โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ศึกษาการตรวจวัดพาราควอตบนผิวขั้วพิมพ์สกรีนชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี
Study of Paraquat Detection on Various Surface Screen-Print Electrodes by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Square Wave Voltammetry (SWV)

ชื่อนิสิต นางสาวทิพากร วัฒนศิริชัยกุล เลขประจำตัว 5933043723

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศึกษาการตรวจวัดพาราควอตบนผิวขั้วพิมพ์สกรีนชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี

Study of Paraquat Detection on Various Surface Screen-Print Electrodes by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Square Wave Voltammetry (SWV)

โดย

นางสาวทิพากร วัฒนศิริชัยกุล

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

โครงการ ศึกษาการตรวจวัดพาราควอตบนผิวขั้วพิมพ์สกรีนชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี และสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี

โดย นางสาวทิพากร วัฒนศิริชัยกุล

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธรักษา วรานุศุภากุล ประธานกรรมการ
2. ศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา พุดหอม กรรมการ
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา อาจารย์ที่ปรึกษา

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา)
อาจารย์ที่ปรึกษา

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)
หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ 29 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2563

ชื่อโครงการ ศึกษาการตรวจวัดพาราควอตบนผิวขั้วพิมพ์สกรีนชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี และสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี
ชื่อนิสิตในโครงการ นางสาวทิพากร วัฒนศิริชัยกุล เลขประจำตัว 5933043723
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการตรวจวัดพาราควอตบนผิวขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดคาร์บอน (ขั้วไฟฟ้า C) คาร์บอนเคลือบทอง (ขั้วไฟฟ้า C/Au) และทอง (ขั้วไฟฟ้า Au) ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรีและเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เริ่มจากการเคลือบทองลงบนขั้วไฟฟ้า C พบว่ามีอนุภาคทองเคลือบบนผิวขั้วไฟฟ้าทำงาน 8.71% ของผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานทั้งหมด และเปรียบเทียบสัญญาณความต้านทานของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนทั้ง 3 ชนิด พบว่าขั้วไฟฟ้า C มีความต้านทานสูงที่สุด ตามด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ตามลำดับ จากนั้นวัดสัญญาณพาราควอตบนผิวขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนทั้ง 3 ชนิดด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี พบว่าขั้วไฟฟ้า C มีการตอบสนองต่อสัญญาณของพาราควอตได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au ที่บริเวณศักย์ไฟฟ้า -0.65 โวลต์ ขณะที่ขั้วไฟฟ้า Au ไม่สามารถวัดสัญญาณพาราควอตได้ ต่อมาทำการวัดความต้านทานของพาราควอตความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร บนผิวขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี พบว่าขั้วไฟฟ้า C ให้สัญญาณความต้านทานต่ำมาก ในขณะที่ไฟฟ้า C/Au สามารถวัดค่าความต้านทานได้ 180, 84 และ 24 มิลลิโอห์ม ตามลำดับ

คำสำคัญ: พาราควอต, สแควร์เวฟโวลแทมเมทรี, อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี, ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน

Project Title Study of Paraquat Detection on Various Surface Screen-Print Electrodes by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Square Wave Voltammetry (SWV)

Student Name Miss Tiphakorn Wattanasirichaikul Student ID 5933043723

Advisor Name Assistant Professor Dr. Charoenkwan Kraiya

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2019

Abstract

In this work, detection of paraquat signals on various surface screen-print electrodes which are carbon screen-print electrode (C) , gold deposited on carbon screen-print electrode (C/Au) and gold screen-print electrode (Au) using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and square wave voltammetry (SWV) were studied. Deposition of gold on the carbon screen-print electrode was verified to contain 8.71% gold particles on the working electrode surface. Resistivity of the all 3 screen-print electrodes were compared and showed that the C electrode had the highest resistivity followed by C/Au electrode and Au electrode, respectively. However, by square wave voltammetry, paraquat current responses at -0.65 V was the most dominate on the C electrode than the one on the C/Au electrode, while the Au electrode could not detect the paraquat signal. Then, resistivities of 1, 5 and 10 mg/L paraquat on the C electrode and C/Au electrode were determined using electrochemical impedance spectroscopy. The results showed that the C electrode had very low resistivity while the C/Au electrode had resistivities of 180, 84 and 24 mΩ for 1, 5 and 10 mg/L paraquat, respectively.

Keywords: Paraquat, Square-wave voltammetry, Electrochemical impedance spectroscopy, Screen-print electrode

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนตรวจทาน แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความใส่ใจตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธรักษา วรานุศุภากุล และศาสตราจารย์ ดร.ขนิษฐา พุดหอม ที่ให้เกียรติสละเวลาเป็นกรรมการสอบการวิจัยและตรวจสอบแก้ไขรายงานให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และเทคนิคปฏิบัติการอันเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และขอขอบคุณพี่ๆ ในห้องปฏิบัติการ และเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา รวมทั้งกำลังใจ และขอขอบคุณบิดามารดาที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมาจนสามารถดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
Abstract	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ฌ
สัญลักษณ์/คำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
1.4.1 พาราควอต	3
1.4.2 Aptamer	5
1.4.3 โวลแทมเมทรี	5
1.4.4 เทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี (SWV)	7
1.4.5 เทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี (CA)	8
1.4.6 เทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (EIS)	9
1.4.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	11
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
บทที่ 2 การทดลอง	14
2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	14
2.2 สารเคมี	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 การเตรียมสารละลาย 15

2.4 การเคลือบผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (ขั้วไฟฟ้า C) ด้วยสารละลายทอง โดยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี 17

2.5 การศึกษาสัณฐานและรายละเอียดบนพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทดสอบความต้านทานด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี 18

2.6 ทดสอบสัญญาณพาราควอตของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี และเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี 19

บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 21

3.1 การเคลือบผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนด้วยทอง และทดสอบผิวขั้วไฟฟ้าทำงานที่ได้ 21

3.2 การทดสอบสัญญาณของพาราควอตบนขั้วไฟฟ้าC, ขั้วไฟฟ้าC/Au และขั้วไฟฟ้าAu โดยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี 25

3.3 การตรวจวัดพาราควอตบนขั้วไฟฟ้า C, ขั้วไฟฟ้า C/Au, ขั้วไฟฟ้า Au ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี 29

บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง 33

เอกสารอ้างอิง 35

ภาคผนวก 37

ประวัติผู้วิจัย 39

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	คุณสมบัติของพาราควอต	3
2.1	การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์	16
2.2	การเตรียมสารละลายพาราควอตมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ร่วมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	16
2.3	การเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+}ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ร่วมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	17
3.1	แสดงค่าสัญญาณความต้านทานของ $Fe^{2+/3+}$ บนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนต่างชนิดกัน โดยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	23
3.2	ค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าของพาราควอตบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนต่างชนิดกัน โดยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี	27
3.3	เปรียบเทียบค่าความไว (Sensitivity) และค่าความเป็นเส้นตรง (R^2) ของสัญญาณพาราควอตบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนต่างชนิดกัน โดยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรีและเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	31

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	สัญญาณกระตุ้นชนิดต่างๆในเทคนิคโวลแทมเมทรี	6
1.2	สัญญาณกระตุ้นในเทคนิคแสควร์เวฟโวลแทมเมทรี	8
1.3	สัญญาณกระตุ้นในเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี (a) สัญญาณระหว่างศักย์ไฟฟ้า–เวลา (b) การตอบสนองระหว่างกระแส-เวลา	9
1.4	Nyquist plot ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์จินตภาพ (Z') และอิมพีแดนซ์จริง (Z')	11
3.1	ขั้วไฟฟ้า C และ ขั้วไฟฟ้า C/Au	21
3.2	พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au ที่กำลังขยาย1000 เท่า และ 10000 เท่า	22
3.3	พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า Au ที่กำลังขยาย 1000	22
3.4	กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณ $Fe^{2+/3+}$ ที่ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าC ขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	24
3.5	สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	25
3.6	สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	26
3.7	สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	26
3.8	กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	28
3.9	Nyquist plot ของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.10	Nyquist plot ของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	30
3.11	กราฟแสดงสัญญาณพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	30
5.1	Nyquist plot ของ $Fe^{2+/3+}$ ที่ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	37
5.2	Nyquist plot ของ $Fe^{2+/3+}$ ที่ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	37
5.3	Nyquist plot ของ $Fe^{2+/3+}$ ที่ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	38

สัญลักษณ์/คำย่อ

ขั้วไฟฟ้า C	ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (Carbon screen-print electrode)
ขั้วไฟฟ้า C/Au	ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเคลือบทองพิมพ์สกรีน (Gold deposited on carbon screen-print electrode)
ขั้วไฟฟ้า Au	ขั้วไฟฟ้าทองพิมพ์สกรีน (Gold screen-print electrode)
PQ	พาราควอต (Paraquat)
SWV	สแควร์เวฟโวแทมเมทรี (Square wave voltammetry)
EIS	อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (Electrochemical impedance spectroscopy)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พาราควอต (1,1-dimethyl-4,4-dipyridinium chloride) เป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืช ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากออกฤทธิ์ได้เร็ว และไม่ทำลายพืชผลหลักทางการเกษตร แต่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตอย่างมาก[1] หากร่างกายได้รับพาราควอตเข้าไป จากการตกค้างของพาราควอตในสิ่งแวดล้อม อาจจะเกิดอันตรายได้ โดยพาราควอตจะถูกรีดิวซ์ด้วย nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH)[2] ภายในเซลล์ กลายเป็นสารที่สามารถเปลี่ยนโมเลกุลของออกซิเจนอิสระให้กลายเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (superoxide radical) ที่สามารถทำลายพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่อยู่ในโมเลกุลฟอสโฟลิปิดที่เยื่อหุ้มเซลล์และไลโซโซม กลายเป็นลิปิดเปอร์ออกไซด์ และเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีต่อเนื่อง เยื่อหุ้มเซลล์และไลโซโซมจะถูกทำลาย และตายไป หรือเกิดสภาพอื่น เช่น การเสื่อมสภาพของอวัยวะ การแก่ การเกิดผังผืดเพิ่มขึ้น[2] หากพาราควอตทำให้เกิดอนุมูลอิสระดังกล่าว ที่อวัยวะสำคัญ เช่น ตับที่จะเสื่อมสภาพ อาจเป็นโรคตับเรื้อรัง การเสื่อมสภาวะของเนื้อเยื่อปิดที่เกิดเฉียบพลัน จนอาจจะทำให้เกิดการเสียชีวิตได้ จึงควรมีวิธีการตรวจวัดปริมาณของพาราควอตในสิ่งแวดล้อมจริง เพื่อที่จะสามารถระบุได้ถึงความเป็นอันตรายของสภาพพื้นที่นั้น

ในปัจจุบันได้มีวิธีการสำหรับการตรวจวัดปริมาณของพาราควอตหลากหลายวิธี ทั้งเทคนิคทางโครมาโตกราฟี[3] สเปกโตสโคปี[4] หรือเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า[5] ซึ่งวิธีการทางเคมีไฟฟ้านั้นตรวจวัดค่าได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำ เดิมมีการใช้ขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีนในการตรวจวัดพาราควอตด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี[6] ทางผู้จัดทำจึงมีความสนใจในการปรับปรุงพื้นผิวหน้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนด้วย Aptamer ซึ่งเป็น DNA, RNA สายเดี่ยว หรือ peptide ที่สามารถจับกับโมเลกุลเป้าหมายได้อย่างจำเพาะ โดยสามารถจับกับโมเลกุลต่าง ๆ ได้หลากหลาย[7] เช่น ไอออนของโลหะ (metal ion) สี (organic dye) กรดอะมิโน โปรตีน ไวรัส แบคทีเรีย และเซลล์ โดยอาศัย

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในโครงสร้าง 3 มิติให้เหมาะต่อการจับกับโมเลกุลนั้นๆ ซึ่งคาดว่าจะทำการเคลือบ Aptamer ลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อให้ผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามีความจำเพาะสำหรับการตรวจวัดพาราควอตมากขึ้น

โครงการนี้จึงสนใจปรับปรุงขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีนสำหรับตรวจวัดปริมาณพาราควอต โดยปรับปรุงผิวหน้าขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีนด้วย Aptamer สำหรับเพิ่มความจำเพาะต่อการตรวจวัดปริมาณพาราควอต เทียบกับขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีนที่ใช้อยู่เดิมโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (EIS) และเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี (SWV) เพื่อเป็นวิธีการทางเลือกสำหรับการตรวจวัดปริมาณพาราควอตในสภาพแวดล้อมจริง และสามารถระบุถึงความเป็นอันตรายของพื้นที่เหล่านั้นว่ามีความเป็นอันตรายมากน้อยเพียงใด จะได้ทำการจัดการพื้นที่เหล่านั้นได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

1.2.1 ปรับปรุงขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีนสำหรับการตรวจวัดปริมาณพาราควอต

1.2.2 เปรียบเทียบสัญญาณพาราควอตของขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีน (ขั้ว C), ขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีนเคลือบทอง (ขั้ว C/Au), ขั้วทองพิมพ์สกรีน (ขั้ว Au) ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีและสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่สามารถใช้ตรวจวัดปริมาณพาราควอตในงานภาคสนาม

1.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.1 พาราควอต

พาราควอต เป็นสารเคมีที่ใช้กำจัดวัชพืชชนิดดูดความชื้น (non-selective contact bipyridydium herbicide) ซึ่งจัดว่าเป็นสารที่มีอันตรายร้ายแรงที่สุด เมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่นๆในกลุ่มเดียวกัน โดยจะทำให้เกิดอันตรายต่ออวัยวะส่วนต่างๆของร่างกายที่สัมผัส ได้แก่ เล็บ ตา จมูก ปาก ผิวหนัง และหากพาราควอตเข้าสู่ร่างกายทางปาก ก็ทำให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินอาหารและทางเดินหายใจ และอาจทำให้ถึงแก่ชีวิตในที่สุด

1.4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

พาราควอตบริสุทธิ์อยู่ในรูปของเกลือจะมีสีขาว แต่ถ้าอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์จะมีสีเหลือง มีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีกลิ่น สำหรับพาราควอทคลอไรด์ ซึ่งเป็นรูปที่นำมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดวัชพืช มีคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของพาราควอต

ความถ่วงจำเพาะ ที่ 20 °C	1.240-1.260
จุดหลอมเหลว	175-180 °C
จุดเดือด	300 °C
ความสามรถในการละลายน้ำที่ 20 °C	700 g/L
ความเป็นกรดด่างในสภาพที่เป็นของเหลว	6.5-7.5

พาราควอตละลายในน้ำได้ดีและละลายได้เพียงเล็กน้อยในตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆ ในสภาพที่เป็นของเหลวจะเป็นสารที่ไม่ระเบิด และไม่ไวไฟ แต่มีคุณสมบัติในการกัดกร่อนโลหะ มีความเสถียรในสารละลายกรดหรือสารละลายกลาง แต่จะแตกตัวได้ง่ายในสารละลายเบส[8]

1.4.1.2 การใช้งานพาราควอต

พาราควอตเป็นสารที่ใช้กำจัดวัชพืช เนื่องด้วยคุณสมบัติที่เป็นสารดูดความชื้น โดยทั่วไฟใช้กับวัชพืชใบกว้างและหญ้า และใช้ได้ดีกับวัชพืชที่ยังอ่อนซึ่งมีความสูงน้อยกว่า 30 เซนติเมตร โดยจะมีฤทธิ์ในการทำลายเนื้อเยื่อสีเขียวของวัชพืช ปกติการใช้พาราควอตนั้นจะใช้ในพื้นที่ที่ไม่มีการปลูกพืชหรือในระหว่างแถวของแปลงผักหรือในสวนผลไม้ขณะยังไม่มีผล ตลอดจนถึงแปลงไม้ยืนต้นต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้ในการทำให้ใบฝ้ายร่วงก่อนกำหนดอีกด้วย สำหรับกรัมม็อกโซน (Gramoxone)[9] ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พาราควอตที่ใช้อย่างแพร่หลายในประเทศต่างๆ จะมีองค์ประกอบของพาราควอตไดคลอไรด์ ความเข้มข้น 200 g/L อัตราการใช้พาราควอตที่เหมาะสม คือ 250-1,500 g/ha แต่ถ้าใช้ในการปราบวัชพืชจำพวกหญ้าและตอควรจะเพิ่มความเข้มข้นถึง 2,200 g/ha สำหรับการเจือจางกับน้ำเพื่อใช้ในการฉีดพ่นควรใช้ความเข้มข้นในอัตรา 1-5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร และปริมาณการฉีดต่อพื้นที่ 200-500 ลิตร ของน้ำที่ผสมพาราควอตแล้วต่อพื้นที่ 1 hectare

1.4.1.3 ความเป็นอันตรายของพาราควอต

พาราควอตมีอันตรายต่อมนุษย์จนถึงแก่ชีวิตได้ การเสียชีวิตเนื่องจากพิษของพาราควอตเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อปีค.ศ. 1964 ต่อมาในปีค.ศ 1977 พบว่ามีผู้เสียชีวิตจำนวน 600 คน จากการตั้งใจกินเพื่อฆ่าตัวตายและอุบัติเหตุ นอกจากนี้ยังมีรายงานจากประเทศมาเลเซียว่า ในระหว่างปีค.ศ. 1977-1981 มีผู้ได้รับพิษจากพาราควอตทั้งสิ้น 310 คน และในจำนวนนี้ยังมีเสียชีวิตถึง 246 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 79 ของผู้ได้รับพิษทั้งหมด ส่วนในประเทศปาปัวกินีมีรายงานว่า มีผู้ได้รับพิษพาราควอตประมาณปีละ 100 คน

สำหรับในประเทศไทย จากการศึกษาของสำนักคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ[7] ซึ่งได้ทำการสำรวจสถิติเกี่ยวกับการได้รับพิษแบบเฉียบพลันจากสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ในปีพ.ศ. 2528 โดยรวบรวมข้อมูลจากโรงพยาบาลและสถานพยาบาลอื่นๆ อีกกว่า 250 แห่งทั่วประเทศ ปรากฏว่าพาราควอตเป็นสาร

ก่อให้เกิดการเจ็บป่วยและเสียชีวิตเป็นอันกับสองรองจากพาราไธออน แต่ถ้าพิจารณาในแง่ของจำนวนผู้เสียชีวิต แล้วพบว่า พาราควอตเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการเสียชีวิตสูงสุด กล่าวคือ มีผู้เสียชีวิตทั้งสิ้น 74 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 41 ของจำนวนผู้เสียชีวิตจากสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ทั้งหมด

1.4.2 Aptamer

Aptamer เป็นนิวคลีโอไทด์สายสั้น ๆ อาจเป็น RNA, ssDNA หรือ dsDNA ซึ่งมีการทำงานคล้ายกับ โมโนโคลนอลแอนติบอดี ถูกนำมาใช้ในในการจับโมเลกุล[10] โดยมีข้อได้เปรียบคือสามารถจับกับโมเลกุลได้อย่างจำเพาะ ความเสถียรที่อุณหภูมิห้องนาน สามารถสังเคราะห์ได้ง่าย และใช้เวลาอันรวดเร็ว อีกทั้งง่ายต่อการดัดแปลงโดยการเติมหมู่ฟังก์ชันเข้าไป นอกจากนี้สามารถเพิ่มความไว และความจำเพาะต่อการวิเคราะห์งานทางเคมีไฟฟ้า สามารถจัดย่อเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด พกพาได้สะดวก ในทางด้านนาโนเทคโนโลยี Aptamer ถูกนำไปดัดแปลงเกี่ยวกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้าอีกด้วย โดย Aptamer มักถูกนำมาใช้ในงานตัวตรวจวัดทางชีวภาพสำหรับการหาปริมาณของโมเลกุลขนาดเล็ก รวมถึงโลหะหนัก ยาปฏิชีวนะ สารสื่อประสาท นิวคลีโอไทด์ สารกำจัดศัตูพืช และยา

1.4.3 โวลแทมเมตรี

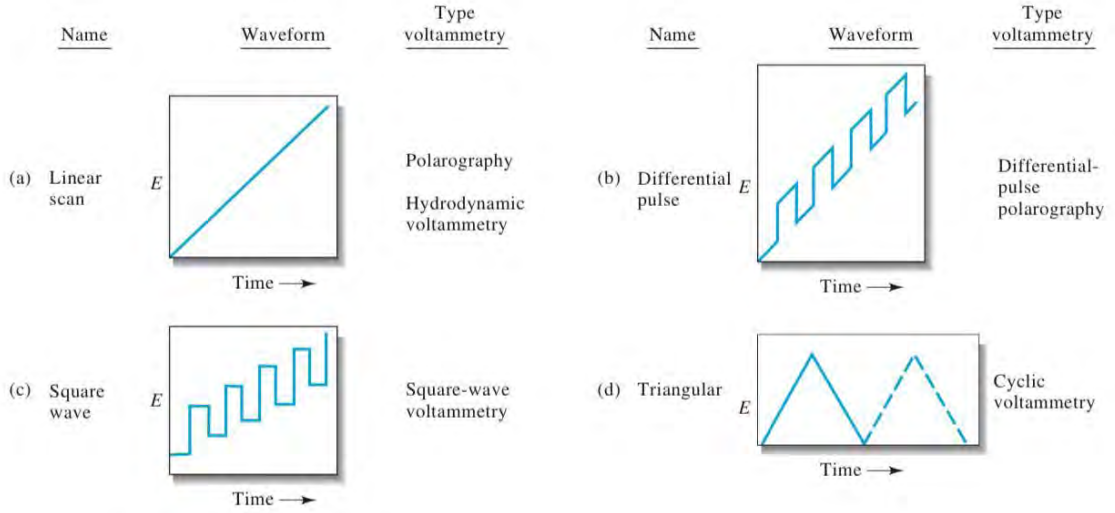
โวลแทมเมตรี (Voltammetry) เป็นกลุ่มของการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า ลักษณะสำคัญของการวิเคราะห์ทางโวลแทมเมตรี คือ มีการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าจุลภาค และมีการให้สัญญาณกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ แล้วทำการบันทึกกระแสไฟฟ้าตามศักย์ ที่ให้แก่วงจร สัญญาณกระตุ้นนี้ทำให้เกิดการตอบสนองที่มีลักษณะเฉพาะในรูปแบบกระแสไฟฟ้า โดยลักษณะโวลแทมโมแกรมที่ได้ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรเป็นรูปแบบใดเทียบกับเวลา โดยที่เรียกว่า “รูปคลื่น” (Wave form) รูปคลื่นทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าประเภทโวลแทมเมตรี มี 4 รูปแบบ ได้แก่

1) สัญญาณกระตุ้นแบบกวาดเชิงเส้นตรง (Linear sweep หรือ linear scan: LS)

2) สัญญาณกระตุ้นแบบคลื่นรูปสามเหลี่ยม (Cyclic voltammetry หรือ triangular: CV)

3) สัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์เชิงผลต่าง (Differential pulse: DP)

4) สัญญาณกระตุ้นแบบคลื่นรูปจัตุรัส (Square-wave: SW)



รูปที่ 1.1 สัญญาณกระตุ้นชนิดต่างๆในเทคนิคโวลแทมเมทรี (Voltammetry)[11]

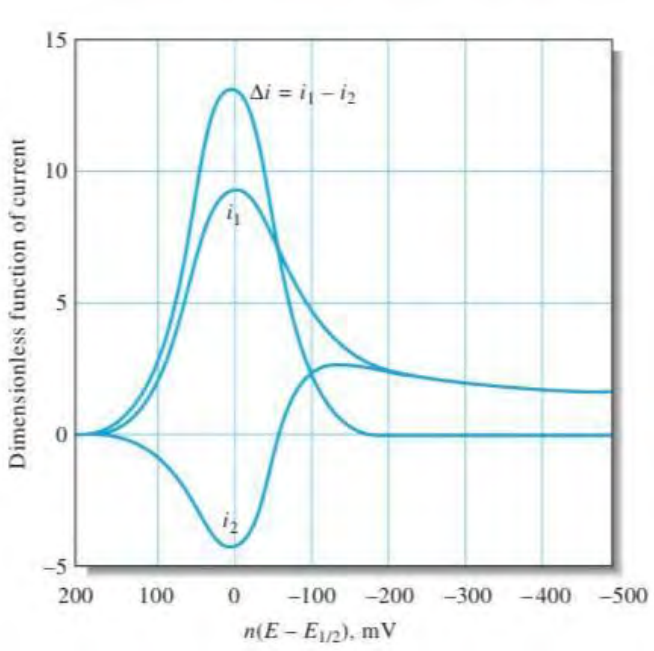
การวิเคราะห์ด้วยหลักการโวลแทมเมตรีนั้น ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ

1) เครื่องควบคุมสัญญาณทางไฟฟ้า ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ในการควบคุมศักย์ที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า โพเทนชิออสแตท (Potentiostat) และอุปกรณ์ในการอ่านค่ากระแสของวงจร จึงอาจเรียกส่วนการควบคุมสัญญาณไฟฟ้านี้ว่า Voltammetric analyzer ในเครื่องมือของการทำโวลแทมเมตรีนี้ อาจจะมีอุปกรณ์บันทึกผล แปลผลข้อมูล และอาจจะสร้างกราฟได้ด้วย

2) เซลล์เคมีไฟฟ้า ปัจจุบันการวิเคราะห์ของโวลแทมเมตรีธรรมดาทั่วไปนั้นจะใช้โพเทนชิออสแตท ชนิด 3 ขั้วไฟฟ้า (Tree-electrodes potentistat) ประกอบ ด้วยขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)[12] จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกื้อหนุนที่มีตัวอย่างที่สนใจจะวิเคราะห์อยู่ด้วย ขั้วไฟฟ้า (Electrode) เป็นองค์ประกอบหนึ่งในครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า

1.4.4 เทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี

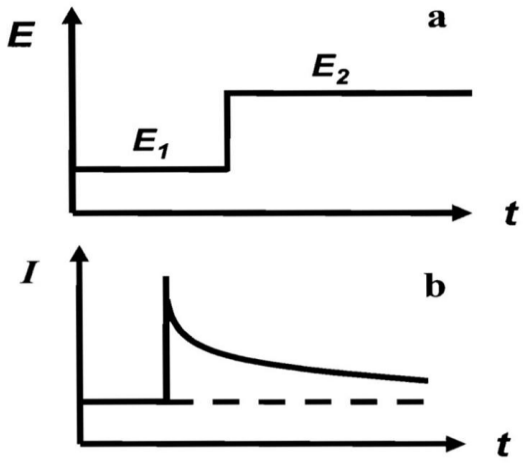
สแควร์เวฟเป็นสัญญาณกระตุ้นที่ให้กับวงจรแบบช่วงสั้น ๆ (พัลส์) ที่แตกต่างไปจากพัลส์ปกติ คือ สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้เสร็จสิ้นภายในเวลาไม่กี่วินาทีเท่านั้น ศักย์ไฟฟ้าจะถูกเพิ่มให้กับวงจรครั้งละ 10 มิลลิโวลต์ ทุก ๆ 5 มิลลิวินาที ในช่วงศักย์ไฟฟ้าเป็น 1 โวลต์ ใช้เวลาประมาณ 0.50 วินาที ศักย์ไฟฟ้าที่ให้มีลักษณะเป็นขั้นบันได (Staircase) ขณะเดียวกันจะให้ศักย์ไฟฟ้าในลักษณะของสแควร์เวฟกับวงจรที่ความถี่ประมาณ 200 เฮิร์ต (โดยทั่วไปอาจใช้ความถี่ได้ระหว่าง 100 ถึง 1000 เฮิร์ตซ์) ด้วยขนาดศักย์ไฟฟ้าประมาณ 50/n มิลลิโวลต์ในเวลา 5 มิลลิวินาที เท่ากับหนึ่งขั้นบันได ศักย์ไฟฟ้ารูปสแควร์เวฟที่ชันขึ้นตามแต่ละขั้นของบันไดศักย์ไฟฟ้านั้น ขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรนี้เพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง กระแสถูกวัดค่า 2 ครั้งต่อ 1 สแควร์เวฟ คือ ที่จุดสิ้นสุดของเวฟพัลส์เป็น i_1 และที่จุดก่อนเกิดพัลส์ใหม่เป็น i_2 ผลต่างของกระแส ($\Delta i = i_1 - i_2$) จะถูกบันทึกพร้อมกับศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 1.2 สัญญาณกระตุ้นในเทคนิคแสควร์เวฟโวลแทมเมทรี (Square wave voltammetry)[11]

1.4.5 เทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี

โครโนแอมเพอโรเมทรี (Chronoamperometry) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางไฟฟ้า โดยใช้รูปแบบคลื่นเป็นช่วงๆ (พัลส์) สามารถนำมาวิเคราะห์จลนศาสตร์และกลไกของปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า รูปคลื่นโดยทั่วไปของเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี เป็นแบบขั้วเดียว (รูปที่ 1.3a) ศักย์ไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงทันทีจากศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น E_1 ไปเป็นศักย์ไฟฟ้า E_2 ขณะที่เกิดปฏิกิริยาบนผิวขั้วไฟฟ้า จากนั้นการตอบสนองต่อกระแส faradic จะถูกวัดเป็นฟังก์ชันของเวลา (รูปที่ 1.3b)



รูปที่ 1.3 สัญญาณกระตุ้นในเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี (a) สัญญาณระหว่างศักย์ไฟฟ้า–เวลา, (b) การตอบสนองระหว่างกระแส-เวลา[13]

1.4.6 เทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

เทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ลักษณะของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้า[14] ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านวัสดุศาสตร์ เช่น ในการศึกษาลักษณะการเคลือบแบตเตอรี่หรือเซลล์เชื้อเพลิง รวมไปถึงการวิเคราะห์การแพร่ของไอออนผ่านเยื่อ และการศึกษารอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

หลักการของ EIS คือ การให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ ในรูปฟังก์ชันไซน์ (Sine wave) โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้า ที่มีค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้า (Amplitude) ในระดับ 10 - 50 มิลลิโวลต์ และปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วงระหว่าง 10^{-3} – 10^{5} เฮิร์ต เมื่อกำหนดศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งแล้วเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในรูปกระแสสลับ ป้อนให้แก่ระบบ แล้ววัดค่าความต้านทาน จากค่าความต้านทานที่ได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้านั้นๆ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์สามารถใช้บ่งบอกลักษณะการตอบสนองของกระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า หรือสัญญาณอื่นๆ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่สนใจได้

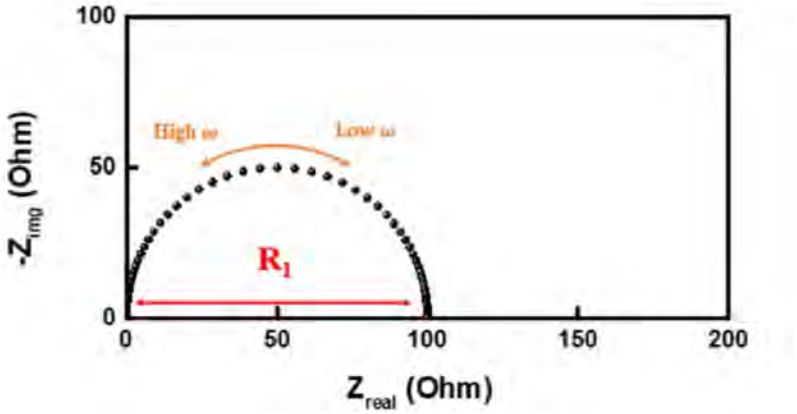
โดยทั่วไปการทดลองอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าจะประกอบด้วย

ก. เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Potentiostat) หรือเครื่องวัดกระแส (Galvanostat)

ข. เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองค่าความถี่ (Frequency Response Analyzer, FRA)

ค. เซลล์เคมีไฟฟ้า โดยเซลล์เคมีไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าพื้นฐาน 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE) และขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode, CE)

อิมพีแดนซ์ (Impedance) คือความต้านทานของศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ จะเท่ากับความต้านทาน (Resistance, R) เมื่อค่าต่างเฟส (Phase shift) ของศักย์ไฟฟ้า (E) และกระแส (I) มีค่าเท่ากับศูนย์ ขนาดของอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (Real Impedance, Z') และอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ (Imaginary Impedance, Z'') โดยอิมพีแดนซ์ส่วนจริง หมายถึง ค่าศักย์ไฟฟ้า (E) และกระแส (I) จะอยู่เฟสเดียวกับกระแส (In phase) ในทางตรงข้ามอิมพีแดนซ์จินตภาพค่าศักย์ไฟฟ้า (E) และ กระแส (I) จะอยู่ต่างเฟสกับกระแส (Out of phase) เมื่อนำค่าอิมพีแดนซ์ทั้งสองมาสร้างกราฟโดย ให้ค่าอิมพีแดนซ์จินตภาพ (Imaginary Impedance) บนแกน Y และอิมพีแดนซ์จริง (Real Impedance) บนแกน X จะได้กราฟที่มีลักษณะเฉพาะ เรียกการพล็อตว่า Nyquist plot ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้สามารถแปลให้อยู่ในรูปที่สัมพันธ์กับวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสม และเป็นข้อมูลคาดคะเนพฤติกรรม หรือสมรรถนะของขั้วไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่กำหนด เราจึงสามารถใช้ ลักษณะของกราฟ Nyquist plot ในการเทียบหาวงจรไฟฟ้าทีมีองค์ประกอบต่างๆ ที่เรียกว่า วงจรไฟฟ้าเทียบเท่า หรือ วงจรสมมูล (Equivalent Circuit)



รูปที่ 1.4 Nyquist plot ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์จินตภาพ (Z'') และอิมพีแดนซ์จริง (Z')[15]

1.4.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) อาศัยหลักการกราดไปบนพื้นผิวตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงที่ถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิด เมื่ออิเล็กตรอนดังกล่าวกระทบกับผิวชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยอะตอมต่างๆจะปล่อยสัญญาณที่สามารถนำไปประมวลผลและให้ข้อมูลเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ, องค์ประกอบของพื้นผิว และ คุณสมบัติอื่นๆ เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น[16] ส่วนประกอบของ SEM ประกอบไปด้วยส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ที่ เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตาม คอลัมน์ ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0-30 kV (บางเครื่องทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วย แอพเพอเจอร์ (aperture) หรือช่องเปิดที่มีลักษณะต่างๆ กันตามลักษณะการใช้งาน

จุดเด่นของ SEM คือ มีระยะชัดลึก และมีความสามารถแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูง เนื่องจาก SEM ใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ที่มีความยาวคลื่นที่สั้น ทำให้ SEM มีความสามารถแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบได้ ทำให้ได้ภาพที่มี

ความชัดลึกสูงร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy / EDS / EDX) โดยมีหลักการทำงานคือ การกระตุ้นวัตถุตัวอย่างโดยอนุภาคพลังงานสูง อันได้แก่ อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ อนุภาคจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่มาอย่างรวดเร็วมีพลังงานจลน์สูง เมื่ออนุภาคนี้ผ่านเข้ามาในอะตอมของวัตถุตัวอย่าง บางส่วนก็จะมีโอกาสที่จะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม ในการชนนี้ก็จะถ่ายทอดพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและโดยทั่วไปมักจะสูงมากพอที่จะหลุดออกไปจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าก็จะตกลงมาอยู่แทนที่ ในการตกลงมาอยู่ชั้นต่ำกว่านี้ อิเล็กตรอนก็จะต้องปล่อยหรือคายพลังงานที่มีอยู่มากเกินระดับที่ต้องการออกไป พลังงานที่คายออกมานี้จะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะ (characteristic x-ray)[17] ซึ่งจะบอกได้ว่าวัตถุตัวอย่างมี องค์ประกอบของธาตุใดบ้าง เนื่องจากแต่ละธาตุมีรังสีเอกซ์เฉพาะที่ไม่เหมือนกัน ข้อได้เปรียบในการใช้เทคนิค EDS คือ สามารถตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ในเวลาอันรวดเร็วและตรวจได้คราวละหลายๆ ธาตุพร้อมกัน นอกจากนี้ยังไม่ทำลายวัตถุตัวอย่างหรือทำให้วัตถุตัวอย่างสูญเสียสภาพเดิม และสามารถใช้วัตถุตัวอย่างในสภาพของแข็งได้ ดังนั้น เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS/EDX (SEM-EDS/EDX) ก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์ องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างได้ละเอียดและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2010 Jose A. Ribeiro และคณะ[18] ได้ตรวจวัดปริมาณพาราควอต โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทองที่ดัดแปลงผิวขั้วด้วยดีเอ็นเอ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี, ดิฟเฟอเรนพัลส์โวลแทมเมตรี และสเควร์เวฟโวลแทมเมตรี ได้พิสูจน์ว่า การตรึงดีเอ็นเอบนพื้นผิวไฟฟ้านั้น เพื่อสร้างตัวตรวจจัดทางชีวภาพ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความไว และขีดจำกัดในการตรวจวัดปริมาณพาราควอตได้ดีขึ้น

ในปี ค.ศ. 2014 Farahi และคณะ[19] วิเคราะห์สารละลายพาราควอต (PQ^{2+}) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเงิน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ ได้ผลที่ดีที่สุด ดังนี้ ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ แอมพลิจูด 50 มิลลิโวลต์ การเพิ่มขึ้นของการแสกน 5 มิลลิโวลต์ เวลาสะสม 120 วินาที ความถี่ 50 เฮิร์ต ระดับขั้นแอมพลิจูด 0.05 โวลต์ มีขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 7.1×10^{-9} โมลาร์สำหรับพีคที่ 1 และ 2.8×10^{-9} โมลาร์สำหรับพีคที่ 2 อีกทั้งสามารถวิเคราะห์ปริมาณพาราควอตในตัวอย่างนมได้สำเร็จ

ในปี ค.ศ. 2015 Gaini และคณะ[20] ใช้เทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ในการวิเคราะห์ปริมาณพาราควอต บนขั้วไฟฟ้าเงิน ที่สภาพความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 มิลลิเฮิร์ตถึง 100 กิโลเฮิร์ต ที่มีศักย์ไฟฟ้า 0.0 มิลลิโวลต์เทียบกับ Ag/AgCl โดยระบุความต้านทานการถ่ายโอนประจุเป็นความเข้มข้นขึ้นกับพารามิเตอร์ พื้นที่ผิวขั้วเงินดูดซับพาราควอต และกระบวนการถ่ายโอนประจุถูกควบคุมโดยการแพร่ (diffussion) พบว่ามีความสามารถในการทำซ้ำได้ดี (RSD=1.03%) ขีดจำกัดในการตรวจวัด 7.37×10^{-16}โมลาร์ และขีดจำกัดการวัดปริมาณ 24.59×10^{-16} โมลาร์ วิธีการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พาราควอตในตัวอย่างนมและมะเขือเทศ

ในปี ค.ศ. 2015 Mahmoud และคณะ[21] ได้รายงานเกี่ยวกับการพัฒนาแอปตาเซ็นเซอร์ให้ติดกับทองอนุภาคนาโน บนผิวของขั้วไฟฟ้ากลาสซี่คาร์บอน สำหรับการตรวจวัดปริมาณยาไอบูโพรเฟน ได้ว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงตั้งแต่ 0.005 ถึง 7 นาโนโมลาร์ ขีดจำกัดในการตรวจวัด 0.5 พิโคโมลาร์ ถือว่ามีความไวในการตรวจวัดกว่างานวิจัยก่อนหน้าอย่างมาก ทั้งยังเพิ่มความจำเพาะ ความเสถียร และช่วงความเป็นเส้นตรงที่กว้างขึ้น โดยสามารถนำไปใช้วินิจฉัยไอบูโพรเฟนในเลือดมนุษย์ได้

บทที่ 2
การทดลอง

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 เครื่องโพเทนชิออสแตท: Plamsens4 potentiostat และ PSTrace software version 5.6

2.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น IT-100

2.1.3 ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร

(ขั้วไฟฟ้าทำงาน : คาร์บอน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง : ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าช่วย : แพลทินัม)

2.1.4 ขั้วไฟฟ้าทองพิมพ์สกรีน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร

(ขั้วไฟฟ้าทำงาน : ทอง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง : ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าช่วย : แพลทินัม)

2.1.5 กล่องเชื่อมต่อสำหรับขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนกับเครื่องโพเทนชิออสแตท

2.1.6 ขวดกำหนดปริมาตร ขนาด 10.00, 25.00, 50.00 และ 100.00 มิลลิลิตร

2.1.7 บีกเกอร์ ขนาด 10, 100 และ 500 มิลลิลิตร

2.1.8 ไมโครปิเปต ขนาด 10.0 – 100.0, 100 - 1000 และ 500 - 5000 ไมโครลิตร

2.1.9 เครื่องชั่งน้ำหนัก 5 ตำแหน่ง

2.2 สารเคมี

2.2.1 พาราควอตไดคลอไรด์ (Paraquat dichloride: AR grade) จากบริษัท Fluka

2.2.2 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride: AR grade)

2.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: AR grade)

2.2.4 โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride: AR grade)

2.2.5 สารละลายทองมาตรฐาน (Gold standard solution) ความเข้มข้น 1000 mg/L

2.2.6 โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอเรต (II) ไตรไฮเดรต (Potassium hexacyanoferrate (II) trihydrate)

2.2.7 โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอเรต (III) (Potassium hexacyanoferrate (III))

2.2.8 Aptamer

2.2.9 6-เมอแคปโตเฮกซะนอล (6-Mercaptohexanol)

2.3 การเตรียมสารละลาย

2.3.1 สารละลายทองมาตรฐานความเข้มข้น 0.5 โมลาร์

ปิเปตสารละลายทองมาตรฐานความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (มวลโมเลกุล 393.833 กรัมต่อโมล) ปริมาตร 1.70 มิลลิลิตร ใส่ขวดกำหนดปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.3.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.19999 กรัม (มวลโมเลกุล 39.997 กรัมต่อโมล) ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดกำหนดปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.3.3 สารละลายมาตรฐานพาราควอตความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งพาราควอตไดคลอไรด์ 0.02500 กรัม (มวลโมเลกุล 257.158 กรัมต่อโมล) ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 250.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.3.4 สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์

ตารางที่ 2.1 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์

ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์	ความเข้มข้น (M)	ปริมาตร (mL)	น้ำหนักสารที่ต้องชั่ง (g)
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	1.000	50.00	2.92200
โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)	1.000	50.00	3.72757

ชั่งสารแต่ละชนิดตามน้ำหนักที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.1 ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดกำหนดปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.3.5 สารละลายมาตรฐานพาราควอตความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ปิเปตสารละลายมาตรฐานพาราควอตเข้มข้น 100.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1.000 โมลาร์ ปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 2.2 ใส่ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ตารางที่ 2.2 การเตรียมสารละลายพาราควอตมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ความเข้มข้นพาราควอต (ppm)	ปริมาตรพาราควอต (mL)	ปริมาตร NaCl (mL)	ปริมาตรรวม (mL)
1	0.10	1.00	10.00
5	0.50	1.00	10.00
10	1.00	1.00	10.00

2.3.6 สารละลายผสมระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอเรต (II) ไตรไฮเดรต (Potassium hexacyanoferrate (II) trihydrate) 0.42239 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดกำหนดปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ชั่งโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอเรต (III) (Potassium hexacyanoferrate(III)) 0.32943 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ใส่ขวดกำหนดปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

เก็บสารละลายทั้งสองรวมกันในขวดพลาสติก

2.3.7 สารละลายผสมระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ความเข้มข้นต่างๆในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ปิเปตสารละลายสารละลายผสมระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ความเข้มข้น 50.0 มิลลิโมลาร์ และสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1.000 โมลาร์ ปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 2.3 ใส่ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 10.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

ตารางที่ 2.3 การเตรียมสารละลายผสมระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ความเข้มข้น $Fe^{2+/3+}$ (mM)	ปริมาตร $Fe^{2+/3+}$ (mL)	ปริมาตร NaCl (mL)	ปริมาตรรวม (mL)
0.5	0.10	1.00	10.00
2.5	0.50	1.00	10.00
5	1.00	1.00	10.00

2.3.8 Aptamer ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์

ปิเปต Aptamer มาตรฐานความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ขวดกำหนดปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เก็บที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส

2.4 การเคลือบผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (ขั้วไฟฟ้า C) ด้วยสารละลายทอง โดยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี

2.4.1 เชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (ขั้วไฟฟ้า C) เข้ากับเครื่องโพเทนชิออสแตท ผ่านกล่องเชื่อมต่อ

2.4.2 ปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร หยดลงบนขั้วไฟฟ้า C ให้ครอบคลุมส่วนของขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วย ทำการไฮโดรไลซิสขั้วไฟฟ้า C โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เริ่มแสกนจากศักย์ไฟฟ้า 1.0 ถึง -1.0 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าลำดับขั้น 0.01 โวลต์ อัตราการแสกน 0.05 โวลต์ต่อวินาที จำนวน 5 ครั้ง ล้างผิวขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนด้วยน้ำกลั้น เช็ดด้วยกระดาษเช็ดทำความสะอาด

2.4.3 ทำการเคลือบผิว ขั้วไฟฟ้า C ด้วยสารละลายทองมาตรฐาน โดยการปิเปตสารละลายทองมาตรฐานความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร หยดลงขั้วลงบนขั้วไฟฟ้า C ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสแล้ว ทำการเคลือบผิวโดยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.62 โวลต์[17] เวลา 1 นาที แล้วล้างผิวขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนด้วยน้ำกลั้น เช็ดด้วยกระดาษเช็ดทำความสะอาด จากนั้นทำการเคลือบผิวซ้ำจนเห็นอนุภาคทองบนผิวขั้วไฟฟ้าทำงาน ด้วยตาเปล่า

2.5 การศึกษาสัณฐานและรายละเอียดบนพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทดสอบความต้านทานด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

2.5.1 สังเกตขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C กับขั้วไฟฟ้า C/Au ด้วยตาเปล่า และศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า C/Au เทียบกับ ขั้วไฟฟ้า Au โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.5.2 ทดสอบความต้านทานของขั้วไฟฟ้า C ขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ตามขั้นตอนดังนี้

1) เชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนที่ต้องการทดสอบเข้ากับเครื่องโพเทนชิออสแตทผ่านกล่องเชื่อมต่อ

2) ปิเปตสารละลายผสมระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ความเข้มข้นที่ต้องการที่ผสมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร หยดลงบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนให้ครอบคลุมผิวขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วย

3) ทดสอบสัญญาณ $Fe^{2+/3+}$ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรเคมีคัลอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี แสกนที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ (E_{dc}) 0.26 โวลต์, ศักย์ไฟฟ้าสลับ (E_{ac}) 0.1 โวลต์ และความถี่ 0.1-100,000 เฮิร์ต บันทึกค่าสัญญาณ แล้วล้างผิวขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนด้วยน้ำกลั่น เช็ดด้วยกระดาษเช็ดทำความสะอาด จากนั้นทำการวัดสัญญาณซ้ำอีกอย่างน้อย 2 ครั้ง

2.6 ทดสอบสัญญาณพาราควอตของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี และเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

2.6.1 เชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่ต้องการวัดสัญญาณ เข้ากับเครื่องโพเทนชิออสแตท ผ่านกล่องเชื่อมต่อ

2.6.2 ปิเปตสารละลายมาตรฐานพาราควอตความเข้มข้นที่ต้องการที่ผสมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร หยดลงบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนให้ครอบคลุมผิวขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วย

2.6.3 ทดสอบสัญญาณพาราควอตด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี และเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี โดย

1) กรณีทดสอบสัญญาณด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี เริ่มแสกนจากศักย์ไฟฟ้า -0.3 ถึง -1.2 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าลำดับขั้น 0.004 โวลต์ แอมพลิจูด 0.05 โวลต์ และความถี่ 15.0 เฮิร์ต บันทึกค่าสัญญาณ

แล้วล้างผิวขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนด้วยน้ำกลั่น เช็ดด้วยกระดาษเช็ดทำความสะอาด จากนั้นทำการวัดสัญญาณซ้ำอีกอย่างน้อย 2 ครั้ง

2) กรณีทดสอบสัญญาณด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี แสกนที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ (E_{dc}) -0.68 โวลต์, ศักย์ไฟฟ้าสลับ (E_{ac}) 0.1 โวลต์ และความถี่ 0.1-100,000 เฮิร์ต บันทึกค่าสัญญาณ แล้วล้างผิวขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนด้วยน้ำกลั่น เช็ดด้วยกระดาษเช็ดทำความสะอาด จากนั้นทำการวัดสัญญาณซ้ำอีกอย่างน้อย 2 ครั้ง

บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการตรวจวัดพาราควอตด้วยขั้วไฟฟ้าต่างชนิด ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (ขั้วไฟฟ้า C) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนเคลือบทอง (ขั้วไฟฟ้า C/Au) และขั้วไฟฟ้าทอง (ขั้วไฟฟ้า Au) ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือ เทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี และเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ได้ผลการทดลองดังนี้

3.1 การเคลือบผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนด้วยทอง และทดสอบผิวขั้วไฟฟ้าทำงานที่ได้

นำขั้วไฟฟ้า C มาทำการปรับผิวของขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) โดยการเคลือบทอง ด้วยวิธีการทางไฟฟ้า โดยใช้สารละลายทองมาตรฐานความเข้มข้น 0.5 M หยดลงบนขั้วไฟฟ้า C ให้ศักย์ไฟฟ้าที่ -0.62 โวลต์[17] เป็นระยะเวลา 1 นาที ทำซ้ำ 30 ครั้ง ด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี ได้ผลการทดลองดังนี้

3.1.1 การสังเกตบริเวณขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยตาเปล่า

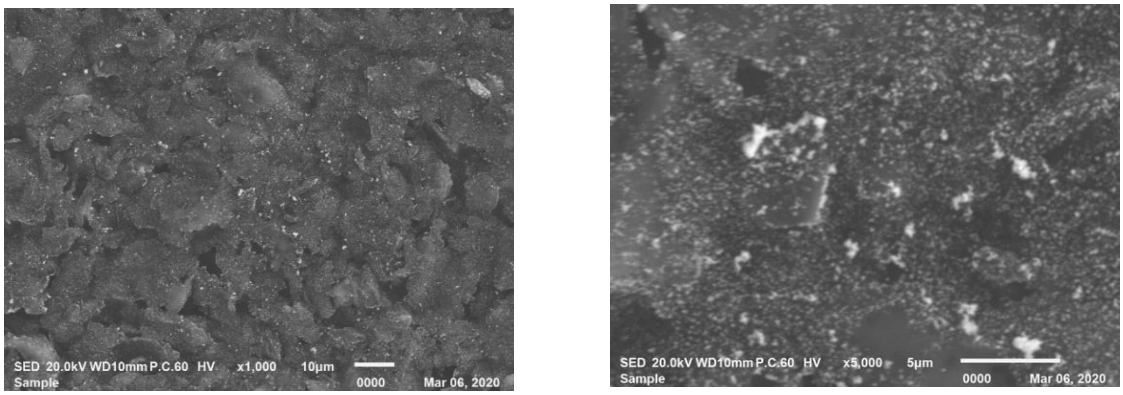
(a) (b)

รูปที่ 3.1 (a) ขั้วไฟฟ้า C และ (b) ขั้วไฟฟ้า C/Au

เมื่อทำการสังเกตขั้วไฟฟ้า C ที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวขั้วด้วยทองโดยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี พบว่าบริเวณขั้วไฟฟ้าทำงานจากเดิมที่เป็นสีดำของคาร์บอน (รูปที่ 3.1a) กลายเป็นมีสีทองอยู่บริเวณขั้วไฟฟ้า

ทำงาน (รูปที่ 3.1b) คาดว่าทองได้เคลือบติดอยู่บนผิวขั้วคาร์บอนพิมพ์สกรีนแล้ว จึงทำการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นที่ผิวโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ต่อไป

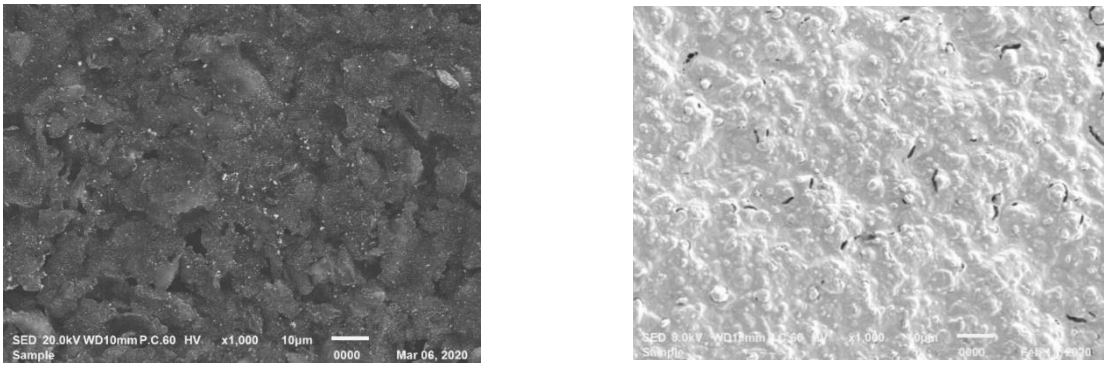
3.1.2 การศึกษาสัณฐานและรายละเอียดบนพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C ที่ผ่านกระบวนการเคลือบด้วยทองแล้ว โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



(a) (b)

รูปที่ 3.2 พื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au ที่กำลังขยาย (a) 1000 เท่า และ (b) 10000 เท่า

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าที่บริเวณขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au มีจุดขาว ซึ่งคาดว่าเป็นอนุภาคของทองเคลือบบริเวณผิวขั้ว จึงทำการตรวจจับสัญญาณเอกซเรย์ลักษณะเฉพาะของธาตุ พบว่ามีมวลของทองบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C อยู่ 8.71 % ของธาตุบริเวณผิวหน้าขั้วทั้งหมด



(a) (b)

รูปที่ 3.3 พื้นผิวของ (a) ขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au และ (b) ขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า Au ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

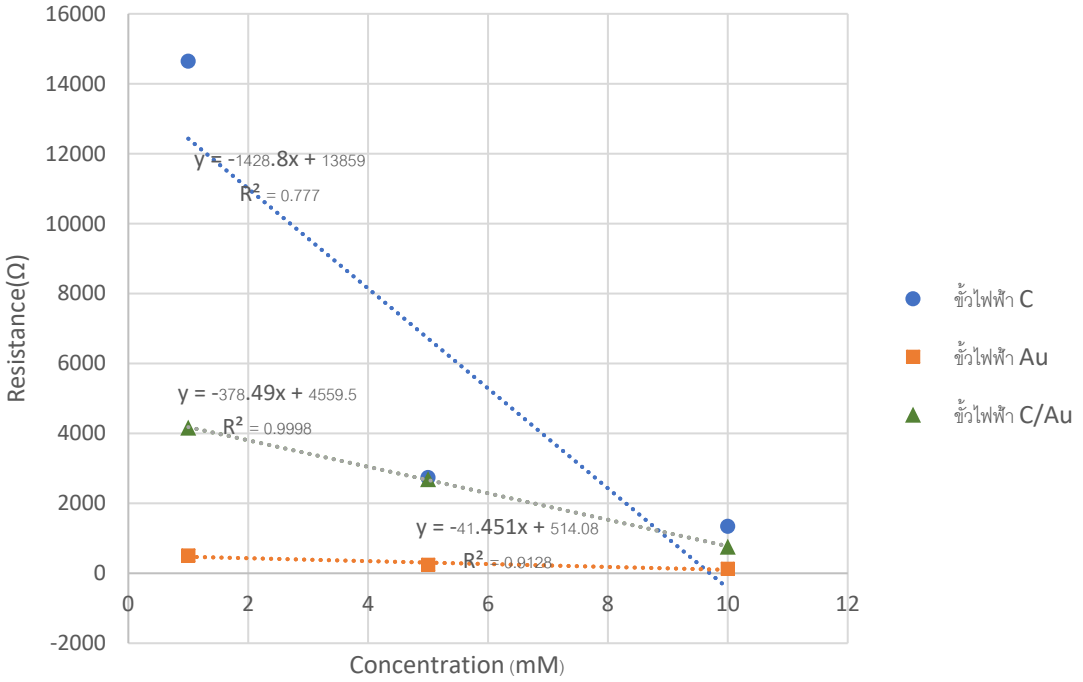
เมื่อเปรียบเทียบรายละเอียดบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au กับขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า Au พบว่าบริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au มีอนุภาคทองเกาะอยู่ในลักษณะเป็นจุดเล็กๆ กระจายบริเวณโดยรอบ ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า Au มีอนุภาคทองเคลือบบริเวณผิวขั้วเป็นแผ่นชัดเจน คาดว่ากระบวนการทำขั้วไฟฟ้า Au ของทางบริษัทอยู่ภายใต้ภาวะอุณหภูมิและความดันสูง โมเลกุลทองจึงอัดแน่นแล้วมีความเป็นระเบียบมากกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au ที่นิสิตได้ปรับปรุงผิว

3.1.3 การตรวจวัดความต้านทานบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยใช้สารละลายมาตรฐาน $Fe^{2+/3+}$

วัดสัญญาณความต้านทานของ $Fe^{2+/3+}$ ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ บนขั้วไฟฟ้า C/Au เทียบกับขั้วไฟฟ้าต่างชนิดกัน คือ ขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า Au ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ความเข้ม 0.1 โมลาร์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูป 3.4

ตารางที่ 3.1 ค่าความต้านทานของ $Fe^{2+/3+}$ บนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนต่างชนิดกัน โดยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

ความเข้มข้นของ $Fe^{2+/3+}$ (mM)	ค่าความต้านทาน (Ω)		
	ขั้วไฟฟ้า C	ขั้วไฟฟ้า C/Au	ขั้วไฟฟ้า Au
0.5	14640.0	4165.7	509.6
2.5	2737.3	2694.7	240.3
5	1338.7	762.4	129.1

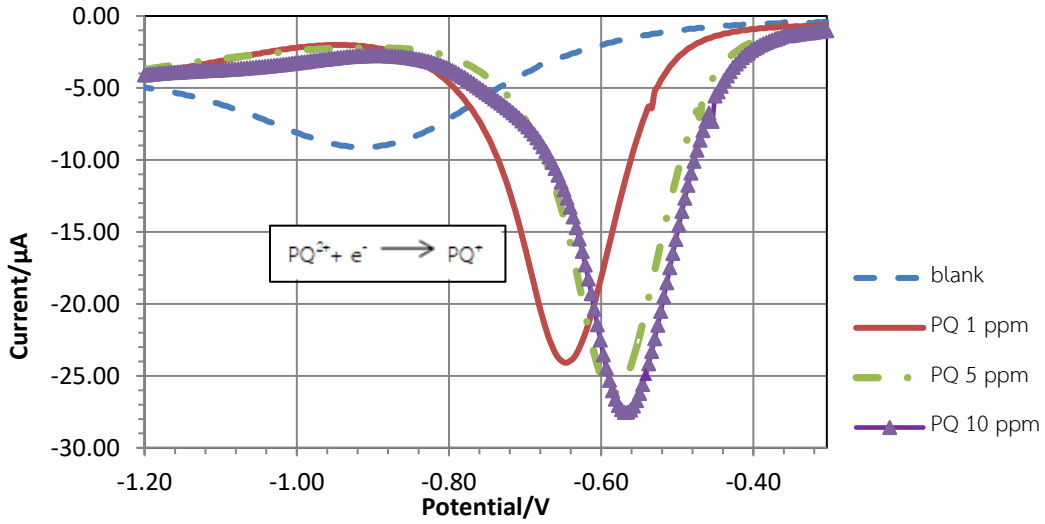


รูปที่ 3.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณ $Fe^{2+/3+}$ ที่ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C ขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

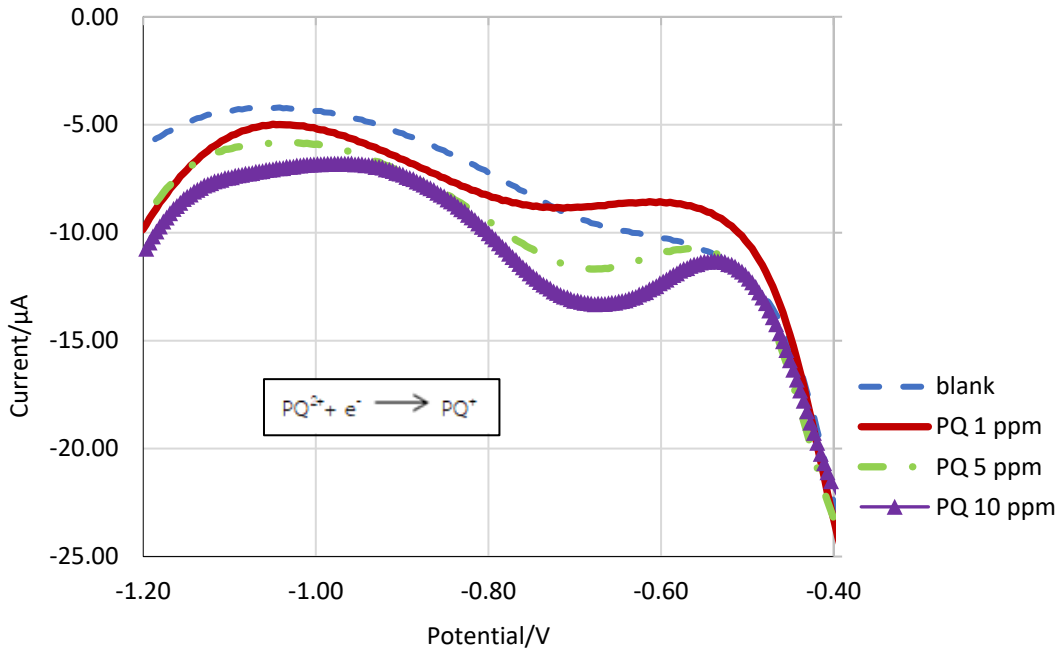
จากตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบสัญญาณความต้านทานของสารละลายมาตรฐาน $Fe^{2+/3+}$ ที่ 3 ระดับความเข้มข้น คือ 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $Fe^{2+/3+}$ ทำให้สัญญาณความต้านทานที่ตรวจวัดได้มีค่าลดลง เป็นแนวโน้มเดียวกันทั้ง 3 ขั้วไฟฟ้า แล้วเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้า C/Au กับขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า Au (รูปที่ 3.4) พบว่าขั้วไฟฟ้า C มีความต้านทานสูงที่สุด ตามด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ตามลำดับ แสดงว่าค่าความต้านทานที่ลดลงเป็นผลมาจากปริมาณทองบนผิวขั้วไฟฟ้า หรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่า อนุภาคทองทำให้การนำไฟฟ้าของขั้วดีขึ้น

3.2 การทดสอบสัญญาณของพาราควอตบนขั้วไฟฟ้า C, ขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au โดยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี

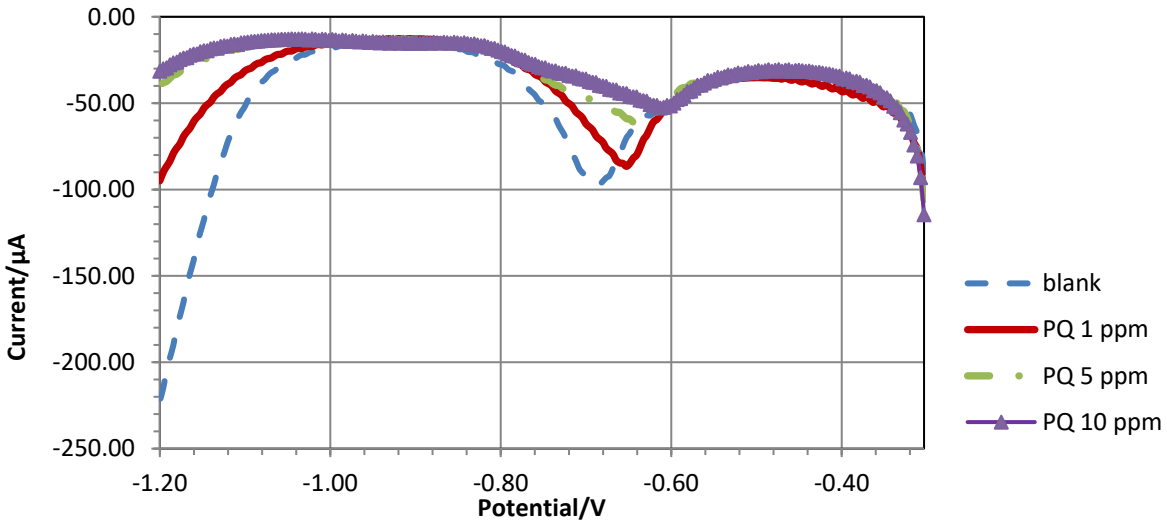
เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร บนขั้วไฟฟ้าที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า C ขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ได้ผลการทดลองดังรูป 3.5, 3.6, 3.7และ 3.8



รูปที่ 3.5 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์



รูปที่ 3.6 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์



รูปที่ 3.7 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ตารางที่ 3.2 ค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าของพาราควอตบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนต่างชนิดกัน โดยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี

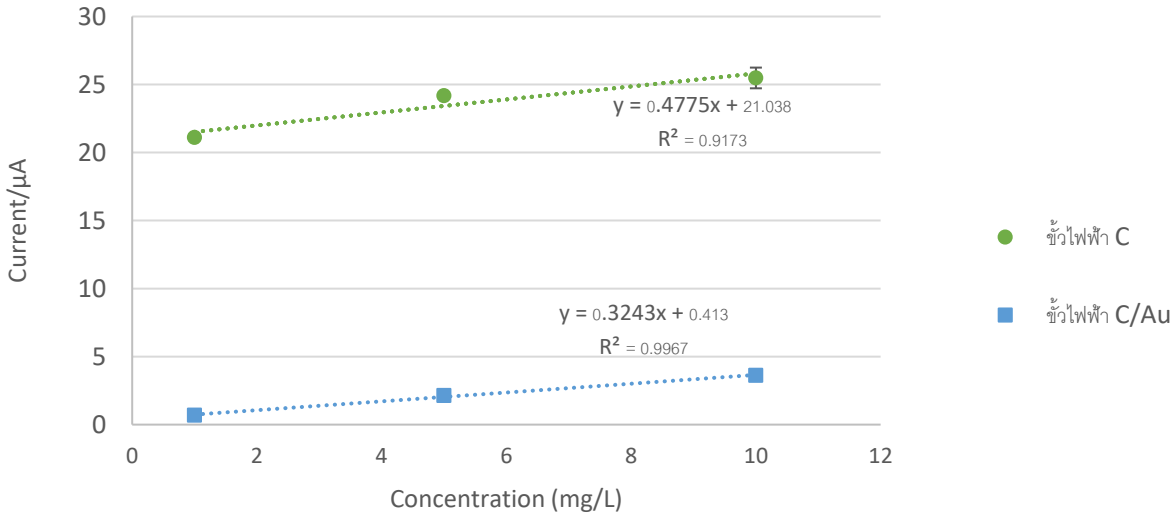
ชนิดขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน	ความเข้มข้นพาราควอต (mg/L)	สัญญาณกระแสไฟฟ้า (μA)
ขั้วไฟฟ้า C	1	21.10
	5	24.17
	10	25.48
ขั้วไฟฟ้า C/Au	1	0.68
	5	2.13
	10	3.61

เมื่อทำการทดสอบสัญญาณของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยขั้วไฟฟ้า C, ขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี จากสแควร์เวฟโวลแทมโมแกรม พบว่าขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au (รูปที่ 3.5 และ 3.6) เกิดสัญญาณรีดักชันของพาราควอต ดังสมการ

$$PQ^{2+} + e^{-} \longrightarrow PQ^{+}$$

ที่บริเวณศักย์ไฟฟ้า -0.65 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fabio R. Simoes [22] และค่าสัญญาณกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพาราควอตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าขั้วไฟฟ้า C สามารถวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au ในทุกๆ ความเข้มข้น (ตารางที่ 3.2) แสดงว่าขั้วไฟฟ้า C มีการตอบสนองต่อสัญญาณพาราควอตที่ตรวจวัดด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรีดีกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au และเมื่อพิจารณาสัญญาณแบลงค์ของขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au บริเวณศักย์ไฟฟ้า -0.65 โวลต์ พบว่ามีสัญญาณกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าเมื่อมีพาราควอตละลายอยู่ในสารละลาย ในขณะที่แบลงค์ของขั้วไฟฟ้า Au มีกระแสสัญญาณบางอย่างเกิดขึ้นบริเวณ -0.65 โวลต์ แต่เมื่อวัดสัญญาณพาราควอตที่ความเข้มข้นมากขึ้น สัญญาณกระแสไฟฟ้าบริเวณนั้นกลับมีค่าลดลง (รูปที่ 3.7) คาดว่าสัญญาณรีดักชันที่ปรากฏเมื่อใช้ขั้ว Au นั้นไม่ใช่สัญญาณของพาราควอต

จากข้อมูลข้างต้น กล่าวได้ว่าขั้วไฟฟ้า C สามารถวัดสัญญาณพาราควอตได้ดี ขณะที่ขั้วไฟฟ้า Au ไม่สามารถวัดสัญญาณพาราควอตได้ และเมื่อเคลือบทองลงบนผิวขั้วไฟฟ้า C ส่งผลให้การวัดสัญญาณพาราควอตด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรีมีประสิทธิภาพลดลง ทั้งในแง่ความสูง หรือความชัดเจนของสัญญาณ (รูปที่ 3.6) และความไวในการตรวจวัดสัญญาณ (รูปที่ 3.8)

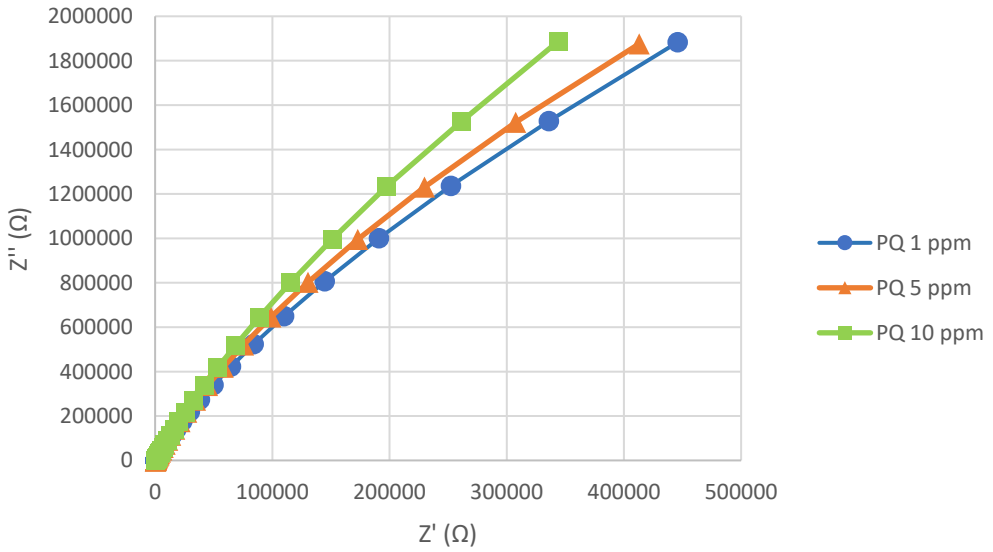


รูปที่ 3.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

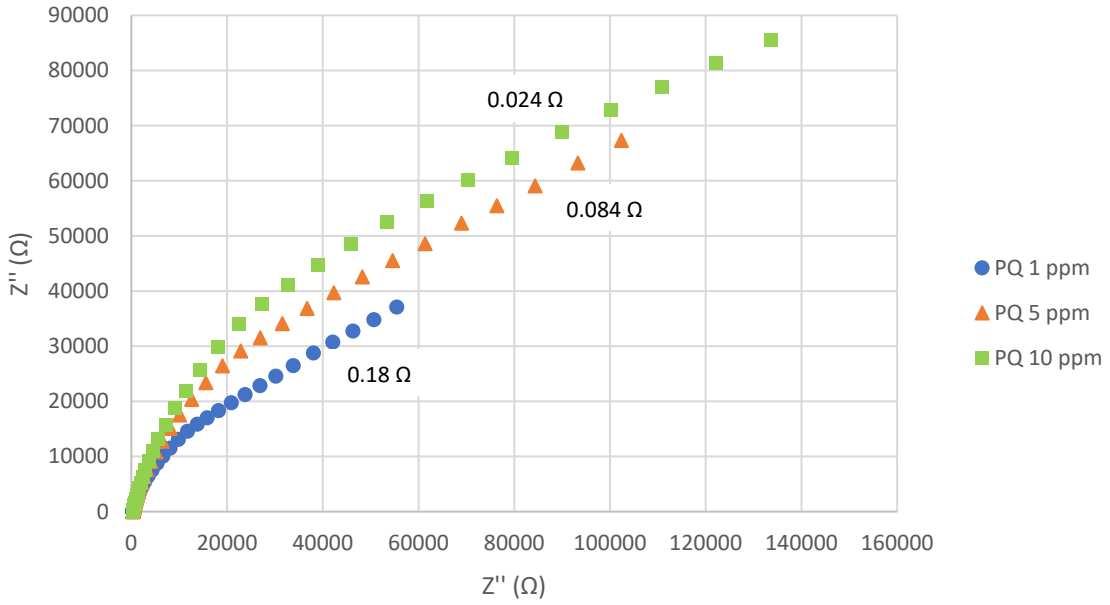
ผลการทดลองที่ได้จากเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรีนี้ ไม่มีความสอดคล้องกับข้อมูล ค่าความต้านทานของผิวขั้วไฟฟ้าในการทดลองที่ 3.1.3 ที่แสดงถึงขั้วไฟฟ้า C มีค่าความต้านทานสูงกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ตามลำดับ ดังนั้นหากตรวจวัดพาราควอตด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรีแล้ว ขั้วไฟฟ้า C มีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au

3.3 การตรวจวัดพาราควอตบนขั้วไฟฟ้า C, ขั้วไฟฟ้า C/Au, ขั้วไฟฟ้า Au ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

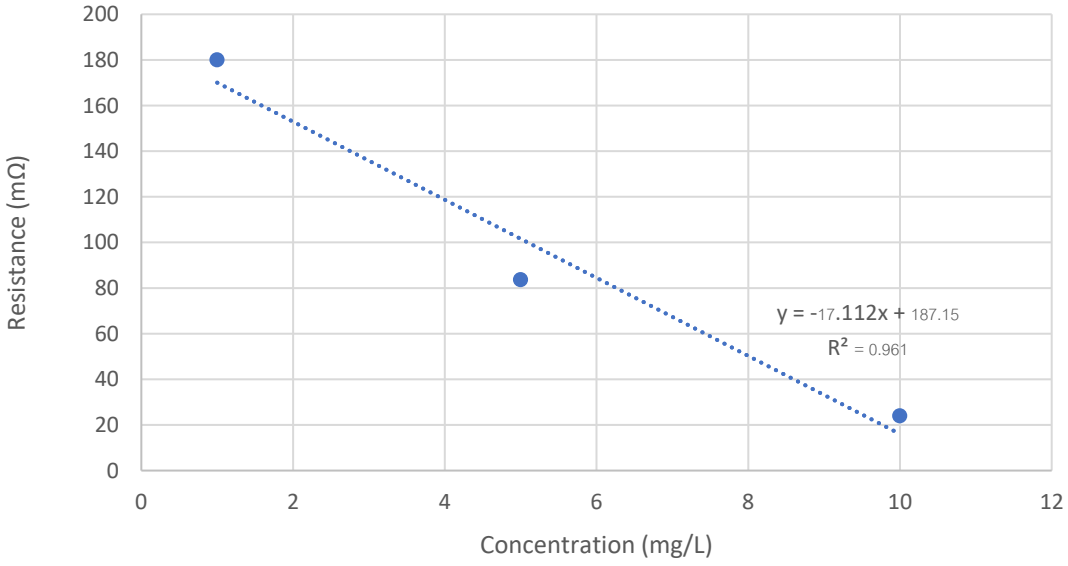
เปรียบเทียบความต้านทานของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร บนขั้วไฟฟ้าที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า C ขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ตรวจวัดด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ แต่เนื่องด้วยสถานการณ์ COVID-19 ทำให้สามารถแสดงผลการทดลองได้เพียงแค่การเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au จึงได้ผลการทดลองดังแสดงในรูป 3.9, 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.9 Nyquist plot ของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์



รูปที่ 3.10 Nyquist plot ของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงสัญญาณพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

เมื่อทำการตรวจวัดความต้านทานของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร บนขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี พบว่าขั้วไฟฟ้า C (รูปที่ 3.9) มีค่าสัญญาณความต้านทานต่ำมาก และต่ำกว่าของขั้ว C/Au (รูปที่ 3.10) จนไม่สามารถระบุค่าได้ สอดคล้องกับผลของเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี (รูปที่ 3.8) นั่นคือ ขั้วไฟฟ้า C สามารถตรวจวัดสัญญาณการนำไฟฟ้าของพาราควอตได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au ในขณะที่ขั้วไฟฟ้า C/Au (รูปที่ 3.10) สามารถอ่านค่าสัญญาณความต้านทานของพาราควอตที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ 180, 84 และ 24 มิลลิโอห์ม ตามลำดับ และมีค่าความเป็นเส้นตรง (R^2) ในการตรวจวัดพาราควอตเท่ากับ 0.9610 (รูปที่ 3.11)

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่าความไว (Sensitivity) และค่าความเป็นเส้นตรง (R^2) ของสัญญาณพาราควอตบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนต่างชนิดกัน โดยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี (SWV) และเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (EIS)

ชนิดขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน	เทคนิคที่ตรวจวัด	ค่าความไว (Sensitivity)	ค่าความเป็นเส้นตรง (R^2)
ขั้วไฟฟ้า C	SWV	0.48 μA/ppm	0.9173
	EIS	ไม่สามารถตรวจวัดได้	
ขั้วไฟฟ้า C/Au	SWV	0.32 μA/ppm	0.9967
	EIS	17.11 mΩ/ppm	0.9610
ขั้วไฟฟ้า Au	SWV	ไม่สามารถตรวจวัดได้	
	EIS	ไม่มีข้อมูล	

จากตารางที่ 3.3 การตรวจวัดสัญญาณของพาราควอตด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี ขั้วไฟฟ้า C มีค่าความไว (Sensitivity) สูงกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au ขณะที่ขั้วไฟฟ้า C/Au ค่าความเป็นเส้นตรงดีกว่าขั้วไฟฟ้า C เมื่อพิจารณาการตรวจวัดสัญญาณความต้านทานของพาราควอตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี จากการทดลองมีเพียงขั้วไฟฟ้า C/Au ที่สามารถตรวจสัญญาณความต้านทานของพาราควอตได้ หากเลือกนำมาใช้งานขั้วไฟฟ้า C มีความเหมาะสมในการตรวจวัดสัญญาณการนำไฟฟ้าของพาราควอตด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี ขณะที่ขั้วไฟฟ้า C/Au สามารถใช้ในการตรวจวัดสัญญาณพาราควอตด้วยเทคนิคทั้ง 2 ได้ โดยเฉพาะกับเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบทองลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า C ด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี เมื่อสังเกตขั้วไฟฟ้า C/Au เทียบกับขั้วไฟฟ้า C ด้วยตาเปล่า จะเห็นสีทองบริเวณขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดบนพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีอนุภาคทองเกาะบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานอยู่ 8.71% ของพื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบลักษณะผิวขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au เห็นได้ว่าขั้วไฟฟ้า C/Au มีอนุภาคทองกระจายตัวเป็นจุดเล็กๆ รอบบริเวณผิวขั้วไฟฟ้าทำงาน ขณะที่ขั้วไฟฟ้า Au มีอนุภาคทองเป็นแผ่นชัดเจน คาดว่าเกิดจากการกระบวนการผลิตของทางบริษัทที่ผลิตขั้วไฟฟ้าทองภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง อนุภาคทองจึงมีความเป็นระเบียบ เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณความต้านทานสารละลายมาตรฐาน $Fe^{2+/3+}$ ของขั้วไฟฟ้า C/Au ขั้วไฟฟ้า C และ ขั้วไฟฟ้า Au ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี พบว่าขั้วไฟฟ้า C มีความต้านทานมากกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ตามลำดับ แสดงถึงความต้านทานที่ลดลงเป็นผลมาจากปริมาณของอนุภาคทองบนผิวขั้วไฟฟ้า

การเปรียบเทียบสัญญาณพาราควอตความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของทั้ง 3 ขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี พบว่า ขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au เกิดสัญญาณรีดักชัน ที่บริเวณศักย์ไฟฟ้า -0.65 โวลต์ โดยที่ขั้วไฟฟ้า C ให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าสูงกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au กล่าวได้ว่าขั้วไฟฟ้า C มีการตอบสนองต่อสัญญาณพาราควอตที่ตรวจวัดด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรีดีกว่าขั้วไฟฟ้า C/Au และขั้วไฟฟ้า Au ไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณพาราควอตได้

การเปรียบเทียบความต้านทานพาราควอตความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของขั้วไฟฟ้า C และขั้วไฟฟ้า C/Au ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี พบว่าขั้วไฟฟ้า C ให้สัญญาณค่าความต้านทานต่ำมาก ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าได้ ขณะที่ขั้วไฟฟ้า C/Au สามารถตรวจความต้านทานของพาราควอตด้วยเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี หากต้องการนำขั้วไฟฟ้ามาใช้งาน ขั้วไฟฟ้า C มีความเหมาะสมในการตรวจวัดสัญญาณการนำไฟฟ้าของพาราควอต

ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี ขณะที่ขั้วไฟฟ้า C/Au สามารถใช้ในการตรวจวัดสัญญาณพาราควอตด้วยเทคนิคทั้ง 2 ได้ โดยเฉพาะกับเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

เนื่องด้วยสถานการณ์ COVID-19 ที่มีการแพร่ระบาดอย่างรุนแรง ทำให้ไม่สามารถดำเนินการทดลองในขั้นต่อไปได้ คือการเคลือบ Aptamer ลงบนผิวขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนทั้ง 3 ชนิด แล้วนำไปทดสอบสัญญาณด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี และเทคนิคอิเล็กโตรอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ซึ่งทางผู้วิจัยคาดว่าน่าจะสามารถเพิ่มความจำเพาะในการวัดสัญญาณพาราควอตได้ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1 Raju, B.; Pitak, E.; Mati, H.; Saksorn, L.; Chanunthorn, C.; Viyapol, P.; Ryo, M.; Apichai, J.; Noppadon, N.; 3D structured laser engraves decorated with gold nanoparticle SERS chips for paraquat herbicide detection in environments, Sensors and Actuators B: Chemical **2020**, 304.

2 Farahi, A.; Gaini, L. E.; Achak, M.; Yamani, S. E.; Mhammedi, M. E.; Bakasse, M.; Interaction study of paraquat and silver electrode using electrochemical impedance spectroscopy: Application in milk and tomato samples, Food Control **2015**, 679-685.

3 Yuanggao, Z.; Yunying, S.; Yangjuan, B.; Jiangtao, T.; Yao, C.; Lanlan, W.; An improved approach for extraction and high-performance liquid chromatography analysis of paraquat in human plasma, Journal of Chromatography B **2011**, 1809-1812.

4 Roldan, M.L.; Corrado, G.; Francioso, O.; Sanchez-Cortes, S.; Interaction of soil humic acids with herbicide paraquat analyzed by surface-enhanced raman scattering and fluorescence spectroscopy on silver plasmonic nanoparticles, Analytica Chimica Acta **2011**, 87-95.

5 Laghrib, F.; Bakasse, M.; Lahrich, S.; Mhammedi, M. E.; Electrochemical sensors for improved detection of paraquat in food samples, Materials Science & Engineering C **2019**, 107.

6 อัญธิกา เพ็งสมจิตต์. ผลของความเข้มข้นของเกลือและค่าพีเอชที่มีต่อสัญญาณทางโวลแทมเมทรีของพาราควอต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย **2018**.

7 Baoshan, H.; Long, W.; Xiaoze, D.; Xiaohai, Y.; Ming, L.; Sasa, Y.; Dandan, Y.; Aptamer-based thin film gold electrode modified with gold nanoparticles and carboxylated multi-walled carbon nanotubes for detecting oxytetracycline in chicken samples, Food Chemistry **2019**, 300.

8 Lock, E.A.; Wilks, M.F.; (). Paraquat. In: Krieger RI (ed.), Hayes' Handbook of Pesticide Toxicology (3.ed.), Chapter 83, 1767 – 1823, Elsevier Inc. 2010

9 กรมควบคุมมลพิษ. พาราควอท. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 1998.

10 Seyedeh M. S.; Marzieh D.; Fatemeh S.; Maryam A.; Mehrdad R. K.; Aptamer based-electrochemical biosensors. Chapter 8, 213-251, Electrochemical biosensors. 2019.

11 Skoog, D. A.; West, D. M.; Holler, F. J.; Crouch, S. R.; Fundamentals of Analytical Chemistry. Cengage Learning: 2014.

12 ธนศาสตร์ สุขศรีเมือง. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry). ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2005.

13 Pitiphat T. On-chip electrochemical sensor for cysteine detection. Faculty of engineering King Mongkut's university of technology Thonburi **2007**.

14 วรพรรณ พรมศิลา. การศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี เชิงเคมีไฟฟ้าของตัวตรวจวัดพอลิอะนิลีนสำหรับวัดการนำไฟฟ้าแบบไม่สัมผัส. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ **2013**.

15 Carles, L.; Susana, A. G.; Marc, J. V.; Carlos, M.; Evaluation of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) for in-line monitoring of internal corrosion in ductile iron water distribution pipes, Material Science **2014**.

16 ดนัย กิจชัยนุกูล. เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรมฟิสิกส์ราชมงคล. 2547.

17 อัจฉราพร ศรีอ่อน. หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสกนนิ่ง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2559.

18 Jose, A. R.; Catia, A. C.; Hye, J. L.; Voltammetric determination of paraquat at DNA-gold nanoparticle composit electrodes, Electrochimica Acta **2010**, 7892-7896.

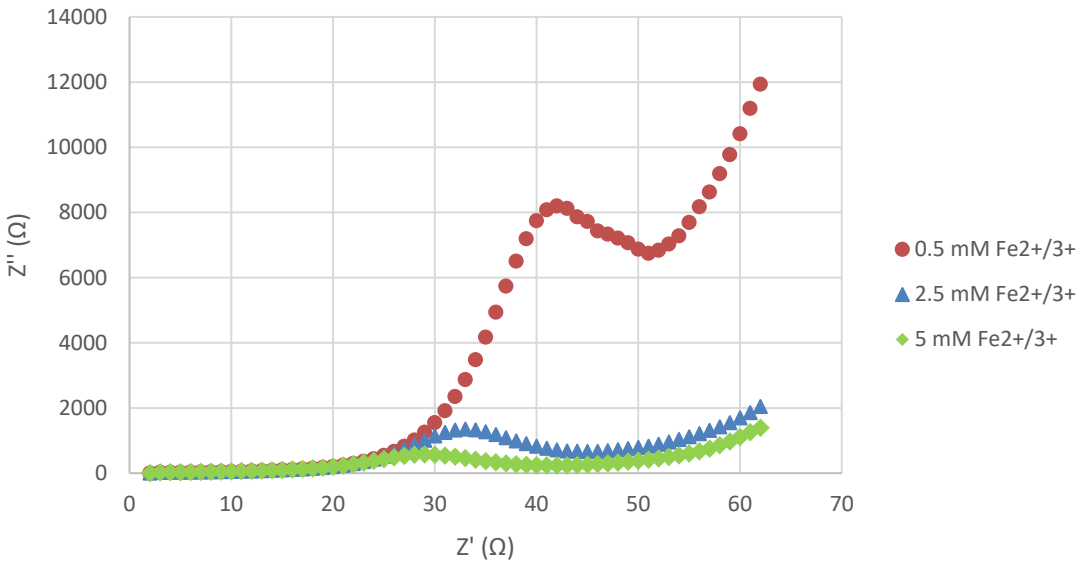
19 Farahi, A.; Lahrich, S.; Achak, M.; Gaini, L. E.; Bakasse, M.; Mhammedi, M. E.; Parameters affecting the determination of paraquat at silver rotating electrodes using differential pulse voltammetry, Analytical Chemistry Research **2014**, 16-21.

20 Gaini, L. E.; Farahi, A.; Achak, M.; Yamani, S. E.; Mhammedi, M. E.; Bakasse, M.; Interaction study of paraquat and silver electrode using electrochemical impedance spectroscopy: Application in milk and tomato samples, Food Control **2015**, 679-685.

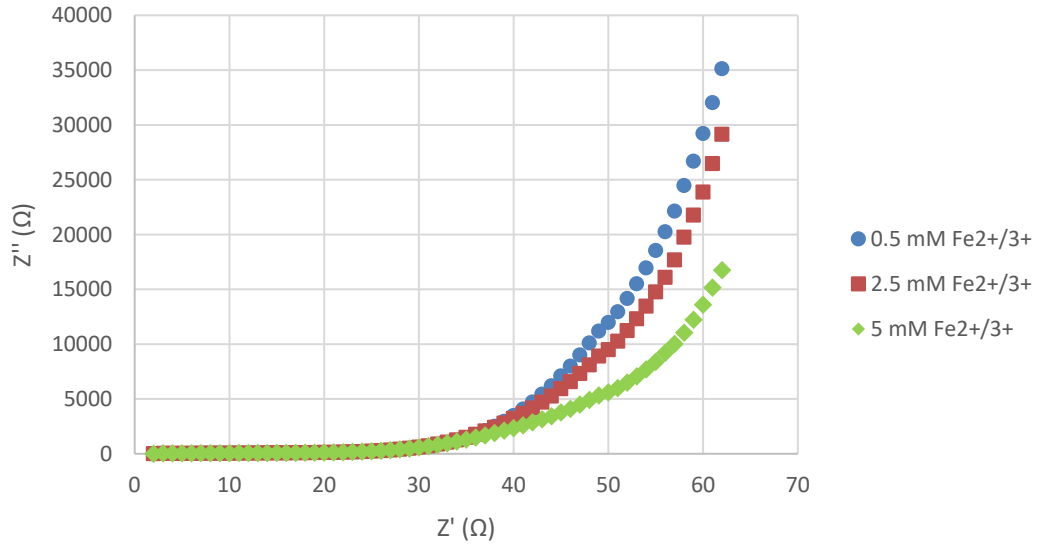
21 Chai-Huang, L.; Ching-Chou, W.; Yu-Fen, K.; A high sensitive impedimetric salbutamol immunosensor based on the gold nanostructure-deposited screen-printed carbon electrode, Journal of Electroanalytical Chemistry **2016**, 27-33.

22 Fabio, R. S.; Carlos, M. V.; Christopher, M. B.; Electroanalytical Detection of the Pesticide Paraquat by Batch Injection Analysis, Taylor & Francis Journal **2007**, 1800-1810.

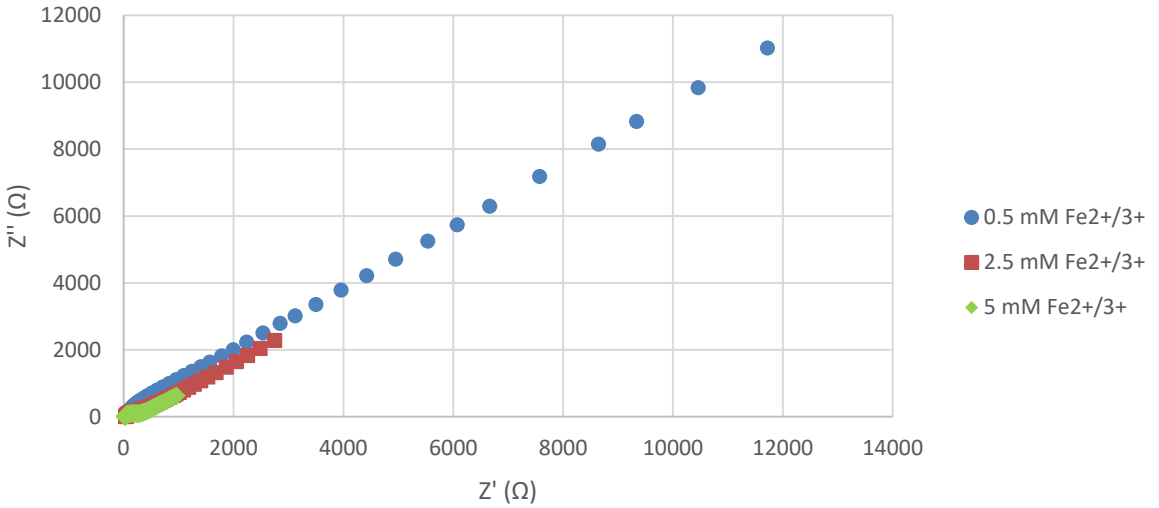
ภาคผนวก



รูปที่ 5.1 Nyquist plot ของ $Fe^{2+/3+}$ ที่ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์



รูปที่ 5.2 Nyquist plot ของ $Fe^{2+/3+}$ ที่ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า C/Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์



รูปที่ 5.3 Nyquist plot ของ $Fe^{2+/3+}$ ที่ความเข้มข้น 0.5, 2.5 และ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้า Au ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ประวัติผู้วิจัย

นางสาว ทิพากร วัฒนศิริชัยกุล เกิดวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2541 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย ปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี เมื่อปีการศึกษา 2558 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2559 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 88/30 หมู่ 7 ตำบลบางกระเจ้า อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร 74000 อีเมล yok-tw@hotmail.com