

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

หัวข้อโครงการวิจัย การสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์ปรับแต่งขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

หัวหน้าโครงการ รศ.ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์

ทุนวิจัย ทุนงบประมาณ ประจำปี 2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน (FTO 5 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร × 3 มิลลิเมตร) เพื่อใช้ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการพอกพูนทางไฟฟ้าของอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์ที่เตรียมมาจากโคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) ที่มีความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ ละลายอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ลงบนขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยมีสภาวะการทดลองดังนี้ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในช่วง -1.0 ถึง 1.0 โวลต์ มีอัตราการสแกนที่ (Scan Rate) 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวนรอบของการสแกนเท่ากับ 20 รอบ ในการตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) และเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (XRD) เพื่อตรวจสอบลักษณะของอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) ที่กระจายตัวอยู่บนขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน สำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า นำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ มาตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีและแอมเพอโรเมทรี ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 7.0 จากการทดลองได้ช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดในช่วงความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.10 มิลลิโมลาร์ (มีสมการเชิงเส้นเป็นดังนี้ $y = 0.0748x \times 10^7 + 0.5 \times 10^8$ ($R^2 = 0.9996$)) ซีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 2.85 ไมโครโมลาร์ (S/N = 3) เมื่อนำไปตรวจวัดสารตัวอย่างน้ำยาล้างแผล 2 ตัวอย่าง มีค่าร้อยละการคืนกลับเท่ากับ 94.42 และ 102.31 ตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ พบว่าขั้วไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นมีความไวในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (sensitivity) ดีกว่า ซึ่งสามารถที่จะนำขั้วไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการควบคุมและตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ต่อไป

RH

๑๐

คำสำคัญ : ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน, โคบอลต์ออกไซด์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

๐๖

๙๘๖๑๑

เลขหมู่

เลขทะเบียน 130275

วัน เดือน ปี ๒ ๓ ๒๕๕๖

18097338
b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในเชิงพาณิชย์ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกข้อควรระวังในการคัดลอกเอกสารนี้คือ ห้ามตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

Title Synthesis and Characterisation of Cobalt Oxide Modified Fluorine-Doped Tin Oxide Electrode for Determination of Hydrogen Peroxide.

Head of project Assoc.Prof.Dr.Suwan Chaiyasith

Year 2013

ABSTRACT

In this work, the new electrode for determination of hydrogen peroxide was developed base on electrodepositing Co_3O_4 particles on FTO. Cyclic voltammetric deposition was carried out at potential range -1.0 to 1.1 V for 0.50 mM CoCl_2 in 0.1 M KCl solution at scan rate is 50 mV/s and 20 scan cycles. The physical properties were investigated by FE – SEM and XRD. The result from SEM and XRD are indicated in that Co_3O_4 particles were well distributed on FTO surface. The chemical behaviors of the modified electrode were examined using cyclic voltammetry and amperometry in 0.1 M phosphate buffer solution pH 7.0 . The result shown that linearity range is 0.02 to 0.10 mM, ($R^2 = 0.9996$). The detection limit was 2.85 μM (S/N=3). The sensitivity of modified electrode is higher than bare electrode. The percent recovery of H_2O_2 in two samples by cobalt oxide/FTO electrode was 94.42 and 102.31. This shows that , the Co_3O_4 modified FTO can be used as working electrode for detection of hydrogen peroxide for further application.

Keywords : Fluorine-doped Tin Oxide Electrode, Cobalt oxide, Hydrogen peroxide

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 คำจำกัดความ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โคอบอลต์.....	4
2.2 โคอบอลต์ออกไซด์.....	6
2.3 ชั่วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์.....	8
2.4 ชั่วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน.....	9
2.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	10
2.5.1 การใช้งานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	11
2.6 หลักการทางเคมีไฟฟ้าทั่วไป.....	12
2.6.1 การถ่ายเทมวลในสารละลาย.....	13
2.6.1.1 ไมเกรชัน.....	13
2.6.1.2 การแพร่.....	14
2.6.1.3 การพา.....	14
2.6.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า.....	17
2.7.1 เซลล์โวลแทมเมตรี.....	17
2.7.2 ขั้วไฟฟ้า.....	19
2.7.3 เทคนิคโวลแทมเมตรี.....	21
2.7.3.1 เทคนิคการวิเคราะห์ในกลุ่ม โวลแทมเมตรี.....	21
2.8 เทคนิคการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	33
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ ๖ วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	42
3.1.1 สารเคมีที่ใช้.....	42
3.1.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน.....	42
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์.....	42
3.2.1 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์.....	42
3.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน.....	44
3.4 การเตรียม โคบอลต์ออกไซด์ด้วยวิธีการพอกพูนทางไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้า ทिनออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	45
3.5 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย โคบอลต์คลอไรด์ที่เหมาะสมในการพอกพูนทางไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าทिनออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	46
3.6 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าทिनออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์.....	46
3.6.1 สแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคปี.....	46
3.6.2 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์.....	47
3.7 ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทिनออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์.....	47
3.8 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8.1 ศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	47
3.8.2 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	48
3.8.3 ศึกษาอัตราการสแกนที่เหมาะสม.....	49
3.9 ศึกษาช่วงของความเป็นเส้นตรง.....	50
3.10 ศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์.....	51
3.11 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	52
3.12 การวิเคราะห์ค่าร้อยละของการคืนกลับ.....	52
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	53
4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการพอกพูนทางไฟฟ้าบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	53
4.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ.....	55
4.2.1 ผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	55
4.2.2 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์.....	56
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์.....	58
4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	59
4.4.1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม.....	59
4.4.2 พีเอชที่เหมาะสม.....	61
4.4.3 อัตราการสแกนที่เหมาะสม.....	63
4.5 ช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	66
4.6 ขีดจำกัดการตรวจวัด.....	70
4.7 การประยุกต์ในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง.....	70
4.8 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ.....	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
เอกสารอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลายมาตรฐาน.....	80
ก.1 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์.....	80
ก.2 การเตรียมสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 0.1 โมลาร์.....	80
ก.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.10 โมลาร์.....	80
ก.4 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.10 โมลาร์.....	80
ก.5 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์.....	80
ก.6 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์.....	81
ก.7 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	81
ก.7.1 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์.....	81
ก.7.2 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์.....	82
ก.7.3 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบิฟเฟออร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์.....	82
ก.7.4 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์.....	82
ภาคผนวก ข การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบิฟเฟออร์.....	84
ข.1 การเตรียมสารละลายไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 1.00 โมลาร์.....	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ข.2 การเตรียมสารละลายไดไฮโดรเจน โพแทสเซียมเพอร์ออกไซด์ 1.00 โมลาร์.....	85
ข.3 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์	85
ภาคผนวก ค แสดงกราฟของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ในปฏิกิริยาการเกิดโคบอลต์ออกไซด์.....	86
ค.1 แสดงกราฟของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ปฏิกิริยาในการเกิดโคบอลต์ออกไซด์.....	87
ภาคผนวก ง ไซคลิกโวลแทมโมแกรมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	89
ง.1 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมในการพอกพูนทางไฟฟ้า.....	90
ภาคผนวก จ ไซคลิกโวลแทมโมแกรมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	91
จ.1 กราฟแสดง ไซคลิกโวลแทมโมแกรมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	92
ภาคผนวก ฉ ช่วงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	93
ฉ.1 กราฟแสดงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของ ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	94
ฉ.2 กราฟแสดงความเป็นเส้นตรงในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของ ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์.....	95
ภาคผนวก ช การคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัด.....	96
ช.1 แสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขั้ว ไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	97
ช.2 แสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของ ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	98
ภาคผนวก ซ การคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..	101
ซ.1 แสดงการคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ในน้ำยาล้างแผลตามร่างกายตามกฎพญานาคคู่.....	102
ซ.2 แสดงการคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ในน้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปากตราเสือดาว.....	103
ภาคผนวก ฌ แสดงค่าร้อยละของการคืนกลับตามข้อกำหนด AOAC.....	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของ โคมบอลต์ออกไซด์.....	7
3.1 แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ สารละลายโคมบอลต์คลอไรด์.....	46
3.2 แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม.....	48
3.3 แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ที่เหมาะสม.....	48
3.4 แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาหาอัตราการสแกนที่เหมาะสม.....	49
3.5 แสดงความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบขณะทำการตรวจวัด ในช่วงเวลาต่างๆ.....	51
4.1 แสดงค่าร้อยละของการคืนกลับของการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	72
ก.1 แสดงปริมาณของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายต่างๆ เพื่อเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์.....	83
ข.1 แสดงอัตราการผสมเพื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์.....	85
ข.1 แสดงตารางการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	97
ข.2 แสดงตารางการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ที่ปรับปรุงด้วยโคมบอลต์ออกไซด์.....	98
ข.1 ตารางแสดงการคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในน้ำยาล้างแผลตามร่างกายตามกฎพจนานาคคู่.....	102
ข.2 ตารางแสดงการคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในน้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปากตราเลือดดาว.....	103

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์	8
2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนที่ใช้ในงานวิจัย.....	10
2.3 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	10
2.4 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สถานะแก๊สและของแข็ง.....	11
2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน.....	13
2.6 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการแพร่.....	14
2.7 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการพา.....	15
2.8 รูปแบบแสดงกระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	16
2.9 แสดงกระบวนการดูดซับหรือกระบวนการอัดประจุที่รอยต่อเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า เป็นค่าลบกับอิเล็กโทรด.....	17
2.10 แสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าที่สามารถให้แก่ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม คาร์บอนและเมอร์คิวรี ในอิเล็กโทรไลต์เกลือหนูนชนิดต่างๆ.....	20
2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาแบบเทคนิคโพลารोगราฟี.....	22
2.12 โพลารोगรามของเทคนิคโพลารोगราฟี.....	22
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา เมื่อมีการหยุดปรอท.....	23
2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า โดยการทำให้แท่งโพลารोगราฟี....	23
2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคแอมเพอโรเมทรี.....	24
2.16 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี.....	24
2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ปกติ... 25	25
2.18 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ปกติ.....	25
2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรี แบบดิฟเฟอเรนเชียล.....	26
2.20 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบดิฟเฟอเรนเชียล.....	26
2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรี แบบสแควร์ – เวฟ.....	26
2.22 กราฟแสดงโวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีสแควร์-เวฟ.....	27

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมตรี.....	27
2.24 โวลแทมโมแกรมที่ได้ของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมตรี.....	27
2.25 โวลเทจโปรแกรมของไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	28
2.26 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	28
2.27 สามารถแสดงตำแหน่งในไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดปฏิกิริยา ที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆ.....	30
2.28 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ และผันกลับได้ไม่สมบูรณ์.....	32
2.29 เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ กับที่ผันกลับไม่ได้ และผันกลับได้ไม่สมบูรณ์.....	32
3.1 ลายสกรีนชั้นต่างๆ ของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน.....	43
4.1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนในสารละลาย โคบอลต์คลอไรด์ที่มีความเข้มข้นในช่วง 0.10 ถึง 10.00 มิลลิโมลาร์ในสารละลาย โพแทสเซียมคลอไรด์ 0.10 โมล สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.1 ถึง +1.1 โวลต์ (เทียบกับ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	53
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ กับกระแสไฟฟ้าที่ได้ จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.662 โวลต์ ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	54
4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100,000 เท่า ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	55
4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100,000 เท่า ของ ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์.....	56
4.5 กราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	57
4.6 กราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	
ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนเทียบกับ ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับแต่งด้วยโคบอลต์ ออกไซด์เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ (เทียบกับขั้ว อ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	58
4.8	
ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์สแกน ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	60
4.9	
ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 5.8, 6.0, 6.2, 6.5, 6.7 และ 7.0 ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	61
4.10	
ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิ โมลลาร์ ในบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 และ 8.0 ของ สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วย โคบอลต์ออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์.....	62
(เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที	
4.11	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับค่าพีเอช 5.8, 6.0, 6.2, 6.5, 6.7, 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 และ 8.0 ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ซึ่งใช้เป็นสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์ เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.12	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	64
4.13	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	64
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลลาร์.....	65
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลลาร์.....	66
4.16	แอมเพอโรแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.76 โวลต์.....	67
4.17	แอมเพอโรแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.76 โวลต์.....	67
4.18	เปรียบเทียบแอมเพอโรแกรมระหว่างขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนกับขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.76 โวลต์.....	68

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและกระแส ที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน.....	69
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและกระแส ที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์.....	69
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่างตัวอย่างน้ำยาล้างแผลตามร่างกายตามกฎพญานาคคู่.....	71
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่าง น้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปากตราเลือดดาว.....	71
ค.1 กราฟจากเครื่องอิเล็กโทรดิกแฟรคโทมิเตอร์ของโคบอลต์ไฮดรอกไซด์ ($\text{Co}(\text{OH})_2$).....	87
ค.2 กราฟจากเครื่องอิเล็กโทรดิกแฟรคโทมิเตอร์ของโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4).....	87
ค.3 กราฟจากเครื่องอิเล็กโทรดิกแฟรคโทมิเตอร์ของโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) และโคบอลต์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (CoOOH).....	88
ง.1 แสดงโวลแทมโมแกรมของการพอกพูนทางไฟฟ้าของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.1 ถึง +1.1 โวลต์ อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	90
จ.1 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์.....	92
ฉ.1 แสดงกราฟจากการพลอตระหว่างกระแสกับความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์.....	94
ฉ.2 แสดงกราฟจากการพลอตระหว่างกระแสกับความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์.....	95

คำย่อและสัญลักษณ์

R^2	ค่าความเป็นเส้นตรง (Relative coefficient)
mM	มิลลิโมลาร์
mmol.L ⁻¹	มิลลิโมลาร์
M	โมลาร์
% w/w	หน่วยความเข้มข้นร้อยละน้ำหนักต่อน้ำหนัก (Wight by Weight)
% v/v	หน่วยความเข้มข้นร้อยละปริมาตรต่อปริมาตร (Volume by Volume)
% w/v	หน่วยความเข้มข้นร้อยละน้ำหนักต่อปริมาตร (Weight by Volume)
μm	ไมโครเมตร
nm	นาโนเมตร
μA	ไมโครแอมแปร์
V	โวลต์
mV/s	มิลลิโวลต์ต่อวินาที
μM	ไมโครโมลาร์
%Recovery	ค่าร้อยละของการคืนกลับ
ppm	หนึ่งในล้านส่วน
ppb	หนึ่งในพันล้านส่วน
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
FCC	โครงสร้างแลตทิซแบบลูกบาศก์แบบหนึ่งในหนึ่งหน่วยเซลล์ ประกอบด้วยจุดแลตทิซทั้งหมด 4 จุด ได้แก่ 8 มุม มุมละ 1/8 จุด (คิดเป็น 1 จุด) และตรงกลางผิวหน้า 6 ด้าน ด้านละ 1/2 จุด (คิดเป็น 3 จุด)
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
cm^2	ตารางเซนติเมตร
cal/g	ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว
$\text{cal}/\text{sec cm}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{cm}$	ค่าการนำความร้อน
% IACS	ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย ทั้งด้านการแพทย์ ด้านอุตสาหกรรม และด้านสิ่งแวดล้อม [1] เป็นต้น การตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับอุตสาหกรรมบางประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่มีการฟอกสี เช่น การผลิตยาข้อมผสม อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นสารฟอกขาว โดยคุณภาพของการฟอกจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยตรง นอกจากนี้กรมควบคุมมลพิษยังกำหนดให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเคมีภัณฑ์ที่มีความอันตรายและต้องควบคุมปริมาณ ไม่ให้เกิดตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ [2] และกรณีที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปนเปื้อนอยู่ในน้ำหรือดิน หากมนุษย์ได้สัมผัสหรือสูดดมเข้าไปจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยหากมีการสัมผัสทางการหายใจหรือกลืนกินเข้าไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีฤทธิ์กัดกร่อนก่อให้เกิดอาการเจ็บคอ ไอ หายใจติดขัด ปวดท้อง และอาเจียน หากสัมผัสทางผิวหนังจะเกิดผื่นแดงและปวดแสบปวดร้อน [3] บริเวณแหล่งน้ำที่อยู่ใกล้เกี่ยวกับอุตสาหกรรมที่มีการใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงต้องมีการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อควบคุมความเป็นพิษอยู่ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเสมอ [4] ในทางการแพทย์มักจะทำการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในร่างกายเพื่อบ่งบอกถึงปริมาณอนุมูลอิสระ ซึ่งหากในร่างกายมีการผลิตอนุมูลอิสระออกมามากเกิดจะก่อให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อต่างๆ ในร่างกายได้ [5] ในทางอุตสาหกรรมอาหารการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถบ่งบอกถึงความสดของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ได้ [6]

เทคนิคที่ใช้สำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีหลายเทคนิคด้วยกัน เช่น โครมาโทกราฟี (Chromatography) เคมีลูมิเนสเซนซ์ (Chemiluminescence) [7] เป็นต้น โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่มีการใช้ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างกว้างขวาง เนื่องจากทำการตรวจวัดได้ง่าย ให้ผลการตรวจวัดที่รวดเร็วและเชื่อถือได้ นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดยังมีราคาถูกอีกด้วย จึงมีความสนใจที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าในการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และทำการพัฒนาขั้วตรวจวัดเพื่อปรับปรุงเทคนิคให้มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดมากขึ้น

ในโครงการนี้จะใช้วิธีทางแอมเพอโรเมตริก (Amperometric) ในการตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการประยุกต์ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน (FTO) ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงพื้นผิวโดยการเคลือบด้วยโคบอลต์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนสำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยโคบอลต์ออกไซด์โดยการพอกพูนทางไฟฟ้า
2. สร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วย สำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการตรวจวัดเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์เทียบกับขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน
2. ปรับปรุงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยวิธีการพอกพูนทางไฟฟ้า
3. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโคบอลต์ออกไซด์
4. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิค ไซคลิกโวลแทมเมตรี
5. ศึกษาประสิทธิภาพการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโคบอลต์ออกไซด์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ยังไม่ทำการปรับปรุงพื้นผิว

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. สามารถพัฒนาขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ สำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
2. ได้ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ทำการปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนโคบอลต์ออกไซด์ที่สร้างขึ้นมีสัญญาณในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้มากกว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง

1.5 คำจำกัดความ

1. โคนบอลต์ คือ ธาตุที่มีสัญลักษณ์เป็น "Co" นำหนักอะตอมเท่ากับ 59 โดยโคนบอลต์ - 60 เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการรักษามะเร็ง

2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ สารประกอบอินทรีย์ นำหนักอะตอม 34.0147 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลว -0.43 องศาเซลเซียส จุดเดือด 150.2 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 1.463 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3. ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน คือ ขั้วไฟฟ้าทำงานที่มีซับซ้อน เป็นแก้วที่เคลือบด้วยสารนำไฟฟ้าโปร่งแสง ซึ่งก็คือ ดินบุก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงการพิเศษเรื่องการสังเคราะห์และศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์ปรับแต่งด้วยไฟฟ้าที่ออกไซด์เจือฟลูออรีนสำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผู้วิจัยศึกษาทฤษฎี วารสาร และบทความในประเทศและต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยคั้งหัวข้อต่อไปนี้

- 2.1 โคบอลต์ (Cobalt)
- 2.2 โคบอลต์ออกไซด์ (Cobalt oxide)
- 2.3 ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนทินออกไซด์ (Fluorine tin oxide electrode)
- 2.4 ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (Carbon print screen electrode)
- 2.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
- 2.6 หลักการทางเคมีไฟฟ้าทั่วไป (Principles of electrochemistry)
- 2.7 การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Analysis of electrochemistry)
- 2.8 เทคนิคการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrochemical deposition)
- 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โคบอลต์

โคบอลต์ [8,9] เป็นชื่อทางเคมีของธาตุหนึ่ง มีสัญลักษณ์เป็น "Co" น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 59 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลวเท่ากับ 1,495 องศาเซลเซียส จุดเดือดเท่ากับ 2,927 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นเท่ากับ 8.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความต้านทานเท่ากับ 6.24 นาโนโอห์ม ความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวเท่ากับ 259.4 จูลต่อกรัม และความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอเท่ากับ 6,276 จูลต่อกรัม

โคบอลต์ที่เกิดเป็นสารประกอบมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 แต่ +2 จะเสถียรมากที่สุดพบในสารประกอบและเกลือโคบอลต์เป็นส่วนใหญ่ สารประกอบโคบอลต์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สารประกอบโคบอลต์ส (Cobaltous) เตรียมได้จากการเผา Co(OH)_2 หรือ CoCO_3 ให้สึชมพูเมื่อมีน้ำในผลึกถ้าปราศจากน้ำในผลึกจะเป็นสีน้ำเงิน ชนิดที่ 2 คือ สารประกอบโคบอลติก (Cobaltic) เช่น $\text{Co}_2(\text{SO}_4)_3$ การทำอิเล็กโทรไลซิสของสารละลาย CoSO_4 ในกรดซัลฟิวริกเจือจาง $\text{Co}_2(\text{SO}_4)_3$ ตกผลึกสีน้ำเงินที่ขั้วแพลทินัม (Pt electrode)

ตามปกติเราจะไม่ใช้โคบอลต์ในรูปสารบริสุทธิ์แต่จะผสมกับธาตุอื่นเพื่อทำเป็นโลหะผสม (Alloy) ประโยชน์ของโคบอลต์ คือ ใช้เป็นสารให้สีสำหรับทาหรือเขียนหมึกพิมพ์และสีข้อม

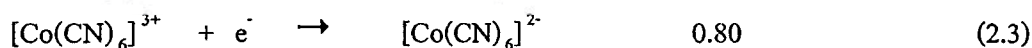
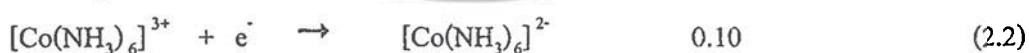
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับผ้าฝ้าย (Cotton) ในอุตสาหกรรมจะใช้โคบอลต์ออกไซด์เติมลงไประหว่างกระบวนการทำเซรามิกส์เพื่อให้สีขาว นอกจากนี้ยังมีการใช้โคบอลต์ในผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและใช้ทำเป็นแม่เหล็กถาวร

โคบอลต์ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมีต่างๆ เช่น ไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) และดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) ส่วนโคบอลต์-60 ยังใช้เป็นแหล่งรังสีแกมมาในการรักษาโรคมะเร็งและใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในอาหาร

โคบอลต์เป็นโลหะสีขาวปนน้ำเงินเล็กน้อยเป็นสารประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) มีความแข็ง (Strength) และค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยา แต่ก็รวมตัวกับอโลหะได้บ้างเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างสารประกอบของโคบอลต์เช่น Co_3O_4 , CoF_2 , CoX_2 ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) เป็นต้น โลหะโคบอลต์ไม่ละลายในกรดเข้มข้นและเบส แต่ละลายช้าๆ ในกรดเจือจางได้ไอออน $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ซึ่งมีสีชมพู ถ้าเทียบกับธาตุอื่นแล้วโคบอลต์จัดว่ามีปริมาณค่อนข้างน้อยในโลกส่วนใหญ่จะปนอยู่กับแร่ชนิดอื่น เช่น สารหนู นิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว เป็นต้น การถลุงออกมาเป็นโลหะบริสุทธิ์ค่อนข้างยากจึงทำให้มีราคาแพง โดยทั่วไปมักใช้วิธีนำสินแร่มาเผาอย่างในอากาศเพื่อให้ได้ออกไซด์ผสม Co_3O_4 (หรือ $\text{CoO} \cdot \text{Co}_2\text{O}_3$) แล้วนำไปรีดิวซ์โดยใช้ถ่านหรืออะลูมิเนียม

สมบัติทางเคมีส่วนใหญ่ของโคบอลต์จะเป็นสมบัติเนื่องมาจากการที่มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 ดังกล่าวข้างต้น เมื่อเติมสารละลายแอมโมเนียมหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายที่มี Co^{2+} จะได้ตะกอนสีน้ำเงิน $\text{Co}(\text{OH})_2$ ซึ่งละลายได้ในสารละลายเบสเข้มข้นกลายเป็น $[\text{Co}(\text{OH})_4]^{2-}$ นอกจากนี้ยังละลายในสารละลายแอมโมเนียมได้เป็น $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ $\text{Co}(\text{II})$ มีความเสถียรมากในสภาวะปกติ แต่ถ้าอยู่ในสารประกอบเชิงซ้อนที่เลขออกซิเดชัน +3 จะมีความเสถียรมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบค่า E^0 ดังสมการต่อไปนี้



สารประกอบ $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{4-}$ สามารถรีดิวซ์น้ำแล้วให้ไฮโดรเจนได้ แสดงว่าเป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงมาก แต่ถ้าเป็นสารละลายในรูปสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ จะเสถียรส่วน $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก (จากค่า E^0 ข้างบน, $E^0 = +1.82 \text{ V}$)

เมื่อนำโคบอลต์เจือกับเหล็ก นิกเกิลและอะลูมิเนียม จะได้โลหะเจือ อลูมิเนียม-นิกเกิล-โคบอลต์โลหะ (Alnico) ซึ่งใช้ทำแม่เหล็กถาวร นอกจากนี้ยังใช้เจือกับโลหะอื่นเป็นโลหะเจือที่ให้ความแข็งแรงทนทาน เช่น Satellite เป็นโลหะเจือที่ประกอบด้วยโคบอลต์ 55% ทังสแตน 15% โครเมียม 25% และโมลิบดีนัม 5% มีความแข็งแรงมากแม้จะเผาจนร้อนแดง ทนต่อการผุกร่อน นอกจากนี้ สารประกอบของโคบอลต์ยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในดินที่อุดมสมบูรณ์

2.2 โคบอลต์ออกไซด์

โคบอลต์ออกไซด์ คือ สารประกอบอนินทรีย์ที่มีโดยทั่วไปจะมีหลายสูตรโมเลกุลแต่สูตรโมเลกุลที่มีความเสถียรคือ Co_3O_4 สามารถสังเคราะห์ได้จาก CoO ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 ถึง 900 องศาเซลเซียส ดังสมการ



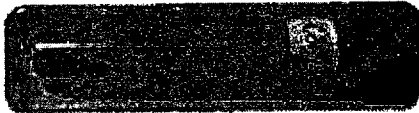
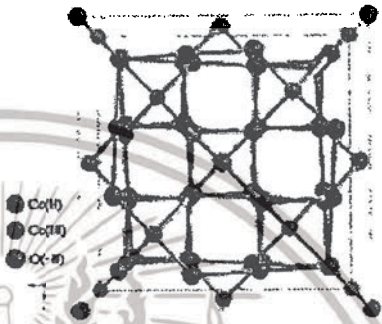
นาโนโคบอลต์ออกไซด์เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ ที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโน ตัวอย่างการใช้โคบอลต์ออกไซด์ คือ การนำโคบอลต์ออกไซด์มาเป็นสารให้สีในเซรามิกส์และแก้วเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 850 ถึง 900 องศาเซลเซียส จะให้สีน้ำตาลเทา สลายตัวที่ 1,935 องศาเซลเซียสและไม่ละลายน้ำ โดยส่วนใหญ่ นาโนโคบอลต์ออกไซด์จะถูกนำไปใช้เป็นสีในน้ำหมึก น้ำยาเคลือบเงาและเป็นสารเติมแต่งในปุ๋ย [10]

นาโนโคบอลต์ออกไซด์สามารถนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเช่น การเปลี่ยนไซลีน (Xylene) เป็นกรดเทเรฟทาลิก (Terephthalic acid) โดยใช้นาโนโคบอลต์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้กำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) จากกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยน้ำ (Steam reforming) ซึ่งเป็นการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้นาโนโคบอลต์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [11] คุณสมบัติทั่วไปของโคบอลต์ออกไซด์แสดงดังตารางที่

2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของโคบอลต์ออกไซด์

โคบอลต์ออกไซด์

	
ลักษณะทางกายภาพ	
โครงสร้างผลึก	
ชื่อตามระบบไอยูแพค (IUPAC name)	โคบอลต์ ไดโคบอลต์ ออกไซด์ (cobalt(II) dicobalt(III) oxide)
ชื่อสามัญ	โคบอลต์ออกไซด์
สูตรโมเลกุล	Co_3O_4
น้ำหนักโมเลกุล	$\text{CoO} \cdot \text{Co}_2\text{O}_3$
ความหนาแน่น	240.80 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว	6.11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
อุณหภูมิที่สลายตัว	895 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายในน้ำ	900 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลาย	ไม่ละลาย
ในกรดและเบส	ละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน (Fluorine Tin Oxide)

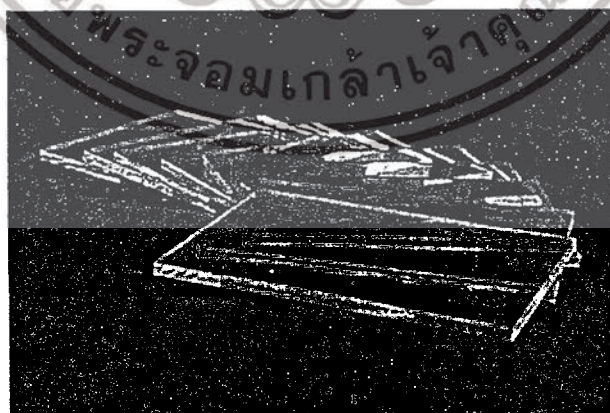
2.3.1 สมบัติทั่วไปของทินออกไซด์ เจือฟลูออรีน [12]

ทินไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทน์ เติระโกนัล เซลล์หน่วย (unit cell) มีอะตอมของทินอยู่ตรงกลาง และอยู่ที่มุมทั้ง 8 มุม และมีอะตอมของออกซิเจน อยู่ที่ กึ่งกลางด้านทั้งหน่วยที่เล็กที่สุดของผลึกจะเรียกว่าเซลล์ดั้งเดิม (primitive cell) เป็นปริมาตรรูปสี่เหลี่ยมสามารถประกอบขึ้นมาเป็นผลึกได้พอดี

ทินออกไซด์ เจือฟลูออรีนเกิดจากการเจือทินออกไซด์ด้วยฟลูออรีน โดยฟลูออรีนจะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของออกซิเจนทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น และมีสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำ เรียกสารประกอบออกไซด์ที่นำไฟฟ้านี้ว่า n-type transparent conducting oxide จากนั้นนำสารประกอบของทินออกไซด์ เจือฟลูออรีนมาเคลือบลงบนฉับสเตรทที่เป็นกระจกเพื่อนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน

เทคนิคที่ใช้ในการเคลือบทินออกไซด์เจือฟลูออรีนมีหลายเทคนิคด้วยกัน เช่น วิธีการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยระบบไพโรซอล การเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม (dip-coating technique) หรือเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolyzed) เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนมีดังนี้ [13]

- 1.สามารถส่องผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็น (380-700 nm) ได้สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์
- 2.มีค่าความต้านทานต่ำที่สุดประมาณ 5×10^{-3} โอห์ม
- 3.มีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล มีระนาบการจัดเรียงตัว (2 1 1)
- 4.สามารถใส่ปริมาณฟลูออรีน คีบุงมากที่สุดได้ประมาณ 3% โดยโมล



รูปที่ 2.1 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์

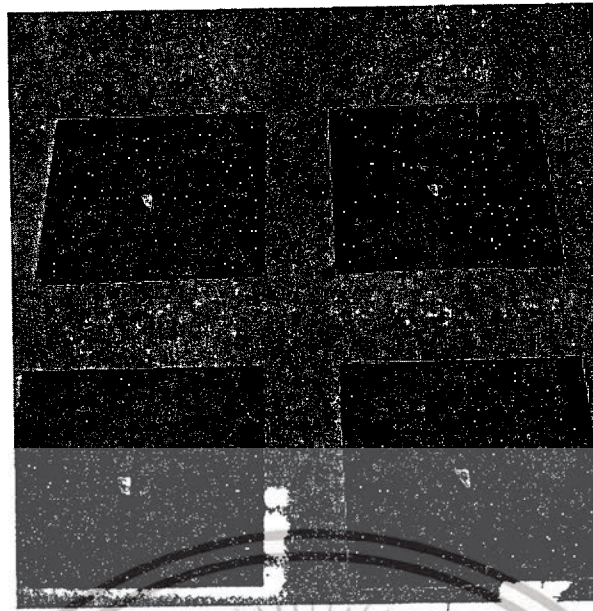
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน [14] พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์สาร โดยมีลักษณะคล้ายกับขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทั่วไปคือประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสามขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งใช้ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีนลงบนวัสดุรองรับที่มีลักษณะเป็นแผ่นผิวเรียบ เช่น กระดาษ เซรามิกส์ หรือแผ่นโพลีเมอร์ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคการพิมพ์สกรีนทำให้สามารถผลิตขั้วไฟฟ้าได้ที่ละมากๆ พร้อมๆ กันได้

ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนสามารถนำมาทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าเพื่อให้มีคุณสมบัติได้อย่างหลากหลาย เพื่อให้สามารถนำไปใช้ตรวจวัดสารต่างๆ ตามที่ต้องการได้ โดยปัจจุบันนี้ได้มีการศึกษาการใช้งานปรับปรุงขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน เพื่อใช้งานทางด้านต่างๆ กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้การปรับแต่งขั้วไฟฟ้าใช้งานด้วยวิธีต่างๆ เช่น การผสมสารที่ต้องการปรับปรุงลงไปที่หมึกสกรีนโดยตรงหรือการใช้ โพลีเมอร์ตรึงสารที่ต้องการเคลือบไว้บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน จะถูกออกแบบมาให้มีขนาดเล็กและเพื่อให้ใช้แบบได้ครั้งเดียวแล้วทิ้งหรือใช้กับเครื่องมือแบบพกพาได้โดยการเสียบใช้งานได้ที่ข้อดีของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

1. ใช้งานง่ายและให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว
2. ช่วยลดสัญญาณรบกวน (Background) เพราะขั้วไฟฟ้าทำงานสัมผัสกับสาร โดยตรงไม่มีฉนวนมาบัง
3. ช่วยลดการปนเปื้อนเนื่องจากเป็นขั้วชนิดใช้แล้วทิ้ง
4. ราคาถูกเนื่องจากส่วนประกอบที่ใช้ทำขั้วราคาไม่แพง



รูปที่ 2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนที่ใช้ในงานวิจัย

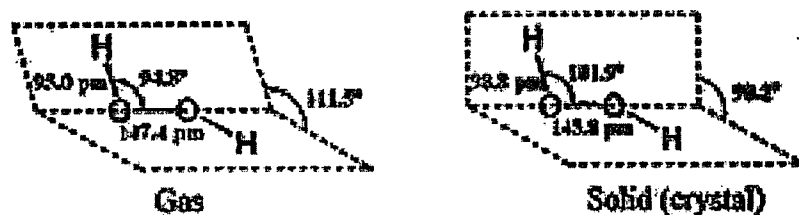
2.5 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) [15,16] มีชื่อตามระบบไอยูแพคว่า Dihydrogen dioxide มีลักษณะเป็นของเหลวสีฟ้าจาง มีความหนืดมากกว่าน้ำเพียงเล็กน้อย เมื่อเจือจางจะมีลักษณะใสไม่มีสี มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidize) ที่แรงมีประสิทธิภาพในการฟอกสีเป็นอย่างมาก ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค Disinfectant, Antiseptic, Oxidizer และใช้เป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนจรวด ในธรรมชาติไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดขึ้นเองในร่างกายซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่ได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ภายในเซลล์ในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด (โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตที่มีกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน) กระบวนการที่เกิดจากเอนไซม์จำพวก Peroxidases ซึ่งมีความปลอดภัยไม่เป็นอันตรายและสลายตัวได้ง่ายเมื่อมีความเข้มข้นต่ำๆ



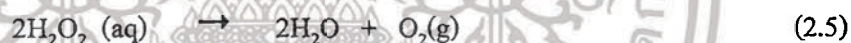
รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้าง โมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สถานะแก๊สและของแข็ง

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีโครงสร้างโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 สายละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีคุณสมบัติแตกต่างจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บริสุทธิ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทั่วไปไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะหาได้ในรูปของสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์สามารถหาซื้อทั่วไปตามร้านขายยาใช้เป็นน้ำยาสำหรับล้างแผล หน่วยความเข้มข้นที่นิยมใช้อีกหน่วยสำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือ หน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร (w/v) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถสลายตัวได้เป็นน้ำและแก๊สออกซิเจน ดังสมการ (2.4)



2.5.1 การใช้งานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ทางด้านอุตสาหกรรม [1]

- ใช้ในงานฟอกขาวกระดาษหรือฟอกผ้า
- ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคแทนคลอรีนซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าคลอรีน
- ใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหารเป็นต้น

การใช้งานทั่วไป [17]

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นระหว่าง 3-12% สามารถใช้ร่วมกับ

แอมโมเนียมในการฟอกสีผม

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3% ใช้สำหรับล้างแผลทำความสะอาด

เนื้อเยื่อที่ตายแล้ว

อย่างไรก็ตามการศึกษาล่าสุดชี้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำลายเซลล์ผิวที่เกิดใหม่ ถูกดูดซึมโดยผิวหนังและทำให้เกิดสถานะเส้นเลือดฝอยอุดตัน จะปรากฏเป็นสีขาวชั่วคราวที่ผิวหนังเมื่อ

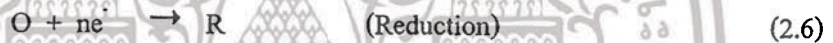
สัมพันธ์กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำจะใช้สำหรับทำให้สุญจาเจียน แต่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ไม่เหมาะสำหรับกลืนกิน

2.6 หลักการทางเคมีไฟฟ้าโดยทั่วไป

เคมีไฟฟ้า [18] เป็นความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งปริมาณทางไฟฟ้ามีการส่งผ่านจากปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทำงานเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ส่วนที่สองคืออุปกรณ์ทางเคมีไฟฟ้า ทำหน้าที่ตรวจรับหรือให้สัญญาณปริมาณทางไฟฟ้าและส่วนที่สามคือสารละลายที่มีเกลืออิเล็กโทรไลต์ละลายอยู่เพื่อการนำไฟฟ้าในสารละลาย

โดยทั่วไปหัวข้อเคมีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าด้วยสมการต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) คือ ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชัน ตัวอย่างเช่น สมการต่อไปนี้



โดย O เป็นสารออกซิไดซ์เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และ R เป็นสารรีดิวซ์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2. ปฏิกิริยา Heterogeneous คือ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารละลายด้วยกระบวนการถ่ายเทมวลและอิเล็กตรอน ดังสมการต่อไปนี้



3. กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าว หรือกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะมีการส่งผ่านสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า

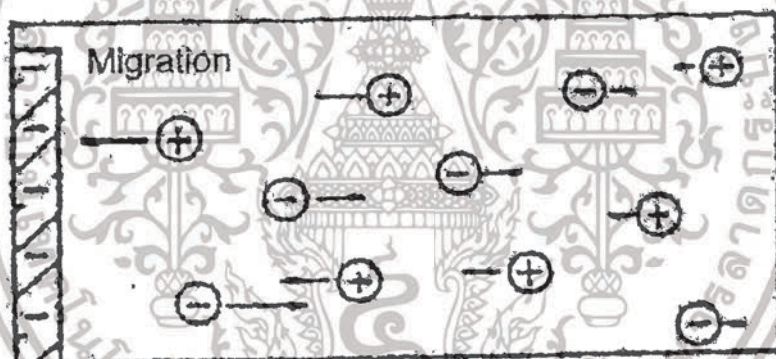
4. ปริมาณกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการถ่ายเทมวล ซึ่งมีด้วยกัน 3 ลักษณะ คือ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และการพา (Convection) รวมถึงจลศาสตร์ของปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน

2.6.1 การถ่ายเทมวลในสารละลาย (Mass transfer)

มวลในสารละลายซึ่งอาจจะเป็น ไอออนหรือโมเลกุลถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ด้วย 3 กลไกนี้เกิดขึ้นกับขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ตัวอย่างต่างๆ ที่ใช้อธิบายต่อไปนี้จะแสดงเฉพาะขั้วแอโนดเท่านั้น

2.6.1.1 ไมเกรชัน (Migration)

ไมเกรชัน เป็นการเคลื่อนที่ของ ไอออนหรือสปีชีส์ต่างๆ ที่มีประจุเข้าหาขั้วไฟฟ้าตามแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตหรือภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้กับขั้วไฟฟ้า คือพวกที่มีประจุบวกเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าลบและพวกที่มีประจุไฟฟ้าลบเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าบวก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูป 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน

กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสไมเกรชัน ซึ่งเป็นกระแสที่ไม่มีความสำคัญในการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า บางวิธีวิเคราะห์ต้องต้องมีการกำจัดการเคลื่อนที่แบบหนึ่งของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกือหนุน (Supporting electrolyte) ซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์แก่และเนื่องต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยต้องเติมในปริมาณที่เข้มข้นมากกว่าสารละลายตัวอย่าง 50 ถึง 100 เท่า ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไปในวิธีวิเคราะห์ที่ซึ่งต้องมีการลดกระแสไมเกรชัน

2.6.1.2 การแพร่ (Diffusion)

การแพร่ คือ เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือสปีชีส์ต่างๆ ที่มีประจุเข้าหาขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เอง เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น โดยเคลื่อนที่จากบริเวณที่สารละลายมีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่สารละลายมีความเข้มข้นต่ำกว่าเพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสที่เรียกว่า กระแสแพร่ จัดเป็นกระแสฟาราเดิก (Faradaic current) กระแสการแพร่นี้ขึ้นกับอัตราการเคลื่อนที่ของไอออนและอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า จัดเป็นกระแสที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ ได้แก่

1. ความเข้มข้นของสาร - สารที่เข้มข้นสูงจะแพร่ได้มาก
2. อุณหภูมิ - การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การแพร่เป็นไปได้เร็วขึ้น
3. ความดัน - การเพิ่มความดันช่วยให้โมเลกุลหรือไอออนของสารเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น
4. สิ่งเจือปนอื่นๆ - ที่ปนอยู่ในสารจะเป็นอุปสรรคขัดขวางทำให้การแพร่เกิดได้ช้าลง
5. การดูดติดของสารอื่น - ถ้าโมเลกุลหรือไอออนของสารที่แพร่ถูกดูดติดด้วยองค์ประกอบของสารต่างๆ จะทำให้ความสามารถในการแพร่ลดลง



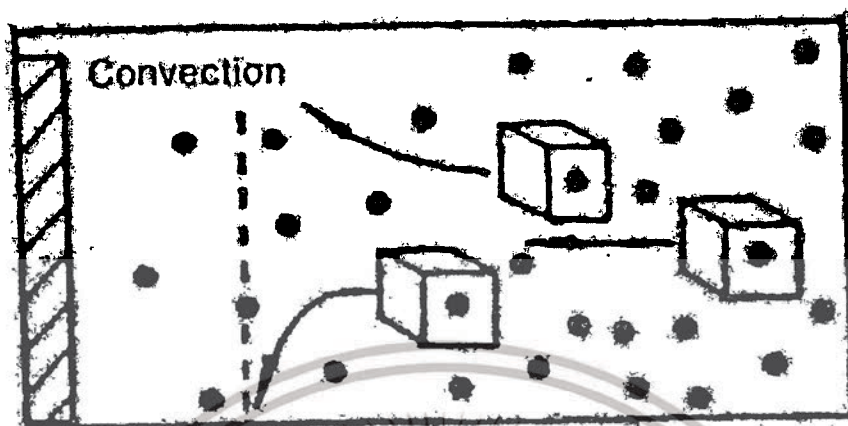
รูป 2.6 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการแพร่

2.6.1.3 การพา (Convection)

การพาเป็นการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงทางกายภาพทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลายเช่นการคน หรือการกวนสารละลาย การหมุน หรือการสั่นของอิเล็กโทรด หรือเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างของความหนาแน่นของสาร ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบการพาเรียกว่า การพาโดยธรรมชาติ (Natural convection) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูป 2.7 แสดงการนำพามวลจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดด้วยการพา

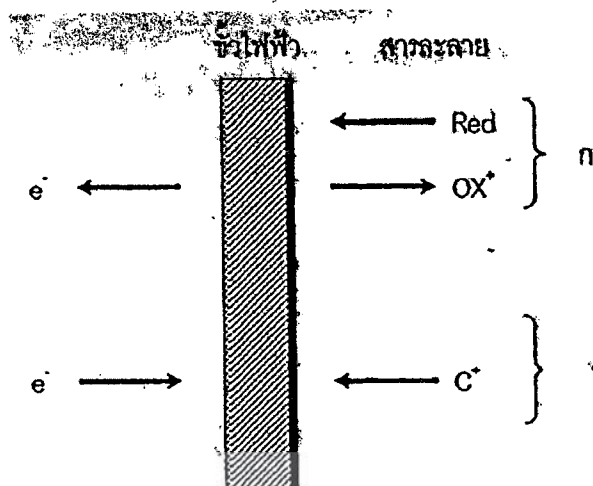
กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสการพาหรือกระแสคอนเวกชัน (Convection current) ซึ่งเป็นกระแสที่ไม่ค่อยมีความสำคัญเท่าใดนักในการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า บางวิธีวิเคราะห์อาจต้องมีการกำจัดเคลื่อนที่แบบนี้โดยการหยุดคนหรือกวนสารละลายขณะการวัด

2.6.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

กระบวนการที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภทดังนี้

1. ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อิเล็กโทรดหนึ่งและปฏิกิริยารีดักชันที่อีกอิเล็กโทรดหนึ่ง กระบวนการแบบนี้เรียกว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic current process) และกระแสที่เกิดขึ้น เรียกว่า กระแสฟาราเดอิก (Faradaic current, I_{fa}) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ที่กล่าวว่า “ปริมาณของประจุ (อิเล็กตรอน) ที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นสัดส่วนตรงกับกระแส”

เมื่อวัดกระแสฟาราเดย์ที่เกิดขึ้นจากสารที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งถูกวัดด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.8 หรือถูกออกซิไดซ์ที่อิเล็กโทรดทำให้ทราบจำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาและสามารถนำไปหาปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ตามหลักปริมาณสารสัมพันธ์ ดังนั้นกระแสฟาราเดย์จึงจัดเป็นสัญญาณการวิเคราะห์ (Analytical signal) ชนิดหนึ่งที่ถูกต้องในเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า

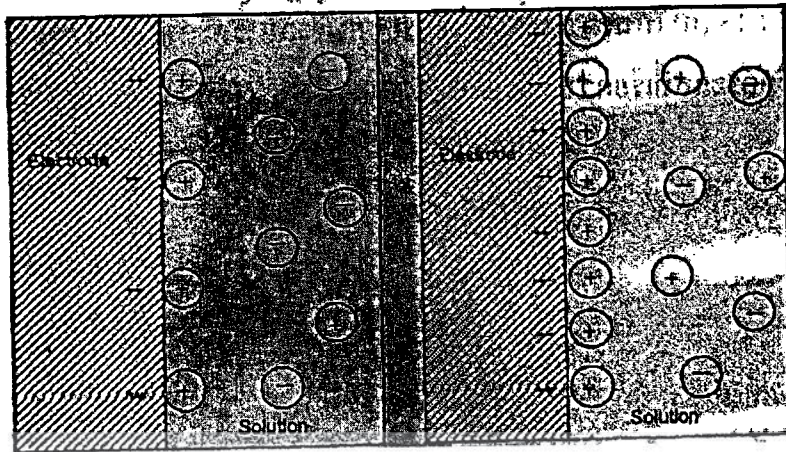


รูปที่ 2.8 รูปแบบแสดงกระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ก.กระบวนการฟาราเดอิก $\text{Red} \rightleftharpoons \text{OX}^+ + e^-$

ข.กระบวนการอัดประจุ (นอนฟาราเดอิก)

2. กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (Adsorption) ของไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับอิเล็กโทรดที่ผิวหน้าอิเล็กโทรดแต่ไม่ข้ามรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลายและไม่มีปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ข กระบวนการนี้ทำให้บริเวณรอยต่อเปรียบเหมือนตัวเก็บประจุ (Electric capacitor) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จึงเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการอัดประจุ (Charging process) หรือ กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic process) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ



รูป 2.9 แสดงกระบวนการดูดซับหรือกระบวนการอัดประจุที่รอยต่อเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าลบกับอิเล็กโทรด

องค์ประกอบของสารละลายที่ไม่ใช่ของค์ประกอบที่คงการวิเคราะห์มักเกิดกระบวนการอัดประจุ ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นสัญญาณรบกวนของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์เชิงไฟฟ้าเคมี ดังนั้นต้องนำกระแสที่วัดได้ (I) มาหักลบด้วยกระแสอนฟาราเดอิก (I_{chg}) จึงจะได้กระแสที่เกิดจากปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือกระแสฟาราเดอิก (I_{far}) ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{far} = I - I_{chg} \tag{2.11}$$

2.7 การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

2.7.1 เซลล์โวลแทมเมทรี

เซลล์โวลแทมเมทรี [19] เป็นเทคนิคที่มักใช้เรียกเซลล์เคมีไฟฟ้าในกลุ่มการวิเคราะห์ โวลแทมเมทรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันไปจากการทำโพเทนชิอเมทรีตรงที่ว่า ขั้วไฟฟ้าในการทำโวลแทมเมทรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าช่วย หรือขั้วไฟฟาร่วม ที่จมอยู่ในสารละลายที่มีสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ และสารอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมักเรียกว่าเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ช่วย หรือเกลือหนุน (Supporting electrolyte) โดยสารอิเล็กโทรไลต์ช่วย มักใช้ในปริมาณที่มากเกินไป นอกจากนี้ยังมีระบบกำจัดแก๊สออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การกำจัดออกซิเจน

โดยปกติออกซิเจนมีอยู่ทั่วไปในบรรยากาศในรูปแก๊สและละลายอยู่ในสารละลาย สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ออกซิเจนจะสามารถละลายได้ในตัวทำละลายทุกชนิด เช่น น้ำ ออกซิเจนสามารถละลายในน้ำได้ดี (ประมาณ 10^{-3} โมลาร์) ออกซิเจนที่อยู่ในสารละลายเป็นสารรบกวนต่อการวิเคราะห์เพราะจะเกิดกระแสเนื่องจากการแพร่ของสองส่วน ส่วนแรกออกซิเจนในสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โมเลกุลของน้ำไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าครึ่งคลื่นเท่ากับ -0.14 โวลต์ (เปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Saturated calomel electrode, SCE) และส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ได้น้ำเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.9 โวลต์ ดังสมการ



ผลจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจนทั้งสองปฏิกิริยาดังกล่าว เกิดขึ้นในช่วงศักย์ไฟฟ้า 0 ถึง -1 โวลต์ โดยเฉพาะที่ศักย์ไฟฟ้า -0.14 โวลต์นั้นถือว่าต่ำมาก ทำให้เกิดกระแสแคโทดิกได้ไม่น้อยกว่า 5 ไมโครแอมแปร์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังสามารถที่จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ในสารตัวอย่างได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องกำจัดออกซิเจนออกจากสารละลายที่จะทำการตรวจวัดก่อน โดยการผ่านแก๊สเฉื่อยที่บริสุทธิ์ เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สอาร์กอน ลงไปในสารละลายที่จะทำการวัดประมาณ 10 ถึง 15 นาที ก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์ และผ่านแก๊สปกคลุมบรรยากาศบริเวณเหนือสารตัวอย่างตลอดการวิเคราะห์ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการละลายของออกซิเจนลงไปในพื้นที่เหนือสารตัวอย่างขณะทำการวิเคราะห์

2. สารอิเล็กโทรไลต์ช่วย (Supporting electrolyte)

สารละลายในเซลล์โวลแทมเมตรี นอกจากจะมีสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์แล้ว ยังต้องมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย โดยใช้ปริมาณมากกว่าสารละลายตัวอย่าง 50 ถึง 100 เท่า เพื่อที่จะให้เกิดกระบวนการแพร่ของไอออนตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามากที่สุดและให้เกิดกระบวนการไมเกรชันของไอออนตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้าน้อยที่สุดหรือแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย นั่นคืออัตราส่วนของกระแสไมเกรชัน (I_m) ต่อกระแสของการแพร่ (I_d) มีค่าน้อยมากๆ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยควรเตรียมจากสารที่มีความบริสุทธิ์สูงและไม่ถูกออกซิไดส์หรือถูกรีดิวซ์ได้ง่ายความเข้มข้นของสารละลายที่อยู่ในช่วง 0.10 ถึง 1.00 โมลาร์

หน้าที่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย มีดังนี้

- ช่วยลดความต้านทานของสารละลาย
- ช่วยนำไฟฟ้าในกรณีสารตัวอย่างนำไฟฟ้าได้น้อย
- ช่วยขจัดโลหะไอออนแทรกซ้อนที่ปนมาในสารตัวอย่าง
- ช่วยป้องกันการเกิดไมเกรชัน
- ช่วยทำหน้าที่เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ (ช่วยปรับหรือรักษาพีเอชของสารละลายให้คงที่)

2.7.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เป็นขั้วที่จำเป็นต้องมีเพื่อใช้ในการเทียบศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากวงจร เป็นค่าของความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว จึงเรียกได้ว่าเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative potential) ในการใช้งานจะมีค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าคงที่ตลอดการทดลอง และควบคุมค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าใช้งานด้วย โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะมีใช้กันหลายชนิด เช่น ขั้วไฟฟ้าคาโลเมต ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นต้น

2. ขั้วไฟฟ้าร่วม หรือขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode)

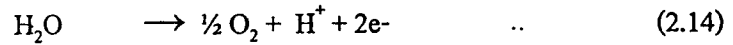
ขั้วไฟฟ้าช่วย ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ส่งต่อผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่างระหว่างการวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าร่วมนี้มีพื้นที่ผิวมากๆ เพื่อให้การนำไฟฟ้าเป็นไปได้ดี และลดการเกิดศักย์จากโอห์มของวงจร

3. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode)

ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ในกลุ่มการวิเคราะห์โวลแทมเมตรี ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะแตกต่างจากการวิเคราะห์อื่น คือขนาดของขั้วไฟฟ้าต้องเล็ก เพื่อให้พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าในการสัมผัสกับสารตัวอย่างมีน้อย เกิดสภาวะของโพลาริเซชันตลอดการวิเคราะห์ โดยส่วนใหญ่จะนิยมที่ทำมาจากแพลทินัม (Pt) หรือคาร์บอน (C) หรือปรอท (Hg) เป็นต้น ซึ่งขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ดีควรจะให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง รวมทั้งมีการตอบสนองที่คงที่ เชื่อถือได้ตลอดอายุการใช้งาน และสิ่งที่ควรพิจารณาในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าใช้งาน คือ ลักษณะของปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์และกระแสน้ำในขั้วไฟฟ้าที่ใช้งาน โดยปัจจัยย่อยอื่นๆ ที่นำมาพิจารณาด้วย เช่น ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานได้ ค่าการนำไฟฟ้า ราคา ความยากง่ายในการหา และความเป็นพิษ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

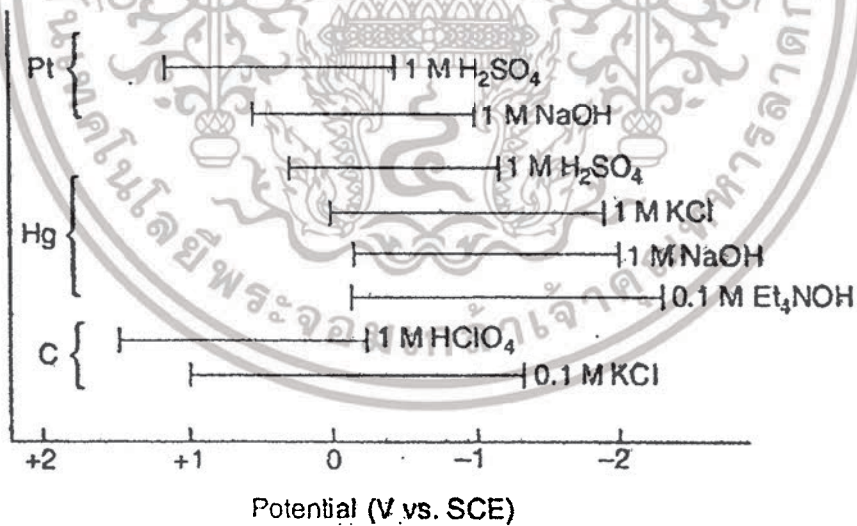
โดยทั่วไปตัวทำละลายของสารตัวอย่างมักเป็นน้ำ ช่วงศักย์ไฟฟ้าใช้งานของแต่ละขั้วไฟฟ้า หาได้จากการใช้พลังงานไฟฟ้าในรูปศักย์แก่เซลล์เคมีไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการศึกษาเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานและมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงรวมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ศักย์ที่ให้กับวงจรจนเกิดการไหลของกระแส อันเป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำ และให้โมเลกุลออกซิเจนเป็นชนิดจำกัดศักย์ไฟฟ้าทางบวก



ขณะเดียวกันชนิดจำกัดศักย์ไฟฟ้าทางลบเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำและได้โมเลกุลไฮโดรเจน



นอกจากชนิดจำกัดศักย์ทั้งบวกและลบของขั้วไฟฟ้าใช้งานจะแตกต่างกันตามชนิดของขั้วไฟฟ้าแล้ว ยังแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วย สรุปได้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงช่วงศักย์ไฟฟ้าที่สามารถให้แก่ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม คาร์บอนและเมอร์คิวรี ในอิเล็กโทรไลต์เกือบทุกชนิดต่างๆ

6. Cyclic Voltammetry

7. Stripping Voltammetry

- Anodic Stripping Voltammetry
- Cathodic Stripping Voltammetry
- Potentiometric Stripping Analysis

2.7.3.1 เทคนิคการวิเคราะห์ในกลุ่มโวลแทมเมตรี [20]

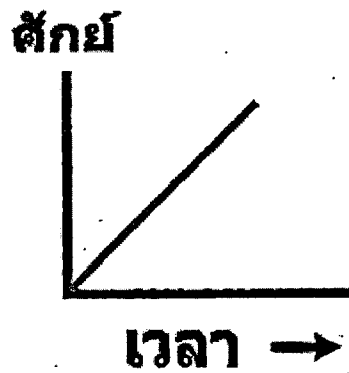
1. โพลารอกราฟี (Polarography)

โพลารอกราฟีเป็นเทคนิคของกลุ่มโวลแทมเมตรี (เป็นเทคนิคแรกของกาวิเคราะห์โดยโวลแทมเมตรี) ที่มีการใช้ขั้วไฟฟ้าแบบหยดปรอทเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน เทคนิคนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สำหรับการวิเคราะห์โดยโพลารอกราฟีนี้ศักย์ที่ให้กับขั้วไฟฟ้าจะเป็นแบบ Linear-scan นั่นคือ ให้ศักย์กับวงจรในอัตราเร็วที่คงที่หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มศักย์อย่างเป็นเส้นตรงตามเวลา



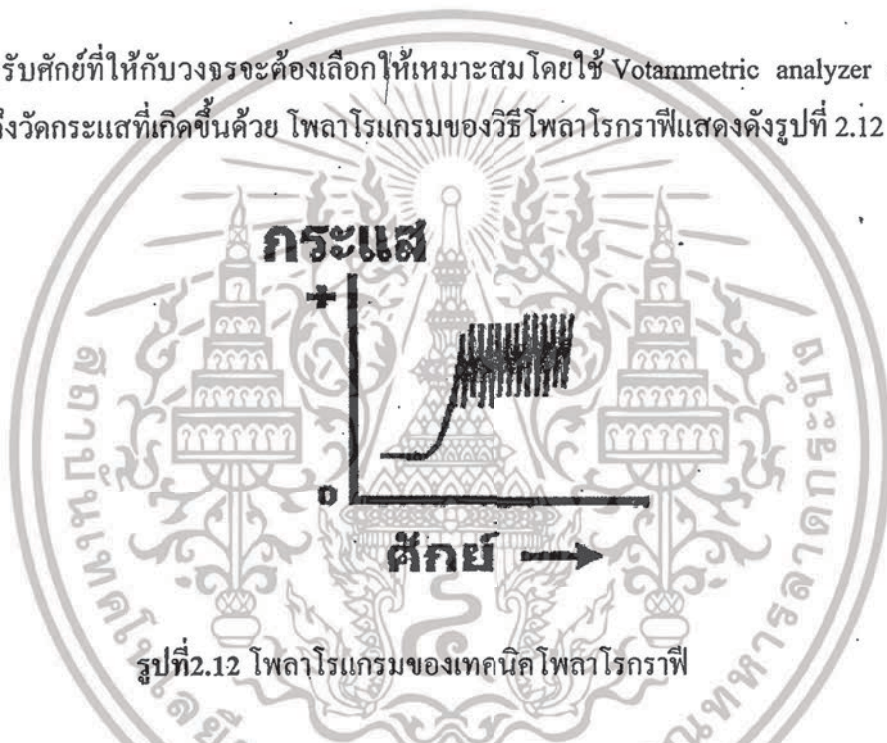
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาแบบเทคนิคโพลารอกราฟี

สำหรับศักย์ที่ให้กับวงจรจะต้องเลือกให้เหมาะสมโดยใช้ Voltammetric analyzer เป็นตัวควบคุมรวมถึงวัดกระแสที่เกิดขึ้นด้วย โพลารแกรมของวิธีโพลารอกราฟีแสดงดังรูปที่ 2.12



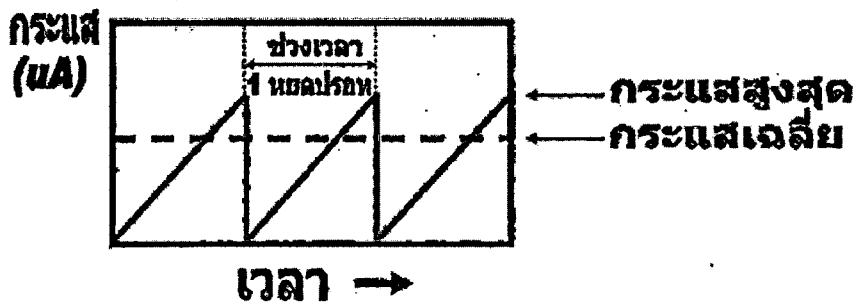
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาแบบเทคนิค โพลารอกราฟี

สำหรับศักย์ที่ให้กับวงจรจะต้องเลือกให้เหมาะสม โดยใช้ Voltammetric analyzer เป็นตัวควบคุมรวมถึงวัดกระแสที่เกิดขึ้นด้วย โพลาริแกรมของวิธี โพลารอกราฟีแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โพลาริแกรมของเทคนิค โพลารอกราฟี

สาเหตุที่โพลาริแกรมที่ได้เป็นแบบฟันเลื่อย ก็เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสระหว่างการหยดปรอทเกิดการแกว่งของกระแสขึ้น โดยกระแสเริ่มเกิดเมื่อมีการปล่อยปรอทจากปลายหลอดรูเล็กและกระแสขึ้นสูงสุด เมื่อปรอทถูกปล่อยออกมาเต็มหยดพร้อมที่จะหยดลงในสารละลาย



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา เมื่อมีการหยดปรอท

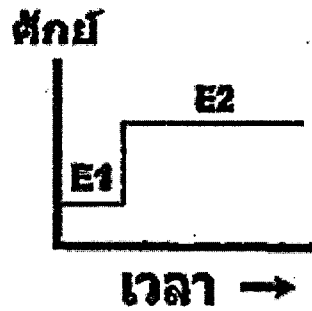
เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาวิธี โพลารอกราฟีแบบใหม่ที่เรียกว่า การทำแทสต์โพลารอกราฟี โดยการควบคุมบันทึกกระแสก่อนที่จะหยดออกมาจากปลายหลอดครู่เล็กในแต่ละหยด ทำให้โพลารแกรมที่ได้ไม่เกิดสภาพพื้นเลื้อย



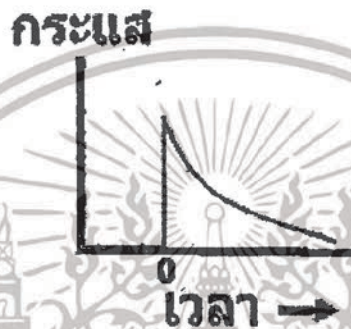
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า โดยการทำให้แทสต์โพลารอกราฟี

2. แอมเพอโรเมทรี (Amperometry)

เทคนิคแอมเพอโรเมทรี เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยให้ศักย์คงที่แก่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยค่าศักย์ที่ให้แก่วงจรนั้นต้องมีค่าที่เพียงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคแอมเพอโรเมตรี



รูปที่ 2.16 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคแอมเพอโรเมตรี

จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปกระแสจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง หรืออาจไม่มีสารตั้งต้นเหลืออยู่เลยก็เป็นได้ ความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่ลดลงต่อเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ

$$I(t) = kt^{-1/2} \quad (2.16)$$

i = กระแส t = เวลา k = ค่าคงที่

3. พัลส์โวลแทมเมตรี (Pulse Voltammetry)

3.1 พัลส์ปกติ (Normal pulse)

เป็นการให้ศักย์กับวงจรไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้นๆ ต่อทุกปรอทหยด โดยศักย์ที่ให้นี้มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอกับเวลา สำหรับการวัดกระแสต้องวัดในช่วงเวลาที่หยดปรอทใกล้จะหยดออกจากปลายแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



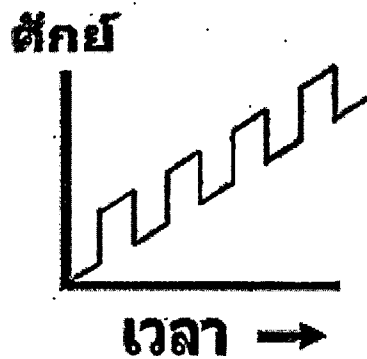
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์



รูป 2.18 กราฟแสดง โวลแทม โมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีแบบพัลส์ปกติ

3.2 ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ (Differential-pulse Voltammetry)

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรีเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจวัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีปริมาณน้อยๆ สำหรับสัญญาณกระตุ้นในลักษณะของดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์เป็นการเพิ่มศักย์ที่คงที่ในลักษณะของพัลส์ให้กับขั้วไฟฟ้าที่รับศักย์ปกติในรูปลิเนียร์ – สแกนอยู่แล้ว



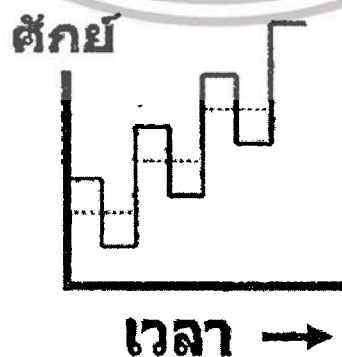
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลเทจเมทรีแบบคิฟเฟอร์เรนเซียสพัลส์



รูป 2.20 กราฟแสดงโวลเทจ โมแกรมของพัลส์โวลเทจเมทรีแบบคิฟเฟอร์เรนเซียสพัลส์

3.3 สแควร์-เวฟ (Square-wave)

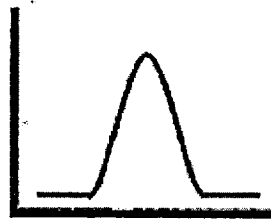
สแควร์-เวฟโวลเทจเมทรี จะให้สัญญาณกระตุ้น (ศักย์ที่ต่างจากพัลส์ทั้งสองแบบที่กล่าวมาคือ ให้สัญญาณกระตุ้นกับวงจรไฟฟ้าเป็นช่วงๆ) สำหรับวิธีนี้จะให้หยดปรอทแค่หนึ่งหยดเป็นชั่วไฟฟ้าใช้งานและเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นช่วงเวลาสั้นๆ รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์สแควร์-เวฟแสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของพัลส์โวลเทจเมทรีแบบสแควร์-เวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลต่างกระแส



ศักย์ →

รูปที่ 2.22 กราฟแสดง โวลแทมโมแกรมของพัลส์โวลแทมเมทรีสแควร์ – เวฟ

4 สทริปปิงโวลแทมเมทรี (Stripping voltammetry)

สทริปปิงโวลแทมเมทรีเป็นเทคนิคที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าสูงมากนั่นคือ สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างโลหะปริมาณน้อยๆได้ โดยเทคนิคนี้จะเพิ่มขั้นตอนที่ทำให้สารตัวอย่างมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์โดยวิธีโวลแทมเมทรีต่อไป รูปแบบสัญญาณกระตุ้นแบบ สทริปปิงแสดงดังรูปที่ 2.23

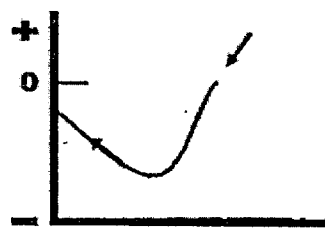
ศักย์



เวลา →

รูปที่ 2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมทรี

กระแส



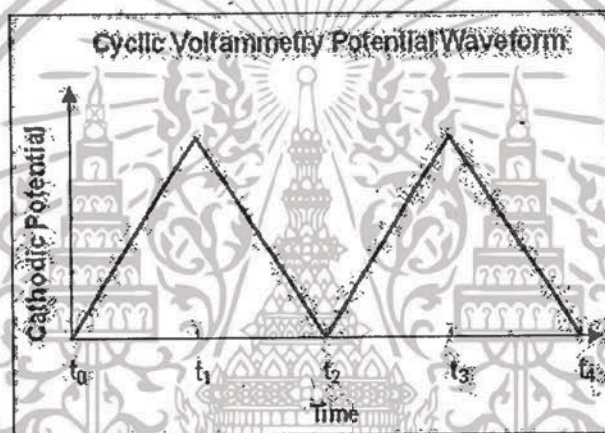
← ศักย์

รูปที่ 2.24 โวลแทมโมแกรมที่ได้ของเทคนิคสทริปปิงโวลแทมเมทรี

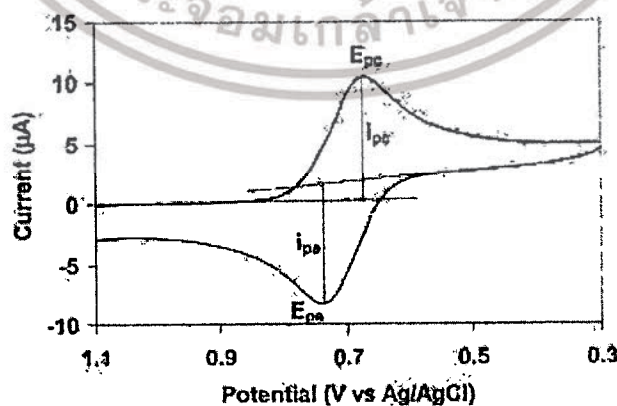
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry)

ไซคลิกโวลแทมเมตรี [18] เป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าในลักษณะสามเหลี่ยมหน้าจั่วแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมากเพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสารบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน ตลอดจนใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าอื่นๆต่อไป การบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วทำงาน โดยจะทำการพลอตค่ากระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) การให้ศักย์ไฟฟ้าในไซคลิกโวลแทมเมตรีจะเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าตามค่า Scan rate เมื่อเทียบกับเวลาจนถึงจุดสูงสุดและลดศักย์ไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามด้วย Scan rate เดียวกัน



รูปที่ 2.25 โวลเทจโปรแกรมของไซคลิกโวลแทมเมตรี



รูปที่ 2.26 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) ที่ได้สำหรับปฏิกิริยาที่ผันกลับได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.26 อธิบายกระแสที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

เมื่อเริ่มให้ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นค่าลบเพิ่มขึ้นจากเวลา t_0 ไปถึง t_1 ตัวออกซิไดส์ (Ox) หรือสารที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกรีดิวซ์ (Red) ที่ขั้วไฟฟ้าทำงาน ดังปฏิกิริยา 2.17

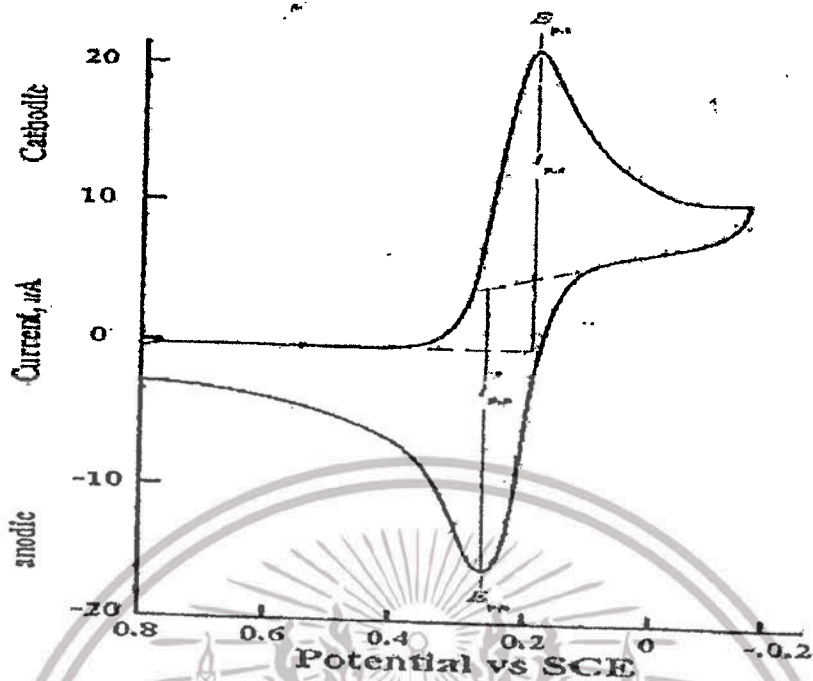


กระแสที่เกิดขึ้นเป็นกระแสแคโทดิก (Cathodic current) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ณ จุดนี้ตัวออกซิไดส์จะถูกรีดิวซ์จนหมด ทำให้ปริมาณตัวออกซิไดส์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานลดน้อยลง กระแสจะลดลงถึงค่าต่ำสุดเมื่อเวลา t_1 โวลแทมโมแกรมจึงมีลักษณะเป็นพีค เรียกว่าแคโทดิกพีค (Cathodic peak) กระแสแคโทดิกที่วัดจากเส้นฐานพีคของจุดเริ่มต้นไปถึงจุดสูงสุดของพีค เรียกว่า กระแสแคโทดิกพีค (Peak cathodic current, I_{pc}) และศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่กระแสแคโทดิกมีค่าเท่ากับ I_{pc} คือ E_{pc} (Peak cathodic potential) พิจารณาได้จากรูปที่ 2.26

หลังจากเวลา t_1 จะลดศักย์ไฟฟ้าที่ให้ไปในทิศทางที่เป็นบวก (หรือเป็นศักย์ไฟฟ้าที่ผันกลับกับตอนแรก) ดังแสดงในไซคลิกโวลแทมโมแกรมรูปที่ 2.26 แต่ก็ยังมีกระแสแคโทดิกเกิดขึ้นอยู่ เพราะศักย์ไฟฟ้ายังเป็นค่าลบเพียงพอที่จะเกิดรีดักชัน จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าเริ่มเข้าสู่ค่าที่เป็นบวก ตัวรีดิวซ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยารีดักชันที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานเริ่มถูกออกซิไดส์ ดังปฏิกิริยา



กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสแอโนดิก (Anodic current) กระแสนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นรอบๆ ขั้วไฟฟ้าของตัวรีดิวซ์ลดลงเป็นศูนย์ ขณะนี้กระแสแอโนดิกจะมีค่าสูงสุด และจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงเวลา t_2 โวลแทมโมแกรมมีลักษณะเป็นพีค เรียกว่า แอโนดิกพีค (Anodic peak) กระแสแอโนดิกที่วัดได้จากเส้นฐานพีคที่ลากจากเวลา t_1 ไปถึงจุดสูงสุดของพีค เรียกว่า กระแสแอโนดิกพีค (Peak anodic current, I_{pa}) และศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่กระแสแอโนดิกมีค่าเท่ากับ I_{pa} คือ E_{pa} (Peak anodic potential)



รูปที่ 2.27 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แสดงวิธีการหาความสูงพีค เมื่อ i_p , E_p คือ ความสูงและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันตามลำดับ ส่วน i_{pa} , E_{pa} คือ ความสูงกระแสและตำแหน่งศักย์พีคที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตามลำดับ

$$i_p = 2.69 \times 10^5 n^{3/2} A C D^{1/2} V^{1/2} \quad (2.19)$$

- เมื่อ i_p = กระแสพีค (A)
 n = จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา
 C = ความเข้มข้นของสารในสารละลายบัลค์ (mol/cm^3)
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร (cm^2/s)
 V = อัตราการสแกน (V/s)
 A = พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า (cm^2)

$$E_p = E^o - \frac{RT}{\alpha n_a F} \left[0.78 - \ln \frac{k^o}{D^{1/2}} + \ln \left(\frac{\alpha n_a F v}{RT} \right)^{1/2} \right] \quad (2.20)$$

- เมื่อ α = สัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยนประจุ
 n_a = จำนวนอิเล็กตรอนในการแลกเปลี่ยนประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k^0 = ค่าคงที่อัตรามาตรฐาน

$$\text{และ } i_p = 2.99 \times 10^5 n(\alpha n_a) ACD^{1/2} V^{1/2} \quad (2.21)$$

เมื่อนำค่า i_p มาเขียนพลอตกับค่า $V^{1/2}$ ซึ่งถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่ากระบวนการนี้เป็นแบบ Diffusion-control คือกระแสที่ได้จากปฏิกิริยา ซึ่งเป็นกระแสที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ หมายความว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เร็ว จนไม่ได้เป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา แต่ไอออน โมเลกุลหรืออนุภาคของ Electroactive species เคลื่อนที่จากชั้นสารละลายบัลค์ (Bulk solution) โดยการแพร่เข้าสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจะแพร่ช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า กระแสที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสเข้ามาของไอออน โมเลกุลหรืออนุภาคของ Electroactive species ดังกล่าว ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ Diffusion-control

ในกรณีที่มีการเกิดสารผลิตภัณฑ์ หรือมี Electroactive species ติดอยู่ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า กระแสฟีดที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ 2.22 [22]

$$i_p = \frac{n^2 F^2 A \Gamma v}{4RT} \quad (2.22)$$

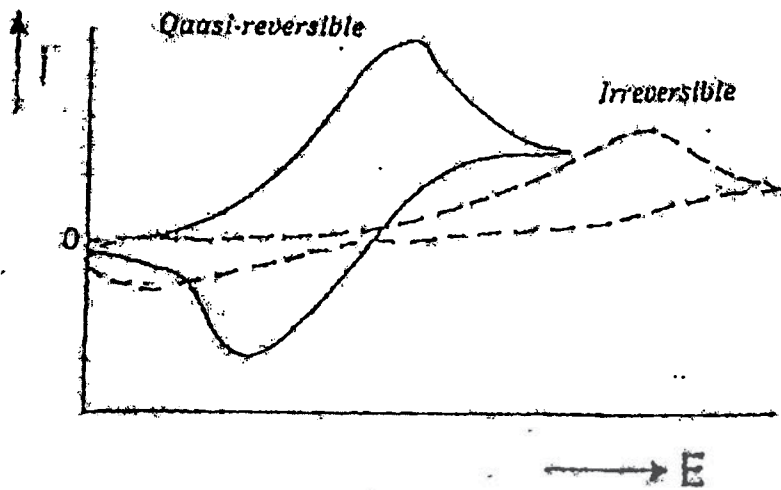
เมื่อ

i_p = กระแสฟีด (A)

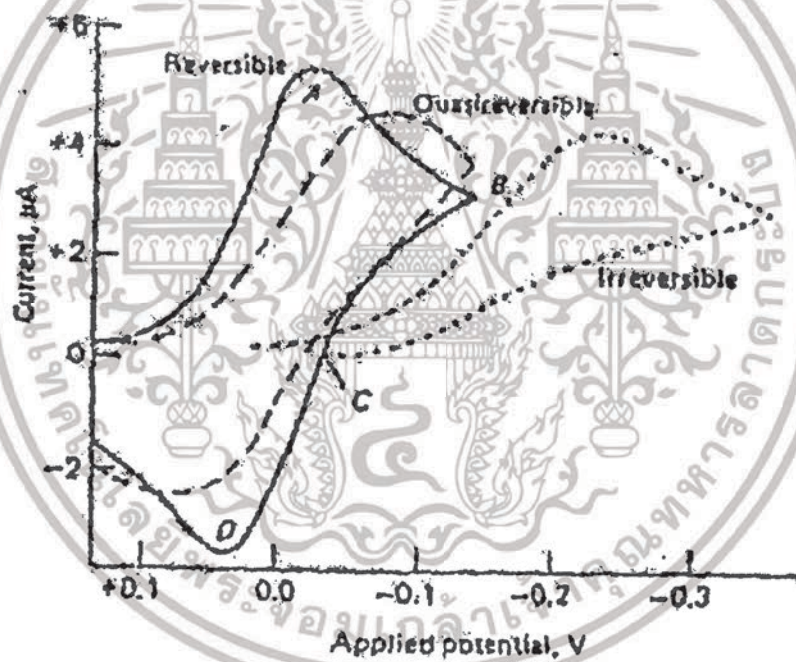
Γ = ปริมาณฟิล์มเชิงเส้นพื้นที่ผิว (mol/cm^2)

เมื่อนำค่า i_p มาเขียนพลอตกับค่า V ถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่ากระบวนการเป็นแบบ Surface-control หมายความว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดช้าจนกลายเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยา เพราะว่า ไอออน โมเลกุลหรืออนุภาคของ Electroactive species ที่เคลื่อนที่ได้เร็วพอๆ กับการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจึงถูกควบคุมโดยความเร็วของปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า จึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ Surface-control

การแยกฟีดว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Diffusion-control หรือว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Surface-control ทำได้โดยการพลอตกราฟระหว่าง $\log i_p$ กับ $\log V$ ซึ่งจะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแล้วพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟ ซึ่งถ้าเส้นกราฟมีความชันเท่ากับ 0.5 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Diffusion-control ส่วนถ้าเส้นกราฟมีความชันเท่ากับ 1 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Surface-control แล้วถ้ากราฟมีความชันเท่ากับ 1 ที่อัตราการสแกนต่ำและมีความชันเท่ากับ 0.5 ที่อัตราการสแกนสูงหมายความว่าปฏิกิริยาเป็นแบบผสมระหว่าง Surface-control กับ Diffusion-control



รูปที่ 2.28 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ และผันกลับได้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ กับที่ผันกลับไม่ได้และผันกลับได้ไม่สมบูรณ์

แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อลักษณะโวลแทมโมแกรมดังนั้นนอกจากจะใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมทรีในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพแล้ว ยังสามารถใช้ศึกษากลไกของการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ และจลศาสตร์ของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยเฉพาะปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบระหว่างโลหะกับสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้าทำงานที่ใช้ได้ดีกับวิธี ไซคลิก โวลแทมเมตรี คือ อิเล็กโทรดจุลภาค (micro electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตรอาจทำจาก แพลทินัม ทอง หรือ คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fiber microelectrode) ที่เคลือบด้วยเมมเบรนที่ แลกเปลี่ยนไอออนได้ด้วยอย่างเช่น คาร์บอนไฟเบอร์อิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยเมมเบรนที่แลกเปลี่ยน ไอออนได้ที่มีชื่อว่า Nafion เป็นต้น การใช้ขั้วจุลภาคนี้ทำให้วิธี ไซคลิก โวลแทมเมตรีไม่จำเป็นต้อง มีการไล่แก๊สออกซิเจนออกก่อนการวิเคราะห์ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

2.8 เทคนิคการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrochemical deposition)

การพอกพูนด้วยไฟฟ้า [21] เป็นเทคนิคที่ใช้สารละลายคอลลอยด์ในกระบวนการผลิต เซรามิกส์มีข้อดีหลากหลาย เช่น ใช้เวลาในการขึ้นรูปน้อยไม่มีข้อจำกัดในด้านรูปร่างของชั้นสเตรท เหมาะสมกับการทำงานในปริมาณมากๆ โดยหลักการการทำงานคือ ให้ประจุบนอนุภาคของสารตั้งต้น ในคอลลอยด์ เพื่อที่จะให้อนุภาคเดินทางไปเคลือบบนผิวของขั้วอิเล็กโทรดที่เป็น โลหะหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ด้วยกระแสไฟฟ้าตรงที่ให้เข้าไป เนื่องจากในคอลลอยด์จะไม่มีองค์ประกอบ ของสารอินทรีย์จึงทำให้อนุภาคสามารถเดินทางไปยังขั้วอิเล็กโทรดได้ อัตราเร็วในการเกิดฟิล์มมี ค่าประมาณ 1 มิลลิเมตรต่อนาที การเคลือบผิวจะเกิดได้ทุกตำแหน่งของขั้วอิเล็กโทรด สารละลาย สามารถใช้ได้หลายชนิดเช่น แอซิทิลแอซีโตน (Acetylacetone) แอลกอฮอล์ (Alcohol) และ แอซีโตน (Acetone) เป็นต้น

การพอกพูนด้วยไฟฟ้าเป็นที่นิยมมากในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งรวมถึง Electrocoating, E-coating, Cathodic electrodeposition และ Electrophoretic coating หรือ Electrophoretic painting โดยคุณสมบัติลักษณะของกระบวนการนี้ก็คือ คอลลอยด์ ซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยในของเหลว สามารถโยกย้ายภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า (Electrophoresis) และฝาก ไปยังอนุภาคเพื่อเดินทางไปเคลือบบนผิวของขั้วอิเล็กโทรดที่เป็น โลหะหรือวัสดุ ซึ่งตัวอย่างของ คอลลอยด์ได้แก่ เม็ด เม็ดสี สี เซรามิกส์ และ โลหะ เป็นต้น

กระบวนการการพอกพูนด้วยไฟฟ้านี้ จะใช้สำหรับการใช้เคลือบต่างๆ ในผลิตภัณฑ์โลหะ ซึ่งได้รับการใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการเคลือบหุ้มตัวถังรถยนต์และ ชิ้นส่วนรถแทรกเตอร์ และเครื่องจักรกลหนัก สวิตช์เกียร์ไฟฟ้า เครื่องใช้เฟอร์นิเจอร์โลหะภาชนะบรรจุเครื่องดื่มและหลายผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมอื่น ๆ ซึ่งกระบวนการนี้มีจำนวนของข้อ ได้เปรียบ กว่ากระบวนการอื่น ๆ ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่

1. สามารถควบคุมความหนาของการเคลือบได้
2. สามารถเคลือบวัตถุที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน ได้ง่าย
3. มีการเคลือบที่รวดเร็ว

4. ความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง
5. ใช้กับวัสดุอื่นๆ ได้ เช่น โลหะ เซรามิกส์ พอลิเมอร์และอื่น ๆ
6. สามารถควบคุมการเคลือบได้
7. กระบวนการเป็นไปโดยอัตโนมัติและต้องใช้แรงงานคนน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ
8. ประสิทธิภาพสูงในการเคลือบผิววัสดุและใช้ต้นทุนลดลงเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Abdollah Salimi, Rahman Hallaj และคณะ ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนโดยอนุภาคนาโนของโคบอลต์ออกไซด์ ซึ่งเตรียมจากสารละลายโคบอลต์คลอไรด์โดยการทำการพอกพูนทางไฟฟ้า จะอยู่ในรูปของฟิล์มโคบอลต์ไฮดรอกไซด์ที่เคลือบอยู่บนขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน ตรวจสอบชั้นฟิล์มด้วยไซคลิกโวลแทมเมตรีพบว่ามีความเสถียรต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ และเมื่อนำไปตรวจสอบปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมตรีได้กระแสเท่ากับ 0.75 โวลต์ เมื่อใช้ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิงในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7.5 มีขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 0.4 นาโนเมตร ความไวเท่ากับ 4.86 ไมโครแอมแปร์ต่อไมโครต่อตารางเซนติเมตรและเวลาการตอบสนองดีขึ้น 95 เปอร์เซ็นต์ [22]

Xingpin Cui, Li Hong, Xiangqin Lin นำไฮบริดคอปเปอร์ โคบอลต์ เฮกซะไซยาโนเฟอเรต (hybrid copper-cobalt hexacyanoferrate) ฟิล์มมาใช้เทคนิคการพอกพูนทางไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าแพลททินัมหรือขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน โดยใช้เทคนิคโวลแทมเมตรีและศึกษาคุณลักษณะโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า พบว่าไฮบริดคอปเปอร์ โคบอลต์ เฮกซะไซยาโนเฟอเรตฟิล์มเป็นการแทนที่ของไฮบริดเฮกซะไซยาโนเฟอเรต กับการเพิ่มปริมาณของ Cu ไอออน ในสารละลายพอกพูน การเพิ่มปริมาณของ Cu ไอออน ในฟิล์มเหมือนกัน ปริมาณของแพลททินัมในฟิล์มค่อย ๆ ลดลง ขั้วไฟฟ้าที่ทำการปรับแต่งแล้วแสดงการตอบรับทางเคมีไฟฟ้าในช่วงพีเอช 4 ถึง 10 แสดงการตอบรับทั้งปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ค่าความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงระหว่าง 2.3×10^{-3} ถึง 8.1×10^{-7} โมลาร์ และขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 6.6×10^{-8} โมลาร์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เซ็นเซอร์แสดงความเสถียรและต่อต้านการแทรกแซงออกซิเจนและการออกซิไดซ์สารประกอบอื่นๆ ที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าค่า 0.02 โวลต์ [23]

Rasa Garjonyte และ Albertas Malinauskas ทำการเคลือบขั้วไฟฟ้าคาร์บอนด้วย เหล็ก คิวปริก คิวปรัส โคบอลต์ และ นิกเกิล เฮกซะไซยาโนเฟอเรต (Nickel hexacyanoferrates) โดยเตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสารละลายผสมของ เหล็ก คิวปริก คิวปรัส โคบอลต์และนิกเกิลเฮกซะไซยาโนเฟอร์สและนำไปตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าตรวจวัดได้ดีเมื่อสารละลายมีพีเอช 3.05 ถึง 7.3 การตอบสนองต่อกระแส แคนโทดิกคือ 0.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ เมื่อเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าคาร์บอนที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงพบว่าความว่องไวในการตรวจวัดไฮโดรเจนดีขึ้นเมื่อทำการปรับปรุง และการตอบสนองต่อกระแสแคนโทดิกดีขึ้น [24]

Li Li, Jing Ge และคณะ ในงานวิจัยนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการไฮโดรเมทัลลurgical (Hydrometallurgical) ที่ถูกนำมาใช้ในการกลับคืนของลิเทียมและโคบอลต์จากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (LIBs) กรดซัลฟูริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะนำมาละลายรีเอเจนต์และชะล้างโคบอลต์และลิเทียมกับสารละลายที่มี $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้ในการกลับคืนที่มีประสิทธิภาพของลิเทียมและโคบอลต์ ขั้นตอนการแยกของโลหะที่มีอนุภาคและกระบวนการการชะล้างเคมีได้การกลับคืนมาของโคบอลต์ 90 เปอร์เซ็นต์ ลิเทียม 100 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการไฮโดรเมทัลลurgical เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทำง่าย และเพียงพอต่อการฟื้นตัวของโลหะจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [25]

A. Malinauskas, R. Araminaite และคณะ ความสำเร็จของพราสเซียน บลู (Prussian blue) ในการตรวจวัดโดยโคร โนแอมเพอโรเมทรีสำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แสดงให้เห็นการยับยั้งความเร็วของการตรวจวัดที่พีเอช 7.3 ค่าเนินการทดลองที่ศักย์ไฟฟ้า 0.0 โวลต์กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ เริ่มอัตราขั้นแรกที่ 1.2×10^{-7} และ 2.8×10^{-9} ต่อนาที สำหรับ ตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.20 และ 0.74 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ แต่ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 5.5 จะยับยั้งการดำเนินงานขั้นที่สองให้ช้าลง โคบอลต์เฮกซะไซยาโนเฟอร์ส มีความเสถียรต่อปฏิกิริยาอิเล็กโทรคะตะไลติก (Electrocatalytic reduction) ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.74 มิลลิโมลาร์ ของการยับยั้งการดำเนินการขั้นแรกในช่วง 3.3×10^{-3} ต่อนาที ในสารละลาย พีเอช 7.3 ที่ 0.0 โวลต์ เป็นเวลา 8.5 วินาที ซึ่งช้ากว่าพราสเซียน บลู สำหรับความเสถียรทั้ง 2 ขั้วตรวจวัดจึงเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นไบโอเซนเซอร์ [26]

L.mentar, M.R. Khelladi และ A.Aziz ทำการเปรียบเทียบอิเล็กโทรดที่ทำการปรับปรุงด้วยโคบอลต์โดยใช้ขั้วสเตรทที่แตกต่างกันคือทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและซิลิกา โดยทำการพอกพูนทางไฟฟ้าจากสารละลายโคบอลต์ซัลเฟต ($CoSO_4 \cdot 7H_2O$), โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และกรดบอริก (H_3BO_3) เช่นเดียวกัน จากนั้นทำการตรวจสอบโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี พบว่าโคบอลต์

สามารถเคลือบเกาะบนขั้วไฟฟ้าที่นอกไซด์เจือฟลูออรีน ได้ดีกว่าซิลิกาและกราฟที่ได้จากการตรวจวัดไฮโดรเจน เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าที่นอกไซด์เจือฟลูออรีนจะได้กราฟที่ชัดเจนกว่าขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงจากซิลิกา [27]

D. Ramirez, D. Silva และคณะ ศึกษาการทำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide thin film) โดยทำการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเคมีจากสารละลายผสมระหว่างซิงค์คลอไรด์กับลิเทียมคลอไรด์ ใช้สารตั้งต้นของออกซิเจนที่แตกต่างกันคือ จวกไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และจากโมเลกุลของไฮโดรเจน พบว่าซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีการจัดเรียงโครงสร้างขนานกับแนวแกน (0 0 2) เมื่อใช้สารตั้งต้นเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่ามีสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวระหว่าง 5 ถึง 7 พลังงานในการเปลี่ยนชั้นพลังงานอยู่ระหว่าง 3.41 ± 0.03 อิเล็กตรอนโวลต์ [28]

L.mentar, M.R. Khelladi และ A.Aziz ทำการศึกษาและนำเสนอการก่อผลึกทางเคมีไฟฟ้าและการคุณลักษณะการเติบโตของผลึกของโคบอลต์ โดยศึกษาจากแผ่นฟิล์มบางของโคบอลต์ที่ได้มาจากการพอกพูนทางไฟฟ้าจากสารละลายโคบอลต์ซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต และกรดบอริกพีเอช 4 ลงบนขั้วไฟฟ้า ที่นำทินออกไซด์เจือฟลูออรีนมาเคลือบลงบนขั้วสเตรทที่เป็นแก้ว ทำการตรวจสอบโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลเทมเมทรี และการตรวจวัดทางคลอโรโนโครโมเมทรี โดยความหนาแน่นของผลึกโคบอลต์ที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ให้ [29]

Wei Li, Hyuck Jung, Ngyen Duc Hoa และคณะ ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าโดยการเคลือบพอลิเมอร์อะซิเตส (polymer-assisted) จากนาโนโคบอลต์ และ ซิงเกิลวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNT) ในขั้นตอนแรกจะนำซิลิกา มาทำการพอกพูนทางไฟฟ้ากับซิงเกิลวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ และนำไปทำการพอกพูนทางไฟฟ้ากับโคบอลต์ออกไซด์ โดยเตรียมจากสารละลายโคบอลต์ซัลเฟต และ พอลิเอททาไมด์ (PEI) ที่ละลายอยู่ในน้ำกลั่น นำไปทำอุลตราโซนิเคชัน (Ultrasonication) เพื่อแยกโคบอลต์ออกจากพอลิเอททาไมด์ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสารประกอบโลหะ-พอลิเมอร์ $xCo.(C_2H_5N)_n$ จากนั้นนำไป สปินโค้ทกับ ซิลิกาที่เคลือบด้วยซิงเกิลวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ และเผาเพื่อไล่พอลิเอททาไมด์จะได้ xCo_3O_4 นำขั้วไฟฟ้าอนุภาคนาโนโคบอลต์ออกไซด์/ซิงเกิลวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ไปตรวจวัดกับ NO_x เพื่อทดสอบการตอบสนองต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน และตรวจวัดไฮโดรเจนเพื่อทดสอบการตอบสนองต่อปฏิกิริยารีดักชัน พบว่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองดีขึ้นเมื่อเทียบกับคาร์บอนนาโนทิวบ์หรือโคบอลต์ออกไซด์ บริสุทธิ [30]

Chia-Yu Lin, Yi-Hsuan Lai และคณะ ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้ ซิงค์ออกไซด์จากนั้นนำไปทำการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesized) กับอนุภาคนาโนของเงิน (Silver nanoparticles) โดยจะอยู่ในรูปของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่เคลือบด้วยอนุภาคนาโนของเงินและซิงค์ออกไซด์ โดยเตรียมได้จากการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของอนุภาคนาโนของเงินบนทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ทำการพอกพูนด้วยไฟฟ้าด้วยอนุภาคของซิงค์ออกไซด์แล้ว เพื่อนำไปใช้ตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อนุภาคนาโนซิงค์ที่ปกคลุมบนทินออกไซด์เจือฟลูออรีนจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สามารถตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ดีขึ้น ขั้วไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงแล้วมีความไวเท่ากับ 152.1 มิลลิแอมต่อตารางเซนติเมตรต่อโมลาร์ ขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 0.9 ไมโครโมลาร์ [31]

Peng Wang, Shengqi Li, Jinqing Kan ขั้วตรวจวัดไฟฟ้าทางชีวภาพไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สร้างได้จากการเชื่อมโยงระหว่างฮอร์เซอร์ราดิส เพอร์ออกซิเดส (Horseradish peroxidase) และพอลิอะนิลีน โดยใช้กลูตารอลดีไฮด์เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยงบนขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยพอลิอะนิลีนสังเคราะห์ได้จากสารละลายออกแกนิก หนึ่ง-เอทิล-สาม-เมททาลินดาโซเลีย เอทิล ซัลเฟต (1-ethyl-3-methylimidazolium ethyl sulfate) และตอบสนองได้ไวที่พีเอชมากกว่า 6 การตอบสนองเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นถึง 20 มิลลิโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร กระแสตอบสนองสูงสุดคือ 1.189 ไมโครแอมแปร์ กระแสการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส พลังงานก่อกัมมันต์ (E_p) ของตัวเร่งปฏิกิริยา เพอร์ออกซิเดส (Horseradish peroxidase) เท่ากับ 39.1 กิโลจูลต่อโมล [32]

Kenneth I. Ozoemena, Zhixin Zhao และคณะทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนโดยใช้ ฟัททาโลไซยามิน-โคบอลต์ โพรพิธิน (Phthalocyanine-cobalt porphyrin) เพื่อใช้ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์พบว่าคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าและการเป็นตัวเร่งทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ การควบคุม ซึ่งเชื่อมโยงกับผลของฟัททาโลไซยามิน-โคบอลต์ โพรพิธิน ขั้วไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงแล้วมีขีดจำกัดในการตรวจวัดดีขึ้น (ระดับไมโครโมลาร์) และมีความเสถียรมากขึ้นถึง 8 สัปดาห์ [33]

Kuei-Sheng Tseng, Lin-Chi Chen, Kuo-Chuan Ho ในงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้พราสเซียนบลูเพื่อปรับปรุงขั้วไฟฟ้าสำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยทำการพอกพูนพราสเซียนบลูด้วยกัลวานอสแตติก (Galvanostatically) บนทินออกไซด์เจือฟลูออรีน เมื่อนำไปทำการตรวจวัดต้องพยายามควบคุมให้ศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ -0.2 โวลต์ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือ

ฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยพลาสมาเขียน บลูเช่อยู่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จีคจำกัดการตรวจวัดอยู่ระหว่าง 50.00 ไมโครโมลาร์ ถึง 50.00 โมลาร์ ความว่องไวในการตรวจวัดคือ 58.1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อโมลาร์ แต่จะพบการละลายของไฮโดรเจนซึ่งรบกวนการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จึงต้องทำการล้างด้วยไนโตรเจนก่อนนำไปตรวจวัด เพื่อให้ผลการตรวจวัดดีขึ้น [34]

P.S. Patil, L.D. Kadam และ C.D. Lokhande ทำการปรับปรุงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ด้วยฟิล์มของโคบอลต์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolyzed) โดยพ่นละอองของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์กับน้ำกลั่นลงบนทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่มีอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 นาที ชั้นฟิล์มที่ได้จะแสดงความเป็นแอนโอดิกอิเล็กโตรโครมิก (anodic electrochromism) โดยเปลี่ยนจะสีเทาเป็นสีเหลืองซีดโดยใช้เวลาในการเปลี่ยนสีประมาณ 2-4 วินาที ซึ่งไม่มีความสำคัญ เพราะจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) จะพบว่าโครงสร้างของชั้นฟิล์มไม่ได้เปลี่ยนไปแม้ว่าสีจะเปลี่ยนไปก็ตาม [35]

E.Gomez , A Labarta และคณะ องค์ประกอบที่หลากหลายของฟิล์มบางโคบอลต์กับคอปเปอร์ เห็นได้จากขั้วไฟฟ้าที่ทำการเคลือบทินออกไซด์เจืออินเดียมลงบนแผ่นแก้ว (ITO) โดยใช้เทคนิคการพอกพูนทางไฟฟ้าโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตและโคบอลต์ซัลเฟต ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของทั้งคอปเปอร์ไอออนและโคบอลต์ไอออนในสารละลายที่จะนำไปทำการพอกพูนทางไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจืออินเดียมจะต้องเพียงพอที่จะทำการพอกพูนทางไฟฟ้าได้โดยตรงและสามารถตรวจวัดความต้านทานแม่เหล็กได้โดยปราศจากแยกของชั้นฟิล์มพบว่าเปอร์เซ็นต์การเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโคบอลต์ ไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อให้กระแสไปทางลบมากขึ้น [36]

Ana P.Baioni, Marcio Vidotti และคณะ ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนด้วยอนุภาคนาโนของคอปเปอร์ เฮกซะไซยาโนเฟอเรต (Copper hexacyanoferrate) ซึ่งเตรียมได้จากเทคนิค โซโนเคมีคัล เรดิเอชัน (sonochemical irradiation) ของสารละลายของโพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ (Potassium ferricyanide) กับน้ำ และ สารละลายคอปเปอร์คลอไรด์ และใช้เทคนิคการพอกพูนทางไฟฟ้าแบบชั้นต่อชั้น (Electrostatic deposition layer-by-layer) และนำไปตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งแสดงให้เห็นความว่องไวในการตรวจวัดที่สูง [37]

Rasa Garjonyte, Albertas Malinauskas ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเฟลทด้วยโลหะ Hexacyanoferrates ซึ่งเตรียมจากสารละลายผสมระหว่าง เหล็ก คอปเปอร์ โคบอลต์ หรือ นิกเกิล ซัลเฟต เพื่อใช้ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงแล้วแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่ไวต่อกระแสแคโทดิกกับเปอร์ออกไซด์ แต่ความไวจะลดลงอย่างมากเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 3.05 ถึง 7.3 แต่ตอบสนองกับตัวออกซิไดซ์ได้ไม่ดีนัก [38]

Abdollah Salimi, Hussein Mamkhezri และคณะทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน โดยใช้อุณหภูมิโคบอลต์ออกไซด์ เพื่อใช้ในการตรวจวัดสารหนู โดยทำการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเคมีกับโคบอลต์คลอไรด์ให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.1 ถึง +1.2 โวลต์ ซึ่งมีการตอบสนองต่อสารพิษอนินทรีย์พีเอช 11 ถึง 5 ได้ดี เมื่อใช้เทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรีตรวจวัดสารหนูที่ศักย์ไฟฟ้า 0.75 โวลต์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ซึ่งมีขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 11.00 นาโนโมลาร์ ความไวเท่ากับ 11.30 นาโนแอมแปร์ต่อไมโครโมลาร์ และเวลาการตอบสนองคือขึ้น 95 เปอร์เซ็นต์ [39]

Abdollah Salimi, Rahman hallaj และ Saied Soltanian ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนด้วยอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์เพื่อใช้ในการตรวจวัดอีโมโกบิล โดยทำการพอกพูนทางด้วยไฟฟ้าเคมีจากสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 ใช้ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 0.5 ถึง -1.1 โวลต์ ซึ่งสามารถตอบสนองต่อแอมเพอโรเมทรีได้ต่ำกว่า 5 วินาที การตอบสนองต่อความเข้มข้นอยู่ในช่วงระหว่าง 5.00 ถึง 700.00 ไมโครโมลาร์ และมีขีดจำกัดในการตรวจวัดต่ำถึง 0.50 ไมโครโมลาร์ [40]

Li Tian, Jiangyu Bian และคณะศึกษาสารที่เกิดปฏิกิริยากับไฟฟ้าเคมี (electroactive material) จากการคำนวณกรดแอสคอร์บิก สามารถปรับปรุงได้สำเร็จโดยวิธีเพตติง/โพเทนเชียลไซคลิก (plating/potential cycling) โดยทำการศึกษาจากฟิล์มของโคบอลต์ที่ได้จากการพอกพูนสารละลายโคบอลต์ซัลเฟตลงบนขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนโดยโพเทนเชียลไซคลิกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.10 โมลาร์ เพื่อใช้ในการตรวจวัดกรดแอสคอร์บิก โดยทำการพอกพูนทางไฟฟ้ากับสารละลายโคบอลต์ฟอสเฟต โดยฟิล์มบนขั้วไฟฟ้าที่การปรับปรุงแล้วแสดงความเป็นตัวเร่งทางไฟฟ้าที่ดีกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดแอสคอร์บิก และตอบสนองได้เร็วใช้เวลาน้อยกว่า 3 วินาที และมีความสัมพันธ์ทางเส้นตรงที่ดีซึ่งจะเห็นได้จากอัตราความเข้มข้นของ 3.00×10^{-4} ไมโครโมลาร์ ขีดจำกัดในการตอบสนองเท่ากับ 0.2 ไมโครโมลาร์ภายใต้สภาวะที่ดีที่สุด [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abdollah Salimi, Rahman Hallaj และคณะศึกษาการตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอนที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนของโอบอลด์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ทำการตรวจสอบโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลเทมเมทรี ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.1 ถึง 1.1 โวลต์ สารละลายโอบอลด์คลอไรด์จะเป็นตัวกำหนดอนุภาคนาโนของโอบอลด์ออกไซด์ที่ถูกพอกพูนลงบนพื้นผิวของกลาสติคาร์บอน ศึกษาคุณลักษณะของพื้นผิวขั้วโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบชั้นฟิล์มของโอบอลด์ออกไซด์จากเทคนิคไซคลิกโวลเทมเมทรีในสารละลายเบสและสารละลายในน้ำ พบว่าขั้วที่ทำการปรับปรุงแล้วมีความสามารถในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดีขึ้น การตอบสนองต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลเทมเมทรีและ โครโนแอมเพอโรเมทรี การตรวจวัดทางโครโนแอมเพอโรเมทรีใช้ที่ 0.75 โวลต์ เปรียบเทียบกับขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ที่ใช้เป็นขั้วอ้างอิงในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7.4 ขีดจำกัดการตรวจวัดคือ 0.4 นาโนโมลาร์กับเส้นตรงที่ขึ้นไป 6 ชั้นที่สำคัญ ความไวเท่ากับ 4.86 ไมโครแอมแปร์ต่อไมโครต่อตารางเซนติเมตร เวลาการตอบสนองดีขึ้น 95% ที่กระแสสถานะมาตรฐานคือน้อยกว่า 2 วินาที อายุการใช้งานประมาณ 20 วัน แต่ขั้วที่ทำการปรับปรุงจะมีคุณสมบัติบางประการที่แย่งลง เช่น ความเสถียรของสัญญาณการตอบสนองต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเป็นต้น อย่างไรก็ตามการพัฒนาพื้นผิวขั้วไฟฟ้า กลาสติคาร์บอนโดยใช้การพอกพูนอนุภาคนาโนโอบอลด์ออกไซด์ ทำให้มีประสิทธิภาพการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ดีขึ้น [42]

L.D. Kadam, S.H. Pawar, P.S. Patil ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าที่ใช้หินออกไซด์เจือฟลูออรีนเคลือบลงไปบนขั้วสเตรทที่เป็นแก้ว ด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้สารละลายโอบอลด์คลอไรด์ ตรวจสอบคุณลักษณะได้จากเทคนิคไซคลิกโวลเทมเมทรี โครโนแอมเพอโรเมทรี และ สเปกโทรโฟโตเมทรี ชั้นฟิล์มแสดงให้เห็นถึงอิเล็กโตรโครมิก แอนโอดิก โดยเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีเหลือง ให้สีในช่วงความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร เวลาการตอบสนองในการเกิดสีประมาณ 3 วินาที และจางหายภายใน 2.55 วินาทีได้ความหนาของชั้นฟิล์มประมาณ 0.7 ไมโครเมตร [43]

Lokhande V.R. Shinde, S.B. Mahadik, T.P. Gujar, C.D ศึกษารูปแบบและการยึดติดของฟิล์มบางโอบอลด์ออกไซด์ที่ถูกพอกพูนลงไปบนขั้วสเตรทที่เป็นแก้ว โดยใช้เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสจากสารละลายโอบอลด์คลอไรด์ ตรวจสอบโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟร็กโทเมทรี กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การดูดซับ และวัดความต้านทานทางไฟฟ้า ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานของโอบอลด์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติความเป็นตัวเก็บประจุทางไฟฟ้าเคมีทำการศึกษาในสารละลายเกลือหนูน โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟเฟรคชันพบว่า โครงสร้างของโคบอลต์คลอไรด์เป็นแบบคิวบิกจากการศึกษาคุณลักษณะทางพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบผลึกของอนุภาคนาโนโคบอลต์คลอไรด์กระจายอยู่ทั่ว จากการศึกษาทั้งทางตรงและทางอ้อมของช่องว่างระหว่างแถบ (band gap) ของ 2.10 และ 1.60 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการตรวจวัดความต้านทานทางไฟฟ้าพบว่าโคบอลต์คลอไรด์มีพฤติกรรมเป็นสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง ค่าความต้านทานเท่ากับ 1.5×10^3 โอห์มเซนติเมตร [44]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้

1. ไดโทแทสเซียม ไฮโดรเจนฟอสเฟต; $K_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ 98% (w/w) (บริษัท Carlo Erba Reagents)
2. ไดไฮโดรเจน โปแทสเซียมฟอสเฟต; $KH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ 99% (w/w) (บริษัท Carlo Erba Reagents)
3. ก๊าซไนโตรเจน; N_2 99.999% (v/v) (TIG, Thailand)
4. โปแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต; $K_3[Fe(CN)_6]$ (บริษัท MBRCK)
5. โปแทสเซียมคลอไรด์; KCl Analytical reagent (บริษัท UNIVAR)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์; NaOH 98% (w/w) A.R. grade (บริษัท RANKEM)
7. กรดไฮโดรคลอริก; HCL 36.5% (v/v) (บริษัท Carlo Erba Reagents)
8. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์; H_2O_2 >30% (w/v) (บริษัท Fisher Scientific)
9. โคบอลต์คลอไรด์; $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 99% (w/w) (บริษัท J.T. Baker Inc.)
10. เอทิลแอลกอฮอล์; C_2H_5OH 99.8% (v/v) (บริษัท Carlo Erba Reagents)

3.1.2 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

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

3.1.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน
2. ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน
3. เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า (Autolab Potentiostat) รุ่น

PGSTAT20 ของบริษัท Ecochemie

4. เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic bath) รุ่น Tramsonic 570/H ของบริษัท ELMA
5. ตู้อบสารเคมี
6. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analysis balance): PRECISA Models 404 MSCS
7. เครื่องทำน้ำปราศไออน รุ่น Milli-Q (Milford, MA, USA)
8. เครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมแท่งกวน รุ่น 728 Stirrer (Metrohm)
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)
10. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)
11. เครื่องวัดพีเอช Metrohm รุ่น 716 DMS Titrino ของบริษัท Ecochemie ประเทศไทย
12. ไมโครปิเปต (Micropipette) ของบริษัท Vipro

3.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายบัฟเฟอร์ที่เตรียมขึ้นใช้น้ำปราศจากไออน (Deionized water) ที่ผลิตจากเครื่อง Milli-Q (Milford, MA, USA) ในการเตรียมสารละลาย

3.2.1 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.10 โมลาร์ ด้วยน้ำปราศจากไออน เพื่อศึกษาหาอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโอบอลด์ออกไซด์ [ภาคผนวก ข.3]

เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.10 โมลาร์ พีเอช 5.8 ถึง 8.0 เพื่อใช้ศึกษาหา พีเอชที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโอบอลด์ออกไซด์ [ภาคผนวก ข.4]

3.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

เตรียมแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC Rigid sheet) โดยตัดให้มีขนาดตามต้องการของเฟรมสกรีน ทำความสะอาดแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์จากนั้นล้างด้วยเอทานอล ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำแผ่นพอลิไวนิลคลอไรด์มาทำการสกรีนชั้นต่างๆ ตามลำดับ ดังนี้

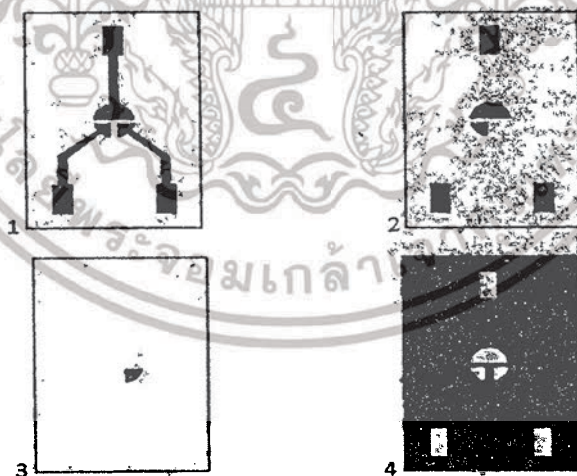
1. ทำการสกรีนลายขั้วนำไฟฟ้า (Conducting track) ด้วยหมึกซิลเวอร์ (Silver Ink) นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายในหมึกซิลเวอร์ (Silver Ink)

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

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

4. ทำการสกรีนลายฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ด้วยสีน้ำมัน นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายที่ในสีน้ำมัน

หมายเหตุ: ก่อนใช้งานทำการคัดเลือกขั้วไฟฟ้า โดยการเช็คลายวงจรด้วยมัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.1 ลายสกรีนชั้นต่างๆ ตามลำดับ

1. ลายของเส้นวงจรสกรีนด้วยหมึกเงิน
2. ชั้นของหมึกคาร์บอน
3. ชั้นของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงสกรีนด้วยหมึกซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
4. ชั้นของฉนวนไฟฟ้าสกรีนด้วยสีน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเตรียมโคบอลต์ออกไซด์ด้วยวิธีการพอกพูนทางไฟฟ้า (Electro deposition) บน ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน (Fluorine tin oxide)

1. นำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน นำไปแช่ในสารละลายเอทานอลและน้ำปราศจากไอออนในอัตรา 1:1 โดยปริมาตร ในเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 5 นาทีและทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเพื่อกำจัดอนุภาคต่างๆ ที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าขั้ว

2. นำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนจากข้อ 1 มากำหนดขนาดในการพอกพูนทางไฟฟ้า โดยกำหนดพื้นที่หน้าขั้วขนาดกว้าง 5.00 มิลลิเมตร ยาว 5.00 มิลลิเมตร

3. นำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนไปพอกพูนทางไฟฟ้า ด้วยโคบอลต์คลอไรด์ โดยใช้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ในโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์ [ภาคผนวก ก.2] ทำการให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง -1.1 ถึง +1.1 โวลต์ เป็นจำนวน 20 รอบ โดยใช้อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

4. นำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ผ่านการปรับปรุงมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

5. หลังจากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จะได้ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่เคลือบด้วยโคบอลต์ออกไซด์

หมายเหตุ : ในระหว่างการทดลองพ่นแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาทีเพื่อไล่ออกซิเจนออก พ่นอย่างต่อเนื่องเหนือสารละลาย และการทดลองกระทำที่อุณหภูมิห้อง

3.5 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่เหมาะสมในการพอกพูนทางไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน

การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์ที่เหมาะสมในการพอกพูนทางไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน จะศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าและลักษณะฟิสิกที่เกิดขึ้น โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.1 ถึง +1.1 โวลต์ สภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสภาวะที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์

ความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)	ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (โมลาร์)	ปริมาณสารละลาย (มิลลิลิตร)	อัตราการสแกน (มิลลิโวลต์ต่อวินาที)
0.10	0.10	5.00	50
0.50	0.10	5.00	50
1.00	0.10	5.00	50
10.00	0.10	5.00	50

3.6 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์

3.6.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

นำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ มาศึกษารูปร่างลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อเปรียบเทียบขนาดและรูปร่างของผลึกที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์

3.6.2 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)

นำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ มาศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของผลึกบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์

3.7 ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์

การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี จะศึกษาโดยการเปรียบเทียบปริมาณการกระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จากขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ สารละลายที่ใช้คือ โปแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 10.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.00 โมลาร์ [ภาคผนวก ก.7] ปริมาณ 5.00 มิลลิลิตร โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

3.8 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่างๆ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ซึ่งจะศึกษาสถานะต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.8.1 ศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาสารอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าและลักษณะของพีคที่เกิดขึ้น โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ สถานะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม

สารละลาย อิเล็กโทรไลต์	ความ เข้มข้น (โมลาร์)	ปริมาณ สารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ (มิลลิโมลาร์)	อัตราการสแกน (มิลลิโวลต์ต่อ วินาที)
กรดไฮโดรคลอริก	0.10	5.00	1.00	50
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.10	5.00	1.00	50
โพแทสเซียมคลอไรด์	0.10	5.00	1.00	50
ฟอสเฟตบัฟเฟอร์	0.10	5.00	1.00	50

หมายเหตุ: การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ [ภาคผนวก ก.8]

3.8.2 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะศึกษาโดยการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่ค่าพีเอชต่างๆ [ภาคผนวก ข.3] โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ สภาวะในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสม

พีเอช	ความเข้มข้นของ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (โมลาร์)	ความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลาร์)	ปริมาณ สารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร)	อัตราการสแกน (มิลลิโวลต์ต่อ วินาที)
5.8	0.10	1.00	5.00	50
6.0	0.10	1.00	5.00	50
6.2	0.10	1.00	5.00	50
6.5	0.10	1.00	5.00	50
6.7	0.10	1.00	5.00	50
7.0	0.10	1.00	5.00	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) แสดงสภาวะที่ใช้ในการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ที่เหมาะสม

พีเอช	ความเข้มข้นของฟอสเฟตบัพเฟอร์ (โมลาร์)	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลาร์)	ปริมาณสารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร)	อัตราการสแกน (มิลลิโวลต์ต่อวินาที)
7.2	0.10	1.00	5.00	50
7.4	0.10	1.00	5.00	50
7.6	0.10	1.00	5.00	50
7.8	0.10	1.00	5.00	50
8.0	0.10	1.00	5.00	50

3.8.3 ศึกษาอัตราการสแกนที่เหมาะสม

การศึกษาอัตราการสแกนที่เหมาะสมจะศึกษา โดยการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าอัตราการสแกนที่ให้แก่วัดไฟฟ้าทำงาน โดยใช้ช่วงศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ สภาวะในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงสภาวะที่ใช้ในการศึกษาหาอัตราการสแกนที่เหมาะสม

อัตราการสแกน	ความเข้มข้นของฟอสเฟตบัพเฟอร์ (โมลาร์)	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลาร์)	ปริมาณสารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร)
10	0.10	1.00	5.00
20	0.10	1.00	5.00
30	0.10	1.00	5.00
40	0.10	1.00	5.00
50	0.10	1.00	5.00
60	0.10	1.00	5.00
70	0.10	1.00	5.00
80	0.10	1.00	5.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาหาอัตราสแกนที่เหมาะสม

อัตราสแกน	ความเข้มข้นของ ฟอสเฟตบัพเฟอร์ (โมลาร์)	ความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิโมลาร์)	ปริมาณสารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร)
90	0.10	1.00	5.00
100	0.10	1.00	5.00
200	0.10	1.00	5.00
300	0.10	1.00	5.00
400	0.10	1.00	5.00
500	0.10	1.00	5.00
600	0.10	1.00	5.00
700	0.10	1.00	5.00
800	0.10	1.00	5.00
900	0.10	1.00	5.00

3.9 ศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง โดยใช้เทคนิคโคร โนแอมเพอโรเมทรี ศึกษาโดยการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ตรวจวัดได้จากขั้ว 2 ชนิด คือ ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยคงปริมาตรสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ที่เอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ที่ 5.00 มิลลิลิตร และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มเข้าระบบที่ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบระหว่างการตรวจวัดในช่วงเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบขณะทำการตรวจวัดในช่วงเวลาต่างๆ

เวลา (วินาที)	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ เพิ่มเข้าระบบ (ไมโครลิตร)	ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ในระบบ (ไมโครโมลาร์)
50	10	20
100	10	40
150	10	60
200	10	80
250	10	100
300	10	120
350	10	140
400	10	160
450	10	180
500	10	200
550	10	220

3.10 ศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์

การศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Limit of detection) จะเป็นการศึกษาปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาตรฐานที่น้อยที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยอาศัยกราฟมาตรฐานในการทดลองที่ 3.9 โดยเปรียบเทียบขีดจำกัดของการวิเคราะห์ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน และขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโอบอลด์ออกไซด์

3.11 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากตัวอย่าง น้ำยาล้างแผลตามร่างกาย ตราเมกนุพญานาคคู่ ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 % w/v และน้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปาก ตราเสือดาว ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 % w/v ไปตรวจวัดด้วยเทคนิคโครโมแอมเพอโรเมทรี ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโอบอลต์ออกไซด์ในการตรวจวัด คงที่ ศักย์ไฟฟ้าไว้เท่ากับ 0.760 โวลต์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ โดยปีเปิดสารละลายตัวอย่างลงไป 10.00 ไมโครลิตร ที่มีการปั่นกวสารละลายตลอดทำการ ทดลอง จากนั้นเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 20 ถึง 200 ไมโครโมลาร์ลงไป ในตัวอย่างเดียวกัน จากนั้นทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าแล้วนำมาพลอตกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมเข้าไปกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ เพื่อจะไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารตัวอย่าง

3.12 การวิเคราะห์ค่าร้อยละของการคืนกลับ

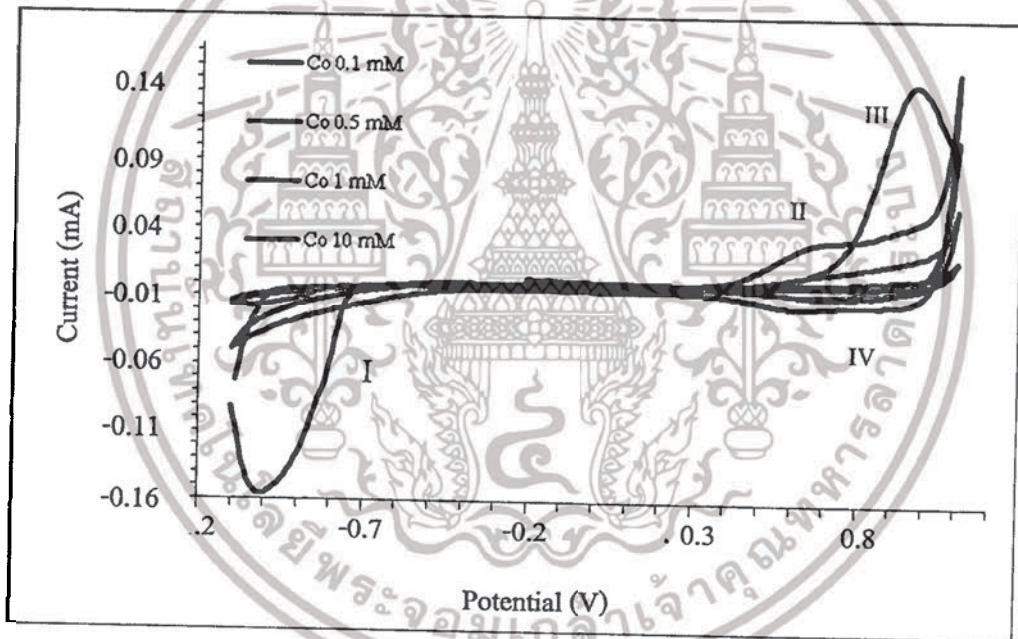
การคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ของการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายตัวอย่างโดยใช้เทคนิคแอมเพอโรเมทรี ซึ่งนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จากสารละลายตัวอย่างจากการทดลองที่ 3.11 มาคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

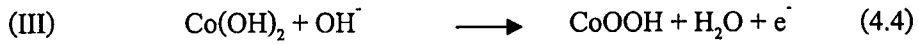
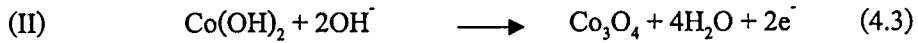
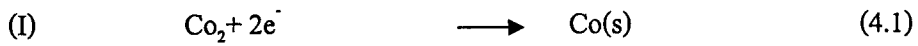
4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการพอกพูนทางไฟฟ้าบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน

ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์โดยใช้เทคนิคการพอกพูนทางไฟฟ้าบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ได้ทำการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ความเข้มข้น 0.10, 0.50, 1.00 และ 10.00 มิลลิโมลาร์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.1 ถึง +1.1 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1

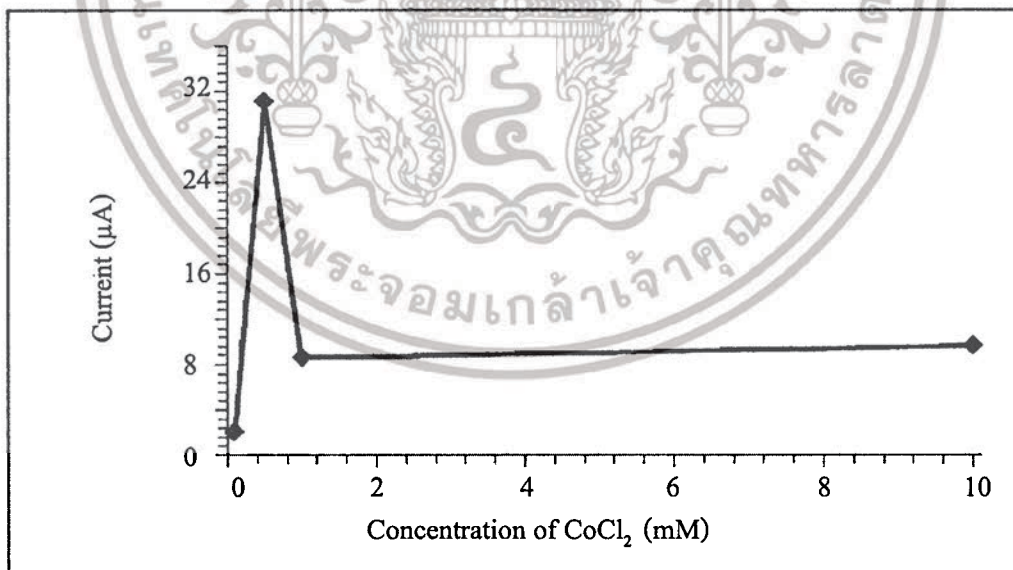


รูปที่ 4.1 ไซคลิกโวลแทมเมโทแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนในสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่มีความเข้มข้นในช่วง 0.10 ถึง 10.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.1 ถึง +1.1 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยความเข้มข้นโคบอลต์คลอไรด์ 0.1 มิลลิโมลาร์ (เส้นสีน้ำเงิน), 0.5 มิลลิโมลาร์ (เส้นสีแดง), 1 มิลลิโมลาร์ (เส้นสีเขียว) และ 10 มิลลิโมลาร์ (เส้นสีม่วง)

จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมรูปที่ 4.1 จะปรากฏพีค 4 พีคด้วยกัน โดยแต่ละพีคเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



โดยสามารถยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ [ภาคผนวก ค.] จากปฏิกิริยาที่ 4.3 เป็นปฏิกิริยาการเกิดโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) บนผิวหน้าขั้วจึงเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการพอกพูนทางไฟฟ้า จึงพลอตค่าปริมาณกระแสที่ตำแหน่งเกิดพีค 2 หรือที่ศักย์ไฟฟ้า 0.662 โวลต์ กับ ความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่ทำให้เกิดโคบอลต์ออกไซด์บนผิวหน้าขั้วมากที่สุด



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.662 โวลต์ ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน

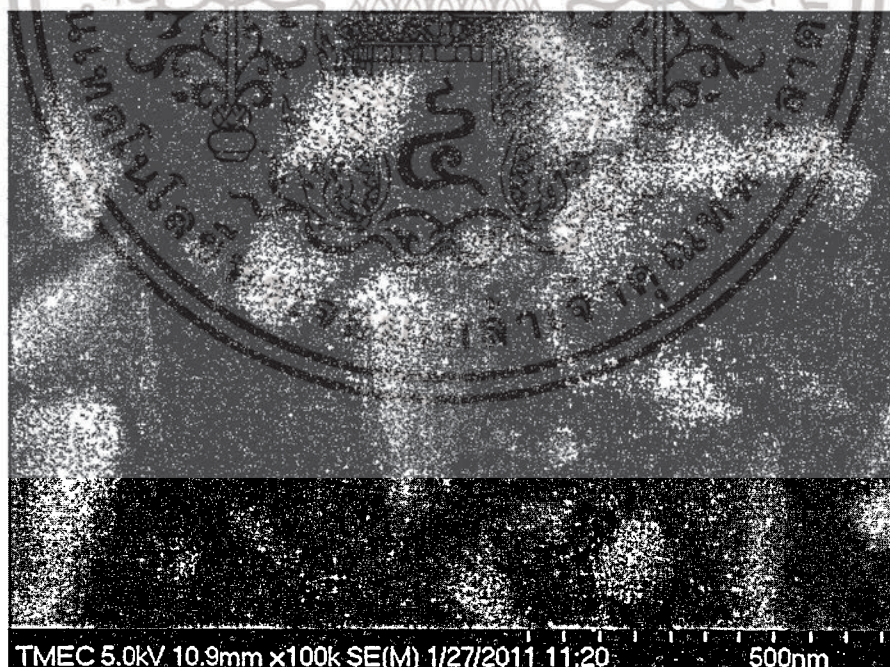
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ กับปริมาณกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 4.2 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 0.50 มิลลิโมลาร์ จะเห็นพีคกระแสของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้า 0.662 โวลต์ ชัดเจนที่สุด

ในการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ในการพอกพูนทางไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน คือ 0.50 มิลลิโมลาร์ ไซคลิกโวลแทมโมแกรมในการพอกพูนทางไฟฟ้าแสดงใน [ภาคผนวก ง.]

4.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ

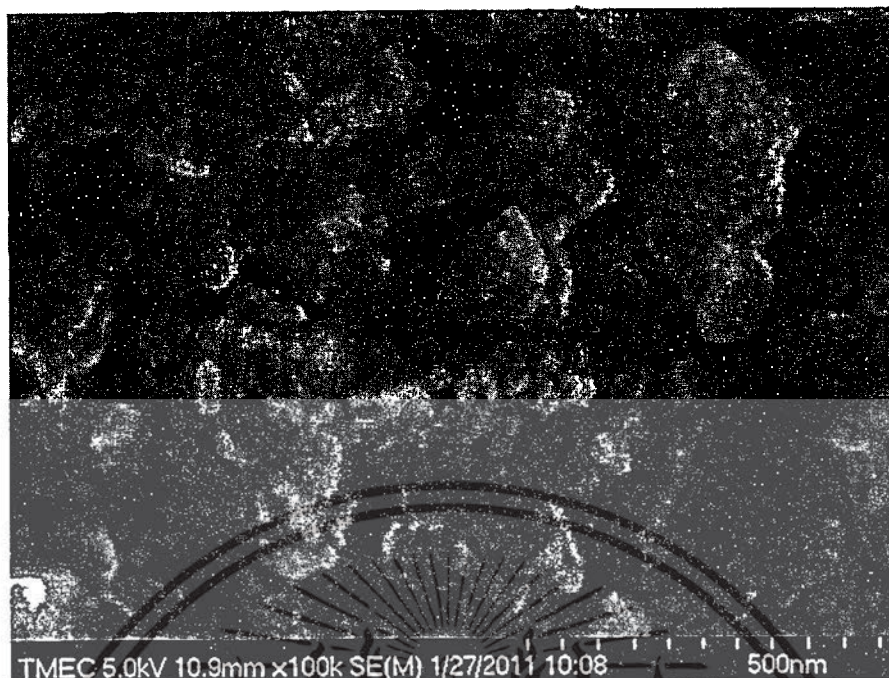
4.2.1 ผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์จากสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ในโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ จะพบลักษณะทางกายภาพบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า ดังรูป 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100,000 เท่าของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100,000 เท่า ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์

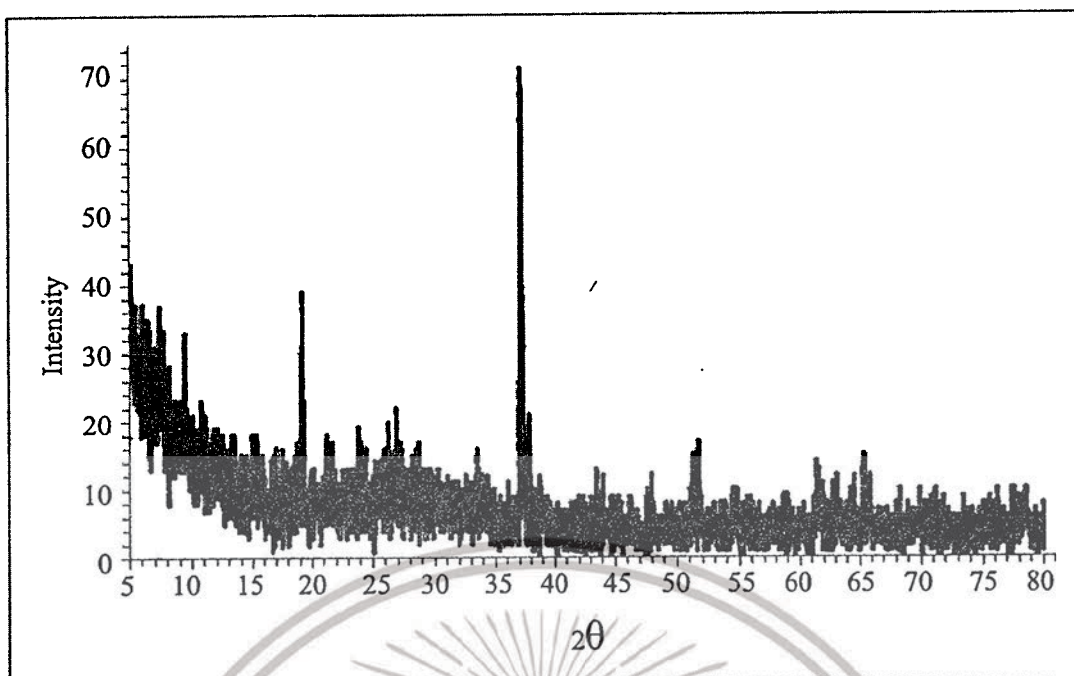
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 และ 4.4 เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนก่อนและหลังทำการปรับปรุงด้วยสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ พบว่าก่อนทำการพอกพูนทางไฟฟ้าด้วยสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ จะปรากฏแต่ผลึกของทินออกไซด์เจือฟลูออรีน แต่หลังจากทำการพอกพูนทางไฟฟ้ากับสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ จะมีอนุภาคมาเกาะอยู่บนพื้นผิวของผลึกทินออกไซด์เจือฟลูออรีน

การทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า การพอกพูนทางไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนด้วยสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ความเข้มข้น 0.05 มิลลิโมลาร์ สามารถทำการปรับปรุงได้จริง

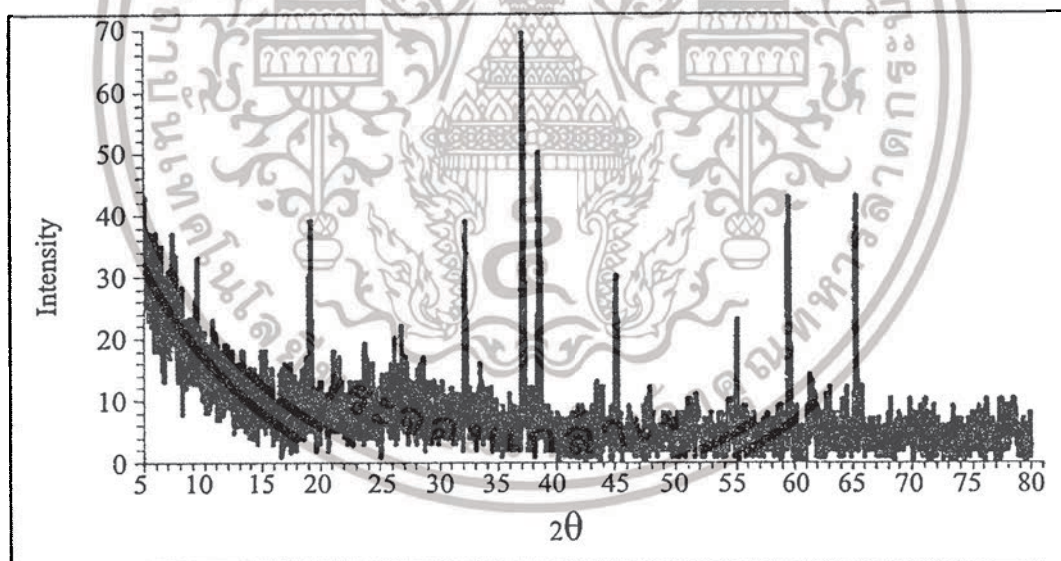
4.2.2 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์

ผลจากศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์จากสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ จะพบลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า ดังรูป 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของซั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน



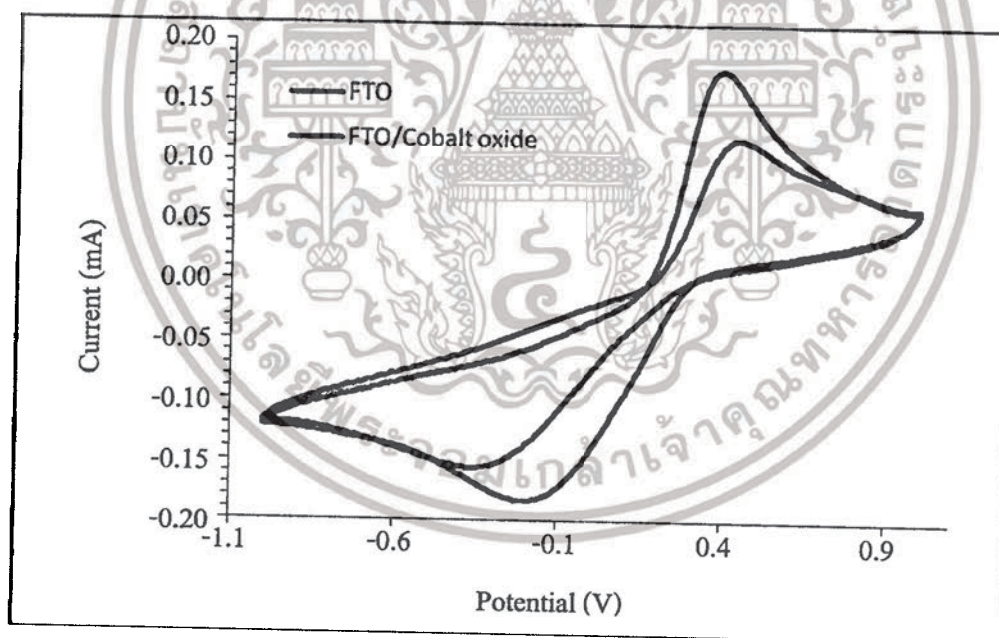
รูปที่ 4.6 กราฟจากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ของซั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพอกพูนทางไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนด้วยสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ความเข้มข้น 0.50 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์จะปรากฏอนุภาคที่เกาะบนผลึกทินออกไซด์เจือฟลูออรีน จากรูปที่ 4.6 สามารถยืนยันจากรูปได้ว่าอนุภาคที่มาเกาะบนผลึกทินออกไซด์เจือฟลูออรีน คือโคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4)

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคโคบอลต์ออกไซด์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนเทียบกับขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยนำไปตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ไชคลิกโวลแทมโมแกรม ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนเทียบ (เส้นสีน้ำเงิน) กับ ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับแต่งด้วยโคบอลต์ออกไซด์ (เส้นสีแดง) เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

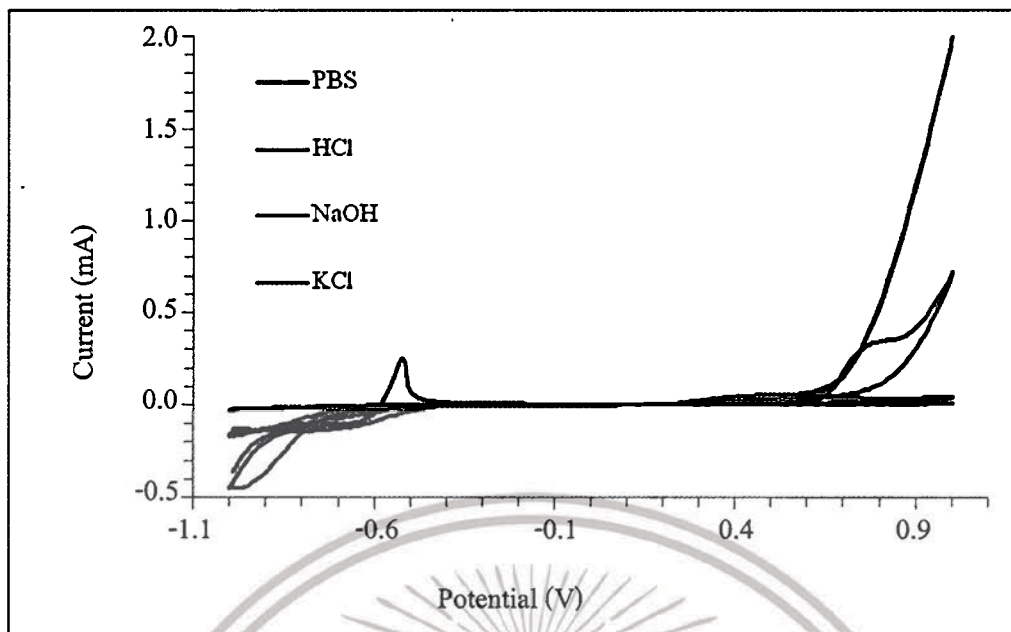
ลาร์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสที่ได้จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมจากรูป 4.7 พบว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ให้กระแสที่สูงกว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ในการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าโคบอลต์ออกไซด์สามารถช่วยปรับปรุงสภาพการนำกระแสของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้ ซึ่งเป็นผลมาจากโคบอลต์ออกไซด์มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี อีกทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสบริเวณหน้าขั้วไฟฟ้าจึงทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดได้ดีขึ้นและสามารถให้กระแสไฟฟ้าปริมาณค่าสูงขึ้น

4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.4.1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม

ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ได้แก่ สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์, สารละลายไฮโดรคลอริก 0.10 โมลาร์, สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.10 โมลาร์ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จะได้ไซคลิกโวลแทมโมแกรมแสดงดังรูป 4.8



รูปที่ 4.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ ได้แก่

สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (เส้นสีฟ้า)

สารละลายไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ (เส้นสีแดง)

สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ (เส้นสีม่วง)

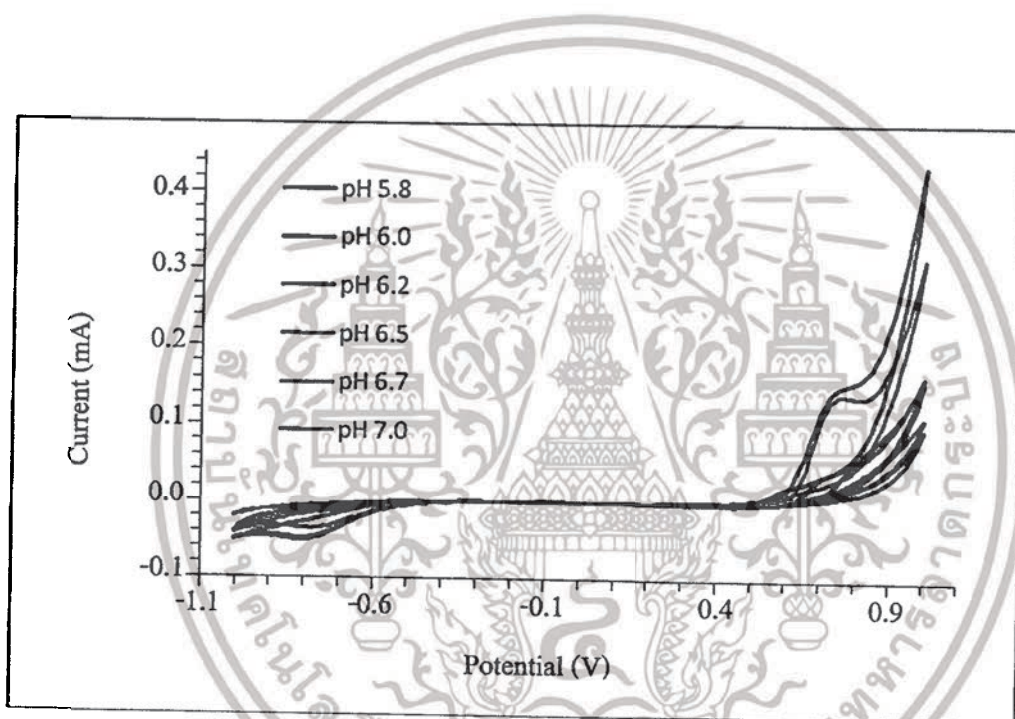
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ (เส้นสีเขียว)

ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

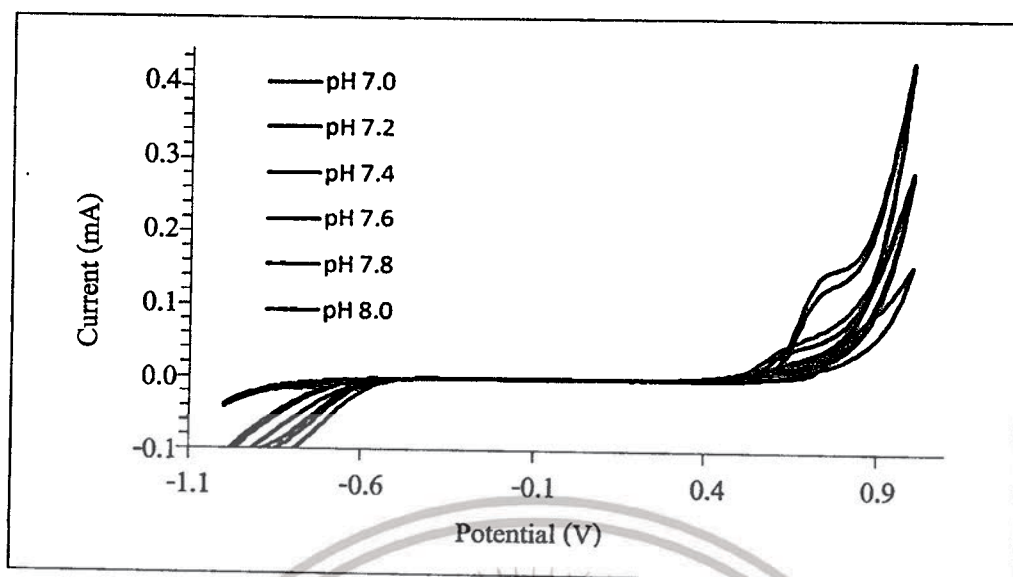
เมื่อพิจารณาจากรูป 4.8 พบว่าไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เมื่อใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเห็นพีคออกซิเดชันได้ชัดเจนที่สุด ในการทดลองนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

4.4.2 พีเอชที่เหมาะสม

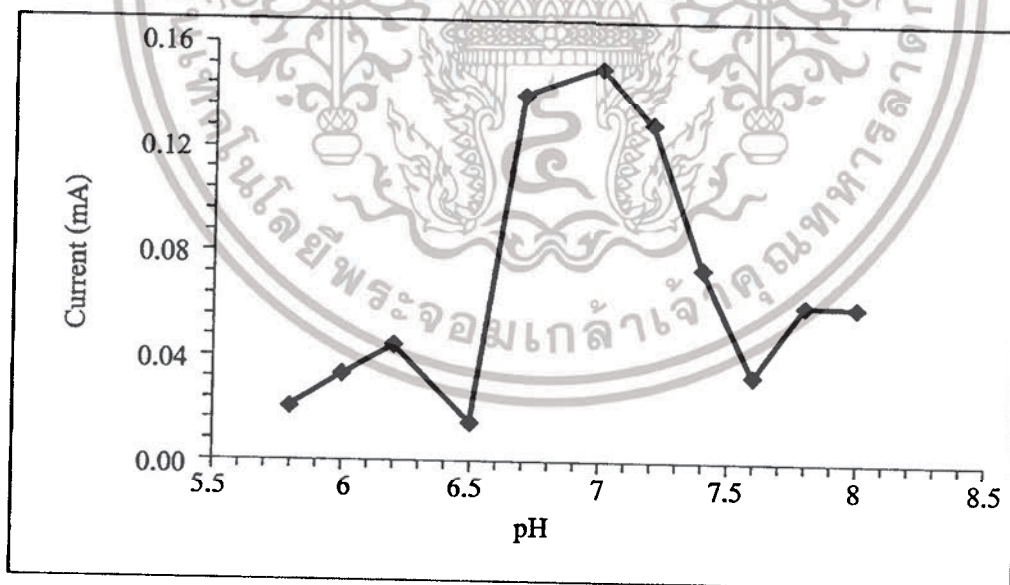
ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 5.8, 6.0, 6.2, 6.5, 6.7, 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 และ 8.0 ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมดังรูป 4.9 และ รูป 4.10 เมื่อนำค่ากระแสมาพลอตกับค่าพีเอชจะ ได้ผลดังรูป 4.11



รูปที่ 4.9 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 5.8, 6.0, 6.2, 6.5, 6.7 และ 7.0 ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที



รูปที่ 4.10 ไซคลิก โวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 และ 8.0 ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที



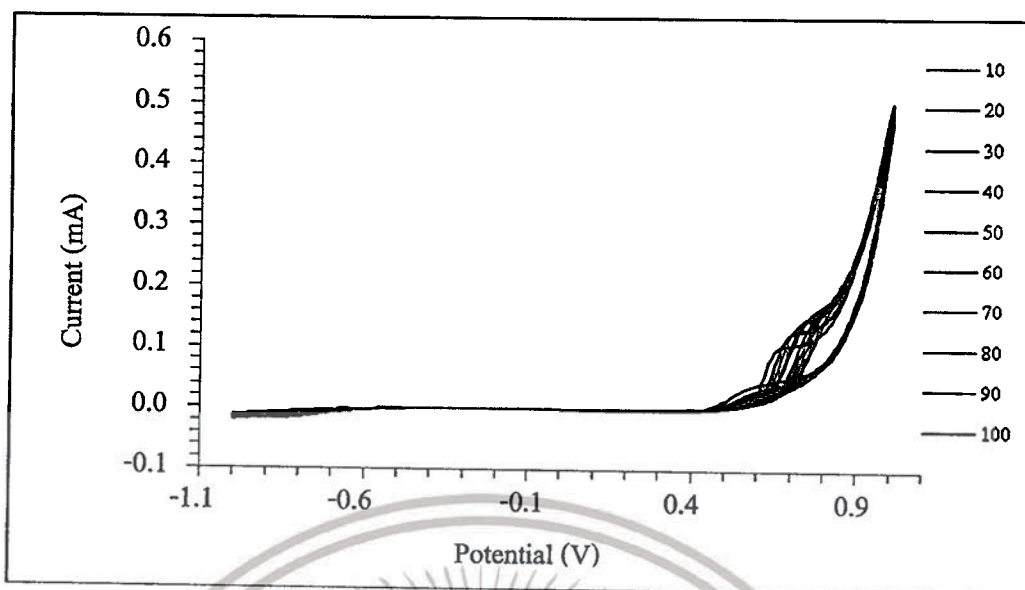
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับค่าพีเอช 5.8, 6.0, 6.2, 6.5, 6.7, 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 และ 8.0 ของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ซึ่งใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

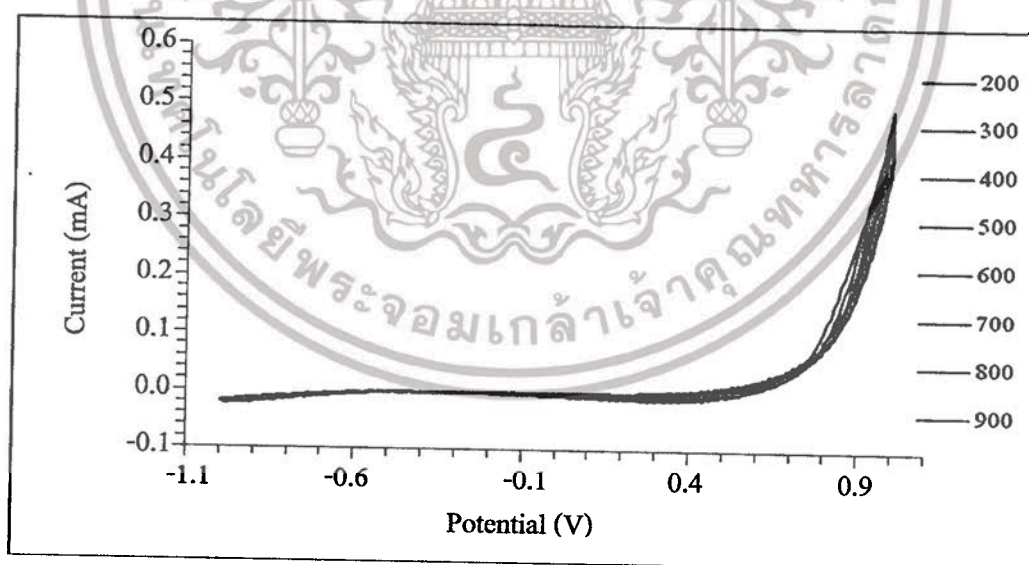
เมื่อพิจารณาจากรูป 4.11 เมื่อใช้พีเอชต่างๆค่ากระแสที่ได้ก็จะมีค่าแตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ให้ค่ากระแสที่สูงที่สุด ในการทดลองจึงสรุปได้ว่าพีเอชของสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าเท่ากับ พีเอช 7

4.4.3 อัตราการสแกนที่เหมาะสม

ผลการศึกษาอัตราการสแกนที่เหมาะสมของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จากรูป 4.12 และ 4.13 จะพบว่าค่าพีคกระแสออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการสแกนเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราการสแกนเพิ่มขึ้นจนถึง 80 มิลลิโวลต์ต่อวินาทีความชัดเจนของพีคกระแสออกซิเดชันก็จะลดลง จนกระทั่งอัตราการสแกนเพิ่มขึ้นจนถึง 200 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จะไม่สามารถมองเห็นพีคกระแสออกซิเดชันได้



รูปที่ 4.12 โชนิกวัตแอมโกรมของการตรวจวัดไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที



รูปที่ 4.13 โชนิกวัตแอมโกรมของการตรวจวัดไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 มิลลิโมลลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตพีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ สแกนศักย์ไฟฟ้า

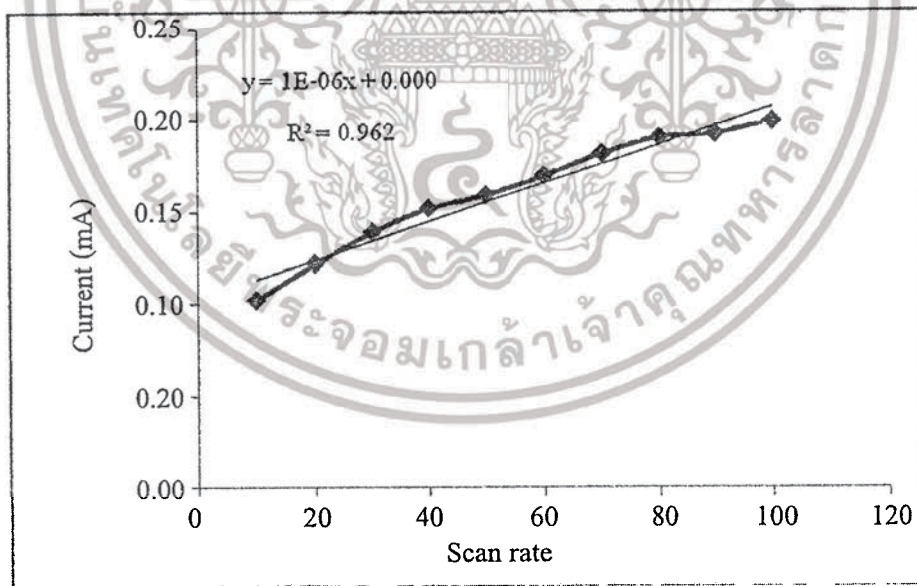
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง -1.0 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เมื่อนำค่าอัตราการสแกนที่ให้แกขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ มาพลอตกับค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมดังแสดงในรูป 4.14 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการสแกนในลักษณะเป็นเส้นโค้งแสดง และเมื่อพลอตค่ากระแสไฟฟ้ากับค่ารากที่สองของอัตราการสแกนดังแสดงในรูป 4.15 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการสแกนในลักษณะเป็นเส้นตรงโดยมีค่า R² เท่ากับ 0.9950 ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตรึงอยู่บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าพบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้กระแสที่เกิดจากกระบวนการ diffusion control โดยเห็นได้จากสมการ [45]

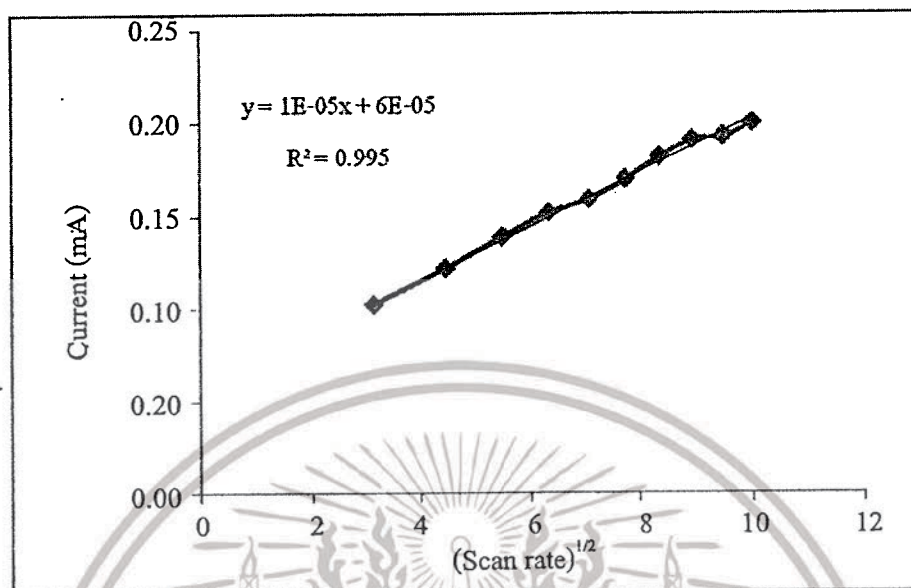
$$i_p = 2.99 \times 10^5 n(\alpha n_e)^{1/2} A C D^{1/2} V^{1/2} \tag{4.8}$$

ในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ สามารถใช้ค่าอัตราการสแกนในช่วง 10 ถึง 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เพราะทำให้กระแสที่ชัดเจนในการวิเคราะห์



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์

ออกไซด์ ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

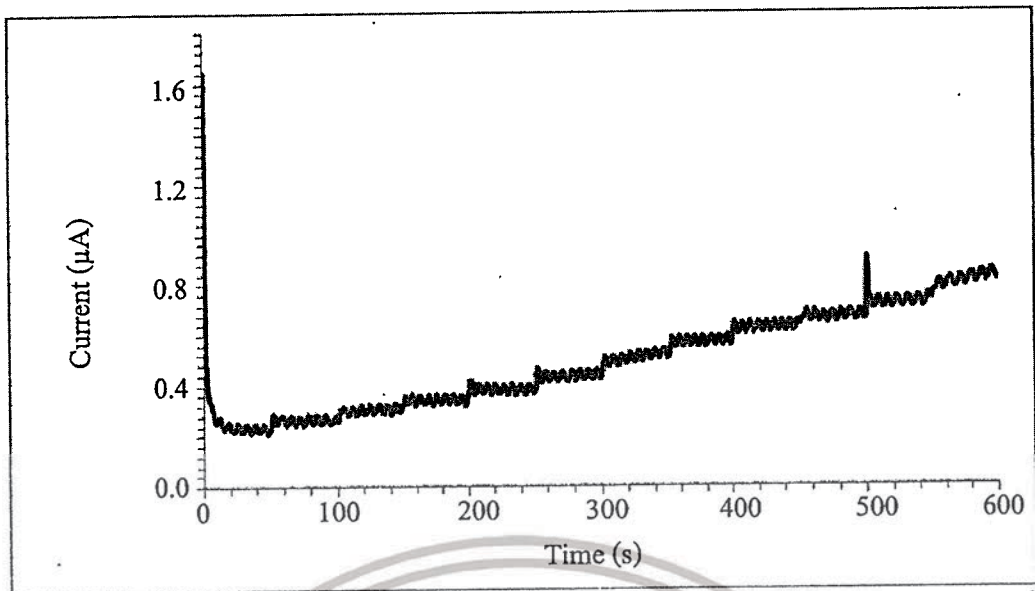


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

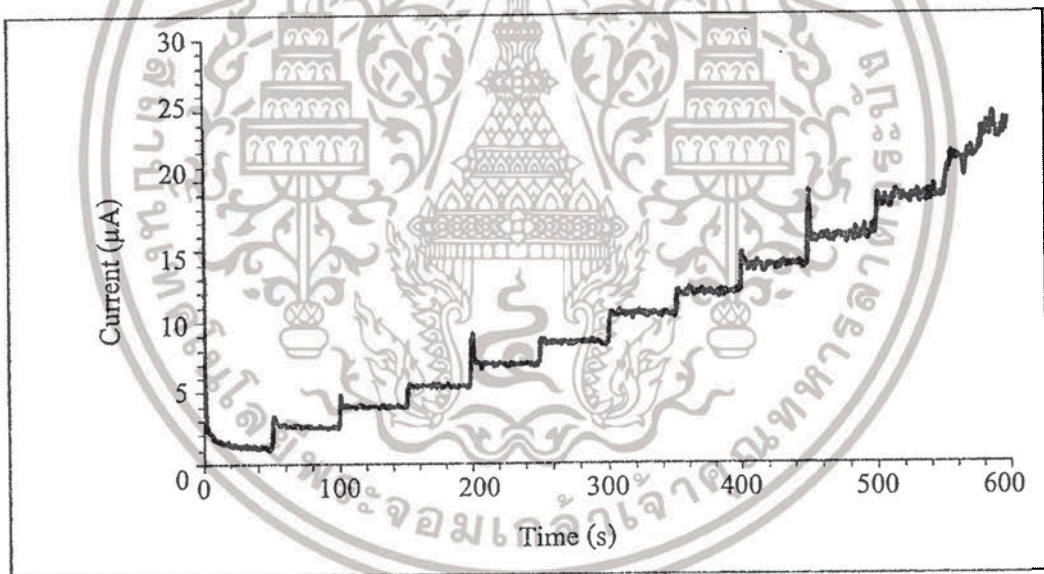
4.5 ช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลการศึกษาการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ด้วยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี เมื่อพิจารณาไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ [ภาคผนวก จ.] สามารถกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่ให้ปริมาณกระแสสูงสุดที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.76 โวลต์

เมื่อคงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.76 โวลต์ ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ โดยเทคนิคโครโนแอมเพอโรเมทรี ได้ผลแอมเพอโรแกรมดังแสดงในรูป 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ

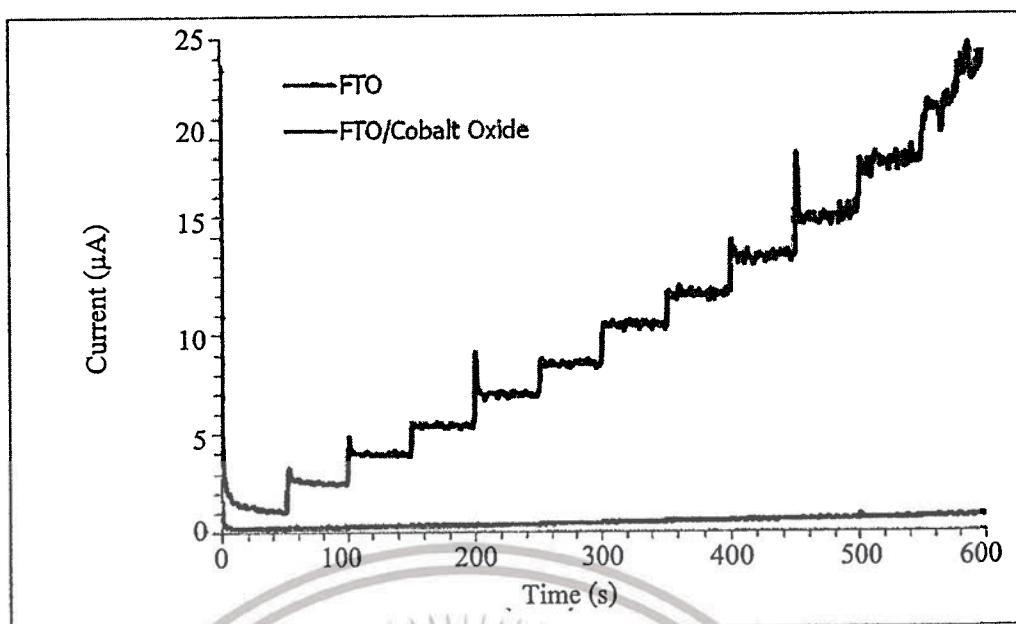


รูปที่ 4.16 แอมเพอโรแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.76 โวลต์



รูปที่ 4.17 แอมเพอโรแกรมของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโบบอลต์ออกไซด์ ในการตรวจวัด ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.76 โวลต์

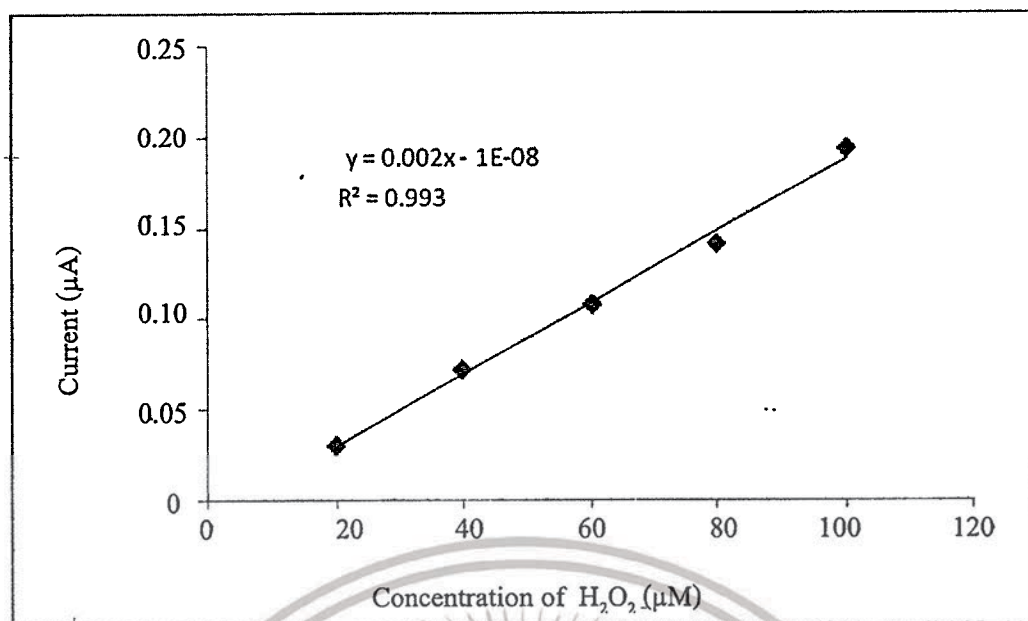
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



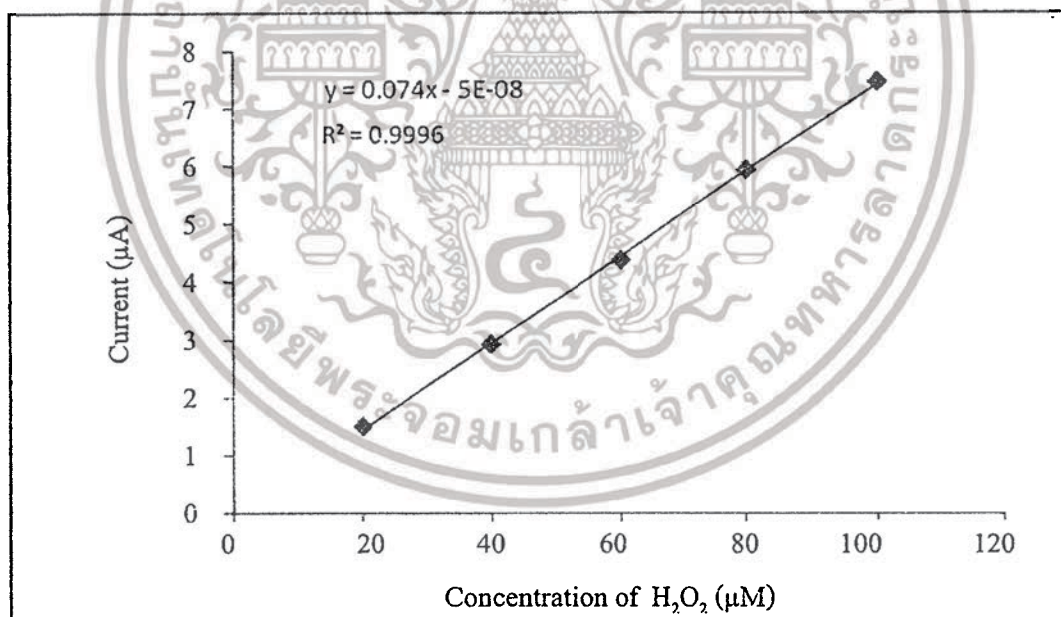
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบแอมเพอโรแกรมระหว่างขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนกับ ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.76 โวลต์

จากแอมเพอโรแกรมรูปที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อนำมาพลอตค่าปริมาณกระแสกับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ [ภาคผนวก ก.] และเลือกช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟ จะได้ช่วงความเป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์อยู่ในช่วงความเข้มข้น 20.00 ถึง 100.00 ไมโครโมลาร์ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9930 และ 0.9996 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ และจากแอมเพอโรแกรมรูปที่ 4.18 เมื่อนำค่ากระแสที่วัดได้จากขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์มาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าค่ากระแสที่ได้จากขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์มีค่าสูงกว่า

ในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ให้ปริมาณกระแสและความเป็นเส้นตรงมากกว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและกระแส ที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและกระแส ที่อยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

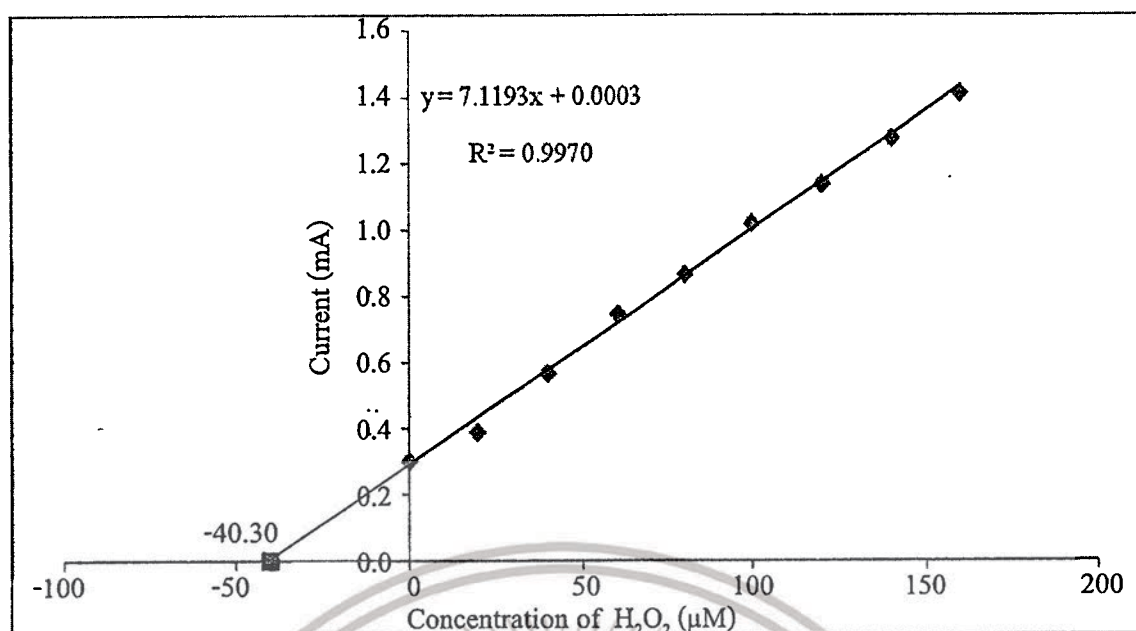
4.6 ขีดจำกัดการตรวจวัด

ผลจากการศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนและขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโอบอลต์คลอไรด์ จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 จะสามารถหาขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD) ได้จากการคำนวณสมการเส้นตรงของกราฟ เมื่อเปรียบเทียบขีดจำกัดการตรวจวัดในการตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยโอบอลต์ออกไซด์ จะพบว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนมีขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 17.30 ไมโครโมลาร์ และขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโอบอลต์ออกไซด์ขีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 2.85 ไมโครโมลาร์ [แสดงการคำนวณใน [ภาคผนวก ข.]

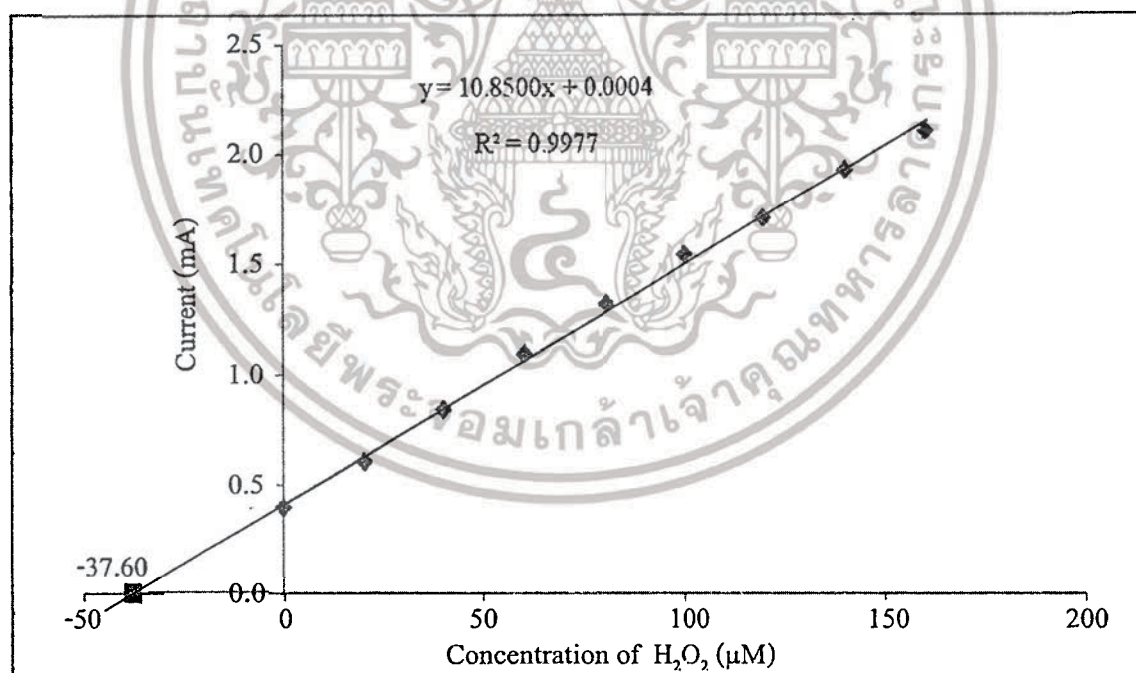
ในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโอบอลต์ออกไซด์สามารถตรวจวัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในฟอสเฟตบัพเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำกว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน ดังนั้นขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโอบอลต์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดสูงกว่า

4.7 การประยุกต์ในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง

การตรวจวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารตัวอย่าง น้ำยาล้างแผลตามร่างกายตามกฎพยานาคู ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 % w/v และน้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปากตราเสือขาว ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 % w/v โดยใช้เทคนิคแอมเพอโรเมทรี โดยการเติมสารละลายมาตรฐานลงในสารตัวอย่าง (standard addition method) ความเข้มข้น 20-160 ไมโครโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.76 โวลต์ กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่าง ตัวอย่าง น้ำยาล้างแผลตามร่างกายตรามงกุฎพญานาค



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกระแสไฟฟ้าในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ของสารละลายตัวอย่าง น้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปากตราเสือดาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 เป็นรูปแสดงกราฟของวิธีการเติมสารมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในสารละลายตัวอย่างที่ไม่ทราบความเข้มข้นแน่นอนของน้ำยาล้างแผลตามร่างกาย ตรา มงกุฎพญานาคคู่และน้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปาก ตราเสือดาว โดยสามารถหาจุดตัดแกน x มีค่าเท่ากับ -40.30 และ -37.60 ไมโครโมลาร์ เมื่อคำนวณกลับเพื่อหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าน้ำยาล้างแผลตามร่างกาย ตรามงกุฎพญานาคคู่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1.30 โมลาร์ และน้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปาก ตราเสือดาวมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 2.42 โมลาร์

4.8 การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)

การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับจะพิจารณาจากช่วงการเติมสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 20 – 160 ไมโครโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.76 โวลต์ การคำนวณแสดงใน [ภาคผนวก ช.]

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าร้อยละของการคืนกลับของการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

น้ำยาล้างแผลตามร่างกาย ตรามงกุฎพญานาคคู่		น้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปาก ตราเสือดาว	
ความเข้มข้นที่เติม (ไมโครโมลาร์)	ค่าร้อยละของการ คืนกลับ	ความเข้มข้นที่เติม (ไมโครโมลาร์)	ค่าร้อยละของการ คืนกลับ
20	62.62	20	96.14
40	93.32	40	103.03
60	104.62	60	106.83
80	99.29	80	106.24
100	101.29	100	105.61
120	98.27	120	100.92
140	98.23	140	101.09
160	97.70	160	98.72
เฉลี่ย	94.42	เฉลี่ย	102.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางแสดงค่าร้อยละของการคืนกลับของการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคแอมเพอโรเมทรีด้วยขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ออกไซด์ พบว่าค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดน้ำยาล้างแผลตามร่างกาย ตามนงกฎพญานาคภูมิคุ้มกันเท่ากับ 94.42 และน้ำยาล้างแผลในช่องหู ช่องปาก ตราเลือดดาวมีค่าเท่ากับ 102.31 ซึ่งค่าร้อยละของการคืนกลับ ที่ยอมรับได้ของการวิเคราะห์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 40 ไมโครโมลาร์ มีค่าเท่ากับ 80 - 110 เปอร์เซ็นต์ [ภาคผนวก ณ.] แสดงให้เห็นว่าวิธีวิเคราะห์หาสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ออกไซด์ มีความสามารถในการวิเคราะห์ที่ดีและมีความถูกต้องสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนสามารถทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจวัดได้ โดยการพอกพูนทางไฟฟ้าของโคบอลต์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ที่เหมาะสมสำหรับการพอกพูนทางไฟฟ้าคือ 0.50 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.1 ถึง 0.1 โวลต์ มีอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) เมื่อนำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ไปศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้า โดยนำไปตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.00 โมลาร์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เมื่อพิจารณาไซคลิกโวลแทมโมแกรมเปรียบเทียบกันพบว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ให้กระแสฟลักซ์ที่สูงกว่าขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีน จึงนำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเทคนิคโครโนแอมโพรเมทรี ใช้สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ คงที่ศักย์ไฟฟ้า 0.76 โวลต์ ค่าความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตั้งแต่ 0.20 ถึง 0.10 มิลลิโมลาร์ $R^2 = 0.9996$ ซีดจำกัดการตรวจวัดเท่ากับ 2.85 ไมโครโมลาร์ จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยโคบอลต์ออกไซด์ ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายตัวอย่างน้ำยาล้างแผลตามร่างกายคนและน้ำยาล้างแผลในช่องหูช่องปากตราเสือดาว พบว่ามีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ในสารตัวอย่าง 1.30 และ 2.42 โมลาร์และมีค่าร้อยละของการคืนกลับเท่ากับ 94.42 และ 102.31 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขณะตรวจวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยเทคนิคโครโนแอมโพรเมทรี จะเกิดฟองอากาศขึ้นที่ผิวหน้าสารละลายเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้นทำให้แอมโพรแกรมที่ช่วงความเข้มข้นสูงๆ ไม่เป็นเส้นตรง จึงควรมีระบบกำจัดออกซิเจนเพื่อลดสัญญาณรบกวน

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Somasundrun, K. Kirtikara, M. Tanticharoen, Anal. Chim. Acta 319 (1996) 59-70.
- [2] [Online]. Available : <http://msds.pcd.go.th/index.asp>
- [3] [Online]. Available : <http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/addict/precursorHydrogen%20peroxide.html>
- [4] [Online]. Available : <http://www.chemtrack.org/Chem-Result.asp>
- [5] Nuttakaan Leelarungrayu "Modification of Biosensor for Hydrogen Peroxide Detection from Oxidative Stress for Application in Medicine" (2007)
- [6] Orachat Apichatratanchai, Sopa Klinchan, Samorn Hirunpraditkoon, Boonsong Sutapan "An Amperometric Xanthine Oxidase Biosensor for the Determination of Tuna Fish Freshness"
- [7] Chia-Yu Lin, Yi-Hsuan Lai, A. Balamurugan, R. Vittal. Talanta 82 (2010): 340-347
- [8] รศ สุรางค์ อนุกุล "ปฏิบัติการเคมีคุณภาพวิเคราะห์" จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] ณัฐพงศ์ คลอนสอน "การสังเคราะห์และการศึกษาสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนโคบอลต์พทาโลไซยานินในรูปอนุภาคของซีโอไลต์ EMT และซีโอไลต์ BEA" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] [Online]. Available : www.chemicaland21.com/industrialchem/inorganic/COBALT%28II,20OXIDE.htm
- [11] Frdric Hebrard and Philippe Kalck "Cobalt-Catalyzed Hydroformylation of Alkenes: Generation and Recycling of the Carbonyl Species, and Catalytic Cycle" Chemical Reviews 109 (2009) pp 4272-4282
- [12] Shanshan Wu, Shuai Yuan, Liyi Shi, Yin Zhaoand, Jianhui Fang. "Preparation, characterization and electrical properties of fluorine-doped tin dioxide nanocrystals" Research Center of Nanoscience and Nanotechnology (2009)
- [13] Arkadiy A. Furman, Aleksander A., Sergiy M. "Tin(IV) oxide nanopowder and methods for preparation and use thereof" Physical properties (2004)
- [14] W.Phoohinkong. "Screen-printed electrode modified with nano-ZnO dispersed on polyaniline nanowires biosensor for determination of hydrogen peroxide". Master of Science. Bangkok:King Mongkut's Institute Of Technology Ladkrabang, (2010).
- [15] Dougherty, Dennis A.; Eric V. Anslyn "Modern Physical Organic Chemistry". University Science. (2005). p. 122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Hill, C. N. (2001). *A Vertical Empire: The History of the UK Rocket and Space Programme, 1950-1971*
- [17] [Online]. Available : http://www.chemsystems.com/about/cs/news/items/PERP%200708_3_Hydrogen%20Peroxide.cfm
- [18] รศ.คณิดา ดังคณานุรักษ์ เคมีวิเคราะห์ 1 โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [19] รศ.เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ “เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [20] [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/Eanal/analmedia/media/electrochemistry/web/Eanal/anal_votammtry1.htm
http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/Eanal/anal_votammtry2.htm
http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/Eanal/anal_votammtry3.htm
http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/Eanal/anal_votammtry4.htm
- [21] “Electrophoretic deposition (EPD)”. [Online]. Available: http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Khongrat_Tragolrat/Chapter2.pdf. 2005.
- [22] Abdollah Salimi, Rahman Hallaj “Nanomolar detection of hydrogen peroxide on glassy carbon electrode modified with electrodeposited cobalt oxide nanoparticles”. *Analytica Chimica Acta* 594 (2007) 24–31
- [23] Xingpin Cui, Li Hong, Xiangqin Lin “Electrochemical preparatio, characterization and application of electrodes modified with hybrid hexacyanoferrates of copper and cobalt”. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 526 (2002) 115-124
- [24] Rasa Garjonyte, Albertas Malinauskas “Electrocatalytic reactions of hydrogen peroxide at carbon paste electrodes modified by some metal hexacyanoferrates”. *Sensors and Actuators* 46 (1998) 236-241
- [25] Li Li, Jing Ge, Feng Wu, Renjijie, shi Chen, Borong Wu “Recovery of cobalt and lithium from spent lithium ion batteries using organic citric acid as leachant”. *Journal of Hazardous Materials* 176 (2010) 288-293
- [26] A. Malinauskas, R. Araminaite, G. Mickeviciute, R. Garjonyte “Evaluation of operational stability of Prussian blue-and cobalt hexacyanoferrate-based amperometric hydrogen peroxide sensor for biosensing application”. *Materials Science and Engineering C* 24 (2004) 513-519
- [27] L.mentar, M.R. Khelladi A.Aziz, “Early stags of cobalt electrodeposition on FTO and n-type Si substrates in sulfate medium”. *Materials Chemistry* (2010) 449-453

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] D. Ramirez, D. Silva, H. Gomez, G. Riveros, R.E. Marotti, E.A. Dalchiele, "Electrodeposition of ZnO thin film by using molecular oxygen and optical properties". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91 (2007) 1458 - 1461
- [29] L.mentar, M.R. Khelladi, A.Aziz "Effect of potential on the early stage of nucleation and growth during cobalt electrocrystallization in sulfate medium onto FTO surface". *Materials Letters* (2010) 2403-2406
- [30] Wei Li, Hyuck Jung, Nguyen Duc Hoa "Nanocomposite of cobalt oxide nanocrystals and single-walled carbon nanotubes for a gas sensor application". *Sensors and Actuators B* 150 (2010) 160-166
- [31] Chia-Yu Lin, Yi-Hsuan Lai, A. Balamurugan, R. Vittal, Chii-Wann Lin, Kuo-Chuan Ho "Electrode modified with a composite film of ZnO nanorods and Ag nanoparticles as a sensor for hydrogen peroxide". *Talanta* 82 (2010) 340-347
- [32] Peng Wang, Shengqi Li, Jinqing Kan, "A hydrogen peroxide biosensor based on polyaniline/FTO". *Sensors and Actuators B* 137 (2009) 662-668
- [33] Kenneth I. Ozoemena, Zhixin Zhao, Tebello Nyokong "Immobilized cobalt(II) phthalocyanine-cobalt(II) porphyrin pentamer at a glassy carbon electrode: Applications to efficient amperometric sensing of hydrogen peroxide in neutral and basic media". *Electrochemistry Communications* 7 (2005) 679-684
- [34] Kuei-Sheng Tseng, Lin-Chi Chen, Kuo-Chuan Ho, "Amperometric detection of hydrogen peroxide at a Prussian Blue-modified FTO electrode". *Sensors and Actuators B* 108 (2005) 738-745
- [35] P.S. Patil, L.D. Kadam, C.D. Lokhande "Studies on electrochromism of spray pyrolyzed cobalt oxide thin film". *Solar Energy Materials and Solar Cells* 53 (1998) 229-234
- [36] E.Gomez, A Labarta, A. Llorente, E. Valles "Electrodeposited cobalt+copper thin Film on ITO substrate". *Journal of Electroanalytical Chemistry* 517 (2001) 63-68
- [37] Ana P.Baioni, Marcio Vidotti, Pablo A. Fiorito "Copper hexacyanoferrate nanoparticles modified electrodes: A versatile tool for biosensors". *Journal of Electroanalytical Chemistry* 622 (2008) 219-224
- [38] Rasa Garjonyte, Albertas Malinauskas "Studies on ionic intercalation properties of cobalt oxide thin film prepared by spray pyrolysis technique". *Materials Chemistry and Physics* 68 (2001):280-282

- [39] Abdollah Salimi, Hussein Mamkhezri "Electrochemical of trace amount of arsenic (III) at glassy carbon electrode modified with cobalt oxide nanoparticles". *Sensors and actuators B* 129 (2008) 246-254
- [40] Abdollah Salimi, Rahman hallaj, Saied Soltanian "Immobilization of hemoglobin on electrodeposited cobalt-oxide nanoparticles : Direct voltammetry and electrocatalytic activity". *Biophysical Chemistry* 130 (2007) 122-131
- [41] Li Tian, Jianguy Bian "Electrochemical study on cobalt film modified glassy carbon electrode and its application". *Electrochimica Acta* 55 (2010) 3083-3088
- [42] Abdollah Salimi, Rahman Hallaj, Saied Soltanian, Hussein Mamkhezri "Nanomolar detection of hydrogen peroxide on glassy carbon electrode modified with electrodeposited cobalt oxide nanoparticles". *Analytica Chimica Acta* 594 (2007) 24-31
- [43] L.D. Kadam, S.H. Pawar, P.S. Patil "Studies on ionic intercalation properties of cobalt oxide thin films prepared by spray pyrolysis technique". *Materials Chemistry and Physics* 68 (2001) 280-282
- [44] Lokhande V.R. Shinde, S.B. Mahadik, T.P. Gujar, C.D "Supercapacitive cobalt oxide (Co_3O_4) thin films by spray pyrolysis". *Applied Surface Science* 252 (2006) 7487-7492
- [45] Suwan Chaiyasith, Tanin Tangkuaram and Pachernchaipat Chaiyasith, Electrocatalytic of chlorophenoxylic acids at a protoporphyrin IX cobalt (III) chloride modified glassy carbon electrode 581 (2005) 104-110



ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.8637 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250.00 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.10 โมลาร์

ก.2 การเตรียมสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 0.1 โมลาร์

ชั่งโคบอลต์คลอไรด์ 23.739 มิลลิกรัม ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์ เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.10 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์

ก.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.10 โมลาร์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายในน้ำปราศจากไอออนเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.10 โมลาร์

ก.4 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.10 โมลาร์

เปิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 12.06 โมลาร์ มา 0.417 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.10 โมลาร์

ก.5 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมคลอไรด์ 18.637 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนเทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250.00 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.00 โมลาร์

ก.6 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ชั่งโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 82.315 มิลลิกรัม ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ เทใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ จะได้สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 10.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ก.7 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2)

เนื่องจากในขวดของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความเข้มข้น 30% (w/v) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีความหนาแน่น 1.463 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เท่ากับ 1463.00 กรัมต่อลิตร

สารละลาย 100.00 มิลลิลิตร มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 30.00 กรัม

สารละลาย 1 ลิตร มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 438.90 กรัม

ดังนั้นจะได้ว่าจำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 12.90 โมลต่อลิตร เท่ากับ 12.90 โมลาร์

ก.7.1 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 775 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ 10 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ จะได้ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์

ก.7.2 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 775 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ 10 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ จะได้ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์

ก.7.3 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 775 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ 10 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ จะได้ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์

ก.7.4 การเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 775 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.10 โมลาร์ เขย่าให้เข้ากัน จะได้ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์

ปีเปตสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ 10 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.10 โมลาร์ จะได้ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ ก.1 แสดงปริมาณของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 1.00 โมลาร์ ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายต่างๆ เพื่อเตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์

ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)	ปริมาตรของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.00 โมลาร์ (ไมโครลิตร)
0.1	10
0.3	30
0.5	50
0.7	70
0.9	90
1.1	110
2.0	200
5.0	500
10.0	1000



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้