



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ออกแบบขั้วทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดน้ำแนวลึก
Electrochemical electrode design for measurement in water
column

ชื่อนิสิต นางสาววิสุมิตรา ชนะสกุลนิยม

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2560

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ออกแบบขั้วทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดน้ำแวนลิก

Electrochemical electrode design for measurement in water column

โดย

นางสาววิสุมิตรา ชนะสกุลนิยม

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

โครงการ ออกแบบชั่วคราวเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดน้ำแวนลิก


โดย นางสาววิสมิตรา ชนะสกุลนิยม

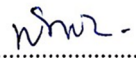
ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธรักษา วรานุกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคเคนศ ตุงคะสมิต)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนาร ธีรพิบูลย์เดช)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

..... หัวหน้าภาควิชาเคมี
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

วันที่ เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2561

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ ดีมาก ดี พอใช้

ชื่อโครงการ ออกแบบขั้วทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดน้ำแวนลิก
 ชื่อนิติในโครงการ นางสาววิสุมิตรา ชนะสกุลนิยม เลขประจำตัว 5733160223
 ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา
 ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคนธ์ ตุงคะสมิต
 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ก๊าซที่ละลายในน้ำสามารถระเหยหรือปรับเข้าสู่สมดุลใหม่กับบรรยากาศได้ การเก็บน้ำตัวอย่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติไปยังห้องปฏิบัติการอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซที่ละลายในน้ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแสงแดด ความดัน หรืออุณหภูมิ การตรวจวัดก๊าซที่ละลายน้ำในสถานที่จริงจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ ดังนั้นขั้วทางเคมีไฟฟ้าจึงถูกออกแบบมาสำหรับตรวจวัดก๊าซที่ละลายในน้ำแวนลิก ในการศึกษาเบื้องต้นนี้ ทำการออกแบบและสร้างขั้วไฟฟ้าแบบแท่ง 3 ชนิด ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดทองคำ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าช่วยชนิดแพลทินัม ทดสอบการใช้งานด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ผลการทดลองแสดงด้วยโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ทำการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์พบสัญญาณไฟฟ้าที่มีลักษณะผันกลับได้ เช่นเดียวกับที่วัดได้โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามพบการเลื่อนของตำแหน่งโวลแทมโมแกรม เนื่องจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ไม่เหมือนกัน ผลของวัสดุและการออกแบบของขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดทองคำพบว่า ชนิดของสายไฟ ส่งผลน้อยต่อสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ ในขณะที่ความยาวของสายไฟมีผลต่อการลดลงของค่ากระแสไฟฟ้า ในขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า ฟองอากาศในภาวอ็อกซิเจนส่งผลทำให้ความสูงของค่ากระแสไฟฟ้าน้อยลง และผิวหน้าของลวดทองคำบนขั้วไฟฟ้าทำงานเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อรูปร่างหรือการผันกลับได้ของโวลแทมโมแกรม การเชื่อมผิวหน้าเก่าของลวดทองคำออก เพื่อเปิดผิวหน้าทองคำใหม่ สามารถปรับปรุงสัญญาณได้ ถึงแม้จะไม่ได้สัญญาณที่ดีขึ้นเสมอไปก็ตาม

คำสำคัญ : ออกแบบขั้วไฟฟ้า, ไซคลิกโวลแทมเมตรี, น้ำแวนลิก, ก๊าซที่ละลายน้ำ

Project Title Electrochemical electrode design for measurement in water column

Student Name Miss Wisumitra Chanasakulniyom Student ID 5733160223

Advisor Name Assistant Professor Charoenkwan Kraiya, Ph.D.

Co-advisor Name Assistant Professor Sukkaneste Tungasmita, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2017

Abstract

Dissolved gases can spontaneously evaporate or equilibrate with atmosphere. Water sampling from natural resources to laboratory could cause errors in the dissolved-gas analysis due to the change of sunlight, pressure or temperature. An on-site measurement can help reduce such errors. Therefore, on-site electrochemical electrodes were designed aiming for the determination in water column. In this preliminary study, three rod electrodes: gold (Au) working electrode, Ag/AgCl reference electrode, and Pt counter electrode were created and tested using cyclic voltammetry. Results shown that voltammogram of 5 mM standard potassium hexacyanoferrate(III) measured by the designed-rod electrodes appeared in a reversible shape similar to one obtained by commercial electrodes. However, position of the voltammogram shifted due to the unidentical reference electrode. Effects on the material and design of the gold working electrode were investigated. The results revealed that types of electrical wire had small effect on the signal while the wire length reduced the current height. In the electrode constructing step, bubbles in epoxy reduced the current height. Gold surface on the working electrode was one importance factor that effected on the shape or reversibility of the voltammogram. Results shown that slide off the old gold surface to refresh the electrode surface could improve the signal, even though it was not always happen.

Keywords : electrode design, cyclic voltammetry, water column, dissolved gas

กิตติกรรมประกาศ

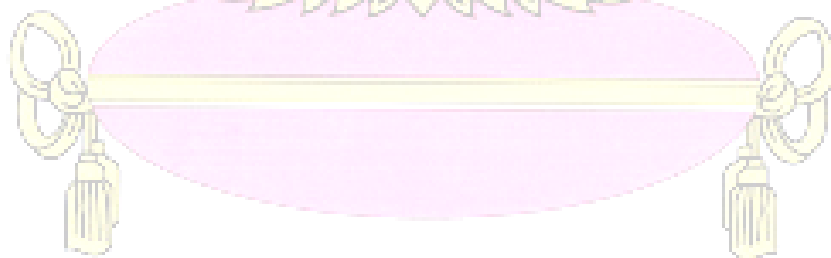
งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนตรวจทาน แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความใส่ใจตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคตเกษม ตุงคะสมิต ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาขณะทำงานวิจัย และการอนุเคราะห์เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการทำงานวิจัยนี้ ทำให้งานวิจัยสำเร็จได้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธรักษา วรรณสุภากุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนารัตน์ พิบูลย์เดช ที่สละเวลาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบการวิจัยและตรวจสอบแก้ไขรายงานให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณนายพลากร คุ่มฉายา ที่ให้คำปรึกษา ช่วยแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และเทคนิคปฏิบัติการอันเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา และขอระลึกถึงกำลังใจและความช่วยเหลือจากครอบครัวและเพื่อน ๆ รวมถึงบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ จนสามารถดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
1.4.1 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า	2
1.4.2 โวลแทมเมตรี (Voltammetry)	2
1.4.2.1 ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode: WE)	3
1.4.2.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode: RE)	3
1.4.2.3 ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode: CE)	3
1.4.3 ไชคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)	4
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 2 การทดลอง	8
2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	8
2.2 สารเคมี	9
2.3 การเตรียมสารละลาย	10
2.3.1 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	10
2.3.2 สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์	10
2.3.3 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร	10
2.4 การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้า	11
2.4.1 ขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์	13
2.4.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์	14
2.4.3 ขั้วไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์	15
2.5 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า	15
2.5.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงานก่อนใช้งาน	15

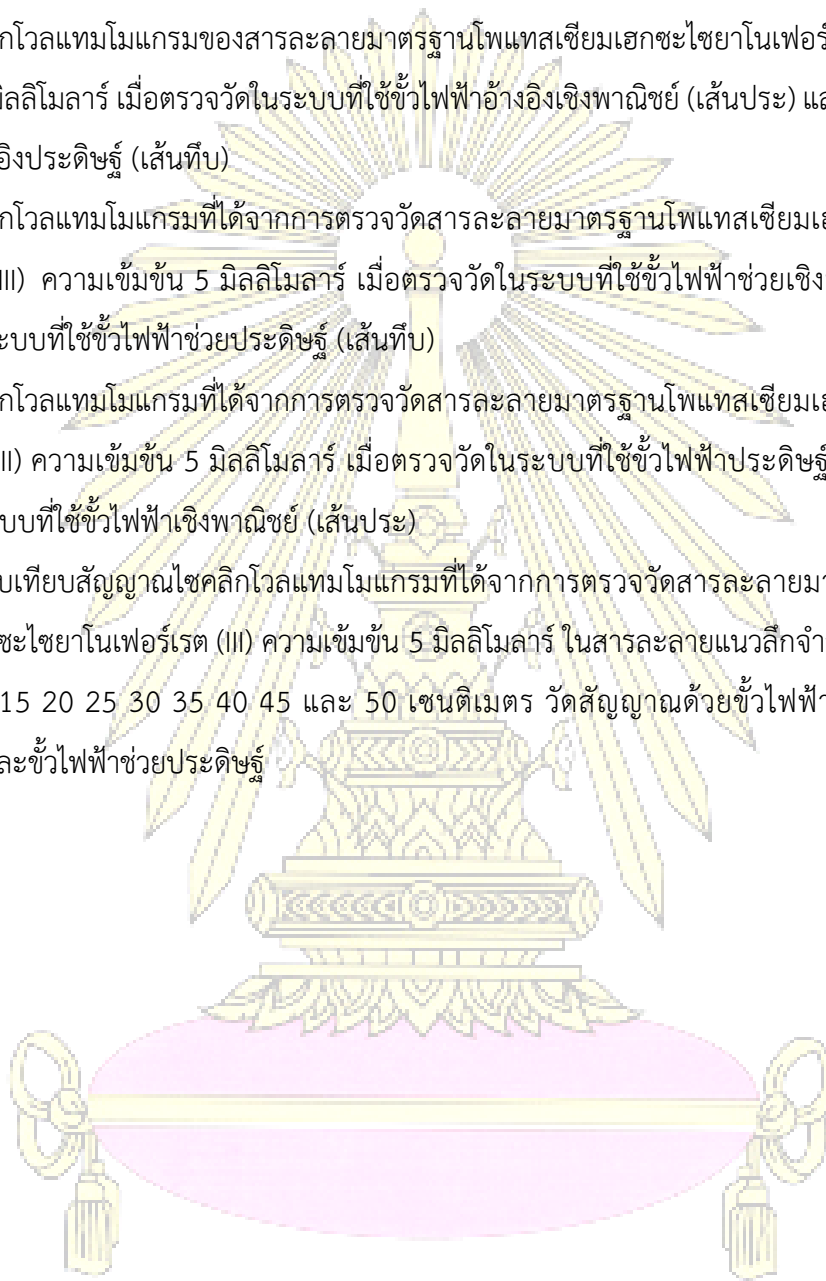
2.5.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ก่อนใช้งาน	16
2.5.3 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าหลังใช้งาน	16
2.6 การทดลอง	16
2.6.1 ผลของความยาวสายไฟที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทำงาน	20
2.6.2 ผลของผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทองคำ	20
2.6.3 ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์	20
2.6.4 ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดแพลทินัม	20
2.6.5 การวัดสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	21
2.6.6 การวัดสารละลายในน้ำที่มีระดับความลึก	21
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	22
3.1 ศึกษาการสร้างขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ พร้อมทดสอบการใช้งาน	22
3.1.1 การสร้างขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์ชนิดลวดทองคำ	22
3.2 การทดสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการวัดสัญญาณของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำ	25
3.2.1 ผลของชนิดสายไฟที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทำงาน	25
3.2.2 ผลของความยาวสายไฟที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทำงาน	28
3.2.3 ผลของปริมาณฟองอากาศที่มีในส่วนผสมของกาวอีพ็อกซี	32
3.2.4 ผลของผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทองคำ	33
3.3 ศึกษาการสร้างและทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดอื่น ๆ	36
3.3.1 การสร้างขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดอื่น ๆ	37
3.3.2 ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์	38
3.3.3 ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดแพลทินัม	39
3.4 การนำขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทุกชนิดมาใช้วัดสารละลายในลักษณะต่าง ๆ	40
3.4.1 การวัดสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	40
3.4.2 การวัดสารละลายในน้ำที่มีระดับความลึก	41
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	43
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	47
ประวัติผู้วิจัย	57

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 สัญญาณกระตุ้นแบบสามเหลี่ยม (Triangular voltage waveform) ที่ใช้ในไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)	4
รูปที่ 1.2 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) ของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)	5
รูปที่ 2.1 ขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์ต่อกับสายไฟ	11
รูปที่ 2.2 สายไฟสี่เทา สีม่วง และสีน้ำเงิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ 0.46 (a) 0.62 (b) และ 1.03 (c) มิลลิเมตร ตามลำดับ	11
รูปที่ 2.3 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน	12
รูปที่ 2.4 ขั้วไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์ต่อกับสายไฟสีม่วง	12
รูปที่ 2.5 หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์	14
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า	19
รูปที่ 2.7 การวัดสารละลายในน้ำที่ระดับความลึกต่าง ๆ	21
รูปที่ 3.1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าเชิงพาดิซของ Metrohm ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร (a) และขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต (b) โดยสแกนจากค่าศักย์ไฟฟ้า 0.8 ถึง -0.2 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าแต่ละขั้น 0.02 โวลต์ อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ต่อวินาที	23
รูปที่ 3.2 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร (เส้นทึบ) และกับขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ที่ไม่มีลวดทองคำ (เส้นประ) ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต	24
รูปที่ 3.3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสี่เทา ความยาว 1 ฟุต จำนวน 3 เส้น	25
รูปที่ 3.4 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 ฟุต จำนวน 3 เส้น	26

รูปที่ 3.5	ไซคลิกโวลแทมโม่แกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต จำนวน 3 เส้น	26
รูปที่ 3.6	ไซคลิกโวลแทมโม่แกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน (เส้นประ) และสายไฟสีม่วง (เส้นทึบ) ความยาว 1 ฟุต	27
รูปที่ 3.7	ไซคลิกโวลแทมโม่แกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 (เส้นสีน้ำเงิน) 3 (เส้นสีแดง) และ 5 (เส้นสีเขียว) ฟุต (สแกนครั้งที่ 3)	28
รูปที่ 3.8	ไซคลิกโวลแทมโม่แกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 (a) 3 (b) และ 5 (c) ฟุต โดยสแกนสัญญาณไฟฟ้าครั้งละ 1 รอบ (1 cycle/scan) จำนวน 20 ครั้ง	30
รูปที่ 3.9	ไซคลิกโวลแทมโม่แกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 (a) 3 (b) และ 5 (c) ฟุต โดยสแกนสัญญาณไฟฟ้าต่อเนื่องกัน 20 รอบ จำนวน 1 ครั้ง (20 cycles/scan)	31
รูปที่ 3.10	ไซคลิกโวลแทมโม่แกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 ฟุต โดยสายที่ 1 2 และ 3 ไล่ออกอากาศออกด้วยเครื่องสูบล้าง (เส้นสีน้ำเงิน, สีแดง และสีเขียว ตามลำดับ) และสายที่ 4 กับ 5 ไม่ได้ไล่ออกอากาศออก (เส้นสีม่วง และสีส้ม ตามลำดับ)	33
รูปที่ 3.11	ไซคลิกโวลแทมโม่แกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วงเส้นที่ 4 ความยาว 1 ฟุต ก่อนการเนียนผิวหน้าขั้วทองคำ (เส้นประ) และหลังการเนียนผิวหน้าขั้วทองคำ (เส้นทึบ)	34

รูปที่ 3.12	ไซคลิกโวลแทจโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติขั้วชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วงเส้นที่ 5 ความยาว 1 ฟุต ก่อนการเฉือนผิวหน้าขั้วทองคำ (เส้นประ) และหลังการเฉือนผิวหน้าขั้วทองคำ (เส้นทึบ)	35
รูปที่ 3.13	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์	36
รูปที่ 3.14	ไซคลิกโวลแทจโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เมื่อตรวจวัดในระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิงพาดิชย์ (เส้นประ) และระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประติขั้ว (เส้นทึบ)	39
รูปที่ 3.15	ไซคลิกโวลแทจโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เมื่อตรวจวัดในระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าช่วยเชิงพาดิชย์ (เส้นประ) และระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าช่วยประติขั้ว (เส้นทึบ)	40
รูปที่ 3.16	ไซคลิกโวลแทจโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เมื่อตรวจวัดในระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าประติขั้วทั้งหมด (เส้นทึบ) และระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเชิงพาดิชย์ (เส้นประ)	41
รูปที่ 3.17	เปรียบเทียบสัญญาณไซคลิกโวลแทจโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวทึบจำลอง ที่มีความลึก 5 10 15 20 25 30 35 40 45 และ 50 เซนติเมตร วัดสัญญาณด้วยขั้วไฟฟ้าทำงานขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วยประติขั้ว	42



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขั้วไฟฟ้าทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละการทดลอง	17
ตารางที่ 5.1 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสี่เทา ความยาว 1 ฟุต	47
ตารางที่ 5.2 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 ฟุต	47
ตารางที่ 5.3 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต	48
ตารางที่ 5.4 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 ฟุต สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 20 ครั้ง	49
ตารางที่ 5.5 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 3 ฟุต สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 20 ครั้ง	50
ตารางที่ 5.6 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 5 ฟุต สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 20 ครั้ง	51
ตารางที่ 5.7 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิ้งจำลอง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร	52
ตารางที่ 5.8 ค่าสัญญาณกระแสพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิ้งจำลอง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร	52
ตารางที่ 5.9 ค่าสัญญาณกระแสพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิ้งจำลอง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

“น้ำ” มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของพืชและสัตว์บนโลกรวมทั้งมนุษย์ จัดเป็นทรัพยากรที่สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในปัจจุบันชุมชนเมืองและภาคอุตสาหกรรมเติบโตอย่างรวดเร็ว ผลกระทบที่ตามมาคือ ปัญหามลพิษทางน้ำที่ทำให้คุณภาพชีวิตของมนุษย์และระบบนิเวศของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำแย่งลง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพน้ำเพื่อให้ทราบถึงปัญหา แนวทางการแก้ไข และป้องกันผลกระทบที่เกิดจากมลพิษ ซึ่งการตรวจวัดก๊าซที่ละลายในน้ำเป็นวิธีหนึ่งของการตรวจสอบคุณภาพน้ำที่มีประสิทธิภาพ

ปัจจุบันการตรวจวัดก๊าซที่ละลายในน้ำได้พัฒนาขึ้นหลากหลายวิธี ตัวอย่างเช่น การวัดการละลายของออกซิเจนด้วยวิธีวินเคลอ (Winkler method)¹ การวัดเซลล์ไฟต์ด้วยเทคนิคสตริปปีงโครโนโพเทนชิเมตรี (Stripping chronopotentiometry)² การวัดก๊าซมีเทนด้วยแคพวิทริงดาวน์สเปกโตรสโคปี (Cavity ring-down spectroscopy)³ การวัดออกซิเจนด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี (Voltammetry)⁴ และการวัดก๊าซไนโตรเจนด้วยเทคนิคฟลิวอินเจกชันอะนาไลซิส (Flow injection analysis)⁵ เป็นต้น การตรวจวัดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีความแม่นยำสูง สามารถตรวจวัดได้รวดเร็ว ใช้งานง่าย และขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำ⁶

วิธีการตรวจวัดก๊าซที่ละลายในน้ำส่วนใหญ่ทำโดยเก็บน้ำตัวอย่างจากแหล่งน้ำ แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ แต่สารที่ตรวจวัดอยู่ในรูปของก๊าซ ซึ่งสามารถระเหยหรือปรับเข้าสู่สมดุลใหม่กับบรรยากาศได้ การเก็บน้ำตัวอย่างและการขนส่งสู่ห้องปฏิบัติการอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ได้ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว การตรวจวัดก๊าซในสถานที่จริงที่ระดับความลึกต่าง ๆ จึงมีความสำคัญ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงสนใจประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด สำหรับการวิเคราะห์ในสถานที่จริงร่วมกับเทคนิคโวลแทมเมตรี โดยออกแบบประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าแบบแท่ง เนื่องจากขั้วไฟฟ้าแบบแท่งเหมาะสำหรับการตรวจวัดน้ำแนวลึก ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้นจะนำมาทดสอบค่าสัญญาณของขั้วไฟฟ้ากับสารมาตรฐานก่อน เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องก่อนนำไปตรวจวัดในแหล่งน้ำสถานที่จริง

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

- 1.2.1 ออกแบบและประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าชนิดทองคำ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ และแพลทินัม สำหรับตรวจวัดน้ำแวนิลิก
- 1.2.2 ทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้นและหาแนวทางนำไปใช้งานจริงในภาคสนาม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้แบบและขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ และแพลทินัม สำหรับตรวจวัดน้ำแวนิลิก
- 1.3.2 ได้แนวทางการนำไปใช้งานจริงและข้อมูลในการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้น

1.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.1 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า

เคมีไฟฟ้าเป็นการวิเคราะห์ทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนประจุ (charge transfer) ระหว่างผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารที่นำมาวิเคราะห์โดยตรง

การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้ามีหลายเทคนิค เช่น โพลเทนชิโอเมตรี (Potentiometry) โวลแทมเมตรี (Voltammetry) อิเล็กโทรกราวิเมตรี (Electrogravimetry) และคูลอมเมตรี (Coulombmetry) เป็นต้น โดยเทคนิคโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่นิยม เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว เหมาะสำหรับการวิเคราะห์หาเชิงปริมาณ (quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (qualitative analysis)

1.4.2 โวลแทมเมตรี (Voltammetry)

โวลแทมเมตรีเป็นชื่อรวมของกลุ่มวิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า เป็นเทคนิคที่วัดกระแสไฟฟ้าเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปภายใต้สภาวะที่เกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (concentration polarization) อย่างสมบูรณ์ เซลล์ไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE) และ ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode, CE) โดยขั้วทั้งสามมีหน้าที่แตกต่างกันดังนี้

1.4.2.1 ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode: WE)

ขั้วไฟฟ้าทำงานเป็นขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของสารที่ต้องการวิเคราะห์ เมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในระบบต้องสามารถตอบสนองอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยเทคนิคโวลแทมเมตรีขั้วไฟฟ้าทำงานมีพื้นที่ผิวหน้าขั้วขนาดเล็กมากพอที่ทำให้สารเกิดปฏิกิริยารับหรือส่งอิเล็กตรอนเฉพาะบริเวณใกล้ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเท่านั้น ไม่ทำให้สารละลายทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยขั้วไฟฟ้าทำงานที่ดีควรจะสามารถใช้วัดซ้ำได้ มีช่วงการวิเคราะห์กว้าง ให้สัญญาณรบกวนต่ำ นำไฟฟ้าได้ดี และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ขั้วไฟฟ้าทำงานมีหลายชนิด เช่น ขั้วไฟฟ้าทอง ขั้วไฟฟ้าปรอทหยด หรือขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอน เป็นต้น^{7,8}

1.4.2.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode: RE)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้อ้างอิงศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงาน มีคุณสมบัติที่ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คงที่ มีส่วนประกอบคงตัว และไม่เกิดโพลาไรเซชันบริเวณขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไฮโดรเจน (Standard Hydrogen Electrode, SHE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode, SCE) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver/silver chloride electrode, Ag/AgCl) โดยเฉพาะขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สะดวกต่อการใช้งาน และมีอายุการใช้งานนาน⁷

1.4.2.3 ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode: CE)

ขั้วไฟฟ้าช่วยเป็นขั้วไฟฟ้าที่ช่วยให้กระแสไฟฟ้าครบวงจร โดยกระแสวิ่งระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าช่วย โดยจะไม่ผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร ขั้วไฟฟ้าช่วยไม่มีการเปลี่ยนแปลงในขณะวิเคราะห์สารตัวอย่าง มักมีพื้นผิวมาก ๆ เพื่อให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี นิยมใช้ลวดแพลทินัมเป็นวัสดุของขั้วไฟฟ้านี้⁷

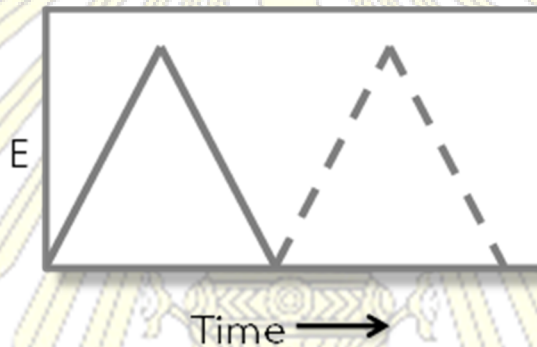
ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายความต่างศักย์และวัดกระแสไฟฟ้าที่มีความละเอียดและถูกต้องสูง โดยจะต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและแสดงผลการวิเคราะห์⁹ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ตามศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรจะถูกนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า (I-E plot) เรียกรูปที่แสดงว่า โวลแทมโมแกรม (Voltammogram) โดยมีเทคนิคการวิเคราะห์รูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดจากการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน สัญญาณที่กระตุ้นจึงต่างกัน เช่น ไชคลิกโวลแทมเมตรี

(Cyclic voltammetry) สแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (Square wave voltammetry) ลิเนียร์สวีปโวลแทมเมตรี (Linear sweep voltammetry) หรือพัลส์โวลแทมเมตรี (Pulse voltammetry) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) สำหรับการศึกษาสัญญาณสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์

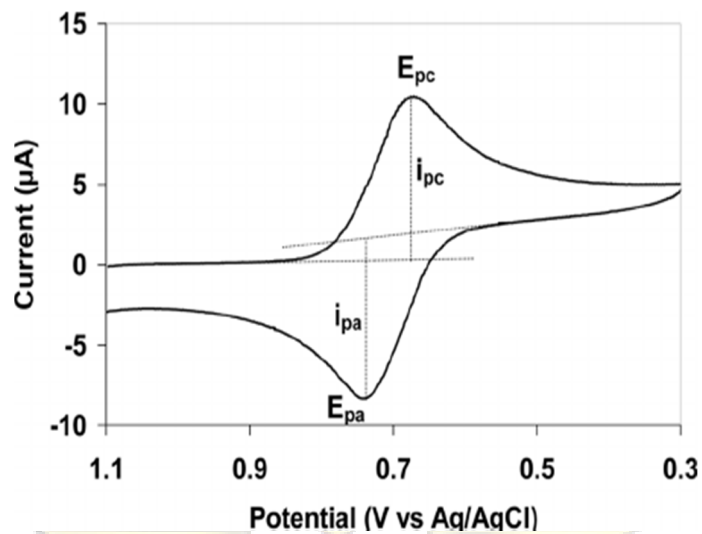
1.4.3 ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)

ไซคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคทางโวลแทมเมตรีที่วัดกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน เมื่อให้สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้ารูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular voltage waveform) ดังแสดงในรูป 1.1 แก่ขั้วไฟฟ้าทำงานซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายที่ไม่มีการคน (unstirred solution) การให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์ เป็นการสแกนไปข้างหน้า (forward scan) เมื่อเวลาผ่านไปศักย์ที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สแกนไปถึงจุดหนศักย์ไฟฟ้าก็จะเริ่มลดลงด้วยอัตราการสแกนเท่าเดิมเป็นการสแกนย้อนกลับ (reverse scan) จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นจะได้เป็นหนึ่งไซเคิล



รูปที่ 1.1 สัญญาณกระตุ้นแบบสามเหลี่ยม (triangular voltage waveform) ที่ใช้ในไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)¹⁰

กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในระหว่างการสแกนศักย์จะถูกนำมาสร้างกราฟระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า เรียกว่า ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งไซคลิกโวลแทมโมแกรมสามารถบอกปฏิกิริยาไปข้างหน้าของสารตั้งต้นและปฏิกิริยาย้อนกลับของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไปข้างหน้า ถ้าสแกนศักย์ไฟฟ้าไปข้างหน้าในทางลบมากขึ้น สารที่ทำการวิเคราะห์จะเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชันและเรียกกระแสไฟฟ้าสูงสุดว่ากระแสแคโทดิก (Cathodic peak current, i_{pc}) เมื่อสแกนศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับไปทางบวกมากขึ้น สารที่ทำการวิเคราะห์จะเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและเรียกกระแสไฟฟ้าสูงสุดว่ากระแสแอนอดิก (Anodic peak current, i_{pa}) โดยค่าศักย์ไฟฟ้าของตำแหน่งที่มีกระแสสูงสุดของปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชัน เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าแคโทดิก (Cathodic peak potential, E_{pc}) และศักย์ไฟฟ้าแอนอดิก (Anodic peak potential, E_{pa}) ตามลำดับ^{10,11}



รูปที่ 1.2 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) ของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)¹²

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1995 Brendel, P. J. และ Luther, G. W.¹⁴ ได้ศึกษาการพัฒนาขั้วไฟฟ้าทองอมัลกัม (Au/Hg) แบบแท่งเพื่อวัดการละลายของออกซิเจน ซัลไฟด์ เหล็ก และแมงกานีสที่ละลายอยู่ในตะกอนทะเล ขั้วไฟฟ้านี้สามารถบอกความละเอียดของระดับความลึกเป็นมิลลิเมตร ตรวจวัดได้รวดเร็วสำหรับการวัดค่าของ สารรีดอกซ์ (Redox) ทุกชนิดในระหว่างการสแกนที่มีศักย์ภาพเพียงครั้งเดียว ขั้วไฟฟ้ามีความแม่นยำและ เสถียรภาพทั้งในห้องปฏิบัติการและสถานที่จริงที่ทำการศึกษ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบขั้วไฟฟ้าทำงานแบบเป็น แก้วใช้ความร้อนและอีพ็อกซีเป็นตัวช่วยกันน้ำ มีขั้วไฟฟ้าคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode, SCE) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ สแกนที่ 200 มิลลิโวลต์ต่อวินาทีสำหรับลิเนียร์สวีป โวลแทมเมตรี (Linear sweep voltammetry) และ แอมพลิจูด 15 มิลลิโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าแต่ละขั้น 2 มิลลิ โวลต์ ความถี่ 300 เฮิร์ตซ์ อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 200 มิลลิโวลต์ต่อวินาที สำหรับเทคนิคสแควร์เวฟ โวลแทมเมตรี (Square wave voltammetry)

ในปี ค.ศ. 1999 Luther, G. W. และคณะ⁴ ได้ศึกษาวิธีการตรวจวัดการละลายของออกซิเจน แมงกานีส เหล็ก และซัลไฟด์ที่ละลายอยู่ในตะกอนด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี (Voltammetry) โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ทองอมัลกัม (Au/Hg) แบบแท่งที่มีความยาวสาย 30 เมตร พร้อมกับเครื่องมือวัดขนาดเล็กที่ติดตั้งบนเรือ (ROV) สามารถตรวจสอบแบบเรียลไทม์ในสถานที่จริงที่ทำการศึกษา วัดสัญญาณเข้าได้โดยไม่ทำให้สัญญาณ ลดลง ไม่มีการทับซ้อนกันของแมงกานีสและออกซิเจน และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH สัมพันธ์กับการ เปลี่ยนแปลงของแมงกานีสและออกซิเจน โดยผู้วิจัยได้ออกแบบขั้วไฟฟ้าทำงานแบบเป็นแก้วและแบบเป็น

พอลิเมอร์ PEEK™ (polyethyletherketone) ใช้ความร้อนและอีพ็อกซีเป็นตัวช่วยกันน้ำ มีขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย ขั้วทั้ง 3 ชนิดจะมีสายชิลด์ (Shield) ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกไว้อยู่ โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ สแกนที่ 200 มิลลิโวลต์ต่อวินาทีสำหรับลิเนียร์สวீปโวลแทมเมตรี (Linear sweep voltammetry) และแอมพลิฟิเคชัน 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาทีสำหรับลิเนียร์สวี่ปโวลแทมเมตรี (Square wave voltammetry) อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที สำหรับเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (Square wave voltammetry)

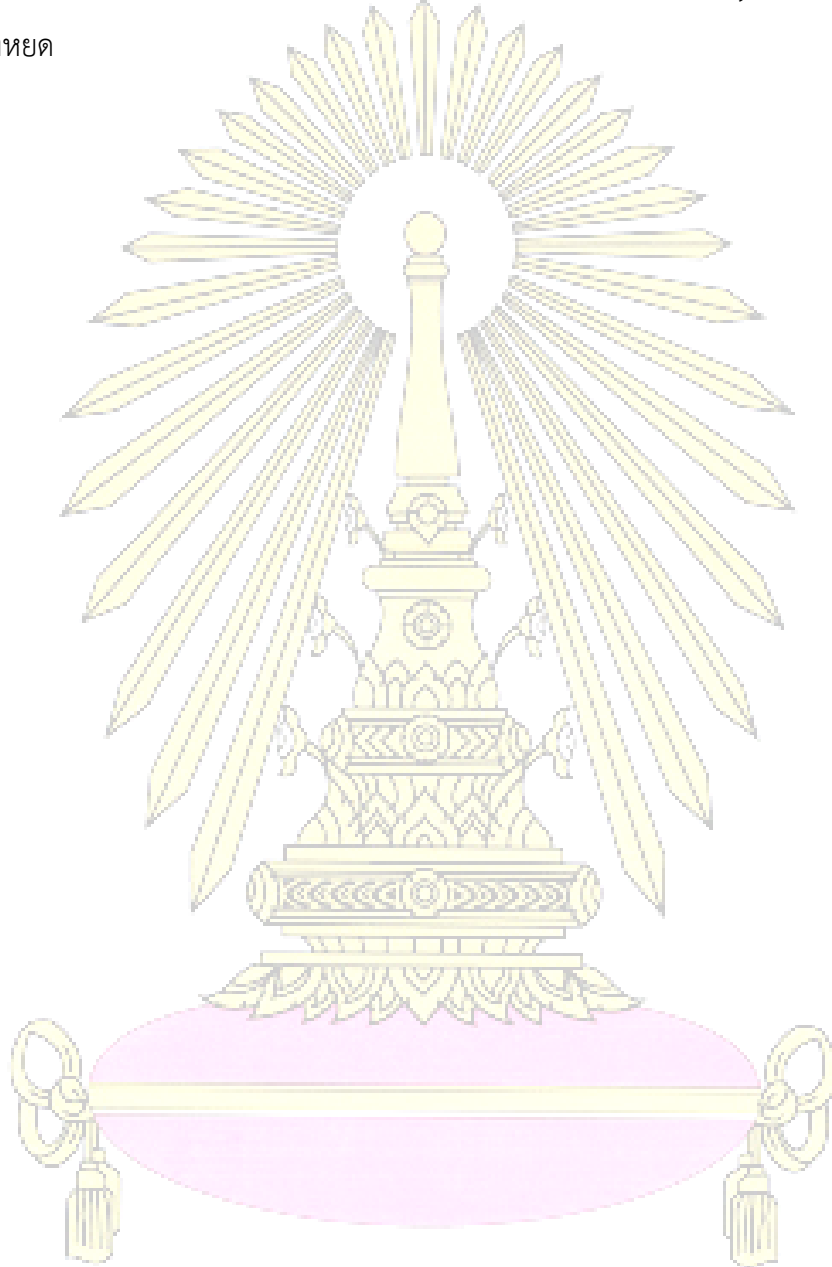
ในปี ค.ศ. 2008 Luther, G. W. และคณะ¹³ ได้ศึกษากระบวนการทางชีวธรณีเคมี (Biogeochemical) เพื่อการวัดแบบเรียลไทม์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ไฟฟ้าเคมี (ISEA) ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี (Voltammetry) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทองอมัลกัม (Au/Hg) แบบแท่ง มีการออกแบบขั้วไฟฟ้าทำงาน 2 แบบ คือ ขั้วไฟฟ้าแบบเป็นแก้วใช้สำหรับวัดตะกอนและขั้วไฟฟ้าแบบเป็นพอลิเมอร์ PEEK™ (polyethyletherketone) ใช้สำหรับน้ำในแนวลึก ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag / AgCl) ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีเคลือบซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) โดยให้ลวดเงินที่ยื่นออกมาจากปลาย 20 มิลลิเมตร จุ่มลงในสารละลายคลอไรด์เป็นเวลา 20 วินาที ใช้แบตเตอรี่ 9 V (ลวดแพลทินัม (Pt) อยู่ขั้วลบและลวดซิลเวอร์ (Ag) อยู่ขั้วบวก) และขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย ขั้วทั้ง 3 ชนิดจะมีสายชิลด์ (shield) ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกไว้อยู่ โดยวิธีโวลแทมเมตรีที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบแท่งเหมาะสำหรับการศึกษาทางด้านเคมีของระบบสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย แต่ต้องการให้นักวิเคราะห์ได้ศึกษาเกี่ยวกับหลักการทางเคมีไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 2013 Lemtiri-Chlieh, F. และ Ali, R.¹⁵ ได้ทำการทดลองการเคลือบซิลเวอร์คลอไรด์ที่ผิวของลวดเงิน โดยใช้แบตเตอรี่ 9 โวลต์และสายไฟปากจระเข้หนีบลวดเงิน 2 สายจุ่มลงสายละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ เป็นเวลา 10-15 วินาที (หรือจะเห็นการเปลี่ยนสีจากสีเงินเป็นสีม่วงอมเงิน) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดด้านแอนอดหรือด้านขั้วบวก

ในปี ค.ศ. 2015 Baciu, A. และคณะ⁶ ได้ศึกษาวิธีการตรวจวัดซัลไฟด์และไนไตรต์ในน้ำด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี (Voltammetry) และ แอมเพอโรเมตริก (Amperometry) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเพชรเจือโบรอน (Boron-Doped Diamond, BDD) พบว่าพารามิเตอร์ของการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจวัดไนไตรต์และซัลไฟด์คือ การใช้สแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (Square wave voltammetry) ที่ดำเนินการภายใต้สภาวะการทำงานที่เหมาะสม โดยให้ศักย์ไฟฟ้าแต่ละขั้น 0.01 โวลต์ แอมพลิฟิเคชัน 0.5 โวลต์ และความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ นอกจากนี้แอมพลิฟิเคชัน 0.2 โวลต์ มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับขีดจำกัดการตรวจวัดของไนไตรต์

ในปี ค.ศ. 2012 Aumond, V. และคณะ² ได้ศึกษาวิธีการตรวจวัดซัลไฟด์ด้วยเทคนิคสตรipping โครโนโพเทนชิเมตริก (Stripping chronopotentiometry) ในน้ำทะเลตัวอย่าง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาการวิเคราะห์น้ำทะเลในแนวลึกโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งซัลไฟด์จะถูกสะสมโดยให้ศักย์ไฟฟ้า

-0.25 โวลต์ (เทียบกับ Ag/AgCl, KCl 3 โมลาร์) ที่มีการสั่นของหลอดทองและสตริปปิงออกจากการให้กระแสคิงที่ลดลง (โดยทั่วไปคือ -2 ไมโครแอมแปร์) เงื่อนไขของไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic) จะถูกปรับโดยการสั่น ทำให้ขั้นตอนการสะสมสั้นลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการลดการระเหยของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) คือ 30 นาโนโมลาร์ หลังจากขั้นตอนการสะสมที่ 7 วินาที ขีดจำกัดการตรวจวัดนี้อยู่ในช่วงเดียวกับเทคนิคแคโทดิกโวลแทมเมตรี (Cathodic voltammetry) ที่มีความไวสูงที่สุดโดยใช้ขั้วไฟฟ้าปรอทหยด



บทที่ 2

การทดลอง

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1.1 เครื่องโพเทนซีโอสแตท Portable potentiostats: 910 PSTAT mini (Metrohm Autolab, Netherlands)
- 2.1.2 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล MicroXplore PC200 Digital Handheld Microscope (Orion Telescopes & Binoculars, United States of America)
- 2.1.3 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม PSTAT software 1.0 (Metrohm Autolab, Netherlands) และโปรแกรม DinoCapture 2.0 (Orion Telescopes & Binoculars, United States of America)
- 2.1.4 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, Switzerland)
- 2.1.5 เครื่องสั่นความถี่สูง Sonicator As3120 (Autoscience, China)
- 2.1.6 เครื่องกวนสารละลาย 728 Magnetic Stirrer (Metrohm Autolab, Netherlands)
- 2.1.7 ขั้วไฟฟ้าทอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร
- 2.1.8 ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Metrohm Autolab, Netherlands)
- 2.1.9 ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม (Metrohm Autolab, Netherlands)
- 2.1.10 ลวดทองคำร้อยละ 99.99 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร (Surepure Chemetals, United States of America)
- 2.1.11 ลวดแพลทินัมร้อยละ 99.95 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร (Alfa Aesar, United Kingdom)
- 2.1.12 ลวดเงินร้อยละ 99.99 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร (Johnson Matthey, United Kingdom)
- 2.1.13 กระจกชนิดยี่ห้อหัวฉีดแบบถือความจุ 3 มิลลิลิตร (Nipro, Japan)
- 2.1.14 เข็มฉีดยาขนาด 0.9 x 25 มิลลิเมตร (Nipro, Japan)
- 2.1.15 สายไฟสี่เท่า มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 0.129 ตารางมิลลิเมตร (Alps Industrial, Thailand)
- 2.1.16 สายไฟสี่ม้วน มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 0.205 ตารางมิลลิเมตร (Wire & Cable, Thailand)

- 2.1.17 สายไฟสีน้ำเงิน มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 1 ตารางมิลลิเมตร
(Siam Unity Industry, Thailand)
- 2.1.18 กาวอีพ็อกซี่ 2-K-EPOXIDKLEBER (UHU, Germany)
- 2.1.19 กาวอีพ็อกซี่ พัททึ Epoxy putty (Sunnic Chemical, Thailand)
- 2.1.20 ถ่านอัลคาไลน์ 9 โวลต์
- 2.1.21 เครื่องตัดท่อพลาสติกพอลิเมอร์
- 2.1.22 ตลับเมตร
- 2.1.23 ขาตั้งเหล็กและแคลมป์
- 2.1.24 หัวแร้งและที่วางหัวแร้ง
- 2.1.25 ตะกั่วบัดกรี
- 2.1.26 น้ำยาประสาน
- 2.1.27 ท่อพลาสติกประเภทเทฟลอน (PTFE tube) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3 มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 มิลลิเมตร
- 2.1.28 บิวเรต
- 2.1.29 ปีกเกอร์
- 2.1.30 ขวดปรับปริมาตร
- 2.1.31 คีมปอกสายไฟ
- 2.1.32 ผ้าสักหลาดสำหรับขัดขั้วไฟฟ้า

2.2 สารเคมี

- 2.2.1 โปแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) (Potassium hexacyanoferrate(III): $K_3[Fe(CN)_6]$)
(Sigma-Aldrich, United States of America)
- 2.2.2 โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride: NaCl) (Carlo Erba Reagents, France)
- 2.2.3 ผงอะลูมินา (Alumina powder) ขนาด 1.0 และ 0.3 ไมโครเมตร
(PACE Technologies, United States of America)
- 2.2.4 เอทานอล (Ethanol) (Merck, Germany)
- 2.2.5 อะซิโตน (Acetone) (Merck, Germany)
- 2.2.6 น้ำ Milli-Q ($18 M\Omega\text{ cm}^{-1}$) จาก Milli-Q Ultrapure Water Purification system
(Millipore, USA)

2.3 การเตรียมสารละลาย

2.3.1 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ซังโซเดียมคลอไรด์ 0.5844 กรัม (NaCl: น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 58.443 กรัมต่อโมล) ละลายด้วยน้ำ Milli-Q ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100.00 มิลลิลิตร

ซังโซเดียมคลอไรด์ 1.4611 กรัม (NaCl: น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 58.443 กรัมต่อโมล) ละลายด้วยน้ำ Milli-Q ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 250.00 มิลลิลิตร

2.3.2 สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์

ซังโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) 0.0823 กรัม ($K_3[Fe(CN)_6]$: น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 329.24 กรัมต่อโมล) ละลายด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 50.00 มิลลิลิตร

ซังโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) 0.1646 กรัม ($K_3[Fe(CN)_6]$: น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 329.24 กรัมต่อโมล) ละลายด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100.00 มิลลิลิตร

2.3.3 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร

ซังโซเดียมคลอไรด์ 2.25 กรัม ใส่บีกเกอร์ 500 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำ Milli-Q ปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตร



2.4 การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์ (รูปที่ 2.1) ประกอบด้วย

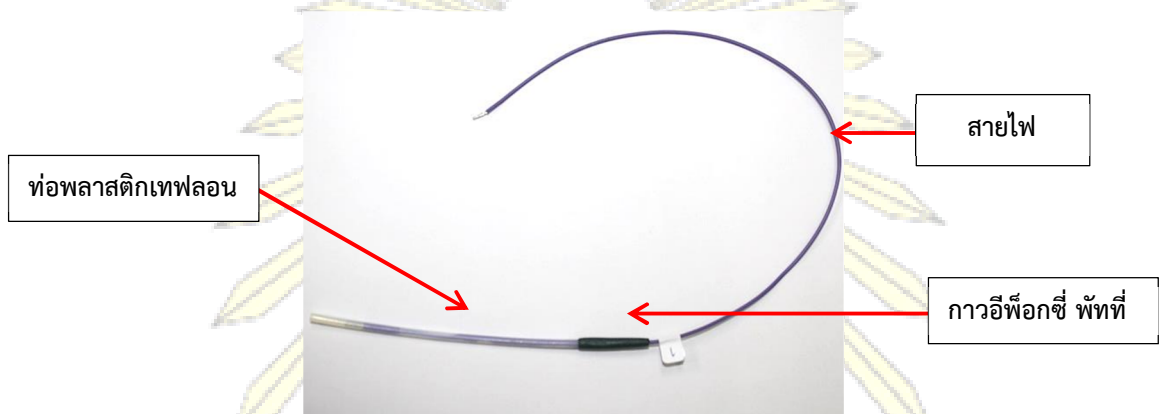
ลวดทองคำร้อยละ 99.99 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร

ท่อพลาสติกประเภทเทฟลอน (PTFE tube) ความยาว 10 เซนติเมตร

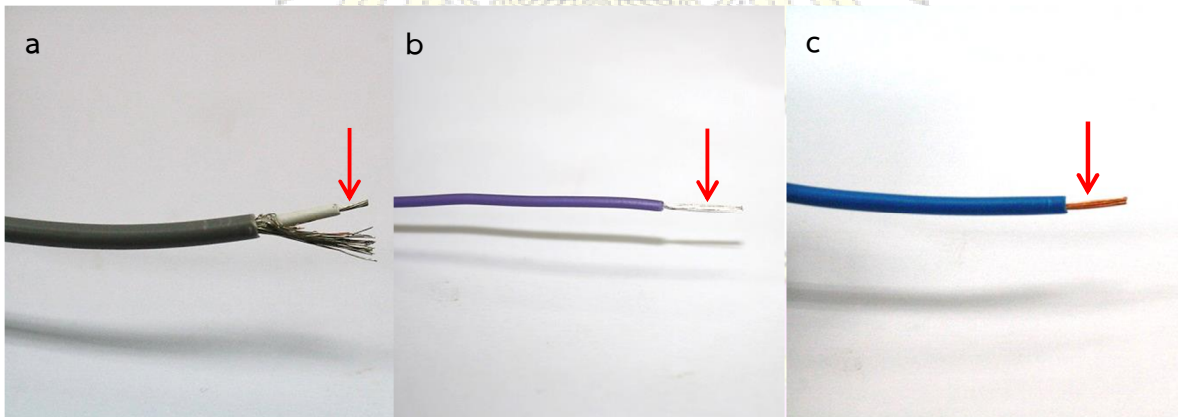
สายไฟสีเทา มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 0.129 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 1 ฟุต

สายไฟสีม่วง มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 0.205 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 1 3 และ 5 ฟุต

สายไฟสีน้ำเงิน มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 1 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 1 ฟุต (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.1 ขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์ต่อกับสายไฟ



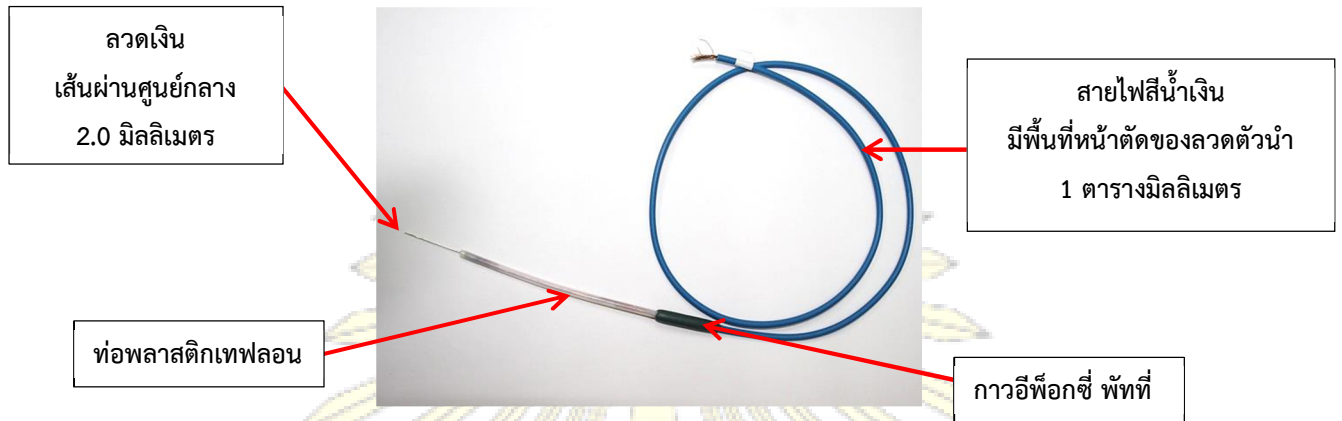
รูปที่ 2.2 สายไฟสีเทา สีม่วง และสีน้ำเงิน มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 0.129 (a) 0.205 (b) และ 1 (c) ตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ

ข้อไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ (รูปที่ 2.3) ประกอบด้วย

ลวดเงินร้อยละ 99.99 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร

ท่อพลาสติกประเภทเทฟลอน (PTFE tube) ความยาว 10 เซนติเมตร

สายไฟสีน้ำเงิน มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 1 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 2 ฟุต



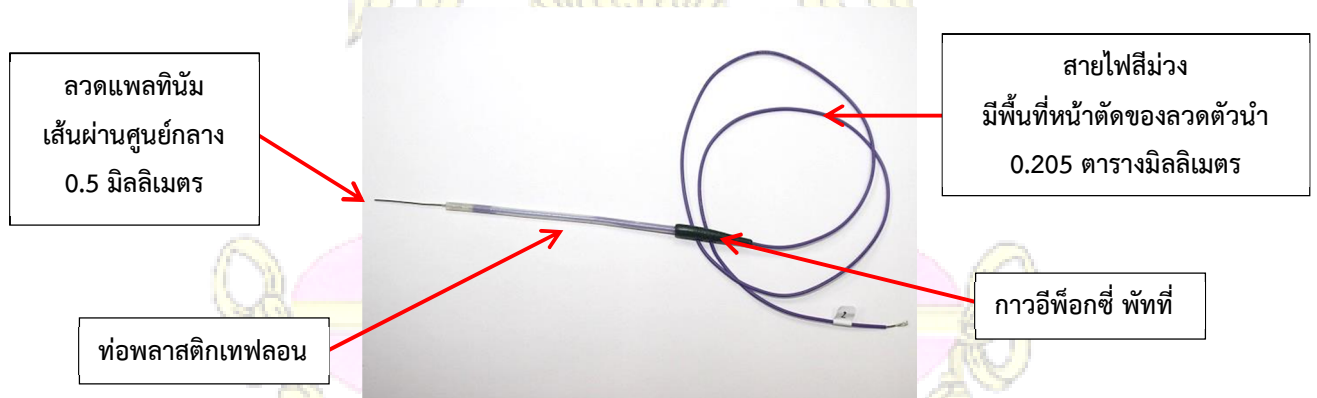
รูปที่ 2.3 ข้อไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน

ข้อไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์ (รูปที่ 2.4) ประกอบด้วย

ลวดแพลทินัมร้อยละ 99.95 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร

ท่อพลาสติกประเภทเทฟลอน (PTFE tube) ความยาว 10 เซนติเมตร

สายไฟสีม่วง มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 0.205 ตารางมิลลิเมตร ความยาว 2 ฟุต

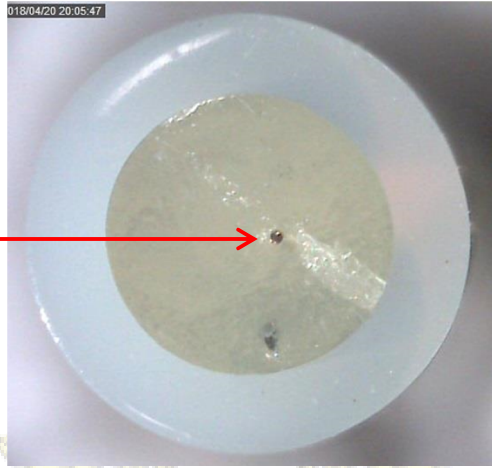


รูปที่ 2.4 ข้อไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์ต่อกับสายไฟสีม่วง

2.4.1 ขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์

1. นำลวดทองคำมาเชื่อมติดกับสายไฟที่ปกให้เหลือแต่ลวดทองแดง โดยปกฉนวนหุ้มสายไฟสีม่วงกับสายไฟสีเทาออก 1.5 เซนติเมตร และสายไฟสีน้ำเงินออก 9 เซนติเมตร จากนั้นใช้หัวแร้งที่มีความร้อนละลายตะกั่วบัดกรี แนบลงจุดที่ต้องการเชื่อม หัวแร้งจะละลายตะกั่วยึดติดทันที
2. ตัดลวดทองคำให้มีความยาว 1 เซนติเมตร และตัดสายไฟตามความยาวที่ต้องการ โดยวัดจากปลายของท่อพลาสติกเทพลอน
3. ผสมกาวอีพ็อกซีให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งกาวอีพ็อกซีประกอบด้วย 2 ส่วนคือ เนื้ออีพ็อกซี (epoxy) และ ตัวช่วยทำให้เกิดการแข็งตัว (hardener) โดยการผสมกาวอีพ็อกซีแยกออกเป็น 2 วิธีเพื่อศึกษาผลของฟองอากาศ
 - 3.1 กดหลอดฉีดยากาวไหลออกมาตามปริมาณที่ต้องการ ใช้แท่งพลาสติกแบนค่อย ๆ คนผสมกาว 2 ส่วนเข้าด้วยกันให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุด จากนั้นไล่ฟองอากาศออกด้วยเครื่องสูบลมที่แรงที่สุด
 - 3.2 กดหลอดฉีดยากาวไหลออกมาตามปริมาณที่ต้องการ ใช้แท่งพลาสติกแบนคนผสมกาว 2 ส่วนเข้าด้วยกัน
4. นำสายไฟสีน้ำเงินกับสายไฟสีเทาความยาว 1 ฟุต และสายไฟสีม่วงความยาว 1 3 และ 5 ฟุต ที่เชื่อมลวดทองแล้ว ใส่เข้าไปในท่อพลาสติกเทพลอน โดยให้ลวดทองคำพอดีตรงส่วนต้นของท่อพลาสติกเทพลอนหรือเกินออกมาเล็กน้อย จากนั้นนำกระบอกฉีดยาหัวฉีดแบบลิ้นคความจุ 3 มิลลิลิตร บรรจุกาวอีพ็อกซีที่ได้เตรียมไว้แล้ว ใส่เข็มฉีดยาขนาด 0.9 x 25 มิลลิเมตร ฉีดกาวอีพ็อกซีเข้าไป โดยฉีดจากส่วนปลายของท่อพลาสติกเทพลอนก่อน แล้วจึงฉีดส่วนต้นของท่อพลาสติกเทพลอน
5. เมื่อกาวอีพ็อกซีแห้งสนิทแล้ว นำกาวอีพ็อกซี พัทท์ (epoxy putty) ที่มีลักษณะคล้ายดินน้ำมัน มาตัดตามปริมาณที่ต้องการ ใช้มือผสมกันจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปแปะบนรอยต่อระหว่างสายไฟกับส่วนปลายของท่อพลาสติกเทพลอนเพื่อป้องกันน้ำซึมเข้าไป
6. ตัดส่วนต้นของท่อพลาสติกเทพลอนด้วยเครื่องตัดท่อพลาสติกพอลิเมอร์เล็กน้อยให้เห็นลวดทองที่ผิวหน้าขั้ว (รูปที่ 2.5) จากนั้นปกสายไฟด้านปลายสายเพื่อใช้หนีบต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท

ลวดทองคำ
เส้นผ่านศูนย์กลาง
0.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.5 หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์

2.4.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์

- นำลวดเงินมาเชื่อมติดกับสายไฟที่ปกกให้เหลือแต่ลวดทองแดง โดยปกกฉนวนหุ้มสายไฟสีน้ำเงินออก 9.5 เซนติเมตร จากนั้นใช้หัวแร้งที่มีความร้อนละลายตะกั่วบัดกรี แบนลงจุดที่ต้องการเชื่อม หัวแร้งจะละลายตะกั่วยึดติดทันที
- ตัดลวดเงินให้มีความยาว 1 นิ้ว และตัดสายไฟความยาว 2 ฟุต โดยวัดจากปลายของท่อพลาสติกเทฟลอน
- ผสมกาวอีพ็อกซีให้เป็นเนื้อเดียวกัน กดหลอดฉีดให้กาวไหลออกมาตามปริมาณที่ต้องการ ใช้แท่งพลาสติกแบนค่อยๆคนผสมกาว 2 ส่วนเข้าด้วยกันให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุด จากนั้นไล่ฟองอากาศออกด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง
- นำสายไฟที่เชื่อมลวดเงินใส่เข้าไปในท่อพลาสติกเทฟลอน โดยให้ลวดเงินเกินออกมาประมาณเกือบ 1 นิ้ว ตรงส่วนต้นของท่อพลาสติกเทฟลอน จากนั้นนำกระบอกฉีดยาหัวฉีดแบบลิ้นคความจุ 3 มิลลิลิตร บรรจุกาวอีพ็อกซีที่ได้เตรียมไว้แล้ว ใส่เข็มฉีดยาขนาด 0.9 x 25 มิลลิเมตร ฉีดกาวอีพ็อกซีเข้าไป โดยฉีดจากส่วนปลายของท่อพลาสติกเทฟลอนก่อน แล้วจึงฉีดส่วนต้นของท่อพลาสติกเทฟลอน
- เมื่อกาวอีพ็อกซีแห้งสนิทแล้ว นำกาวอีพ็อกซี พัทท์ (epoxy putty) ที่มีลักษณะคล้ายดินน้ำมัน มาตัดตามปริมาณที่ต้องการ ใช้มือผสมกันจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปแปะบนรอยต่อระหว่างสายไฟกับส่วนปลายของท่อพลาสติกเทฟลอนเพื่อป้องกันน้ำซึมเข้าไป
- ปกกสายไฟด้านปลายสายเพื่อใช้หนีบต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท

2.4.3 ขั้วไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์

1. นำลวดแพลทินัมมาเชื่อมติดกับสายไฟที่ปกกให้เหลือแต่ลวดทองแดง โดยปกกฉนวนหุ้มสายไฟสีม่วงออก 1 เซนติเมตร จากนั้นใช้หัวแร้งที่มีความร้อนละลายตะกั่วบัดกรี แบนลงจุดที่ต้องการเชื่อม หัวแร้งจะละลายตะกั่วยึดติดทันที
2. ตัดลวดแพลทินัมให้มีความยาว 1 นิ้ว และตัดสายไฟความยาว 2 ฟุต โดยวัดจากปลายของท่อพลาสติกเทฟลอน
3. ผสมกาวอีพ็อกซีให้เป็นเนื้อเดียวกัน กดหลอดฉีดยาให้กาวไหลออกมาตามปริมาณที่ต้องการ ใช้แท่งพลาสติกแบนค่อยๆคนผสมกาว 2 ส่วนเข้าด้วยกันให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุด จากนั้นไล่ฟองอากาศออกด้วยเครื่องสูบลมที่แรงที่สุด
4. นำสายไฟที่เชื่อมลวดแพลทินัมใส่เข้าไปในท่อพลาสติกเทฟลอน โดยให้ลวดแพลทินัมเกินออกมาประมาณ เกือบ 1 นิ้ว ตรงส่วนต้นของท่อพลาสติกเทฟลอน จากนั้นนำกระบอกฉีดยาหัวฉีดแบบลือคความจุ 3 มิลลิลิตร บรรจุกาวอีพ็อกซีที่ได้เตรียมไว้แล้ว ใส่เข็มฉีดยาขนาด 0.9×25 มิลลิเมตร ฉีดกาวอีพ็อกซีเข้าไป โดยฉีดจากส่วนปลายของท่อพลาสติกเทฟลอนก่อน แล้วจึงฉีดส่วนต้นของท่อพลาสติกเทฟลอน
5. เมื่อกาวอีพ็อกซีแห้งสนิทแล้ว นำกาวอีพ็อกซี พัทท์ (epoxy putty) ที่มีลักษณะคล้ายดินน้ำมัน มาตัดตามปริมาณที่ต้องการ ใช้มือผสมกันจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปแปะบนรอยต่อระหว่างสายไฟกับส่วนปลายของท่อพลาสติกเทฟลอนเพื่อป้องกันน้ำซึมเข้าไป
6. ปอกสายไฟด้านปลายสายเพื่อใช้หนีบต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท

2.5 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

2.5.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงานก่อนใช้งาน

1. นำขั้วไฟฟ้าทองประดิษฐ์ มาขัดด้วยสารละลายอะลูมินาแบบขั้นที่ผสมจากผงอะลูมินาขนาด 1.0 ไมโครเมตร บนผ้าสักหลาดหยาบ ขัดวนเป็นจำนวน 80 รอบ แล้วล้างด้วยน้ำ Milli-Q จากนั้นนำไปเข้าเครื่องสูบลมที่แรงที่สุดเป็นเวลา 1 นาที แล้วล้างขั้วไฟฟ้าทองประดิษฐ์ด้วยน้ำ Milli-Q อีกครั้ง
2. ทำขั้นตอนในข้อ 1. ซ้ำอีกครั้งด้วยสารละลายอะลูมินาแบบขั้นที่ผสมจากผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร บนผ้าสักหลาดละเอียด จากนั้นเช็ดให้แห้ง

2.5.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ก่อนใช้งาน

1. นำสายไฟที่มีลวดเงินใหม่จำนวน 2 เส้น มาทำความสะอาดด้วยเอทานอล จากนั้นล้างด้วยน้ำ DI
2. จุ่มส่วนที่เป็นลวดเงินลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร ต่อสายไฟแต่ละเส้นกับถ่านอัลคาไลน์ 9 โวลต์ เป็นเวลา 10 นาที โดยสายไฟด้านหนึ่งต่อกับขั้วบวก และอีกเส้นต่อกับขั้วลบ
3. จากนั้นที่ด้านแอนโอดจะมีตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์เกาะอยู่ นำไปใช้เป็นขั้วซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ต่อไป

2.5.3 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าหลังใช้งาน

สำหรับขั้วไฟฟ้าทำงาน: นำขั้วไฟฟ้าทองประดิษฐ์ไปล้างด้วยน้ำ Milli-Q จากนั้นนำมาขัดด้วยสารละลายอะลูมินาแบบขั้นที่ผสมจากผงอะลูมินาขนาด 1.0 ไมโครเมตร บนผ้าสักหลาดหยาบ ขัดวนเป็นจำนวน 80 รอบ แล้วล้างด้วยน้ำ Milli-Q จากนั้นนำไปเข้าเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 1 นาที แล้วล้างขั้วไฟฟ้าทองประดิษฐ์ด้วยน้ำ Milli-Q อีกครั้ง ทำซ้ำอีกครั้งด้วยสารละลายอะลูมินาแบบขั้นที่ผสมจากผงอะลูมินาขนาด 0.3 ไมโครเมตร บนผ้าสักหลาดละเอียด จากนั้นเช็ดให้แห้ง นำเก็บในให้เรียบร้อย

สำหรับขั้วไฟฟ้าแพลทินัม: ล้างด้วยน้ำ Milli-Q หลังการใช้งาน

สำหรับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์: ล้างด้วยน้ำ Milli-Q หลังการใช้งาน เช็ดลวดเงินที่ถูกละลายด้วยซิลเวอร์คลอไรด์ด้วยแอมโมเนีย จากนั้นล้างด้วยเอทานอล ตามด้วยด้วยน้ำ Milli-Q เช็ดให้แห้ง นำเก็บในให้เรียบร้อย¹⁶

2.6 การทดลอง

1. บรรจूसารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ลงในเซลล์เคมีไฟฟ้า
2. จุ่มขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วย ตามชนิดที่ระบุไว้ในแต่ละการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ลงในสารละลายข้อ 1. ต่อสายไฟของแต่ละขั้วเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท (รูปที่ 2.6)

ตารางที่ 2.1 ขั้วไฟฟ้าทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละการทดลอง

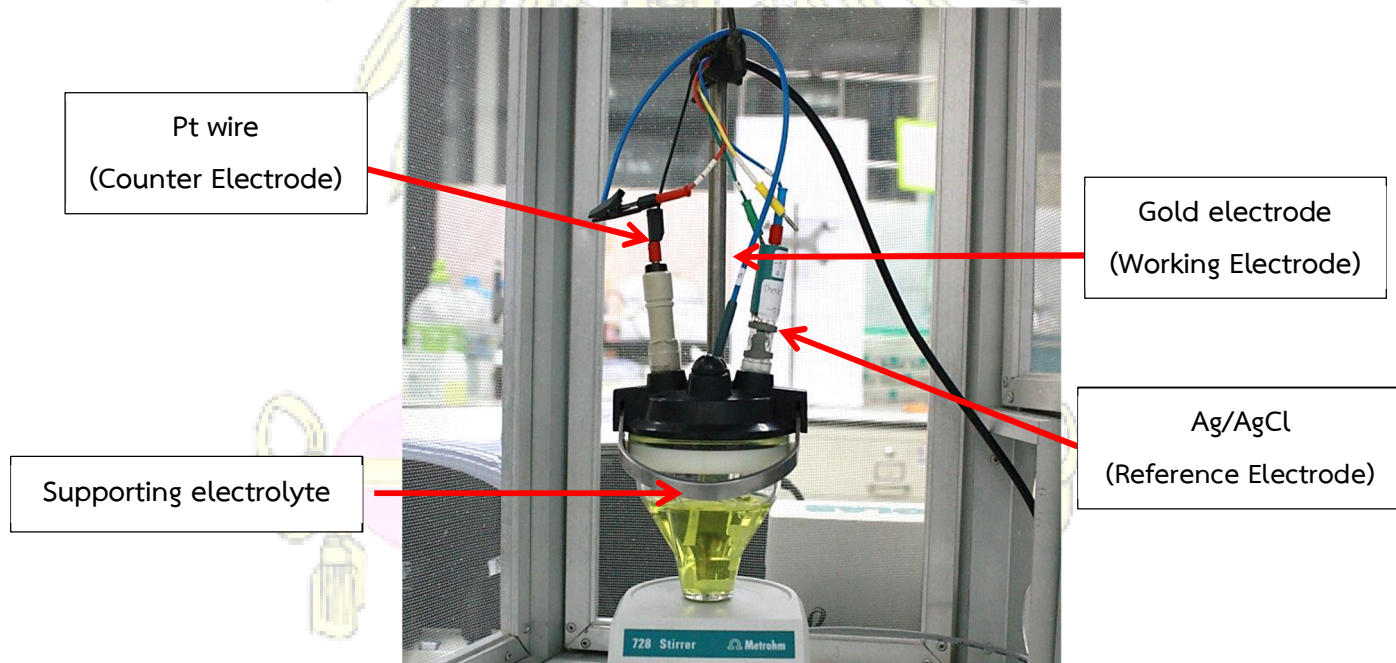
การทดสอบ	ขั้วไฟฟ้าที่เลือกใช้		
	ขั้วไฟฟ้าทำงาน	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง	ขั้วไฟฟ้าช่วย
1. ผลของชนิด สายไฟที่ใช้ทำ ขั้วไฟฟ้าทำงาน	ขั้วไฟฟ้าประติมาตร ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีเทา ความ ยาว 1 ฟุต	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิง พลาตินัมชนิด Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าช่วยเชิง พลาตินัมชนิด Pt
	ขั้วไฟฟ้าประติมาตร ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 1 ฟุต		
	ขั้วไฟฟ้าประติมาตร ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต		
2. ผลของความ ยาวสายไฟที่ใช้ ทำขั้วไฟฟ้า ทำงาน	ขั้วไฟฟ้าประติมาตร ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 1 ฟุต	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิง พลาตินัมชนิด Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าช่วยเชิง พลาตินัมชนิด Pt
	ขั้วไฟฟ้าประติมาตร ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 3 ฟุต		
	ขั้วไฟฟ้าประติมาตร ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 5 ฟุต		

ตารางที่ 2.1 ขั้วไฟฟ้าทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละการทดลอง (ต่อเนื่อง)

การทดสอบ	ขั้วไฟฟ้าที่เลือกใช้		
	ขั้วไฟฟ้าทำงาน	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง	ขั้วไฟฟ้าช่วย
3. ผลของปริมาณ ฟองอากาศที่มีใน ส่วนผสมของกา วอีพ็อกซี	ขั้วไฟฟ้าประติษฐาน ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิง พานิชย์ชนิด Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าช่วยเชิง พานิชย์ชนิด Pt
	ขั้วไฟฟ้าประติษฐานที่ ไม่มีลวดทองต่อกับ สายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต		
4. ผลของผิวหน้า ของขั้วไฟฟ้า ทองคำ	ขั้วไฟฟ้าประติษฐาน ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 1 ฟุต	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิง พานิชย์ชนิด Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าช่วยเชิง พานิชย์ชนิด Pt
5. ทดสอบการ ทำงานของ ขั้วไฟฟ้าประติษฐาน ชนิดซิลเวอร์-ซิล เวอร์คโลไรด์	ขั้วไฟฟ้าประติษฐาน ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 1 ฟุต	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิง พานิชย์ชนิด Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าช่วยเชิง พานิชย์ชนิด Pt
		ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ประติษฐานชนิด Ag/AgCl	
6. ทดสอบการ ทำงานของ ขั้วไฟฟ้าประติษฐาน ชนิดแพลทินัม	ขั้วไฟฟ้าประติษฐาน ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 1 ฟุต	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิง พานิชย์ชนิด Pt	ขั้วไฟฟ้าช่วย ประติษฐานชนิด Pt
		ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิง พานิชย์ชนิด Ag/AgCl	

ตารางที่ 2.1 ขั้วไฟฟ้าทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละการทดลอง (ต่อเนื่อง)

การทดสอบ	ขั้วไฟฟ้าที่เลือกใช้		
	ขั้วไฟฟ้าทำงาน	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง	ขั้วไฟฟ้าช่วย
7. การวัดสารละลาย ในเซลล์ เคมีไฟฟ้า	ขั้วไฟฟ้าประติขันธ์ ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 3 ฟุต	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิง พานิชย์ชนิด Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าช่วยเชิง พานิชย์ชนิด Pt
		ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ประติขันธ์ชนิด Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าช่วย ประติขันธ์ชนิด Pt
8. การวัดสารละลาย ในน้ำที่มีระดับ ความลึก	ขั้วไฟฟ้าประติขันธ์ ทองคำที่ต่อกับ สายไฟสีม่วง ความ ยาว 3 ฟุต	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ประติขันธ์ชนิด Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าช่วย ประติขันธ์ชนิด Pt



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้า

3. ตั้งพารามิเตอร์ของเครื่องมือ โดยเลือกโหมดไซคลิกโวลแทจเมตริ สแกนจากค่าศักย์ไฟฟ้า -0.8 ถึง -0.2 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าแต่ละขั้น 0.02 โวลต์ อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ต่อวินาที บันทึกสัญญาณที่ได้ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง หรือใช้ชุดพารามิเตอร์ค่าอื่น ตามแต่ที่ระบุไว้ในแต่ละการทดลอง

2.6.1 ผลของความยาวสายไฟที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทำงาน

ทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ด้านบน โดยปรับการสแกนสัญญาณในข้อ 3 เป็นจำนวนสแกน 1 ครั้ง บันทึกสัญญาณที่ได้ทำซ้ำจำนวน 20 ครั้ง หลังจากนั้นปรับจำนวนสแกน เป็น 20 ครั้ง

2.6.2 ผลของผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทองคำ

ทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ด้านบน โดยปรับการสแกนสัญญาณในข้อ 3 เป็นจำนวนสแกน 1 ครั้ง บันทึกสัญญาณที่ได้ ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

2.6.3 ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

ทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ด้านบน โดยปรับการสแกนสัญญาณในข้อ 3 เป็นสแกนจากค่าศักย์ไฟฟ้า -0.7 ถึง -0.3 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าแต่ละขั้น 0.02 โวลต์ อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ต่อวินาที (สำหรับการใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์) และจำนวนสแกน 1 ครั้ง บันทึกสัญญาณที่ได้ ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

2.6.4 ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดแพลทินัม

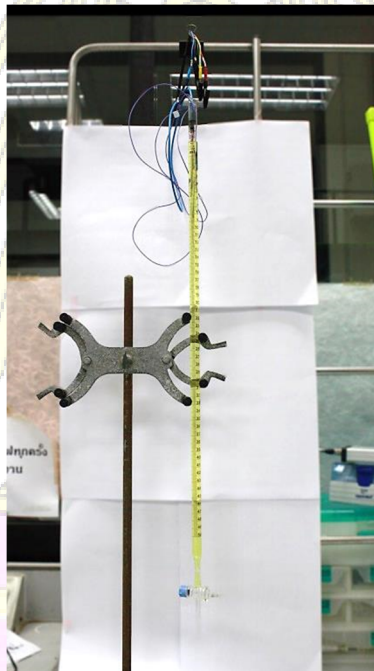
ทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ด้านบน โดยปรับการสแกนสัญญาณในข้อ 3 เป็นจำนวนสแกน 1 ครั้ง บันทึกสัญญาณที่ได้ ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

2.6.5 การวัดสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า

ทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ด้านบน โดยปรับการสแกนสัญญาณในข้อ 3 เป็นสแกน จากค่าศักย์ไฟฟ้า -0.7 ถึง -0.3 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าแต่ละขั้น 0.02 โวลต์ อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ต่อวินาที (สำหรับการใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์) และจำนวนสแกน 1 ครั้ง บันทึกสัญญาณที่ได้ ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

2.6.6 การวัดสารละลายในน้ำที่มีระดับความลึก

ทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ด้านบน โดยปรับการสแกนสัญญาณในข้อ 3 เป็นสแกน จากค่าศักย์ไฟฟ้า -0.7 ถึง -0.3 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าแต่ละขั้น 0.02 โวลต์ อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ต่อวินาที และจำนวนสแกน 1 ครั้ง บันทึกสัญญาณที่ได้ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง โดยวัดที่ระดับความลึก 5 10 15 20 25 30 35 40 45 และ 50 เซนติเมตร (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 การวัดสารละลายในน้ำที่มีระดับความลึกต่าง ๆ

บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบขั้วทางเคมีไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดก๊าซที่ละลายในน้ำแวนลิค ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี โดยได้ออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบขั้วไฟฟ้าที่ประดิษฐ์ขึ้น และนำมาประยุกต์ใช้ในวัดสัญญาณของสารมาตรฐานในน้ำแวนลิคจำลองได้ผลการทดลองดังนี้

3.1 ศึกษาการสร้างขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ พร้อมทดสอบการใช้งาน

3.1.1 การสร้างขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์ชนิดลวดทองคำ

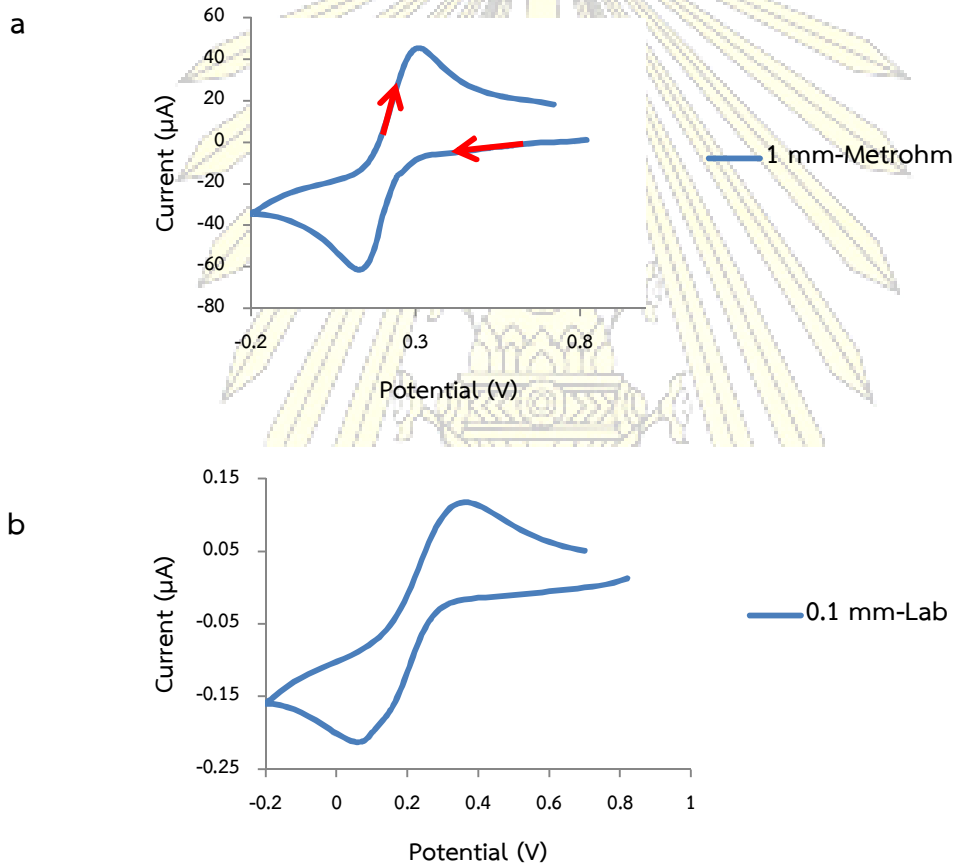
ขั้วไฟฟ้าทำงานประดิษฐ์ประกอบด้วยลวดทองคำร้อยละ 99.99 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร นำลวดทองคำ มาเชื่อมต่อกับลวดทองแดง ซึ่งลวดทองแดงแบ่งออกเป็น 3 แบบ โดยมีขนาดของลวดตัวนำที่แตกต่างกัน (1) สายไฟสีเทา มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 0.129 ตารางมิลลิเมตร (2) สายไฟสีม่วง มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 0.205 ตารางมิลลิเมตร และ (3) สายไฟสีน้ำเงิน มีพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ 1 ตารางมิลลิเมตร โดยค่าพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำที่รายงานนั้นไม่ใช่ตัวเลขจากการวัดโดยตรงของผู้ทดลอง แต่มาจากการแปลงตัวเลขในตารางค่าคุณลักษณะเฉพาะของสายไฟ¹⁷ ซึ่งการวัดด้วยไมโครมิเตอร์คาลิเปอร์ (micrometer caliper) อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากพื้นที่ช่องว่างระหว่างลวดตัวนำหรือแรงบีบลวดตัวนำจากการหมุนสเกล การสร้างขั้วไฟฟ้าจะนำลวดทองคำความยาว 1 เซนติเมตร มาเชื่อมติดกับสายไฟที่ปกกให้เหลือแต่ลวดทองแดง โดยปกกฉนวนหุ้มสายไฟสีม่วงกับสายไฟสีเทาออก 1.5 เซนติเมตร และสายไฟสีน้ำเงินออก 9 เซนติเมตร จากนั้นใช้หัวแร้งที่มีความร้อนละลายตะกั่วบัดกรีแนบลงจุดที่ต้องการเชื่อม ซึ่งขั้นตอนนี้อาจจะทำให้ลวดทองคำขาดได้ต้องระวังการบัดกรีเป็นพิเศษ เนื่องจากลวดทองมีขนาดเล็กและหัวแร้งมีอุณหภูมิที่สูง

การใช้คีมปกกสายไฟ อาจทำให้สายของลวดตัวนำขาดได้ เนื่องจากขนาดของลวดตัวนำที่เล็กและคีมปกกสายไฟที่มีแรงกดเอาฉนวนที่หุ้มสายออก แรงกดของคีมปกกสายไฟนี้ไม่สามารถที่จะควบคุมได้ทำให้ลวดตัวนำที่มีขนาดเล็กขาด ดังนั้นการปกกสายไฟต้องระวังแรงกดเป็นพิเศษหรืออาจจะใช้กรรไกรช่วยในการปกกสายค่อย ๆ ปกกฉนวนที่หุ้มสายออก

เพื่อป้องกันน้ำเข้าสายไฟที่บรรจุอยู่ในท่อพลาสติกเทฟลอน (PTFE tube) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 มิลลิเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร จึงใช้กระบอกฉีดยาที่บรรจุสารอีพ็อกซี ฉีดสารอีพ็อกซีเข้าไปในท่อเทฟลอน แต่เนื่องจากสารอีพ็อกซีที่มีลักษณะข้นและเหนียว ทำให้เมื่อใช้เข็มฉีดยาขนาด 0.5 x 25 มิลลิเมตร เกิดปัญหาที่เข็มหลุดออกจากหัวของกระบอกฉีดยา จากปัญหา

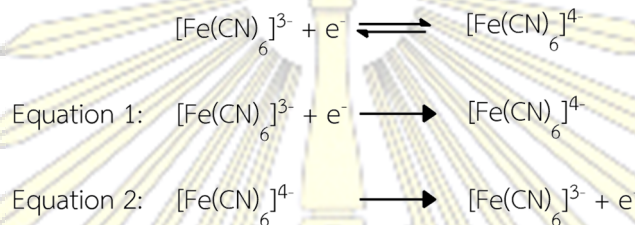
ดังกล่าวจึงนำกาวอีพ็อกซีมาผสมกับอะซิโตน เพื่อให้กาวอีพ็อกซีมีลักษณะเหลวมากขึ้น แต่การนำกาวอีพ็อกซีมาผสมกับอะซิโตนทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่จำนวนมาก ใช้เวลาในการแข็งตัวนาน และเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะอ่อนนิ่ม งามได้ตามปริมาณอะซิโตนที่ผสมเข้าไป ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนขนาดเข็มฉีดยาเป็น 0.9×25 มิลลิเมตร และกระบอกฉีดยาเป็นหัวฉีดแบบล็อกเข็มได้ เพื่อลดปัญหาแรงดันที่จะดันเข็มฉีดยาหลุดออกจากหัวของกระบอกฉีดยา

ทดลองวิเคราะห์สัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ของ Metrohm ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับสัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้นเดียวกัน ที่วัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.1) ในสภาวะเดียวกัน

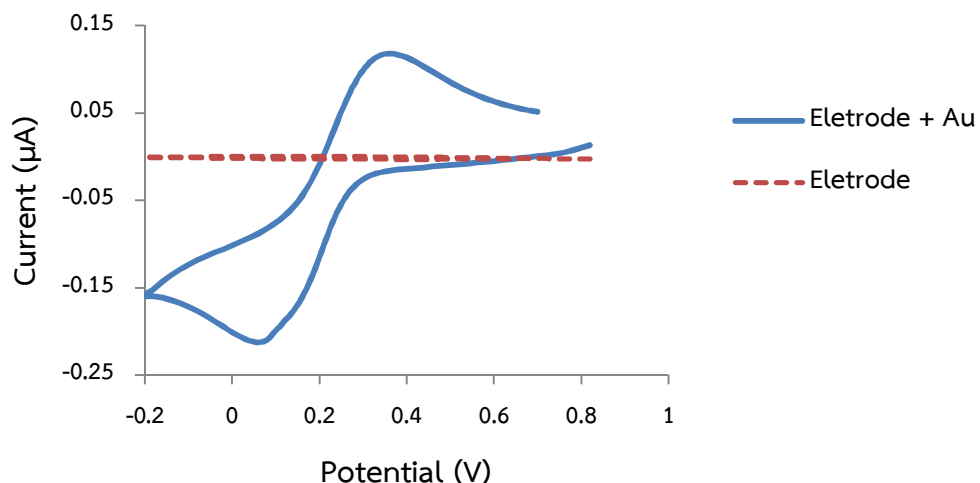


รูปที่ 3.1 ไซคลิกโวลแทมเมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ของ Metrohm ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร (a) และขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต (b) โดยสแกนจากค่าศักย์ไฟฟ้า 0.8 ถึง -0.2 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าแต่ละชั้น 0.02 โวลต์ อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.5 โวลต์ต่อวินาที

จากผลการทดสอบ พบว่า สัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) มีลักษณะผันกลับได้ (reversible) เมื่อตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าเชิงพาดิซและขั้วไฟฟ้าที่ประจุขึ้น โดยเมื่อสแกนไปทางศักย์ไฟฟ้าด้านลบ (0.8 ไป -0.2 โวลต์) พบสัญญาณของปฏิกิริยารีดักชันในช่วง 0.2 ถึง 0 โวลต์ (Equation 1) และเมื่อกลับทิศการสแกนไปทางศักย์ไฟฟ้าด้านบวก (-0.2 ไป 0.8 โวลต์) ผลิตภัณฑ์ $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในช่วง 0.2 ถึง 0.4 โวลต์ (Equation 2) ซึ่งลักษณะและตำแหน่งของสัญญาณที่วัดได้จากขั้วไฟฟ้าประจุมีความสอดคล้องตรงกันกับที่วัดได้จากขั้วไฟฟ้าเชิงพาดิซ นอกจากนี้ปริมาณค่ากระแสไฟฟ้า (ความสูงของพีคสัญญาณ) ที่ต่างกันมากในรูปที่ 3.1 และ 3.2 เป็นผลมาจากขนาดของหลอดทองคำที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า ขั้วไฟฟ้าประจุสามารถนำมาใช้ตรวจวัดสัญญาณได้เช่นเดียวกับขั้วไฟฟ้าเชิงพาดิซ



จากนั้นทดลองวิเคราะห์สัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประจุชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าประจุที่ไม่มีหลอดทองคำ โดยทั้งคู่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาวสาย 1 ฟุต (รูปที่ 3.2)



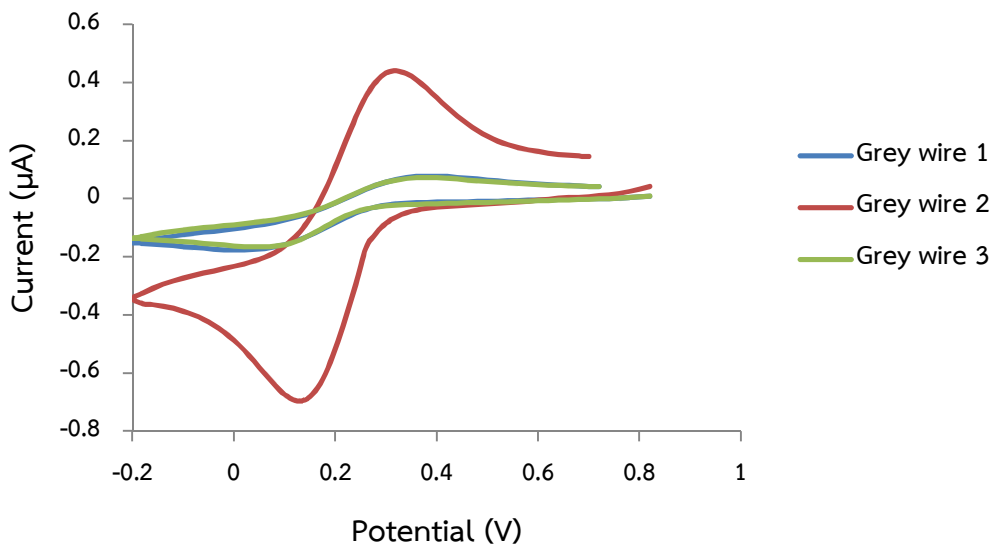
รูปที่ 3.2 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประจุชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร (เส้นทึบ) และกับขั้วไฟฟ้าประจุที่ไม่มีหลอดทองคำ (เส้นประ) ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต

พบว่า ไม่ปรากฏสัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เมื่อตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติขั้วที่ไม่มีลวดทองคำ ผลการทดลองนี้ยืนยันว่า พื้นผิวของทองคำมีความสำคัญต่อการวัดสัญญาณไฟฟ้าของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า หรืออาจกล่าวได้ว่า อิพ็อกซีโดยลำพังไม่สามารถใช้ตรวจวัดสัญญาณของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าได้

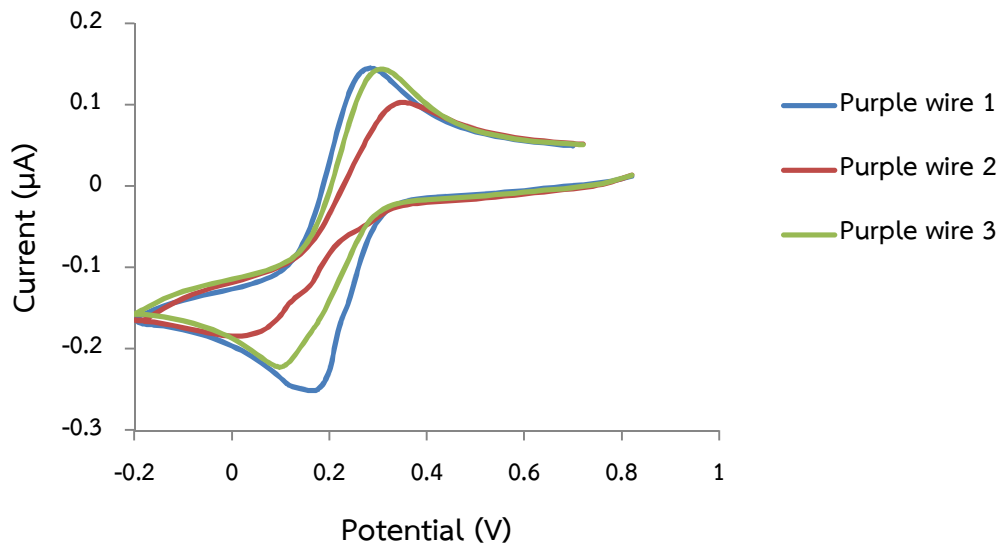
3.2 การทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการวัดสัญญาณของขั้วไฟฟ้าประติขั้วชนิดทองคำ

3.2.1 ผลของชนิดสายไฟที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทำงาน

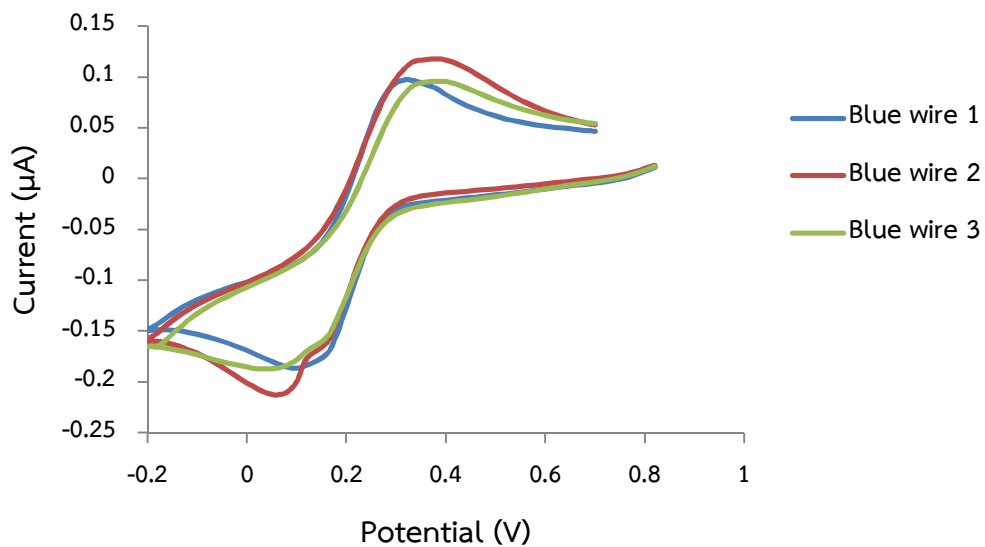
ทดลองวิเคราะห์สัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประติขั้วชนิดทองคำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ สายไฟสีเทา ม่วง และน้ำเงิน ชนิดละ 3 เส้น โดยมีขั้นตอนการประติขั้วขั้วที่เหมือนกัน มีความยาวสายไฟเส้นละ 1 ฟุต ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติขั้วชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีเทา ความยาว 1 ฟุต จำนวน 3 เส้น



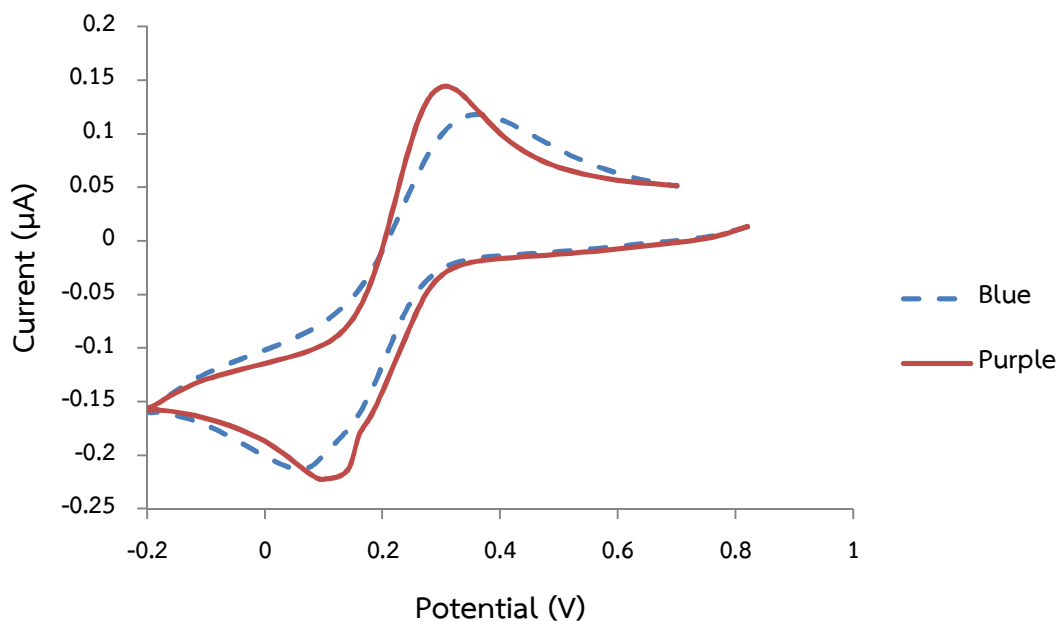
รูปที่ 3.4 ซิกนัลโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 ฟุต จำนวน 3 เส้น



รูปที่ 3.5 ซิกนัลโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต จำนวน 3 เส้น

เมื่อวัดความสูงของสัญญาณแคโทดิก (พิกสัญญาณที่ตำแหน่งประมาณ 0.073 โวลต์) ที่ได้จากสายไฟแต่ละเส้น แล้วคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสายไฟแต่ละชนิด พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสายไฟสีเทา ม่วง และน้ำเงินมีค่าเท่ากับ 0.282 0.041 และ 0.086 ตามลำดับ โดยกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากสายไฟสีเทา 3 เส้นมีค่าแตกต่างกันมาก มีเพียงสายเส้นที่ 2 (Grey wire 2) ที่ลวดตัวนำไม่ขาดและให้กระแสสูงสุด ซึ่งกระแสที่ลดลงน่าจะเกิดจากการหลุด-ขาดของลวดตัวนำในขั้นตอนการปอกสายไฟเอาฉนวนที่หุ้มสายออก ทำให้การนำไฟฟ้าของสายที่ขาดนำไฟฟ้าได้ไม่ดี และเนื่องจากลวดตัวนำของสารไฟสีเทานี้มีขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ 0.46 มิลลิเมตร) มีโอกาสเกิดการขาดได้ง่ายตอนปอกฉนวนที่หุ้มออก ผู้วิจัยจึงไม่นำสายไฟสีเทานี้มาใช้งาน

เมื่อพิจารณาโวลแทมโมแกรมที่วัดได้ด้วยสายไฟสีม่วงและสีน้ำเงิน พบว่า โวลแทมโมแกรมมีลักษณะใกล้เคียงกัน และเมื่อนำสัญญาณเส้นที่แสดงความผันกลับ (reversible) ที่ดีที่สุดในกลุ่ม ซึ่งคือเส้นสัญญาณที่มีความชันสูงที่สุดในกลุ่ม มาเปรียบเทียบกับ (รูปที่ 3.6) พบว่าสัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่วัดได้จากสายไฟสีม่วง แสดงความผันกลับที่มากกว่าและยังมีค่าความสูงของกระแสแคโทดิกที่มากกว่าสัญญาณที่วัดได้จากสายไฟสีน้ำเงินเล็กน้อย ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้สายไฟสีม่วงในการประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าทำงานสำหรับการทดลองในขั้นถัดไป



รูปที่ 3.6 ซิกคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน (เส้นประ) และสายไฟสีม่วง (เส้นทึบ) ความยาว 1 ฟุต

3.2.2 ผลของความยาวสายไฟที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทำงาน

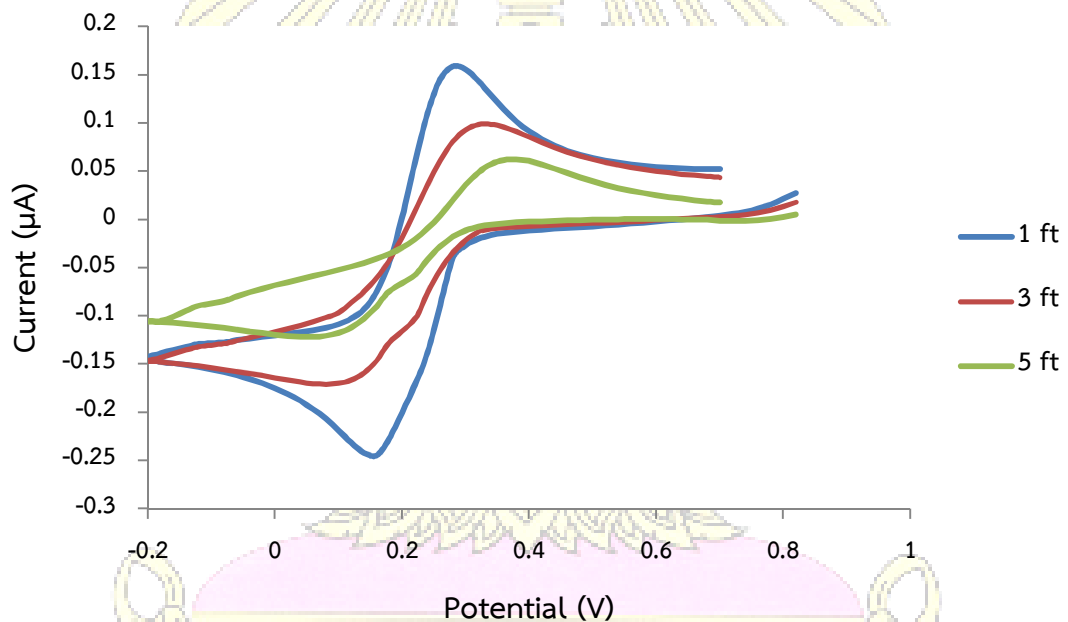
ทดลองวิเคราะห์สัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วงความยาว 1 3 และ 5 ฟุตตามลำดับ พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าลดลงตามความยาวของสายไฟที่มากขึ้น (รูปที่ 3.7) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการความต้านทานไฟฟ้าต่อไปนี้

$$R = \frac{l \times \rho}{A}$$

โดย l คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

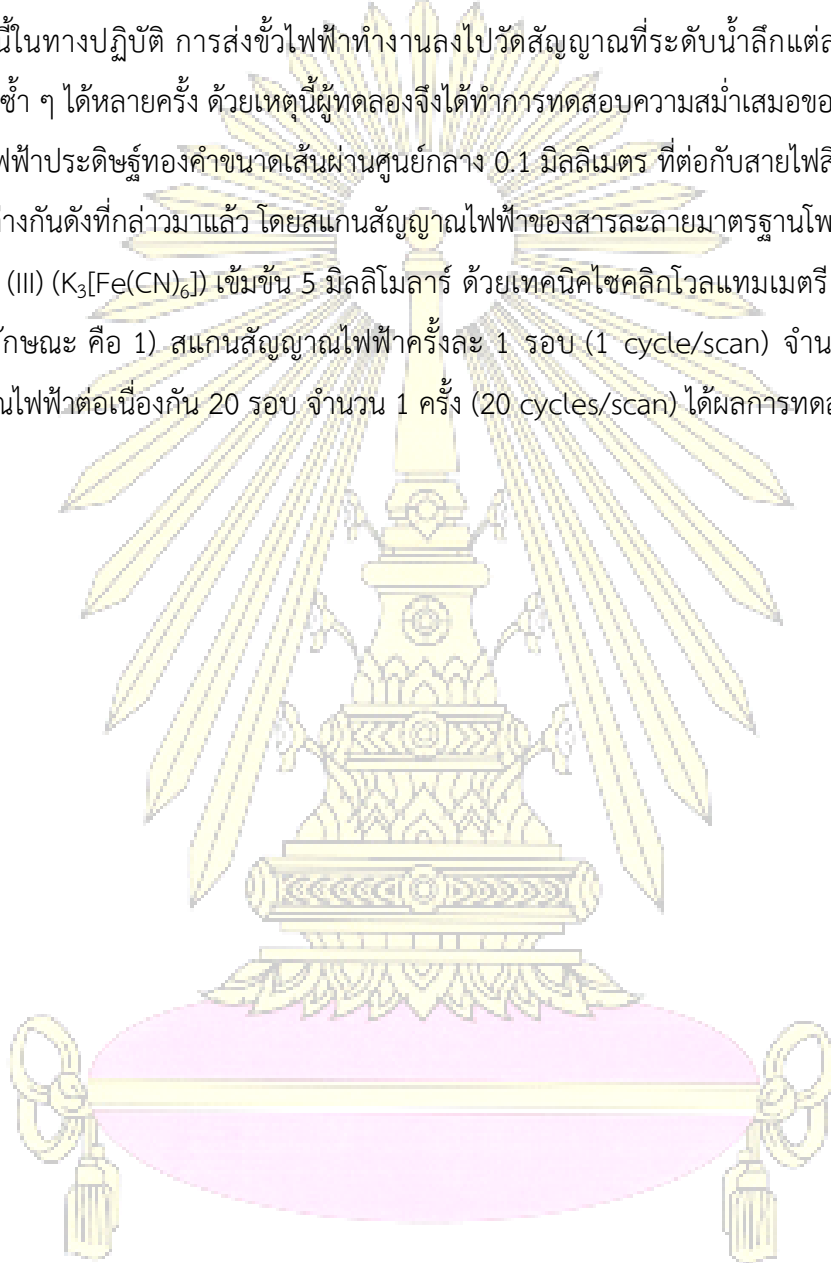
ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของสสาร มีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร ($\Omega \cdot m$)

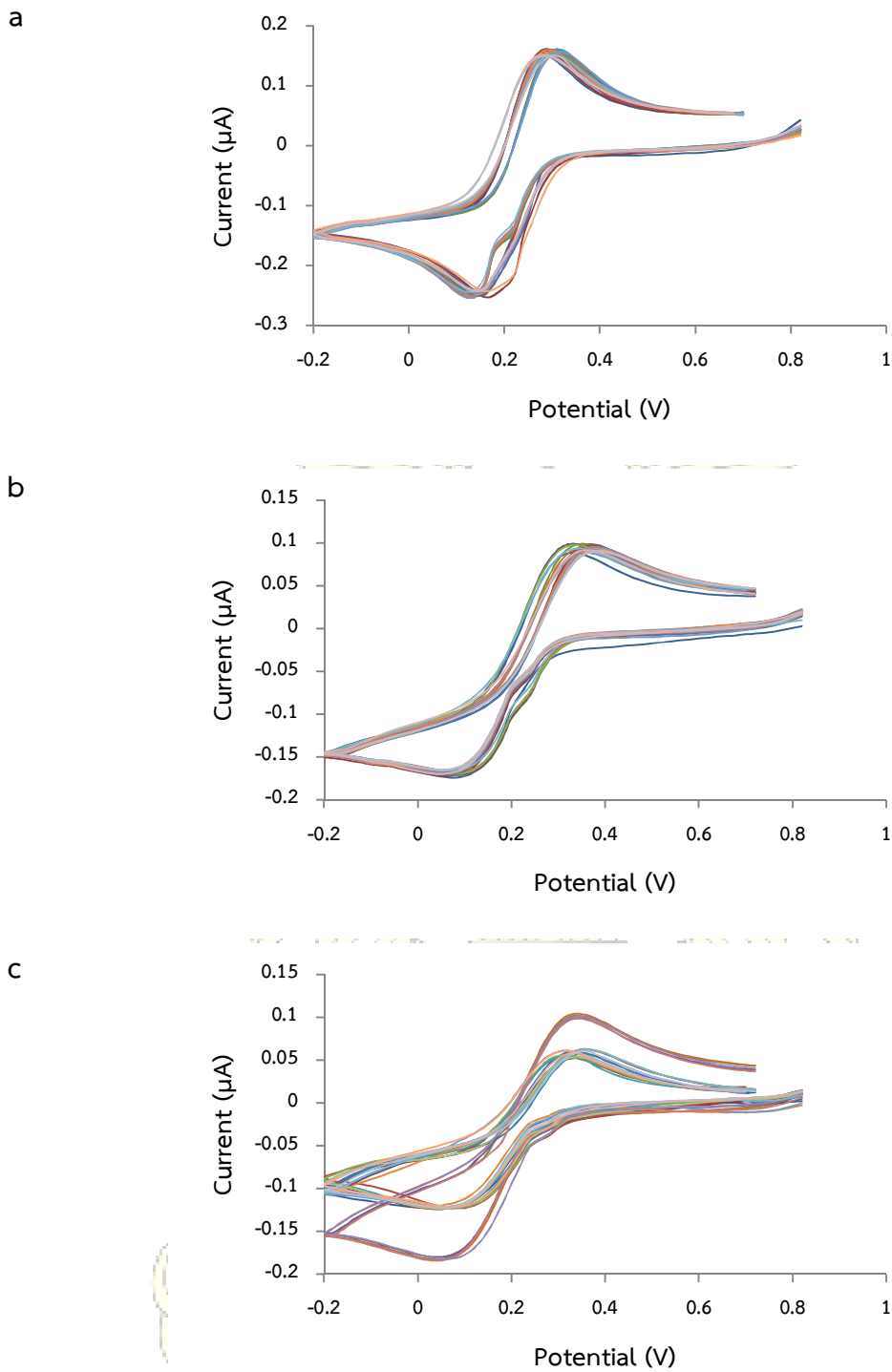


รูปที่ 3.7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 (เส้นสีน้ำเงิน) 3 (เส้นสีแดง) และ 5 (เส้นสีเขียว) ฟุต (สแกนครั้งที่ 3)

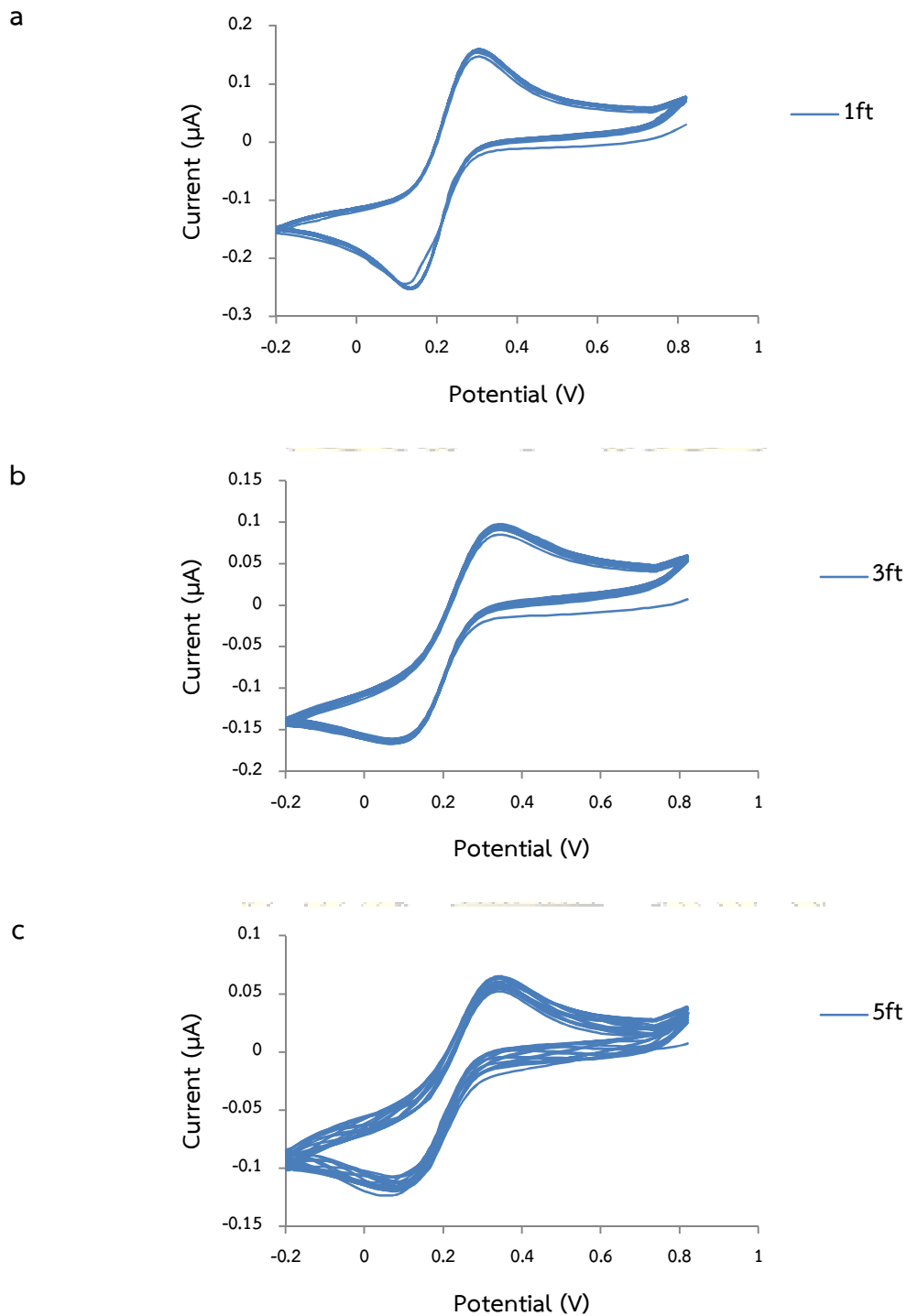
นั่นคือ เมื่อลวดตัวนำชนิดเดียวกัน (ρ ค่าเดียวกัน) มีพื้นที่หน้าตัด (A) ที่เท่ากัน แต่มีความยาวสายไฟ (l) ที่ต่างกัน จะส่งผลให้มีค่าความต้านทาน (R) ของสายไฟที่ต่างกัน โดยสายไฟที่มีความยาวมาก จะมีความต้านทานไฟฟ้ามาก เป็นผลให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่วัดได้อ่อนลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้นี้ อย่างไรก็ตามการส่งขั้วไฟฟ้าทำงานไปวัดสัญญาณที่ระดับน้ำลึก ไม่อาจหลีกเลี่ยงหรือลดการใช้สายไฟฟ้าที่ยาวได้ จึงจำเป็นต้องยอมรับผลกระทบเรื่องความยาวของสายไฟพื่อนี้

นอกจากนี้ในทางปฏิบัติ การส่งขั้วไฟฟ้าทำงานลงไปที่ระดับน้ำลึกแต่ละครั้ง ขั้วจะต้องสามารถใช้สแกนซ้ำ ๆ ได้หลายครั้ง ด้วยเหตุนี้ผู้ทดลองจึงได้ทำการทดสอบความสม่ำเสมอของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วงที่มีความยาวของสายไฟแตกต่างกันดังที่กล่าวมาแล้ว โดยสแกนสัญญาณไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ซ้ำ ๆ กันจำนวน 20 ครั้ง ใน 2 ลักษณะ คือ 1) สแกนสัญญาณไฟฟ้าครั้งละ 1 รอบ (1 cycle/scan) จำนวน 20 ครั้ง และ 2) สแกนสัญญาณไฟฟ้าต่อเนื่องกัน 20 รอบ จำนวน 1 ครั้ง (20 cycles/scan) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9





รูปที่ 3.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติรูปชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 (a) 3 (b) และ 5 (c) ฟุต โดยสแกนสัญญาณไฟฟ้าครั้งละ 1 รอบ (1 cycle/scan) จำนวน 20 ครั้ง



รูปที่ 3.9 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 (a) 3 (b) และ 5 (c) ฟุต โดยสแกนสัญญาณไฟฟ้าต่อเนื่องกัน 20 รอบ จำนวน 1 ครั้ง (20 cycles/scan)

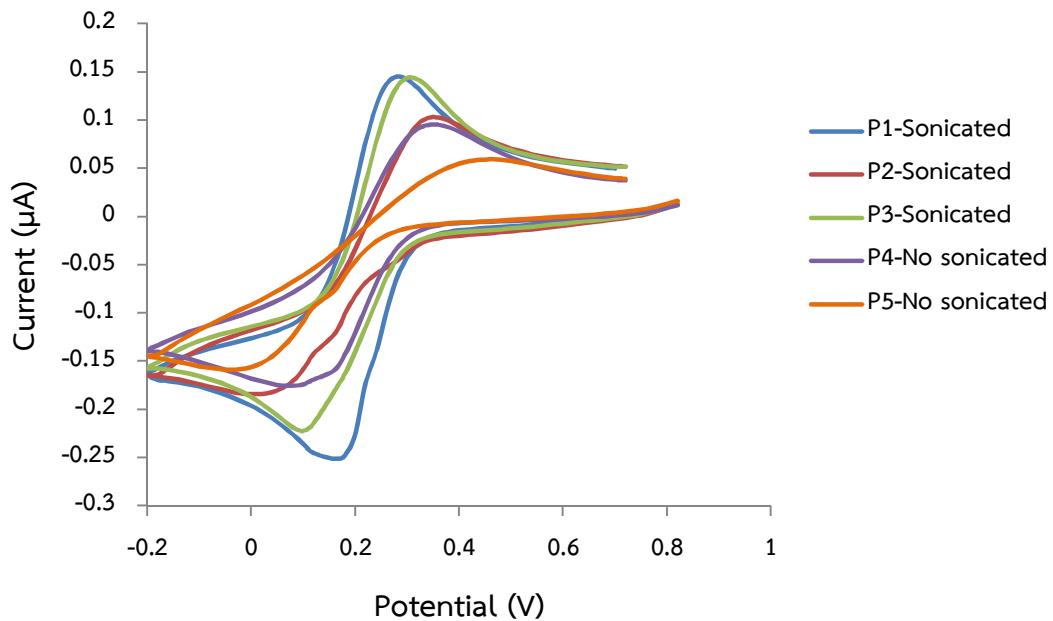
จากผลการทดลอง พบว่า สายไฟสีม่วงทั้ง 3 ความยาวให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน คือ การสแกนในลักษณะที่ 2 (20 cycles/scan) ได้สัญญาณไฟฟ้าที่มีการซ้อนทับกันของสัญญาณ (reproducible) ดีกว่าการสแกนในลักษณะที่ 1 (1 cycle/scan) โดยสายไฟที่มีความยาวน้อยวัดความเที่ยงของสัญญาณไฟฟ้าได้ดีกว่าสายไฟที่มีความยาวมากกว่า นอกจากนี้สายไฟที่มีความยาวน้อยกว่ายังสามารถวัดค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ได้มากกว่าสายไฟที่มีความยาวมากกว่าอีกด้วย และด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวไปข้างต้น การส่งข้อไฟฟ้าทำงานไปวัดสัญญาณที่ระดับน้ำลึก ไม่อาจหลีกเลี่ยงหรือลดการใช้สายไฟที่ยาวได้ จึงจำเป็นต้องยอมรับและเข้าใจผลกระทบเกี่ยวกับการใช้สายไฟที่ยาวนี้

จากผลการทดลองข้างต้น ผู้ทดลองมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเลือกใช้ข้อไฟฟ้าให้เหมาะกับการปฏิบัติงานในภาคสนาม ดังนี้

- 1) เลือกใช้ข้อไฟฟ้าที่มีความยาวสายไฟไม่เกินกว่าความลึกของแหล่งน้ำที่ต้องการทำการวัดค่า
- 2) ทำการสอบเทียบ (calibration) กระแสสัญญาณของข้อไฟฟ้าแต่ละข้อแยกกัน
- 3) หากต้องการเก็บค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้ามากกว่า 1 ครั้งในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดค่า ควรเลือกการสแกนแบบต่อเนื่อง n รอบ/ครั้ง (n cycles/scan)

3.2.3 ผลของปริมาณฟองอากาศที่มีในส่วนผสมของกาวอีพ็อกซี

ทดลองวิเคราะห์สัญญาณเมื่อมีปริมาณฟองอากาศในส่วนผสมของกาวอีพ็อกซีไม่เท่ากัน โดยใช้ข้อไฟฟ้าประติษฐ์ทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วงที่มีความยาว 1 ฟุต สแกนสัญญาณไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี จำนวน 1 รอบ โดยใช้ข้อไฟฟ้าประติษฐ์ทองคำ 2 ลักษณะ คือ 1) สายที่ 1 2 และ 3 ทำการไล่ฟองอากาศออกด้วยเครื่องสูบลมสูง และ 2) สายที่ 4 กับ 5 ไม่ได้ทำการไล่ฟองอากาศออก ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.10



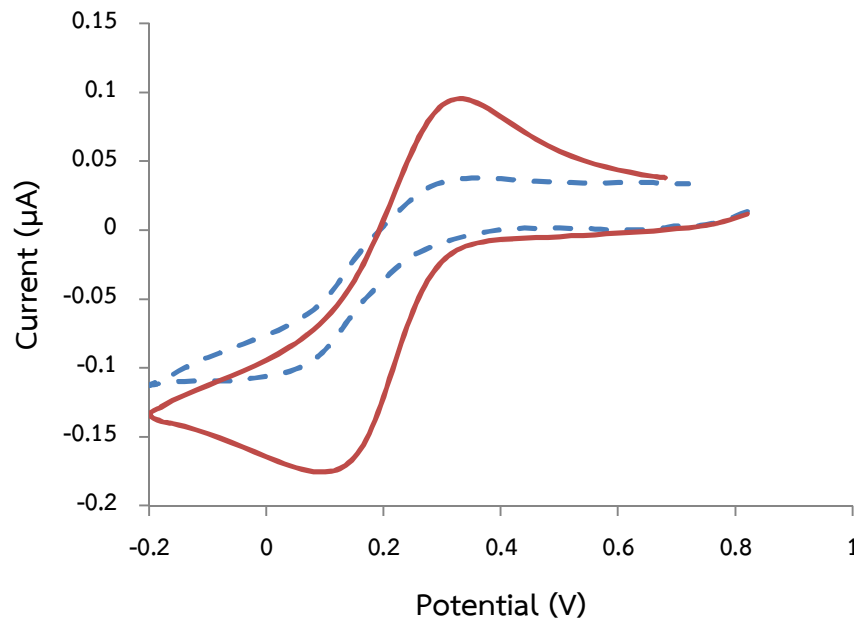
รูปที่ 3.10 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติขันธ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 ฟุต โดยสายที่ 1 2 และ 3 ไล่งออกอากาศออกด้วยเครื่องสูบลมสูง (เส้นสีน้ำเงิน, สีแดง และสีเขียว ตามลำดับ) และสายที่ 4 กับ 5 ไม่ได้ไล่งออกอากาศออก (เส้นสีม่วง และสีส้ม ตามลำดับ)

ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสายที่ 4 และ 5 (เส้นสีม่วง และสีส้ม ตามลำดับ) ที่มีการเตรียมการอีพ็อกซีแบบไม่ได้ไล่งออกอากาศออกให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าสายที่ 1 2 และ 3 ที่ไล่งออกอากาศออกด้วยเครื่องสูบลมสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธีไล่งออกอากาศจากการอีพ็อกซีออกด้วยเครื่องสูบลมสูงสำหรับการทำขั้วไฟฟ้าทำงานในการทดลองขั้นต่อไป

3.2.4 ผลของผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทองคำ

ทองคำ นอกจากจะเป็นโลหะเนื้ออ่อน เกิดรอยขีดข่วนได้ง่ายแล้ว ผิวของทองคำยังสามารถเกิดออกไซด์กับออกซิเจนในอากาศในขณะที่ใช้งานหรือเก็บรักษาได้อีกด้วย ซึ่งทั้ง 2 สาเหตุนี้ จะส่งผลให้การวัดกระแสสัญญาณด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดทองคำแย่ง ผู้ทดลองจึงได้ทำการศึกษาผลของผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทองคำ โดยเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่วัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติขันธ์ชนิดลวดทองคำ กับสัญญาณของสารละลายเดียวกันที่วัดด้วยขั้วไฟฟ้าอันเดมที่ทำการเฉือนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทองคำออก แล้วนำมาขัดผิวด้วยผงอะลูมินาก่อนนำมาใช้งาน

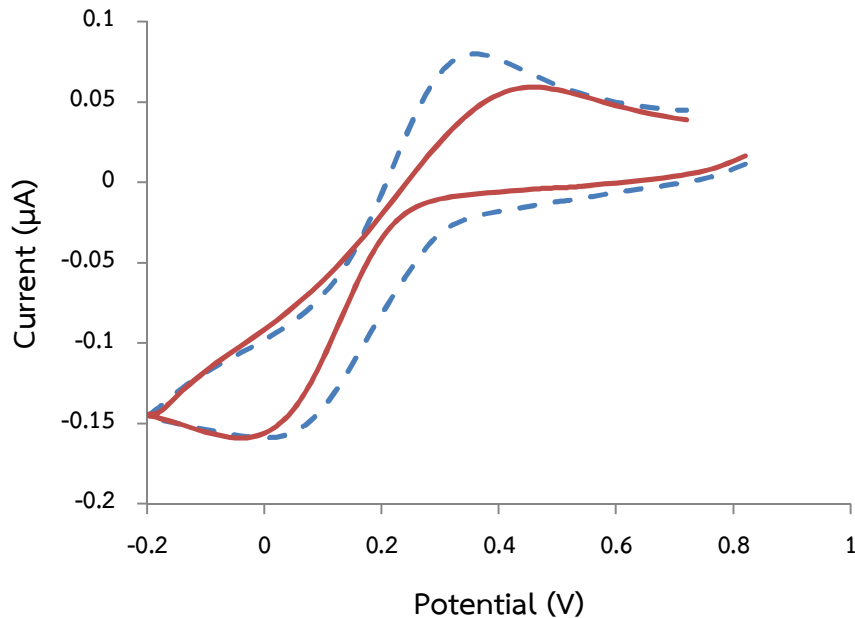
พบว่า วิธีการฉีกผิวหน้าเก่าของขั้วไฟฟ้าทองคำออก เพื่อเปิดผิวหน้าทองคำใหม่ขึ้นมา สามารถทำให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้ขั้วไฟฟ้าอันเดิมเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วงเส้นที่ 4 ความยาว 1 ฟุต ก่อนการฉีกผิวหน้าขั้วทองคำ (เส้นประ) และหลังการฉีกผิวหน้าขั้วทองคำ (เส้นทึบ)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ มีลักษณะความผันกลับ (reversible) ที่ดีขึ้น กล่าวคือ มีความชัน (slope) ของพีคสัญญาณที่ชันขึ้น และมีความสูงของกระแสสัญญาณที่มากขึ้น เมื่อวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทองคำสายสีม่วงความยาวสายไฟ 1 ฟุต ที่มีการฉีกเปิดผิวของขั้วไฟฟ้าทองคำใหม่แล้ว ทั้งนี้ ผลของค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นนี้ อาจเกิดเนื่องมาจากผิวหน้าขั้วมีความใหม่หรืออาจเกิดเนื่องมาจากพื้นที่ผิว (surface area) ใหม่มีพื้นที่ผิวของลวดทองคำเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากขั้นตอนการประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้านั้น ลวดทองคำอาจไม่ได้ตั้งตรงในแนวตั้ง ขนานไปความยาวของท่อเทฟลอน (PTFE tube) ตลอดความยาวของลวดทองคำ หรือไม่ได้ถูกบรรจุอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของท่อเทฟลอนตลอดความยาวของลวดทองคำ ดังนั้นหากลวดทองคำมีการโน้มเอียงไปบริเวณส่วนใดเมื่อตัดผิวหน้าขั้วไฟฟ้าใหม่ ลวดทองบริเวณส่วนนั้นจึงอาจมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าบริเวณส่วนที่ลวดทองคำตั้งตรง เป็นผลให้วัดกระแสสัญญาณได้มากขึ้น

นอกจากนี้ รูปที่ 3.12 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ทำการวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติษฐานทองคำสายสีม่วงอีกหนึ่งเส้น (เส้นที่ 5) ความยาวสายไฟ 1 ฟุต



รูปที่ 3.12 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติษฐานทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วงเส้นที่ 5 ความยาว 1 ฟุต ก่อนการเชื่อมผิวหน้าขั้วทองคำ (เส้นประ) และหลังการเชื่อมผิวหน้าขั้วทองคำ (เส้นทึบ)

จากผลการทดลอง พบว่า กระแสสัญญาณที่วัดได้ด้วยขั้วไฟฟ้าประติษฐานทองคำที่มีการเชื่อมเปิดผิวของขั้วไฟฟ้าทองคำใหม่นั้น ไม่มีลักษณะที่ดีขึ้นกว่าสัญญาณที่วัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้าประติษฐานทองคำเดิม กล่าวคือสัญญาณที่วัดได้จากขั้วไฟฟ้าประติษฐานทองคำที่มีการเชื่อมเปิดผิวใหม่แล้วนั้น มีลักษณะความผันกลับได้ (reversible) น้อยลงและมีค่าความสูงของกระแสแคโทดลดลง

จากข้อมูลข้างต้นจึงอาจสรุปได้ว่า ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามีความสำคัญยิ่งต่อลักษณะและความสูงของกระแสสัญญาณที่วัดได้ อันจะส่งผลไปถึงการวิเคราะห์สัญญาณด้วย ดังนั้นการดูแลและรักษาผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจึงนับเป็นสิ่งจำเป็น โดยวิธีการเชื่อมผิวหน้าเก่าของขั้วไฟฟ้าทองคำออก เพื่อเปิดผิวหน้าทองคำใหม่ขึ้นมา สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ในกรณีที่สัญญาณที่วัดได้มีลักษณะหรือค่าความสูงสัญญาณที่แยกลง แต่วิธีนี้ไม่อาจยืนยันได้ว่าการเชื่อมผิวหน้าเก่าของขั้วออก จะทำให้ได้สัญญาณที่ดีขึ้นเสมอไป

3.3 ศึกษาการสร้างและทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดอื่นๆ

เนื่องด้วยโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าทำงาน หรือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary or Counter electrode) ดังนั้นการที่จะนำเทคนิคโวลแทมเมตรีออกไปใช้งานในภาคสนามนั้น นอกจากการออกแบบประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าใช้งานแล้ว ยังจำเป็นต้องคำนึงถึงขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วยด้วย

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ที่ใช้งานง่ายและนิยมใช้กันทั่วไป คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl reference electrode) โดยบริษัทที่ขายอุปกรณ์เคมีไฟฟ้าส่วนใหญ่จะขายขั้วไฟฟ้าชนิดนี้มาในรูปแบบของขั้วไฟฟ้าแก้ว (รูปที่ 3.13)



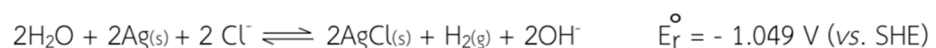
รูปที่ 3.13 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์¹⁸

ซึ่งนอกจากจะมีราคาแพงแล้ว วัสดุที่ทำจากแก้วยังมีโอกาสแตก เสียหายได้ง่าย จึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานในภาคสนาม ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ขึ้นมา โดยจะบรรยายเกี่ยวกับการสร้างและทดสอบขั้วไฟฟ้าในหัวข้อต่อไป

ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary or Counter electrode) มีองค์ประกอบสำคัญหลัก คือ ลวดแพลทินัมที่มีพื้นที่ผิวมากๆ ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้หาซื้อได้จากบริษัทที่ขายอุปกรณ์เคมีไฟฟ้า หากแต่มีราคาสูง และบริเวณหัวต่อ (jack) กับสายไฟมักจะไม่มีอุปกรณ์หรือลักษณะกันน้ำ ทำให้มีโอกาสเกิดไฟฟ้าลัดวงจรได้ง่ายหากนำขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์นี้ไปใช้งานภาคสนาม ดังนั้นผู้ทดลองจึงได้ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์ขึ้นมา ในลักษณะเดียวกันกับการสร้างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.3.1 การสร้างขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดอื่น ๆ

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ประกอบด้วย (1) ลวดเงินร้อยละ 99.99 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร (2) ท่อพลาสติกเทฟลอน (PTFE tube) ความยาว 10 เซนติเมตร และ (3) สายไฟสีน้ำเงิน นำลวดเงินมาเชื่อมติดกับสายไฟที่ปกกให้เหลือแต่ลวดทองแดง โดยปกกฉนวนหุ้มสายไฟสีน้ำเงินออก 9.5 เซนติเมตร ใช้หัวแร้งที่มีความร้อนละลายตะกั่วบัดกรีแบบลงจุดที่ต้องการเชื่อม จากนั้นตัดลวดเงินให้มีความยาว 1 นิ้ว และตัดสายไฟให้มีความยาว 2 ฟุต ให้ลวดเงินเกินออกมาประมาณ 1 นิ้ว ตรงส่วนต้นของท่อพลาสติกเทฟลอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 มิลลิเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร และเพื่อป้องกันน้ำเข้าสายไฟที่บรรจุอยู่ในท่อพลาสติกเทฟลอน จึงใช้กระบอกฉีดยาหัวฉีดแบบลือคที่บรรจุกาวอีพ็อกซีฉีดเข้าไปในท่อเทฟลอน เมื่อกาวอีพ็อกซีแห้งสนิทแล้ว นำกาวอีพ็อกซี พัทท์ (epoxy putty) ไปแปะบนรอยต่อระหว่างสายไฟกับส่วนปลายของท่อพลาสติกเทฟลอนเพื่อป้องกันน้ำซึมเข้าไป (รูปที่ 2.3) โดยก่อนใช้งานขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ต้องเคลือบผิวของลวดเงินด้วยซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ก่อน โดยการจุ่มส่วนที่เป็นลวดเงินของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์จำนวน 2 ขั้ว ลงในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร และต่ออีกปลายของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 เข้ากับถ่านก้อนเหลี่ยมขนาด 9 โวลต์



พบว่า ด้านแอโนดจะมีตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์เกาะอยู่ (Equation 3) และด้านแคโทดจะมีฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้น (Equation 4) และเมื่อทำการใช้ขั้วอ้างอิงประดิษฐ์นี้ซ้ำ ๆ พบปัญหาลวดเงินมีการผุกร่อนจากด้านแอโนดที่มีซิลเวอร์หลุดออกมา ดังนั้นควรที่จะใช้ลวดเงินที่มีความหนามากขึ้น เนื่องจากการทดลองนี้ลวดเงินขาดระหว่างการทดลองส่งผลให้ไม่สามารถทดลองในสภาวะเดิมต่อไปได้

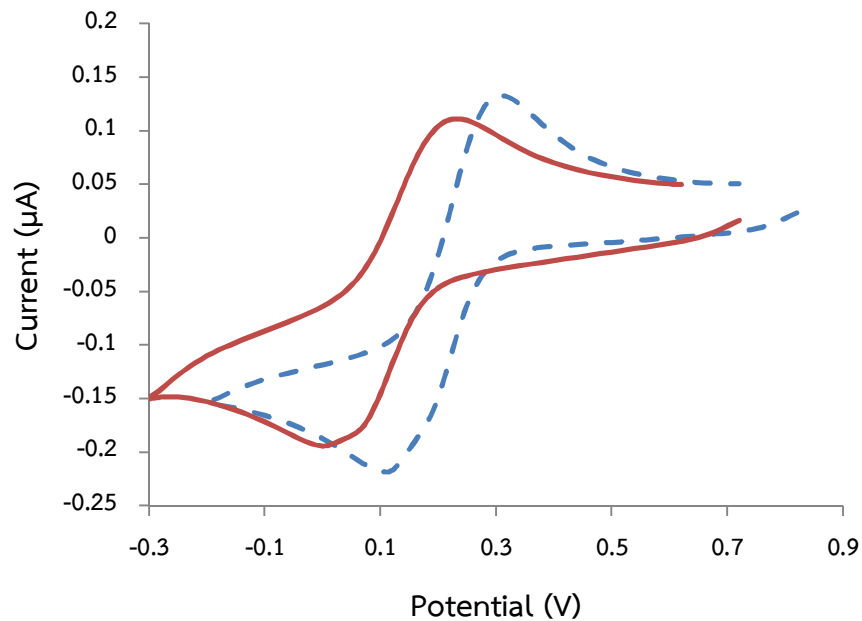
ขั้วไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์ประกอบด้วย (1) ลวดแพลทินัมร้อยละ 99.95 โดยมวล เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร (2) ท่อพลาสติกเทฟลอน (PTFE tube) ความยาว 10 เซนติเมตร และ (3) สายไฟสีม่วง นำลวดแพลทินัมมาเชื่อมติดกับสายไฟที่ปกกให้เหลือแต่ลวดทองแดง โดยปกกฉนวนหุ้มสายไฟสีม่วงออก 1 เซนติเมตร ใช้หัวแร้งที่มีความร้อนละลายตะกั่วบัดกรีแบบลงจุดที่ต้องการเชื่อม จากนั้นตัดลวดแพลทินัมให้มีความยาว

1 นิ้ว และตัดสายไฟให้มีความยาว 2 ฟุต ให้ลวดแพลทินัมเกินออกมาประมาณ 1 นิ้วตรงส่วนต้นของท่อพลาสติกเทฟลอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 มิลลิเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร และเพื่อป้องกันน้ำเข้าสายไฟที่บรรจุอยู่ในท่อพลาสติกเทฟลอน จึงใช้กระบอกฉีดยาหัวฉีดแบบ ล็อคที่บรรจุกาวอีพ็อกซี ฉีดเข้าไปในท่อเทฟลอน เมื่อกาวอีพ็อกซีแห้งสนิทแล้ว นำกาวอีพ็อกซี พัทท์ (epoxy putty) ไปแปะบนรอยต่อระหว่างสายไฟกับส่วนปลายของท่อพลาสติกเทฟลอนเพื่อป้องกันน้ำซึมเข้าไป (รูปที่ 2.4)

ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีวิธีสร้างที่คล้ายกัน แต่สิ่งที่ต้องระวังคือ ขั้นตอนฉีดกาวอีพ็อกซี จะต้องระวังกาบเปื้อนลวดเงินกับลวดแพลทินัมที่ยื่นออกมาจากปลายท่อพลาสติกเทฟลอน เนื่องจากทำให้ สูญเสียพื้นที่การทำงานของขั้วไฟฟ้า

3.3.2 ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์

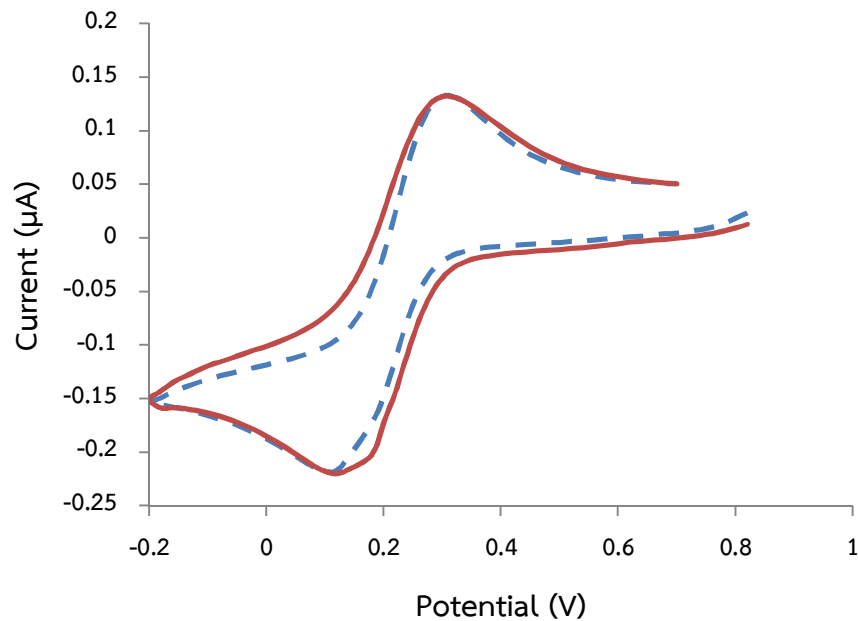
ทดลองวิเคราะห์สัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วทองคำประดิษฐ์สายไฟสีม่วง ความยาว 3 ฟุต ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเชิงพาณิชย์ และขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ โดยเปรียบเทียบโวลแทม โมแกรมที่วัดได้เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เชิงพาณิชย์ กับเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (รูปที่ 3.14) แสดงให้เห็นว่า เมื่อตรวจวัดสัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ด้วยขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ประดิษฐ์ ตำแหน่งของพีคแคโทดิกและแอโนดิกมีการเคลื่อนไปในทิศทางที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากขึ้น และลักษณะความผันกลับได้ (reversibility) ของสัญญาณลดลงเล็กน้อย แสดงว่าการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าอ้างอิง มีผลต่อทั้งตำแหน่งและลักษณะความผันกลับได้ของสัญญาณ โดยการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงส่งผลต่อตำแหน่งของสัญญาณมากกว่าต่อรูปลักษณะของสัญญาณ ดังนั้นขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ที่สร้างขึ้นมาจึงพอที่จะนำมาใช้แทนขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เชิงพาณิชย์ได้



รูปที่ 3.14 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เมื่อตรวจวัดในระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเชิงพาณิชย์ (เส้นประ) และระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประดิษฐ์ (เส้นทึบ)

3.3.3 ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดแพลทินัม

ทดลองวิเคราะห์สัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วทองคำประดิษฐ์สายไฟสีม่วง ความยาว 3 ฟุต ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม และขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เชิงพาณิชย์ โดยเปรียบเทียบโวลแทมโมแกรมที่วัดได้เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเชิงพาณิชย์ กับเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดแพลทินัม (รูปที่ 3.15) แสดงให้เห็นว่า โวลแทมโมแกรมทั้งสองเกือบซ้อนทับกันอย่างสมบูรณ์ นั่นแสดงว่า ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมประดิษฐ์มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเชิงพาณิชย์ ดังนั้นจึงสามารถใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ชนิดแพลทินัมแทนขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเชิงพาณิชย์ได้

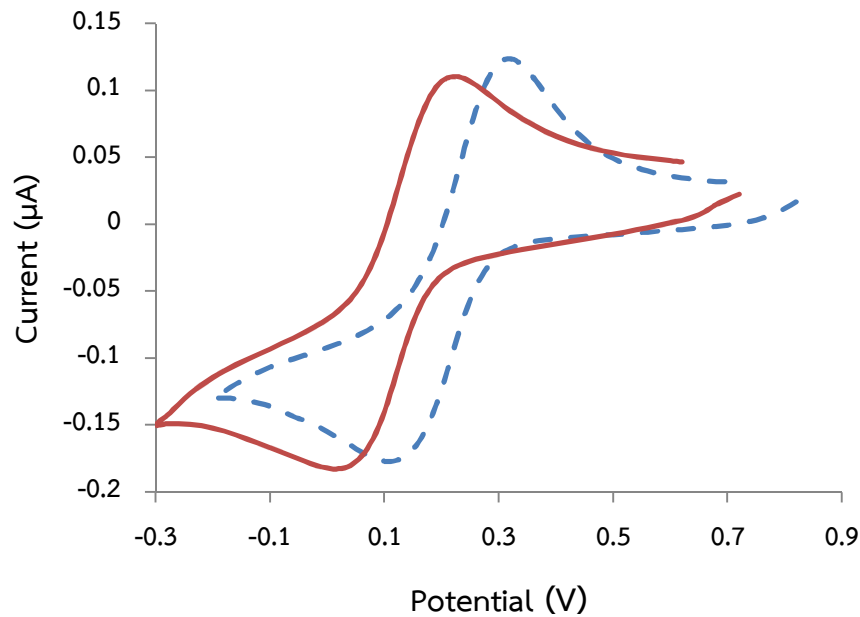


รูปที่ 3.15 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เมื่อตรวจวัดในระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าช่วยเชิงพาดิซซ์ (เส้นประ) และระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์ (เส้นทึบ)

3.4 การนำขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทุกชนิดมาใช้วัดสารละลายในลักษณะต่างๆ

3.4.1 การวัดสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า

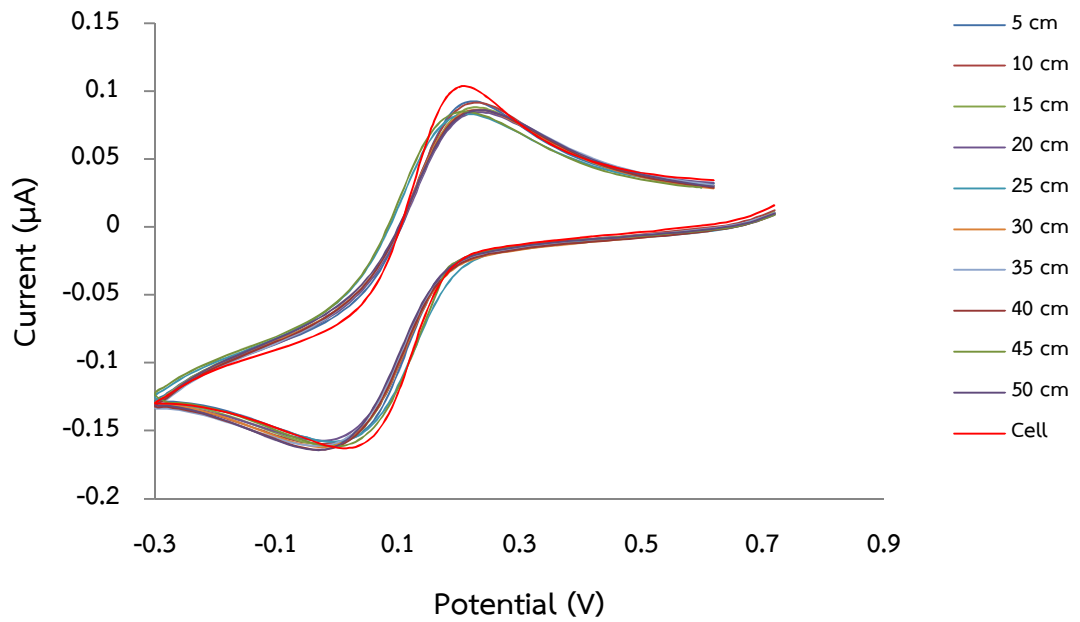
ทดลองวิเคราะห์สัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วทองคำประดิษฐ์สายไฟสีม่วง ความยาว 3 ฟุต เปรียบเทียบโวลแทมโมแกรมที่ได้เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมประดิษฐ์ คู่กับขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ประดิษฐ์ และเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเชิงพาดิซซ์ คู่กับขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เชิงพาดิซซ์ พบว่า โวลแทมโมแกรมทั้งสองของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) มีลักษณะคล้ายกัน (รูปที่ 3.16) โดยโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการใช้ขั้วไฟฟ้าแพลทินัมประดิษฐ์ คู่กับขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ประดิษฐ์ พบการเคลื่อนของสัญญาณไปในทิศทางศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นลบมากขึ้น 80 มิลลิโวลต์ และมีลักษณะความผันกลับได้ (reversibility) ของสัญญาณน้อยกว่าโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการใช้ขั้วไฟฟ้าเชิงพาดิซซ์ (ใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานอันเดียวกัน) ทั้งนี้เป็นผลมาจากขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์อ้างอิงดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.3.2



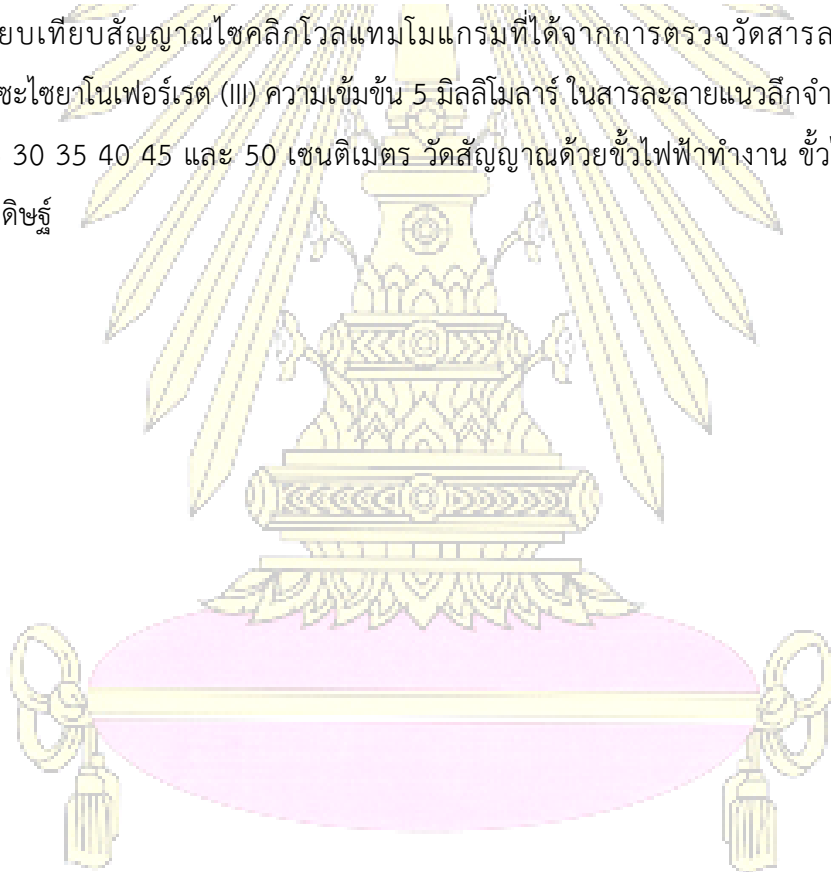
รูปที่ 3.16 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ เมื่อตรวจวัดในระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด (เส้นทึบ) และระบบที่ใช้ขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (เส้นประ)

3.4.2 การวัดสารละลายในน้ำที่มีระดับความลึก

นำขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทุกชนิดมาทดลองวัดสัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่มีระดับความลึกประมาณ 53 เซนติเมตร (รูปที่ 2.7) โดยใช้ขั้วทองคำประดิษฐ์สายไฟสีม่วง ความยาว 3 ฟุต ร่วมกับเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนครั้งละ 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่แต่ละระดับความลึก 5 10 15 20 25 30 35 40 45 และ 50 เซนติเมตร พบว่า ได้โวลแทมโมแกรมที่ซ้อนทับกันในทุกๆ ครั้งทั้งที่สแกน และที่ทุกๆ ระดับความลึกที่วัดสัญญาณ (รูปที่ 3.17) ทั้งนี้เป็นเพราะสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ในทุกๆ ระดับความลึกมีค่าความเข้มข้นเดียวกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าความดันหรือระดับความลึกในช่วงที่ทดลองนี้ไม่มีผลต่อการวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี



รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแวลูริกจำลอง ที่มีความลึก 5 10 15 20 25 30 35 40 45 และ 50 เซนติเมตร วัดสัญญาณด้วยขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วยประดิษฐ์



บทที่ 4

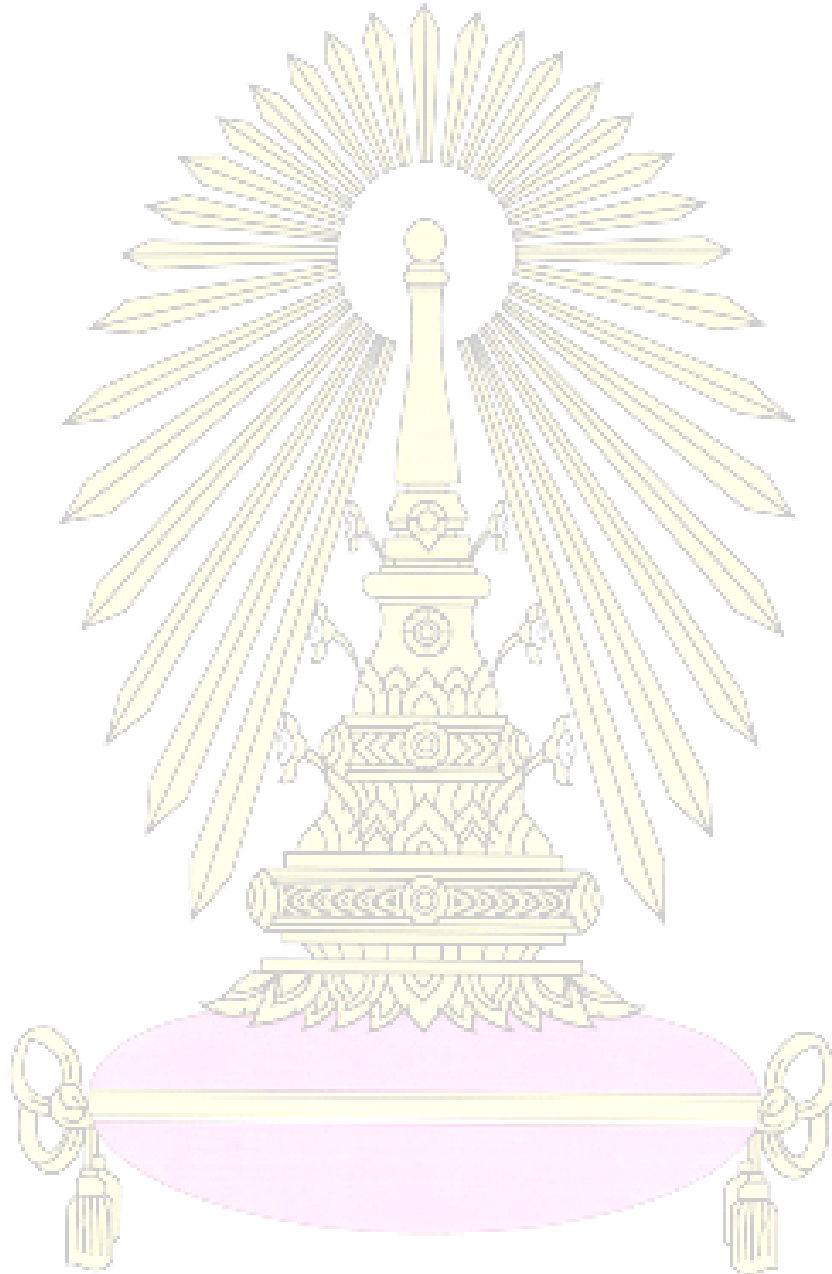
สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้แบบและชี้ทางเคมีไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับตรวจวัดน้ำแวนลิก โดยเบื้องต้นผู้วิจัยได้สร้างขั้วไฟฟ้าทำงานประติษฐานชนิดลวดทองคำ จากลวดทองคำบริสุทธิ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประติษฐานด้วย สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ละลายในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบสัญญาณไฟฟ้าที่มีลักษณะผันกลับได้ เช่นเดียวกับที่วัดได้โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ และไม่พบสัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) เมื่อวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติษฐานที่ไม่มีลวดทองคำ จากนั้นทำการทดสอบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อสัญญาณของขั้วไฟฟ้าประติษฐานชนิดทองคำ พบว่า ชนิดของสายไฟที่ไม่มีการขาดของลวดทองแดง ส่งผลน้อยต่อสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ แต่ความยาวของสายไฟที่มากขึ้น มีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้น้อยลง อันเนื่องมาจากความต้านทานที่เพิ่มขึ้นตามความยาวของลวดตัวนำ นอกจากนี้วิธีสแกนสัญญาณแบบ n รอบ/ครั้ง จะได้โวลแทมโมแกรมที่ใกล้เคียงกันมากกว่าการสแกนแบบ 1 รอบ/ครั้ง ในส่วนของการสร้างและดูแลรักษาขั้วไฟฟ้าประติษฐานชนิดลวดทองคำ ปริมาณฟองอากาศที่มีในส่วนผสมของกาวอีพ็อกซีส่งผลต่อค่าสัญญาณ ทำให้กระแสมีค่าต่ำลง จึงต้องไล่ฟองอากาศด้วยเครื่องสูบลมที่แรงก่อน และผิวหน้าของลวดทองคำมีความสำคัญต่อความสูงกระแสและลักษณะของโวลแทมโมแกรมเป็นอย่างมาก การเช็ดผิวหน้าเก่าของขั้วไฟฟ้าทองคำออก เพื่อเปิดผิวหน้าทองคำใหม่ขึ้นมา สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทองคำได้ ถึงแม้ว่าจะไม่ได้สัญญาณที่ดีขึ้นเสมอไปก็ตาม

ในส่วนของขั้วไฟฟ้าประติษฐานชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์และแพลทินัม ได้ถูกออกแบบและสร้างให้เหมาะกับการใช้งานในภาคสนาม โดยทดสอบการทำงานของขั้วไฟฟ้าประติษฐานทั้งสองเทียบกับขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ พบว่าสามารถใช้ขั้วไฟฟ้าประติษฐานทั้งสองแทนขั้วไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ได้ โดยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประติษฐานชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ไม่มีผลทำให้รูปร่างของโวลแทมโมแกรมเปลี่ยนไป แต่จะมีผลต่อการเลื่อนตำแหน่งของโวลแทมโมแกรมในแนวแกน y เท่านั้น

สุดท้ายผู้วิจัยได้นำเอาขั้วไฟฟ้าประติษฐานทุกชนิดมาทำการวัดสัญญาณของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในรูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการและในสารละลายที่มีความลึก 53 เซนติเมตรโดยประมาณ พบว่าขั้วไฟฟ้าที่ประติษฐานทั้งหมดสามารถใช้วัดกระแสสัญญาณได้ดี ความดันหรือระดับความลึกในช่วงที่ทำการทดลองนี้ไม่มีผลต่อการวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยการตรวจวัดก๊าซที่ละลายน้ำในสถานที่จริง ต้องมีกระบวนการเคลือบผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานประติษฐานด้วยโลหะที่เหมาะสมกับก๊าซที่ต้องการ

วิเคราะห์ก่อน เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดที่ดีขึ้น และปัญหาที่อาจพบในการตรวจวัดในสถานที่จริงคือ ขั้วไฟฟาลอยตัวอยู่ในน้ำ เนื่องจากความหนาแน่นของขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าน้ำ จึงจำเป็นต้องนำวัตถุที่มีมวลมากมาถ่วงให้ขั้วไฟฟ้าสามารถตรวจวัดในแนวตั้งได้ เพื่อให้ค่าที่ตรวจวัดก๊าซที่ละลายในน้ำมีค่าความแม่นยำและความเที่ยงที่ดี



เอกสารอ้างอิง

1. Helm, I.; Jalukse, L.; Leito, I. A highly accurate method for determination of dissolved oxygen: Gravimetric Winkler method. *Analytica Chimica Acta*. **2012**, *741*, 21-31.
2. Aumond, V.; Waeles, M.; Salaün, P.; Gibbon-Walsh, K.; van den Berg, C. M.G.; MarieSarradin, P.; D.Riso, R. Sulfide determination in hydrothermal seawater samples using a vibrating gold micro-wire electrode in conjunction with stripping chronopotentiometry. *Analytica Chimica Acta*. **2012**, *753*, 42-47.
3. Roberts, H. M.; Shiller, A. M. Determination of dissolved methane in natural waters using headspace analysis with cavity ring-down spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*. **2015**, *856*, 68-73.
4. Luther, G. W.; Reimers, C. E.; Nuzzio, D. B.; Lovalvo, D. In Situ Deployment of Voltammetric, Potentiometric, and Amperometric Microelectrodes from a ROV To Determine Dissolved O₂, Mn, Fe, S(-2), and pH in Porewaters. *Environmental Science & Technology*. **1999**, *33* (23), 4352-4356.
5. Lin, K.; Pei, J.; Li, P.; Ma, J.; Li, Q.; Yuan, D. Simultaneous determination of total dissolved nitrogen and total dissolved phosphorus in natural waters with an on-line UV and thermal digestion. *Talanta*. **2018**, *185*, 419-426.
6. Baciu, A.; Ardelean, M.; Pop, A.; Pode, R.; Manea, F. Simultaneous Voltammetric/Amperometric Determination of Sulfide and Nitrite in Water at BDD Electrode. *Sensors (Basel)*. **2015**, *15* (6), 14526-14538.
7. Skoog, D. A. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Thomson-Brooks/Cole: 2004.
8. Christian, G. D. *Analytical Chemistry*, 6th Ed. Wiley India Pvt. Limited: 2007.
9. Bard, A. J.; Faulkner, L. R. *Electrochemical Method : Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons. 1980.
10. Skoog, D. A.; West, D. M.; Holler, F. J.; Crouch, S. R. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Cengage Learning: 2013.
11. วนาศาสตร์ สุขศรีเมือง. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตริก (Cyclic Voltammetry). ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2548. แหล่งที่มา:

- https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/218_76-79.pdf. (accessed April 15, 2018)
12. Petrovic, S. Cyclic Voltammetry of Hexachloroiridate(IV): An Alternative to the Electrochemical Study of the Ferricyanide Ion. *The Chemical Educator*. **2000**, 5(5), 231-235.
 13. Luther, G. W.; Glazer, B. T.; Ma, S.; Trouwborst, R. E.; Moore, T. S.; Metzger, E.; Kraiya, C.; Waite, T. J.; Druschel, G.; Sundby, B.; Taillefert, M.; Nuzzio, D. B.; Shank, T. M.; Lewis, B. L.; Brendel, P. J. Use of voltammetric solid-state (micro)electrodes for studying biogeochemical processes: Laboratory measurements to real time measurements with an in situ electrochemical analyzer (ISEA). *Marine Chemistry*. **2008**, 108(3), 221-235.
 14. Brendel, P. J.; Luther, G. W. Development of a Gold Amalgam Voltammetric Microelectrode for the Determination of Dissolved Fe, Mn, O₂, and S(-II) in Porewaters of Marine and Freshwater Sediments. *Environmental Science & Technology*. **1995**, 29(3), 751-761.
 15. Lemtiri-Chlieh, F.; Ali, R. Characterization of Heterologously Expressed Transporter Genes by Patch- and Voltage-Clamp Methods: Application to Cyclic Nucleotide-Dependent Responses. *Cyclic Nucleotide Signaling in Plants: Methods and Protocols*. **2013**, 67-93.
 16. [https://www.warneronline.com/Documents/uploader/Chloriding%20Ag-AgCl%20electrodes%20\(090728\).pdf](https://www.warneronline.com/Documents/uploader/Chloriding%20Ag-AgCl%20electrodes%20(090728).pdf). (accessed March 23, 2018)
 17. <https://www.victronenergy.com/upload/documents/AWG%20to%20Metric%20Conversion%20Chart.pdf>. (accessed March 14, 2018)
 18. <https://www.metrohm.com/easydb/60726100/450>. (accessed May 19, 2018)

ภาคผนวก

ตารางที่ 5.1 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติษฐานทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสี่เทา ความยาว 1 ฟุต

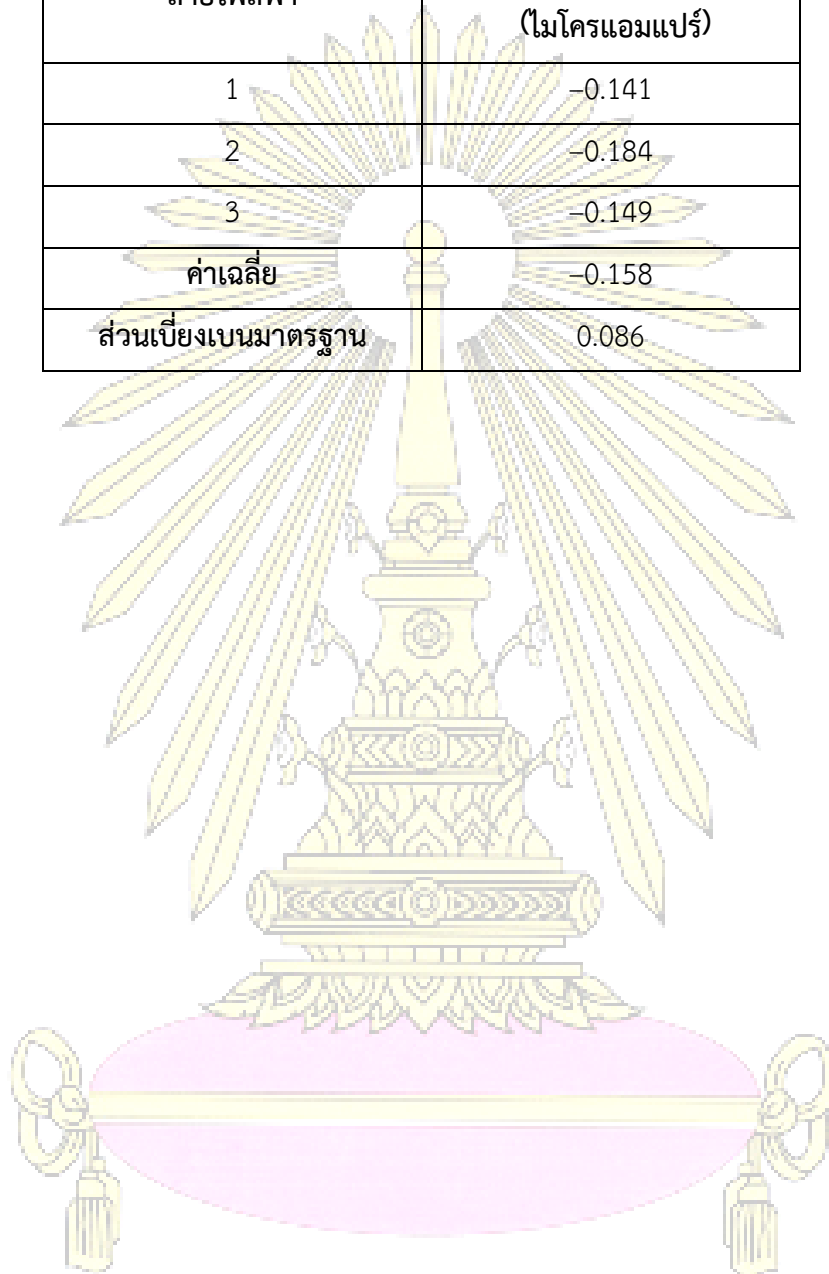
สายไฟสี่เทา	กระแสพีกแคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)
1	-0.151
2	-0.630
3	-0.132
ค่าเฉลี่ย	-0.304
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.282

ตารางที่ 5.2 ค่าความสูงพีกแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติษฐานทองคำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 ฟุต

สายไฟสีม่วง	กระแสพีกแคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)
1	-0.224
2	-0.142
3	-0.191
ค่าเฉลี่ย	-0.186
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.041

ตารางที่ 5.3 ค่าความสูงพีคแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติมาตรของค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีน้ำเงิน ความยาว 1 ฟุต

สายไฟสีฟ้า	กระแสพีคแคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)
1	-0.141
2	-0.184
3	-0.149
ค่าเฉลี่ย	-0.158
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.086



ตารางที่ 5.4 ค่าความสูงพีคแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติษฐานของค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 1 ฟุต สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 20 ครั้ง

ครั้งที่	กระแสพีคแคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)
1	-0.226
2	-0.223
3	-0.224
4	-0.222
5	-0.223
6	-0.223
7	-0.228
8	-0.226
9	-0.227
10	-0.228
11	-0.229
12	-0.228
13	-0.230
14	-0.228
15	-0.228
16	-0.227
17	-0.225
18	-0.226
19	-0.226
20	-0.223
ค่าเฉลี่ย	-0.226
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002

ตารางที่ 5.5 ค่าความสูงพีคแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติมาตรของค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 3 ฟุต สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 20 ครั้ง

ครั้งที่	กระแสพีคแคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)
1	-0.135
2	-0.154
3	-0.154
4	-0.154
5	-0.155
6	-0.152
7	-0.152
8	-0.148
9	-0.151
10	-0.148
11	-0.149
12	-0.152
13	-0.151
14	-0.152
15	-0.154
16	-0.155
17	-0.155
18	-0.153
19	-0.151
20	-0.150
ค่าเฉลี่ย	-0.151
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.004

ตารางที่ 5.6 ค่าความสูงพีคแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าประติษฐานของค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ที่ต่อกับสายไฟสีม่วง ความยาว 5 ฟุต สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 20 ครั้ง

ครั้งที่	กระแสพีคแคโทดิก (μA)
1	-0.092
2	-0.089
3	-0.165
4	-0.113
5	-0.098
6	-0.164
7	-0.112
8	-0.089
9	-0.098
10	-0.166
11	-0.101
12	-0.124
13	-0.118
14	-0.170
15	-0.093
16	-0.167
17	-0.113
18	-0.112
19	-0.110
20	-0.100
ค่าเฉลี่ย	-0.120
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.029

ตารางที่ 5.7 ค่าความสูงพีคแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแวลูจาลอง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประติษฐานทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสพีคแคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์พีคแคโทดิก (โวลต์)
1	-0.135	-0.020
2	-0.134	-0.010
3	-0.126	-0.020
ค่าเฉลี่ย	-0.132	-0.017
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.005	0.006

ตารางที่ 5.8 ค่าสัญญาณกระแสพีคแคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแวลูจาลอง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประติษฐานทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสพีคแคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์พีคแคโทดิก (โวลต์)
1	-0.128	-0.020
2	-0.129	-0.020
3	-0.128	-0.020
ค่าเฉลี่ย	-0.129	-0.020
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.001	0

ตารางที่ 5.9 ค่าสัญญาณกระแสฟลักซ์แคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิ้งจำลอง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสฟลักซ์แคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์ฟลักซ์แคโทดิก (โวลต์)
1	-0.130	-0.020
2	-0.130	-0.020
3	-0.126	-0.020
ค่าเฉลี่ย	-0.129	-0.020
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002	0

ตารางที่ 5.10 ค่าสัญญาณกระแสฟลักซ์แคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิ้งจำลอง โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสฟลักซ์แคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์ฟลักซ์แคโทดิก (โวลต์)
1	-0.130	-0.020
2	-0.133	-0.020
3	-0.131	-0.040
ค่าเฉลี่ย	-0.131	-0.027
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002	0.012

ตารางที่ 5.11 ค่าสัญญาณกระแสฟลักซ์แคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิ้งจำลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสฟลักซ์แคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์ฟลักซ์แคโทดิก (โวลต์)
1	-0.135	-0.040
2	-0.133	-0.020
3	-0.131	-0.020
ค่าเฉลี่ย	-0.133	-0.027
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002	0.012

ตารางที่ 5.12 ค่าสัญญาณกระแสฟลักซ์แคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิ้งจำลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสฟลักซ์แคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์ฟลักซ์แคโทดิก (โวลต์)
1	-0.131	-0.020
2	-0.131	-0.040
3	-0.127	-0.020
ค่าเฉลี่ย	-0.130	-0.027
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002	0.012

ตารางที่ 5.13 ค่าสัญญาณกระแสฟลักซ์แคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิแกนด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 35 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสฟลักซ์แคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์ฟลักซ์แคโทดิก (โวลต์)
1	-0.141	-0.020
2	-0.138	-0.020
3	-0.136	-0.020
ค่าเฉลี่ย	-0.138	-0.020
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002	0

ตารางที่ 5.14 ค่าสัญญาณกระแสฟลักซ์แคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิแกนด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 40 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสฟลักซ์แคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์ฟลักซ์แคโทดิก (โวลต์)
1	-0.137	-0.040
2	-0.134	-0.020
3	-0.135	-0.040
ค่าเฉลี่ย	-0.136	-0.033
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.002	0.012

ตารางที่ 5.15 ค่าสัญญาณกระแสฟลักซ์แคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิแกนด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 45 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสฟลักซ์แคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์ฟลักซ์แคโทดิก (โวลต์)
1	-0.135	-0.020
2	-0.135	-0.020
3	-0.136	-0.020
ค่าเฉลี่ย	-0.135	-0.020
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.001	0

ตารางที่ 5.16 ค่าสัญญาณกระแสฟลักซ์แคโทดิกของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายแนวลิแกนด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ทั้งหมด สแกน 1 รอบ ทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร

ครั้งที่	กระแสฟลักซ์แคโทดิก (ไมโครแอมแปร์)	ศักย์ฟลักซ์แคโทดิก (โวลต์)
1	-0.136	-0.040
2	-0.136	-0.040
3	-0.136	-0.040
ค่าเฉลี่ย	-0.136	-0.040
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0	0

ประวัติผู้วิจัย

นางสาววิสุมิตรา ชนะสกุลนิยม เกิดเมื่อวันที่ 19 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2538 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน สาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี จังหวัดลพบุรี เมื่อปีการศึกษา 2556 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 359 ตำบลแก่งคอย อำเภอแก่งคอย จังหวัด สระบุรี รหัสไปรษณีย์ 18110 อีเมล fafah_freez@hotmail.com

