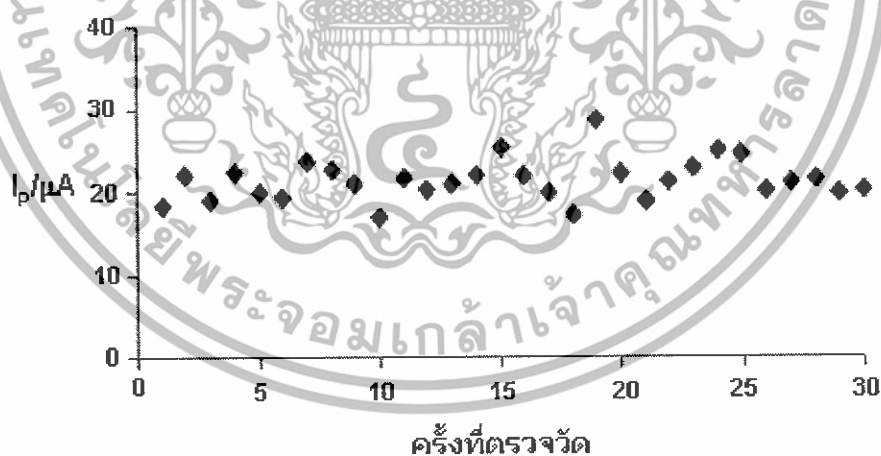
จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s

ค่าที่ได้จากการทดลอง	GC-E	MWNTs-E	AgHCF/MWNTs-E
กระแสฟีกเฉลี่ย	5.421	21.413	11.72
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.5626	2.503	2.399
% RSD.	10.37	11.69	17.93

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า %RSD ของ AgHCF / MWNTs สูงที่สุด เนื่องจากเหตุผลดังนี้ AgHCF ที่อยู่ในเพสต์อาจกระจายตัวไม่ทั่วถึงทั้งเพสต์ ทำให้ในการตรวจวัดในแต่ละครั้งได้ค่ากระแสแตกต่างกันมากกว่า GCE และ MWNTs-E

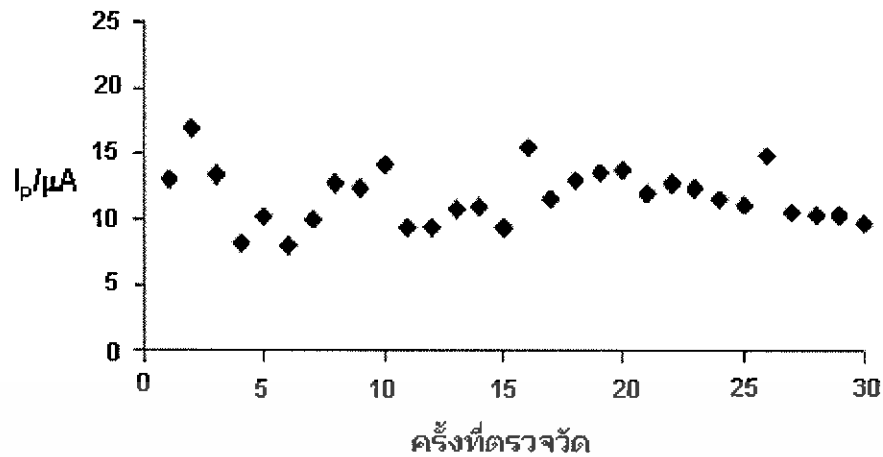


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงกระแสฟีกจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในสารละลาย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากาสติคาร์บอนเป็นขั้วทำงาน (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ อัตราการสแกน 50 mV/s ซึ่งตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงกระแสฟีกจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในสารละลาย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เฟสส์ (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ อัตราการสแกน 50 mV/s ซึ่งตรวจวัดทั้งหมด 30 ครั้ง

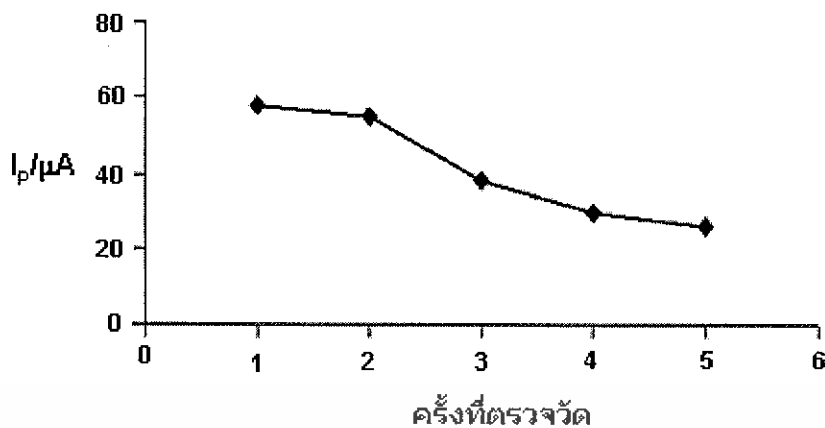
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



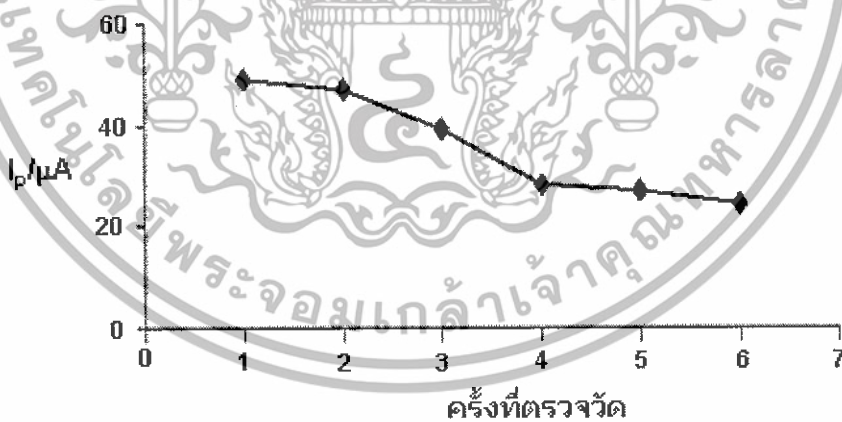
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงกระแสฟีกจากการตรวจวัดโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในสารละลาย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่ปรับปรุง ด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรต (ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Ag/AgCl) โดยเทคนิค ไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s ซึ่งวัดตรวจทั้งหมด 30 ครั้ง

4.6.3 การศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า

จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 โดยใช้ MWNTs-E (ดูรูปที่ 4.35 ประกอบ) และ AgHCF/MWNTs-E (4.36 ประกอบ) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s พบว่า อายุการใช้งานของ MWNTs-E คือ 5 ครั้งและ AgHCF/MWNTs-E เท่ากับ 6 ครั้ง สาเหตุที่มีอายุการใช้งานสั้นนั้น เนื่องจากการเกิดฟิล์มของสารที่ตรวจวัดบนผิวหน้าขั้ว ซึ่งอาจเป็นฟอสเฟตหรือโดพามีนก็ได้ สำหรับวิธีการแก้ไขทำได้โดยการนำกระดาษขาวผิวเรียบที่ไม่ได้ผ่านการใช้งาน จากนั้นก็ทำการขัดผิวหน้าขั้วบนกระดาษขาว ทำให้ฟิล์มที่ติดหน้าขั้วไฟฟ้าหลุดออก ซึ่งจากการตรวจวัดความแม่นยำของขั้วไฟฟ้า ก็ได้ใช้วิธีนี้ในการแก้ไขพบว่าได้ผลดีโดยไม่ลดกระแสฟีกที่คงที่ไม่ลดลง เหมือนกับกรณีที่ไม่ได้ขัดที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.35 แสดงอายุการใช้งานของ MWNTs-E จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s ใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (ตรวจวัดต่อเนื่องโดยไม่ได้ทำการขัดผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก่อนทำการตรวจวัด)



รูปที่ 4.36 แสดงอายุการใช้งานของ AgHCF/MWNTs-E จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV/s ใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (ตรวจวัดต่อเนื่องโดยไม่ได้ทำการขัดผิวหน้าขั้วไฟฟ้าก่อนทำการตรวจวัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การวิเคราะห์ปริมาณโดพามีนตัวอย่างด้วยเทคนิคไฟฟ้าเพอร์เนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี

จากการทดลองได้นำสารละลายตัวอย่างยาโดพามีนเข้มข้น 25,000 ppm (0.1318 M) มาเจือจางในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL จนมีความเข้มข้นของโดพามีนจากตัวอย่างสุทธิ 25 ppm (131.82 μ M) แล้วเติมสารละลายมาตรฐานโดพามีนจนมีความเข้มข้นของโดพามีนจากสารมาตรฐานสุทธิ เท่ากับ 0, 210.9, 421.85, 843.7 และ 2109.26 μ M พบว่า ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคการเติมสารมาตรฐานโดยใช้เทคนิค

ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี ด้วย GCE, MWNTs-/E และขั้วไฟฟ้า

AgHCF / MWNTs-E โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

ค่าที่ได้	GC-E	MWNTs-E	AgHCF/MWNTs-E
สมการเส้นตรง	$y=(0.0225x)+2.984$	$y=(0.0331x)+4.825$	$y=(0.0289x)+2.7932$
R^2	0.9887	0.9727	0.9897
จุดตัดแกน x (x,0)	(-132.62,0)	(-129.38,0)	(-96.65,0)
ค่าที่ตรวจวัดได้/ μ M	132.62	129.38	96.65
% ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์	+0.01	-1.85	-27.28

หมายเหตุ

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์} = \frac{[\text{ค่าความเข้มข้นที่วัดได้} - \text{ค่าความเข้มข้นที่ระบุข้างขวด}]}{\text{ค่าความเข้มข้นที่ระบุข้างขวด}} \times 100$$

จากผลการทดลองพบว่าผลการวิเคราะห์ปริมาณ โดพามีนของ GC-E และ MWNTs-E มีความใกล้เคียงกับที่ระบุจากข้างขวดมากกว่า AgHCF / MWNTs-E ที่เป็นเช่นนี้ น่าจะเกิดจากขณะที่ตรวจวัด แต่ละครั้งอาจมีปริมาณ AgHCF ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดกระแสการรบกวน จากฟลักของ AgHCF ซึ่งจะขึ้นที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับโดพามีนบริเวณ ซึ่งรบกวนการวิเคราะห์ ในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความไม่เที่ยงของขั้วไฟฟ้า AgHCF/MWNTs-E แต่ละครั้งด้วย

สำหรับวิธีการคำนวณหาปริมาณโดพามีนในตัวอย่างมีดังนี้

1. ใช้โปรแกรม Microsoft Excel พล็อตกราฟมาตรฐาน (แกนตั้งเป็นค่ากระแสฟลักแกนนอนเป็นความเข้มข้น) เพื่อหาความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างกระแสฟลักกับความเข้มข้น จะได้สมการ $y = mx + c$ โดย m เป็นความชัน และ c จะเป็นจุดตัดแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากสมการ $y = mx + c$ ต้องแทนค่า $y = 0$

แก้สมการ จะได้ $x = -(c/m)$ ซึ่งความเข้มข้นของตัวอย่างโดยพหามีนเท่ากับ $-x$ เมื่อ ค่า $y = 0$ นั้นเอง

ส่วนค่า % ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

$$= \frac{(\text{ความเข้มข้นจากการทดลอง} - \text{ความเข้มข้นที่ระบุจากข้างขวด})}{\text{ความเข้มข้นที่ระบุจากข้างขวด}} \times 100$$

$$= -(X \text{ เมื่อ } y = 0) / (131.82) \times 100$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าทั้งสามชนิด

ผลการทดลอง	ขั้วไฟฟ้า			เทคนิค
	GC-E	MWNTs-E	AgHCF/ MWNTs-E	
1. สูตรขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม	—	30%oil	30%oil 0.5%AgHCF	CV
2. พีเอชที่เหมาะสม	—	7.5	7.5	CV
3. กระบวนการของขั้วไฟฟ้า	—	ถูกควบคุมด้วยการแพร่	ถูกควบคุมด้วยการแพร่	CV
4. ช่วงการแปรผันตรงของการตรวจวัด (μM)	40-200	40-800	20-800	CV
5. สภาพไว ($\mu\text{A}/\mu\text{M}$)	5.6943	48.162	24.82	DPV
6. สมการเส้นตรง	$Y = 5.6943x + 0.2737$	$Y = 48.162x + 3.5445$	$Y = 24.822x + 1.901$	CV
7. ขีดจำกัดการตรวจวัด (μM)	3.294	0.38	1.02	CV
8. % RSD. (μM)	10.37	11.69	17.93	CV
9. ครึ่งชีวิต (ครั้ง)	—	5	6	CV
10. %ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์	+0.60	-1.85	-26.68	DPV

หมายเหตุ — หมายถึง ไม่ได้ทำการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ในการตรวจวัดโดพามีนด้วยขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ (MWNTs-E) อัตราส่วนของน้ำมันพาราฟินที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดโดพามีน คือ ร้อยละ 30 และเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำมันพาราฟินร้อยละ 30 มาทำการปรับปรุงด้วยซิลเวอร์เฮกซะไชยาโนเฟอร์เรต(II) (AgHCF) เพื่อให้ตรวจวัดโดพามีนพบว่าซิลเวอร์เฮกซะไชยาโนเฟอร์เรต (II) ไม่ช่วยเพิ่มสัญญาณกระแสในการตรวจวัดโดพามีน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการรบกวนการวิเคราะห์โดพามีนอีกด้วย จากการทดลองนี้เลือกใช้ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์เฮกซะไชยาโนเฟอร์เรต(II) (AgHCF/MWNTs-E) ที่มีอัตราส่วนของ AgHCF เท่ากับ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักในการตรวจวัดโดพามีนเพื่อเปรียบเทียบกับ MWNTs-E ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินร้อยละ 30 และขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน GC-E

ในการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 M ในการตรวจวัดโดพามีน ของ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 7.5 เท่ากันทั้ง MWNTs-E และ AgHCF/MWNTs-E และจากการศึกษาผลของอัตราการสแกน ได้กระบวนกรของ MWNTs-E และ AgHCF/MWNTs-E ถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion Controlled)

จากการศึกษาสมบัติของ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกนเท่ากับ 50 mV พบว่าสภาพไวของ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E เท่ากับ 48.162 ($R^2=0.9916$), 24.82 ($R^2=0.9969$) และ 5.6943 ($R^2=1.00$) $\mu\text{A}/\text{mM}$ ตามลำดับ โดยมีช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดของ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E เท่ากับ 40-800, 20-800, 20-200 mM ตามลำดับ ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit of Detection) โดพามีนที่อัตราส่วนสัญญาณกระแสต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3 ($S/N = 3$) ของ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E เท่ากับ 0.38, 1.02 และ 3.29 μM ตามลำดับ ส่วนการศึกษาความแม่นยำในการตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีพบว่า MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E มีค่า % RSD. เท่ากับ 11.69, 10.37 และ 17.93 ตามลำดับ ในการศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าพบว่า MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E ได้จำนวนครั้งของการตรวจวัดซ้ำที่ให้กระแสที่ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งคือเพียง 5 และ 6 ครั้ง ตามลำดับ เพราะว่าเกิดฟิล์มของสารที่ตรวจวัดยึดติดบริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำให้ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของโดพามีนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า แต่สามารถแก้ไขได้โดยการขัดหน้าขั้วไฟฟ้า ด้วยการนำไปขัดถูบนกระดาษสะอาดสีขาวทุกครั้งก่อนจะตรวจวัด พบว่าวิธีนี้ช่วยให้ความแม่นยำของการตรวจวัดสูงขึ้น

จากการใช้ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E ตรวจวัดโดพามีนไฮโดรคลอไรด์ ในยาตัวอย่าง พบว่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของปริมาณที่ระบุบนขวดยากับปริมาณที่ MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GC-E ตรวจวัดได้เท่ากับร้อยละ -1.85, -27.78 และ +0.01 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Siam Health.2006. Parkinson Disease. [Online]. Available :
<http://www.siamhealth.net/Disease/neuro/parkinson.htm>.
- [2] Baranyi, M., Milusheva, E., Sylvester Vizi, E. and Sperlagh, B.2006. Chromatographic Analysis of Dopamine Metabolism in a Parkinsonian Model. *J. Chromatogr. A.* 1120 : 13-20.
- [3] Vuorensola, K., Siren, H. and Karjalainen, U. 2003. Determination of Dopamine and Methoxycatecholamines in Patient Urine by Liquid Chromatography with Electrochemical Detection and by Capillary Electrophoresis Coupled with Spectrophotometry and Mass Spectrometry. *J. Chromatogr. B.* 778(2) : 277-289.
- [4] Nagaraja, P., Vasantha, R.A. and Sunitha, K.R. 2001. A Selective and Sensitive Spectrophotometric Estimation of Catechol Derivative in Pharmaceutical Preparations. *Talanta.* 55 :1039-1046.
- [5] Wang, H.Y., Sun, Y. and Tang, B. 2002. Study on Fluorescence Property of Dopamine and Determination of Dopamine by Fluorimetry. *Talanta.* 57 :899 – 907.
- [6] Ebru Seekin, Z. and Volkan, M. 2005. Flow Injection Fluorescence Determination of Dopamine Using a Photo Induced Electron Transfer (PET) Boronic Acid Derivative. *Anal. Chim. Acta.* 547(1) : 104-108.
- [7] Wang, Z. Liu, J., Liang, Q., Wang, Y. and Luo, G. 2002. Carbon Nanotube-Modified Electrode for the Simultaneous Determination of Dopamine and Ascorbic Acid. *Analyst.* 127 : 653-658.
- [8] ไศภิชรุ ฐี ฐีอฐำฐำง. 2548. การใช้ข้วกลาสสิคาร์บอนที่ปรับปรุ้งด้วยซิงเกิลวอลล์นาโนทิวบ์ สําหรับตรวจวัดโดพามีนทางเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] Wang, J., Li, M., Shi, Z., Li, N. and Gu, Z. 2001. Electrocatalytic Oxidation of 3,4-dihydroxyphenylacetic acid at a Glassy Carbon Electrode Modified with Single - wall Carbon Nanotubes. *Electrochim. Acta.* 47 : 651 – 657.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Yan, X.X., Pang, D.W., Lu, J.Q., Tong, H. 2004. Electrochemical Behavior of L-Dopa at Single-Wall Carbon Nanotube Modified Glassy Carbon Electrode. *J. Electroanal. Chem.* 569 : 47-52.
- [11] Wu, K., Fei, J. and Hu, S. 2003. Simultaneous Determination of Dopamine and Serotonin on a Glassy Carbon Coated with a Film of Carbon Nanotubes. *Anal. Biochem.* 318 : 100-106.
- [12] Chicharro, M., Sanchez, A., Bermejo, E., Zapardiel, A., Rubianes, M.D. and Rivas, G.A. 2005. Carbon Nanotubes Paste Electrodes as New Detectors for Capillary Electrophoresis. *Anal. Chim. Acta.* 543(1-2) : 84-91.
- [13] Zhao, G.C., Yin, Z.Z., Zhang, L. and Wei, X.W. 2005. Direct Electrochemistry of Cytochrome C on a Multiwalled Carbon Nanotubes Modified Electrode and its Electrocatalytic Activity for the Reduction of H_2O_2 . *Electrochem. Commun.* 7(3) : 256 – 260.
- [14] Ciszewaki, A. and Milczarek, G. 1999. Polyeneol - Modified Platinum Electrode for Selective Detection of Dopamine in the Presence of Ascorbic Acid. *Anal. Chem.* 71 : 1055-1061.
- [15] Budavari, S. 2001. *The Merck Index*. 13th ed. USA : Merck & Co.Inc. pp. 602.
- [16] British Pharmacopoeia Commission. 1998. *British Pharmacopoeia*. vol. 1. London : The Stationery Office. pp. 816-817.
- [17] British Pharmacopoeia Commission. 1998. *British Pharmacopoeia*. vol. 2. London : The Stationery Office. pp. 1651–1652.
- [18] Skoog, D.A. and Leary, J.J. 1992. *Principle of Instrumental Analysis*. 4th Ed. Florida : Saunders College. pp. 535-564.
- [19] Hart, J.J. 1990. *Electroanalysis of Biologically Important Compounds Principle of Instrumental Analysis of Biologically Important Compounds*. 1st Ed. Chichester : Ellis Horwood Ltd. pp. 13-28.
- [20] Brett, C.M.A. and Brett A.M.O. 1994. *Electrochemistry : Principle, Method and Applications*. 2nd Ed. New York : Oxford University Press Inc. pp. 176-219.
- [21] Monk, M.S.P. 2002. *Fundamentals of Electroanalytical Chemistry*. 2nd Ed. Manchester. Manchester Metropolitan University. pp. 157-162.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] Gorton, L., editor. 2005. *Wilson & Wilson's Comprehensive Analytical : Biosensors and Modern Biospecific Analytical Techniques*. vol. 44. Lund : Lund University. pp. 293-319.
- [23] Ajayan, P.M., Charliert, J.C. and Rinzler, A.G. 1999. Carbon Nanotubes: From Macromolecules to Nanotechnology. *P.N.A.S.* 96(25) : 14199-14200.
- [24] Guozhong, C. 2004. *Nanostructures & Nanomaterials : Synthesis, Properties & Applications*. London : Imperial College Press. pp. 232-238.
- [25] Nanotechnology Now.2006. **SWCNT Structure**. [Online]. Available : <http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm>.
- [26] Wellesley College.1998.Nanotube. [Online]. Available : <http://www.wellesley.edu/Chemistry/Flick/bucky/nanotube.gif>.
- [27] Ahwahnee Technology.2006. **SWCNT and MWCNT Structure**. [Online]. Available: http://www.ahwahneetech.com/technology/carbon_nanotube.htm.
- [28] Jayasri, D. and Narayanan, S.S. 2006. Electro-catalytic Oxidation and Amperometric Determination of BHA at Graphite-wax Composite Electrode with Silver Hexacyanoferrate as Electrocatalyst. *Sens and Actua B: Chemical*. 199 : 135 -142.
- [29] Wang, F., Chen, L., Chen, X. and Hu, Z. 2005. Studies on Electrochemical Behaviors of Acyclovir and its Voltammetric Determination with Nano-structured Film Electrode. *Anal. Chim. Acta*. 576(1) : 17-22.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ตารางที่ ก.1 แสดงค่ากระแสฟีก และความต่างศักย์ที่ได้จากการใช้ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีปริมาณน้ำมันพาราฟินตั้งแต่ร้อยละ 30, 35 และ 40 ตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

น้ำมันพาราฟิน(%w/w)	ครั้งที่	ความต่างศักย์(V)	กระแสฟีก(μ A)
30	1	0.119	55.51
	2	0.119	55.23
	3	0.119	55.94
	เฉลี่ย	0.119 ± 0	55.56 ± 0.3576
35	1	0.188	14.71
	2	0.198	14.57
	3	0.188	14.58
	เฉลี่ย	0.1913 ± 0.0058	14.62 ± 0.078
40	1	0.148	14.57
	2	0.184	14.59
	3	0.155	14.05
	เฉลี่ย	0.1623 ± 0.0191	14.403 ± 0.306

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 แสดงค่ากระแสฟีก และความต่างศักย์ จากการใช้ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์โพลีเมอร์ที่มีปริมาณซิลเวอร์เวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอร์เรตตั้งแต่ร้อยละ 0.1, 0.5, 1.0, 3.0 และ 5.0 ซึ่งมีปริมาณน้ำมันพาราฟินเท่ากันคือ ร้อยละ 30 ตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่เข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

% AgHCF(w/w)	ครั้งที่	ความต่างศักย์(V)	กระแสฟีก(μ A)
0.10%	1	0.184	48.44
	2	0.194	50.15
	3	0.184	48.66
	เฉลี่ย	0.1873 ± 0.0058	49.083 ± 0.93
0.50%	1	0.184	55.48
	2	0.184	55.55
	3	0.184	55.95
	เฉลี่ย	0.184 ± 0	55.66 ± 0.254
1.00%	1	-	-
	2	-	-
	3	-	-
	เฉลี่ย	-	-
3.00%	1	-	-
	2	-	-
	3	-	-
	เฉลี่ย	-	-
5.00%	1	0.074	53.24
	2	0.074	49.05
	3	0.084	53.09
	เฉลี่ย	0.0773 ± 0.0058	51.79 ± 0.0058

- หมายถึงไม่มีกระแสฟีกเกิดขึ้น (no peak found)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 แสดงกระแสฟลักที่เพิ่มขึ้นในการตรวจวัดสารละลายโดพามีน 1 mM ที่อยู่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM ที่มี pH ตั้งแต่ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 และ 8.0 โดยใช้ MWNTs-E และ AgHCF/MWNTs-E ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้อัตราในการสแกน 50 mV/s

pH	ครั้งที่	MWNTs/ μA	AgHCF/MWNTs/ μA
4.5	1	14.36	-
	2	14.81	-
	3	14.61	-
	เฉลี่ย	14.59 \pm 0.2255	-
5	1	16.85	-
	2	16.75	-
	3	16.99	-
	เฉลี่ย	16.86 \pm 0.1206	-
5.5	1	19.83	-
	2	19.88	-
	3	19.49	-
	เฉลี่ย	19.73 \pm 0.2122	-
6	1	20.47	-
	2	21.03	-
	3	20.82	-
	เฉลี่ย	20.77 \pm 0.2829	-
6.5	1	34.93	49.05
	2	34.91	48.33
	3	35.12	48.31
	เฉลี่ย	34.99 \pm 0.1159	48.563 \pm 0.4216
7	1	47.88	48.89
	2	48.81	48.49
	3	46.98	48.33
	เฉลี่ย	47.89 \pm 0.9150	48.57 \pm 0.2884

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pH	ครั้งที่	MWNTs/ μA	AgHCF/MWNTs/ μA
7.5	1	59.61	52.55
	2	59.09	52.11
	3	59.39	52.56
	เฉลี่ย	59.39 ± 0.2610	52.41 ± 0.2570
8	1	43.01	12.69
	2	42.29	12.55
	3	42.08	12.59
	เฉลี่ย	42.46 ± 0.4876	12.61 ± 0.0721

- หมายถึงไม่มีกระแสฟลักเกิดขึ้น (no peak found)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 แสดงค่ากระแสฟลัก และ ความต่างศักย์ของการเกิดปฏิกิริยา จากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ใช้อัตราการสแกนตั้งแต่ 10 ถึง 500 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์พอสต์

อัตราการสแกน(mV/s)	ครั้งที่	ความต่างศักย์(V)	กระแสฟลัก(μ A)
10	1	0.171	22.68
	2	0.173	22.94
	3	0.173	22.75
	เฉลี่ย	0.1723 \pm 0.00115	22.79 \pm 0.00115
50	1	0.188	42.03
	2	0.188	42.23
	3	0.188	42.85
	เฉลี่ย	0.188 \pm 0	42.37 \pm 0.42755
100	1	0.212	55.67
	2	0.202	56.12
	3	0.202	56.01
	เฉลี่ย	0.2053 \pm 0.0057	55.933 \pm 0.235
200	1	0.211	76.86
	2	0.212	76.01
	3	0.22	75.71
	เฉลี่ย	0.2143 \pm 0.0049	76.196 \pm 0.597
300	1	0.228	88.23
	2	0.238	91.51
	3	0.217	89.26
	เฉลี่ย	0.2277 \pm 0.0105	86.667 \pm 1.677
400	1	0.217	104.3
	2	0.236	101.7
	3	0.236	105.9
	เฉลี่ย	0.2297 \pm 0.0102	103.97 \pm 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการสแกน(mV/s)	ครั้งที่	ความต่างศักย์(V)	กระแสฟลัก(μA)
500	1	0.245	114.3
	2	0.249	115.3
	3	0.245	120.8
	เฉลี่ย	0.2463±0.0105	116.8±3.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 แสดงค่ากระแสฟีก และ ความต่างศักย์จากการเกิดปฏิกิริยาจากจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 1.0 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 mM pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิก โวลแทมเมตรี ใช้อัตราการสแกนตั้งแต่ 10 ถึง 500 mV/s โดยใช้ขั้วไฟฟ้ามีลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เคลือบด้วยซิลเวอร์เฮกซะไฮยาโนเฟอไรต์

อัตราการสแกน(mV/s)	ครั้งที่	ความต่างศักย์(V)	กระแสฟีก(μ A)
10	1	0.133	51.97
	2	0.135	50.98
	3	0.135	51.98
	เฉลี่ย	0.1343 \pm 0.0012	51.643 \pm 0.057
50	1	0.157	85.19
	2	0.159	86.05
	3	0.161	84.99
	เฉลี่ย	0.159 \pm 0.002	85.41 \pm 0.563
100	1	0.182	113.3
	2	0.181	112.9
	3	0.178	114.1
	เฉลี่ย	0.1803 \pm 0.002	113.43 \pm 0.61
200	1	0.199	156.3
	2	0.189	155.9
	3	0.189	156.8
	เฉลี่ย	0.1923 \pm 0.0047	156.33 \pm 0.45
400	1	0.246	214.4
	2	0.249	214.9
	3	0.24	212.6
	เฉลี่ย	0.245 \pm 0.0046	213.97 \pm 1.21
500	1	0.254	251.1
	2	0.249	253.9
	3	0.253	255.6
	เฉลี่ย	0.252 \pm 0.0026	253.53 \pm 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 แสดงค่ากระแสฟีกจากการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้นตั้งแต่ 0.005 ถึง 2.0 mM ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 M pH 7.5 โดยใช้หัวไฟฟ้า MWNTs-E, AgHCF/MWNTsE และ GCE ด้วยเทคนิคคิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ โวลแทมเมตรี ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

ความเข้มข้น (mM)	ครั้งที่ตรวจวัด	กระแสฟีก(μ A)		
		GCE	MWNT-E	AgHCF/MWNTs-E
0.005	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
	เฉลี่ย	-	-	-
0.01	1	-	1.589	1.774
	2	-	1.609	1.310
	3	-	1.821	1.650
	เฉลี่ย	-	1.6815 \pm 0.1285	1.578 \pm 0.2402
0.02	1	0.1831	4.864	2.804
	2	0.1526	5.026	2.008
	3	0.16021	4.703	2.500
	เฉลี่ย	0.1653 \pm 0.015875	4.864 \pm 0.124	2.437 \pm 0.40167
0.04	1	0.632	6.981	3.495
	2	0.5737	6.395	2.131
	3	0.5769	6.441	2.987
	เฉลี่ย	0.5942 \pm 0.03277	6.6056 \pm 0.3258	2.8710 \pm 0.6893
0.1	1	0.7355	8.686	4.3660
	2	0.9857	8.595	4.3420
	3	0.8050	8.690	4.3005
	เฉลี่ย	0.84206 \pm 0.12915	8.6570 \pm 0.0537	4.33616 \pm 0.03313
0.24	1	1.387	13.69	9.951
	2	1.773	13.95	10.69
	3	1.769	13.89	8.963
	เฉลี่ย	1.6430 \pm 0.2217	13.843 \pm 0.1361	9.8680 \pm 0.8664

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้น (mM)	ครั้งที่ตรวจวัด	กระแสฟีก(μA)		
		GCE	MWNT-E	AgHCF/MWNTs-E
0.48	1	4.971	25.25	15.420
	2	4.782	25.03	16.050
	3	4.976	24.91	15.935
	เฉลี่ย	4.9096±0.1105	25.063±0.172	15.8013±0.3354
0.8	1	6.975	41.24	23.15
	2	6.598	41.03	21.66
	3	6.729	41.36	22.06
	เฉลี่ย	6.7673±0.1914	41.210±0.167	22.290±0.771
1.0	1	10.68	61.65	22.51
	2	10.29	61.23	25.05
	3	10.29	59.95	24.15
	เฉลี่ย	10.420±0.225	60.943±0.885	23.903±1.287
2.0	1	20.99	106.9	44.91
	2	21.06	101.6	42.08
	3	21.63	100.3	44.91
	เฉลี่ย	21.226±0.351	102.93±3.496	43.966±1.633

- หมายถึงไม่มีกระแสฟีกเกิดขึ้น (no peak found)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 แสดงค่ากระแสฟีกกับครั้งที่วัดของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนเข้มข้น 0.50 mM ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 mM pH 7.50 โดยใช้ขั้วไฟฟ้า MWNTs-E, AgHCF/MWNTs-E และ GCE ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

ครั้งที่ตรวจวัด	กระแสฟีก(μ A)		
	GC-E	MWNTs-E	AgHCF/MWNTs-E
1	4.471	18.32	13.03
2	5.816	21.99	16.91
3	4.745	18.83	13.32
4	4.972	22.31	8.21
5	6.046	20.01	10.15
6	4.797	19.32	7.989
7	5.981	23.83	9.981
8	4.766	22.71	12.72
9	4.567	20.97	12.45
10	5.797	17.07	14.16
11	5.837	21.63	9.377
12	5.762	20.19	9.377
13	5.736	21.11	10.83
14	4.999	21.99	11.06
15	4.969	25.31	9.424
16	6.387	21.93	15.57
17	4.951	19.92	11.66
18	5.937	17.28	12.95
19	5.098	28.87	13.61
20	6.312	22.35	13.72
21	4.558	18.97	12.06
22	6.371	21.19	12.77
23	5.461	23.02	12.47
24	5.367	25.03	11.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ตรวจวัด	กระแสฟีก(μA)		
	GC-E	MWNTs-E	AgHCF/MWNTs-E
25	5.673	24.88	11.11
26	5.199	20.36	15.04
27	5.661	21.22	10.65
28	5.275	21.53	10.42
29	5.321	19.91	10.32
30	5.777	20.36	9.828
average	5.421	21.413	11.72
SD.	0.5626	2.503	2.399
% RSD.	10.38	11.69	17.93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 แสดงค่ากระแสฟีก จากการตรวจวัดสารละลายที่ได้จากการเติมสารมาตรฐาน โดพามีนไฮโดรคลอไรด์ เข้มข้นต่างๆกัน ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ลงในตัวอย่างยาตรวจวัดสารละลายตัวอย่างโดพามีน ด้วย MWNTs-E, AgHCF/MWNTsE และ GCE ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี ใช้อัตราสแกน 50 mV/s

ความเข้มข้นของ สารมาตรฐานที่เติม(μM)	ครั้งที่	กระแสฟีก(μA)		
		MWNTs-E	AgHCF/MWNT-E	GCE
0	1	9.101	3.224	3.911
	2	9.119	3.229	3.898
	3	9.102	3.219	3.895
	เฉลี่ย	9.107 ± 0.0101	3.224 ± 0.0050	3.901 ± 0.0085
210.93	1	13.11	10.02	6.017
	2	13.07	10.13	6.021
	3	13.15	10.06	6.014
	เฉลี่ย	13.11 ± 0.040	10.07 ± 0.055	6.017 ± 0.004
421.85	1	14.85	11.08	15.03
	2	14.81	11.09	14.96
	3	14.78	11.07	15.01
	เฉลี่ย	14.81 ± 0.035	11.08 ± 0.010	15.00 ± 0.036
843.7	1	27.95	19.91	19.57
	2	27.93	19.85	19.58
	3	21.97	19.79	19.56
	เฉลี่ย	25.95 ± 0.020	19.85 ± 0.060	19.57 ± 0.010
2109.26	1	79.11	55.39	50.99
	2	79.19	55.42	50.87
	3	78.89	55.16	51.03
	เฉลี่ย	79.06 ± 0.155	55.32 ± 0.142	50.96 ± 0.0832
สมการ		$(0.0341x) + 3.9724$	$(0.0245x) + 2.3504$	$(0.0225x) + 2.984$
จุดตัดแกนx		-116.4927	-116.4927	-95.93469
R^2		0.9706	0.9874	0.9887

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้