

การใช้อนิโพลีเมอร์คาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์นาโนทิวบ์สำหรับตรวจวัด
โคพาวินทางเคมีไฟฟ้า

SINGLE-WALL CARBON NANOTUBE MODIFIED GLASSY CARBON
ELECTRODE FOR ELECTROANALYTICAL DETERMINATION OF
COPAVINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของวารสารตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1914-1

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้ขั้วกลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์นาโนทิวส์สำหรับตรวจวัด
โดพามีนทางเคมีไฟฟ้า

SINGLE-WALL CARBON NANOTUBE MODIFIED GLASSY CARBON
ELECTRODE FOR ELECTROANALYTICAL DETERMINATION OF
DOPAMINE



โสภณัฐ เชื้อคำช้าง

SOPIS CHUEKACHANG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 60259
วัน,เดือน,ปี 27 ส.ย. 2549

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1914-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SINGLE-WALL CARBON NANOTUBE MODIFIED GLASSY CARBON
ELECTRODE FOR ELECTROANALYTICAL DETERMINATION OF
DOPAMINE**



**A THESIS SUMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATED STUDIES
KING MONGKUT'S INSITITUTE OF TECHNOKOGY LADKRABANG
2005
ISEN 974-15-1914-1**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATED STUDIES

KING MONGKUT'S INSITITUTE OF TECHNOKOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ขั้วกลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับตรวจวัดโคพามีนทางเคมีไฟฟ้า
นักศึกษา	นายโสภณัฐ เชื้อคำช้าง
รหัสประจำตัว	43065504
ภาควิชา	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี (เคมีวิเคราะห์)
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อนำมาตรวจวัดโคพามีนด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีใช้อัตราการสแกน (Scan Rate) 50 mV/s สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ปริมาตรซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 10 μ L พบว่าได้ค่ากระแสมากกว่าขั้วไฟฟ้าทอง ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมและขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของโคพามีนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากการสแกนพบว่าเป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาแบบการแพร่ (Diffusion-controlled, $R^2=0.9441$) ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง ค่าการทำซ้ำและอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์โพลาริกราฟี ช่วงความเป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ในช่วง 2.5 ถึง 25 ppm ($R^2=0.9766$) ซีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.021 ppm ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลี่ยช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 100 ppm ($R^2=0.9972$) เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ตรวจวัดตัวอย่างยาโคพามีนได้ค่า %Recovery เท่ากับ 119.9% ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลี่ยมีค่า %Recovery เท่ากับ 95.5% อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถวัดได้ 34 ครั้ง ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 0.021 ppm (S/N=3) สัญญาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.033 μ A ค่าการทำซ้ำ (%RSD) เท่ากับ 8.42 ส่วนขั้วไฟฟ้าเปลี่ยค่าการทำซ้ำ (%RSD) เท่ากับ 4.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Single-Wall Carbon Nanotube Modified Glassy Carbon Electrode for Electroanalytical Determination of Dopamine
Student	Mr. Sopsis Chuekachang
Student ID.	43065504
Degree	Master of Science
Programme	Chemistry (Analytical Chemistry)
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suwan Chaiyasit

ABSTRACT

In this research, interest in cyclic voltammetry techniques based on modified single-wall carbon nanotube electrode for measurement of dopamine. The optimum experimental condition was found to be 0.1 M phosphate buffer pH 7.5, volume of suspension single-wall carbon nanotube was 10 μ L. Single-wall carbon nanotube modified glassy carbon electrode (SWCNTs-GC) shows signal of cyclic voltamogram oxidation peak of dopamine higher than single-wall carbon nanotube modified gold, platinum and graphite electrode and bare-glassy carbon electrode (Bare-GC). The electrochemical behavior of dopamine at the single-wall carbon nanotube modified glassy carbon electrode was a diffusion-controlled process. The peak current of differential pulse voltammetry (DPV) increased lineary with the concentrations of dopamine in the range from 2.5-25 ppm ($R^2=0.9766$), detection limit was 0.021 ppm (S/N=3), minimum current to detection dopamine was 0.033 μ A and reproducibility (n=20) was 8.42. Bere-glassy carbon electrode DPV increased lineary with the concentrations of dopamine in the range from 2.5-100 ppm ($R^2=0.9972$) and reproducibility (n=20) was 4.85. The percentage recovery for dopamine in drug sample by SWCNTs-GC was 119.9% and Bare-GC was 95.5%

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า	5
2.1.1 เทคนิคโวลแทมเมทรี	9
2.1.2 เทคนิค Linear Sweep Voltammetry	9
2.1.3 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี	10
2.1.4. พัลส์โวลแทมเมทรี	11
2.1.4.1 พัลส์ปกติ	12
2.1.4.2 คิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์	12
2.2 คาร์บอนนาโนทิวบ์	14
2.2.1 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	18
2.3 โดพามีน	20
2.4 โรคพากินสัน	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	29
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	26
3.1.1 สารเคมีที่ใช้	29
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย	29
3.2 วิธีการวิจัย.....	30
3.2.1 เตรียมสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.2.2 การล้างขั้วไฟฟ้าก่อนการใช้งาน	30
3.2.3 การเตรียมขิงเกลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อใช้ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า	31
3.2.4 ศึกษาหาขั้วไฟฟ้าทำงานที่เหมาะสมในการตรวจวัดโคพามีน	31
3.2.5 ศึกษาปริมาณขิงเกลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า ..	31
3.2.6 การศึกษาสภาวะความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาของโคพามีน	32
3.2.7 การศึกษาผลของอัตราการสแกน (scan rate) ต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโคพามีน	32
3.2.8 ศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า	32
3.2.9 ศึกษาขีดจำกัดในการตรวจวัด (Detection Limit)	32
3.2.10 ศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า (Lifetime)	33
3.2.11 ศึกษาค่าการทำซ้ำ (Reproducibility)	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	34
4.1.1 การปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยขิงเกลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์	34
4.1.2 ศึกษาค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ที่เหมาะสมในการตรวจวัดโคพามีน	38
4.1.3 ศึกษาปริมาณขิงเกลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้หยดลงบนขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน ...	39
4.1.4 ศึกษาอัตราการสแกน (scan rate) ที่เหมาะสม	41
4.1.5 ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า	42
4.1.6 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า	46
4.1.7 ค่าการทำซ้ำ	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.8 ตรงจวด โดพามินในตัวอย่างยา	47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผลการวิจัย	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก ประสิทธิภาพของข้วไฟฟ้า	55
ประวัติผู้เขียน	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า	4
2.2 สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก	18
2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางเคมีที่สำคัญของ SWCNTs	20
ก.1. แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระแส background	56
ก.2. แสดงค่าการทำให้ช้าของขั้วไฟฟ้า SWNTs-GC	58
ก.3. แสดงค่าการทำให้ช้าของขั้วไฟฟ้า Bare-GC	59
ก.4. แสดงจำนวนครั้งที่วัดกระแสออกซิเดชันของโคพามีน	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าทำงานและ ขั้วไฟฟ้าช่วย	5
2.2 แสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้าทำงานสามประเภทในอิเล็กโทรไลต์หลายชนิด	7
2.3 แสดงการให้ศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบของ linear sweep voltammetry เทียบกับเวลา	10
2.4 แสดงภาพรวมของการทดลองโดยใช้เทคนิคโวลแทมเมทรี	11
2.5 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWNT) ที่เกิดจากการม้วนแผ่น กราฟไฟต์ที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb)	14
2.6 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube)	15
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการบิดตัวของ carbon nanotube กับค่าแรงดัน band-gap	16
2.8 การม้วนแผ่นกราฟไฟต์ในทิศทางที่แตกต่างกันเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ 3 ลักษณะคือ Armchair, Zigzag และ Chiral	16
2.9 แสดงโครงสร้างของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์	17
2.10 แสดงโครงสร้างของโคพามีน	20
2.11 แสดงการเกิดปฏิกิริยาโคพามีน	21
2.12 แสดงการสังเคราะห์โคพามีนในเส้นประสาท	23
4.1 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ 100 ppm โคพามีนวัดด้วยขั้วไฟฟ้ากราฟไฟต์(SWCNTs- Graphite), ขั้วแพลทินัม (SWCNTs-Pt), ขั้วทอง (SWCNTs-Gold) และ ขั้วกลาสติคาร์บอน (SWCNTs-GC) ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ อัตราสแกน 50 mV/s เทียบกับ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	34
4.2 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของโคพามีนเข้มข้น 100 ppm วัดด้วยขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าเปลือย (bare-GC) ที่อัตราสแกน 50 mVs เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ...	35
4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์บนผิวของคาร์บอนเทป กำลังขยาย 50,000 x	36
4.4 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ 0.001 โมลาร์ $K_3(Fe(CN)_6)$ วัดด้วยขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน ที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าเปลือย (bare-GC) ที่อัตรา สแกน 50 mVs เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลาย 0.1 M KCl	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ 100 ppm โคพามีนวัดด้วยขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ อัตราสแกน 50 mV/s เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลาย 0.1 M อะซิเตทบัฟเฟอร์, โปแทสเซียมคลอไรด์, ฟอสเฟตบัฟเฟอร์	38
4.6 แสดงการพลอตค่า pH กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 5.5-8.5 ของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s	39
4.7 กราฟแสดงปริมาตรซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์กับค่ากระแสไฟฟ้า	40
4.8 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โพลาริกราฟีของปริมาตรซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาตรต่างๆทดสอบกับโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	40
4.9 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการศึกษาอัตราสแกนของโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	41
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ได้จากขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์กับรากที่สองของอัตราการสแกน ในโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	42
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับกระแสของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดสอบกับโคพามีนเข้มข้น 1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 200, และ 400 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	43
4.12 แสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของโคพามีนโดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	4.3
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับกระแสของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน(Bare-GC) กับโคพามีนเข้มข้น 1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 200, และ 400 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	44
4.14 แสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของโคพามีนโดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	45
4.15 แสดงอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดสอบกับโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงกราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ยาโคพามีนด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โพลารोगราฟี่ตรวจวัดโดยขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนเปลือย (Bare-GC) ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	47
4.17 แสดงกราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ยาโคพามีนด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โพลารोगราฟี่ตรวจวัดโดยขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิง เกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวป์ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5	48
ก.1. แสดงภาพถ่าย SEM ของซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวป์บนผิวของคาร์บอนเทป กำลังขยาย 1,000 x	61
ก.2. แสดงภาพถ่าย SEM ของซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวป์บนผิวของคาร์บอนเทป กำลังขยาย 10,000 x	61
ก.1. แสดงภาพถ่าย SEM ของซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวป์บนผิวของคาร์บอนเทป กำลังขยาย 10,000 x	62

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำปรึกษา แนะนำ และแนวทางในการแก้ปัญหาที่ดีจาก รศ. ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, รศ. และ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าซึ่งในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมกับให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะตลอดจนช่วยตรวจรายละเอียดต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. พชณี เจริญยิ่ง ที่กรุณาให้คำปรึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาของโคพามีน

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือ และสถานที่สำหรับการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน และรุ่นน้องนักศึกษาปริญญาโท สาขาเคมีวิเคราะห์ และสาขาเคมีอินทรีย์ ทุกคนที่ให้กำลังใจตลอดจนความช่วยเหลือต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวเป็นอย่างสูง สำหรับความรัก กำลังใจ และให้การสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

โสภิชร์ เชื้อคำช้าง

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

SWCNTs	ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
SWCNT	ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
MWCNTs	มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
CNTs	คาร์บอนนาโนทิวบ์
SWCNTs-GC	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
μm	ไมโครเมตร
nm	นาโนเมตร
Ω	โอห์ม
A	แอมแปร์
Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
CV	ไซคลิกโวลแทมเมตรี
CV	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน
E	ศักย์ไฟฟ้า (V)
V	โวลต์
GC	ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน
Pt	ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม
g	กรัม
L	ลิแกนต์
M	โมลาร์
mg	มิลลิกรัม
mM	มิลลิโมลาร์
mL	มิลลิลิตร
mol	โมล
mV/s	มิลลิโวลต์ต่อวินาที
n	จำนวนของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา
Ox	สารออกซิไดซ์
R	ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
Red	สารรีดิวซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RSD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
R.E.	จั่วไฟฟ้าอ้างอิง
s	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SCE	จั่วไฟฟ้าอ้างอิงคาโธดอัมตั่ว
v	อัตราการสแกน (V/s)
V	โวลต์
μA	ไมโครแอมแปร์
μM	ไมโครโมลาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย [1,2,3,4]

คาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยแผ่นกราฟิตที่นำมาม้วนเป็นรูปทรงกระบอก ความยาวของคาร์บอนนาโนทิวบ์มากกว่า μm อัตราส่วนความยาวของท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 เท่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ค้นพบมีสองโครงสร้างคือซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNTs) และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNTs) ลักษณะ โครงสร้างของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยแผ่นกราฟิตที่นำมาม้วนเป็นรูปทรงกระบอกหลายๆ ชั้นซ้อนกัน ส่วนโครงสร้างของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยแผ่นกราฟิตที่นำมาม้วนเป็นรูปทรงกระบอกชั้นเดียวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 nm

ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่ำถึง $100\text{-}200 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ เปรียบเทียบได้กับเส้นใยคาร์บอนคุณภาพสูงซึ่งมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้าต่ำประมาณ $100 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ นอกจากนี้ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^9 G A/cm^2 ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง คาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติเหมือนโลหะหรือสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับโครงสร้าง เส้นผ่านศูนย์กลางและมุมบิด มีค่าการนำความร้อน มีความแข็งแรงสูง เหนียว และมีความยืดหยุ่นที่ดี ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีสามารถจับยึด โมเลกุลและดูดซับแก๊สได้เป็นอย่างดี

โรคพาร์กินสัน คือ โรคที่เกิดจากความผิดปกติของระบบประสาท เนื่องจากการขาดสารโดพามีน (Dopamine) ในสมอง พบได้บ่อยในผู้สูงอายุทั้งเพศชายและหญิง คนดังระดับโลกก็เป็นโรคนี้อีกหลายคน เช่น ประธานาธิบดีเรแกน มูอัมมาร์อัสซัด และคารา โรคนี้อธิพม์ครั้งแรกโดยแพทย์ชาวอังกฤษชื่อ Jame Parkinson ในปี ค.ศ.1817 ซึ่งได้อธิบายกลุ่มอาการที่มีการสั่นของมือ และการเคลื่อนไหวช้าลง ต่อมาปี ค.ศ.1960 ได้มีการค้นพบว่าเซลล์ของสมองไม่สามารถสร้างสารโดพามีนได้อย่างเพียงพอ สารนี้จะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมไปยังสมองส่วนที่เรียกว่า corpus striatum ทำให้การทำงานของกล้ามเนื้อมีกำลังและประสานกันได้อย่างดี หากเซลล์สมองส่วนนี้ไม่สามารถสร้างสารดังกล่าวได้อย่างเพียงพอการทำงานของกล้ามเนื้อจะไม่ประสานงานกัน มือจะกระตุก อาการสั่นขณะอยู่เฉยๆ เกิดขึ้นที่มือหรือเท้า ซีกใดซีกหนึ่ง หรือทั้ง 2 ซีก เคลื่อนไหวช้าลง เช่น เดินช้าลง แขนไม่แกว่ง พูดเสียงเบา

วิธีตรวจวัดปริมาณโดพามีนปัจจุบันใช้เทคนิคทางโครมาโทกราฟี [5] สเปกโทรโฟโตเมตรี [6] สเปกโทรฟลูออโรเมตรี [7] แต่มีข้อเสียคือ มีความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง ระยะเวลาการวิเคราะห์นาน เครื่องมือมีราคาแพง ยังมีอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้วัดปริมาณโดพามีนคือ เทคนิคทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมีไฟฟ้าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เทคนิคนี้มีข้อดีกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้นคือ มีสภาพไว (sensitivity) และมีความสามารถเชิงคัดเลือก (selectivity) ดีกว่าเครื่องมือมีราคาถูกกว่า เทคนิคทางเคมีไฟฟ้ามีด้วยกันหลายเทคนิค เทคนิคที่ได้รับความสนใจคือ เทคนิคโวลแทมเมทรี เป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะสูงมาก ส่วนประกอบหลักของขั้วไฟฟ้าประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้าใช้งานขนาดเล็ก การตรวจวัดโคพามีนในทางการแพทย์ ทำได้สะดวกรวดเร็วโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าใช้งานที่นิยมใช้ตรวจวัดโคพามีนโดยทั่วไปใช้ ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน และขั้วกราไฟต์ จะมีสภาพไว และความเสถียรภาพ (stability) ในการตรวจวัดโคพามีนไม่ดีเท่าที่ควร จากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าเคมี [8] เพื่อใช้ตรวจวัดโคพามีนทางเคมีไฟฟ้า โคพามีนเป็นสารเคมีที่สำคัญในสมองเป็นสารที่เกิดออกซิเดชันได้ง่ายดังนั้นวิธีการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าจะเป็นแบบแอนอดิกออกซิเดชัน ความเข้มข้นของโคพามีนในเส้นประสาทส่วนกลางมีความเข้มข้นน้อยกว่า 100 nM [9] ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ช่วยให้เกิด catalysis ทางเคมีไฟฟ้าที่จำเพาะเจาะจงกับโคพามีน ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการวัดโคพามีนในงานวิจัยนี้ใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน, ขั้วไฟฟ้าทอง, ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมและขั้วไฟฟ้ากราไฟต์ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNTs) เพื่อตรวจวัดโคพามีน เพื่อหาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมและปริมาตรซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทำงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดโคพามีนด้วยเทคนิค ไซคลิก โวลแทมเมทรี และดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลทาโรกราฟี
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดโคพามีนด้วยเทคนิค โวลแทมเมทรี โดยปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ใช้เทคนิค โวลแทมเมทรีเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดโคพามีน โดยทุกครั้งที่เปลี่ยนอัตราการสแกน ความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด-เบส ต้องปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทำงานใหม่และทำการศึกษาดังนี้

1.1 ศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมในการตรวจวัดโคพามีนในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ โดยใช้เทคนิค ไซคลิก โวลแทมเมทรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ศึกษาหาขั้วไฟฟ้าทำงานที่เหมาะสมโดยขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน, ขั้วไฟฟ้าทอง, ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมและขั้วไฟฟ้ากราไฟต์

1.3 ศึกษาอัตราการสแกน (scan rate) ที่เหมาะสมใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยให้อัตราการสแกนต่างๆ กัน

1.4 ศึกษาปริมาณของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทำงาน

2. ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์

2.1 ศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าโดยนำขั้วที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มาทดสอบกับโคพามีนที่ความเข้มข้นคงที่ หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำมาทดลองใหม่จนกว่าค่าสัญญาณที่ได้จะลดลงครึ่งหนึ่ง

2.2 ศึกษาขีดจำกัดในการตรวจวัด โดยนำขั้วที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มาทดสอบกับสารละลายปราศจากโคพามีน แล้วนำค่ากระแสที่ได้ไปคำนวณหาขีดจำกัดในการตรวจวัด

2.3 ศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมตรีเพื่อตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน โคพามีนที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วนำค่ากระแสที่ได้เขียนกราฟหาช่วงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง เมื่อทราบช่วงความเข้มข้นนำไปประยุกต์ใช้วัดตัวอย่างโคพามีน โดยวิธีเดิมสารละลายมาตรฐาน

2.4 ศึกษาการทำซ้ำใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมตรีในการตรวจวัดโคพามีนที่ความเข้มข้น 100 ppm บันทึกกระแสแล้วทำซ้ำอีก 20 ครั้ง นำค่ากระแสที่ได้ไปคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)

1.4 ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงของการนำขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ใช้ในการตรวจวัดโคพามีน และเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการวิเคราะห์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

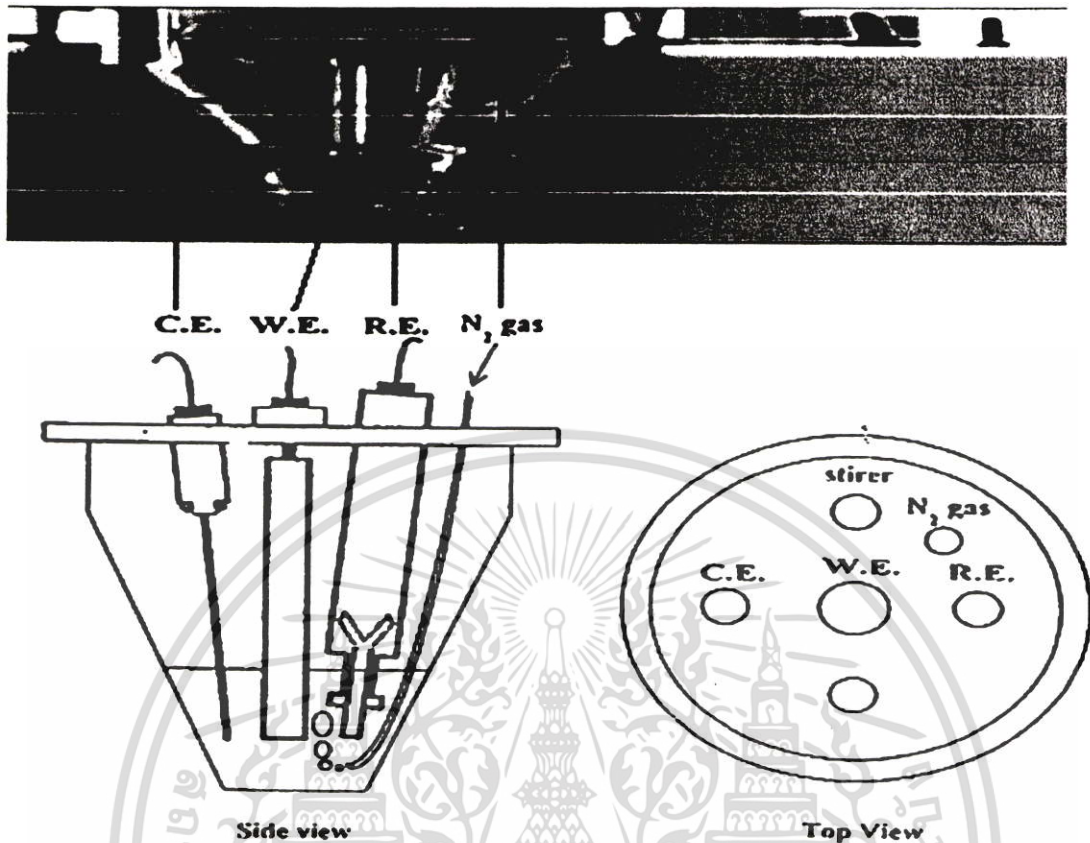
2.1 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า [10]

เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้ามีหลายวิธี เช่น โพลเทนซีอเมทรี (potentiometry) โวลแทมเมทรี (voltammetry) แอมเพอโรเมทรี (amperometry) และคูลอมบ์เมทรี (coulometry) เป็นต้น ซึ่งแต่ละสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้วงจร และค่าไฟฟ้าที่วัดจะแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

เทคนิค	สัญญาณไฟฟ้าที่ให้	ค่าทางไฟฟ้าที่วัด
โพลเทนซีอเมทรี	กระแส = 0	ศักย์
แอมเพอโรเมทรี	ศักย์คงที่	กระแส
โวลแทมเมทรี	ศักย์	กระแส
คูลอมบ์เมทรี	กระแสหรือศักย์	ปริมาณไฟฟ้า

ในทางเคมีไฟฟ้า เซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง(Reference electrode) และขั้วไฟฟ้าทำงาน ส่วนที่สองคืออุปกรณ์ทางเคมีไฟฟ้าทำหน้าที่ตรวจวัดหรือให้สัญญาณทางไฟฟ้า และส่วนที่สามคือสารละลายที่มีเกลืออิเล็กโทรไลต์ละลายอยู่เพื่อช่วยนำไฟฟ้าในสารละลาย



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าช่วย

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

คุณสมบัติที่ถือเป็นลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ มีศักย์ที่แน่นอน ไม่แปรหรือขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจร ไม่ขึ้นกับส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ดีต้องมีส่วนประกอบคงตัว ไม่เปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อเก็บไว้ และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรก คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงปฐมภูมิ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน เป็นขั้วไฟฟ้าที่สร้างได้ง่าย ผลที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าผันกลับไปมาได้เพื่อให้ขั้วไฟฟ้าคงสภาพมาตรฐานไว้ได้ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประเภทที่สอง คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทุติยภูมิ ถูกพัฒนาเนื่องจากความไม่สะดวกของการมีแก๊สเป็นส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน โดยพัฒนาเป็นโลหะเป็นส่วนประกอบ (ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประเภทนี้จะรู้ค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าได้ ต้องเทียบมาตรฐานกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน จึงเรียกขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนเป็นขั้วไฟฟ้าปฐมภูมิ) ที่ใช้ค่อนข้างแพร่หลาย คือ ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าเมอร์คิวรี-เมอร์คิวรีซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode)

ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ส่งต่อผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งานเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่โดยขั้วไฟฟ้าช่วยนี้ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องหรือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ขณะเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างระหว่างทำการวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าช่วยมักมีพื้นที่ผิวมากๆ เพื่อให้การนำไฟฟ้าเป็นไปด้วยดี ลดการเกิดศักย์จากโอห์มของวงจร ขดลวดแพลทินัม หรือแผ่นแพลทินัม หรืออ่างปรอท มักใช้เป็นขั้วไฟฟ้าช่วยได้

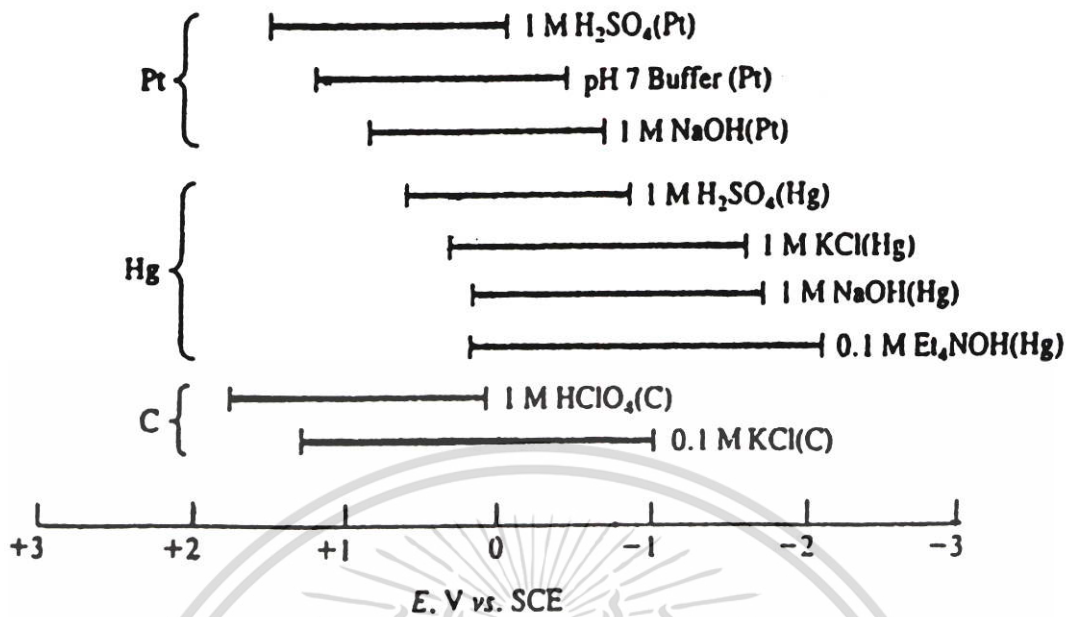
ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)

การวิเคราะห์โวลแทมเมทรินั้นขั้วไฟฟ้าที่ใช้จะแตกต่างจากการวิเคราะห์อื่นๆ คือ ต้องใช้ขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อให้พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าในการสัมผัสกับสารตัวอย่างน้อย เกิดสถานะของโพลาริเซชันตลอดการวิเคราะห์

การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าทำงาน

ขั้วไฟฟ้าใช้งานในกลุ่มการวิเคราะห์โวลแทมเมตรี ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าจุลภาคมักนิยมใช้ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม (Pt) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอน (C) และขั้วไฟฟ้าปรอท (Hg) ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างเมื่อต่อขั้วไฟฟ้าทำงานเหล่านี้เข้ากับวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า จะให้ช่วงของศักย์ที่สัมพันธ์กับกระแสได้ไม่เหมือนกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์สารตัวอย่างจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าจุลภาคให้เหมาะสม

ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาเชิงเคมีไฟฟ้าในวิธีทางโวลแทมเมตรีกำหนดโดยปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า และองค์ประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ ซึ่งจำกัดค่าบวก และค่าลบถูกกำหนดโดยศักย์ไฟฟ้าที่น้ำถูกออกซิไดส์เกิดเป็นก๊าซออกซิเจน และถูกรีดิวซ์เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน รูปที่ 2.2 ซึ่ง Skoog [10] ได้สรุปเป็นผังของช่วงศักย์ไฟฟ้าแต่ละชนิดในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆกัน ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ ขั้วไฟฟ้าคาร์บอน ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม และขั้วไฟฟ้าปรอทหุดในสารละลายชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.2 แสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้าทำงานสามประเภทในอิเล็กโทรไลต์หลายชนิด

ขั้วไฟฟ้าทำงานใน โวลแทมเมตริกจะเป็นขั้วไฟฟ้าเฉื่อย การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดใดจึงขึ้นอยู่กับช่วงศักย์ไฟฟ้าที่กำลังศึกษา องค์ประกอบของสารละลาย และช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ทำการทดลอง สำหรับศักย์ไฟฟ้าค่าบวกมากกว่า SCE ตัวเลือกที่ดีที่สุด คือ ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม

โดยทั่วไปเซลล์เคมีไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) คือปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือรีดักชัน ดังสมการที่ (2.1) เป็นสมการแสดงปฏิกิริยารีดักชัน



โดย O เป็นสารออกซิไดซ์ และ R เป็นสารรีดิวซ์

2. ปฏิกิริยา heterogeneous คือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าอิเล็กโทรดกับสารละลายด้วยกระบวนการถ่ายเทมวล และอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.4)



กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าว หรือกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีการส่งผ่านสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการของการถ่ายเทมวล ซึ่งมีด้วยกัน 3 ลักษณะ คือไมเกรชัน (migration) การแพร่ (diffusion) และการพา (convection) รวมถึงกลศาสตร์ของปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน

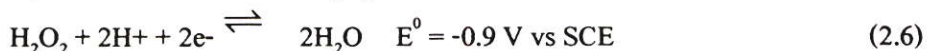
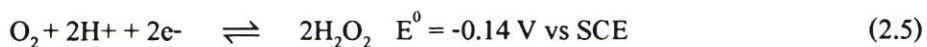
การถ่ายเทมวลในสารละลาย (mass transfer)

มวลในสารละลายซึ่งอาจเป็นไอออนหรือโมเลกุลถูกพาไปยังผิวหน้าของอิเล็กโทรดได้ด้วย 3 กลไกด้วยกัน คือ ไมเกรชัน การแพร่ และการพา กระบวนการถ่ายเทมวลทั้ง 3 กลไกนี้เกิดขึ้นกับขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ตัวอย่างต่างๆ ที่ใช้อธิบายต่อไปนี้จะแสดงเฉพาะขั้วแคโทดเท่านั้น

ไมเกรชัน (migration) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกเคลื่อนเข้าหาขั้วลบ และไอออนลบเคลื่อนไปทางขั้วบวก ความเร็วของการที่ไอออนเคลื่อนเข้าหา หรือเคลื่อนออกจากผิวหน้าของอิเล็กโทรด อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ศักย์ที่ผิวหน้าของอิเล็กโทรดนั้น ซึ่งมีผลทำให้การไหลของกระแสในวงจรอันเนื่องมาจากไอออนที่ต้องการลดลงไปด้วย ในเชิงวิเคราะห์สามารถอาศัยธรรมชาติของการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชันนี้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของไอออน สารวิเคราะห์ให้เป็นไปตามกลไกที่ต้องการเท่านั้น

การแพร่ (diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น อัตราความเร็วของการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่ต่างกัน

การกำจัดออกซิเจน โดยปกติแล้วออกซิเจนมีอยู่ทั่วไปในบรรยากาศในรูปแก๊ส และละลายอยู่ในสารละลาย สำหรับการวิเคราะห์ทางโวลแทมเมตรี ตัวทำละลายทุกชนิดสามารถละลายออกซิเจนได้ เช่น น้ำสามารถละลายออกซิเจนได้ดี (ประมาณ $10^{-3} \text{ mol dm}^{-3}$) ออกซิเจนในสารละลายกลายเป็นสารรบกวนต่อการวิเคราะห์ซึ่งจะเกิดกระแสเนื่องจากการแพร่ 2 คลื่น คือที่คลื่นแรกออกซิเจนในสารละลายเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โมเลกุลของน้ำไปเป็น H_2O_2 มีศักย์ไฟฟ้าครึ่งคลื่น -0.14 V (เทียบกับ SCE) และคลื่นที่ไฮโดรเจนเป้ออกไซด์ถูกรีดิวซ์ได้น้ำเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.9 V



ผลลัพธ์การเกิดรีดักชันของแก๊สออกซิเจนทั้งสองปฏิกิริยา เกิดขึ้นในช่วง 0 ถึง -1 V (หรือมากกว่านั้น) ทำให้เกิดกระแสแคโทดิกได้ไม่น้อยกว่า $5 \mu\text{A}$ ทั้งออกซิเจน และ H_2O_2 ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

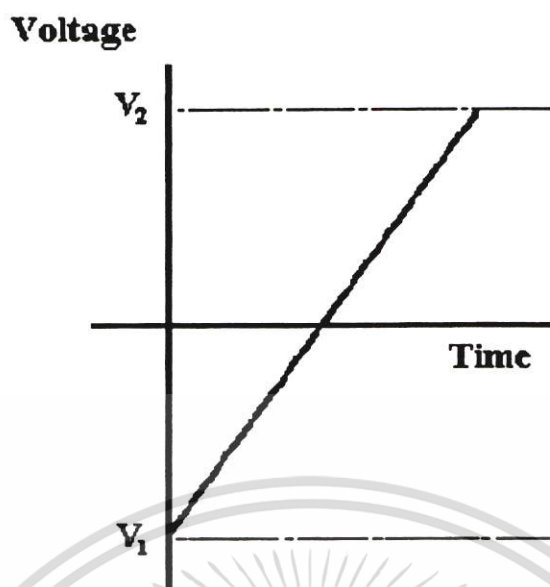
เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ในสารตัวอย่าง ดังนั้นจะเกิดการรบกวนในการหาปริมาณสารอื่น ๆ ที่ถูกรีดิวส์ได้ในช่วงศักย์นี้ ดังนั้นในการวิเคราะห์โวลแทมเมตรีจำเป็นต้องไล่ออกซิเจนออกจากสารละลายตัวอย่าง โดยการผ่านแก๊สเฉื่อยที่บริสุทธิ์ เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สอาร์กอน ลงไปในสารละลายตัวอย่างประมาณ 10-15 นาที ก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์ และผ่านแก๊สปกคลุมบรรยากาศของสารตัวอย่างตลอดการวิเคราะห์ เพื่อแน่ใจว่าไม่มีการละลายของออกซิเจนลงไปในสารละลายตัวอย่างอีก

2.1.1 เทคนิคโวลแทมเมตรี

การวัดโดยใช้เทคนิคโวลแทมเมตรี สามารถวัดได้ในระดับไมโคร โดยใช้ขั้วใช้งานขนาดเล็กเช่น เส้นลวดแพลทินัม เทคนิคนี้จะวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งานขนาดเล็กจะเปลี่ยนแปลงไป ผลของกระแสจะรายงานออกมาเป็นฟังก์ชันกับศักย์ที่ให้เข้าไปค่าที่รายงานออกมาเรียกโวลแทม โมแกรม ถ้ามีสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันเองได้ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปกระแสจะบันทึกออกมาเป็นบวกลบ โดยแคโทดิก(รีดักชัน)กระแสเป็นบวกและกระแสแอโนดิก(ออกซิเดชัน) กระแสเป็นลบถ้าสารละลายเจือจางกระแสจะมีค่าจำกัดเพราะสารที่วิเคราะห์จะเกิดการแพร่ไปยังขั้วไฟฟ้าและมีอัตราเร็วจำกัดขึ้นกับความเข้มข้น ดังนั้นกระแสจำกัดจะเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับความเข้มข้นของแต่ละ Species กระแสจำกัดของขั้วขนาดเล็กมีขนาด 2-3 ไมโครแอมแปร์หรือน้อยกว่า และในการประยุกต์ใช้วัดสารในสารละลายส่วนมากความเข้มข้นของสารและองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากบันทึกโวลแทม โมแกรมแล้ว

2.1.2 เทคนิค Linear Sweep Voltammetry (LSV) [11]

ในลิเนียร์สวีปโวลแทมเมตรี (LSV) เป็นเทคนิคที่กำหนดช่วงศักย์ไฟฟ้าให้แก่ขั้วสไฟฟ้าทำงาน ในลิเนียร์สวีปโวลแทมเมตรี (LSV) จะสแกนจากขีดจำกัดต่ำสุดไปถึงขีดจำกัดสูงสุด ดังรูปที่ 2.3 จะสแกนจาก V_1 ถึง V_2 เทียบกับเวลา อัตราการสแกนของศักย์ไฟฟ้าจะคำนวณได้จากความชันของกราฟ



รูปที่ 2.3 แสดงการให้ศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบของ linear sweep voltammetry เทียบกับเวลา

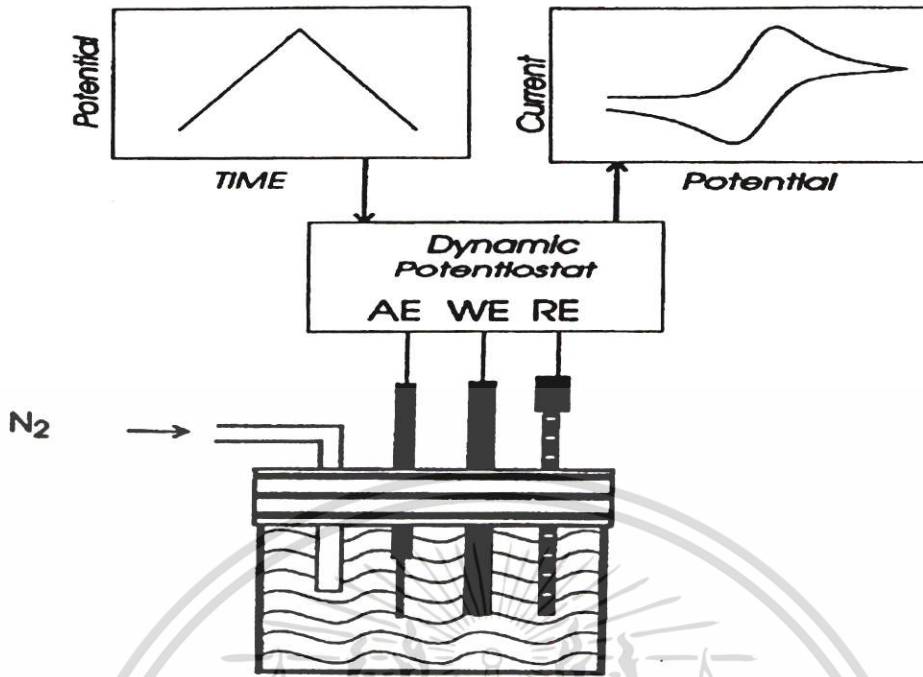
ลักษณะของลิเนียร์สวปโวลแทมโมแกรมที่บันทึกได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัยต่อไปนี้

1. อัตราเร็วของการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาของสาร
2. ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของ Electroactive species
3. ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (Scan Rate)

การตรวจวัดด้วยเทคนิค LSV นิยมพลอตค่ากระแสที่ได้เทียบกับศักย์ไฟฟ้ามากกว่าพลอตเทียบกับเวลา

2.1.3 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี [12]

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีสามารถใช้ได้ทั้งการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ จากโวลแทมโมแกรม เมื่อกำหนดช่วงศักย์ไฟฟ้าและอัตราการสแกน (scan rate) โวลแทมโมแกรมที่ได้จะทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในช่วงศักย์ที่กำหนด พิกที่ เกิดขึ้นสามารถบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน บอกถึงศักย์ที่ต้องการจะวัดอีกด้วย



รูปที่ 2.4 แสดงภาพรวมของการทดลองโดยใช้เทคนิค โวลแทมเมตรี

เมื่อพิจารณาถึง โวลแทมโมแกรมจำเป็นต้องทราบปฏิกิริยารีดอกซ์ดังสมการ (2.1) ลักษณะการป้อนศักย์ให้แก่เซลล์อิเล็กโทรดจะเป็นสามเหลี่ยม โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางที่เป็นลบต่อขั้วไฟฟ้าสารที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์ตอนเริ่มแรกที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้ายังไม่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าใกล้จะถึง E^0 จะเริ่มเกิดกระแสแคโทดิกขึ้น ($O + e^- \rightarrow R$) จนกระทั่งมีการให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางย้อนกลับจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ($R \rightarrow e^- + O$) ให้กระแสแอนอดิก ภาพรวมของเทคนิคไซคลิก โวลแทมเมตรีแสดงดังรูปที่ 2.4

2.1.4 พัลส์โวลแทมเมตรี (Pulse voltammetry) [10]

พัลส์โวลแทมเมตรีเป็นกลุ่มเทคนิควิเคราะห์โวลแทมเมตรี ที่ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1960 โดยการปรับปรุงด้านสัญญาณกระตุ้น จากเดิมเป็นลิเนียร์-สแกนในเทคนิคโพลาโรกราฟี ซึ่งประสบปัญหาด้านการใช้เวลาต่อการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน การจัดตั้งเครื่องมือไม่มีความคล่องตัวโดยเฉพาะส่วนของขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก (ขั้วไฟฟ้าหยดปรอท) และที่สำคัญ คือ มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ต่ำ เมื่อเทียบกับเทคนิควิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีที่เริ่มเป็นที่นิยมในช่วงเวลาขณะนั้น การพัฒนาสัญญาณกระตุ้นจากเดิมซึ่งเป็นการเพิ่มศักย์กับวงจรไปเรื่อยจนเสร็จสิ้นการวิเคราะห์ (ลิเนียร์-สแกน) เป็นการให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณกระตุ้นเป็นพัลส์ ร่วมกับการพัฒนาขั้วไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยใช้อุปกรณ์ และเทคนิคที่ทันสมัยมากขึ้นในการควบคุมหยดปรอท เป็นแนวทางเริ่มแรกของการพัฒนา เทคนิคของโพลารोगราฟีแบบคลาสสิก เป็นพัลส์โพลารोगราฟี ซึ่งต่อมาการใช้ขั้วไฟฟ้า อื่นๆ แทนขั้วไฟฟ้าหยดปรอทเกิดเป็นเทคนิควิธีต่างๆ ในพัลส์โวลแทมเมตรี

จากการพยายามเพิ่มขีดความสามารถของการวิเคราะห์โพลารोगราฟีคลาสสิก เป็นทาสท์โพลารोगราฟีดังได้กล่าวไปแล้ว โดยการวัดกระแสเมื่อประมาณ 5-20 ms ก่อนหยดปรอทจะ หยดจากปลายหลอดครูลึก ผนวกเข้ากับการให้ศักย์กับวงจรในแต่ละช่วงหยด (พัลส์) เป็นที่มา ของสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์ปกติ (normal pulse) ซึ่งเมื่อใช้สัญญาณกระตุ้นแบบนี้กับ เทคนิคโพลารोगราฟี เกิดเป็นโพลารोगราฟี พัลส์ปกติ (normal pulse polarography) ถึงแม้ ขีดความสามารถของการวิเคราะห์สามารถเพิ่มมากขึ้นในเทคนิคโพลารोगราฟี พัลส์ปกติ การปรับปรุงจากพัลส์ปกติ เป็นดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ และสแควร์-เวฟ ใช้ทั้งในเทคนิคโพลารोगราฟี และโวลแทมเมตรี ยิ่งเพิ่มขีดความสามารถของการวิเคราะห์ และขอบเขตการ ประยุกต์ใช้มากยิ่งขึ้น

สัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์

การให้ศักย์กับวงจรหรือขั้วไฟฟ้าหยดปรอทเป็นช่วงสั้นๆ เป็นพัลส์ (พัลส์)ทำได้ 3 ลักษณะ ดังต่อไปนี้

2.1.4.1 พัลส์ปกติ (normal pulse)

เป็นการให้ศักย์กับขั้วไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 40-60 ms ต่อทุกๆ หยดของ ปรอท (2 s/drop) โดยศักย์ที่ให้นี้มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงกับเวลา (ทั่วไปประมาณ 2 mV/s) และวัดค่ากระแสของแต่ละหยดปรอทที่ครึ่งหลังของทุกช่วงศักย์ที่ให้ (ประมาณ 20-30 ms ของพัลส์) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่หยดปรอทใกล้จะหยดออกจากปลายหลอดแก้ว ในขณะที่ กระแสเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มที่ผิวขั้วอิเล็กโทรดลดลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ กระแสของโพลารोगราฟแบบคลาสสิกจะถูกกำจัดออก และได้เคอร์ฟเหมือนกับวิธี normal current-sample polarography

2.1.4.2 ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ (differential pulse)

สัญญาณกระตุ้นในลักษณะของดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ เป็นการเพิ่มศักย์ที่คงที่ใน ลักษณะของพัลส์ให้กับขั้วไฟฟ้าที่รับศักย์ปกติในรูปลิเนียร์-สแกนอยู่แล้ว ฐานของแต่ละ พัลส์เป็นเส้นศักย์ปกติของวงจร ซึ่งค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงในอัตรา 5 mV/s ส่วน ของศักย์ที่สูงพื้นฐาน คือ พัลส์แต่ละพัลส์ ซึ่งเกิดจากการเพิ่มศักย์ขนาดคงที่ระหว่าง 20-100 mV แก่วงจรในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 60 ms ก่อนหยดปรอทหยดหลุดจากปลายหลอดครูลึก (1-2 s/drop) กระแสถูกวัดค่า 2 ครั้งต่อ 1 หยดปรอท ครั้งแรก (i_1) ที่ประมาณ 20 ms ก่อนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มศักย์แต่ละพัลส์ ครั้งหลัง (i_2) ที่ประมาณ 20 ms ก่อนสิ้นสุดแต่ละพัลส์นั้น ค่าผลต่างของกระแสที่วัดได้ ($\Delta I = i_2 - i_1$) ถูกบันทึกตามการเพิ่มศักย์ของวงจรแบบเส้นตรง ดิฟเฟอเรนเชียลเคอร์ฟที่วัดได้ จะปรากฏพิก ซึ่งความสูงแปรผันตามความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

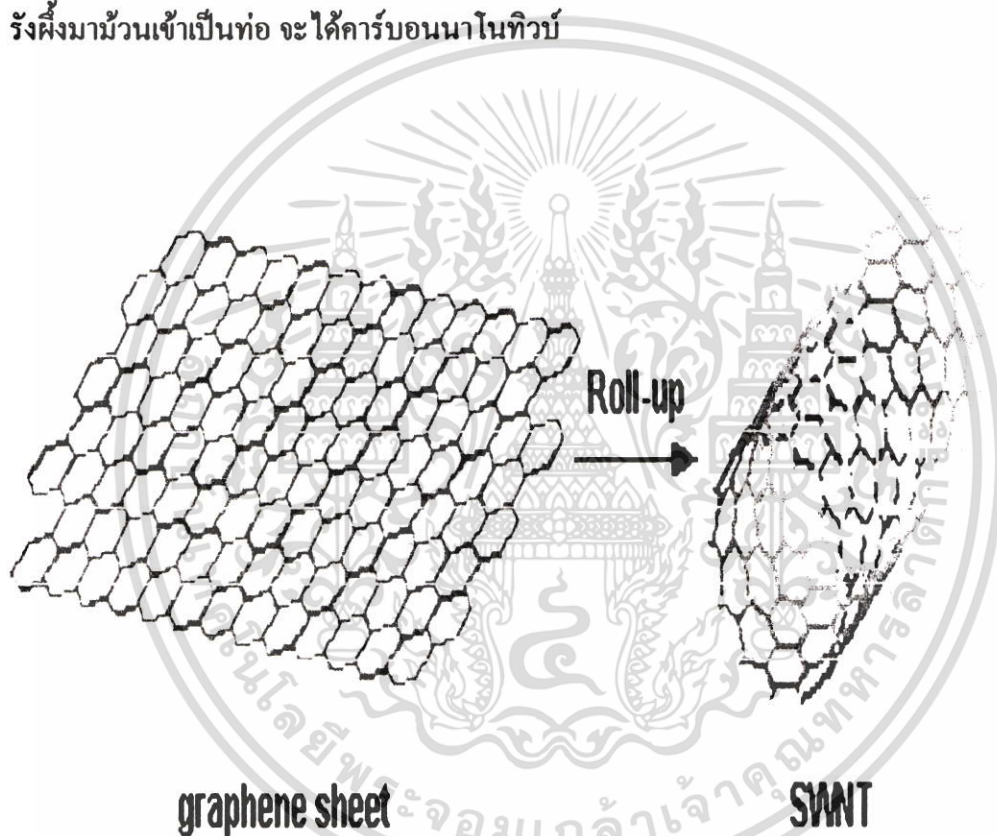
ข้อได้เปรียบประการหนึ่งของเทคนิคนี้ คือ จะสามารถสังเกตเห็น พิกสูงสุดของโพลารแกรมของสารตัวอย่างซึ่งมีศักย์ครึ่งคลื่นแตกต่างกันเล็กน้อยประมาณ 0.04 V ได้ ซึ่งต่างจากวิธีโพลารกราฟีคลาสสิก และพัลส์ปกติ ซึ่งต้องใช้ความแตกต่างของศักย์ครึ่งคลื่นอย่างน้อย 0.2 V สำหรับการแยกของคลื่น 2 คลื่น ข้อได้เปรียบอีกข้อ คือ มีสภาพไวที่เพิ่มขึ้น

สัญญาณกระตุ้นในลักษณะของพัลส์ไม่ว่าเป็นพัลส์ปกติ หรือดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ เทียบกับเทคนิคการวิเคราะห์โพลารกราฟีคลาสสิก ซึ่งวิเคราะห์สารตัวอย่างได้ความเข้มข้นต่ำสุดเพียง 10×10^{-6} M ขณะที่เทคนิควิเคราะห์โพลารกราฟี พัลส์ปกติ หรือดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ วิเคราะห์สารในความเข้มข้นต่ำสุดถึง 1×10^{-7} M การเพิ่มขึ้นของขีดความสามารถในการวิเคราะห์สาร เป็นเพราะเมื่อศักย์ถูกให้กับวงจรในช่วงสั้นๆ เป็นการเร่งการเกิดกระแสฟาราเดอิก กระแสจำกัดขณะเดียวกันเป็นการลดกระแสตกค้างซึ่งเป็นกระแสอนฟาราเดอิก ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ คือ การเพิ่มศักย์กับวงจรในช่วงเวลาสั้นๆ ระหว่างอายุแต่ละหยดปรอท เป็นเหมือนการกระตุ้นให้ชั้นของสารละลายที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ ซึ่งเป็นชั้นระหว่างผิวหน้าหยดปรอทกับสารตัวอย่างมีความหนาน้อยมากๆ ส่งผลให้การแพร่ของสารตัวอย่างสู่ผิวหน้าหยดปรอท เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็น ไปอย่างรวดเร็ว การเกิดของกระแสจำกัดเป็นผลของปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วเช่นกัน ประกอบกับการวัดค่าของกระแสก่อนปรอทหยดจากปลายหลอดครูล์ก ซึ่งเป็นช่วงที่หยดปรอทมีพื้นที่ผิวมากที่สุด กระแสขณะนั้นย่อมมีค่าสูงสุด ผนวกผลของการเกิดกระแสอย่างรวดเร็ว และวัดกระแสสูงสุดย่อมทำให้ผลลัพท์กระแสจากสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์มีค่าสูงกว่ากระแสจากสัญญาณกระตุ้นแบบลิเนียร์-สแกนหลายเท่าตัว

เมื่อให้ศักย์ในรูปของพัลส์กับวงจร หรือขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้กระแสตกค้างซึ่งเป็นกระแสอน-ฟาราเดอิก เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามกระแสนี้ลดลงอย่างเอ็กซ์โพเนนเชียลตามเวลาจนมีค่าเกือบเป็นศูนย์ เมื่อหยดปรอทใกล้หยดหลุดจากปลายหลอด ดังนั้นการวัดกระแสในช่วงเวลานี้ของแต่ละหยดปรอท ย่อมได้รับผลกระทบจากกระแสตกค้างน้อยที่สุด ผลลัพท์กระแสแทบเป็นผลจากสารตัวอย่างเท่านั้น นั่นคือ ผลลัพท์สุดท้ายของการใช้สัญญาณในลักษณะพัลส์ เพิ่มขีดความสามารถของการวิเคราะห์ได้มากขึ้นกว่าการทำโพลารกราฟีแบบคลาสสิกมาก

2.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ [13]

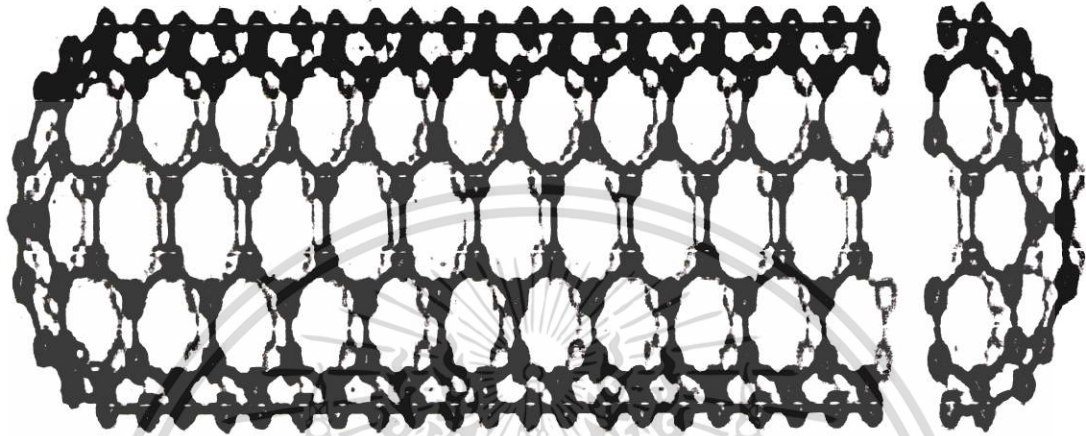
คาร์บอนนาโนทิวป์มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดนาโนเมตร (ประมาณตั้งแต่ 1-50 นาโนเมตร) และมีลักษณะเป็นท่อกลวงยาวจนถึง 10 ไมโครเมตร ทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์อัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถึงหลายพันเท่า คาร์บอนนาโนทิวป์มีธาตุคาร์บอนที่เป็นธาตุเดียวกันกับเพชรและแกรไฟต์ มีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอยู่ 4 ตัวจึงมีความแข็งแรงและคงทน ในขณะที่กราไฟต์ (Graphite) มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอยู่เพียง 3 ตัว และเรียงตัวเป็นแผ่นคล้ายกับรังผึ้ง (Honeycomb) และผงซีเมนต์หรือถ่านจากการเผาไหม้ จะมีโครงสร้างคล้ายกราไฟต์แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ถ้านำแผ่นกราไฟต์ที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้งม้วนเข้าเป็นท่อ จะได้คาร์บอนนาโนทิวป์



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ (SWNT) ที่เกิดจากการม้วนแผ่นกราไฟต์ที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycomb)

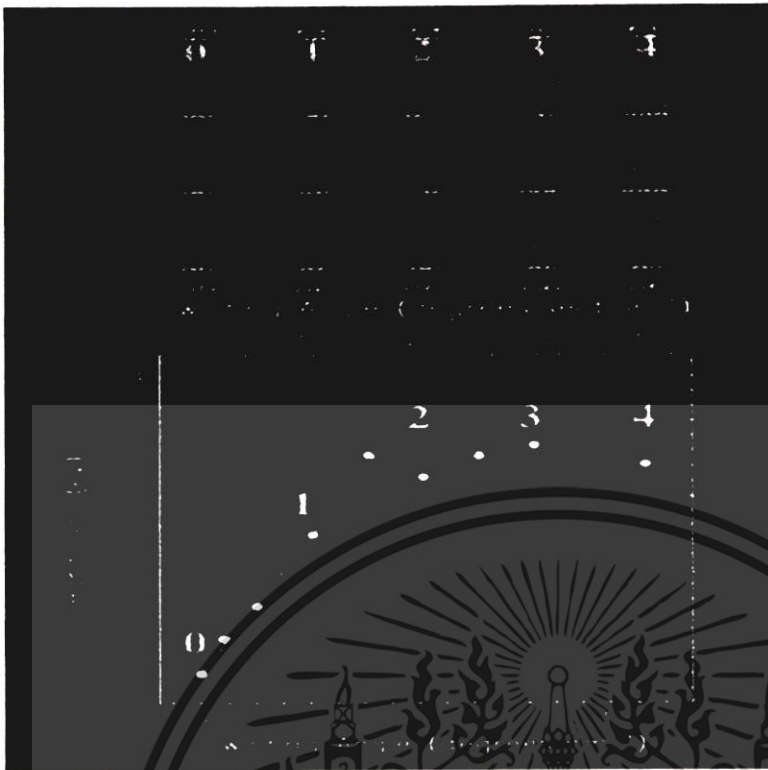
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเมื่อคาร์บอนนาโนทิวบ์มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวก็จะมากขึ้นเมื่อเทียบกับในปริมาตรรวมหรือมวลที่เท่าเดิม ดังนั้นปรากฏการณ์ที่ต้องเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิว เช่น การเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่เราเรียกว่า catalyst ซึ่งถ้าหากมีพื้นที่ผิวมากขึ้น การทำปฏิกิริยัมพันธ์ต่อกันบนพื้นที่ก็จะมากขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นด้วย



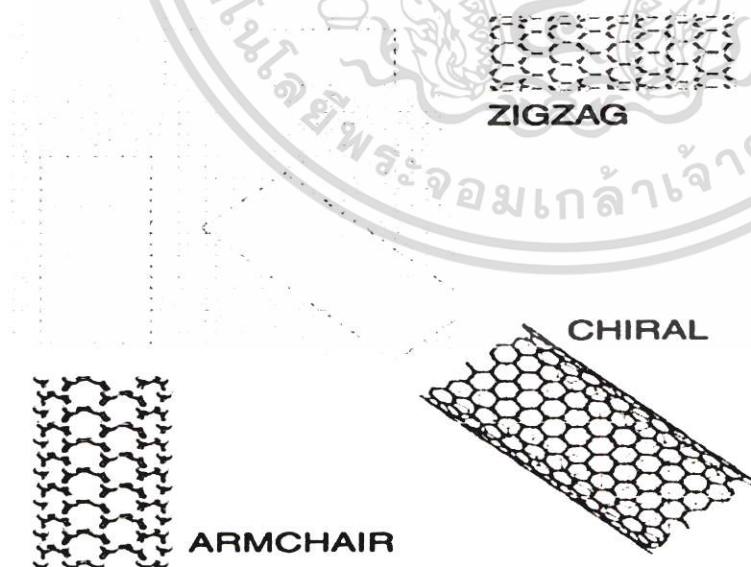
รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้าง โมเลกุลของคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube)

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้ ถ้าถูกจัดเรียงให้เป็นแนวตรง ก็จะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าแต่ถ้าโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ถูกบิดไม่ให้เป็นแนวตรง จะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำขึ้นมาภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของมุมที่บิดกับค่าของแรงดัน band-gap ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถจะถูกบังคับให้มีสถานะนำหรือไม่นำกระแสได้โดยใช้สนามไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้สามารถนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาสร้างทรานซิสเตอร์ได้ และประกอบกับความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าคาร์บอนนาโนทิวบ์ดีกว่าตัวนำทุกชนิด [15] นอกจากนี้การจัดเรียงตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อเป็นท่อแล้วมีการจัดเรียงตัว 3 แบบคือ แบบ Armchair, Zigzag และ Chiral ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการบิดตัวของ carbon nanotube กับค่าแรงดัน band-gap

อย่างไรก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติทางกลคือ มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นมาก ทนต่อแรงดึงได้มากกว่าเหล็กถึง 20 เท่า และมีความแข็งแกร่งต่อการบิดเบือนมากกว่าเหล็กถึง 10 เท่า



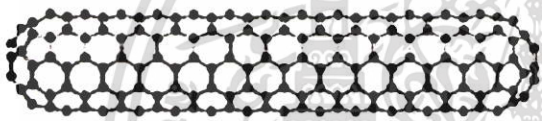
รูปที่ 2.8 การม้วนแผ่นกราฟไฟต์ในทิศทางที่แตกต่างกันเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ 3

ลักษณะคือ Armchair, Zigzag และ Chiral

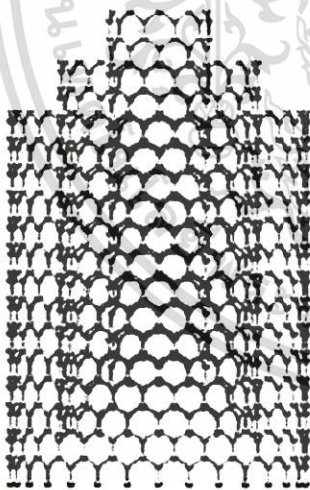
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ การที่มีคุณสมบัติเป็นทั้งตัวนำไฟฟ้าและสารกึ่งตัวนำ เราจึงนำมาทำเป็นทรานซิสเตอร์ คือ นำมาเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ก็จะสามารถสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีความเร็วสูงมาก และมีความต้านทานที่ต่ำมาก แล้วยังมีคุณสมบัติควอนตัม (quantum) คือ สามารถควบคุมการไหลเคลื่อนอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง อาจจะเป็นกลุ่ม จนกระทั่งเป็นอิเล็กตรอนทีละตัวได้

ปัจจุบันมีการสร้างนาโนทิวบ์จากธาตุชนิดอื่นๆ มากมาย เช่น ซิลิคอน แกลเลียมอาเซนไนด์ เป็นต้น เรียกว่า ลวดนาโน (nanowire) เพราะว่ามันกลวงเหมือนนาโนทิวบ์ คาร์บอนนาโนทิวบ์มีผนังชั้นเดียว เรียกว่า single-wall carbon nanotube (SWCNTs) ยังมีแบบที่เป็นท่อที่มีผนังหลายชั้นซ้อนกันคล้ายเอาท่อเล็กซ้อนในท่อใหญ่ เรียกว่า multi-wall carbon nanotube (MWCNTs)



A Single-wall carbon nanotube



B Multi-wall carbon nanotube

รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

2.2.1 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์(CNTs)

CNTs สามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน

1. วิธีการแบบ Arc Discharge [16] เป็นวิธีเริ่มแรกในการสังเคราะห์ C₆₀ Fullerenes เป็นการสร้าง Plasma ให้เกิดขึ้นระหว่างขั้วคาร์บอน โดยการป้อนกระแสไฟ ซึ่ง CNTs จะเกิดการก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว วิธีนี้มีทั้งที่ใช้โลหะเป็นตัวเร่ง (SWCNTs) และ ที่ไม่ใช้โลหะเป็นตัวเร่ง (MWCNTs) วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ CNTs ที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก

2. วิธีแบบ Laser Ablation ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ Smalley วิธีนี้ใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงกระทบกับแท่งคาร์บอนผสม โลหะที่อยู่ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200 °C ทำให้เกิดคาร์บอนแก๊สและคาร์บอนอะตอมที่ร้อนขึ้น CNTs ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้จะแตกต่างจาก วิธี Arc discharge ตรงที่ CNTs ที่มีความบริสุทธิ์ที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม วิธี Laser Ablation นี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

3. วิธีแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition [17] คือการแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น แก๊สมีเทน) บน โลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400–1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้

ตารางที่ 2.2 สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก

วิธี	Arc Discharge	Laser Ablation	CVD
วิธีการสังเคราะห์	ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งกราไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิด hot-plasma ขึ้น CNTs จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว (โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของแก๊ส He)	ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่ง คาร์-บอนที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหยของคาร์บอน และจากนั้น CNTs ก็ก่อรูปขึ้น (โดยส่วนมากสังเคราะห์ในบรรยากาศของแก๊ส Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 1,200 °C)	เป็นการแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วย มีโลหะเป็นตัวเร่ง การสังเคราะห์ (อุณหภูมิประมาณ 400 ~ 1200 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี	Arc Discharge	Laser Ablation	CVD
ประสิทธิภาพ ของผลผลิต	30~90%	มากกว่า 70%	20~90%
SWCNT	- ขนาดสั้น - Ø: 0.6~1.4 nm	- ขนาดยาว (5~20 ?m) - Ø: 1~2 nm	- ขนาดยาวมาก - Ø: 0.6~4 nm
MWCNT	- ขนาดสั้น - Ø: (ใน) 1~3 nm (นอก) ~10 nm	เนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่าย ค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่ นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MW-CNTs แต่สามารถ สังเคราะห์ได้	- ยาวมาก (> 20 nm) - Ø: 10~200 nm
ข้อดี	- เป็นวิธีที่ง่าย และ ค่าใช้จ่ายถูก - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย - สามารถสังเคราะห์ MW-CNTs ได้โดยไม่ต้องใช้ โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ใน ความดันบรรยากาศ ห้อง	- ผลิตที่ได้ส่วนใหญ่ เป็น SWCNTs - ความบริสุทธิ์สูง - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย	- สังเคราะห์ได้ที่ อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWCNT ยาว - สามารถกำหนด ทิศทางของและตำแหน่ง ของทิวป์ได้ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ใน เกณฑ์ดี - สามารถที่จะสัง เคราะห์ในเชิง อุตสาหกรรมได้
ข้อเสีย	- ความยาวของทิวป์สั้น และมีขนาดไม่ สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปน ค่อนข้างมาก (หมายเหตุ: เส้นผ่านศูนย์กลาง)	- เป็นวิธีที่แพงเนื่องจาก ต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง	- เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวป์ ที่ได้มี Defect อยู่ บ้าง แต่ไม่มาก

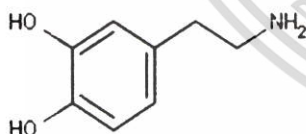
ในงานวิจัยนี้ใช้ SWCNTs ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางเคมีซึ่งเหมาะต่อการนำมา
ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าเคมี ดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางเคมีที่สำคัญของ SWCNTs

ขนาด	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 ~ 2 nm
พื้นที่พื้นผิว	1,500 m ² /g
ความหนาแน่น	1.33-1.40 g/cm ³
กำลังต้านทานแรงดึง	> 60 GPa (ประมาณ 50 เท่าของเหล็กแกร่ง แต่มีน้ำหนักแค่ประมาณ 1/6 เท่า)
ความยืดหยุ่น	ถึงจะถูกงอ ก็สามารถคืนกับสู่สภาพเดิมได้โดยไม่เสียหาย
การทนต่อความร้อน	ในสุญญากาศ : ~ 2,800 °C ในอากาศ : ~ 750 °C
การนำความร้อน	MWCNTs: > 3,000 W/m. K SWCNTs: คาดประมาณ 6,000 W/m. K (มากกว่าเพชรและกราไฟต์ 2,000 W/m. K)
ความสามารถในการนำไฟฟ้า	~ 10 ⁹ G A/cm ² (ประมาณ 1,000 เท่าของทองแดง)
การปลดปล่อยอิเล็กตรอน	สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ที่ 1 – 3 V/μm
การทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี	ตามปกติจะไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ
พื้นที่พื้นผิว	1,500 m ² /g
ความหนาแน่น	1.33-1.40 g/cm ³

2.3 โดพามีน [18]



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของโดพามีน

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

ชื่อเรียกอื่นๆ เช่น 4-(2-aminoethyl)pyrocatechol, 3-hydroxytyramine,

3,4-dihydroxyphenethylamine, α -(3,4-dihydroxyphenyl)- β -aminoethane

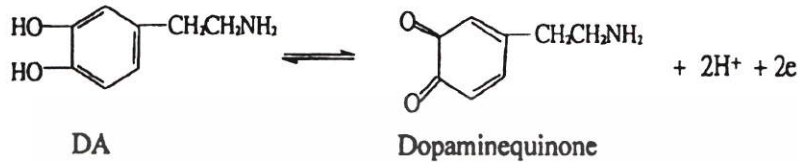
สูตร โมเลกุล C₈H₁₁NO₂ มวล โมเลกุล 153.18 และมีองค์ประกอบทางเคมีคือ C 62.73%, H

7.24%, N 5.14%, O 20.89% ในทางการค้าโดพามีนจะอยู่ในรูปของแข็งมี 2 แบบคือ 1. อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูป Hydrochloride $C_8H_{11}NO_2 \cdot HCl$ มวล โมเลกุล 189.64 จุดหลอมเหลว $241^\circ C$ 2. อยู่ในรูป Hydrobromide $C_8H_{11}NO_2 \cdot HBr$ มวล โมเลกุล 234.10 จุดหลอมเหลว $210-214^\circ C$ ในงานวิจัยนี้ ใช้โดพามีนที่อยู่ในรูป Hydrochloride

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ โดพามีน [28]



รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของ โดพามีน

จากรูปที่ 2.11 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ โดพามีนให้อิเล็กตรอน 2 อิเล็กตรอน ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาเกิดตรงหมู่ OH ได้ Dopaminequinone สามารถตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

คุณสมบัติทางเภสัชวิทยาของยาโดพามีน

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

ข้อบ่งใช้

เพื่อเพิ่มความดันโลหิตในภาวะช็อกที่ไม่ใช่จากการขาดเลือด หรือสารน้ำในร่างกาย และอาจใช้ในขนาดต่ำเพื่อเพิ่มเลือดไปเลี้ยงไต

ข้อห้ามใช้

1. ผู้ป่วยที่ Hypersensitivity กับ Sulfites เพราะยามี Sodium metabisulfite ส่วนประกอบในการเป็น Antioxidant

2. ผู้ป่วยที่มีอาการ Ventricular fibrillation, Tachyarrhythmia, Pheochromocytoma

การเตรียมยา

ยาที่ทำการเจือจางแล้วจะมีความคงตัวได้น้อย 24 ชั่วโมง และยาสลายตัวได้ง่ายในสถานะที่เป็นค้าง

ปริมาณยาโดพามีนที่ใช้ในการรักษา

การให้ยาแก่ผู้ป่วยควรให้ทางเส้นเลือดดำใหญ่ และเมื่อต้องการหยุดยาควรค่อย ๆ ลดขนาดยาเพื่อป้องกันการเกิด hypotension

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

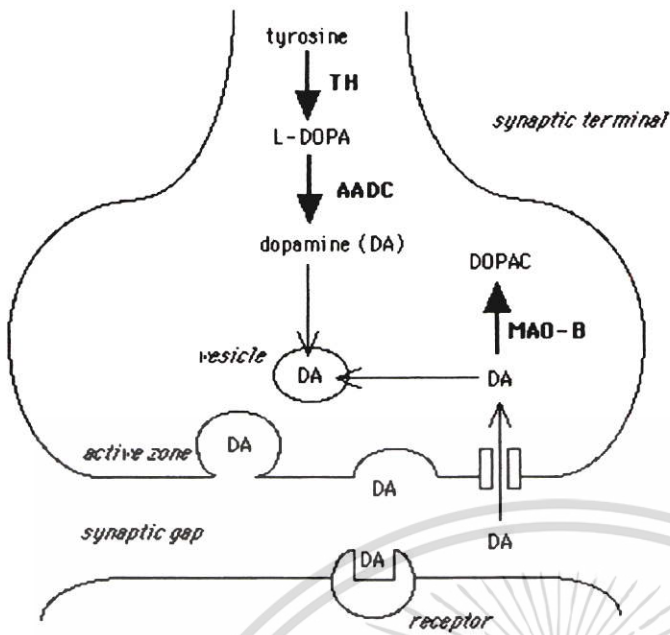
ผู้ใหญ่ คำสั่ง 1-5 mg/kg/min สูงสุดไม่เกิน 20 mg/kg/min

ผลกระทบข้างเคียงที่สำคัญของยาโดพามีน

1. การชักนำให้มีการเต้นของหัวใจที่ผิดปกติทั้งแบบ supraventricular และ ventricular arrhythmias
2. การเพิ่มความต้องการออกซิเจนของกล้ามเนื้อหัวใจ ซึ่งอาจทำให้อาการกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดรุนแรงขึ้น
3. ผลจากการกระตุ้น alpha-1 receptor ทำให้เกิดการขาดเลือดไปเลี้ยงอวัยวะ ส่วนปลาย โดยเฉพาะเมื่อใช้ยานี้ในปริมาณสูงหรือในระยะยาว

2.4 โรคพาร์กินสัน [20,21]

สารเคมีในสมอง มีอยู่หลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึง เซโรโทนิน (Serotonin) ที่ทำให้สมองสงบ ลดความตื่นเต้น และ โดพามีน (Dopamine) ทำให้สมองตื่นตัว กระปรี้กระเปร่า สารเคมีทั้งสองชนิดนี้จะทำงานร่วมกัน ความสมดุลของสารเคมีทั้งสองจึงมีความสำคัญต่อความคิดและอารมณ์ อาหารที่รับประทานจะเป็นตัวสร้างและปรับสมดุล สารเคมีทั้งสองชนิดนี้ตรวจพบสารสื่อประสาทในระบบประสาทกลาง คือ โดพามีน (Dopamine) เซโรโทนิน (Serotonin) กรดแกมมาอะมิโนบิวทีลิก (Gamma amino butylic acid หรือ GABA) สารสื่อประสาทที่กล่าวมานี้เป็นอนุพันธ์ของกรดอะมิโน โดพามีนเกี่ยวข้องกับการทำงานของกล้ามเนื้อ โรคพาร์กินสัน (Parkinson's disease) โรคนี้เกิดขึ้นจากการขาดโดพามีนทำให้กล้ามเนื้อไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวได้ รักษาโดยให้ยา L-dopa ซึ่งเป็นสารที่จะเปลี่ยนเป็นโดพามีนในร่างกายในเวลาต่อมา สมองส่วนที่เรียกว่า คอเดตนิวเคลียส (Caudate nucleus) และบริเวณเวนทรัล เซ็กเมนทัล (Ventral segmental area) จะมีกิจกรรมมากกว่าปกติ โดยส่วนของสมองทั้งสองนี้เป็นบริเวณที่เกี่ยวข้องกับสารสื่อประสาทที่เรียกว่า โดพามีน (Dopamine)



รูปที่ 2.12 แสดงการสังเคราะห์ โดพามีนในเส้นประสาท

จากรูปที่ 2.12 โดพามีนถูกสังเคราะห์ในส่วนปลายของเส้นประสาท ในเซลล์ Tyrosine ถูกเปลี่ยนเป็น L-DOPA โดยเอนไซม์ tyrosine Hydroxylase (TH) ย่อย Tyrosine กลายเป็น L-DOPA จากนั้นถูกเอนไซม์ Decarboxylase (AADC) เปลี่ยนเป็น โดพามีน โมเลกุลของโดพามีนที่ถูกสังเคราะห์ในส่วนปลายของเส้นประสาทถูกปล่อยไปที่รอยต่อของเส้นประสาทไปยังตัวรับสารสื่อประสาท (Receptor)

สารเคมีในสมอง หรือที่ภาษาอังกฤษเรียกว่า brain chemicals เป็นคำที่ใช้อธิบายความหมายเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ ความหมายของสารเคมีในสมองนั้นหมายถึงสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เซลล์ประสาทสร้างขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่ส่งกระแสประสาทจากเซลล์หนึ่ง ไปยังอีกเซลล์หนึ่ง เมื่อเซลล์ประสาทต้นทางถูกกระตุ้น กระแสประสาทที่เกิดขึ้นจะไหลไปตามเส้นประสาทในลักษณะคล้ายๆ กระแสไฟฟ้าไหลไปตามสายไฟฟ้า เมื่อกระแสประสาทไปถึงปลายเส้นประสาทก็จะกระตุ้นให้เซลล์ที่ปลายประสาทหลั่งสารสื่อประสาทออกมา

โรคพาร์กินสันเป็นโรคทางสมองและระบบประสาทชนิดหนึ่งที่พบได้ค่อนข้างบ่อย โดยเฉพาะในผู้สูงอายุ สาเหตุยังไม่ทราบแน่ชัดแต่พบว่าในผู้ป่วยโรคพาร์กินสันจะมีการเสื่อมของเซลล์ประสาทบริเวณก้านสมอง จนส่งผลให้สารเคมีชนิดหนึ่งในสมองที่ชื่อว่าโดพามีนมีปริมาณลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการส่งผลให้ผู้ป่วยเกิดอาการของโรคพาร์กินสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาการของโรคพาร์กินสันมีหลายอย่างที่สำคัญคือ

1. อาการสั่น พบได้ค่อนข้างบ่อย มักพบที่บริเวณแขน มือและอาจพบบริเวณคาง ลำตัวและขาได้ ซึ่งอาการสั่นใน โรคนี้อาจมีลักษณะสำคัญคือ มักจะสั่น อยู่นิ่งๆ แต่เวลา มีการเคลื่อนไหวอาการสั่นจะลดลงหรือหายไป อาการที่สั่นใช้เวลาประมาณ 4-6 ครั้ง/วินาที และมักจะเริ่มที่ซีกใด ซีกหนึ่ง ก่อนแล้วต่อมาเมื่อเป็นมากขึ้นจะสั่นทั้งสองข้าง
2. อาการกล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มักเป็นกับกล้ามเนื้อบริเวณคอ ลำตัว และส่วน โคนแขน โคนขา ซึ่งจะทำให้ผู้ป่วยมีอาการ ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อบริเวณดังกล่าวได้ ทำให้ผู้ป่วยบางราย ต้องรับประทานยาแก้ปวดหรือต้องนอนดึกเป็นประจำ
3. อาการเคลื่อนไหวช้า ระยะเวลาแรกผู้ป่วยอาจรู้สึกทำอะไรช้าลง เคลื่อนไหวไม่ กระฉับกระเฉงว่องไวเหมือนเดิม โดยเฉพาะระยะเริ่มต้นของการเคลื่อนไหว ถ้าเป็นมากขึ้น อาจจะไม่เดินเองไม่ได้ ต้องใช้ไม้เท้าหรือต้องมีคนพยุงเดิน
4. อาการทรงตัวลำบาก ทำให้ผู้ป่วยมีอาการหกล้มได้บ่อยๆ โดยเฉพาะผู้สูงอายุอาจ มีกระดูกต้นขาหักสะโพกหักศีรษะแตก ฯลฯ ได้

อาการอื่นๆ ที่พบได้ในโรคพาร์กินสัน

1. การแสดงสีหน้า ผู้ป่วยมีใบหน้าเฉยเมยไม่ค่อยยิ้มหรือหัวเราะ ดูเหมือนไม่มี อารมณ์ความรู้สึกใดๆ
2. เสียงพูดมักจะเสียงเบาและไม่ค่อยมีเสียงสูงเสียงต่ำ
3. ลายมือผู้ป่วยจะเขียนหนังสือลำบากและมักจะค่อยๆ เขียนตัวเล็กลง ตามลำดับจน อ่านไม่ออก
4. ทำเดินผิดปกติ ก้าวเดินในช่วงแรกๆ ลำบากและเวลาเดินจะก้าวเท้าสั้นๆ ต่อมาจะ ก้าวยาวขึ้นเรื่อยๆ และอาจจะหยุดทันทีทันใดไม่ได้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้หกล้ม ผู้ป่วยมักจะมี อาการหลังค่อมตัวงอโค้งงอไม่ค่อยแกว่งเวลาเดินร่วมด้วย
5. ผู้ป่วยบางรายอาจมีอาการท้องอืด สิ้นหวัง ซึมเศร้าได้ ซึ่งบางเวลาอาจเป็นมากถึง จึ้นทำร้ายตัวเอง การดูแลเอาใจใส่ความเข้าใจของญาติจะช่วยลดปัญหาได้ ถ้ามีอาการ มากควรปรึกษาแพทย์
6. อาการท้องผูก มักพบได้เสมอในผู้ป่วยโรคนี้นั้น ผู้ป่วยควรดื่มน้ำประมาณ 8 แก้ว/วัน รับประทานผักผลไม้ให้เพียงพอและการออกกำลังกายสม่ำเสมอ โดยไม่หนักหรือ หักโหมเกินไป จะช่วยได้บางรายอาจต้องให้ยาระบายอ่อนๆ ช่วยเป็นครั้งคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวินิจฉัย

โดยทั่วไปแพทย์สามารถวินิจฉัยได้จากการสัมภาษณ์ประวัติตรวจร่างกายและทางระบบประสาทอย่างละเอียด ผู้ป่วยบางรายอาจจำเป็นต้องได้รับการตรวจพิเศษเพิ่มเติม เช่น ตรวจเลือด เอ็กซเรย์คอมพิวเตอร์สมอง เพื่อทำให้แน่นอนว่าผู้ป่วยมิได้ป่วยด้วยโรคอื่นที่มีอาการคล้ายโรคพาร์กินสัน

การรักษา

โรคนี้เป็นโรคเรื้อรังชนิดหนึ่ง ซึ่งรักษาไม่หายขาด จำเป็นต้องรับประทานยาและรักษาไปตลอดชีวิตภายใต้การดูแลจากแพทย์ ซึ่งแนวทาง การรักษามี 3 วิธีคือ

1. รักษาด้วยยา ยาที่ให้จะ ไปเพิ่มสารเคมีโดพามีนในสมอง ทำให้ผู้ป่วยมีอาการดีขึ้น แพทย์มักจะเริ่มให้ยาในขนาดน้อยๆ ก่อน แล้วค่อยๆ ปรับยา เพื่อให้เหมาะสมกับผู้ป่วย ซึ่งมักต้องการยาแต่ละชนิดและขนาดของยาแตกต่างกันไปในผู้ป่วยแต่ละราย
2. การรักษาด้วยการทำกายภาพบำบัด ถ้าผู้ป่วยมีอาการไม่มากนัก อาจฝึกหัดเอง ที่บ้าน ได้ เช่น ฝึกการเดิน โดยให้ยึดตัวตรงก่อน และก้าวเดินให้ยาวพอสมควร พยายามแกว่งแขน ขณะเดินห้ามหมุนตัวหรือกลับตัวเร็วๆ เลือกรองเท้าให้เหมาะสม ใช้ส้นเตี้ยๆ ห้ามใส่รองเท้า ส้นสูง ควรบริหาร ข้อเท้าทุกวัน แต่ถ้าอาการเป็นมากก็ควรปรึกษาแพทย์เพื่อให้คำแนะนำต่อไป
3. การรักษาด้วยการผ่าตัดสมอง ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีเริ่มพัฒนาและทำกัน มากขึ้น ซึ่งการผ่าตัดอาจเกิด โรคแทรกซ้อนได้
4. การออกกำลังกาย ถือว่ามีความสำคัญอย่างหนึ่ง ในผู้ป่วยโรคพาร์กินสัน เพราะ สามารถ จะทำให้ผู้ป่วยรู้สึกผ่อนคลายและเคลื่อนไหวร่างกายในชีวิตประจำวัน ได้ดีขึ้น การออกกำลังกายทำได้หลายวิธี ได้แก่ การวิ่งเหยาะๆ การเดินเร็วๆ ขี่จักรยาน หรือว่ายน้ำ เป็นต้น การออกกำลังกายเฉพาะ ผู้ป่วยจะออกกำลังกายได้มากน้อยแค่ไหน ควรปรึกษา แพทย์ ผู้ดูแล และแต่ละรายอาจจะมี โปรแกรมเฉพาะแตกต่างกัน

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Falat และคณะ[22] ใช้ขั้วแกรไฟต์/อีพอกซีที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยวิธีทางไฟฟ้า เทียบกับขั้วที่ยังไม่ได้ทำความสะอาด วัดโคพามีนกับกรดแอสคอบิกฟีกของการเกิดออกซิเดชันของสารทั้งสองแยกกันอย่างชัดเจนและคงที่ ซึ่งได้ผลที่ดีกว่าขั้วที่ไม่ผ่านการทำความสะอาด

Valentini และคณะ[23] ทำขั้วไฟฟ้าโดยใช้อัตราส่วนผงคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Single-wall) ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยกรดไนตริกผสมกับ mineral oil ในอัตราส่วนต่างๆ เทียบกับขั้วไฟฟ้าที่ทำขึ้นโดยใช้ผงกราไฟต์ วัดโคพามีนโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรีให้ผลดีกว่าขั้วไฟฟ้าที่ใช้ผงกราไฟต์

Xue และคณะ[24] ใช้ขั้วกลาสคาร์บอนปรับปรุงด้วย carbon atom ware วัดโคพามีนได้กระแสแอมแปร์ในดิกและแคโทดิกที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้น ที่ pH 6.8

Ciszewski และคณะ[9] ใช้ขั้วแพลทินัมปรับปรุงด้วย 4-allyl-2-methoxyphenol (eugenol) ทำให้โคพามีนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นพอลิเมอร์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.4 จิตจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ $0.1 \mu\text{M}$ (S/N=3) ค่าสัญญาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ $7.9 \text{ nA}\mu\text{M}^{-1}$

Gilbert และคณะ[25] ใช้ขั้วคาร์บอน(ใช้ผงกราไฟต์ผสมกับ mineral oil ในอัตราส่วน 1.65:1 ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก วัดโคพามีนเทียบกับขั้วคาร์บอนที่ยังไม่ปรับปรุงได้ ค่ากระแสสูงกว่า ฟีก ออกซิเดชันของโคพามีนเบี่ยงไปทางศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวก ใช้เทคนิคทางโวลแทมเมทรีศึกษาการเกิดออกซิเดชันของโคพามีนใน 0.1 M ซัลฟูริก ในช่วงศักย์ 0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ต่อมาใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์แทนกรดซัลฟูริก ค่ากระแสการเกิดออกซิเดชันของโคพามีนเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก

Zhao และคณะ [19] ทำการตรวจวัด โดพามีน โดยใช้เทคนิค ไซคลิกโวลแทมเมตรีใช้ขั้วกลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยเจลของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ประกอบด้วย 1-octyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate (OMIMPF₆) ต้องควบคุมความหนาของพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าซึ่งความหนาจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากระแส ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจวัดพิกแอนดิกของโดพามีน กรดแอสคอบิก และกรดยูริกที่ผสมอยู่ในสารละลายเดียวกันสามารถวัดได้พร้อมกัน ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้คือ 0.2 และ 0.15 โวลต์ตามลำดับ ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของโดพามีนอยู่ในช่วง 1.0×10^{-6} - 1.0×10^{-4} โมลาร์ จีคจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 1.0×10^{-7} โมลาร์ (S/N=3) และนำไปประยุกต์ใช้ตรวจวัด โดพามีนในซีรัมของเลือดมนุษย์

Wang J. และคณะ [1] ใช้ขั้วกลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ตรวจวัด 3,4-dihydroxyphenylacetic acid (DOPAC) ในสารละลาย 0.1 M HAc-NaAc buffer pH 4.4 ด้วยเทคนิคทางโวลแทมเมตรี ช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 1.0×10^{-6} ถึง 1.2×10^{-4} M จีคจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit) เท่ากับ 4.0×10^{-7} M การเกิดปฏิกิริยาเคมีของ DOPAC ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นแบบ Diffusion-controlled จากผลการทดลองพบว่า DOPAC ใช้อิเล็กตรอน 2 อิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็น o-quinone โดยปฏิกิริยา Dimerization ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา Dimerization ที่คำนวณได้เท่ากับ 2.10×10^3 dm³ mol⁻¹ s⁻¹

Yan และคณะ [27] ในงานวิจัยได้ศึกษาปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของ L-Dopa โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี แอมเปอโรเมทรี โครโนแอมเปอโรเมทรี และ โครโนคูลอมบ์เมทรี การปรับปรุงขั้วไฟฟ้าด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ช่วยให้ L-Dopa เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าดีขึ้น ค่ากระแสของ L-Dopa ที่ตรวจวัด โดยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรีช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 5.0×10^{-7} - 2.0×10^{-5} molL⁻¹ ปฏิกิริยาเคมีของ L-Dopa ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นแบบ Diffusion-controlled จีคจำกัดในการตรวจวัด (Detection Limit) เท่ากับ 3.0×10^{-7} molL⁻¹

Britto และคณะ [28] สร้างขั้วไฟฟ้าโดยใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ 10 mg ผสมกับ โบรมีน 10 μL ผสมในแท่งแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5mm ยาว 8 cm เพื่อตรวจวัดการเกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีน โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีพบว่าโดพามีนให้อิเล็กตรอน 2 อิเล็กตรอนเกิดเป็น Dopaminequinone

Wu และคณะ [29] ใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ตรวจวัด โดพามีนและ Serotonin (5-HT) ได้พร้อมกัน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.0 ขณะที่ขั้วกลาสติคาร์บอนเปลือย (Bare-GC) ไม่สามารถตรวจวัดโดพามีนและ Serotonin (5-HT) ได้พร้อมกัน ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการทำซ้ำที่ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกุนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้

1. Dopamine (3-hydroxytyramine hydrochloride, 3-hydroxy-tyramin-hydrochloric) ($C_8H_{11}NO_2$, Fluka)
2. HCl (Analytical grade, Merck)
3. HNO_3 (Analytical grade, CARLO ERBA)
4. H_2SO_4 (Analytical grade, CARLO ERBA)
5. KH_2PO_4 (Analytical grade, CARLO ERBA)
6. DI Water
7. Nitrogen gas (N_2 99.99%)
8. Single-wall carbon nanotube (SWNT) เตรียมที่อุณหภูมิ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 Torr 20 min.
9. N,N dimethylformide (DMF) (Analytical grade, CARLO ERBA)

3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือวิจัย

1. เครื่อง PGSTAT 20 AUTOLAB system (Metrohm, Switzerland)
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ที่เป็น Ag/AgCl ใน 3 M KCl (ของบริษัท Metrohm)
3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode)
4. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode): กลาสติคาร์บอน (Glassy carbon, Metrohm, Switzerland,)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการวิจัย

3.2.1 เตรียมสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1.1 การเตรียมสารละลาย stock solution 1.0 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์

ชั่ง KH_2PO_4 มา 13.7465 กรัม ด้วยบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน นำมาใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ในการทดลองปิเปตมาใช้ครั้งละ 2.5 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-เบสด้วยกรดฟอสฟอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนได้ความเข้มข้นฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็น 0.1 โมลาร์

3.2.1.2 การเตรียมสารละลาย 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

ชั่ง KH_2PO_4 มา 13.7465 กรัม ด้วยบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร นำมาใส่ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 900 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-เบสด้วย 0.5 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์จนกระทั่งได้ pH 7.5 นำมาเทใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.2.1.3 การเตรียม stock solution 2,500 ppm โคพามีนมาตรฐาน

ชั่งโคพามีนมา 0.02538 กรัม ด้วยบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตรคนให้ละลายแล้วเทใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ในการทดลองปิเปต stock solution เจือจางด้วย 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 เพื่อเตรียมความเข้มข้นของโคพามีนความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.4 การเตรียม stock solution 2,500 ppm ตัวอย่างยาโคพามีน

ตัวอย่างยาโคพามีนได้รับความอนุเคราะห์จากโรงพยาบาลราชวิถี ตัวอย่างยานี้อยู่ในรูปสารละลายความเข้มข้น 250 mg/10mL คิดเป็น 25,000 ppm ปิเปตสารละลายตัวอย่างยาโคพามีนมา 1 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในการทดลองปิเปต stock solution เจือจางด้วย 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 เพื่อเตรียมความเข้มข้นของตัวอย่างยาโคพามีนความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 การล้างขั้วไฟฟ้าก่อนการใช้งาน

นำขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนมาขัดกับบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ขนาดอนุภาค 0.3 ไมครอน บนแผ่นขัด (emery paper) นำขั้วไฟฟ้าที่ขัดแล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน หลังจากนั้นนำไป sonicate ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 1 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 3 นาที

3.2.3 การเตรียมซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อใช้ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า

ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNT) 15 มิลลิกรัม เติลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร เติมนอร์มัลไฮโดรคลอริก (HCl) 6.0 โมลาร์ 60 มิลลิลิตร ทำตามวิธีของ Wang, Z. และคณะ [8] แต่ปรับเปลี่ยนจากนำไป Ultrasonic เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นนำไปปั่นด้วยแมกเนติก บาร์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แทน เพราะจะใช้ระยะเวลาในการ Ultrasonic นานเกินไป อาจทำให้เครื่องมือมีอายุการใช้งานสั้น จากนั้นนำไป Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที กรองส่วนที่แขวนลอยของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ส่วนที่กรองได้คือน้ำปราศจากไอออนจนกระทั่งวัดน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ล้างมี pH ประมาณ 7 นำไปอบด้วยเตาอบอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยกรดไฮโดรคลอริกมา 1 มิลลิกรัม เติมน,N-dimethylformamide (DMF) 1 มิลลิลิตร (SWCNTs 1mg /DMF 1 mL) ก่อนใช้ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้านำสารแขวนลอย SWCNTs/DMF ไป sonicate เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้สารแขวนลอยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นบีบเค้นมา 10 ไมโครลิตร หยดลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยทำให้แห้งโดยใช้แสงจากโคมไฟอ่านหนังสือ (ใช้ระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง)

3.2.4 ศึกษาหาขั้วไฟฟ้าทำงานที่เหมาะสมในการตรวจวัดโดพามีน

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้ ขั้วไฟฟ้ากราไฟต์, ขั้วไฟฟ้าทอง, ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม และขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน นำขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ชนิดมาปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทดสอบกับโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง 0.6 โวลต์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ด้วยอัตราการสแกน 50 mV/s

3.2.5 ศึกษาปริมาณซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า

นำขั้วไฟฟ้าในการทดลองที่ 3.2.4 มาปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ปริมาณที่ใช้หยดลงบนขั้วไฟฟ้ามีดังนี้ 1 μ L, 2.5 μ L, 5 μ L, 10 μ L และ 20 μ L ทดสอบกับโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ใช้เทคนิคคิพเฟอร์เรน เซลล์พัลส์โวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.6 โวลต์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl Modulation amplitude 25 mVs

3.2.6 การศึกษาสภาวะความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาของโคพามีน
นำขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์มาทดสอบกับ 100 ppm โคพามีน ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 5.5-8.5 ใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา คือ -0.2V ถึง 0.6 โวลต์ อัตราการสแกน 50 mV/s นำผลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างศักย์ไฟฟ้า กระแส และ pH (ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าใหม่ทุกครั้งที่เปลี่ยนแปลง pH)

3.2.7 การศึกษาผลของอัตราการสแกน (scan rate) ต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโคพามีน

ศึกษาผลของอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาของโคพามีน โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดสอบด้วย 100 ppm โคพามีน ใน 25 มิลลิลิตร 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยการวัดกระแสไฟฟ้าเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา คือ -0.2V ถึง 0.6 โวลต์ ที่อัตราการสแกน 10, 25, 50, 100 และ 250 mV/s เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl (ทุกครั้งที่ยกอัตราการสแกนต้องใช้ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงใหม่) นำผลที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างกราฟที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสออกซิเดชันของพิกัดความเป็นเส้นตรงของความสัมพันธ์ดังกล่าว

3.2.8 ศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า

ศึกษาโดยนำขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดลองกับโคพามีนความเข้มข้น 10, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 ppm ตามลำดับ ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 นำค่ากระแสที่ได้มาพลอตกราฟกับความเข้มข้นแล้วเลือกช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง

3.2.9 ศึกษาขีดจำกัดในการตรวจวัด (Detection Limit)

ศึกษาโดยนำขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดลองกับสารละลายปราศจากโคพามีน (blank) ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 นำค่ากระแสที่ได้มาหาค่าสัญญาณรบกวน (noise) จากค่าที่ตรวจวัดได้จำนวน 20 ค่ามาคำนวณหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หลังจากนั้นนำค่าความชันและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไปคำนวณหาขีดจำกัดในการตรวจวัด (การคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก.)

3.2.10 ศึกษาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า (Lifetime)

ศึกษาโดยนำขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดลองกับ 100 ppm ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี อัตราการสแกน 50 mV/s บันทึกกระแสไว้ นำขั้วไฟฟ้าออกจากเซลล์ที่ทดลอง นำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วทิ้งให้แห้ง นำมาทดลองซ้ำ นับจำนวนครั้งที่ทดลองที่ทำให้กระแสลดลงครึ่งหนึ่ง

3.2.11 ศึกษาการทำการซ้ำ (Reproducibility)

ศึกษาโดยนำขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดลองกับ 100 ppm ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ด้วยเทคนิคลิโพเร็นเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี บันทึกกระแสไว้ หลังจากนั้นนำขั้วไฟฟ้าไปขัดแล้วทำการปรับปรุงขั้วใหม่ ทำซ้ำตามเดิมอีก 20 ครั้ง นำค่ากระแสที่ได้ไปคำนวณค่า %RSD



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

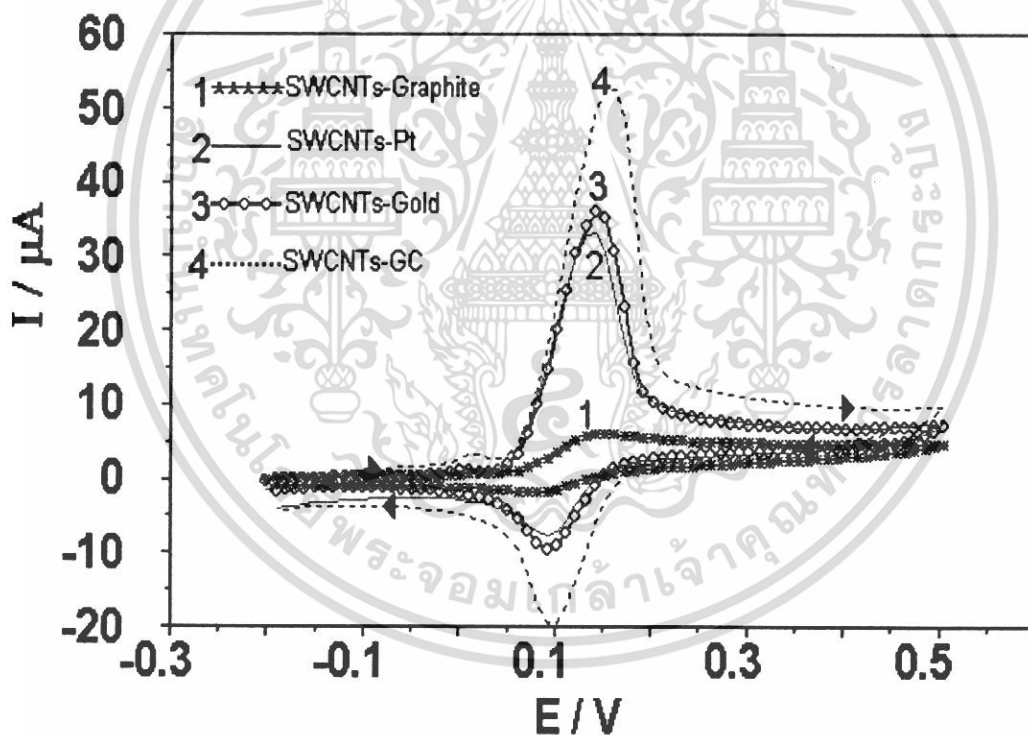
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน

4.1.1 การปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

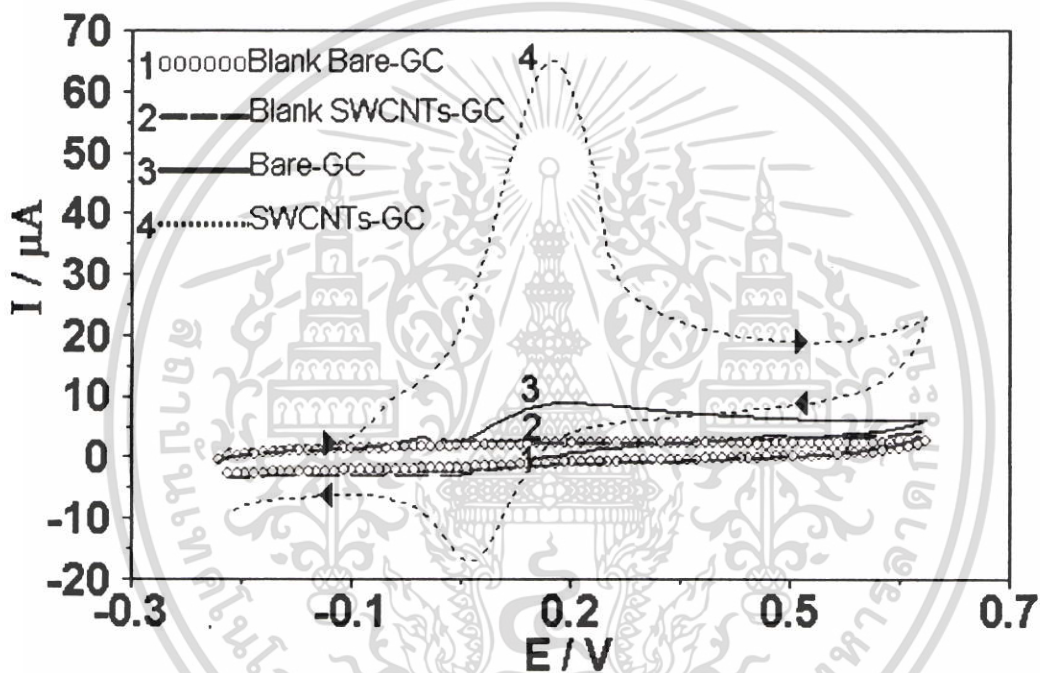
ศึกษาผลของการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานคือ ขั้วไฟฟ้ากราไฟต์, ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม, ขั้วไฟฟ้าทองและขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน ทดสอบกับโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง 0.6 โวลต์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ด้วยอัตราการสแกน 50 mV/s ได้ไซคลิกโวลแทมโมแกรมดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ 100 ppm โดพามีนวัดด้วย ขั้วไฟฟ้ากราไฟต์ (SWCNTs-Graphite), ขั้วแพลทินัม (SWCNTs-Pt), ขั้วทอง (SWCNTs-Gold) และ ขั้วกลาสคาร์บอน (SWCNTs-GC) ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ อัตราสแกน 50 mV/s เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

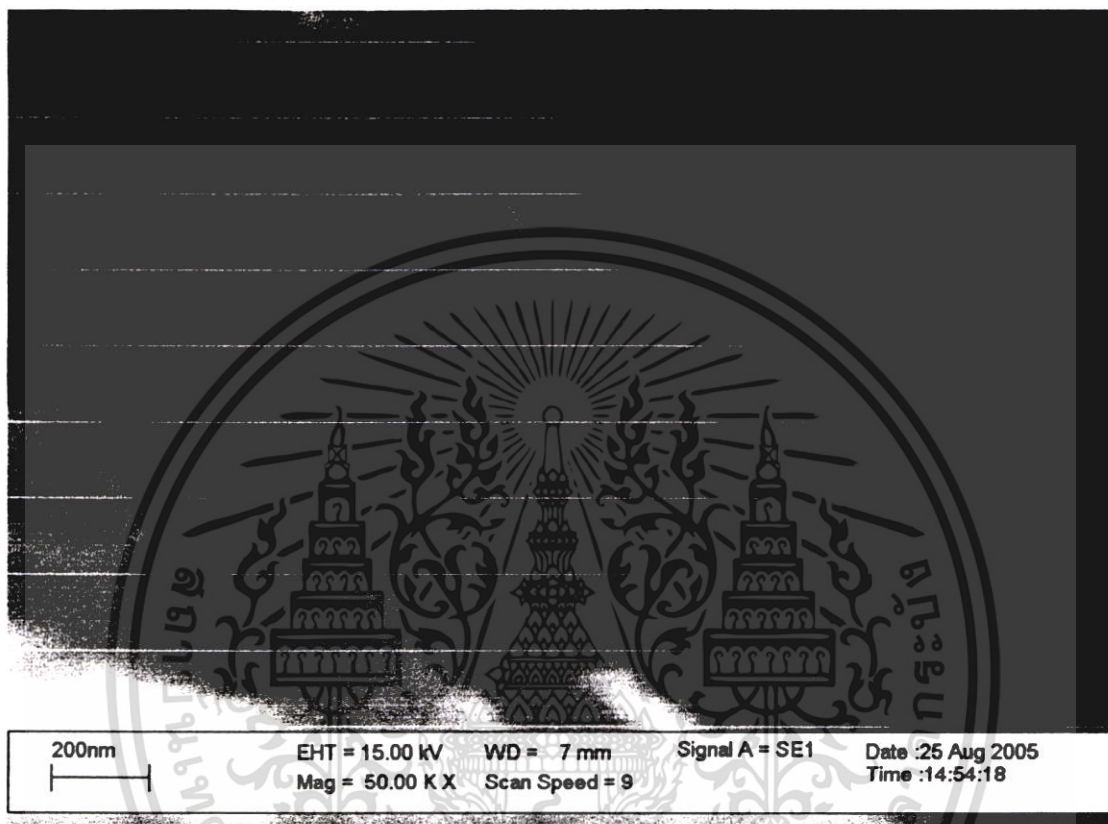
จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมในรูปที่ 4.1 โคพามีนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.14 V ศักย์ไฟฟ้าในการรีดักชันเท่ากับ 0.095 V ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNTs-GC) ให้ค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันสูงกว่าขั้วไฟฟ้าทอง (SWCNTs-GIod), แพลทินัม (SWCNTs-Pt) และกราไฟต์ (SWCNTs-Graphite) ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนเพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และขั้วที่ไม่ได้ปรับปรุง (bare-GC) ทำการทดลองเหมือนกับขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ทุกประการ ได้ไซคลิกโวลแทมโมแกรมดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของโคพามีนเข้มข้น 100 ppm วัดด้วยขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าเปลือย (bare-GC) ที่อัตราสแกน 50 mVs เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลาย 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

จากรูปที่ 4.2 พบว่าขั้วกลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ค่ากระแสออกซิเดชันและรีดักชันสูงกว่าขั้วกลาสคาร์บอนเปลือย (bare-GC) แสดงว่าซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่นำมาปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดโคพามีนได้

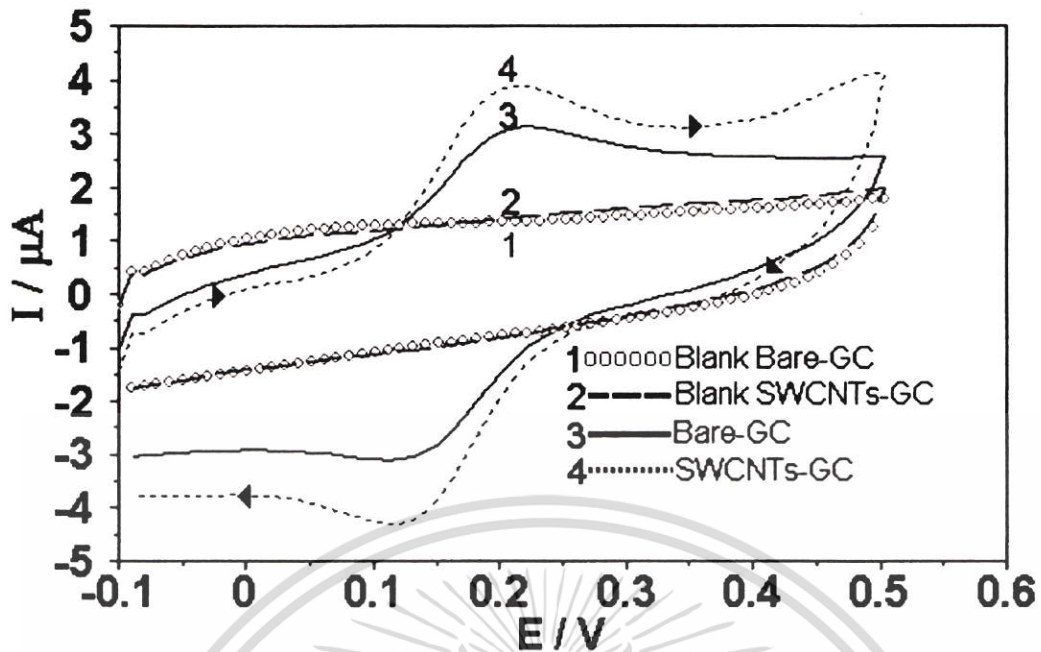
นำสารแขวนลอยของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ที่แขวนลอยอยู่ใน N,N-dimethylformamide (SWCNTs/DMF) บีเปตมา 10 μ L หยดลงไปในคาร์บอนเทปทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำไปส่องด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อดูโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ ได้ผลการส่อง SEM ดังรูป 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์บนผิวของคาร์บอนเทปกำลังขยาย 50,000 x

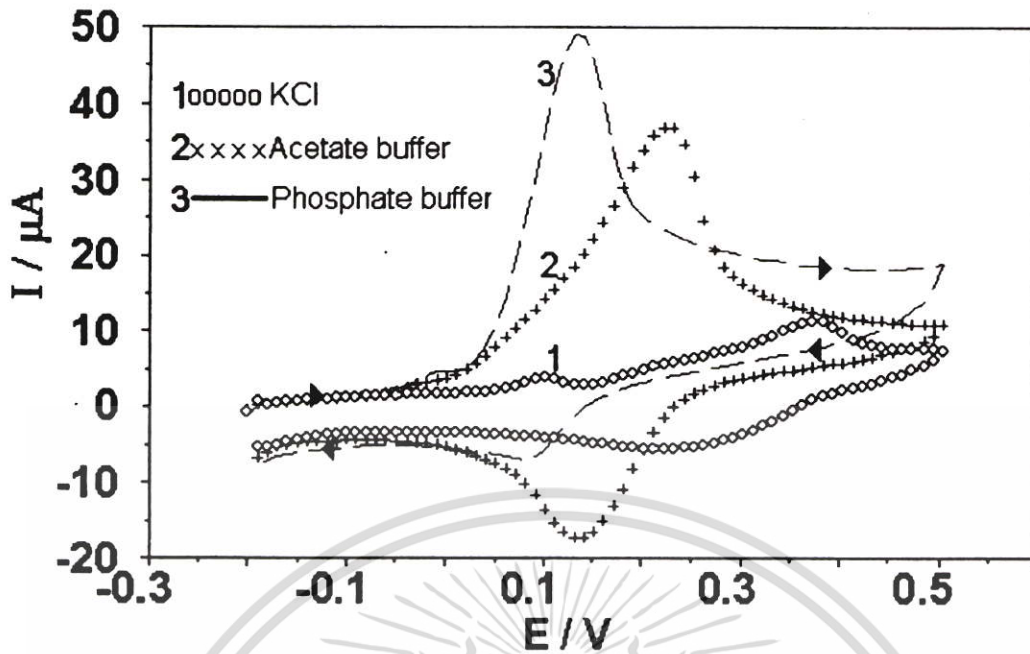
จากรูปที่ 4.3 เมื่อส่อง SEM และวัดขนาดความกว้างของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ประมาณ 37 นาโนเมตร

หลังจากทดสอบกับโดพามีนแล้วนำขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์มาตรวจวัด $K_3(Fe(CN)_6)$ รูปที่ 4.4 แสดงไซคลิกของ $K_3(Fe(CN)_6)$ ซึ่งเป็นสารมาตรฐานในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เหมาะสำหรับใช้เช็คขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ 0.001 โมลาร์ $K_3(Fe(CN)_6)$ วัดด้วยขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าเปลือย (bare-GC) ที่อัตราสแกน 50 mVs เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลาย 0.1 M KCl

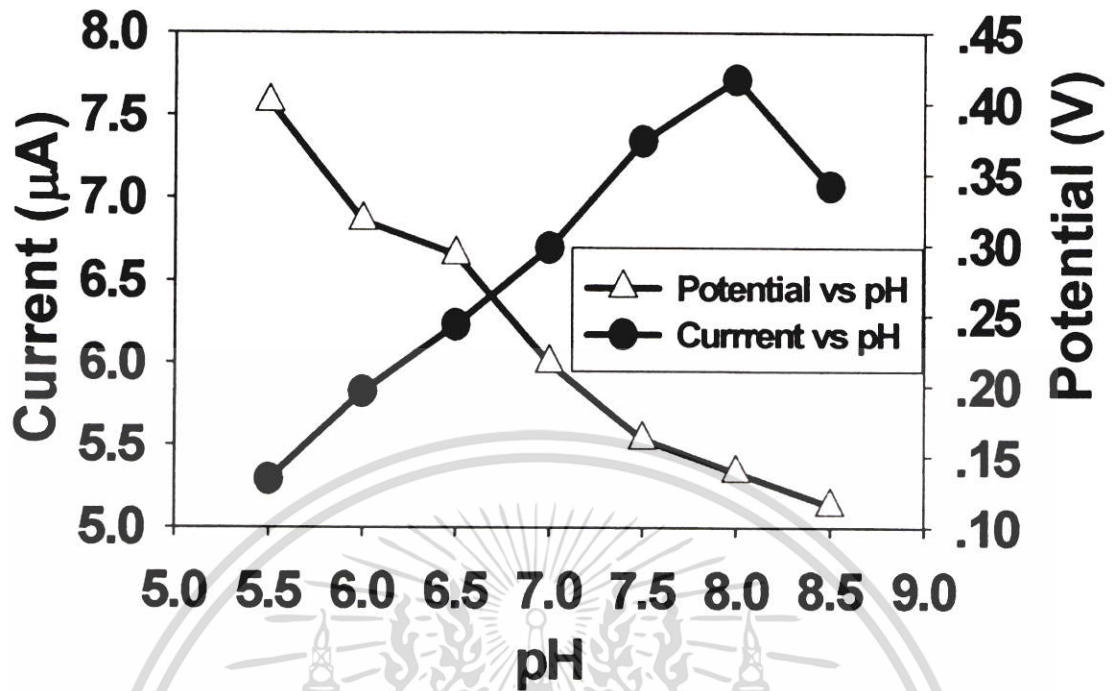
จากรูปที่ 4.4 พบว่าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้ค่ากระแสออกซิเดชันและรีดักชันสูงกว่าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือย จากการทดลองข้างต้นเลือกใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดโคพามีน ขั้นตอนการทดลองต่อไปเป็นการทดสอบหาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดโคพามีนคือ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ อะซิเตตบัฟเฟอร์ และโพแทสเซียมคลอไรด์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 พบว่าฟอสเฟตบัฟเฟอร์ให้ค่ากระแสออกซิเดชันในการตรวจวัดสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้ฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยซึ่งให้ค่ากระแสในการตรวจวัดโคพามีนสูง



รูปที่ 4.5 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ 100 ppm โดพามีนวัดด้วยขั้วไฟฟ้าฟากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ อัตราสแกน 50 mV/s เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลาย 0.1 M อะซิเตทบัฟเฟอร์, โฟสเฟตบัฟเฟอร์, โพสเฟตบัฟเฟอร์

4.1.2 ศึกษาค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ที่เหมาะสมในการตรวจวัดโดพามีน

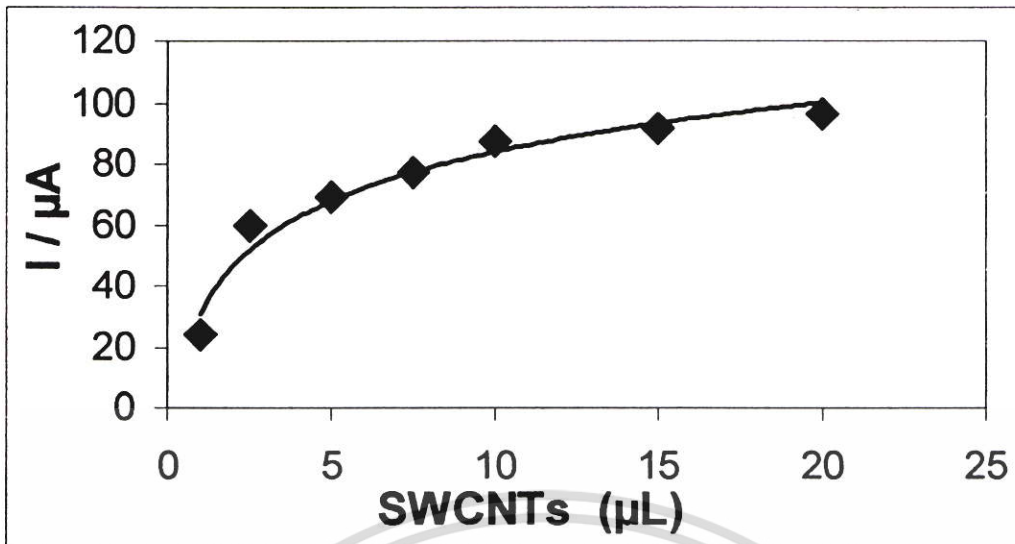
ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนความเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ pH ต่างๆ และเมื่อพลอตค่า pH เทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้ และปริมาณกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อ pH สูงขึ้นปริมาณกระแสเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสูงสุดที่ pH 8.0 แล้วปริมาณกระแสไฟฟ้าก็จะลดลง ส่วนศักย์ไฟฟ้านั้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ที่ pH 8.0 ให้กระแสสูงสุดแต่พอทิ้งสารละลายไว้ประมาณ 5 นาทีเกิดตะกอนสีดำเพราะว่าในสภาวะที่เป็นเบสโดพามีนจะสลายตัวได้ง่ายอาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงใช้ pH 7.5 เป็นค่าที่เหมาะสมเพราะไม่เกิดตะกอน (ทุกครั้งที่ย่ี่ยนแปลงค่า pH ทำการล้างและปรับปรุงขั้วไฟฟ้าฟากลาสติคาร์บอนใหม่)



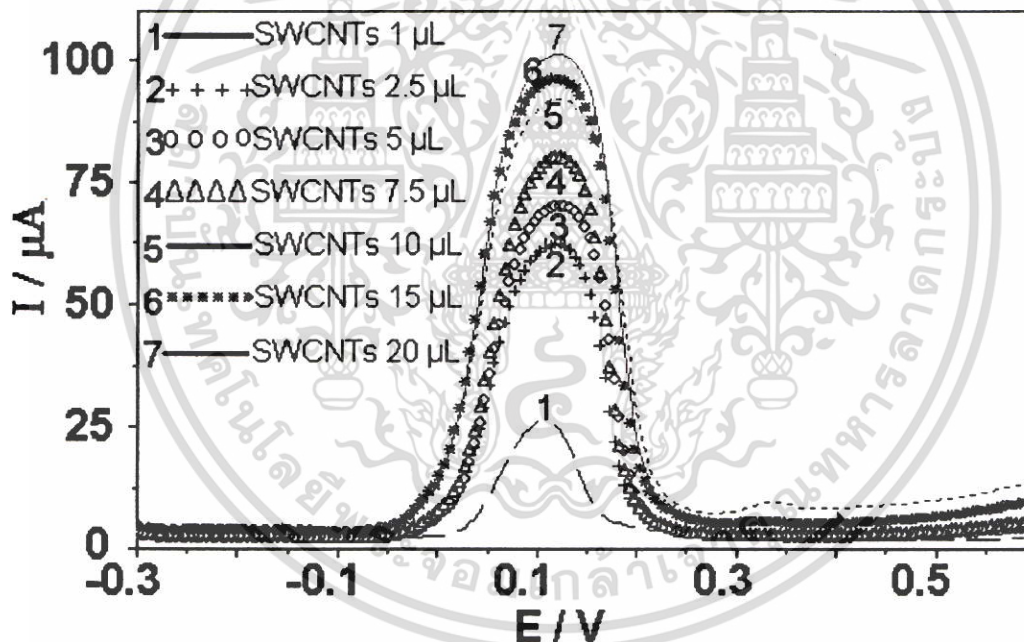
รูปที่ 4.6 แสดงการพลอตค่า pH กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 5.5-8.5 ของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ใช้อัตราการสแกน 50 mV/s

4.1.3 ศึกษาปริมาณซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้หยดลงบนขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน

ปริมาณที่ใช้ทดสอบมี 1µL, 2.5µL, 5µL, 7.5µL, 10µL และ 20µL นำมาปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเพื่อตรวจวัดโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ได้ผลดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณเชิงกลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์กับค่ากระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.8 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลตาโรกราฟี่ของปริมาณเชิงกลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาณต่างๆทดสอบกับโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

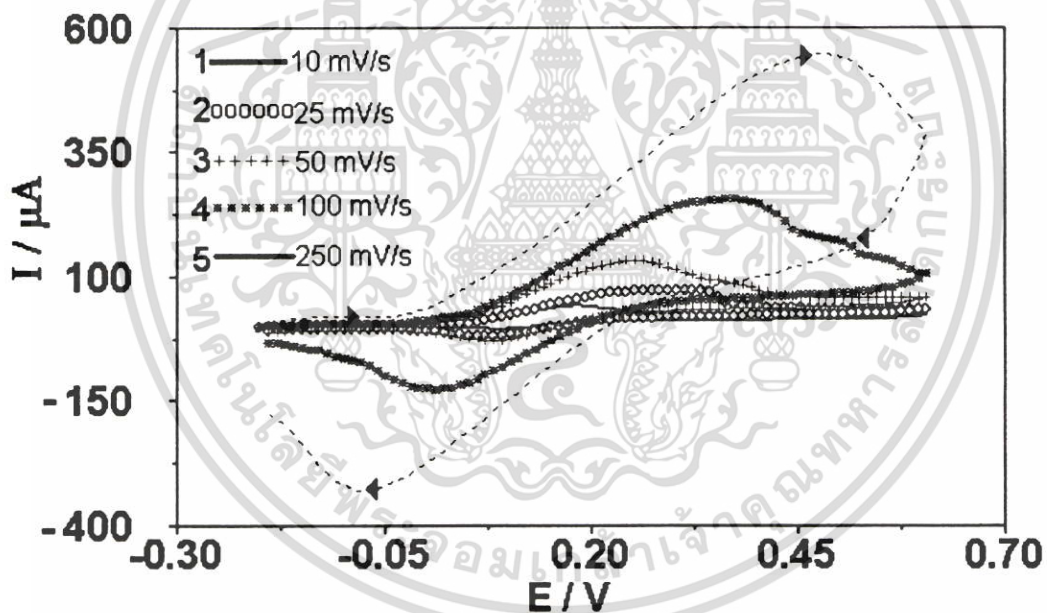
จากรูปพบว่าเมื่อปริมาณที่ใช้หดยปรับขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนเพิ่มขึ้นค่ากระแสออกซิเดชันเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่หดยปรับขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนจนกระทั่งเมื่อใช้ปริมาณเกิน 10 μL ขึ้นไปค่ากระแสออกซิเดชันที่ใช้ปรับขั้วเพิ่มขึ้นไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

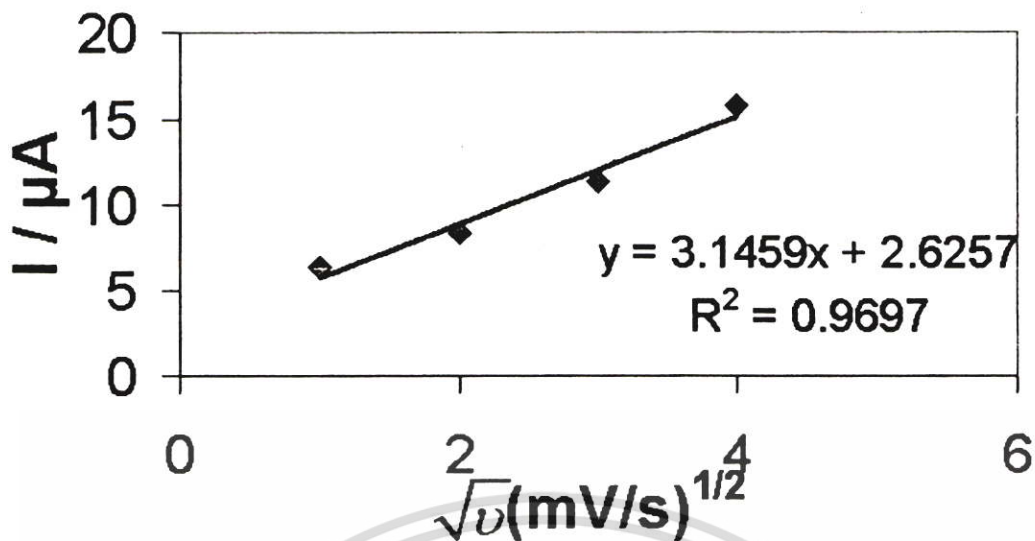
เปรียบเทียบกับค่ากระแสออกซิเดชันที่ปริมาตร 20 μL ต่างจาก 10 μL ไม่มากนักระยะเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ามากกว่าที่ปริมาตร 10 μL ดังนั้นเพื่อความเหมาะสมและใช้ระยะเวลาในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าไม่นานเกินไป จึงเลือกใช้ปริมาตรซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาตร 10 μL

4.1.4 ศึกษาอัตราการสแกน (scan rate) ที่เหมาะสม

ศึกษาอัตราการสแกน (scan rate) ที่เหมาะสมของโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ช่วงที่ใช้ศึกษาคือ 10-250 mV/s เมื่อนำค่าอัตราสแกนที่ให้แก่ขั้วกลาสคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์มาพลอตกับค่ากระแสที่อ่านได้จากโวลแทมโมแกรม ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นตามอัตราสแกน เมื่อพลอตค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นตามค่ารากที่สองของอัตราสแกนมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.9 แสดงไซคลิก โวลแทมโมแกรมที่ได้จากการศึกษาอัตราสแกนของโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

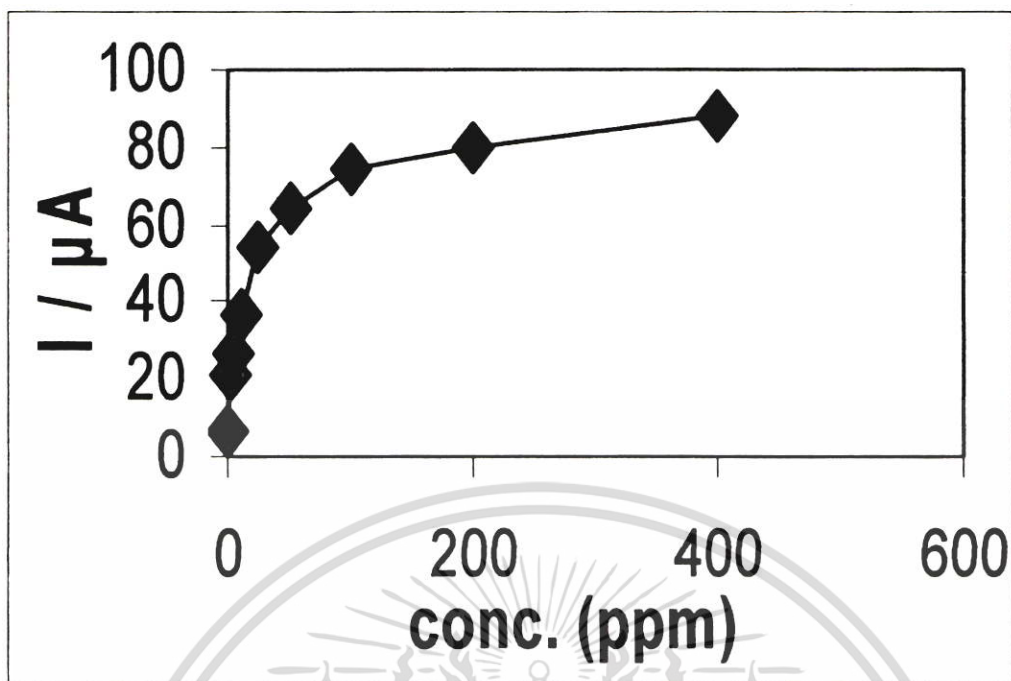


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ได้จากขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอนนาโนทิวกับรากที่สองของอัตราสแกน ในโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

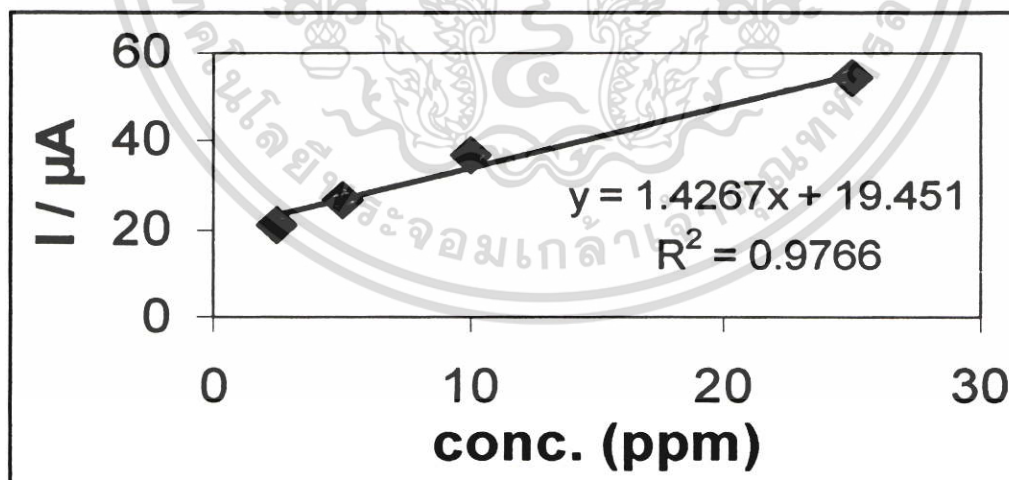
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ได้จากขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวกับรากที่สองของอัตราสแกน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9697 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวให้กระแสที่เกิดจากกระบวนการแพร่ Diffusion-controlled เมื่อนำอัตราสแกนมาเขียนกราฟกับรากที่สองของอัตราสแกนจะให้กราฟที่เป็นเส้นตรงที่อัตราสแกนต่ำ เมื่ออัตราสแกนสูงขึ้นเส้นกราฟจะเริ่มเบี่ยงเบนจากเส้นตรงไปทางลบมากขึ้น

4.1.5 ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า

ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวหาโดยทดสอบกับโคพามีนเข้มข้น 1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 200, และ 400 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 นำค่ากระแสไปพลอตกราฟหาความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับกระแสของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดสอบกับ โดพามีนเข้มข้น 1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 200, และ 400 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

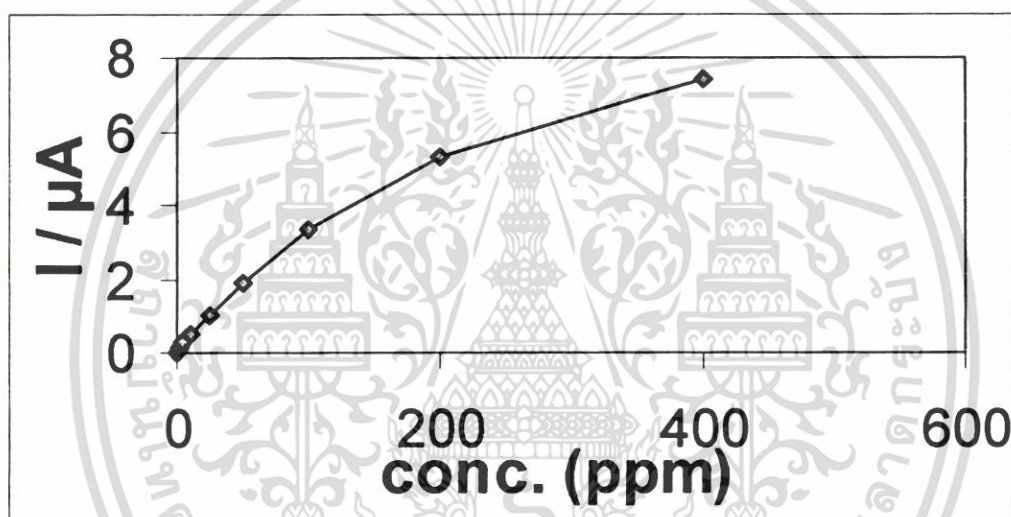


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของโดพามีนโดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

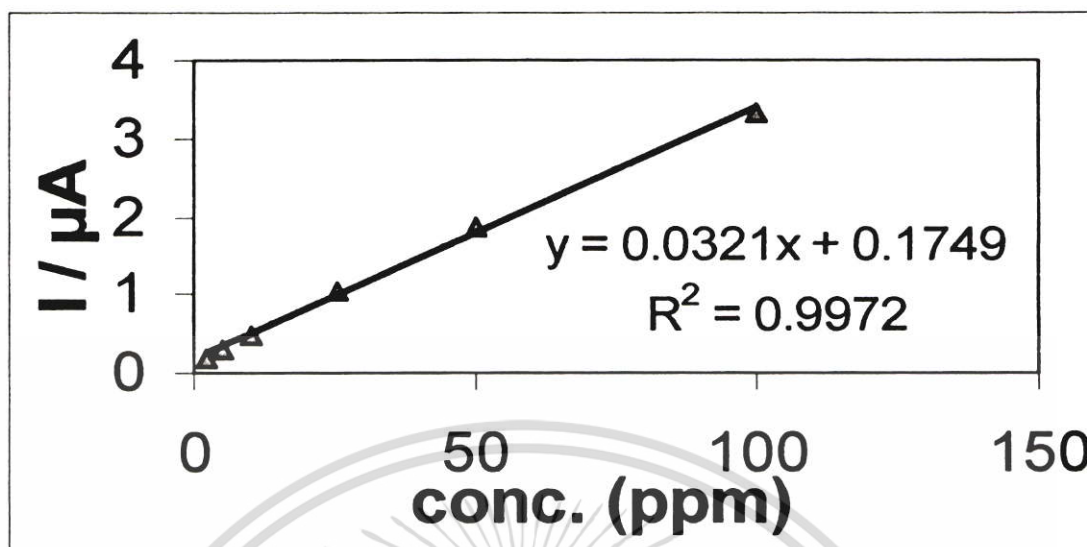
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11-4.12 พบว่าช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ในช่วง 2.5-25 ppm ($R^2=0.9766$) Miller, J.C. [25] ค่า R^2 ที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง 0.99-0.90 ถ้าค่าต่ำกว่านี้ถือว่าผิดปกติ โดยตัดค่าที่มีความเบี่ยงเบนมากกว่า 5% ทั้ง ชิดจำกัดในการตรวจวัดโคพามีนเท่ากับ 0.021 ppm สัญญาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.033 μA รายละเอียดการคำนวณอยู่ที่ภาคผนวก ก1

การหาช่วงความเป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือยทำเหมือนกันกับขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่วัดได้กับความเข้มข้นของโคพามีนดังรูปที่ 4.13-4.14



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับกระแสของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน (Bare-GC) กับโคพามีนเข้มข้น 1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100, 200, และ 400 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

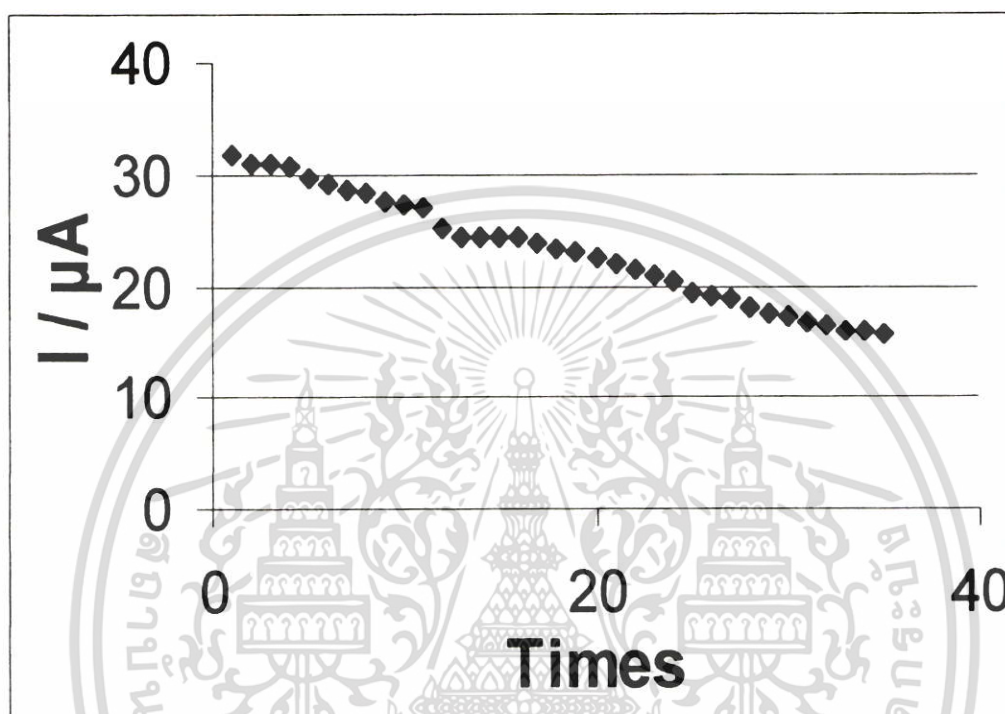


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของโคพามีน โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือย (Bare-GC) มีช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 2.5-100 ppm ($R^2=0.9972$) เมื่อเปรียบเทียบช่วงความเป็นเส้นตรงระหว่างขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์กับขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน (Bare-GC) พบว่าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนมีช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงกว้างกว่าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ ซึ่งโดยหลักการแล้วขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์น่าจะมีช่วงความเป็นเส้นตรงกว้างกว่าเพราะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ดีกว่า อาจเป็นเพราะซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์เมื่อแขวนลอย (Suspension) อยู่ใน DMF มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับ DMF กระบวนการเตรียมการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าแต่ละครั้งได้ความหนาของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ที่เกาะบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนไม่สม่ำเสมอเท่ากันทุกครั้งทำให้ค่ากระแสที่ตรวจวัดไม่ดีเท่าที่ควร ถ้าเป็นขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือยเมื่อนำมาขัดด้วยผงขัดแล้วผิวหน้าขั้วยังเรียบสม่ำเสมอทำให้ค่ากระแสที่ตรวจวัดดีกว่า

4.1.6 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า

มีความจำเป็นต้องหาอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยคาร์บอนนาโนทิวบ์เพราะเมื่อทำการทดลองในสารละลายนานๆ หรือวัดซ้ำบ่อยๆ กระแสที่ได้ลดลงเรื่อยๆ จากรูปที่ 4.15 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าในงานวิจัยนี้คือ 34 ครั้ง



รูปที่ 4.15 แสดงอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดสอบกับโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

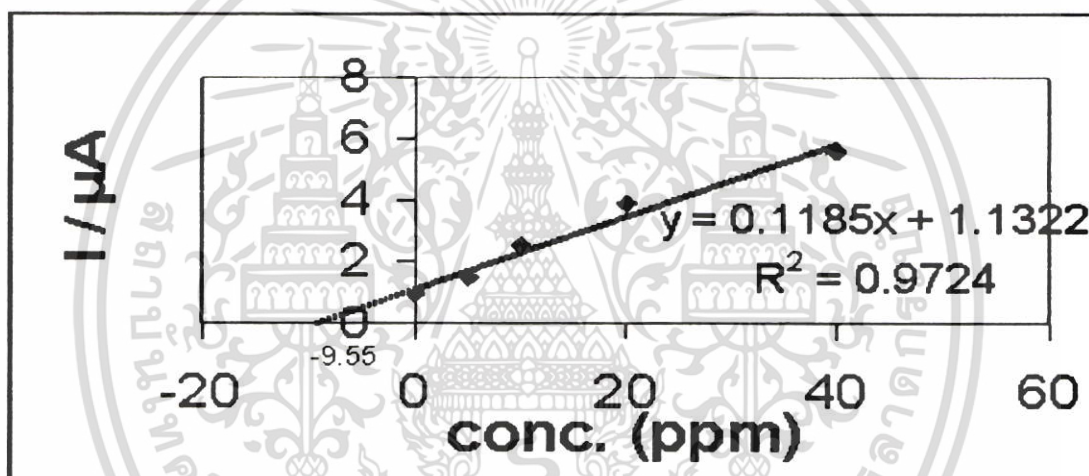
4.1.7 ค่าการทำซ้ำ [30]

ค่าการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ทดสอบกับโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 นำค่ากระแสไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ได้ค่า %RSD เท่ากับ 8.42 ค่าการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือย (Bare-GC) มีค่า %RSD เท่ากับ 4.85 ค่าที่คำนวณอยู่ในภาคผนวก ก. ค่าการทำซ้ำที่ดีควรมีค่าน้อยๆ ค่าการทำซ้ำที่ดีของเทคนิคโวลแทมเมทรีควรอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ [20] ค่าการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือยอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 10\%$ แสดงว่าขั้วไฟฟ้ามี่ค่าการทำซ้ำที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

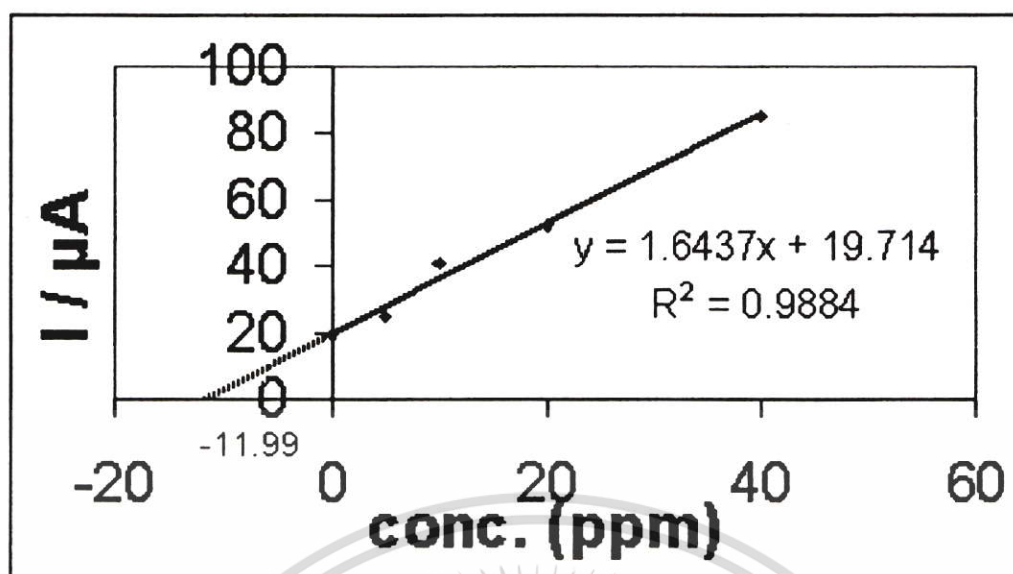
4.1.8 ตรงจวัดโคพามีนในตัวอย่างยา

ปิเปตสารละลายตัวอย่างยาโคพามีนจากหลอดยาซึ่งระบุเข้มข้นของยาเท่ากับ 250mg/10mL มา 1.0 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 mL ปรับปริมาตรด้วย 0.1 โมลาร์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 จากนั้นปิเปตสารละลายตัวอย่างยาโคพามีนมา 2.5 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL ปรับปริมาตรด้วย 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 จากนั้นปิเปตมา 1.0 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL จำนวน 5 ขวด แต่ละขวดเติมสารละลาย 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 จำนวน 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายมาตรฐานโคพามีนเข้มข้น 250 ppm จำนวน 0, 0.5, 1, 2 และ 4 มิลลิลิตร ในแต่ละขวดปรับปริมาตรด้วยสารละลาย 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ให้ถึงขีดปริมาตร และสุดท้ายแต่ละขวดจะมีความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโคพามีน 0, 5, 10, 20 และ 40 ppm ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ยาโคพามีนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรดเรซินเซลลูลอสโพลารोगราฟีตรวจวัด โดยขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนเปลือย (Bare-GC) ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

จากรูป 4.16 เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเปลือยตรวจวัดตัวอย่างยาโดยวิธีเติมสารละลายมาตรฐาน คำนวณความเข้มข้นของตัวอย่างยาจากสมการความชันของกราฟพบว่าตัวอย่างยามีความเข้มข้น 9.55 ppm เมื่อคำนวณความเข้มข้นย้อนกลับตัวอย่างยามีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 23875 ppm จากหลอดยาระบุว่าตัวอย่างยามีความเข้มข้น 250mg/10mL คิดเป็น 95.5% recovery



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ยาโคพามีนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรดรีนเซียลพลัสโพลาโรกราฟีตรวจวัดโดยขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ใน 0.1 โมลาร์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5

จากรูปที่ 4.17 เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ตรวจวัดตัวอย่างยาโดยวิธีเติมสารละลายมาตรฐานคำนวณความเข้มข้นของตัวอย่างยาจากสมการความชันของกราฟพบว่าตัวอย่างยามีความเข้มข้น 11.99 ppm เมื่อคำนวณความเข้มข้นย้อนกลับตัวอย่างยามีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 29750 ppm จากหาค่าร้อยละว่าตัวอย่างยามีความเข้มข้น 250mg/10mL คิดเป็น 119.9% recovery ค่าที่ได้ถือว่าไม่คืบค เพราะควบคุมความหนาของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้มีความหนาเท่ากันตลอดการทดลองนั้นทำได้ยากมาก และสารแขวนลอยของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์กระจายตัวไม่ดี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ เมื่อนำมาตรวจวัดโคพามีนด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีใช้อัตราการสแกน (Scan Rate) 50 mV/s พบว่าได้ค่ากระแสมากกว่าขั้วไฟฟ้าทอง ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมและขั้วกราฟไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วกลาสติคาร์บอนเปลือย (bare-GC) ในการตรวจวัดโคพามีนเข้มข้น 100 ppm ค่ากระแสขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่ามากกว่านอกจากทดสอบกับโคพามีนแล้วยังไปทดสอบกับ 0.001 โมลาร์ $K_3(Fe(CN)_6)$ ซึ่งเป็นสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้ดี ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้ค่ากระแสที่ได้สูงกว่าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือย สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยคือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ช่วงความเป็นกรด-เบสของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์คือ pH 7.5 ปริมาตรซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้ในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 10 μ L ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากการสแกนพบว่าปฏิกิริยาแบบการแพร่ (Diffusion-controlled, $R^2=0.9441$) ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง ค่าการทำซ้ำและอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคคิพเฟอร์เรนเจียลพัลส์โพลารोगราฟี ช่วงความเป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์อยู่ในช่วง 2.5 ถึง 25 ppm ($R^2=0.9766$) ซีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.021 ppm ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือยช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 100 ppm ($R^2=0.9972$) เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ตรวจวัดตัวอย่างยาโคพามีนได้ค่า %Recovery เท่ากับ 119.9% ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนเปลือยมีค่า %Recovery เท่ากับ 95.5% อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถวัดได้ 34 ครั้ง ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 0.021 ppm (S/N=3), สัญญาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.033 μ A และค่าการทำซ้ำ (%RSD, n=20) เท่ากับ 8.42 ส่วนขั้วไฟฟ้าเปลือยค่าการทำซ้ำ (%RSD, n=20) เท่ากับ 4.85

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรหาวิธีการรีงิ้วไฟฟ้าให้มีความหนาของแผ่นฟิล์มเท่ากันทุกครั้งที่เวลาปรับปรุงรีงิ้วไฟฟ้า เพื่อให้ตรวจวัดโคพามินให้ค่ากระแสคงที่สามารถลดค่า %RSD และค่า%Recovery ลงจากเดิม เพื่อให้รีงิ้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าการทำซ้ำที่ดี วิธีการรีงิ้วไฟฟ้าอาจใช้ Nafion เป็นตัวยึกระหว่างซิงเกิลวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์กับรีงิ้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนแทน DMF แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีของผู้วิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, J. et.al. 2001. "Electrocatalytic Oxidation of 3,4-dihydroxyphenylacetic acid at a Glassy Carbon Electrode Modified with Single-wall Carbon Nanotubes." **Electrochimica Acta**. 47 : 651-657.
- [2] Tzeng, Y. and Liu, C.C. 2003. "Electrical contacts Between Carbon Nanotube Coated Electrodes." **Dimond and Related Materials**. 12 : 744-779.
- [3] Rubianes, M.D. and Rivas, G.A. 2003. "Carbon Nanotube Paste Electrode." **Electrochemistry Communications**. 5 : 689-694.
- [4] 2005. **Parkinson Disease**. [Online]. Available : http://www.psychnet-uk.com/clinical_psychology/clinical_psychology_cognitive_disorders3_parkinsons.htm.
- [5] Echizen, H., Itoh, R. and Tshizaki, T. 1989. "Adenosine and Dopamine Simultaneously Determined in Urine by Reversed-Phase HPLC, with on-line Measurement of Ultraviolet Absorbance and Electrochemical detection." **Clinical Chemistry**. 35 : 64-68.
- [6] Michotte, Y., Deleu, D. and Ebinger, G. 1985. "The use of Capillary gas Chromatography /Mass Spectrometry for the Determination of Acidic Dopamine Metabolites in Human Brain." **Biomed Mass Spectrom**. 12 :704-706.
- [7] Gowda, B.G., Melwanki, M.B. and Seetharamappa, J. 2001. "Spectrophotometric Detection of Certain Vicinal Dihydroxybenzene Derivatives in Pharmaceutical Preparations." **Analytical Sciences**. 17 : 533-534.
- [8] Wang, Z. et. Al. 2002. "Carbon Nanotube-Modified Electrode for the Sumultaneous Determination of Dopamine and Ascorbic Acid." **Analyst**. 127 : 653-658.
- [9] Ciszewaki, A. and Milczarek, G. 1999. "Polyeunol-Modified Platinum Electrode for Selective Detection of Dopamine in the Presence of Ascorbic Acid." **Anal. Chem**. 71 : 1055-1061.
- [10] Skoog, D.A., Holler, F.J. and Nieman, T.A. **Principles of Instrumental Analysis**. 5th ed. U.S.A. : Harcourt Brace & Company. 1998. pp. 564-670.
- [11] 2005. "Cyclic Voltammetry." [Online]. Available : <http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Chemistry/Electrochemis/Electrochemical/CyclicVoltammetry/CyclicVoltammetry.htm>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Gosser, Jr.D.K. **Cyclic Voltammetry Simulation and Analysis of Reaction Mechanisms**. New York. : VCH Publishers. 1993. pp. 27-69.
- [13] Ajayan, P.M., Charliert, J.C. and Rinzler, A.G. 1999. "Carbon Nanotubes: From Macromolecules to Nanotechnology." [Online]. Available : <http://www.pnas.org/cgi/content/full/96/25/14199>.
- [14] 2005. "IBM's Carbon Nanotube". [Online]. Available: <http://e-mag.en.kku.ac.th/index.php?op=display&id=44>.
- [15] 2005. "Chip Evolution: IBM Scientists Develop Breakthrough Transistor Technology with Carbon Nanotubes." [Online]. Available : http://domino.research.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/news.20010425_Carbon_Nanotubes.html.
- [16] Meyyappan, M. **Carbon Nanotubes Science and Applications**. Florida : CRC Press. 2004. pp. 2, 65-98.
- [17] 2005. "Synthesis of Carbon Nanotubes by Chemical Vapor Deposition". [Online]. Available : http://www.thaiscience.com/lab_vol/p13/p13cabon%20nanotubes.htm.
- [18] **The Merck Index**. 13th ed. USA. : Merck & Co.Inc. 2001. pp. 602.
- [19] Zao, Y. et. al. 2005. "Selective Detection of Dopamine in the Presence of Ascorbic Acid and Uric Acid by a Carbon Nanotubes-Ionic Liquid gel Modified Electrode." **Talanta**. 66 : 51-57.
- [20] 2005. "Dopamine - A Sample Neurotransmitter)". [Online]. Available: <http://www.utexas.edu/research/asrec/dopamine.html>.
- [21] van den Bosch. A. P. M. 2005. "The Dopamine Theory of Parkinson's Disease". [Online]. Available: <http://tcw2.ppsw.rug.nl/~vdbosch/pd.html>.
- [22] Falat, L. and Cheng, H.Y. 1982. " Voltammertric Differentiation of Ascorbic Acid and Dopamine at anElectrochemically Treated Graphite/Epoxy Electrode." **Anal. Chem**. 54 : 2108.
- [23] Valentini, F. et. al. 2003. " Carbon Nanotube Purification: Preparation and Characterization of Carbon Nanotube Pasre Electrodes." **Anal. Chem**. 75 : 5413.
- [24] Xue, K.H. et. al. 2004. " Investigation of the Electrochemical Behaviors of Dopamine on the Carbon Atom Wire Modified Electrode." **Chemical Physics Letters**. 391 : 243.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Gelbert, M.B. and Curran, D.J. 1986. " Alternating Current Voltammetry of Dopamine and Ascorbic Acid at Carbon Paste and Stearic Acid Modified Carbon Paste Electrodes." **Anal. Chem.** 58 : 1028-1032.
- [26] Miller, J.C. and Miller, J.N. **Statistics for Analytical Chemistry**. 3rd ed. Great Britain : Ellis Horwood. 1993. pp. 101-139.
- [27] Yan, Xu-Xu., et. al. 2004. " Electrochemical Behavior of L-Dopa at Single-wall Carbon Nanotube-Modified Glassy Carbon Electrode." **J. Electroanal. Chem.** 569 : 47-52.
- [28] Britto, P.J., Santhanam, K.S.V. and Ajayan, P.M. 1996. "Carbon Nanotube for Oxidation of Dopamine." **Bioelectrochem. Bioenerg.**, 41 : 121-125.
- [29] 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." **Analytical Biochemistry.** 318 : 100-106.
- [30] Settle, F.A. 1997. **Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry**. New Jersey : Prentice Hall. pp. 710.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกฏนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้า

ทำการทดสอบและคำนวณตามวิธีของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)

ก.1 การคำนวณขีดจำกัดการตรวจหา

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100 ppm ตามลำดับ นำขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มาตรวจวัดโคพามีน ใน 25 mL ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 มาตรวจวัดด้วยเทคนิคโพลาไรซ์เรซินเชลล์พัลส์โพลาริกราฟี ในช่วง -0.3 ถึง 0.6 โวลต์ นำผลการทดลองที่ได้มาสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นกับกระแสที่วัดได้แล้วเลือกช่วงความเข้มข้นที่ให้สัญญาณเป็นเส้นตรง สามารถหาความชันของกราฟได้จากสมการ

$$Y = aX + b$$

เมื่อ a คือ ความชันของกราฟ

b คือ จุดตัดแกน Y

ค่าความชันของ โคพามีนเท่ากับ 0.132

2. เมื่อหาความชันของกราฟได้แล้ว นำสารละลายที่ปราศจากโคพามีน (blank) นำไปทดลองเช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐานนำค่าสัญญาณรบกวน (noise) จากค่าที่ตรวจวัดได้จำนวน 20 ค่ามาคำนวณหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{ค่าเฉลี่ย blank } (\bar{Y}) = \frac{\sum_{j=1}^{n_B} Y_{B_j}}{n_B}$$

$$\text{Standard Deviation of blank } (S_B) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_B} (Y_{B_j} - \bar{Y})^2}{(n_B - 1)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระแส background

ครั้งที่	I (μA)	ครั้งที่	I (μA)
1	0.008	11	0.026
2	0.011	12	0.011
3	0.021	13	0.013
4	0.007	14	0.011
5	0.008	15	0.022
6	0.019	16	0.028
7	0.008	17	0.018
8	0.014	18	0.012
9	0.012	19	0.009
10	0.010	20	0.018
รวม	0.286		
ค่าเฉลี่ย	0.0143		
S _B	0.00625		

3. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสัญญาณต่ำสุดที่สามารถวัดได้และค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด

$$\text{Limit of Detection } (Y_L) = \bar{Y}_B + (3S_B)$$

(เมื่อ 3 คือค่า k = confidence level of 99.86% เมื่อ $Y_L \geq \bar{Y}_B + 3(S_B)$)

$$\text{ขีดจำกัดการตรวจวัด } (C_L) = \frac{(Y_L - \bar{Y}_B)}{a} \text{ หรือ } C_L = \frac{3(S_B)}{a}$$

เมื่อ Y_L คือ สัญญาณต่ำสุดที่วัดได้

\bar{Y}_B คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณจาก Blank

S_B คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Blank

C_L คือ ความเข้มข้นต่ำสุดที่วัดได้

a คือ ความชันของกราฟ (สภาพไว)

$$\text{สัญญาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้} = 0.0143 + 3 \times 0.00625$$

$$= 0.03305 \mu\text{A}$$

$$\text{ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดโคพามีน} = (3 \times 0.00625) / 0.8917 = 0.021 \text{ ppm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ค่าการทำซ้ำ

ค่าการทำซ้ำของการวิเคราะห์หาค่าได้โดยใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) ซึ่งหาได้โดยการหารค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานด้วยค่าเฉลี่ย ค่า RSD นิยมนำเสนอในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เรียกว่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variation, CV)

$$\%RSD, CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100$$

S = standard deviation

\bar{X} = ค่าเฉลี่ย

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{(N-1)}}$$

N = จำนวนครั้งที่ทดลองทั้งหมด

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

ค่าการทำซ้ำหาได้โดยทดสอบกับโดพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 ใช้เทคนิคโพลาไรซ์เรซินซิลิเกต ศึกษาในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.3 ถึง 0.6 โวลต์ หลังจากตรวจวัดเสร็จบันทึกกระแสไว้น้ำจืดไฟฟ้าไปล้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ออกหลังจากนั้นนำจืดไฟฟ้าไปขัดแล้วทำการปรับปรุงจืดไฟฟ้าด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ใหม่ ทำซ้ำตามเดิมอีก 20 ครั้ง นำค่ากระแสที่ได้ไปคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้า SWNTs-GC

ครั้งที่	กระแสที่ได้จาก 100 ppm โคพามีน (μA)
1	31.7
2	44.0
3	33.9
4	35.1
5	32.8
6	38.7
7	36.5
8	34.8
9	40.0
10	41.0
11	39.0
12	37.6
13	33.8
14	36.5
15	38.3
16	34.6
17	35.1
18	36.3
19	32.9
20	37.6
ค่าเฉลี่ย	36.51
s	3.075352
%RSD	8.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้า Bare-GC

ครั้งที่	กระแสที่ได้จาก 100 ppm โดพามีน (μA)
1	3.5
2	3.81
3	3.64
4	3.29
5	3.62
6	3.47
7	3.32
8	3.77
9	3.46
10	3.76
11	3.21
12	3.86
13	3.56
14	3.46
15	3.47
16	3.63
17	3.67
18	3.51
19	3.49
20	3.53
ค่าเฉลี่ย	3.5515
s	0.172177
%RSD	4.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

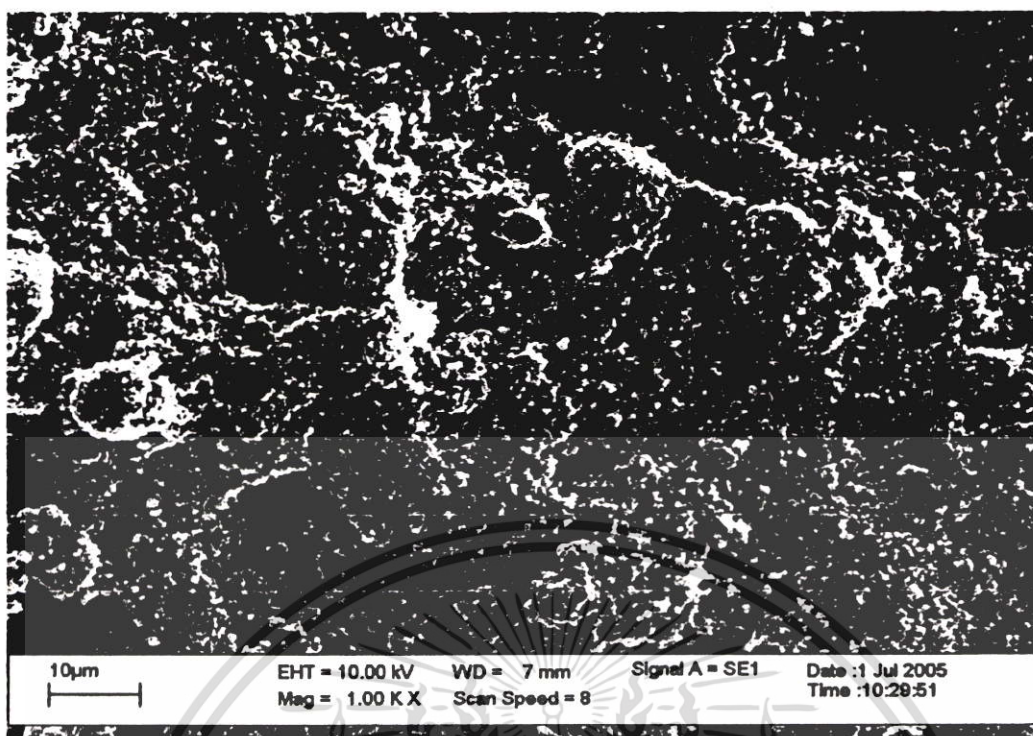
ก.4 อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้า

นำขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนปรับปรุงด้วยซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์หาโดยทดสอบกับ โคพามีนเข้มข้น 100 ppm ใน 0.1 M ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7.5 บันทึกกระแสไว้ นำขั้วไฟฟ้าออกจากเซลล์ที่ทดลองนำมาผ่านน้ำปราศจากไอออนทิ้งไว้ให้แห้งแล้วนำมาทดลองซ้ำ นับจำนวนครั้งที่ทดลองที่ทำให้กระแสลดลงครึ่งหนึ่ง

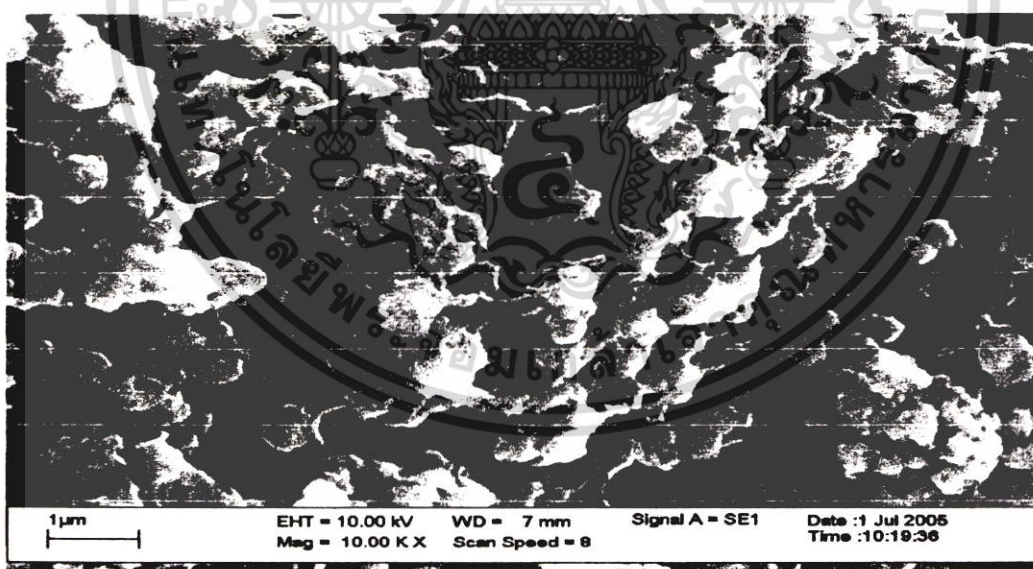
ตารางที่ ก.4. แสดงจำนวนครั้งที่วัดกระแสออกซิเดชันของโคพามีน

ครั้งที่ ทดลอง	กระแสจาก 100 ppm โคพามีน μA	ครั้งที่ ทดลอง	กระแสจาก 100 ppm โคพามีน μA
1	31.7	21	21.9
2	31.0	22	21.5
3	30.9	23	21.0
4	30.7	24	20.4
5	29.7	25	19.3
6	29.1	26	19.1
7	28.5	27	18.7
8	28.3	28	18.1
9	27.6	29	17.5
10	27.2	30	17.1
11	26.9	31	16.8
12	25.2	32	16.4
13	24.3	33	16.0
14	24.5	34	15.9
15	24.5	35	15.6
16	24.4		
17	23.8		
18	23.4		
19	23.0		
20	22.6		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

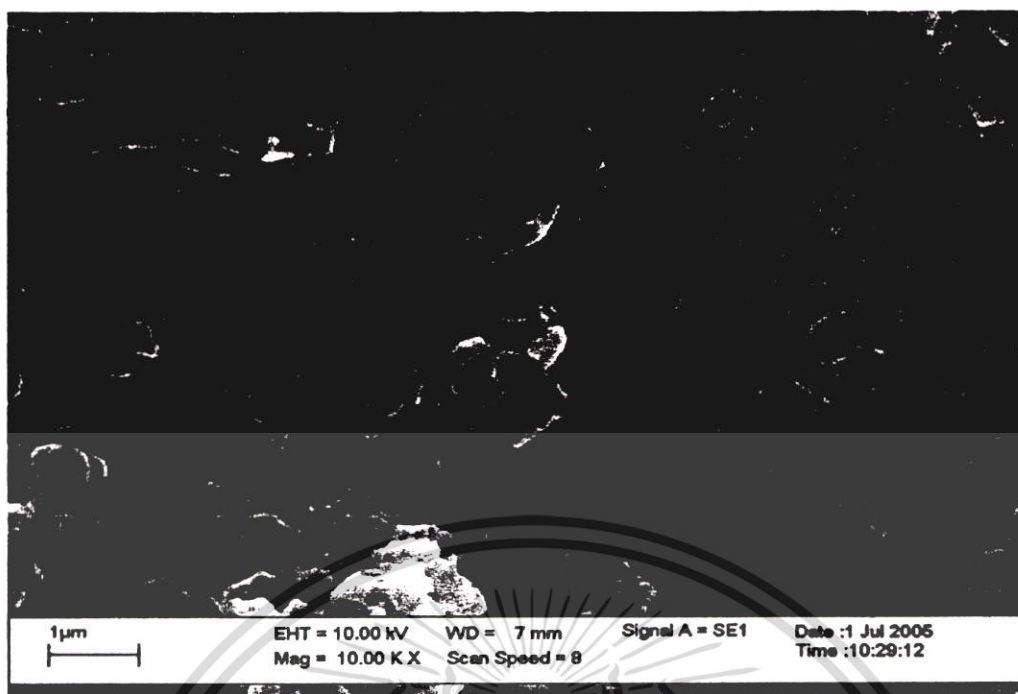


รูปที่ ก1 แสดงภาพถ่าย SEM ของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิว์บนผิวของคาร์บอนเทป
กำลังขยาย 1,000 x



รูปที่ ก2 แสดงภาพถ่าย SEM ของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิว์บนผิวของคาร์บอนเทป
กำลังขยาย 10,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกวนนำไปใช้



x

รูปที่ 33 แสดงภาพถ่าย SEM ของซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบนผิวของคาร์บอนเทป
กำลังขยาย 10,000 x



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายโสภณัฐ เชื้อคำช้าง เกิดเมื่อวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2519 ที่จังหวัดนครพนม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี จากมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ในปีการศึกษา 2542 และได้ทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัยที่ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นระยะเวลาประมาณ 1 ปี ในปีการศึกษา 2543 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี (เคมีวิเคราะห์) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกุนนำไปใช้