

การปรับปรุงขั้วกราไฟต์ด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อตรวจวัด  
สารประกอบออร์กาโนฟอสเฟตด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

MODIFIED GRAPHITE ELECTRODE WITH MULTI-WALL CARBON  
NANOTUBE FOR ELECTROCHEMICAL DETECTION OF  
ORGANOPHOSPHATE

สุภาณี พรทอง  
SUPHANI PHONTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-SC-M-012-140

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การปรับปรุงขั้วกราไฟต์ด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อตรวจวัด  
สารประกอบออร์กาโนฟอสเฟตด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า**

**MODIFIED GRAPHITE ELECTRODE WITH MULTI-WALL CARBON  
NANOTUBE FOR ELECTROCHEMICAL DETECTION OF  
ORGANOPHOSPHATE**



**ศุภาณี พรทอง**

**SUPHANI PHONTHONG**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาเคมี**

**บัณฑิตวิทยาลัย**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ. 2550**

**KMITL-2007-SC-M-012-140**

**MODIFIED GRAPHITE ELECTRODE WITH MULTI-WALL CARBON  
NANOTUBE FOR ELECTROCHEMICAL DETECTION OF  
ORGANOPHOSPHATE**

**SUPHANI PHONTHONG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**KMITL-2007-SC-M-012-140**

**COPPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงขั้วกราไฟต์ด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เพื่อตรวจวัดสารประกอบออร์กาโนฟอสเฟตด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า
นักศึกษา	นางสาวศุภาณี พรทอง
รหัสนักศึกษา	46063803
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี (เคมีวิเคราะห์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

#### บทคัดย่อ

ขั้วแม่เหล็กกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในทางเกษตรก่อให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้แก่ ในน้ำ อากาศ ดิน หรือแม้แต่ในอาหารซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาวิธีการที่รวดเร็ว นำเชื่อถือ และราคาไม่แพงในการตรวจวัดขั้วแม่เหล็กที่ปนเปื้อนในผัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้าในการตรวจวัดพีในโตรไทออนโดยใช้ขั้วกราไฟต์ จากการศึกษาด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีพบว่าพีในโตรไทออนให้พีกริดักชันที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.3 โวลต์ พีออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.5 และ -0.7 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 หลังจากนั้นได้นำขั้วกราไฟต์ไปปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในสารละลายเนฟิออนเข้มข้น 1% (graphite/MWNTs/0.1% Nafion) และใน ZnO (graphite/ZnO/0.1%Nafion) ซึ่งพบว่าขั้ว graphite/MWNTs/0.1%Nafion ให้พีออกซิเดชันและพีกริดักชันของพีในโตรไทออนสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด จากการศึกษาด้วยเทคนิคและดิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี พบว่าขั้วกราไฟต์มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดพีในโตรไทออนอยู่ในช่วง 1 ถึง 200 ppm ( $R^2 = 0.949$ ) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 3.742 (S/N = 3) และมีค่าการทำซ้ำเท่ากับ 1.724 %RSD (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 30 ครั้ง ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดพีในโตรไทออนอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ppm ( $R^2 = 0.923$ ) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 1.241 (S/N = 3) และมีค่าการทำซ้ำเท่ากับ 0.592 %RSD (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 30 ครั้ง ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดพีในโตรไทออนอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ppm ( $R^2 = 0.948$ ) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.989 (S/N = 3) และมีค่าการทำซ้ำเท่ากับ 1.107 %RSD (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 30 ครั้ง และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดพีในโตรไทออนอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ppm ( $R^2 = 0.974$ ) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.498 (S/N = 3) และมีค่าการทำซ้ำเท่ากับ 0.263 %RSD (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 30 ครั้ง

และจากการตรวจวัดพีใน โตรไทออนในตัวอย่างผกได้แก่ ผกคะน้ำ ถั่วฝักยาว และพริกชี้หนูด้วย  
ข้าวราไฟต์ให้ร้อยละของการคืนกลับเป็น 552 664 และ 143 ตามลำดับ ส่วนข้าว Graphite/  
MWNTs/0.1%Nafion ให้ร้อยละของการคืนกลับเป็น 877 197 และ 64.88 ตามลำดับ ข้าว Graphite/  
ZnO/0.1%Nafion ให้ร้อยละของการคืนกลับเป็น 400 219 และ 41.7 ตามลำดับ และข้าว Graphite/  
MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ให้ร้อยละของการคืนกลับเป็น 807 260 และ 126 ตามลำดับ

<b>Thesis Title</b>	Modified Graphite Electrode with Multi Wall Carbonnanotube for Electrochemical Detection of Organophosphate
<b>Student</b>	Miss Suphani Phonthong
<b>Student ID.</b>	46063803
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Chemistry (Analytical Chemistry)
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Suwan Chaiyasith

### ABSTRACT

Organophosphate pesticides are widely used in agriculture. The contamination of pesticide in environment such as water, air, soil and also food in the extreme problem and this will be harmful healthy. The purpose of the work in to develop the method that are quickly, reliable and inexpensive for detection pesticides contaminated in vegetables. In this work, electrochemical method for the determination of fenitrothion using graphite electrode was investigated. The cyclic voltammetric techniques shows that fenitrothion yield a well-defined reduction peak potential at -0.3 V and oxidation peak potential at -0.5 and -0.7 V (v.s Ag/AgCl) in borax buffer pH 10.38. The graphite electrode after modified with MWNTs in 1%Nafion, (graphite/MWNTs/0.1% Nafion), and with ZnO (graphite/ZnO/0.1%Nafion). It was found that graphite/MWNTs/0.1% Nafion significantly enhances the reduction peak and also oxidation peak current of fenitrothion. Differential pulse voltammetry showed the linear range of fenitrothion between 1-200 ppm ( $R^2 = 0.949$ ), detection limit of 3.742 ppm ( $S/N = 3$ ), reproducibility of 1.724 %RSD ( $n = 20$ ) and lifetime of 30 used times for determination of fenitrothion by graphite electrode. The Graphite/MWNTs/ 0.1%Nafion electrode showed the linear range of fenitrothion between 1-100 ppm ( $R^2 = 0.923$ ), detection limit of 1.241 ppm ( $S/N = 3$ ), reproducibility of 0.592%RSD ( $n = 20$ ) and lifetime of 30 used times. The Graphite/ZnO/ 0.1%Nafion electrod showed the linear range of fenitrothion between 1-100 ppm ( $R^2 = 0.948$ ), detection limit of 0.989ppm ( $S/N = 3$ ), reproducibility of 1.107%RSD ( $n = 20$ ) and lifetime of 30 used times. And the Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion showed the linear range of fenitrothion between 1-100 ppm ( $R^2 = 0.974$ ), detection limit of 0.498 ppm ( $S/N = 3$ ), reproducibility of 0.263%RSD ( $n = 20$ ) and lifetime of 30 used times.

The %recovery of fenitrothion in vegetable samples such as kana, long bean and chili by graphite electrode was 552 664 and 143 respectively. Graphite/MWNTs/0.1%Nafion electrode was 877 197 and 64.88 respectively. Graphite/ZnO/0.1%Nafion electrode was 400 219 and 41.7 respectively. Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion electrode was 807 260 and 126 respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการทำงาน

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.อรุณี กงศักดิ์ไพศาล และ รศ.ดร. พรพิมล ม่วงไทย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยตรวจรายละเอียดต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เป็น ไปอย่างถูกต้อง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ Dr. Li Fang จาก Shenyang National Laboratory for Materials Science Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, China ที่ให้ความอนุเคราะห์มีลวดคาร์บอนนาโนทิว์มาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และคำแนะนำต่างๆต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณคุณวินัยและเจ้าหน้าที่ทุกท่านจากบริษัทเมท โทรม สยามเป็นอย่างยิ่งที่ให้ความช่วยเหลือ ดูแล และคำแนะนำในทุก ๆ เรื่องที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศุภาณี พรทอง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XXII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สมบัติของพีไอในโครไทออน.....	4
2.2 สมบัติของเนฟไอออน.....	5
2.3 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์.....	7
2.4 สมบัติของผงอนุภาคซิงค์ออกไซด์.....	20
2.5 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า.....	21
2.5.1 การเคลื่อนที่ของไอออน.....	21
2.5.1.1 การแพร่.....	21
2.5.1.2 การไมเกรชัน.....	21
2.5.1.3 การคอนเวกชัน.....	21
2.5.2 เทคนิคทางเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า.....	21
2.5.2.1 ไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	21
2.5.2.2 พัลส์โวลแทมเมตรี.....	27
2.5.3 การประยุกต์ใช้เทคนิคพัลส์โวลแทมเมตรี.....	31
2.5.3.1 การวิเคราะห์สารอนินทรีย์.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3.2 การวิเคราะห์สารอินทรีย์.....	31
2.5.4 ส่วนประกอบของเซลล์โวลแทมเมตรี.....	32
2.5.4.1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย.....	33
2.5.4.2 ระบบกำจัดแก๊สออกซิเจนออกจากสารละลาย.....	34
2.5.4.3 ขั้วไฟฟ้า.....	34
2.5.4.4 อุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า.....	35
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1. สารเคมี.....	43
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	44
3.3 วิธีการทดลอง.....	45
3.3.1 การเตรียมมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	45
3.3.1.1 การล้างมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	45
3.3.1.2 การเตรียมสารแขวนลอยของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	45
3.3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า.....	45
3.3.2.1 การล้างขั้วไฟฟ้า.....	45
3.3.2.2 การเตรียมขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....	45
3.3.3 การศึกษาลักษณะของฟิโนโตรไทออนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า.....	46
3.3.3.1 การศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดของฟิโนโตรไทออน.....	46
3.3.3.2 การศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัด ของฟิโนโตรไทออน.....	46
3.3.3.3 การศึกษาผล pH ของสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ในการตรวจวัด ของฟิโนโตรไทออน.....	46
3.3.3.4 การศึกษาผลของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัด ของฟิโนโตรไทออน.....	46

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3.5 การศึกษาผลของชนิดสารละลายที่ใช้ในการทำสารแขวนลอย มัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวป์ตรวจวัดของพีในโตรไทออน.....	46
3.3.3.6 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลต์คาร์บอน นาโนทิวป์ในการตรวจวัดของพีในโตรไทออน.....	47
3.3.3.7 การศึกษาผลของปริมาตรของสารแขวนลอยมัลติวอลต์คาร์บอน นาโนทิวป์ในการตรวจวัดของพีในโตรไทออน.....	47
3.3.3.8 การศึกษาผลของพหุนาโนของซิงค์ออกไซด์ในสาร แขวนลอยมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัด พีในโตรไทออน.....	47
3.3.3.9 การศึกษาผลของอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาในการตรวจวัด ของพีในโตรไทออนบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	47
3.3.3.10 การศึกษาช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า.....	48
3.3.3.11 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด.....	48
3.3.4 การศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาได้.....	48
3.3.4.1 ค่าการทำซ้ำ.....	48
3.3.4.2 อายุการใช้งานขั้วไฟฟ้า.....	49
3.3.5 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลตัวอย่าง.....	49
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	50
4.1 ผลการศึกษาลักษณะของพีในโตรไทออนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า.....	50
4.1.1 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดพีในโตรไทออน.....	50
4.1.2 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดพีในโตรไทออน.....	52
4.1.3 ผลการศึกษาผล pH ของสารละลายบอแรกซ์เฟอโรในการตรวจวัด พีในโตรไทออน.....	55
4.1.4 ผลการศึกษาผลของมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัด พีในโตรไทออน.....	57

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.5 ผลการศึกษาชนิดสารละลายที่ใช้ในการทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ตรวจวัดของพีโนโตร ไทออน.....	59
4.1.6 ผลการศึกษาผลความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดของพีโนโตร ไทออน.....	61
4.1.7 ผลการศึกษาผลปริมาตรของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดของพีโนโตร ไทออน.....	63
4.1.8 ผลการศึกษาผลของพองอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในการตรวจวัดพีโนโตร ไทออน.....	65
4.1.9 ผลการศึกษาผลของอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาในการตรวจวัดพีโนโตร ไทออนบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	67
4.1.10 ผลการศึกษาช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า.....	75
4.1.11 ผลค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด.....	80
4.2 ผลการศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาได้.....	80
4.2.1 ผลของค่าการทำซ้ำ.....	80
4.2.2 ผลของอายุการใช้งานขั้วไฟฟ้า.....	81
4.2.3 ผลการตรวจวัดพีโนโตร ไทออนด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	84
4.3 ผลการวิเคราะห์ในตัวอย่างฝัก.....	86
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก การเตรียมสารเคมี.....	96
ภาคผนวก ข ผลการทดลองและการคำนวณ.....	102
ข1 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดพีโนโตร ไทออน.....	102

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ข2 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดพีไนโตร ไทออน.....	104
ข3 ผลการศึกษาผล pH ของสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ในการตรวจวัด พีไนโตรไทออน.....	107
ข4 ผลการศึกษาชนิดสารละลายที่ใช้ในการทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดพีไนโตรไทออน.....	111
ข5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการตรวจวัดพีไนโตรไทออน.....	112
ข6 ผลการศึกษาปริมาตรของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการตรวจวัดพีไนโตรไทออน.....	113
ข7 ผลการศึกษาพหุนุภาคของซิงค์ออกไซด์ในการตรวจวัดพีไนโตรไทออน.....	116
ข8 ผลการศึกษาอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาในการตรวจวัดพีไนโตร ไทออนบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	118
ข9 ผลการศึกษาช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า.....	128
ข10 ผลค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด.....	131
ข11 ผลค่าการทำซ้ำ.....	133
ข12 อายุการใช้งานขั้วไฟฟ้า.....	136
ข13 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผักตัวอย่าง.....	141
ภาคผนวก ก. ความเป็นพิษของขาม่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต.....	146
ภาคผนวก ง. การใช้เครื่อง Auto Lab.....	149
เอกสารอ้างอิง.....	89
ประวัติผู้เขียน.....	157

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพีใน โคร ไทออน.....	5
2.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแนฟิออน.....	6
2.3 โครงสร้างของคาร์บอน.....	7
2.4 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนา โททิวบ์.....	10
2.5 แสดงคุณสมบัติต่างๆของคาร์บอนนา โททิวบ์.....	18
2.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซิงค์ออกไซด์.....	20
4.1 แสดงค่า $R^2$ ที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ เมื่อพลอตกราฟระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับรากที่สองของอัตราการสแกน ( $V^{1/2}$ ).....	73
4.2 แสดงความชันและชนิดของปฏิกิริยาของพีกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของขั้วไฟฟ้า ชนิดต่างๆเมื่อพลอตกราฟระหว่างลอกกาลิทึมของกระแสไฟฟ้ากับลอกกาลิทึมของอัตราการ สแกน.....	74
4.3 แสดงค่าต่างๆของการตรวจวัดพีใน โคร ไทออนด้วยขั้วไฟฟ้าต่างๆ.....	84
4.4 แสดงการตรวจวัดพีใน โคร ไทออนด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion กับเทคนิคอื่น.....	85
4.5 แสดงร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดพีใน โคร ไทออนในตัวอย่างผกด้วยขั้วไฟฟ้า ชนิดคต่างๆ.....	86
ก1 แสดงการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จาก stock solution.....	97
ก2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์.....	100
ก3 การเตรียมสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ที่ pH ต่างๆ.....	101
ก4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานพีใน โคร ไทออนที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38.....	101
ข1 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการตรวจวัดพีใน โคร ไทออน.....	102
ข2 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดพีใน โคร ไทออน..	104
ข3 ผลการศึกษา pH ของสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดพีใน โคร ไทออน.....	107

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข4 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายที่ใช้ทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ในการตรวจวัดพีในโตรไทออน.....	111
ข5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เหมาะสม ในการตรวจวัดพีในโตรไทออนด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion.....	112
ข6 ผลการศึกษาปริมาตรของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เหมาะสม ในการตรวจวัดพีในโตรไทออนด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion.....	113
ข7 แสดงตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าและพีกระแสต่างๆของการตรวจวัดพีในโตรไทออนด้วย ขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ในอัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO.....	116
ข8 แสดงอัตราการสแกนของขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	121
ข9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสแกน รากที่สองของอัตราการสแกน ค่าลอกกาลิเทียมของ อัตราการสแกนกับศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ใน สารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38.....	127
ข10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพีในโตรไทออนกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้.....	128
ข11 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าจากสัญญาณ Noise 30 จุดในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย ขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion.....	132
ข12 แสดงค่าการทำซ้ำของขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion.....	134
ข13 แสดงกระแสไฟฟ้ากับจำนวนรอบของการตรวจวัดพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ด้วย ขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	139
ข14 แสดงปริมาณการตรวจวัดพีในโตรไทออนในตัวอย่างผักด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....	143
ค1 ความเป็นพิษของยาฆ่าแมลงประเภทสารออร์กาโนฟอสเฟตแบ่งตาม ระดับอันตรายหรือความเป็นพิษ.....	144

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของฟีนโตรโทออน.....	4
2.2 โครงสร้างของแนฟิออน.....	6
2.3 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์.....	20
2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบการแพร่ ไมเกรชัน และคอนเวกชัน.....	22
2.5 โวลเทจ โพรแกรมของไซคลิกโวลแทมเมทรี.....	22
2.6 ไซคลิกโวลแทม โมแกรมแบบผันกลับได้.....	23
2.7 ไซคลิกโวลแทม โมแกรมแบบผันกลับไม่ได้ (A) และผันได้ไม่สมบูรณ์ (B).....	23
2.8 ไซคลิกโวลแทม โมแกรมของปฏิกิริยาผันกลับได้แสดงวิธีการหาความสูงของกระแสฟีก เมื่อ $i_{pc}$ และ $E_{pc}$ คือความสูงของกระแสไฟฟ้าและตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าของฟีกที่เกิดปฏิกิริยา รีดักชันตามลำดับ ส่วน $i_{pa}$ และ $E_{pa}$ คือความสูงของกระแสไฟฟ้าและตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า ของฟีกที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	25
2.9 สัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์ปกติทั่วไป.....	28
2.10 สัญญาณกระตุ้นแบบคิเฟอร์เรนเชียลพัลส์.....	30
2.11 สัญญาณกระตุ้นแบบสแควร์-เวฟ.....	30
2.12 โวลแทม โมแกรมของเทคนิคคิเฟอร์เรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี.....	32
2.13 โวลแทม โมแกรมของเทคนิคและสแควร์-เวฟโวลแทมเมทรี.....	32
2.14 แสดงการจัดเซลล์สำหรับการทำเทคนิคโวลแทมเมทรี (ด้านข้างและด้านบน) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode; C.E.) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode; W.E.) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode; R.E.).....	33
2.15 ผังแสดงการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว โดย 1 2 และ 3 แทนออฟแอมป์ (Operational Amplifier; Op Amp).....	35
4.1 ไซคลิกโวลแทม โมแกรมของฟีนโตรโทออนเข้มข้น 100 ppm ในบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย (—) ขั้วแพลทินัม (×) ขั้วกลาสติคาร์บอน (.) ขั้วกราไฟต์ (- -) ขั้ว Graphite/ MWNTs/DMF และ (— - —) ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้า ใน ช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.2 กราฟรูปแท่งแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีใน โตร ไทออนเข้มข้น 100 ppm ในบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วแพลทินัมสแกน ขั้วกลาสลิคาร์บอน ขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion.....51
- 4.3 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีใน โตร ไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ (—) อะซีเตดบัฟเฟอร์ pH 3.7 (X) 0.1M HCl (.) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 (--) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 (— - - —) บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 (+) บริทตัน โรบินสัน บัฟเฟอร์ pH 10.38 และ (— - —) 0.1 M NaOH ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....52
- 4.4 กราฟรูปแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของ พีใน โตร ไทออน เข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ อะซีเตดบัฟเฟอร์ pH 3.7 0.1M HCl ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 บริทตัน โรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 และ 0.1 M NaOH ด้วยขั้วกราไฟต์.....53
- 4.5 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีใน โตร ไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ (—) อะซีเตดบัฟเฟอร์ pH 3.7 (X) 0.1M HCl (.) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 (--) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 (— - - —) บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 (+) บริทตัน โรบินสัน บัฟเฟอร์ pH 10.38 และ (— - —) 0.1 M NaOH ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....53
- 4.6 กราฟรูปแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีใน โตร ไทออน เข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ อะซีเตดบัฟเฟอร์ pH 3.7 0.1M HCl ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 บริทตัน โรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 และ 0.1 M NaOH ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion..... 54
- 4.7 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีใน โตร ไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ ((—) 1.52 (X) 5.44 (.) 7.00 (--) 8.37 (— - - —) 10.38 และ (+) 12.16 ด้วย ขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีในโตร ไทออน เข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ 1.52 2.26 5.44 6.19 7.00 8.37 8.82 10.38 11.11 และ 12.16 ด้วยขั้วกราไฟต์.....	56
4.9 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตร ไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ (—) 1.52 (X) 5.44 (.) 7.00 (--) 8.37 (— -- —) 10.38 และ (+) 12.16 ด้วย ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....	56
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีในโตร ไทออน เข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ 1.52 2.26 5.44 6.19 7.00 8.37 8.82 10.38 11.11 และ 12.16 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion.....	57
4.11 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของ $K_3[Fe(CN)_6]$ เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโปแตสเซียม คลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วย (a) ขั้วกราไฟต์ และ (b) ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....	58
4.12 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตร ไทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย (a) ขั้วกราไฟต์ และ (b) ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....	58
4.13 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตร ไทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย (a) ขั้วกราไฟต์ (b) ขั้วGraphite/MWNTs/DMF และ (c) ขั้ว Graphite/ MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....	60
4.14 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตร ไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสาร แขวนลอยมัลติวอลต์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ (a) 0 (b) 2 (c) 4 (d) 6 (e) 8 และ (f) 10 mg/ml สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย ขั้ว Graphite/MWNTs /0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 0 2 4 6 8 และ 10 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร.....62
4.16	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร (a) 0 (b) 2 (c) 4 (d) 6 (e) 8 และ (f) 10 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....63
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักกระแสต่างๆของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 กับปริมาณของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์.....64
4.18	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ (a) 0 : 0 (b) 2 : 0 (c) 2 : 2 (d) 2 : 4 (e) 2 : 6 (f) 2 : 8 และ (g) 2 : 14 สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s.....65
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักกระแสต่างๆของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 กับน้ำหนักของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์...66
4.20	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 10 (b) 25 (c) 50 (d) 100 และ (e) 250 mV/s.....67
4.21	กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์.....68

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอกกาลิทึมของอัตราการสแกนกับค่าลอกกาลิทึมของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์.....	68
4.23 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 10 (b) 25 (c) 50 (d) 100 และ (e) 250 mV/s.....	69
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion.....	69
4.25 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอกกาลิทึมของอัตราการสแกนกับค่าลอกกาลิทึมของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion.....	70
4.26 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 10 (b) 25 (c) 50 (d) 100 และ (e) 250 mV/s .....	70
4.27 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion.....	71
4.28 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอกกาลิทึมของอัตราการสแกนกับค่าลอกกาลิทึมของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion.....	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์และผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml (อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 1 : 1) ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 10 (b) 25 (c) 50 (d) 100 และ (e) 250 mV/s.....72
4.30	กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion.....72
4.31	กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอกกาติมิของอัตราการสแกนกับค่าลอกกาติมิของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion.....73
4.32	โวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนที่มีความเข้มข้น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 50 (e) 100 และ (f) 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV.....76
4.33	กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆกับกระแสไฟฟ้าของพีโนโตรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์.....76
4.34	โวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนที่มีความเข้มข้น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 50 (e) 100 และ (f) 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV.....77
4.35	กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆกับกระแสไฟฟ้าของพีโนโตรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion.....77

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.36 โวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนที่มีความเข้มข้น (a) 1 (b) 10 (c) 50 (d) 100 และ (e) 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV.....78
- 4.37 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆกับกระแสไฟฟ้าของพีโนโตรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion.....78
- 4.38 โวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนที่มีความเข้มข้น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 50 (e) 100 และ (f) 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมีลิวอดอลคาร์บอนนาโนทิวบ์และผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 6 mg/ml (อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 2 : 4) ปริมาตรปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV.....79
- 4.39 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆกับกระแสไฟฟ้าของพีโนโตรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion...79
- 4.40 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของการตรวจวัดซ้ำของการตรวจพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ.....80
- 4.41 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการสแกนของการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์.....81
- 4.42 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการสแกนของการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion.....82
- 4.43 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการสแกนของการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion.....82

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.44 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการสแกนของ การตรวจวัดพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion.....83
- ข1 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 1 (b) 10 (c) 50 และ (d) 100 (e) 500 และ (f) 1000 mV/s.....118
- ข2 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่เข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 1 (b) 10 (c) 50 และ (d) 100 (e) 500 และ (f) 1000 mV/s.....119
- ข3 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion ที่เข้มข้นของสารแขวนลอยของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 1 (b) 10 (c) 50 และ (d) 100 (e) 500 และ (f) 1000 mV/s..... 119
- ข4 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ที่เข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์และผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml (อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 1 : 1) ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 1 (b) 10 (c) 50 และ (d) 100 (e) 500 และ (f) 1000 mV/s.....120

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- ข5 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ตรวจสอบด้วยขั้วกราไฟต์  
สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการ  
สแกน 50 mV/s เมื่อจำนวนรอบของการสแกนเป็น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 20 และ (e) 30.....136
- ข6 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ตรวจสอบด้วยขั้ว Graphite/  
MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้ว  
อ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อจำนวนรอบของการสแกนเป็น (a) 1 (b) 5  
(c) 10 (d) 20 และ (e) 30.....137
- ข7 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ตรวจสอบด้วยขั้ว Graphite  
/ZnO/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับ  
ขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อจำนวนรอบของการสแกนเป็น (a) 1 (b) 5  
(c) 10 (d) 20 และ (e) 30.....137
- ข8 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ตรวจสอบด้วยขั้ว Graphite/  
ZnO/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์  
(เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อจำนวนรอบของการสแกนเป็น  
(a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 20 และ (e) 30.....138

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A	แอมแปร์
$A$	พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ( $\text{cm}^2$ )
Ag/AgCl	ขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
C	ความเข้มข้นของสาร ในสารละลายบัลค์ ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
CV	ไซคลิกโวลแทมเมทรี
CNTs	คาร์บอนนาโนทิวบ์
C.E.	ขั้วไฟฟ้าช่วย
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
E	ศักย์ไฟฟ้า (V)
$E^\circ$	ศักย์ฟอร์มอล (V)
$E_p^a$	ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าของพีกที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือศักย์ไฟฟ้าของพีกแอโนดิก (V)
$E_p^c$	ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าของพีกที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน หรือศักย์ไฟฟ้าของพีกแคโทดิก (V)
F	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96485 C/mol)
GC	ขั้วกลาสคาร์บอน
Graphite/MWNTs/0.1%Nafion	ขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโน ทิวบ์ในสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 0.1%
Graphite/ZnO/0.1%Nafion	ขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยซิงค์ออกไซด์ในสารละลาย แนฟิออนเข้มข้น 0.1%
Graphite/ZnO/MWNTs/0.1%Nafion	ขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโน ทิวบ์และซิงค์ออกไซด์ในสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 0.1%
g	กรัม
$i_{lim}$	กระแสจำกัด (A)
$i_p$	กระแสพีก (A)
$i_p^a$	กระแสพีกที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือกระแสไฟฟ้าของพีกแอโนดิก (A)

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$i_p^c$	กระแสฟิคที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน หรือกระแสไฟฟ้าของฟิคแคโทดิก (A)
$k^\circ$	ค่าคงที่อัตรามาตรฐาน
M	โมลาร์
mg	มิลลิกรัม
ml	มิลลิลิตร
MWNTs	มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
mol	โมล
mV/s	มิลลิโวลต์ต่อวินาที
n	จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดในครึ่งปฏิกิริยา
ppm	หนึ่งในล้านส่วน
Pt	แพลทินัม
R	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol .K)
RSD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
R.E.	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
SD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SCE	ขั้วอ้างอิงคาโบลอสมิตัว
SWCTNs	ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์
s	วินาที
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
V	อัตราการสแกน (mV/s) หรือ (V/s)
V	โวลต์
W.E.	ขั้วไฟฟ้าใช้งาน
$\mu\text{A}$	ไมโครแอมแปร์
$\mu\text{l}$	ไมโครลิตร
$\emptyset$	เส้นผ่าศูนย์กลาง
%	เปอร์เซ็นต์

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากการเพิ่มประชากรเป็นไปอย่างรวดเร็ว จึงมีการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้าช่วยในการผลิตอาหารให้เพียงพอแก่การบริโภค เช่น มีการนำสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเข้าช่วยในการเพาะปลูกเพื่อเพิ่มผลผลิตเป็นเหตุให้เกิดปัญหาตามมามากมายที่สำคัญคือ ปัญหาเกี่ยวกับสุขภาพของประชาชนเนื่องจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืชทุกชนิดเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตหากใช้เกินความจำเป็นหรือขาดความระมัดระวังในการใช้แล้ว จะทำให้สารตกค้างหลงเหลืออยู่ในอาหารและสิ่งแวดล้อมได้

เป็นที่ทราบกันดีว่าประเทศไทยเป็นตลาดหลักของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช [1] ในช่วงปี ค.ศ. 1982-1992 มีอัตราการเจริญเติบโตถึง 8.8% และลดลงมาตั้งแต่นั้น ในปี ค.ศ. 1994 มีการขายสารเคมีกำจัดศัตรูพืชถึง 247 ล้านเหรียญดอลลาร์สหรัฐ ตลาดของยากำจัดศัตรูพืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในปีนี้และยังคงอยู่ถึง 51% ของการแบ่งขาย ขณะที่ยาฆ่าแมลงยังคงอยู่ถึง 38% และยาฆ่าเชื้อรา 10% สารเคมีกำจัดศัตรูพืชส่วนใหญ่มีความสำคัญและบริษัทในต่างประเทศยังคงเป็นตลาดการค้าขายรายย่อยที่ใหญ่ที่สุดคือ Monsanto มีตลาดค้าขาย 15% ตามมาด้วย Ciba Geigy (ปัจจุบันคือ Novartis) Du Pont Cyanamid Bayer และ Rhône Poulenc พบว่าประเทศที่กำลังพัฒนาส่วนใหญ่ใช้ยาฆ่าแมลง 3 ชนิดคือ Organophosphates monocrotophos Methamidophos และ Methyl parathion เมื่อไม่มีการควบคุมจากรัฐบาล การนำเข้าสารเคมีกำจัดศัตรูพืชคาดว่าจะมีการเพิ่มขึ้นในอนาคตซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่การเพาะปลูกทำให้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชมีผลต่อความต้องการของเกษตรกร

สารประกอบออร์กาโนฟอสเฟต (organophosphate compound) [2] เป็นสารเคมีมีพิษที่ใช้ในทางเกษตรกรรมซึ่งมีหมู่ออร์กาโนฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบได้แก่ Disulfoton Phorate Dimethoate Ciodrin Dichlorvos Dioxathion Ruelene Carbophenothion Supona TEPP EPN HETP Parathion Malathion Ronnel Coumaphos Diazinon Trichlorfon Paraoxon Potasan Dimefox Mipafox Schradan Sevin Chlorpyrifos และ Dimeton ยาฆ่าแมลงกลุ่มที่ประกอบด้วยเอสเทอร์ เอไมด์ หรืออนุพันธ์อย่างง่ายของกรดฟอสฟอริก และไทออฟอสฟอริก บางชนิดมีความเป็นพิษน้อยใช้เป็นยาฆ่าแมลงสังเคราะห์ในการต่อต้านพาราไซต์จากภายนอกและภายในของสัตว์ ได้แก่ Chlorthion Thichlorphon Diazinon Fenchlorphos และ Dichlorvos ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตจะมีความเป็นพิษที่ส่งผลต่อแมลง Malathion Paraoxon Parathion และ Potasan

เกิดปฏิกิริยาโดยทั่วไปกับคลอรีนเนท ไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbons) และเกิดพิษเมื่อสัมผัส ขณะที่ยังชนิดอื่นเช่น Dimefox Mipafox และ Schradan เป็นยาฆ่าแมลงสังเคราะห์ที่มีความจำเพาะซึ่งจะดูดซึมอยู่ในน้ำหล่อเลี้ยงพืชและยังคงมีผลเป็นระยะเวลานาน นอกจากนี้ยังมีความเป็นพิษต่อสัตว์ที่กินพืช แต่ไม่มีผลต่อสัตว์ที่กินสัตว์ที่กินพืชเป็นอาหาร

ดังนั้นในการตรวจวัดสารประกอบออร์กาโนฟอสเฟตที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำ ดิน พืช ผักต่างๆสามารถตรวจวัดได้หลายวิธีได้แก่ การวิเคราะห์โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography; GC) [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] โครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) [11] และโครมาโตกราฟีของเหลว (Liquid Chromatography) [12, 13] วิธีการเหล่านี้ต้องมีการเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ ทำให้สูญเสียเวลาและค่าใช้จ่าย นอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้โดยเฉพาะ GC และ HPLC มีราคาแพงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์สูง การใช้งานค่อนข้างซับซ้อนและต้องการผู้ชำนาญงานโดยเฉพาะ เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดเหล่านี้ จึงมีการพัฒนาวิธีการตรวจวัดที่อาศัยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าได้แก่ การวิเคราะห์โดยวิธีทางโวลแทมเมตรี [14, 15, 16, 17, 18, 19] ซึ่งมีความเที่ยงตรง รวดเร็ว และสามารถวัดซ้ำได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ศึกษาการตรวจวัดสารประกอบออร์กาโนฟอสเฟตด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าได้แก่ ไชคลิกโวลแทมเมตรีและดิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรีโดยใช้ขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เนื่องจากสารนี้สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและเลือกชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการตรวจวัดฟิโนโตรไทออนโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าได้แก่ ไชคลิกโวลแทมเมตรีและดิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี

1.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ pH ของสารละลายบอแรกซ์ ผลของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ชนิดของสารละลายที่ใช้ในการทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ปริมาตรของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ผลของซิงค์ออกไซด์ และอัตราการสแกน ในการตรวจวัดฟิโนโตรไทออนด้วยขั้วกราไฟต์และขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าได้แก่ ไชคลิกโวลแทมเมตรีและดิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี

1.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นได้แก่ ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงขีดจำกัดของการตรวจวัด ค่าการทำซ้ำ และอายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นใหม่

1.3.4 วิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลในโครโทนอนในตัวอย่างผักได้แก่ ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริก  
ชี้หนูด้วยขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

#### 1.4 ผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ ประโยชน์

1.4.1 เป็นการพัฒนาเทคนิคสำหรับตรวจวัดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตที่เกิด  
จากการปนเปื้อนของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช แทนวิธีการแบบเดิมที่ต้องใช้เครื่องมือราคาแพงและ  
บุคลากรที่มีความชำนาญในการวิเคราะห์เฉพาะด้าน

1.4.2 เป็นแนวทางในการพัฒนาขั้วไฟฟ้าเพื่อตรวจวัดสารพิษอื่นๆที่ก่อให้เกิดมลพิษแก่  
สิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

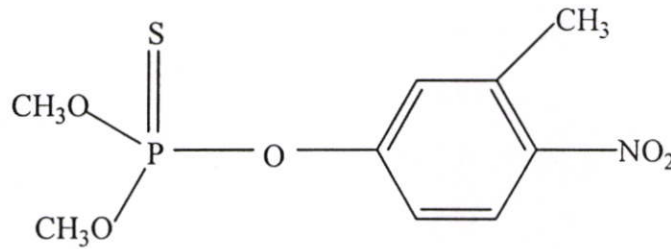
### 2.1 ฟีนโตรไทออน (Fenitrothion) [20, 21]

ฟีนโตรไทออนเป็นยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตซึ่งมีการใช้อย่างกว้างขวางในทางเกษตรกรรมเนื่องจากไปทำลายแมลงต่างๆและสัตว์ทะเลประเภทกุ้ง ปู และสัตว์ชนิดต่างๆที่มีเปลือกแข็งที่ไปรบกวนผลผลิตหรือเก็บรักษาผลผลิตทางเกษตรกรรม

สมบัติของฟีนโตรไทออน [22]

สูตรเคมี  $C_9H_{12}NO_5PS$

สูตรโครงสร้าง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของฟีนโตรไทออน [22]

มวลโมเลกุลสัมพัทธ์	277.25
ชื่อสามัญ	Fenitrothion
ชื่อทาง CAS	O,O-dimethyl O-(3-methyl-4-nitro-phenyl)phosphorothioate
ชื่อ IUPAC	O,O-dimethyl O-(4-nitro-m-tolyl)phosphorothioate
ชื่ออื่น	Accothion, Agrothion, Bayer 41831, Bayer S 5660, Cytel, Dybar, Fenitox, MEP, Novathion, Nuvanol, Cyfen, Sumitomo 1102A
ชื่อทางการค้า	Metathion, Novathion, Sumithion, Folithion
หมายเลขของ CAS	122-14-5

## คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟีนโตรโทอน [22]

ทางกายภาพและทางเคมี	คุณสมบัติ
สถานะ	ของเหลว
สี	เหลือง-น้ำตาล
กลิ่น	มีกลิ่น
จุดหลอมเหลว	0.3 °C
จุดเดือด	140-145 °C (decomp.)/0.1 mmHg
จุดวาบไฟ	157 °C
ความดันไอ	18 mPa ที่อุณหภูมิ 20 °C 6 x 10 <sup>-6</sup> mmHg ที่อุณหภูมิ 20 °C
ความหนาแน่น	$d_{25}^{25}$ 1.32 – 1.34; $d_4^{25}$ 1.3227
ค่าสัมประสิทธิ์ของการแยก (n-Octanol/น้ำ)	3.16
การละลายน้ำ	14 mg/l ที่อุณหภูมิ 30 °C
การละลายในตัวทำละลายอินทรีย์	ละลายได้ง่ายในแอลกอฮอล์ เอสเทอร์ คีโตน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน น้อยกว่า 1000 g/kg ในไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) เมทานอล (Methanol) ไชลีน (Xylene) น้อยกว่า 193 g/kg ใน propan-2-ol น้อยกว่า 42 g/kg ในเฮกเซน (Hexane) ที่อุณหภูมิ 20-25°C
ความเสถียร	เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดย Alkali มีครึ่งชีวิต 4.5 ชั่วโมง ใน 0.01 N NaOH ที่อุณหภูมิ 30 °C และสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 145°C

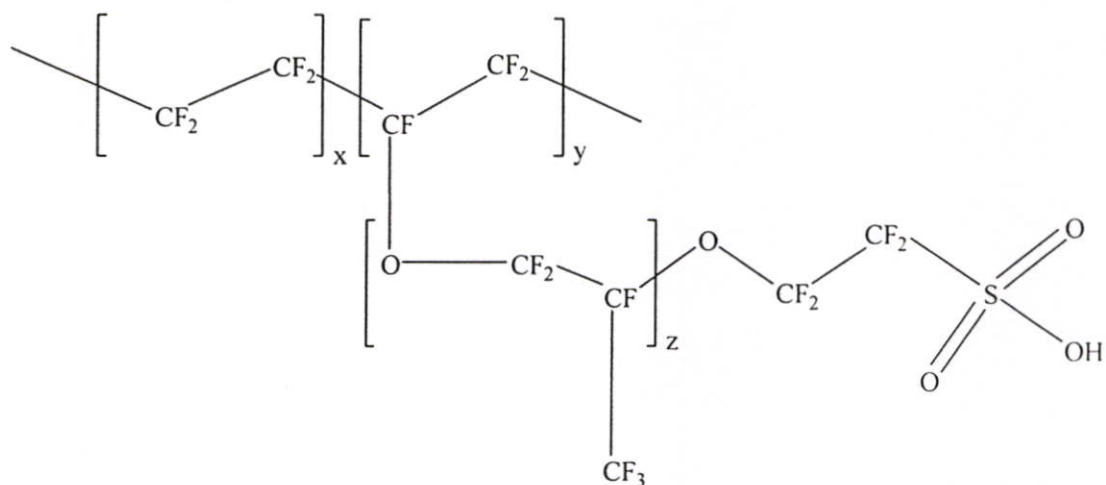
## 2.2 สารละลายแนฟิออน (Nafion solution) [23]

แนฟิออนเป็นสารโคโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่นิยมนำมาใช้เป็นตัวตรงวัสดุต่างๆ เนื่องจากมีความคงทนและให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงจึงนำมาใช้ในทางไฟฟ้าเคมี

สมบัติของสารละลายแนฟิออน [23]

สูตรเคมี  $C_7HF_{13}O_5S \cdot C_2F_4$

## สูตรโครงสร้าง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแนฟิออน [23]

มวลโมเลกุลสัมพัทธ์

ชื่อสามัญ Nafion

ชื่อ IUPAC Sulfonated tetrafluoroethylene copolymer

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารละลายแนฟิออน [23]

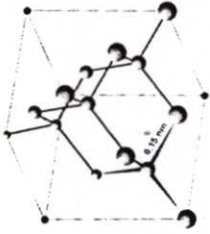
ทางกายภาพและทางเคมี	คุณสมบัติ
สถานะ	ของเหลว
สี	ใส
กลิ่น	มีกลิ่น
ค่ากรด-เบส	เป็นกรดสูง ( $pK_a \sim -6$ )
การนำไฟฟ้า	นำไฟฟ้าได้ดี
การทนความร้อน	190 °C

## 2.3 คาร์บอน (Carbon)

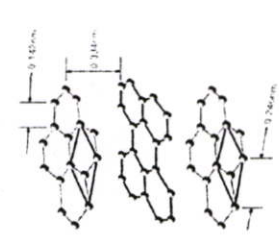
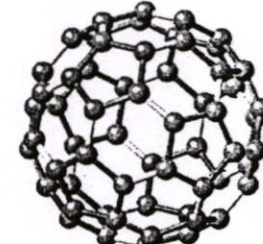
### 2.3.1 ชนิดของคาร์บอน

คาร์บอนมีโครงสร้างการจัดเรียงอิเล็กตรอนคือ  $1s^2 2s^2 2p^2$  และเป็นธาตุที่มีประจุศูนย์อย่างมากมาใช้ในการสร้างพันธะกับสารต่างๆซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โครงสร้างของคาร์บอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 แบบใหญ่ๆ ดังตารางที่ 2.3

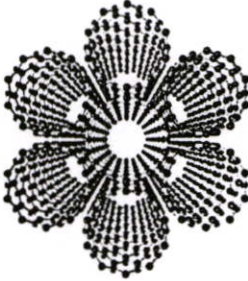
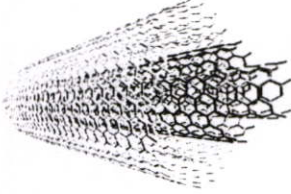
ตารางที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของคาร์บอน

ชนิดของคาร์บอน	การจัดเรียงอิเล็กตรอน	โครงสร้าง	ลักษณะ	คุณสมบัติ
เพชร (Diamond) [24-27, 30]	การจัดเรียงอิเล็กตรอน แบบ $sp^3$	แบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral Structure) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ เป็นของแข็ง</li> <li>◆ เป็นหินที่ล้ำค่าซึ่งมีลักษณะโปร่งแสง และมีหลายสี</li> <li>◆ แข็งแรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ มีความเสถียรน้อยกว่ากราไฟต์</li> <li>◆ ไม่นำไฟฟ้า</li> </ul>

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ชนิดของคาร์บอน	การจัดเรียงอิเล็กตรอน	โครงสร้าง	ลักษณะ	คุณสมบัติ
<p>กราไฟต์ (Graphite) [24, 28, 31]</p>	<p>แบบ <math>sp^2</math></p>	<p>แบนราบรูปเสกษะโกนอล</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ เป็นของแข็งสีเทา</li> <li>◆ อ่อน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ มีความเสถียร</li> <li>◆ นำไฟฟ้าซึ่งค่าการนำไฟฟ้าสูงตามทิศทางของชั้นกราฟีน</li> </ul>
<p>คาร์บอน-60 [24, 29, 32, 33] หรือบั๊กกิบอล (Bucky-ball)</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ มีรูปทรงแบบเสกษะโกนอล 20 รูปและเพนตะโกนอล 12 รูป</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ คล้ายลูกฟุตบอล</li> <li>◆ อะตอมคาร์บอนตรงตำแหน่งมุมของรูปทรงแบบเสกษะโกนอลแต่ละอันมีพันธะยาวในแต่ละด้าน ทำให้เกิดเป็นโพรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ <math>1 \times 10^{-9}</math> m (1nm)</li> </ul>	

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ชนิดของการบอน	การจัดเรียงอิเล็กตรอน	โครงสร้าง	ลักษณะ	คุณสมบัติ
<p>ซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ (Single Walled Carbon Nanotubes; SWNTs) [24, 25, 34]</p>	<p>แบบ <math>sp^2</math></p>	<p>◆ จัดเรียงตัวในแผ่นกราฟีนรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งมันเข้าไปเป็นทิวป์ทรงกระบอกกลาง</p> 	<p>◆ มีรูปร่างเป็นทรงกลมกรวย ทิวป์ หรือรูปทรงที่ซับซ้อน</p> <p>◆ มี <math>\varnothing</math> ~1- 50 nm และยาว 10- 100 <math>\mu</math>m</p>	<p>◆ นำไฟฟ้า</p>
<p>มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ (Multi Carbon Nanotubes; MWNTs) [24, 25, 34, 35]</p>	<p>แบบ <math>sp^2</math></p>		<p>◆ เป็นท่อกลวงและมีคาร์บอนชั้นกลางๆชั้นของทิวป์ซึ่งแต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 nm</p> <p>◆ <math>\varnothing</math> ใน 1.5-15 nm</p> <p>◆ <math>\varnothing</math> นอก 2.5-30 nm</p>	<p>◆ ทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีทั้งประเภทเป็นโลหะและสารกึ่งตัวนำ</p> <p>◆ นำไฟฟ้า</p>

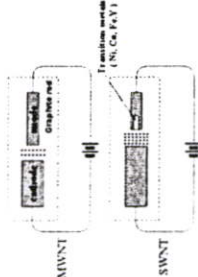
### 2.3.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์มีหลายวิธี ดังตารางที่ 2.4

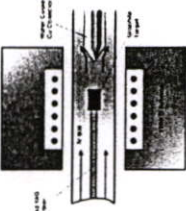
ตารางที่ 2.4 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

วิธีการสังเคราะห์นาโนทิวป์	หลักการสังเคราะห์	ประสิทธิภาพของผลผลิต	ผลผลิต		ข้อดี	ข้อเสีย
			SWNT	MWNTs		
Arc-discharge (Arc-Evaporation Method) [24, 26, 34]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ใช้แท่งกราไฟต์ 2 แท่งเป็นขั้วแคโทด (ลบ) และขั้วแอโนด (บวก)</li> <li>◆ เกิดการ Arc เมื่อให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป (ประมาณ 50 A) ในบรรยากาศของแก๊สฮีเลียม</li> <li>◆ อิเล็กตรอนจำนวนมากจาก Arc-discharge เคลื่อนที่ไปขั้วแอโนดและชนกันภายในแท่งแอโนด ทำให้เกิดกลุ่มก้อนของคาร์บอน</li> <li>◆ โดยการชนกันจะลดลง จนถึงอุณหภูมิต่ำและรวมตัวกันบนผิวของแท่งกราไฟต์ที่เป็นขั้วแคโทด</li> </ul>	30-90%	<ul style="list-style-type: none"> <li>ได้</li> <li>◆ ขนาดเส้น</li> <li>◆ <math>\varnothing</math> 6-1.4 nm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ได้</li> <li>◆ ขนาดเส้น</li> <li>◆ <math>\varnothing</math> 1-3 nm</li> <li>◆ <math>\varnothing</math> ภายนอก ~10 nm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ เป็นวิธีที่ง่าย</li> <li>◆ ค่าใช้จ่ายถูก</li> <li>◆ ทิวป์ที่ได้มีบริเวณที่บกพร่องน้อย</li> <li>◆ สามารถทำได้ในควมดันบรรยากาศห้อง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ CNTs มีขนาดไม่สม่ำเสมอและความยาวของทิวป์สั้น</li> <li>◆ มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก</li> <li>◆ ให้คาร์บอนนาโนทิวป์จำนวนน้อย</li> </ul>

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

วิธีการสังเคราะห์นาโนทิวบ์	หลักการสังเคราะห์	ประสิทธิภาพของผลผลิต	ผลผลิต		ข้อดี	ข้อเสีย
			SWNT	MWNTs		
	<p>◆ วิธีนี้สามารถใช้ตัวเร่งหรือไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ได้ โดยตัวเร่งจะไปช่วยทำลายโมเลกุลของแก๊สที่อยู่ในคาร์บอนทำให้เกิดเป็นทิวบ์ได้</p> 					
Laser Vaporization (Laser ablation) [24, 26, 34, 35]	<p>◆ ใช้แสงเลเซอร์เช่น Nd:YAG คือให้เลเซอร์ 2 ถ้าที่มีความถี่ของพัลส์ในเวลา 50 ns (<math>10^{-9}</math> s)</p> <p>◆ ทำให้กราฟไฟต์เป้าหมายระเหยกลายเป็นไอในเตาอบที่อุณหภูมิ 1200 °C ◆ ในเตาอบเต็มไปด้วยแก๊สฮีเลียมหรือแก๊สอาร์กอนเพื่อรักษาความดันในเตาอบที่ 500 Torr</p>	70-90%	ได้	ไม่ได	<p>◆ ให้ผลิตภัณฑ์มากกว่าวิธี Arc-discharge</p> <p>◆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างที่ดีมาก</p> <p>◆ มีความบริสุทธิ์สูง</p> <p>◆ ทิวบ์ที่ได้มีบริเวณที่บกพร่องน้อย</p>	◆ มีราคาแพง เนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูง

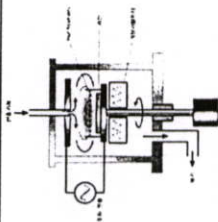
ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

วิธีการสังเคราะห์นาโนทิวบ์	หลักการสังเคราะห์	ประสิทธิภาพของผลผลิต	ผลผลิต		ข้อดี	ข้อเสีย
			SWNT	MWNTs		
Chemical Vapor Deposition (CVD) [24, 34]	<p>◆ กลุ่มก้อนคาร์บอนจากกราฟไฟต์เป้าหมาย ถูกทำให้เย็นดูดซับและรวมตัวกันแน่นบน CuCollector ที่อุณหภูมิต่ำ</p> 	95-98%	ได้	ได้	<p>◆ สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น</p> <p>◆ สามารถควบคุมขนาดความยาวของทิวบ์ได้ง่าย</p>	<p>◆ เมื่อเทียบกับวิธี Laser Vaporization ทิวบ์ที่ได้มีบริเวณที่บกพร่องอยู่บ้างแต่ไม่มาก</p>
	<p>◆ เป็นการแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมเช่น แก๊สมีเทน (Methane) บนโลหะ (เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์)</p> <p>◆ โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมาเข้าช่วย</p> <p>◆ อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400 ถึง ~1200 °C</p>		<p>◆ ขนาด</p> <p>ยาว</p> <p>◆ <math>\varnothing</math></p> <p>0.6-4 nm</p>	<p>◆ ขนาด</p> <p>ยาว</p> <p>(&gt;20 nm)</p> <p>◆ <math>\varnothing</math></p>		

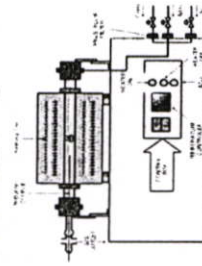
ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

วิธีการสังเคราะห์นาโนทิวป์	หลักการสังเคราะห์	ประสิทธิภาพของผลผลิต	ผลผลิต		ข้อดี	ข้อเสีย
			SWNT	MWNTs		
Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (Plasma CVD) [24]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ สังเคราะห์บนแก้วที่เป็นส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Soda lime glass)</li> <li>◆ โดยทั่วไปพลิ่งที่ใช้ใน Plasma CVD เป็นสัคย์ไฟฟ้ากระแสตรงและมีความถี่คลื่นวิทยุ (13.56 MHz) และความถี่คลื่นไมโครเวฟ(2.47 GHz) สูงให้เข้าไปด้วย</li> <li>◆ โดยการให้ความถี่สูงๆแก่ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วทำให้เกิดการเรืองแสงออกมาใน Chamber หรือ Reaction furnace</li> </ul>	-	ไม่ได้	ได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้</li> <li>◆ มีความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี</li> <li>◆ สามารถสังเคราะห์ CNTs ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า Thermal CVD</li> <li>◆ กำหนดทิศทางของทิวป์ได้ง่าย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ไม่สามารถสังเคราะห์ SWNTs</li> </ul>

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

วิธีการสังเคราะห์นาโนทิวบ์	หลักการสังเคราะห์	ประสิทธิภาพของผลผลิต	ผลผลิต		ข้อดี	ข้อเสีย
			SWNT	MWNTs		
Thermal Chemical Vapor Deposition (Thermal CVD) [24]	 <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ใช้โลหะตัวเร่ง 3 ชนิดคือ เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) หรืออัลลอยด์เกาะสะสมเริ่มบนแกน</li> <li>◆ หลังจากนั้นแกะออกจากแกนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเจือจางด้วยน้ำกลั่น</li> <li>◆ ตัวอย่างวางอยู่ใน Quartz Boat ตำแหน่ง Boat ใน CVD Reaction Furnace</li> <li>◆ อุณหภูมิโลหะตัวเร่งขนาดเล็กน้อยมาก (ขนาดนาโน)</li> <li>◆ เป็นการรวมตัวหลังจากเพิ่มแผ่นฟิล์ม</li> </ul>	-	ได้	ได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ เครื่องมือทำได้ง่าย</li> <li>◆ ให้ผลดีกึ่งที่ดี</li> <li>◆ วิธีการผลิตและแหล่งของไฮโดรคาร์บอนเพียงพอสำหรับสังเคราะห์สารจำนวนมากและการควบคุมของโครงสร้าง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ไม่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันบนแกนดังเช่นเปลี่ยนแปลงการไหลของแก๊สหลักที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจนถึงแก๊สที่ไม่เสถียร ซึ่งมีผลต่อความไวของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและตำแหน่งใน Chamber อีกด้วย</li> </ul>

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

วิธีการสังเคราะห์นาโนทิวป์	หลักการสังเคราะห์	ประสิทธิภาพของผลผลิต	ผลผลิต		ข้อดี	ข้อเสีย
			SWNT	MWNTs		
Vapor Phase Growth [24]	<p>ของโลหะตัวเร่ง โดยใช้แก๊สเอมโมเนียที่อุณหภูมิ 750 ถึง 1050 °C</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ โดยใช้แก๊สที่เหมาะสมและโลหะตัวเร่งเข้าไปใน Chamber โดยตรงโดยไม่ต้องใช้แก๊ส</li> <li>◆ แก๊สที่เหมาะสมเช่น C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> CH<sub>4</sub> C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></li> </ul>	-	<p>SWNT</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ได้</li> <li>◆ ยาว (&gt;20 mm)</li> <li>◆ ∅ 2-4 nm</li> </ul>	<p>MWNTs</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ไม่ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ สังเคราะห์ทิวป์ที่ยาวมาก ๆ ได้ (&gt; 20 mm)</li> <li>◆ สังเคราะห์ CNTs จำนวนมาก ๆ ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ไม่สามารถควบคุมทิศทางและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่ายนัก</li> </ul>

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

วิธีการสังเคราะห์นาโนทิวป์	หลักการสังเคราะห์	ประสิทธิภาพของผลผลิต	ผลผลิต		ข้อดี	ข้อเสีย
			SWNT	MWNTs		
Hot Filament enhanced CVD (HF-CVD) [48]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ใช้เส้นลวด (Filament) ที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกแก๊สออก</li> <li>◆ ใช้อนุภาคโลหะตัวเร่ง</li> <li>◆ ใช้แก๊สของโลหะเช่น Ferrocene หรือ Fe(CO)<sub>5</sub> แทนอนุภาคโลหะตัวเร่ง</li> </ul>	-	ได้	ไม่ได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ทำได้ง่าย</li> <li>◆ ค่าใช้จ่ายถูก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ คุณภาพของ CNTs ที่สังเคราะห์ยังมีคุณภาพต่ำอยู่</li> </ul>
High-Pressure Conversion (HiPCO) [24]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไอโรนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน</li> </ul>	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ มีความบริสุทธิ์สูง (&gt; 80%)</li> <li>◆ สังเคราะห์ CNTs จำนวนมากได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ไม่สามารถควบคุมทิศทางและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่ายนัก</li> </ul>
Electrolysis [24]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ขั้วแอโนดเป็นกราไฟต์คาร์บอน</li> <li>◆ อุณหภูมิ ~600 °C ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอน</li> <li>◆ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 3 ถึง 20 A และศักย์ไฟฟ้า 20 V</li> </ul>	-	-	ได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ยาว</li> <li>◆ <math>\geq 0.5 \mu\text{m}</math></li> <li>◆ <math>\varnothing 2-10 \text{ nm}</math></li> </ul>	

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

วิธีการสังเคราะห์นาโนทิวป์	หลักการตั้งคราะห์	ประสิทธิภาพของผลผลิต	ผลผลิต		ข้อดี	ข้อเสีย
			SWNT	MWNTs		
Flame Synthesis [24]	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ความร้อนจากการเผาไหม้ (ของแก๊สมีเทน) เป็นแหล่งความร้อนของการผลิตในบรรยากาศที่มีออกซิเจนน้อย</li> <li>◆ โดยการไหลของไฮโดรคาร์บอนเหมือนกับ <math>C_2H_2</math> และตัวเร่งใน Diffusion Flam Atmosphere มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 600 ถึง <math>1300\text{ }^{\circ}C</math></li> </ul>	-	ได้	ได้	-	-

77959

### 2.3.3 คุณสมบัติของการบอมนาโนทิวป์

คุณสมบัติของการบอมนาโนทิวป์ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น แสดงดังตารางที่ 2.5.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติต่างๆของการบอมนาโนทิวป์

Material	กลศาสตร์[25-27, 37]		ไฟฟ้า [25, 38]	ความร้อน [24, 39]	เคมี [24]
	Young's Modulus (Elastic Modulus) (GPa)	Tensile Strength (GPa)			
Single wall nanotube	1054	150	◆ นำไฟฟ้า	◆ มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง ◆ เสถียรในสภาวะแก๊สอาร์กอน ◆ มีความต้านทานความเป็นกรดแก่สูง ◆ มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง	◆ ปกติจะไม่ทำปฏิกิริยา
Multi wall nanotube	1200	150	◆ นำไฟฟ้า	◆ มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง	◆ ปกติจะไม่ทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

Material	กลศาสตร์[25-27, 37]			ไฟฟ้า [25, 38]	ความร้อน [24, 39]	เคมี [24]
	Young's Modulus (Elastic Modulus) (GPa)	Tensile Strength (GPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )			
Steel	208	0.4	7.8	◆ นำไฟฟ้า ◆ ไม่นำไฟฟ้า ◆ ไม่นำไฟฟ้า	แก๊สอาร์กอน ◆ มีความต้านทาน ความเป็นกรดแก่สูง ◆ นำความร้อน ◆ ไม่นำความร้อน ◆ ไม่นำความร้อน	◆ เกิดปฏิกิริยา ◆ เกิดปฏิกิริยา ◆ เกิดปฏิกิริยา
Epoxy	3.5	0.005	1.25			
Wood	16	0.008	0.6			

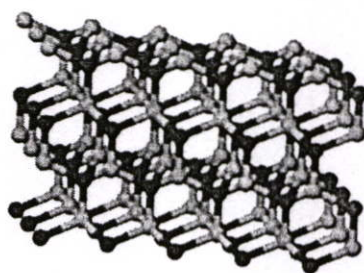
## 2.4 ผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide (ZnO) nanopowder) [40, 41, 42]

ผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ได้ถูกเลือกมาใช้ในทางไฟฟ้าและโฟโตนิก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกึ่งตัวนำอื่นๆซึ่งซิงค์ออกไซด์มีการกระตุ้นพลังงานสูงถึง 60 meV และสามารถนำมาใช้งานได้หลายอย่างเช่น Piezoelectric Ferroelectric และ Ferromagnetic ในอนาคตจะได้มีการนำมาพัฒนาใช้เป็นไบโอเซนเซอร์ ยูวีดีเทคเตอร์ และ FED เป็นต้น

สมบัติผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

สูตรเคมี ZnO

สูตรโครงสร้าง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ [41]

มวลโมเลกุลสัมพัทธ์ 81.4084 g/mol

ชื่ออื่น Zinc Oxide (ZnO) nanopowder

Nano Zinc Oxide (ZnO) powder

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซิงค์ออกไซด์ [40,41]

ทางกายภาพและทางเคมี	คุณสมบัติ
สถานะ	ของแข็ง
สี	ขาว
จุดหลอมเหลว	1980 °C
ความหนาแน่น	5.6 g/cm <sup>3</sup>
การละลายน้ำ	ไม่ละลาย
ความบริสุทธิ์	มากกว่า 99.7%
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	ประมาณ 30 นาโนเมตร
พื้นที่ผิว	ประมาณ 35 m <sup>2</sup> /g

## 2.5 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า

### 2.5.1 การเคลื่อนที่ของไอออนมีด้วยกัน 3 แบบดังนี้

2.5.1.1 การแพร่ (diffusion) [43-49] เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุล เนื่องจากความเข้มข้น โดยเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ หรือจากบริเวณที่มีความหนาแน่นมากไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อย จนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล อัตราเร็วในการแพร่ขึ้นอยู่กับฟลักเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.4

2.5.1.2 การไมเกรชัน (migration) [44] เป็นขบวนการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยให้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป ทำให้ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าลบ และไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าบวก เป็นผลให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนและบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุเพิ่มขึ้นบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ซึ่งประจุต่างๆที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะถูกดึงดูดหรือต่อต้านด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต ดังรูปที่ 2.4

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ [50] สามารถหาได้จากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยารีดักชันซึ่งทำให้ไอออนเกิดการเคลื่อนที่ กระแสไมเกรชันมีค่าเป็นลบสำหรับปฏิกิริยารีดักชันของไอออนบวกหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนลบ และมีค่าเป็นบวกสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนบวกหรือปฏิกิริยารีดักชันของไอออนลบ ดังนั้นกระแสไมเกรชันอาจไปเพิ่มหรือลดค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดของปฏิกิริยาจึงต้องทำให้กระแสไมเกรชันอาจมีค่าใกล้เคียงหรือลดการเคลื่อนที่ของสาร Electroactive โดยไปเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย

2.5.1.3 การคอนเวกชัน (convection) [44] เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนไปยังขั้วไฟฟ้า เนื่องจากการคนสารละลายหรือการไหลของสารละลาย และการหมุนหรือการสั่นของขั้วไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการไหลของของไหล (Fluid Flow) หรือการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นให้เหมาะสม ดังรูปที่ 2.4

### 2.5.2 เทคนิคทางเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า

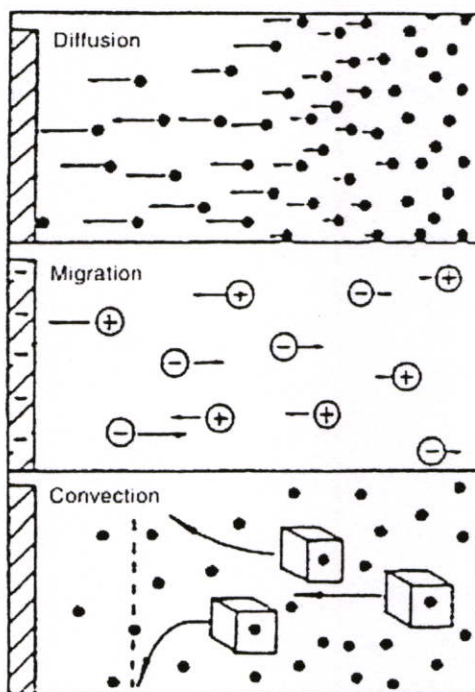
#### 2.5.2.1 ไชคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry ; CV) [50-56]

ไชคลิกโวลแทมเมตรี เป็นเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกกับขั้วไฟฟ้าและปราศจากการคนสารละลาย ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับตัวรีดอกซ์หรือตัวออกซิไดซ์ในสารละลายเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์สัญญาณของกระแสไฟฟ้า สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับพลังงานความร้อนและพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่บริเวณ

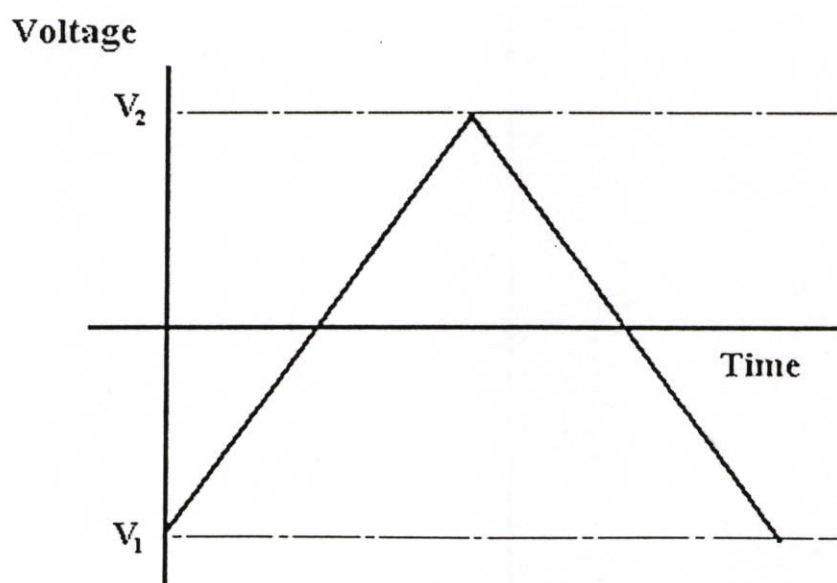
ระหว่างผิวหน้าของสารละลายกับผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเริ่มต้นปฏิกิริยาเคมีของสารละลายเกี่ยวข้องกับทางจลศาสตร์และกลไกโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ไม่เหมือนกัน

ไซคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่วงจรในลักษณะที่เป็นสามเหลี่ยมดังรูปที่

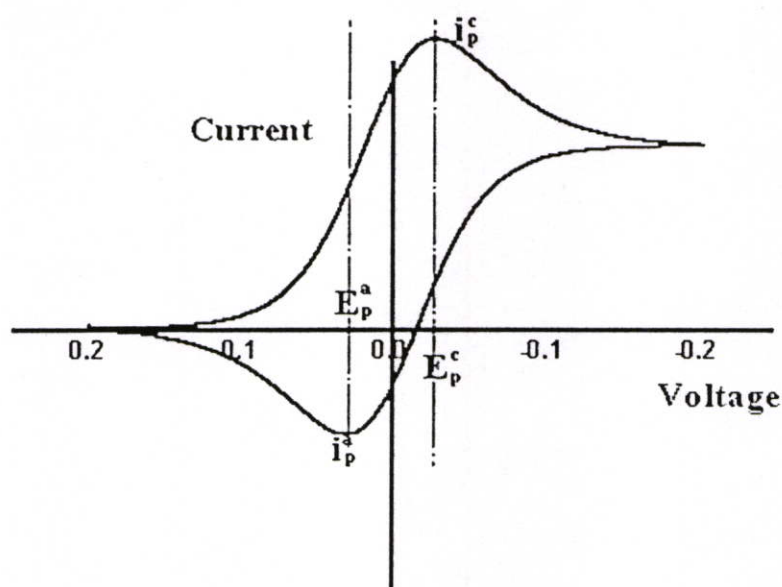
2.5



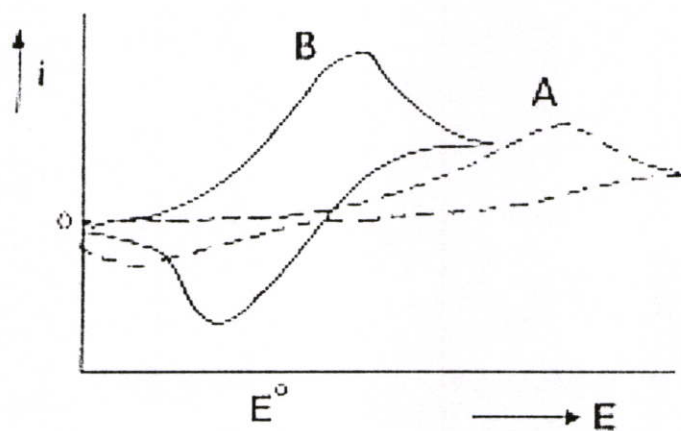
รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบการแพร่ ไมเกรชัน และคอนเวคชัน [44]



รูปที่ 2.5 โวลเทจ โปรแกรมของไซคลิก โวลแทมเมตรี [54]



รูปที่ 2.6 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมแบบผันกลับได้ [54]



รูปที่ 2.7 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมแบบผันกลับไม่ได้ (A) และผันได้ไม่สมบูรณ์ (B) [54]

จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจากนั้นจะค่อยๆลดต่ำลงด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน โวลแทมโมแกรมที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 เมื่อเริ่มสแกนศักย์ไฟฟ้าก็มีกระแสเกิดขึ้นและเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าจนถึงจุดยอดของสามเหลี่ยมก็จะมีกระแสเนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นสูงสุด (กรณีที่ให้ศักย์ไฟฟ้าจากบวกไปลบ) เรียกว่า พิก เมื่อลดศักย์ไฟฟ้าลงด้วยอัตราเร็วเท่าเดิม กระแสจะค่อยๆลดลงจนถึงต่ำสุดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาในทิศทางตรงกันข้าม ลักษณะของกระแสที่ได้จะมีพิกคล้ายกับพิกแรกแต่มีทิศทางตรงกันข้าม เฉพาะในกรณีที่ปฏิกิริยาที่ผันกลับได้

(reversible) แต่จะไม่เกิดฟลักซ์ปฏิกิริยานั้นผันกลับไม่ได้ (irreversible) ส่วนปฏิกิริยาที่ผันได้ไม่สมบูรณ์ (quasireversible) จะได้ฟลักซ์ที่มีลักษณะก้ำกึ่งระหว่างฟลักซ์ของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้และปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ สัญญาณไซคลิก โวลแทมโมแกรมสำหรับปฏิกิริยาผันกลับได้สามารถหาได้โดย [55]

- การแยกศักย์ไฟฟ้าระหว่างฟลักซ์กระแสไฟฟ้าคือ

$$\Delta E = E_p^a - E_p^c = \frac{59}{n} mV \quad (2.1)$$

- ตำแหน่งของฟลักซ์ไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงไปกับฟังก์ชันของอัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า
- อัตราส่วนของฟลักซ์กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1

$$\left| \frac{i_p^a}{i_p^c} \right| = 1 \quad (2.2)$$

- ฟลักซ์กระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของโวลแทมโมแกรมศักย์ไฟฟ้า

$$i_p^a \text{ and } i_p^c \propto \sqrt{v} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_p^c$  คือ ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าของฟลักซ์ที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันหรือศักย์ไฟฟ้าของฟลักซ์ออกซิเดชัน (V)

$E_p^a$  คือ ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าของฟลักซ์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือศักย์ไฟฟ้าของฟลักซ์รีดักชัน (V)

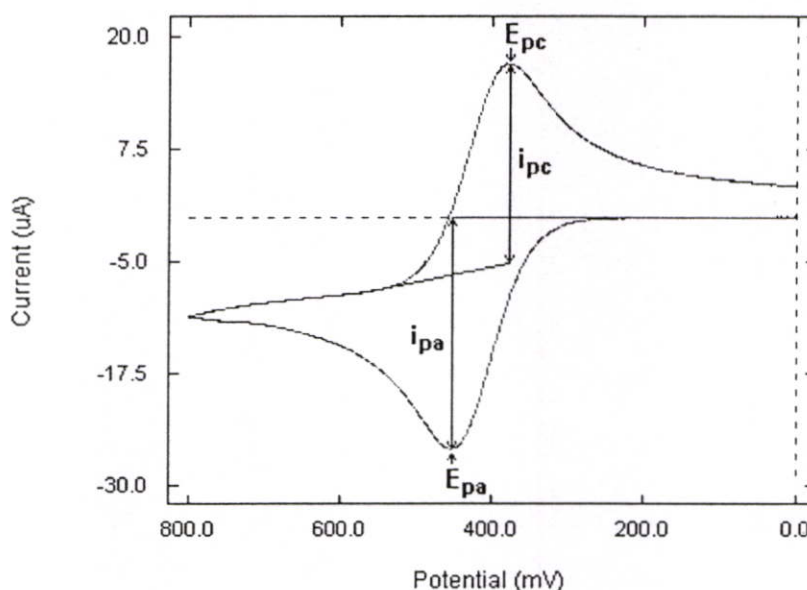
(V)

$i_p^c$  คือ กระแสฟลักซ์ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันหรือกระแสไฟฟ้าของฟลักซ์ออกซิเดชัน (A)

$i_p^a$  คือ กระแสฟลักซ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือกระแสไฟฟ้าของฟลักซ์รีดักชัน (A)

สำหรับปฏิกิริยาผันกลับได้ที่ช้าๆ กระแสไฟฟ้าของฟลักซ์ออกซิเดชันและฟลักซ์รีดักชันมีค่าเท่ากันแต่มีสัญญาณตรงกันข้ามและความแตกต่างในศักย์ไฟฟ้ามีค่า  $0.0592 / n$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนอิเล็กตรอนในครึ่งปฏิกิริยา

ส่วนในการคำนวณที่หาค่ากระแสที่วัดได้จากโวลแทมโมแกรมทำได้โดยหาความสูงของฟลักซ์สามารถแสดงในรูปที่ 2.8 สามารถหาความสูงได้โดยการลากเบสไลน์ (Baseline) แล้ววัดส่วนสูงที่สุดมาถึงเส้นเบสไลน์ ส่วนกระแสฟลักซ์ที่วัดได้ ( $i_p$ ) คำนวณได้จากสมการของ Randles-Sevcik โดยความสูงของฟลักซ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของ Analyte ซึ่งใช้กับปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ดังสมการ 2.4 [57-60]



รูปที่ 2.8 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาผันกลับได้แสดงวิธีการหาความสูงของกระแสฟลัก เมื่อ  $i_{pc}$  และ  $E_{pc}$  คือความสูงของกระแสไฟฟ้าและตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าของฟลักที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันตามลำดับ ส่วน  $i_{pa}$  และ  $E_{pa}$  คือความสูงของกระแสไฟฟ้าและตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าฟลักที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตามลำดับ [36]

$$i_p = 0.4463 n F A C (n F v D / R T)^{1/2} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $i_p$  คือ การแสฟลัก (A)

$n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดในครึ่งปฏิกิริยา

$F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday's Constant; 96485 C/mol)

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Universal Gas Constant; 8.314 J/mol. K)

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature; K)

$A$  คือ พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ( $\text{cm}^2$ )

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารในสารละลายบัลค์ ( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )

$D$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$V$  คือ อัตราการสแกน ( $\text{V}/\text{s}$ )

ถ้าสมมติให้อุณหภูมิเป็น  $25^\circ\text{C}$  (298.15 K) สามารถเขียนสมการของ Randles-Sevcik ได้สมการใหม่ ดังสมการที่ 2.5 คือ

$$i_p = 2.69 \times 10^5 n^{3/2} ACD^{1/2} v^{1/2} \quad (2.5)$$

ส่วนตำแหน่งศักย์พิก (E<sub>p</sub>) และความสูงของกระแสพิก (i<sub>p</sub>) ของปฏิกิริยา Quasireversible และ Irreversible โดยใช้สมการ 2.6 และ 2.7 [44, 61]

$$E_p = E^0 - \frac{RT}{\alpha n_a F} \left[ 0.78 - \ln \frac{k^0}{D^{1/2}} + \ln \left( \frac{\alpha n_a F v}{RT} \right)^{1/2} \right] \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยนประจุ  
 $n_a$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนในการแลกเปลี่ยนประจุ  
 $k^0$  คือ ค่าคงที่อัตรามาตรฐาน

$$i_p = 2.99 \times 10^5 n (\alpha n_a)^{1/2} ACD^{1/2} v^{1/2} \quad (2.7)$$

เมื่อนำค่า  $i_p$  มาเขียนพลอตกับค่า  $v^{1/2}$  ถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่ากระบวนการนี้เป็นแบบ Diffusion-control คือกระแสที่ได้จากปฏิกิริยาเป็นกระแสที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ หมายความว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เร็วจนไม่ได้เป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา แต่ไอออน โมเลกุล หรืออนุภาคที่นำไฟฟ้า (Electroactive species) จะเคลื่อนที่จากชั้นสารละลายบัลค์ (Bulk solution) โดยการแพร่เข้าสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า กระแสที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยจึงขึ้นอยู่กับการแพร่เข้ามาของไอออน โมเลกุล หรืออนุภาคที่นำไฟฟ้างกล่าว ดังนั้นจึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ Diffusion-control

ในกรณีที่มีการเกิดสารผลิตภัณฑ์หรือมีอนุภาคที่นำไฟฟ้าติดอยู่ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า กระแสพิกที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ 2.8 [52, 58]

$$i_p = \frac{n^2 F^2}{4RT} v A \Gamma_{ox} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $i_p$  คือ การแสพิก (A)  
 $\Gamma$  คือ ปริมาณฟิล์มเชิงเส้นพื้นที่ผิว (mol/cm<sup>2</sup>)

เมื่อนำ  $i_p$  มาพลอตกราฟกับค่า  $V$  ถ้าได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแสดงว่ากระบวนการเป็นแบบ Surface-control หมายความว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดช้าจนเป็นขั้นกำหนดความเร็วของปฏิกิริยาเพราะว่าไอออน โมเลกุล หรืออนุภาคที่นำไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นจึงถูกควบคุมโดยความเร็วของปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจึงเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบ Surface-control

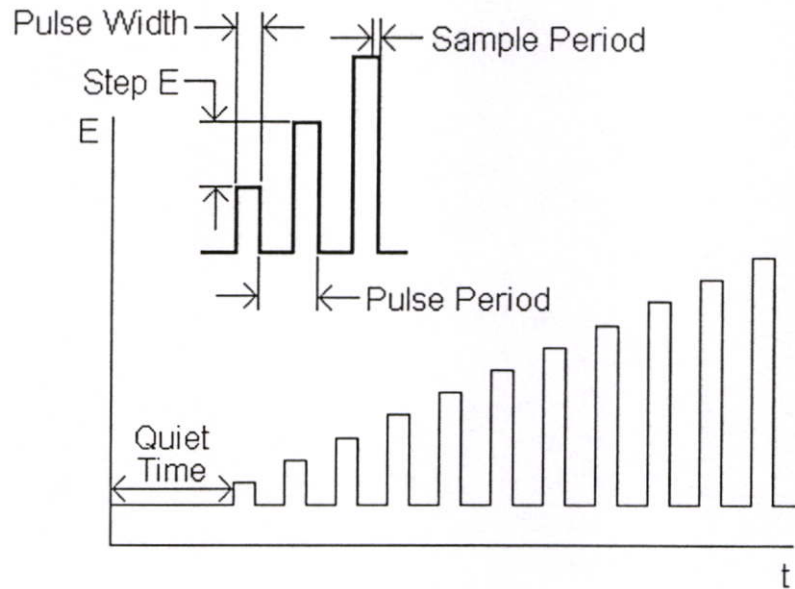
การแยกพิจารณาเป็นปฏิกิริยาแบบ Diffusion-control หรือว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Surface-control ทำได้โดยการพลอตกราฟระหว่าง  $\log i_p$  กับ  $\log V$  ซึ่งจะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแล้วพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟ ถ้าเส้นกราฟมีความชันเท่ากับ 0.5 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Diffusion-control และถ้าเส้นกราฟมีความชันเป็น 1 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Surface-control ถ้ากราฟมีความชันเท่ากับ 1 ที่อัตราสแกนต่ำ และมีความชันเท่ากับ 0.5 ที่อัตราสแกนสูง หมายความว่าปฏิกิริยาเป็นแบบผสมระหว่าง Surface-control กับ Diffusion-control

#### 2.5.2.2 พัลส์โวลแทมเมตรี (Pulse Voltammetry) [62-64]

พัลส์โวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคหนึ่งของเทคนิค โวลแทมเมตรี ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในช่วง ค.ศ. 1950 โดยการปรับปรุงด้านสัญญาณกระตุ้นจากลิเนียร์สแกนในเทคนิคโพลาร์โกราฟีซึ่งมีข้อเสียคือ ใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน การจัดตั้งเครื่องมือไม่ค่อยสะดวกและมีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ต่ำ เมื่อเทียบกับเทคนิคการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี จึงมีการพัฒนาสัญญาณกระตุ้นจากเดิมซึ่งเป็นการเพิ่มศักย์ให้กับวงจรไปเรื่อยๆจนเสร็จสิ้นการวิเคราะห์ (ลิเนียร์สแกน) มาเป็นแบบการให้สัญญาณกระตุ้นเป็นช่วงสั้นๆเรียกว่า พัลส์ ร่วมกับการพัฒนาขั้วไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งต่อมาการใช้ขั้วไฟฟ้าอื่นๆแทนขั้วไฟฟ้าหยดปรอท เกิดเป็นเทคนิควิธีต่างๆในพัลส์โวลแทมเมตรี

สัญญาณการกระตุ้นแบบพัลส์ การให้ศักย์ไฟฟ้ากับวงจรหรือขั้วไฟฟ้า ซึ่งทำได้ 3 ลักษณะดังนี้

2.5.2.2.1 พัลส์ปกติทั่วไป (Normal pulse) เป็นการให้ศักย์ไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าในเวลาสั้นๆ โดยศักย์ไฟฟ้าที่ให้นี้มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงกับเวลาดังรูปที่ 2.9 ดังเช่นในกรณีของขั้วไฟฟ้าหยดปรอทจะให้ศักย์ไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้านานประมาณ 40 ถึง 60 ms ต่อทุกหนึ่งหยดของหยดปรอท ( $2 \text{ s/drop}$ ) โดยศักย์ไฟฟ้าที่ให้นี้มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับเวลา (ทั่วไปประมาณ  $2 \text{ mV/s}$ ) และวัดค่ากระแสของหยดปรอทที่ครึ่งหลังของทุกช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (ประมาณ 20 ถึง 30 ms ของพัลส์) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่หยดปรอทใกล้จะหยดออกจากปลายหลอดแก้ว



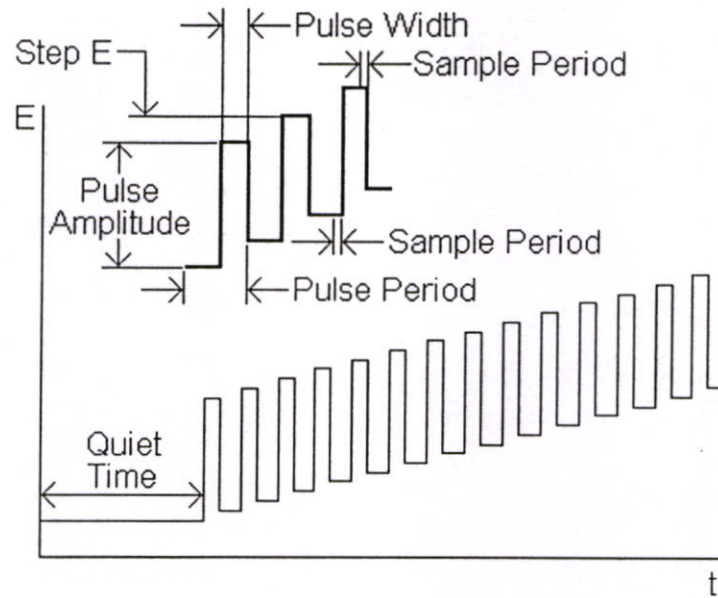
รูปที่ 2.9 สัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์ปกติทั่วไป [63]

2.5.2.2.2. ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ (Differential Pulse) สัญญาณกระตุ้นแบบดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์เป็นการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่คงที่ในลักษณะของพัลส์ให้กับขั้วไฟฟ้าที่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าในแบบลิเนียร์สแกนอยู่แล้วดังรูปที่ 2.10 ฐานของแต่ละพัลส์เป็นเส้นศักย์ไฟฟ้าที่ปกติของวงจรซึ่งค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ส่วนของศักย์ไฟฟ้าที่อยู่สูงพื้นฐานคือพัลส์แต่ละพัลส์ ซึ่งเกิดจากการเพิ่มศักย์ขนาดคงที่แก่วงจรในช่วงเวลาสั้นๆ ดังเช่นในกรณีของขั้วไฟฟ้าหยดปรอทจะมีการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าอย่างเป็นเส้นตรงในอัตรา  $5 \text{ mV/s}$  และมีการให้ศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบพัลส์โดยเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขนาดคงที่ระหว่าง  $20$  ถึง  $100 \text{ mV}$  แก่วงจรในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ  $60 \text{ ms}$  ก่อนหยดปรอทหยดหลุดจากปลายหลอด ( $1$  ถึง  $2 \text{ s/drop}$ ) กระแสไฟฟ้าจะถูกวัด  $2$  ครั้งต่อ  $1$  หยดปรอทครั้งแรกที่ประมาณ  $20 \text{ ms}$  ก่อนการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าแต่ละพัลส์ครั้งที่  $2$  ( $i_2$ ) ประมาณ  $20 \text{ ms}$  ก่อนสิ้นสุดแต่ละพัลส์นั้นค่าผลต่างของกระแสที่วัดได้ ( $\Delta i = i_2 - i_1$ ) ถูกบันทึกตามการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าของวงจร

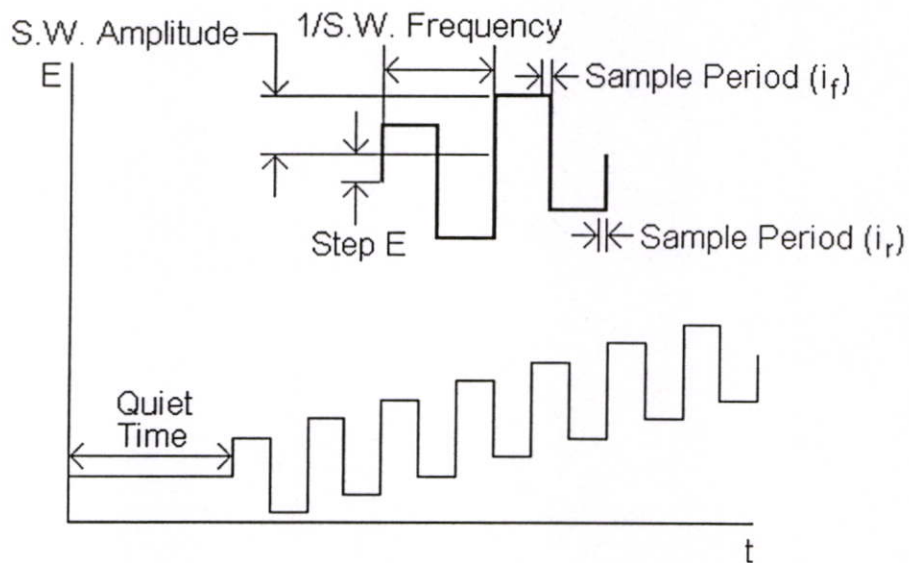
การให้สัญญาณกระตุ้นในลักษณะของพัลส์ทั้งแบบพัลส์ปกติและดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์นั้นสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์สารได้เนื่องจากให้ศักย์ไฟฟ้ากับวงจรในช่วงสั้นๆ เป็นการเร่งการเกิดกระแสฟาราเดอิก ในรูปกระแสจำกัด ขณะเดียวกันเป็นการลดกระแสตกค้างซึ่งเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก ดังเช่นในกรณีของขั้วไฟฟ้าหยดปรอทเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้กับวงจรในช่วงสั้นๆ ระหว่างอายุแต่ละหยดปรอทเป็นเหมือนการกระตุ้นให้ชั้นของสารละลายที่ถูกควบคุมด้วยการแพร่ซึ่งเป็นชั้นระหว่างผิวหน้าหยดปรอทกับสารตัวอย่างมีความหนาแน่นน้อยมากๆ ทำให้การแพร่ของสารตัวอย่างสู่ผิวหน้าหยดปรอทเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็ว การเกิดของกระแสจำกัดซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นได้รวดเร็วเช่นกัน และเป็นการวัดค่ากระแสไฟฟ้าก่อนปรอทหยดจากปลายหลอดซึ่งเป็นช่วงที่ปรอทมีพื้นที่ผิวมากที่สุด กระแสไฟฟ้าขณะนั้นจึงมีค่าสูงสุด ผลของการ

เกิดกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วและการวัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดทำให้กระแสไฟฟ้าจากสัญญาณกระตุ้นแบบพัลส์มีค่าสูงกว่าสัญญาณกระตุ้นแบบลิเนียร์สแกนหลายเท่าตัว เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าในรูปของพัลส์กับวงจรหรือขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสค้ำซึ่งเป็นกระแสนอนฟาราเดอิกเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน แต่กระแสนี้จะลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลตามเวลาจนมีค่าเกือบเป็นศูนย์เมื่อหยุดปรอทใกล้หยุดจากปลายหลอด ดังนั้นการวัดกระแสในช่วงเวลานี้ของในแต่ละหยุดปรอททำให้ได้รับผลจากกระแสค้ำน้อยกว่าที่สุดนั่นคือ ผลของการใช้สัญญาณในลักษณะของพัลส์เพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์ได้มากกว่าการทำโพลาลิกราฟีแบบคลาสสิกมาก

2.5.2.2.3 สแควร์-เวฟ (Square-wave) เป็นสัญญาณกระตุ้นที่ให้กับวงจรเป็นช่วงสั้นๆ ในรูปแบบขั้นบันไดดังรูปที่ 2.11 ดังเช่นในกรณีของขั้วไฟฟ้าหยุดปรอทการวิเคราะห์ตัวอย่างทำได้เสร็จสิ้นภายในเวลาของการหยุดปรอท 1 หยุด ในการทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโดยทั่วไปเวลาต่อการหยุด 1 หยุดของปรอทถูกปรับให้นานขึ้น (ประมาณ 5 วินาทีหรือมากกว่า) สัญญาณกระตุ้น 2 รูปแบบถูกให้กับวงจรพร้อมๆกันในช่วงเวลาที่ครึ่งหลังของอายุหยุดปรอท ศักย์ไฟฟ้าถูกเพิ่มให้กับวงจรครั้งละ  $10 \text{ mV } (\Delta E_p)$  ทุก  $5 \text{ ms } (\tau)$  ในช่วงศักย์ไฟฟ้า  $1 \text{ V}$  ซึ่งกินเวลาประมาณ  $0.50$  วินาที ศักย์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได ขณะเดียวกันศักย์ในลักษณะของสแควร์-เวฟ ( $E_{sw}$ ) ถูกให้กับวงจรในความถี่ประมาณ  $200 \text{ Hz}$  (โดยทั่วไปอาจใช้ความถี่ระหว่าง  $100$  ถึง  $1000 \text{ Hz}$ ) ด้วยขนาดศักย์ไฟฟ้าประมาณ  $50 \text{ mV}$  ในเวลา  $5 \text{ ms } (\tau)$  เท่ากับ 1 ขั้นบันไดศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบสแควร์-เวฟนี้ซ่อนอยู่ในศักย์ไฟฟ้าขั้นบันไดทำให้ผลลัพธ์ของพัลส์เป็นสแควร์-เวฟที่ชันขึ้นตามแต่ละขั้นบันไดของศักย์ไฟฟ้านั้น ขนาดของศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรนี้เพียงพอที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผิวหน้าหยุดปรอทได้กระแสถูกวัดค่า 2 ครั้งต่อ 1 สแควร์-เวฟ คือที่จุดสิ้นสุดของสแควร์-เวฟเป็น  $i_{1,1}$  และที่จุดก่อนเกิดเวฟพัลส์ใหม่เป็น  $i_{1,2}$  ผลต่างของกระแส ( $\Delta i_p = i_{1,1} - i_{1,2}$ ) ถูกบันทึกพร้อมกับศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ให้กับแต่ละพัลส์ที่วัดค่า ข้อมูลทั้งหมดได้จากเสี้ยวอายุของหยุดปรอทเท่านั้น



รูปที่ 2.10 สัญญาณกระตุ้นแบบคิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์ [63]



รูปที่ 2.11 สัญญาณกระตุ้นแบบสแควร์-เวฟ [63]

พัลส์ทั้งสามลักษณะที่กล่าวมานี้ใช้ได้กับขั้วไฟฟ้าหยดปรอทและเรียกเทคนิควิธีวิเคราะห์นี้ว่า พัลส์โพลารอกราฟี ในกรณีที่ประยุกต์ใช้กับขั้วไฟฟ้าแบบอื่นๆเช่น ขั้วไฟฟ้าจุลภาคที่เป็นโลหะหรือของแข็งอื่นๆเรียกว่า พัลส์โวลแทมเมตรี

### 2.5.3 การประยุกต์ใช้เทคนิคพัลส์โวลแทมเมตรี [44, 51, 63, 64]

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ( $E_{1/2}$ ) สามารถทำได้ทั้งเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์และสแควร์-เวฟโวลแทมเมตรี โดยพิจารณาจากโวลแทมโมแกรมซึ่งมีลักษณะเป็นพีกดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 โดยความสูงของพีกเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น สำหรับปฏิกิริยาผันกลับทั่วไป ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตรงจุดยอดของพีกมีค่าประมาณศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของการเกิดปฏิกิริยาครึ่งเซลล์นั้น จากรูปร่างของโวลแทมโมแกรมที่เป็นพีกนี้ ทำให้ทั้งวิธีดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ และสแควร์-เวฟ สามารถใช้พิสูจน์เอกลักษณ์สาร หรือส่วนผสมของสารที่ให้พีกที่ศักย์ต่างกัน ได้

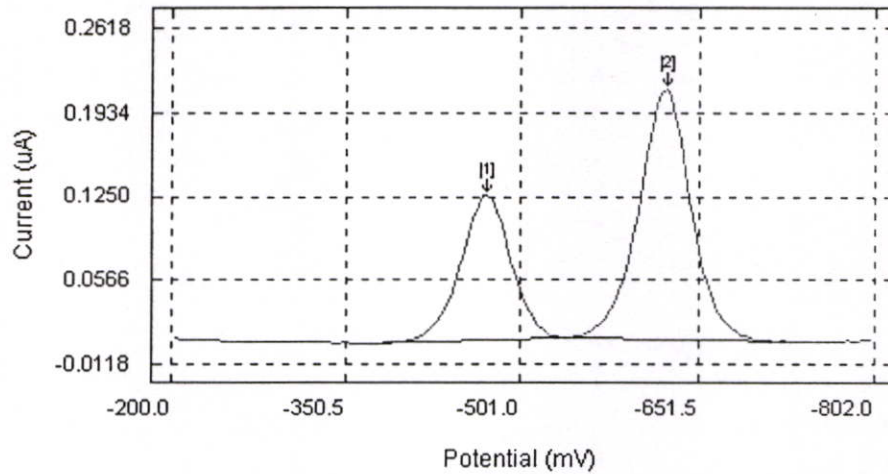
สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ทำโดยวิธีสร้างเส้นกราฟเทียบมาตรฐานหรือวิธีเติมสารมาตรฐาน โดยถ้าสารมาตรฐานและสารตัวอย่างในการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงหรือเหมือนกันมากที่สุดทั้งในด้าน pH และความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ความถูกต้องแม่นยำของการวิเคราะห์จะอยู่ในช่วง 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้น  $1 \times 10^{-7}$  M หรือน้อยกว่านี้

#### 2.5.3.1 การวิเคราะห์สารอินทรีย์

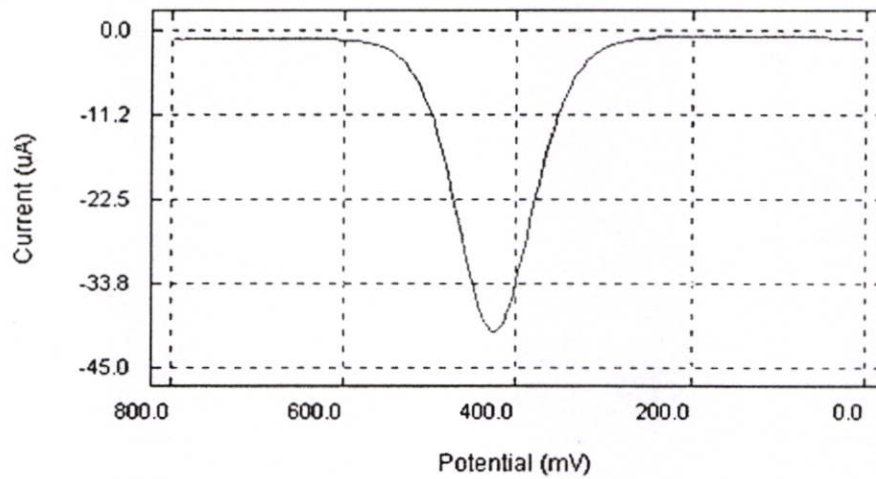
สามารถวิเคราะห์ปริมาณแคตไอออนของโลหะต่างๆ โลหะอัลคาไลน์ อัลคาไลน์เอิร์ท ที่เกิดปฏิกิริยาได้ในช่วงศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ โดยเลือกอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม (ไม่เกิดปฏิกิริยาในช่วงศักย์ไฟฟ้าของสารตัวอย่าง) รวมทั้งแอนไอออนต่างๆ เช่น โบรเมต ไอโอเดต ไดโครเมต วานาเดต ไนไตรท์ ที่อยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มี pH ที่เหมาะกับการเกิดปฏิกิริยาได้

#### 2.5.3.2 การวิเคราะห์สารอินทรีย์

สามารถวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่มีกลุ่มฟังก์ชันคาร์บอนิล กรดคาร์บอกซิลิก เปอร์ออกไซด์ และอีพอกไซด์ กลุ่มไนโตร ไนโตรโซเอมีน ออกไซด์และเอโซ กลุ่มเฮโลเจน ไฮโดร ควิโนน และเมอร์แคปแทน เป็นต้น ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณแต่การเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์มักมีความซับซ้อนและเกิดได้ช้ากว่าสารอนินทรีย์ ทำให้การแปรผลการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์ ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรีจึงขึ้นอยู่กับดุลพินิจและวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์



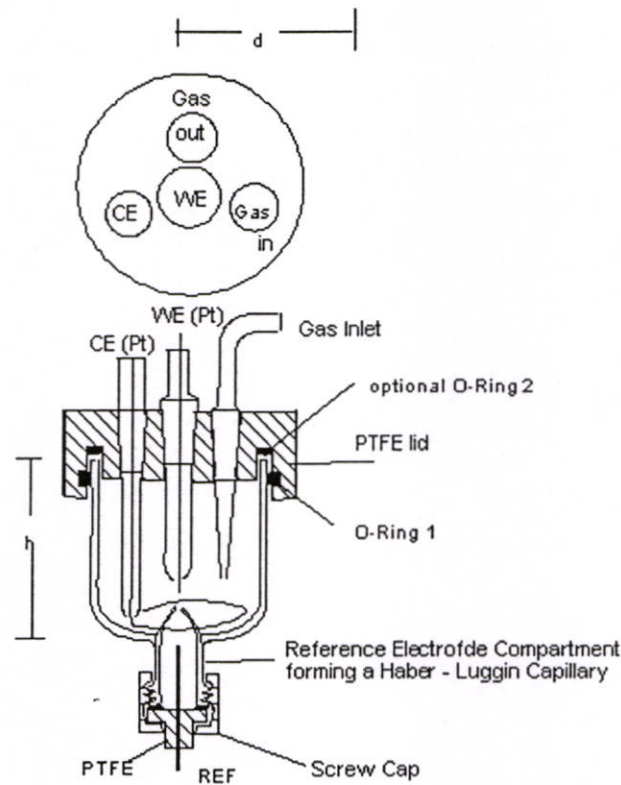
รูปที่ 2.12 โวลแทมโมแกรมของเทคนิคคิฟเฟอร์เรนเซียลพัลส์โวลแทมเมทรี [63]



รูปที่ 2.13 โวลแทมโมแกรมของเทคนิคและสแควร์-เวฟโวลแทมเมทรี [63]

#### 2.5.4 ส่วนประกอบของเซลล์โวลแทมเมทรี [44]

เซลล์สำหรับการทำเทคนิคโวลแทมเมทรีเป็นเซลล์แบบอิเล็กโทรไลติก ซึ่งภายในเซลล์จะประกอบไปด้วยสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ผสมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย โดยมีขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าช่วยและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงอยู่ในเซลล์ด้วย (ในระบบ 3 ขั้ว) นอกจากนี้ยังมีระบบกำจัดแก๊สออกซิเจน ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการจัดเซลล์สำหรับการทำเทคนิค โวลแทมเมทรี (ด้านข้างและด้านบน) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode ; C.E.) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode ; W.E.) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode ; R.E.) [65]

#### 2.5.4.1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย

สารละลายในโวลแทมเมทรินอกจากจะมีสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์แล้วยังต้องมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย โดยใช้ปริมาณมากกว่าสารละลายตัวอย่าง 50 ถึง 100 เท่า เพื่อที่จะให้เกิดกระบวนการแพร่ของไอออนตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามากที่สุดและให้เกิดกระบวนการไมเกรชันของไอออนตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้าน้อยที่สุดหรือแทบไม่เกิดเลย นั่นคืออัตราส่วนของกระแสไมเกรชัน ( $I_m$ ) ต่อกระแสการแพร่ ( $I_d$ ) มีค่าน้อยมากๆ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยควรเตรียมจากสารที่มีความบริสุทธิ์สูงและไม่ถูกออกซิไดส์และถูกรีดิวส์ได้ง่าย ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 M

หน้าที่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย

- ช่วยลดความต้านทานของสารละลาย
- ช่วยนำไฟฟ้าในกรณีที่สารตัวอย่างนำกระแสไฟฟ้าได้น้อย
- ช่วยขจัดโลหะไอออนแทรกซ้อนที่ปนมาในสารตัวอย่าง
- ช่วยป้องกันการเกิด ไมเกรชัน

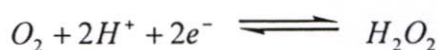
- ช่วยทำหน้าที่เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ (ช่วยปรับหรือรักษา pH ของสารละลายให้คงที่)

#### 2.5.4.2 ระบบกำจัดแก๊สออกซิเจนออกจากสารละลาย

ในการวิเคราะห์สาร โดยวิธี โวลแทมเมตรี จำเป็นที่จะต้องกำจัดแก๊สออกซิเจนออกจากสารละลายตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ โดยเฉพาะสารละลายที่เป็นกรดเพราะว่าแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดส์สามารถถูกรีดิวซ์ได้ นอกจากนี้แก๊สออกซิเจนและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการถูกรีดิวซ์อาจจะทำปฏิกิริยากับสารละลายตัวอย่างได้ด้วย

แก๊สออกซิเจนถูกรีดิวซ์ได้ 2 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรก  $O_2$  ถูกรีดิวซ์เป็น  $H_2O_2$  ที่ศักย์ไฟฟ้า  $-0.1$  V เทียบกับขั้วอ้างอิง SCE (ใช้ขั้วปรอทหยดเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยมี  $0.1$  M KCl เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ช่วย)



ขั้นตอนที่สอง  $H_2O_2$  จะถูกรีดิวซ์ต่อไปเป็น  $H_2O$  ที่ศักย์ไฟฟ้า  $-0.9$  V เทียบกับขั้วอ้างอิง SCE (ใช้ขั้วปรอทหยดเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยมี  $0.1$  M KCl เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ช่วย)



ผลของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจน ทำให้เกิดกระแสแคโทดิกไม่น้อยกว่า 5 ไมโครแอมแปร์ ( $\mu A$ ) ดังนั้นภายในเซลล์โวลแทมเมตรีจะมีระบบกำจัดแก๊สออกซิเจนจากสารละลายโดยการผ่านแก๊สใน โตรเจนหรือแก๊สอาร์กอนลงไป สารละลายตัวอย่างประมาณ 5 ถึง 20 นาที ก่อนทำการวิเคราะห์โดยทำในภาชนะปิดไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศภายนอกเพื่อให้สารละลายตัวอย่างอิ่มตัวด้วยบรรยากาศของแก๊สใน โตรเจนหรือแก๊สอาร์กอน

#### 2.5.4.3 ขั้วไฟฟ้า

1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง จะเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอนและคงที่ ไม่แปรผันไปตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจร ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หรือสารตัวอย่าง และให้ผลการวัดซ้ำเท่าเดิมตลอดเวลา ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ดีต้องมีส่วนประกอบคงตัว ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บไว้ และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่นิยมใช้ได้แก่ SCE และ Ag/AgCl

2. ขั้วไฟฟ้าช่วย ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าแต่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา โดยจะนำกระแสจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าช่วยที่นิยมใช้ได้แก่ ลวดแพลทินัม แท่งกราไฟต์ หรือกลาสคาร์บอน

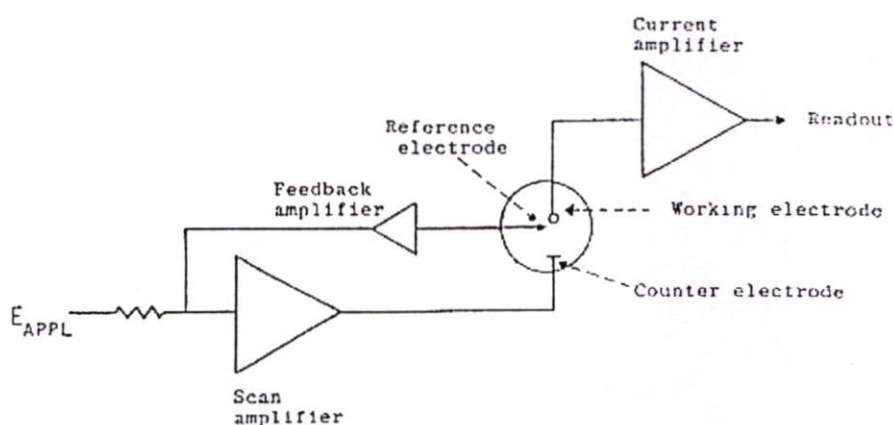
3. **ขั้วไฟฟ้าใช้งาน** การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรีต้องใช้ขั้วไฟฟ้าขนาดเล็กกว่าเทคนิคอื่นๆ เพื่อให้พื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าในการสัมผัสกับสารตัวอย่างมีน้อยและเกิดสภาวะโพลาไรเซชันตลอดการวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าใช้งานมักทำจากวัสดุที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเช่น แพลทินัม ทองคาร์บอน และปรอท ขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ผลิตออกมาจำหน่ายในท้องตลาดมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้านั้น แต่ที่นิยมในปัจจุบันคือ ขั้วไฟฟ้าแบบดิสก์อิเล็กโทรด ขั้วไฟฟ้าแบบนี้ส่วนของแผ่นแบนเล็กๆ นอกจากนี้อาจเป็นแพลทินัม หรือคาร์บอน และยังสามารถใช้เป็นพวกโลหะกึ่งตัวนำเช่น คีบุก หรืออินเดียมออกไซด์ โดยที่แผ่นที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าจะถูกฝังอยู่ในแท่งวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าเช่น เทฟลอน และมีลวดเป็นตัวนำไฟฟ้าเสียบติดไว้เพื่อต่อกับวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า ดังนั้นในการวิเคราะห์สารตัวอย่างจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ชนิดของขั้วไฟฟ้าใช้งานให้เหมาะสม โดยสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ในช่วงศักย์ไฟฟ้าใช้งานของขั้วไฟฟ้านั้น

#### 2.5.4.4 อุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า ประกอบด้วย

- แหล่งให้ศักย์ไฟฟ้า
- เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า ใช้โวลต์มิเตอร์ที่อ่านค่าได้ละเอียดในช่วง 0.01 ถึง 100 ไมโครแอมแปร์ ( $\mu\text{A}$ )

โครแอมแปร์ ( $\mu\text{A}$ )

การต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้าเป็นวงจรนั้นทำได้ 2 แบบ คือ การต่อแบบ 2 ขั้ว และการต่อแบบ 3 ขั้ว ในหัวข้อนี้ขอกล่าวเฉพาะการต่อแบบ 3 ขั้วซึ่งเป็นแบบที่ใช้ในการต่อวงจรสำหรับทำเทคนิคโวลแทมเมตรีที่ใช้ในการวิจัยนี้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.15 ผังแสดงการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว (1 และ 3 แทน ออฟแอมป์ (Operational amplifier; Op amp) [44])

จากรูปที่ 2.15 สำหรับการทำงานของผังวงจรออฟแอมป์อธิบายได้ดังนี้ เมื่อมีการให้พลังงานไฟฟ้าในรูปศักย์ไฟฟ้าแก่วงจร ศักย์ไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังออฟแอมป์ (1) ซึ่งควบคุมศักย์ไฟฟ้าของ

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงไม่ให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านส่วนนี้ ผลลัพธ์คือ ออฟแอมป์ (1) ถูกส่งไปยังออฟแอมป์ (2) เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้าโดยที่ออฟแอมป์ (2) มีกระแสไหลผ่านขั้วไฟฟ้าช่วยกับขั้วไฟฟ้าใช้งาน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารที่ต้องการวิเคราะห์ขึ้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ขณะเดียวกันส่วนของออฟแอมป์ (2) ก็ช่วยรักษาระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าใช้งาน กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการดำเนินไปของปฏิกิริยาของสารที่ต้องการวิเคราะห์ถูกส่งไปยังออฟแอมป์ (3) ซึ่งต่อกับเครื่องบันทึกผลในการบันทึก หรือสร้างกราฟของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Barrio, C. S. และคณะ [3] ได้ศึกษาการสลายตัวของยุงในห้องปฏิบัติการและในขาม่าแมลง 3 ชนิด ได้แก่ Malathion Fenitrothion และ Dichlofluanid ในตัวอย่างแอปเปิ้ล ซึ่งรายงานเป็น 'Safety periods' (เวลาของการพ่นยาฆ่าแมลงและการบริโภคผลไม้) ซึ่งจะซึมผ่านเข้าไปในผลไม้ในแต่ละสภาวะการณและเหตุผลที่จะสลายตัว จะทำการศึกษาที่เป็นอิสระของขาม่าแมลงแต่ละชนิด ภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ นำตัวอย่างแอปเปิ้ลมาทำการพ่นด้วยขาม่าแมลงและจะถูกเก็บตามกำหนดเวลา หลังจากนั้นนำแอปเปิ้ลมาสกัดด้วยซอกซ์เล็ทและใช้เอทิลอะซิเตทเป็นตัวทำละลาย แล้วตรวจวัดขาม่าแมลงด้วย GC (ใช้แคปิลลารี คอลัมน์ และ NPD คีเทคเตอร์) พบว่าพีโนโตรไทออนสลายตัวหลังทำการทดลอง 2 เดือนและลอกกาลิทึมของการสลายตัวของขาม่าแมลงอีก 2 ชนิด และเมื่อทำการทดลองในขาม่าแมลง 3 ชนิด ในวิธีการเดียวกันพบว่า ขาม่าแมลง 3 ชนิดแสดงกราฟลอกกาลิทึมของการสลายตัวซึ่งเกิดขึ้นเร็วกว่าในห้องปฏิบัติการ ไม่มีกรณีที่พ่นยาฆ่าแมลงเข้าไปในแอปเปิ้ลที่ไม่มีเปลือก

Karamfilov, V.K. และคณะ [4] ได้ทำการวิเคราะห์ขาม่าแมลงประเภทออร์การ์โนฟอสเฟต 2 ชนิดคือ Dimethoate [S-((2-(methylamino)ethyl)-2-oxoethyl)phosphorodithioate] และ Fenitrothion [O,O-dimethyl O-(4-nitro-m-tolyl)phosphorothioate] โดยการตรวจวัดสารด้วย Monofunctional C-18 solid-phase extraction (SPE) และหาปริมาณโดยใช้ High-resolution capillary gas-chromatography with nitrogenphosphorus detection (GC-NPD) วิธีนี้เหมาะสมกับสภาวะบริเวณปากแม่น้ำ การเปลี่ยนแปลงร้อยละของการคืนกลับ (Recovery) มีนัยสำคัญกับค่าพีเอชของการสไปค์ตัวอย่างน้ำทะเลอยู่ในช่วง 6.5 ถึง 9.0 ของสารทั้ง 2 ชนิด ระดับความเข้มข้นของเกลือไม่มีผลต่อร้อยละการคืนกลับของ Fenitrothion แต่มีผลต่อ Dimethoate ทำให้ร้อยละของการคืนกลับเพิ่มขึ้น ร้อยละการคืนกลับมีค่าสูงจากการสไปค์ตัวอย่างน้ำที่ความเข้มข้นต่ำคือ 100 ng/l มีค่า 68% และ 91% ของ Dimethoate และ Fenitrothion ตามลำดับ และได้ที่ pH 6.5 และระดับความเข้มข้นของเกลือเท่ากับ 36% ค่าร้อยละการคืนกลับจากการสกัดตะกอนทำการสไปค์ที่ 100 ng/g ของน้ำหนักแห้ง ได้ 91% ของ Dimethoate และ 86% ของ Fenitrothion ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (S/N=3) ของ Dimethoate และ Fenitrothion ในตัวอย่างน้ำและตะกอนมีค่าเท่ากับ 1 ng/l และ 2 ng/g ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ค่า Reproducibility (RSD) ของการตรวจวัดทั้งหมดน้อยกว่า 10% และนำไปเปรียบเทียบกับ GC-EI-MS สเตปดัมที่ได้จะแสดงตำแหน่งของ ไอออนที่ m/z 87 93 และ 229 ของ Dimethoate และ m/z 109 260 และ 277 ของ Fenitrothion ซึ่งแสดงตำแหน่งจำเพาะของสารทั้ง 2 ชนิด วิธีการนี้ไม่เหมาะสำหรับการสกัดและหาปริมาณของ Dimethoxon และออกซิเจนที่เหมือนกันของ Dimethoate เนื่องจากร้อยละของการคืนกลับได้ต่ำกว่า 20% อายุการใช้งานของ

คอลัมน์ GC สามารถปรับปรุงได้หลังจากการทำกราฟมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานที่เตรียมในสารออร์การ์โนฟอสเฟตอิสระที่สกัดได้จากตัวอย่างธรรมชาติ

Zen, J. M. และคณะ [14] ได้พัฒนาความไวของวิธีทางโวลแทมเมตรีเพื่อตรวจวัดพาราไรออน (Parathion;  $\phi\text{NO}_2$ ) โดยใช้ Nafion<sup>®</sup> เคลือบบนขั้วกลาสคาร์บอน ในวิธีนี้พาราไรออนเริ่มต้นอยู่ในรูปของรีดิวซ์ที่ผันกลับไม่ได้จาก  $\phi\text{NO}_2$  ไปเป็น  $\phi\text{NHOH}$  ส่วนพิกที่ผันกลับจะเกิดที่ความต่างศักย์ +0.33 V (เทียบกับขั้ว Ag/AgCl) ซึ่งตรงกับ 2 อิเล็กตรอนของปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชันของไฮดรอกซีลามีน (Hydroxylamine;  $\phi\text{NHOH}$ ) ไปเป็นอนุพันธ์ไนโตรโซ ( $\phi\text{NO}$ ) ซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิคสแควร์-เวฟโวลแทมเมตรี และหาสภาวะของการทดลองที่เหมาะสมเช่น พีเอช ความหนาของแผ่นฟิล์ม ความต่างศักย์ที่ Preconcentration เวลาที่ Preconcentration และสภาวะของสแควร์-เวฟโวลแทมเมตรี แล้ววิธีนี้ยังได้กราฟมาตรฐานของพาราไรออนอยู่ในช่วงความเป็นเส้นตรงถึง 15  $\mu\text{M}$  ในสารละลายซีเทรตบัฟเฟอร์ พีเอชเท่ากับ 1.1 และมีค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (S/N = 3) ที่ความเข้มข้น 50 nM

Morzycka, B. [5] ได้ทำการศึกษาวิธต่างๆในการตรวจวัดยาฆ่าแมลงในน้ำผึ้งและได้พัฒนาวิธีโดยอาศัยหลักการการกระจายตัวในเฟสของแข็ง ได้ทำการตรวจวัดยาฆ่าแมลง 12 ชนิด ได้แก่ Azinfos-methyl Buprofezin Chlorpyrifos Chlorpyrifos-methyl Diazinon Ethion Fenitrothion Fipronil Methidathion Phosalone Pirimicarb และ Propoxur ซึ่งวิธีนี้ใช้ฟลูออริซิลและซิลิกาเป็นสารที่ทำให้เกิดการกระจาย อลูมินาและซิลิกาเป็นตัวดูดซับทำความสะอาดและทำให้ความเป็นขั้วของระบบตัวทำละลายลดลงทำให้ชะยาฆ่าแมลงออกจากตัวอย่างน้ำผึ้ง หาปริมาณยาฆ่าแมลงโดยใช้แคปิลลารีแก๊สโครมาโทกราฟีต่อกับไนโตรเจน-ฟอสฟอรัส ดีเทกเตอร์ ได้ร้อยละของการคืนกลับดี (70-110%) เมื่อทำการสไปค์ตัวอย่างด้วยค่าต่างๆ (0.01-1.0 mg/kg) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 2-8% ขีดจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ 0.005-0.05 mg/kg เมื่อทำการตรวจวัดยาฆ่าแมลงที่มีขั้วต่ำถึงมีขั้วปานกลางในตัวอย่างน้ำผึ้ง

Ciucu, A. A. และคณะ [66] ได้ใช้วิธีแอมเปอโรเมตรีแบบใหม่ที่มีความไวสูงในการตรวจวัดสารประกอบออร์กาโนฟอสเฟต วิธีนี้ใช้ Ferophthalocyanine ไปปรับปรุงบนขั้วคาร์บอนเพชรที่มี Acetylcholinesterase และ Choline oxidase co-immobilized อยู่บนผิวของเยื่อเลือกผ่าน (Dialysis membrane) การทำงานของ Cholinesterase จะเป็นตัวยับยั้งแบบไม่แข่งขันเมื่อมีอยู่ในสารเคมีกำจัดศัตรูพืช มีการพบตัวยับยั้งที่มีความไวสูงบนเยื่อเลือกผ่านที่มีเอนไซม์อยู่น้อยต่อมาจึงใช้มาเป็นสร้างแอมเปอโรเมตริกไบโอเซนเซอร์ ทำการวิเคราะห์โดยใช้ Acetylcholine เป็นสับสเตรตจะได้ Choline เป็นผลิตภัณฑ์โดยเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในชั้น

เอนไซม์ซึ่งถูกออกซิไดส์ด้วย Choline-oxidase และได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $H_2O_2$  ตรวจวัดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ +0.35 V เทียบกับ Ag/AgCl สภาวะของกระแสของสับสเตรตลดลงเมื่อมีการเพิ่มของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช และสามารถตรวจวัด Paraoxon และ Carbofuran ได้สูงถึง  $10^{-10}$  M

Ni, Y. และคณะ [15] ได้ใช้ Differential pulse stripping voltammetry method (DPSV) ในการตรวจวัด Parathion-methyl (PTM) Fenitrothion (FT) และ Parathion (PT) ด้วยขั้วไฟฟ้าหยดปรอทแขวนตัว (Hanging Mercury Drop Electrode; HMDE) โวลแทรมโมแกรมของสารทั้ง 3 ชนิดซ้อนทับกันมากและยากในการตรวจวัดลักษณะเฉพาะของสารทั้ง 3 ชนิดในสารผสม การวิเคราะห์ทางปริมาณของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชแต่ละชนิดในสารผสมจะทำการตรวจวัดโดยใช้วิธีทางเคโมเมทริกที่แตกต่างกันเช่น Classical Least Squares (CLS) Principal Component Regression (PCR) Partial Least Squares (PLS) Kalman filter (KF) และ Radial Basis Function-Artificial Neural Networks (RBF-ANN) การวิเคราะห์สารผสมทั้ง 3 ชนิดนี้โดยวิธีนี้พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายสัมพัทธ์ (Relative prediction error; RPE) ต่ำ และค่าทางสถิติของ % Recovery ได้จากวิธี RBF-ANN จะใช้กับตัวอย่างผักต่างๆ โดยการ spiked จำนวนสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่ทราบแล้วกับข้อมูลทางสถิติ

Schellin, M และคณะ [7] ได้ทำการวิเคราะห์ยาฆ่าแมลงออร์กาโนฟอสเฟต 8 ชนิดคือ Parathion-methyl Fenitrothion Malathion Fenthion Bromophos Bromophos-ethyl Fenamiphos และ Ethion ในตัวอย่างสารละลายโดยใช้การสกัดด้วยตัวทำละลายบนเยื่อเลือกผ่าน เริ่มต้นใส่ตัวอย่างสารละลาย 15 ml ลงใน Extraction vial ขนาด 20 ml ซึ่งมีเยื่อเลือกผ่านที่ประกอบด้วย Nonporous polypropylene วางอยู่ในวาล์วและมีตัวทำละลายอินทรีย์อยู่ 800  $\mu$ l Analytes จะทำการแยกจากชั้นน้ำโดยเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ปริมาณน้อย เทคนิคนี้จะเป็นแบบอัตโนมัติและรวมกับการสกัดสารปริมาณมากและเทคนิค GC-MS สภาวะการทดลองที่เหมาะสมสามารถตรวจสอบได้ Cyclohexane ถูกเลือกให้เป็นเฟสรับ (Acceptor phase) และศึกษาผลกระทบของเกลือ เมทานอล ค่าพีเอช อัตราการคน และเวลาการสกัด นอกจากนี้ยังตรวจสอบอิทธิพลของ Matrix โดยเติม Humic acid sodium salt ที่มีความเข้มข้นต่างๆกันลงไป มีค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดอยู่ในระดับ ng/l หาได้จากการฉีดสารปริมาณมากร่วมกับการฉีดสารปริมาณ 100  $\mu$ l ค่าร้อยละของการคืนกลับอยู่ในช่วง 47 ถึง 100% และค่า Relative standard deviation (n=3) มีค่าอยู่ระหว่าง 4 ถึง 12% (ยกเว้น Bromophos-ethyl มีค่า 22%) ช่วงความเป็นเส้นตรงของการเคลื่อนที่อยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 70  $\mu$ g/l การประยุกต์ของวิธีนี้สามารถใช้กับตัวอย่างจริงโดยการ สไปล์ฆ่าแมลงออร์กาโนฟอสเฟต 8 ชนิดลงในตัวอย่างไวน์แดง ไวน์ขาว และน้ำแอปเปิ้ล

Baroja, O. และคณะ [8] ได้พัฒนาวิธีการตรวจวัด Fenitrothion และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเมตาบอลิซึม 2 ชนิดคือ 3-methyl-4-nitrophenol และ Fenitrooxon จากอากาศในป่าโดยใช้ Thermal-desorption cold trap (TCT) และ GC-MS โดยตัวอย่างอากาศจะป้อนผ่านท่อแก้วที่บรรจุตัวดูดซับคือ Tenax 100 mg ด้วยอัตราการไหล 50 ml/min การ Adsorption/thermal desorption และ Breakthrough จะทำการตรวจสอบด้วยปริมาณสารที่ถูกจับไว้ ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดอยู่ในช่วง 1.6 ถึง 2.1 ngm<sup>-3</sup> ใช้การสเปย์ 21.5 mg active ingredient m<sup>-2</sup> ได้ค่าของยาฆ่าแมลงในบรรยากาศคือ 78.3 ngm<sup>-3</sup> (หลังจาก 2 ชั่วโมง) ภายในเวลา 2 ถึง 4 วันทำการตรวจสอบต่อพบว่า Fenitrooxon มีค่าจะลดลง 50 ถึง 55% ในระหว่างนั้นจะยังมีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเมตาบอลิซึมเหลืออยู่และหมดไปภายในเวลา 19 วันต่อมา

Deo, R. P. และคณะ [67] ได้ใช้แอมเปโรเมตริกไบโอเซนเซอร์ในการตรวจวัดยาฆ่าแมลงประเภทออร์กาโนฟอสเฟต โดยอาศัยคาร์บอนนาโนทิวป์ปรับปรุงเป็นตัวทรานส์ดิวเซอร์และใช้คู่กับ Organophosphorus hydrolase (OPH) biocatalyst มีเชื้อเลือกผ่าน 2 ชั้นประกอบด้วยชั้น OPH และด้านบนเป็นฟิล์ม CNT สำหรับใช้เป็น CNT/OPH ไบโอเซนเซอร์ ชั้น CNT จะพาขั้วลบของ *p*-nitrophenol ไปตรวจวัดซึ่งมีความไวและมีความเสถียรสูง เซนเซอร์ที่เหมาะสมจะพิจารณาจากพื้นที่ผิวที่ปรับปรุงและสถานะของการทดลอง ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมสามารถตรวจวัดต่ำสุดเท่ากับ 0.15 μM ของ Paraoxon และ 0.8 μM ของ Methyl parathion ด้วยค่าความไวเท่ากับ 25 and 6 nA/μM ตามลำดับ

Law, K. A. และคณะ [17] ได้พัฒนา Sonochemically fabricated Bioengineered acetylcholinesterase และ Polyaniline carbon/cobalt phthalocyanine biosensors แบบใหม่เพื่อการตรวจวัดจำนวนยาฆ่าแมลงต่างๆให้ได้อย่างรวดเร็ว ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่นิยมใช้มีขนาดประมาณ 2 × 10<sup>5</sup> cm<sup>2</sup> ดังนั้นจำนวนทั้งหมดของความหนาแน่นของไมโครอิเล็กทรอนิกส์จะรายงานต่อวันโดยค่าเฉลี่ยของ Fabrication ต่างๆ ค่าสัญญาณเอนไซม์ของเซนเซอร์คือการยับยั้งในเวลาของการพักตัว (Incubation) กับยาฆ่าแมลง และแสดงการตรวจวัดที่ความเข้มข้นต่ำของ Dichlorvos Parathion และ Azinphos มีค่าประมาณ 1 × 10<sup>-17</sup> M 1 × 10<sup>-16</sup> M และ 1 × 10<sup>-16</sup> M ตามลำดับ มีค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดต่ำกว่าวิธีการอื่น การตรวจวัดสามารถทำได้ภายในระบบ Flow injection ที่สร้างขึ้นด้วยอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 1 ml min<sup>-1</sup> ศึกษาความเสถียรของเซนเซอร์โดยเติมซูโครสผสมกับ Polygalacturonic acid ลงในเอนไซม์ที่ถูกตรึงที่อยู่บนขั้วทำงานจากนั้นทำให้แห้ง 65% ของการทำงานของเอนไซม์เริ่มต้นพบว่ายังคงอยู่ 92 วัน ซึ่งเป็นค่าที่พิจารณาในการเก็บรักษาขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นและ Facilitating transportation

Sánchez-Ortega, A. และคณะ [11] ได้ศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีในการตรวจวัด Fenitrothion และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยามетаบอลิซึม 2 ชนิดคือ 3-methyl-4-nitrophenol และ Fenitrooxon โดยใช้วิธี Solid-phase micro-extraction (SPME) และ High performance liquid chromatography (HPLC) และใช้ตัวตรวจวัด 2 ตัวคือ Diode array (DAD) และ Direct current amperometrical (DCAD) สำหรับตรวจวัดความว่องไวและความจำเพาะ ศึกษาประสิทธิภาพของการสกัดเช่น เวลาของการดูดซับ พีเอช อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือ และวิธีการดูดซับ ค่า Reproducibility ของการสกัดที่ความเข้มข้น 20 ppb มีค่า RSD < 12.5% ( $n = 10$ ) กราฟมาตรฐานมีลักษณะเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 10 ถึง 1000  $\mu\text{g l}^{-1}$  และค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 11.8  $\mu\text{g l}^{-1}$  ขึ้นอยู่กับตัวตรวจวัดที่ใช้ วิธีการนี้ได้นำมาใช้ตรวจวัด Fenitrothion และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยามетаบอลิซึมในแม่น้ำซึ่งไหลผ่านบริเวณป่าจนถึงอากาศ

Solná, R. และคณะ [68] ได้ทำการตรวจวัดฟีนอลและยาฆ่าแมลงโดยใช้ระบบ 4 ขั้วไฟฟ้าของสกินปรินท์เป็นแอมเปอโรเมตริกทรานสดิวเซอร์และมี Tyrosinase Peroxidase Acetylcholinesterase และ Butyrylcholinesterase เป็นตัวตรึง เลือก Acetylthiocholine chloride เป็นสับเตรตของ Cholinesterases เป็นการตรวจวัดการยับยั้งของยาฆ่าแมลง ใช้ Hydrogen peroxide เป็นโคสับเตรตของ Peroxidase ในการตรวจวัดฟีนอล ศึกษาการทำงานร่วมกันของ Hydrolases และ Oxidoreductases ซึ่งเป็น array เหมือนกัน การตรวจวัด *p*-cresol Catechol และฟีนอลทำเหมือนกับ Carbaryl Heptenophos และ Fenitrothion ซึ่งทำในระบบ flow-through และในสภาวะที่เหมาะสม ในการเติมโลหะหนัก ( $\text{Cu}^{2+}$   $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$ ) ฟลูออไรด์ ( $\text{NaF}$ ) เบนซีน และไดเมทิลซัลโฟไซด์ (Dimethylsulphoxide) ลงบน Cholinesterase activities และแสดงการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าด้วย Hydrolases และ Oxidoreductases สามารถทำหน้าที่ได้เช่นเดียวกับ array ได้ค่า R.S.D. ของระบบการไหลของเซนเซอร์ชนิดเดียวกันต่ำกว่า 4% และน้อยกว่า 10% ภายในกลุ่มเดียวกันจาก 5 เซนเซอร์ สำหรับ R.S.D. ของระบบสภาวะที่เหมาะสมมีค่ามากเป็น 2 เท่า การตรวจวัดครั้งหนึ่งใช้เวลาน้อยกว่า 6 นาที ขีดจำกัดของการตรวจวัดของ Catechol และใช้ Tyrosinase มีค่าเท่ากับ 0.35 และ 1.7  $\mu\text{M}$  ของระบบการไหลและระบบสภาวะที่เหมาะสม ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามขีดจำกัดของการตรวจวัดต่ำสุดในระบบสภาวะที่เหมาะสมของ Carbaryl เท่ากับ 26 nM Heptenophos เท่ากับ 14 nM และ Fenitrothion เท่ากับ 0.58  $\mu\text{M}$

Tsoukali, H. และคณะ [19] ได้ใช้วิธี HS-SPME ในการตรวจวัดสารประกอบออร์กาโนฟอสเฟต (OPPs) ในตัวอย่างทางชีววิทยา ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของ SPME ได้แก่ การเลือกเส้นใยใน SPME ชนิดและปริมาณของเกลือที่ใช้ เวลาที่ใช้ทำให้ร้อนก่อนและเวลาในการสกัด เวลาในการดูดซับ และอุณหภูมิในการสกัด จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแคปพิลารี แก๊สโครมาโตกราฟี

และมีดีเทกเตอร์เป็นไนโตรเจนฟอสฟอรัส (GC-NPD) ให้ความไวและความจำเพาะต่อ OPPs ได้แก่ Malathion Parathion Methyl parathion และ Diazinon ส่วน Fenitrothion จะใช้วิธี Internal standard จึงได้นำวิธีการเหล่านี้มาตรวจวัด OPPs ในตัวอย่างทางชีววิทยาของมนุษย์ ได้แก่ เลือด พลาสมา ปัสสาวะ ของไหลในสมองและไขสันหลัง ตับ และไต ซึ่ดจำกัดของการตรวจวัดอยู่ในช่วง 2 ถึง 55 ng/ml ขึ้นอยู่กับชนิดของ OPPs และตัวอย่างทางชีววิทยา

Zhao, E. และคณะ [69] ได้ศึกษาวิธีตรวจวัดยาฆ่าแมลงกลุ่มออการ์โนฟอสเฟต ได้แก่ Ethoprophos Diazinon Parathion methyl Fenitrothion Malathion Isocarbophos และ Quinaphos ในน้ำส้ม พัฒนา Single-drop microextraction (SDME) มีพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์ ปริมาตรหยด อัตราการเขย่า เวลาการสกัด และความเข้มข้นของเกลือ น้ำส้มแยกโดยการเหวี่ยงและเจือจางในน้ำ จากนั้นทำการสกัดด้วย SDME และวิเคราะห์ด้วย GC ซึ่งต่อกับ Flame photometric detection (FPD) เมื่อทำการทดสอบวิธีพบว่า ความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดได้มีค่า 10 ถึง 500  $\mu\text{g/L}$  ร้อยละการคืนกลับสัมพัทธ์เฉลี่ยของสารแต่ละชนิดมีค่าเกิน 76.2% และต่ำกว่า 108.0% ซึ่ดจำกัดของการตรวจวัดเท่ากับ 5  $\mu\text{g/L}$  ค่าการทำซ้ำของวิธีนี้ดูจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 4.6 ถึง 14.1% ( $n = 5$ ) ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นที่ยอมรับในการตรวจวัดยาฆ่าแมลงกลุ่มออการ์โนฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำผลไม้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

3.1.1 มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWNTs; วิธีสังเคราะห์ CVD ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 20 ถึง 50 นาโนเมตร ยาว 20 ถึง 50 ไมโครเมตร ค่าการนำไฟฟ้า  $1 \times 10^{-6}$  ถึง  $10 \times 10^{-6} \Omega.m$  ของ Shenyang National Laboratory for Materials Science Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, China)

3.1.2 ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (N,N-Dimethyl formamide ; DMF : มวลโมเลกุล 73.09 g/mol ความหนาแน่น 0.949 g/cm<sup>3</sup> ความบริสุทธิ์ 99.8% ของบริษัท Lab-Scan Analytical Science)

3.1.3 สารละลายเนฟิออน (Nafion Solution : ความหนาแน่น 0.87 g/cm<sup>3</sup> เข้มข้น 5% ละลายในแอลกอฮอล์และน้ำ ปริมาตร 25 ml ของบริษัท Fluka)

3.1.4 ฟีนไนโตรไทออน (C<sub>9</sub>H<sub>12</sub>NO<sub>3</sub>PS : มวลโมเลกุล 277.24 g/mol บริษัท Riedel-de Haen)

3.1.5 กรดอะซิติก (Acetic Acid ; CH<sub>3</sub>COOH : มวลโมเลกุล 60.05 g/mol ความหนาแน่น 1.05 g/cm<sup>3</sup> ความบริสุทธิ์ 99.7% ของบริษัท Lab-Scan Analytical Science)

3.1.6 กรดบอริก (Boric Acid ; H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> : มวลโมเลกุล 61.83 g/mol ความบริสุทธิ์ 99.7% ของบริษัท Carlo Erba Reagenti ; RPE)

3.1.7 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid ; HCl : มวลโมเลกุล 36.46 g/mol ความหนาแน่น 1.18 g/cm<sup>3</sup> ความบริสุทธิ์ 37% ของบริษัท Fisher Chemical)

3.1.8 กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid ; H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> : มวลโมเลกุล 97 g/mol ความหนาแน่น 1.685 g/cm<sup>3</sup> ความบริสุทธิ์ 87% ของบริษัท Lab-Scan Analytical Science)

3.1.9 กรดไนตริก (Nitric Acid; HNO<sub>3</sub>) (มวลโมเลกุล 63.01 ความหนาแน่น 1.42 g/cm<sup>3</sup> ความบริสุทธิ์ 69% ของบริษัท BDH Laboratory Supplies)

3.1.10 กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid ; H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : มวลโมเลกุล 98.078 g/mol ความหนาแน่น 1.835 ± 0.001 g/cm<sup>3</sup> ความบริสุทธิ์ 96% ของบริษัท Carlo Erba Reagenti; RPE)

3.1.11 โซเดียมอะซิเตต (Sodium acetate ; CH<sub>3</sub>COONa : มวลโมเลกุล 136.98 g/mol ความบริสุทธิ์ 99% ของบริษัท Carlo Erba Reagenti; RPE)

3.1.12 โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride ; KCl : มวลโมเลกุล 74.55 g/mol ความบริสุทธิ์ >97% ของบริษัท Carlo Erba Reagenti)

3.1.13 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide ; NaOH : มวลโมเลกุล 39.997 g/mol ความบริสุทธิ์ >97% ของบริษัท Carlo Erba Reagenti)

3.1.14 โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogenphosphate ;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  : มวลโมเลกุล 136.09 g/mol ความบริสุทธิ์ 99% ของบริษัท Carlo Erba Reagenti; RPE)

3.1.15 อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  Powder highly pure for polishing ขนาด 0.3  $\mu\text{m}$ )

3.1.16 กรดบอแรกซ์ (Borax Acid : มวลโมเลกุล 381.37 g/mol ความบริสุทธิ์ 99.5% ของบริษัท Carlo Erba Reagenti ; RPE)

3.1.17 โปแตสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอราต (III) ;  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  : มวลโมเลกุล 329.26 g/mol ความบริสุทธิ์ 99% ของบริษัท MERCK)

3.1.18 น้ำปราศจากไอออน

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่อง Ultrasonic Cleaner รุ่น ME 4.6 ของบริษัท Mettler Mlectronics, USA

3.2.2 เครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง รุ่น BP210D ของบริษัท Scientific Promotion, Thailand

3.2.3 เครื่อง pH Meter รุ่น 715 ของบริษัท Metrohm, Switzerland

3.2.4 เครื่องคนสาร รุ่น 728 stirrer ของบริษัท Metrohm, Switzerland

3.2.5 เครื่องกรองสุญญากาศ รุ่น Aspirator A-3S ของบริษัท Tokyo Rikakokai, Japan

3.2.6 กรวยกรอง รุ่น 180770 DIN ของบริษัท Rosenthal Technik, Gemany

3.2.7 เครื่อง PGSTAT 20 AUTOLAB ของบริษัท Metrohm, Switzerland

3.2.8 เครื่องปั่นน้ำผลไม้

3.2.9 ขั้วไฟฟ้าได้แก่ ขั้วกราไฟต์ ขั้วกลาสีคาร์บอน (GC) และขั้วแพลทินัม (Pt) โดยตัวต่อทำจาก PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 mm ยาว 52.5 mm ของบริษัท Metrohm, Switzerland

3.2.10 ไมโครปิเปต ขนาด 10 และ 100  $\mu\text{l}$  รุ่น Witopet ของบริษัท Witeg, Gemany

3.2.11 กระจกกรองเบอร์ 42 ขนาด 70 mm ของบริษัท Toyo Roshi Kaisha, Japan

3.2.12 กระจกบอกลึกน้ำ

3.2.13 บีกเกอร์ขนาด 25 100 และ 250 ml

3.2.14 ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 25 50 และ 100 ml

3.2.15 กระจกบอกลึกขนาด 10 25 50 และ 100 ml

3.2.16 ปิเปตขนาด 2 5 10 และ 20 ml

3.2.17 หลอดหยด

3.2.18 ผ้าสักหลาด สำหรับขัด

### 3.3 วิธีทำการวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

##### 3.3.1.1 การล้างมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

นำมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 0.05 กรัม มาคนในกรดไนตริกเข้มข้น 2.2 โมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร เป็นเวลา 20 ชั่วโมงด้วยความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไป sonicated 3 นาที แล้วกรองด้วยระบบสุญญากาศโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนสารละลายที่ล้างเป็นกลางแล้วนำมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ไปอบที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมงจนแห้ง จากนั้นนำไปเก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้งาน

##### 3.3.1.2 การเตรียมสารแขวนลอยของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

เตรียมสารแขวนลอยของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ความเข้มข้น 2 mg/ml โดยนำมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์มา 2 มิลลิกรัม ผสมกับสารละลายเนฟิออนเข้มข้น 0.1% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไป sonicated เป็นเวลา 30 นาที จะได้เป็นสารแขวนลอยสีดำ

สำหรับการเตรียมสารแขวนลอยของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในสารละลาย DMF ทำเช่นเดียวกันกับสารละลายเนฟิออนเข้มข้น 0.1%

#### 3.3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า

##### 3.3.2.1 การล้างขั้วไฟฟ้า

นำผ้าสักกะหลาดตรึงบนแผ่นกระจกแล้วฉีดด้วยน้ำปราศจากไอออนให้เปียกทั่วผ้าสักกะหลาด จากนั้นเทผงขั้วลอมิเนียมออกไซด์ลงเล็กน้อย นำขั้วกราไฟต์มาขัดโดยหมุนขั้วกราไฟต์เป็นวงกลมเล็กๆไปมาทางซ้ายและขวาเบาๆประมาณ 1 นาที แล้วล้างขั้วกราไฟต์ด้วยน้ำปราศจากไอออน ซับให้แห้ง หลังจากนั้นนำขั้วกราไฟต์ไป sonicated ในน้ำปราศจากไอออนประมาณ 1 นาที เพื่อล้างผงขั้วลอมิเนียมออกไซด์ออกให้หมดก่อนนำไปใช้ในงาน

##### 3.3.2.2 การเตรียมขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยนำมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

นำสารแขวนลอยของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เตรียมไว้แล้วมา 2 ไมโครลิตร หยดลงขั้วกราไฟต์ที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งให้แห้งประมาณ 30 นาที จากนั้นนำไปใช้งานได้

### 3.3.3 การศึกษาลักษณะของพีโนโตรไทออนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

#### 3.3.3.1 การศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดพีโนโตรไทออน

การศึกษานิตของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วแพลทินัมสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.50 โวลต์ ถึง 1.4 โวลต์ ขั้วกลาสติคาร์บอน ขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีและพิจารณาจากลักษณะของไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ขั้วไฟฟ้าต่างๆว่าเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์หรือไม่

#### 3.3.3.2 การศึกษานิตของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดพีโนโตรไทออน

ทำการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ อะซีเตตบัฟเฟอร์ pH 3.6 0.1 M HCl ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 บริทตันโรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 และ 0.1 M NaOH ด้วยขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s พิจารณาจากลักษณะและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ของไซคลิกโวลแทมโมแกรม

#### 3.3.3.3 การศึกษาผล pH ของสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ในการตรวจวัดพีโนโตรไทออน

ทำการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ 1.52 2.26 5.44 6.19 7.00 8.37 8.82 10.38 11.11 และ 12.16 ด้วยขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยพิจารณาค่า pH ที่ให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุด

#### 3.3.3.4 การศึกษาผลของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดพีโนโตรไทออน

ทำการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 และตรวจวัดสารละลาย  $K_3[Fe(CN)_6]$  เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยพิจารณาจากลักษณะและเปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

#### 3.3.3.5 การศึกษาผลของชนิดสารละลายที่ใช้ในการทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ตรวจวัดพีโนโตรไทออน

ทำการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิค

ไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s พิจารณาจากลักษณะและเปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด และจากสารละลายที่ใช้ในการทำสารแขวนลอยที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

### 3.3.3.6 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดพีในโตรโทออน

ทำการตรวจวัดพีในโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion เมื่อทำในสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0 2 4 6 8 และ 10 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s พิจารณาจากลักษณะและเปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

### 3.3.3.7 การศึกษาผลของปริมาตรของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดพีในโตรโทออน

ทำการตรวจวัดพีในโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion เมื่อทำในสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ความเข้มข้น 2 mg/ml ปริมาตร 1 ถึง 10 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s พิจารณาจากลักษณะและเปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากปริมาตรของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

### 3.3.3.8 การศึกษาผลของผองอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดพีในโตรโทออน

ทำการตรวจวัดพีในโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion เมื่ออัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 0 : 0 0 : 2 2 : 0 2 : 2 2 : 4 2 : 6 2 : 8 และ 2 : 14 ในสารละลายเนฟิออนเข้มข้น 0.1% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) พิจารณาจากลักษณะและเปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากผลของอัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO ที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด

### 3.3.3.9 การศึกษาผลของอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาในการตรวจวัดพีในโตรโทออนบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ทำการตรวจวัดพีในโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และ ขั้ว

Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 1 10 25 50 100 250 500 และ 1000 mV/s จากนั้นนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าและดูความเป็นเส้นตรงของกราฟดังกล่าว

### 3.3.3.10 การศึกษาช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า (Linear range)

ทำการตรวจวัดพีโนโตรไทออนที่ความเข้มข้น 1 5 10 50 100 และ 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราฟไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และ ขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion และทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV

นำค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆของพีโนโตรไทออนกับกระแสไฟฟ้า แล้วเลือกช่วงความเข้มข้นที่ให้สัญญาณเป็นเส้นตรง

### 3.3.3.11 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด (Detection limit)

นำขั้วกราฟไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มาตรวจวัดในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากสัญญาณ Noise 30 จุด แล้วหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นนำค่าความชันของช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงที่ได้จากการทดลอง 3.3.3.10 ไปคำนวณหาค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด (การคำนวณในภาคผนวก ข.10)

## 3.3.4 การศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาได้

### 3.3.4.1 ค่าการทำซ้ำ (Reproducibility)

นำขั้วกราฟไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มาตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV ทำซ้ำ 20 ครั้ง (ทุกครั้งมีการเตรียมขั้วไฟฟ้าใหม่) บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ แล้วนำค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (การคำนวณในภาคผนวก ข.11)

### 3.3.4.2 อายุการใช้งานขั้วไฟฟ้า (Life time)

นำขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และ ขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มาตรวจวัดพีในโตร ไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า

### 3.3.5 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผักตัวอย่าง

นำผักตัวอย่างได้แก่ ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้หนู มา 50 กรัม นำไปหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ลงในเครื่องปั่น เติมน้ำปราศจากไอออนไป 50 มิลลิลิตรและปั่นให้ละเอียด จากนั้นนำไปกรองแยกน้ำและกากออกจากกัน ได้น้ำที่แยกออกมาและบีบต่อมา 1 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38

จากนั้นนำไปตรวจวัดด้วยเทคนิคโพเทนชิโวลแทมเมทรีด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า จากนั้นเติมสารละลายมาตรฐานพีในโตร ไทออนเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ลงในตัวอย่างผักที่วัดแล้วและตรวจวัดด้วยเทคนิคโพเทนชิโวลแทมเมทรี บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า หลังจากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานและคำนวณหาร้อยละการคืนกลับของพีในโตร ไทออนในตัวอย่างผัก

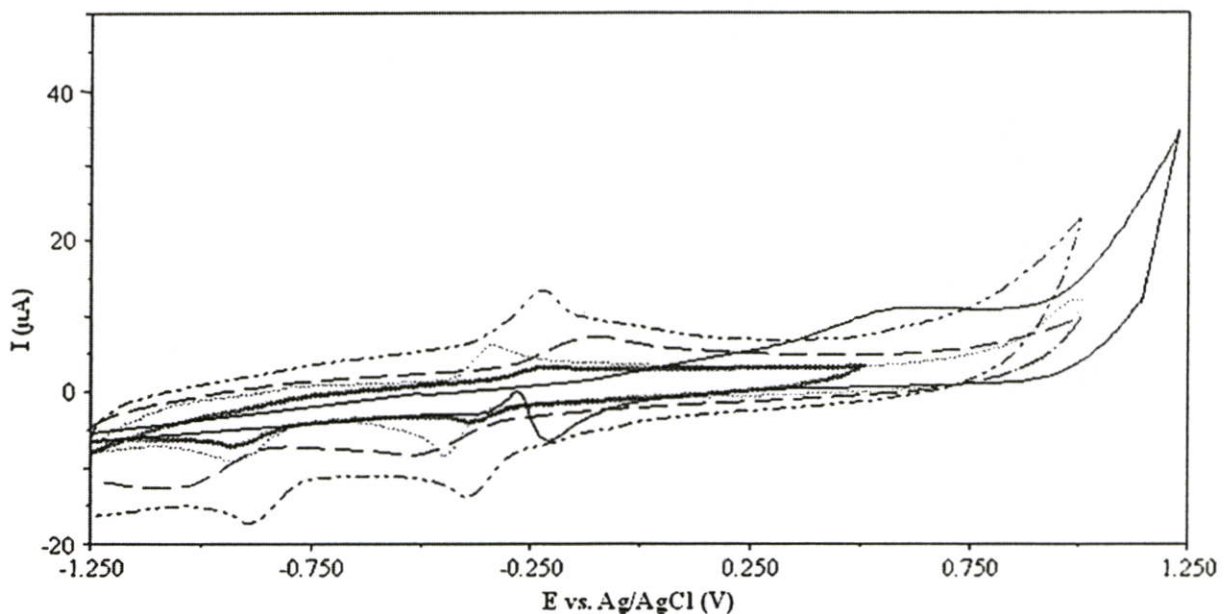
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

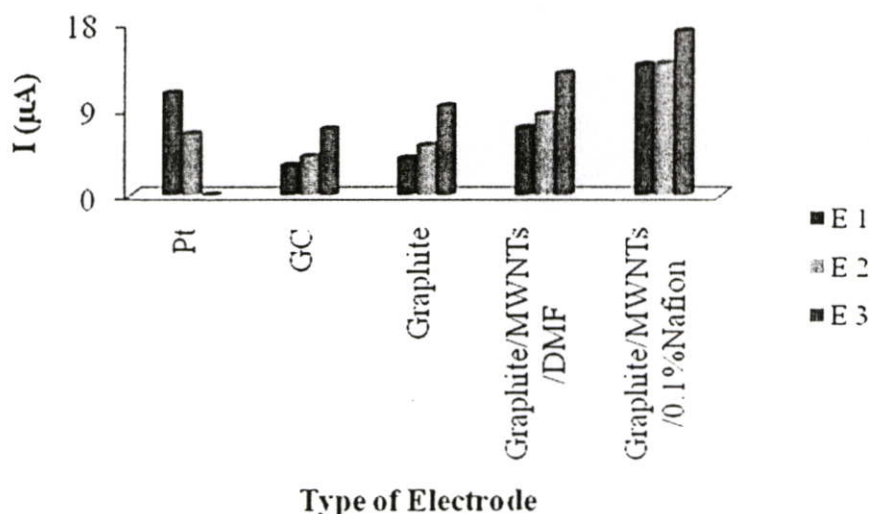
#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะของฟีนโตรไทออนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

##### 4.1.1 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดฟีนโตรไทออน

จากการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดฟีนโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วแพลทินัม ขั้วกลาสติคาร์บอน ขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ได้ผลกระทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย (—) ขั้วแพลทินัม (· · ·) ขั้วกลาสติคาร์บอน (— —) ขั้วกราไฟต์ (- -) ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และ (— - -) ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s



รูปที่ 4.2 กราฟรูปแท่งแสดงค่าฟลักกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรโทออนเข้มข้น 100 ppm ในบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วแพลทินัมสแกน ขั้วกลาสสิคาร์บอน ขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion

จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมในรูปที่ 4.1 ของพีโนโตรโทออนเมื่อตรวจวัดด้วยขั้วกราไฟต์โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.3 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันเท่ากับ -0.5 โวลต์ และ -0.7 โวลต์ ดังสมการ

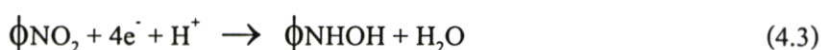
ฟลักแอโนดิก (E1) เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Hydroxylamine ได้อนุพันธ์ของ Nitroso ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ดังสมการ



ฟลักแคโทดิก (E2) เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของ Nitroso ได้ Hydroxylamine ดังสมการ



ฟลักแคโทดิก (E3) เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของ  $\phi\text{NO}_2$  กับอิเล็กตรอน 4 ตัว ได้อนุพันธ์ของ Hydroxylamine ดังสมการ

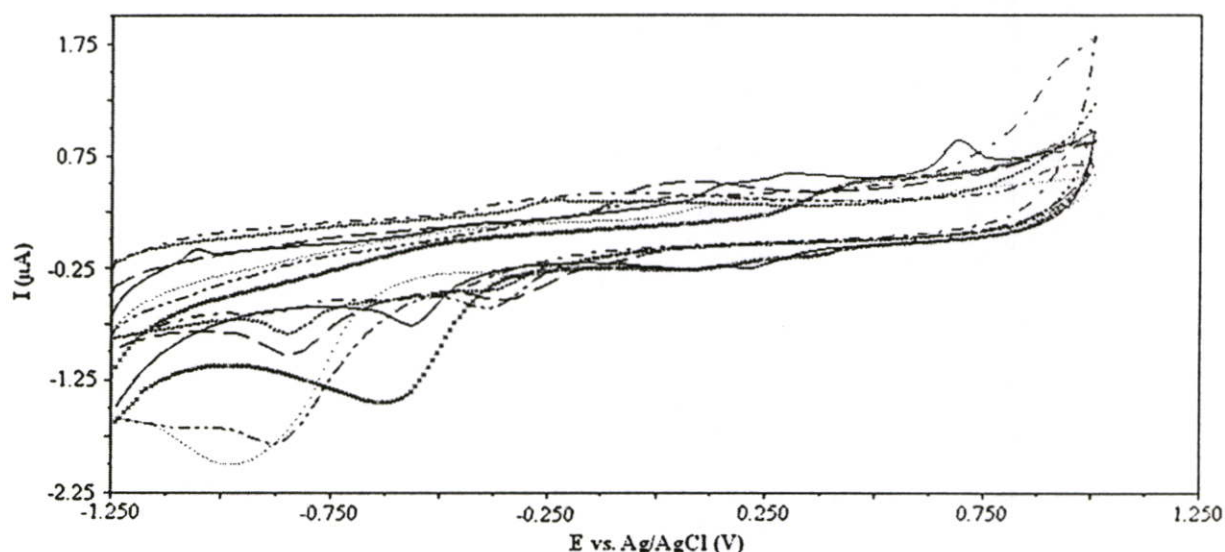


จากนั้นเมื่อนำขั้วกราไฟต์ไปปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion) ให้ค่ากระแสการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันสูงกว่าขั้วแพลทินัม ขั้วกลาสสิคาร์บอน และขั้วกราไฟต์ แต่ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion มีค่ากระแสมากกว่าขั้ว Graphite/MWNTs/DMF เนื่องจากสารทั้งสองต่างเป็นตัวจริงให้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ยึดติดที่ผิวหน้าขั้วกราไฟต์และยังช่วยในการ

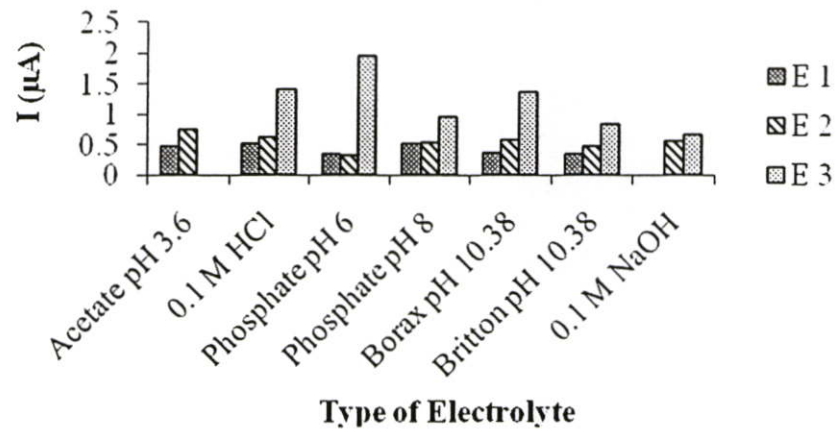
นำไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น แต่สารละลายแนฟิออนมีโครงสร้างเป็นโคโพลิเมอร์ที่ใหญ่กว่า DMF การยึดติดที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจึงดีกว่า หลุดออกยากกว่าเมื่อทำการชะล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและทำให้ขั้วไฟฟ้าสามารถใช้งานได้นาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 0.1% เป็นขั้วใช้งานในการตรวจวัดพีในโครไทออน

#### 4.1.2 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดพีในโครไทออน

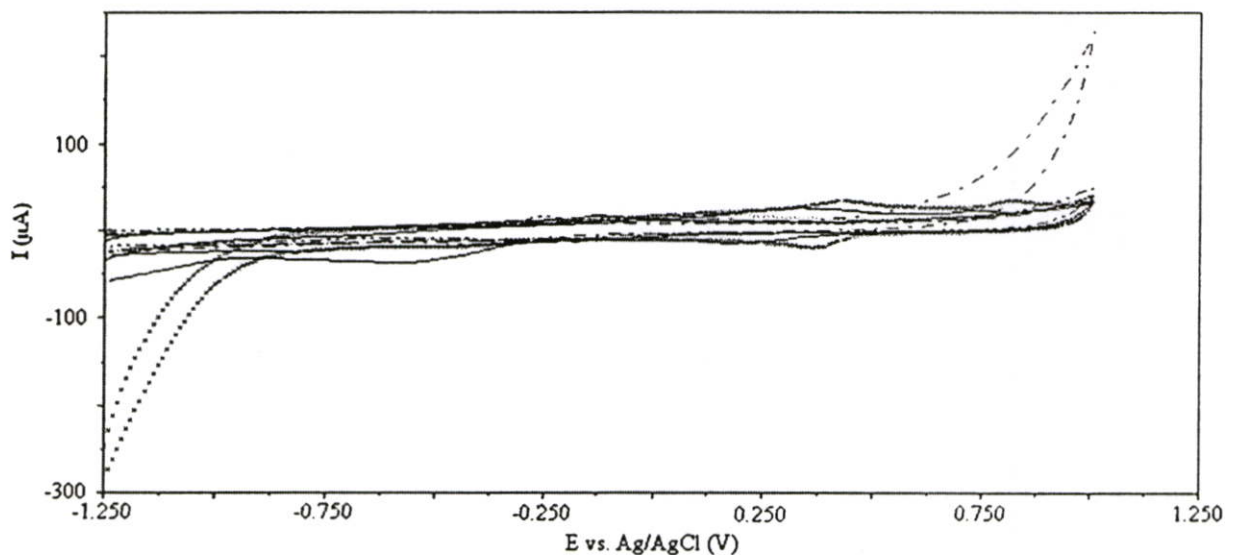
จากการตรวจวัดพีในโครไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ อะซีเตตบัฟเฟอร์ pH 3.7 0.1M HCl ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 บริทตัน โรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 และ 0.1 M NaOH ด้วยขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.3 4.4 4.5 และ 4.6



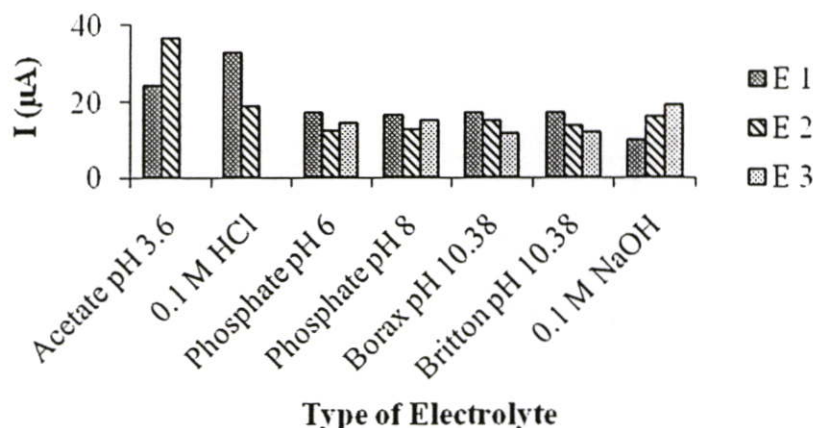
รูปที่ 4.3 ไซคลิก โวลแทมโมแกรมของพีในโครไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ (—) อะซีเตตบัฟเฟอร์ pH 3.7 (X) 0.1M HCl (.) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 (--) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 (— - —) บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 (+) บริทตัน โรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 และ (— - —) 0.1 M NaOH ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s



รูปที่ 4.4 กราฟรูปแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ อะซีเตดบัฟเฟอร์ pH 3.7 0.1 M HCl ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 บริทตันโรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 และ 0.1 M NaOH ด้วยขั้วกราไฟต์



รูปที่ 4.5 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ (—) อะซีเตดบัฟเฟอร์ pH 3.7 (×) 0.1M HCl (.) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 (--) ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 (— · — · —) บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 (+) บริทตันโรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 และ (— · —) 0.1 M NaOH ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราสแกน 50 mV/s



รูปที่ 4.6 กราฟรูปแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของฟิโน

โตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ ได้แก่ อะซิเตดบัฟเฟอร์ pH 3.7

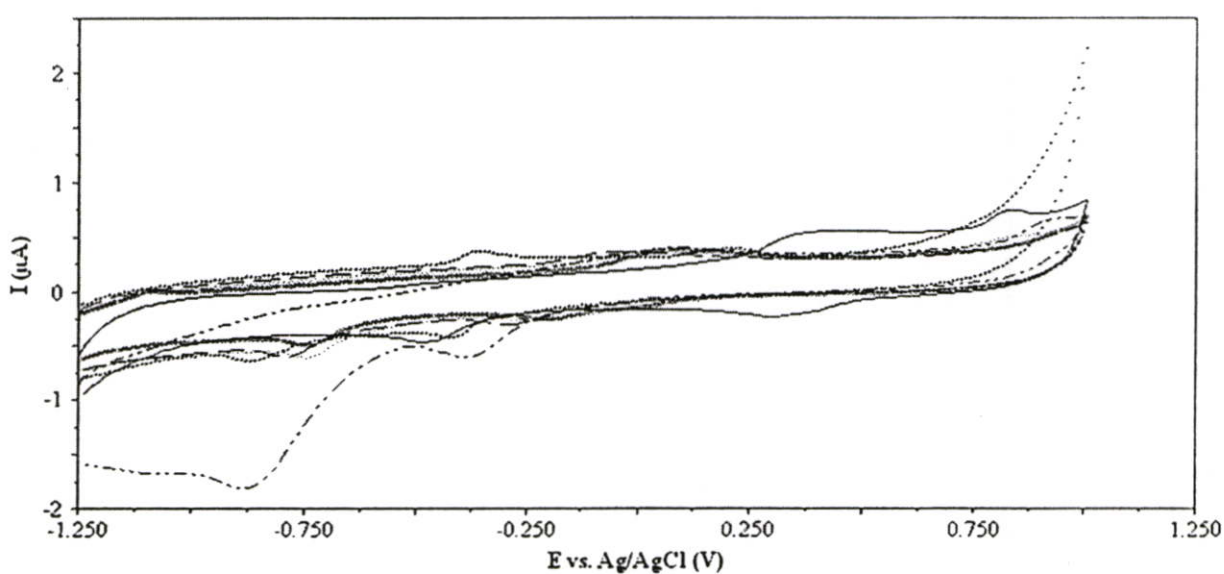
0.1 M HCl ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38

บริทตันโรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 และ 0.1 M NaOH ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion

เนื่องจากสารละลายบัฟเฟอร์ชนิดต่างๆให้พิกออกซิเดชันและรีดักชันของฟิโนโตรไทออนที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน แต่สารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 และสารละลายบริทตันโรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 จะมีตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันมากแต่ได้กระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.282 โวลต์ มีกระแสออกซิเดชันเท่ากับ 0.367 แอมแปร์ และที่ศักย์ไฟฟ้า -0.345 โวลต์ และ -0.848 โวลต์ มีกระแสรีดักชันเท่ากับ -0.580 แอมแปร์ และ -1.36 แอมแปร์ ตามลำดับ เมื่อตรวจวัดด้วยขั้วกราไฟต์ และเมื่อตรวจวัดด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.239 โวลต์ มีกระแสออกซิเดชันเท่ากับ 17.200 แอมแปร์ และที่ศักย์ไฟฟ้า -0.285 โวลต์ และ -0.765 โวลต์ มีกระแสรีดักชันเท่ากับ -15.167 แอมแปร์ และ -11.533 แอมแปร์ ตามลำดับ ส่วนในสารละลายบริทตันโรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.234 โวลต์ มีกระแสออกซิเดชันเท่ากับ 0.353 แอมแปร์ และที่ศักย์ไฟฟ้า -0.365 โวลต์ และ -0.858 โวลต์ มีกระแสรีดักชันเท่ากับ -0.463 แอมแปร์ และ -0.841 แอมแปร์ ตามลำดับ เมื่อตรวจวัดด้วยขั้วกราไฟต์ และเมื่อตรวจวัดด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.237 โวลต์ มีกระแสออกซิเดชันเท่ากับ 17.267 แอมแปร์ และที่ศักย์ไฟฟ้า -0.290 โวลต์ และ -0.808 โวลต์ มีกระแสรีดักชันเท่ากับ -13.583 แอมแปร์ และ -12.000 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ให้พิกกระแสสูงกว่าในสารละลายบริทตันโรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.38 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้สารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดฟิโนโตรไทออน

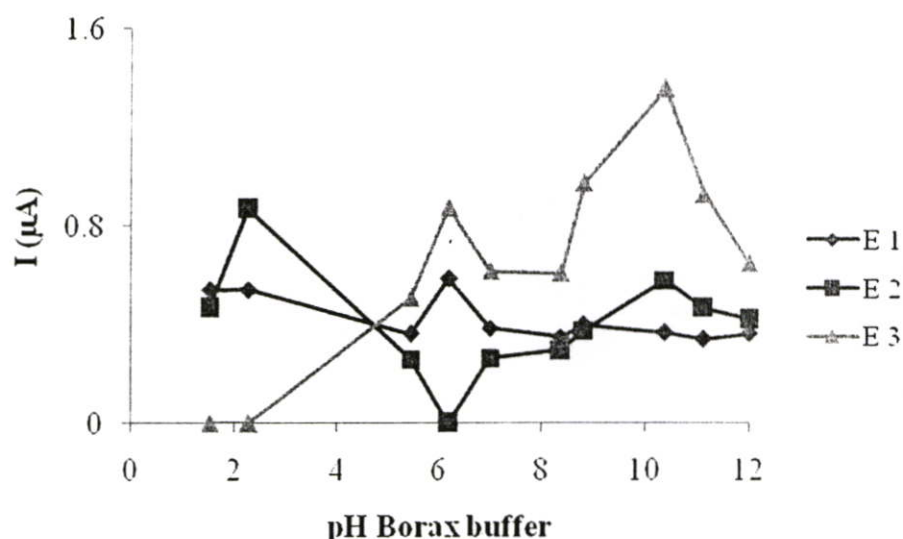
#### 4.1.3 ผลการศึกษาผล pH ของสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ในการตรวจวัดฟีนโตรไทออน

จากการตรวจวัดฟีนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ 1.52 2.26 5.44 6.19 7.00 8.37 8.82 10.38 11.11 และ 12.16 ด้วยขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่า pH ต่างๆ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.7 4.8 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

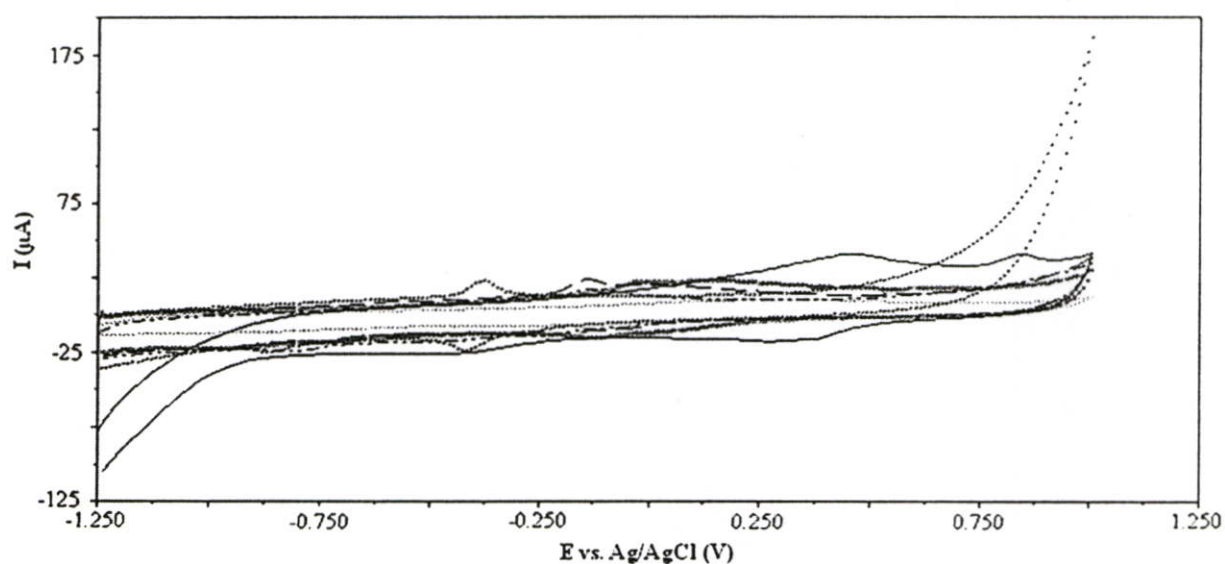


รูปที่ 4.7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์

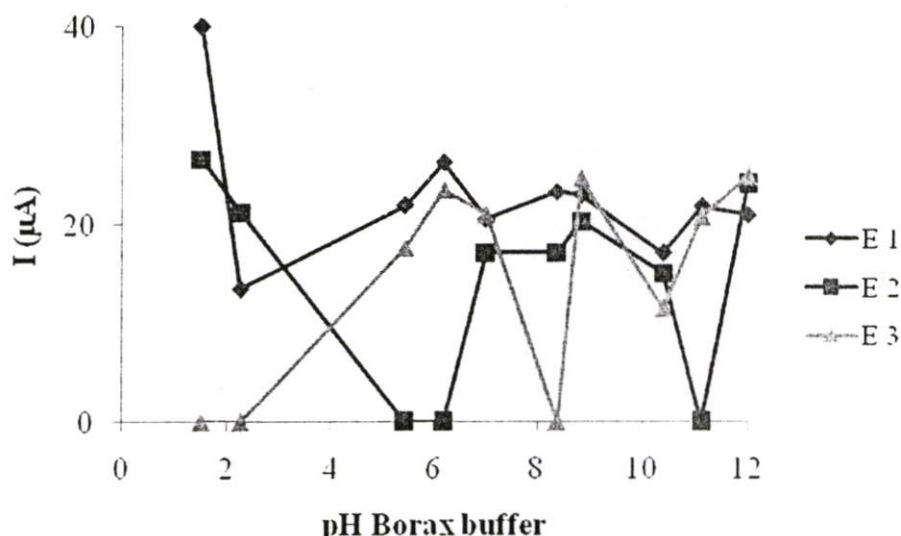
บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ (—) 1.52 (X) 5.44 (.) 7.00 (--) 8.37 (— - - —) 10.38 และ (+) 12.16 ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีคกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของฟิโน ไตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ 1.52 2.26 5.44 6.19 7.00 8.37 8.82 10.38 11.11 และ 12.16 ด้วยขั้วกราไฟต์



รูปที่ 4.9 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของฟิโน ไตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ (—) 1.52 (X) 5.44 (.) 7.00 (--) 8.37 (— -- —) 10.38 และ (+) 12.16 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s

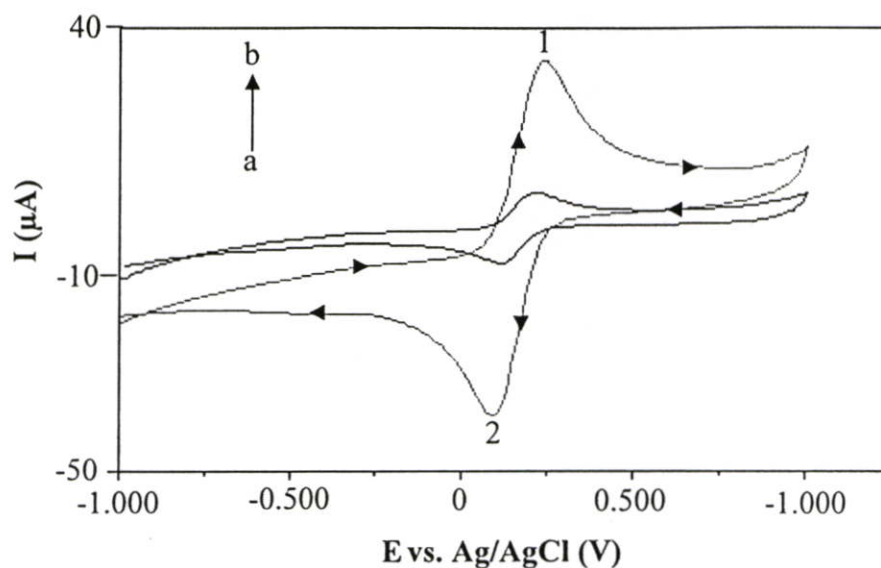


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของฟิโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH ต่างๆ ได้แก่ 1.52 2.26 5.44 6.19 7.00 8.37 8.82 10.38 11.11 และ 12.16 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion

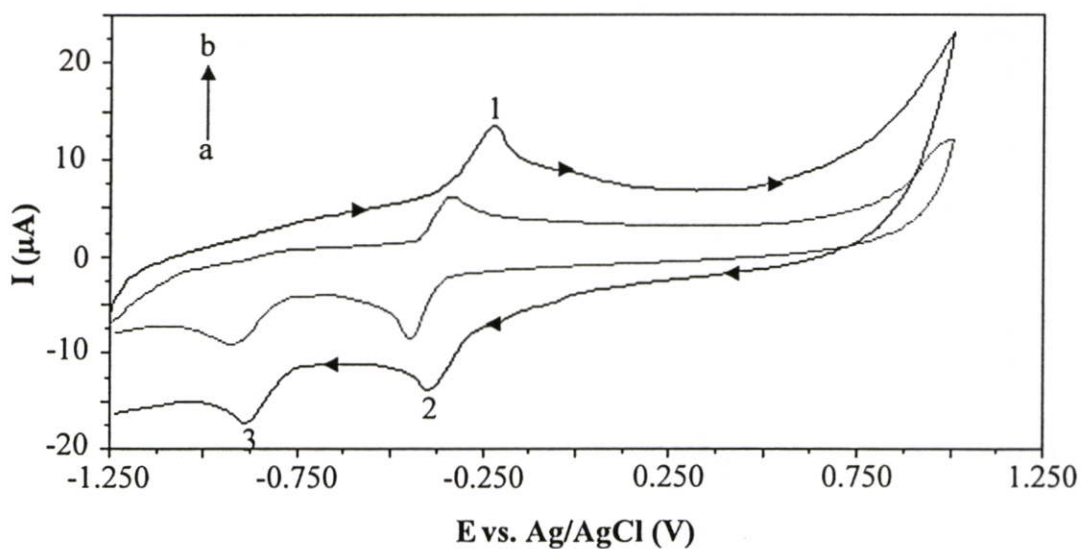
เนื่องจากบอแรกซ์บัฟเฟอร์ ที่ pH ต่างๆ ให้พิกกระแสออกซิเดชันและรีดักชันของฟิโนโตรไทออนที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้แตกต่างกัน โดยเมื่อ pH เพิ่มขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่ม pH ถึง 12 ค่ากระแสที่ได้มีค่าลดลงเนื่องจากฟิโนโตรไทออนมีความเป็นเบสสูงการแตกตัวลดลง ดังนั้นที่ pH 10.38 ให้พิกกระแสออกซิเดชันและรีดักชันดีและให้กระแสไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับ pH อื่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 เป็น pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัดฟิโนโตรไทออน

#### 4.1.4 ผลการศึกษาผลของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดฟิโนโตรไทออน

จากการตรวจวัดฟิโนโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 และตรวจวัดสารละลาย  $K_3[Fe(CN)_6]$  เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ  $K_3[Fe(CN)_6]$  เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วย (a) ขั้วกราไฟต์ และ (b) ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s

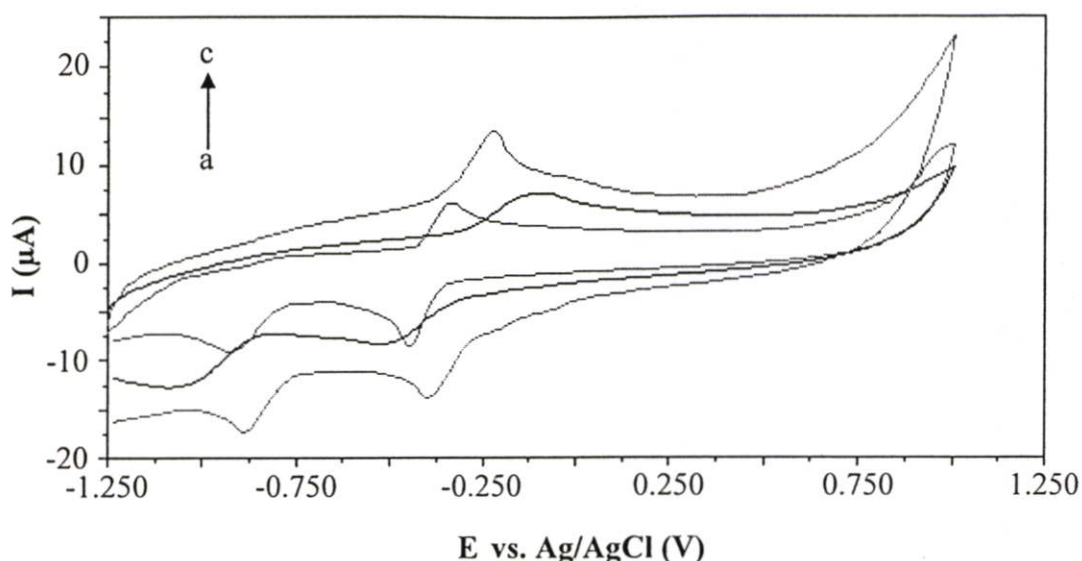


รูปที่ 4.12 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรโทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย (a) ขั้วกราไฟต์ และ (b) ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s

เมื่อเปรียบเทียบขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion พบว่าขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ให้พีคกระแสออกซิเดชันและรีดักชันของ  $K_3[Fe(CN)_6]$  และพีโนโตรไทออนสูงกว่าขั้วกราไฟต์ เนื่องจากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์มีโครงสร้างเป็นท่อกลวงซ้อนกันๆชั้น ซึ่งแต่ละท่อมียขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวน้อยมากทำให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี การนำไฟฟ้าในมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นแบบ ballistic คือไม่มีการกระจายของอิเล็กตรอนตามแนวความยาวของทิวป์ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับโลหะทองแดง [50, 63] และยังสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเนื่องจากเป็นอนุภาคนาโนมีพื้นที่ผิวประมาณ  $1500 \text{ m}^2/\text{g}$  ซึ่งช่วยให้เกิด electron-transfer reaction [19, 25] ได้ดีซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดีขึ้นและสามารถให้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์เพื่อช่วยในการตรวจวัดพีโนโตรไทออน

#### 4.1.5 ผลการศึกษาผลของชนิดสารละลายที่ใช้ในการทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดพีโนโตรไทออน

จากการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์และขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ปรับปรุงในสารละลาย DMF และในสารละลายแอฟอนเข้มข้น 0.1% ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.13

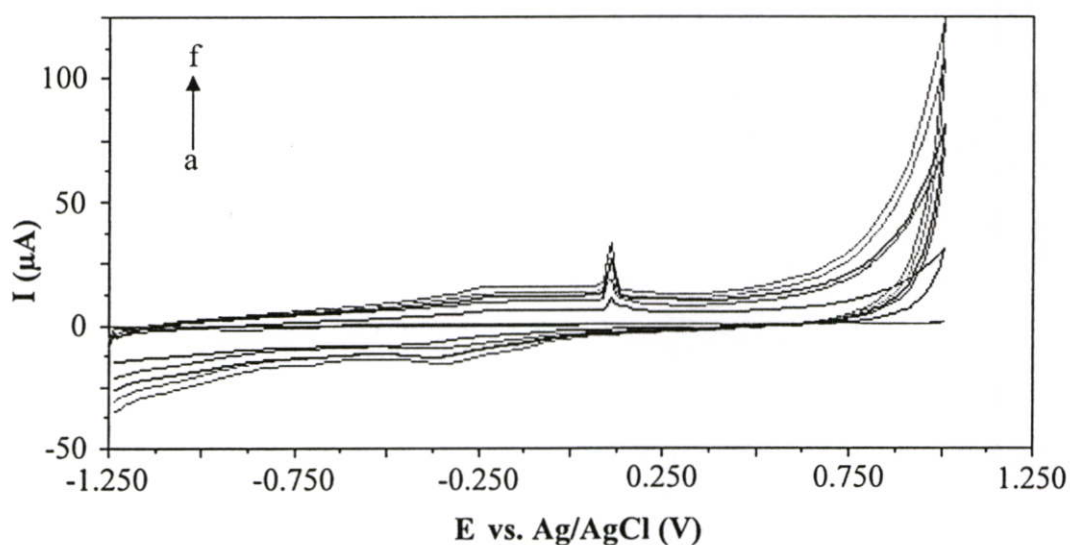


รูปที่ 4.13 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนโตรโทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วย (a) ขั้วกราไฟต์ (b) ขั้วGraphite/MWNTs/DMF และ (c) ขั้วGraphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s

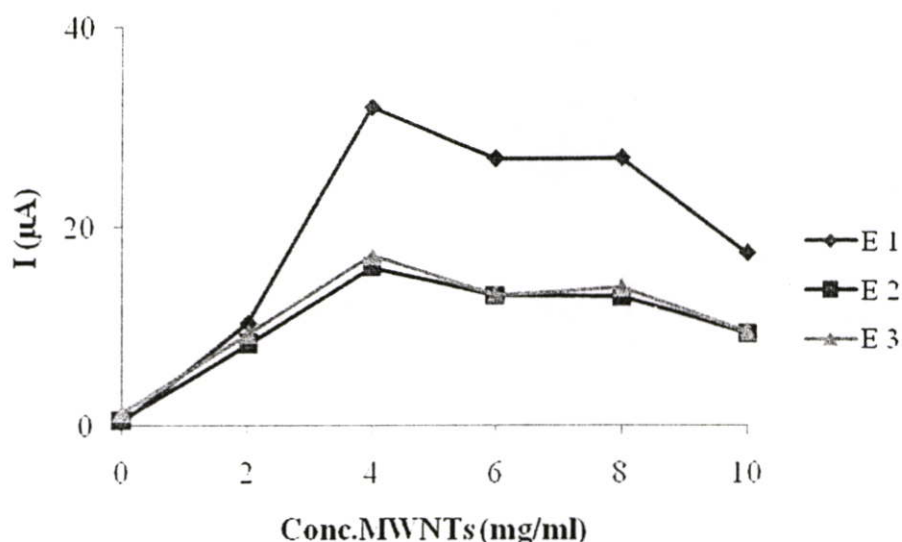
เมื่อเปรียบเทียบขั้วกราไฟต์และขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์พบว่าขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้พีคกระแสออกซิเดชันและรีดักชันของฟีนโตรโทออนสูงกว่าขั้วกราไฟต์ เนื่องจากว่ามัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากโครงสร้างที่เป็นท่อกลวงซ้อนกันหลายๆชั้นทำให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี และยังสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและเมื่อนำมาปรับปรุงให้กับขั้วกราไฟต์ทำให้สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้ดี และเมื่อเลือกสารแขวนลอยที่ใช้ปรับปรุงขั้วกราไฟต์ พบว่าสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 0.1% สามารถให้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า DMF เนื่องจากสารทั้งสองต่างเป็นตัวตรึงให้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ยึดติดที่ผิวหน้าขั้วกราไฟต์และยังช่วยในการนำไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น แต่สารละลายแนฟิออนมีโครงสร้างเป็นโคโพลิเมอร์ที่ใหญ่กว่า DMF การยึดติดที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจึงดีกว่า หลุดออกยากกว่าเมื่อทำการชะล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและทำให้ขั้วไฟฟ้าสามารถใช้งานได้นาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปรับปรุงด้วยสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 0.1% เพื่อช่วยในการตรวจวัดฟีนโตรโทออน

#### 4.1.6 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดพีโนโตรไทออน

จากการตรวจวัดพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 0 2 4 6 8 และ 10 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ (a) 0 (b) 2 (c) 4 (d) 6 (e) 8 และ (f) 10 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s

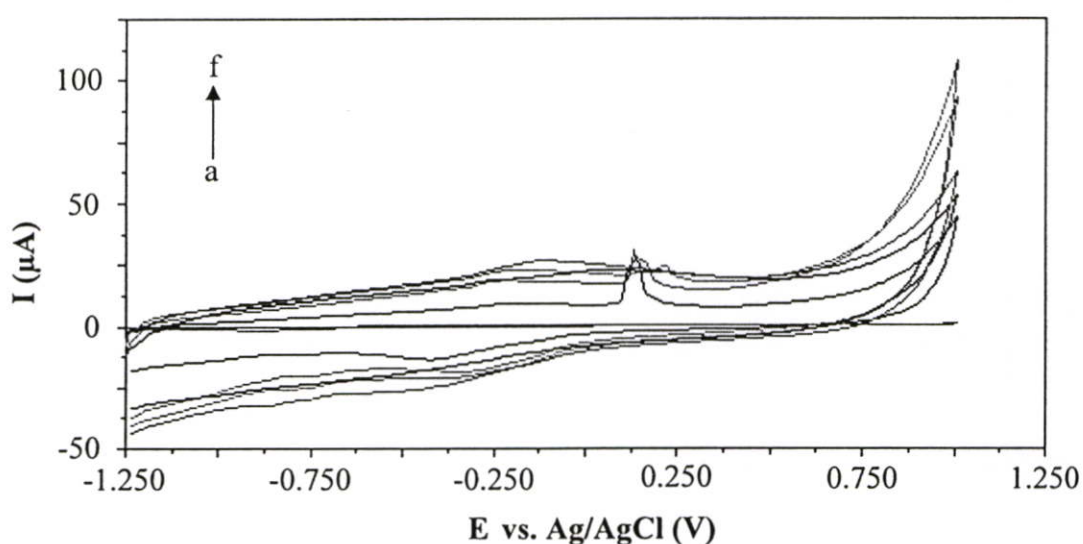


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโดรไทออนที่ความเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์เท่ากับ 0 2 4 6 8 และ 10 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร

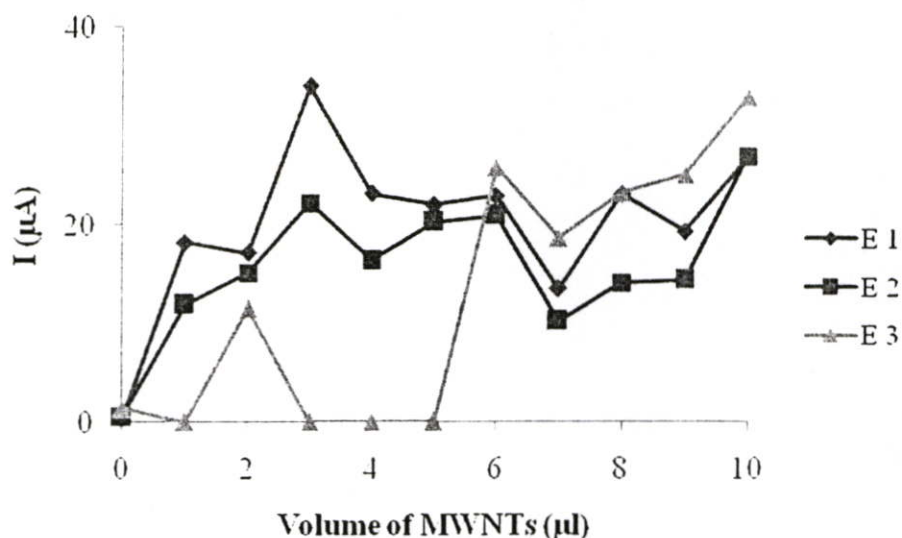
จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโดรไทออน เมื่อเปรียบเทียบขั้วกราฟไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ได้ให้ฟลักกระแสออกซิเดชันและรีดักชันของพีโนโดรไทออนสูงกว่าขั้วกราฟไฟต์ และเมื่อนำขั้วกราฟไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ในสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 0.1% ที่ความเข้มข้นต่างๆพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์เพิ่มมากขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 4 mg/ml และเมื่อเกินจาก 4 mg/ml จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลงเนื่องจากพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามีความหนาของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์มากเกินไปจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ไม่ดี แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 4 mg/ml จะทำให้สารติดอยู่ในทิวของไมโครปิเปตมากและทำการล้างออกได้ยาก เนื่องจากความเข้มข้นมากทำให้เกิดความหนืดและยึดติดกันดีและยังเกาะอยู่ในทิวมากเมื่อทำการหยดสารลงบนขั้วไฟฟ้าก็จะทำให้เหลือสารในทิว แต่เมื่อใช้สารแขวนลอยที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2 mg/ml ก็ให้ฟลักกระแสดี สารแขวนลอยก็ไม่หนืดมากเกินไปและเหลืออยู่ในทิว อีกทั้งยังสามารถทำความสะอาดทิวได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ในปริมาณมากเกินไปในการเตรียมขั้วไฟฟ้าเมื่อเทียบกับความเข้มข้น 4 mg/ml ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวส์ที่ปรับปรุงด้วยสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 0.1% ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยเท่ากับ 2 mg/ml เพื่อช่วยในการตรวจวัดพีโนโดรไทออน

#### 4.1.7 ผลการศึกษาผลของปริมาณของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดพีในโตรไทออน

จากการตรวจวัดพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion เข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ 2 mg/ml ปริมาตร 0 ถึง 10 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับปริมาณของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร (a) 0 (b) 2 (c) 4 (d) 6 (e) 8 และ (f) 10 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s

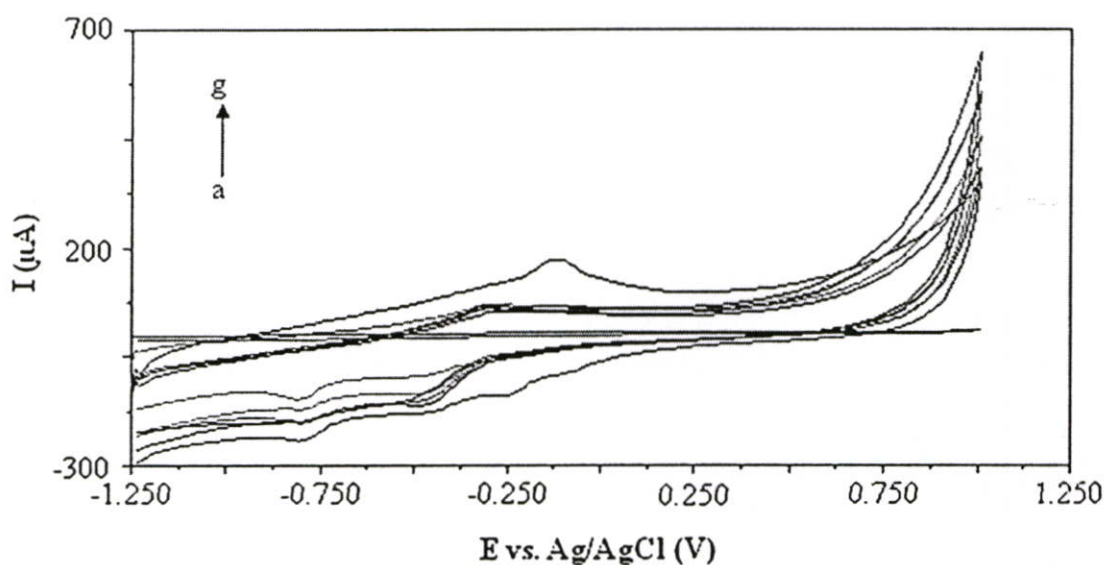


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีทกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโดรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 กับปริมาตรของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์

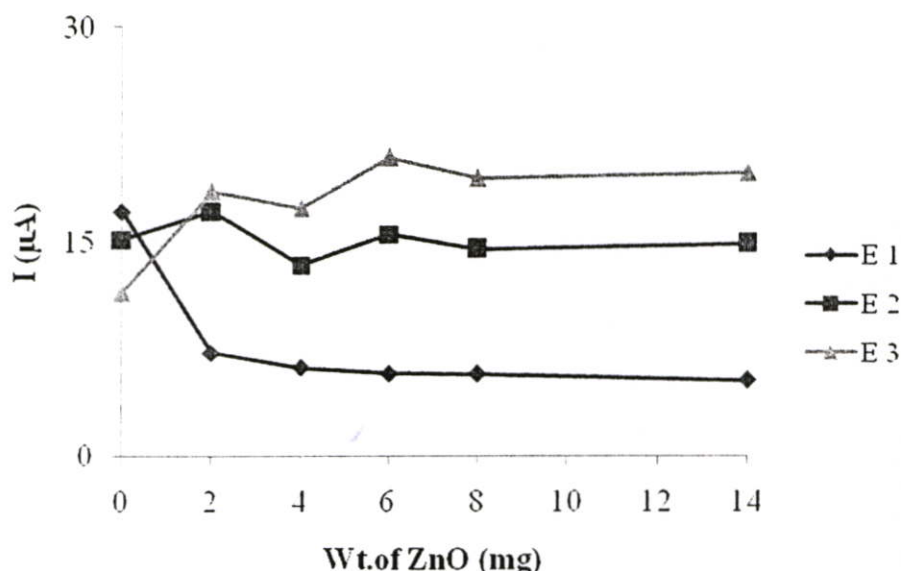
จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโดรไทออนที่ตรวจวัดด้วยขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ให้พีทกระแสออกซิเดชันและรีดักชันของพีโนโดรไทออนสูงกว่าขั้วกราไฟต์และเมื่อนำขั้วกราไฟต์ที่ปรับปรุงด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในสารละลายแอฟอนเข้มข้น 0.1% ที่เข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์เท่ากับ 2 mg/ml ในปริมาตรต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาตรของสารแขวนลอยเพิ่มมากขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และได้ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 3 ไมโครลิตร แต่ให้พีทกระแสออกซิเดชันและรีดักชันของพีโนโดรไทออนไม่ดี และเมื่อปริมาตรมากเกินไปจะทำให้ค่ากระแสไฟฟาลดลงเพราะว่าเมื่อใช้ปริมาตรของสารแขวนลอยมากเกินไปทำให้พื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้ามีความหนาของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์มากขึ้นจึงทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ไม่ดี ดังนั้นใช้สารแขวนลอยที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร จะให้พีทกระแสดีและสามารถให้พีทกระแสออกซิเดชันและรีดักชันครบและยังไม่จำเป็นต้องใช้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในปริมาณมากเกินไปในการเตรียมขั้วไฟฟ้า เนื่องจากสารมีราคาแพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ปรับปรุงด้วยสารละลายแอฟอนเข้มข้น 0.1% ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร เพื่อช่วยในการตรวจวัดพีโนโดรไทออน

#### 4.1.8 ผลการศึกษาผลของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในการตรวจวัดฟีนีโตรไทออน

จากการตรวจวัดฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 0 : 0 2 : 0 2 : 2 2 : 4 2 : 6 2 : 8 และ 2 : 14 ปริมาตร 2 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับน้ำหนักของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ (a) 0 : 0 (b) 2 : 0 (c) 2 : 2 (d) 2 : 4 (e) 2 : 6 (f) 2 : 8 และ (g) 2 : 14 สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s

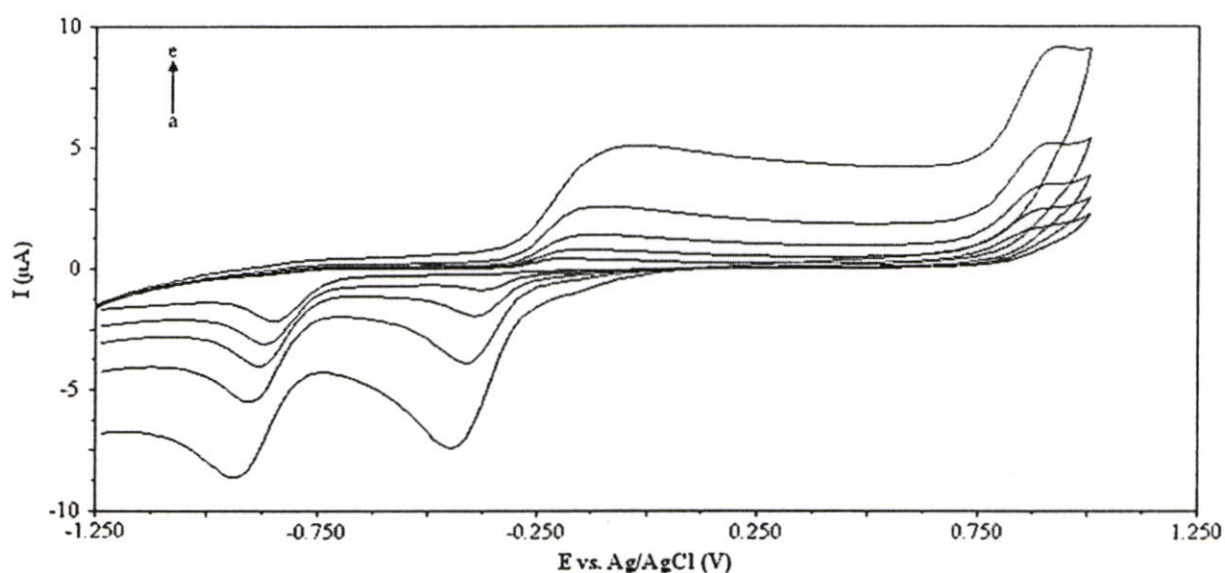


รูปที่ 4.19 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโดรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 กับน้ำหนักของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์

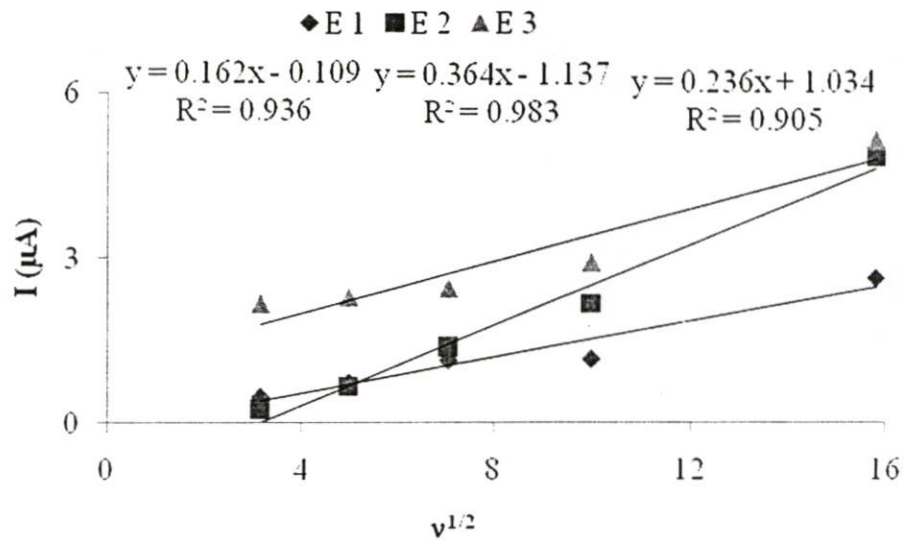
จากคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโดรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ให้ฟลักกระแสออกซิเดชันและฟลักกระแสรีดักชัน และเมื่ออัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เพิ่มขึ้นฟลักกระแสก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ดีเช่นเดียวกับมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และเมื่ออัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 2 : 6 ให้ฟลักกระแสสูงสุด และเมื่ออัตราส่วนหลังจากนั้นให้ค่ากระแสที่ต่ำ เนื่องจากว่าที่อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 2 : 6 เมื่อทำการ sonicated มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ในสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 1% ทำให้สารเกิดการกระจายตัวได้ไม่ดีและจับกันเป็นก้อนบางส่วน อาจทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารทั้งสองลดลง และเมื่อเลือกอัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 2 : 4 ก็ยังให้สามารถให้ฟลักกระแสสูงเช่นกัน และสารทั้งสองเกิดการกระจายตัวดีในสารละลายแนฟิออน อีกทั้งยังไม่ใช้สารทั้งสองในปริมาณมากเกินไป เนื่องจากสารมีราคาแพง

#### 4.1.9 ผลการศึกษาอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาในการตรวจวัดฟีนโนโตรโทอนบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

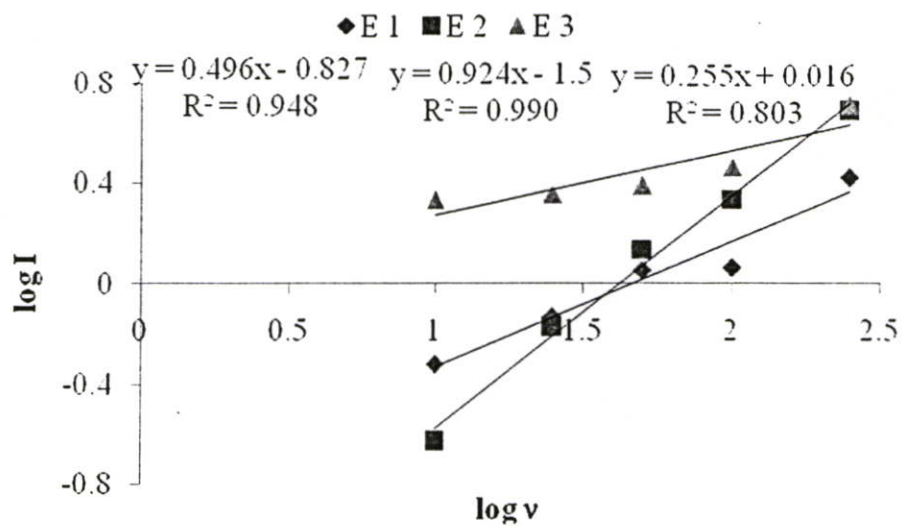
จากการตรวจวัดฟีนโนโตรโทอนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/ZnO/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 1 10 25 50 100 250 500 และ 1000 mV/s และนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอคกาลิทึมของอัตราการสแกนกับลอคกาลิทึมกระแสไฟฟ้า ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.20 4.21 4.22 4.23 4.24 4.25 4.26 4.27 4.28 4.29 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ และดังตารางที่ 4.1 และ 4.2



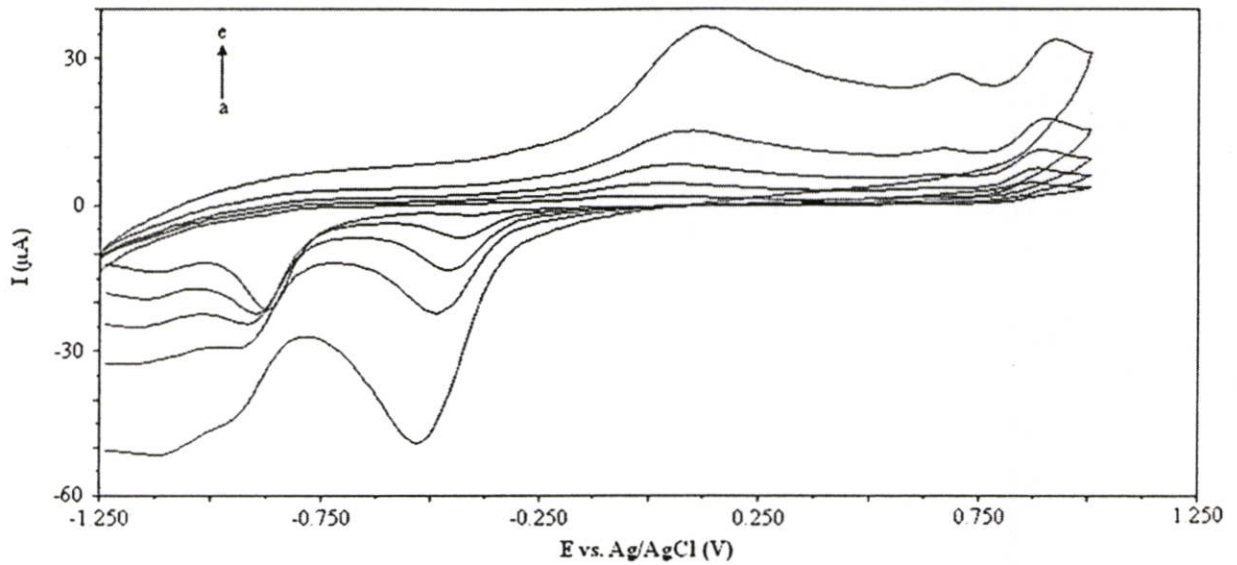
รูปที่ 4.20 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนโนโตรโทอนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 10 (b) 25 (c) 50 (d) 100 และ (e) 250 mV/s



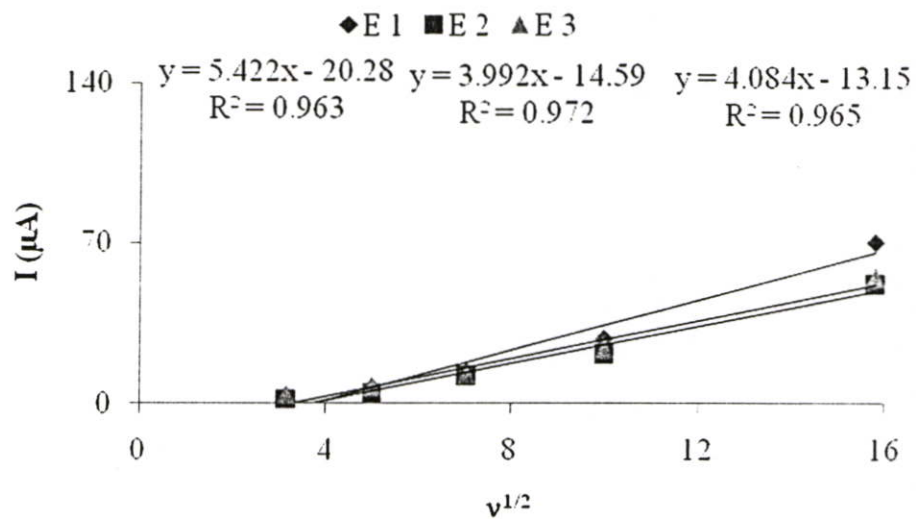
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของฟิโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์



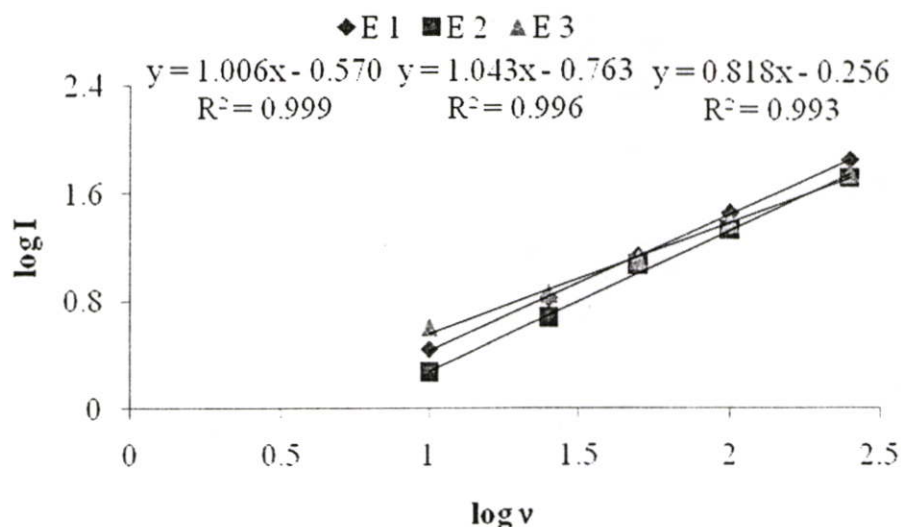
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของอัตราสแกนกับค่าลอการิทึมของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของฟิโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์



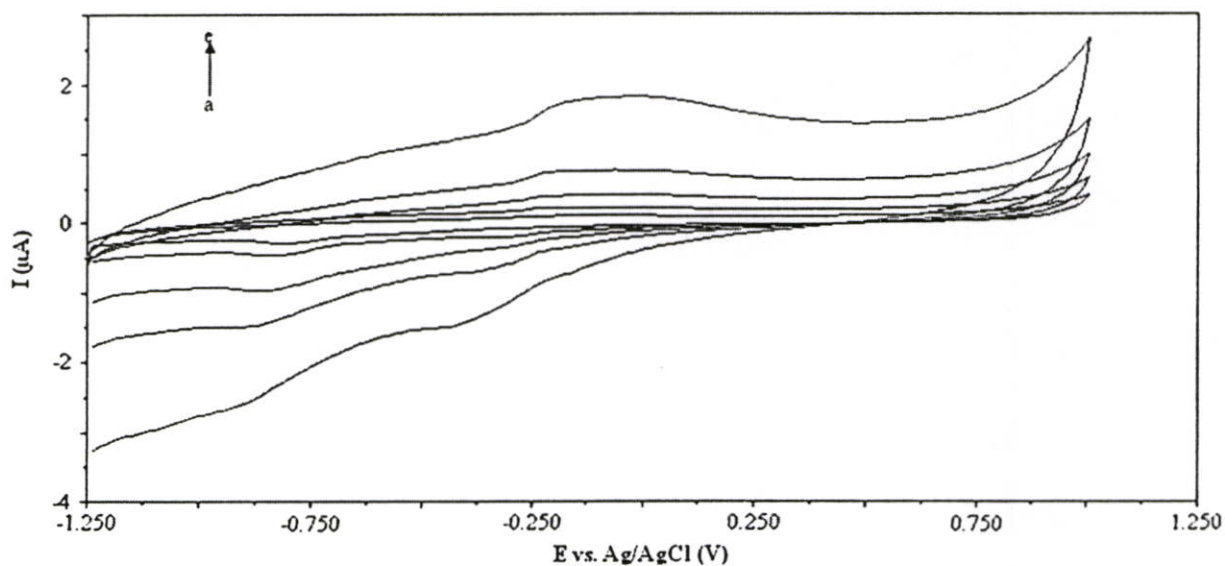
รูปที่ 4.23 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีนีโคลโบรเนตเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่เข้มข้น 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 10 (b) 25 (c) 50 (d) 100 และ (e) 250 mV/s



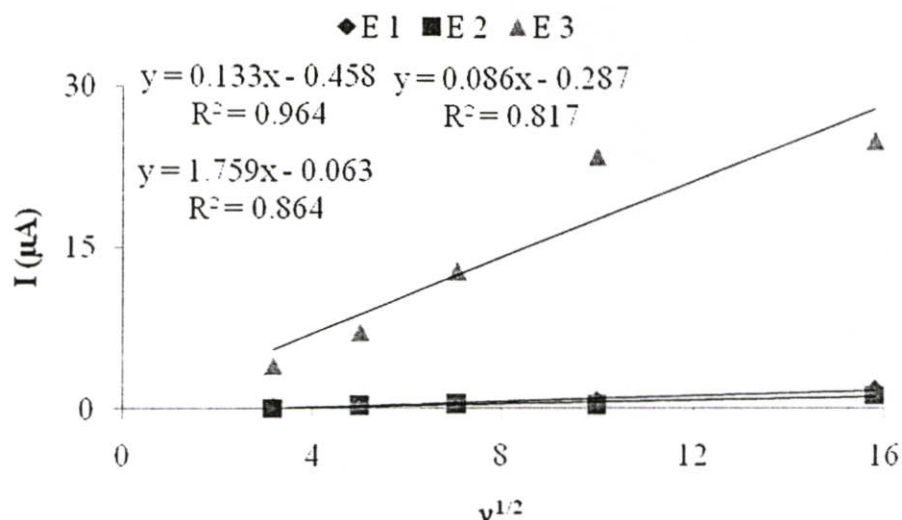
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีนีโคลโบรเนตเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion



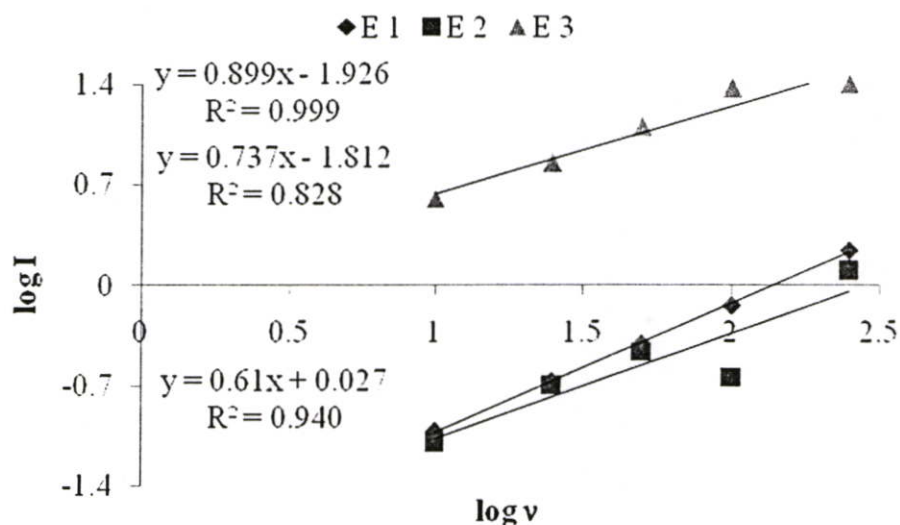
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของอัตรากระแสกับค่าลอการิทึมของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion



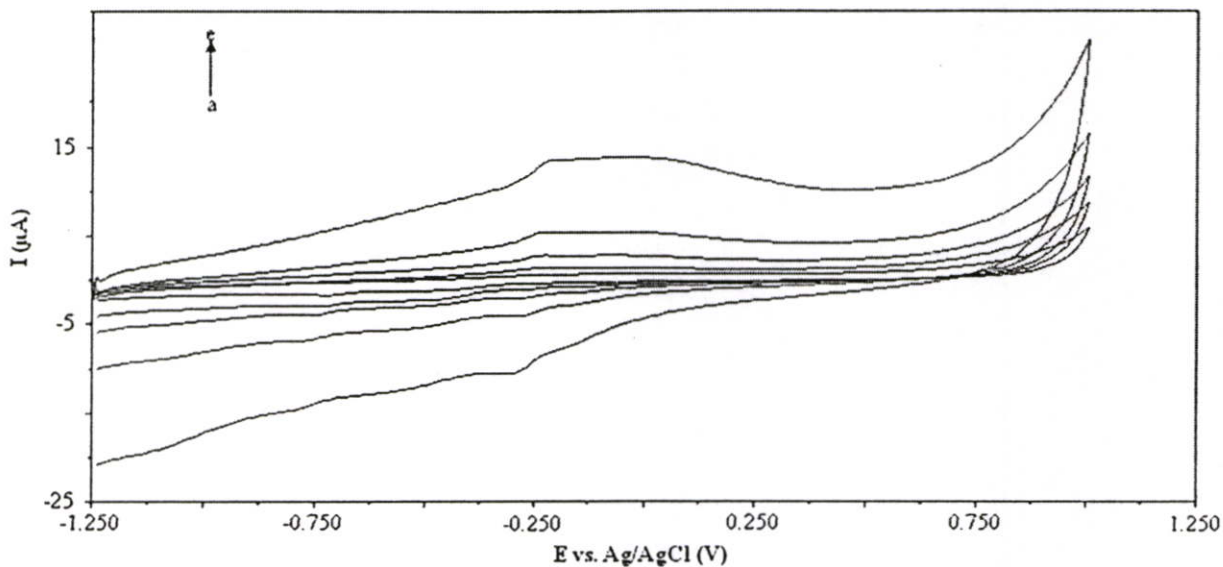
รูปที่ 4.26 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 10 (b) 25 (c) 50 (d) 100 และ (e) 250 mV/s



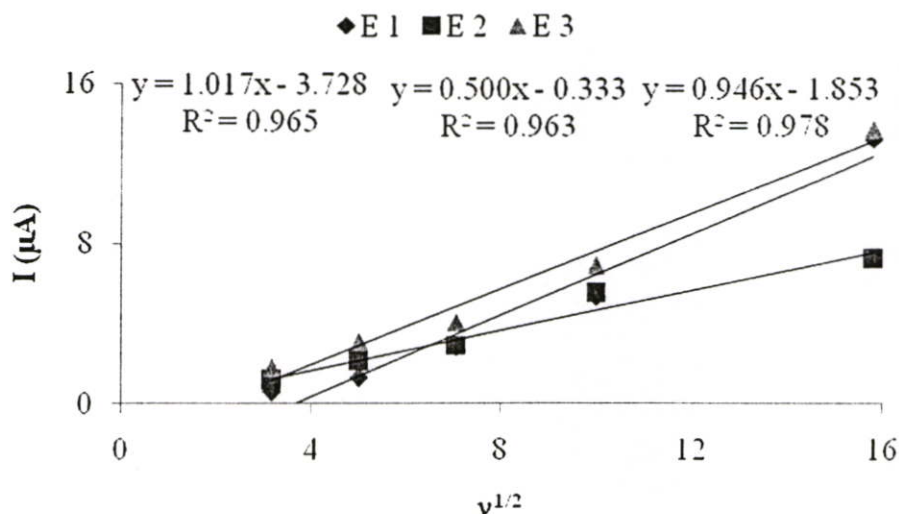
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโดรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion



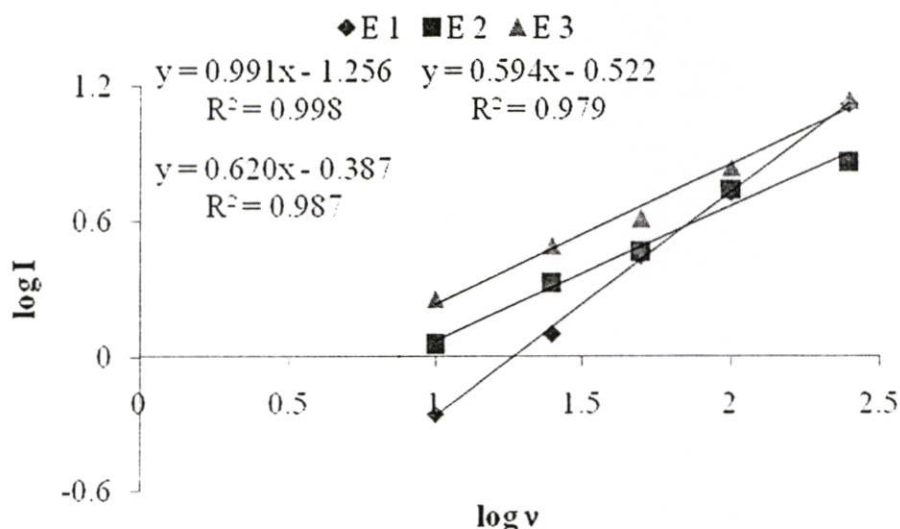
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของอัตราสแกนกับค่าลอการิทึมของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโดรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion



รูปที่ 4.29 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของฟิโนโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/MWNTs/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml (อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 1 : 1) ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 10 (b) 25 (c) 50 (d) 100 และ (e) 250 mV/s



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของฟิโนโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอกกาติทิมของอัตราการสแกนกับค่าลอกกาติทิมของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของพีโนโดร ไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า  $R^2$  ที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ เมื่อพลอตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับรากที่สองของอัตราการสแกน ( $V^{1/2}$ )

Type of Electrode	$R^2$			Type of Reaction
	E 1	E 2	E 3	
Graphite	0.936	0.983	0.905	D
Graphite/MWNTs/0.1%Nafion	0.963	0.972	0.965	D
Graphite/ZnO/0.1%Nafion	0.964	0.817	0.864	D
Graphite/ZnO/MWNTs/0.1%Nafion	0.965	0.963	0.978	D

หมายเหตุ D คือ Diffusion-control

ตารางที่ 4.2 แสดงความชันและชนิดของปฏิกิริยาของฟิสิกส์ที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆเมื่อพลอตกราฟระหว่างลอการิทึมของกระแสไฟฟ้ากับลอการิทึมของอัตราการสแกน

Type of Electrode	Slope			Type of Reaction		
	E 1	E 2	E 3	E 1	E 2	E 3
Graphite	0.496	0.924	0.255	D	S	D
Graphite/MWNTs/0.1%Nafion	1.006	1.043	0.818	S	S	S
Graphite/ZnO/0.1%Nafion	0.899	0.737	0.61	S	S	D
Graphite/ZnO/MWNTs/0.1%Nafion	0.991	0.594	0.62	S	D	D

หมายเหตุ D คือ Diffusion-control

S คือ Surface-control

จากไซคลิกลิตเทอโมแกรมของพีโนโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราฟไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ที่อัตราการสแกนต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการสแกนมากขึ้น ทำให้ได้ฟิสิกส์ออกซิเดชันและรีดักชันชัดเจนและมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อค่าอัตราการสแกนสูงสุดเท่ากับ 250 mV/s จะทำให้กระแสที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความชัดเจนของฟิสิกส์ลดลง ฟิสิกส์กว้างมากขึ้น และเมื่อนำค่ากระแสที่ได้มาพลอตกราฟกับรากที่สองของอัตราการสแกน ( $V^{1/2}$ ) (จากสมการ 2.5) จะได้กราฟเป็นเส้นตรงแสดงว่ากระแสที่ได้เกิดจากกระบวนการ Diffusion-control คือ กระแสไฟฟ้าที่ได้ปฏิกิริยาที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ หมายความว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นเร็วจนไม่ได้เป็นขั้นกำหนดปฏิกิริยา แต่ไอออน โมเลกุล หรืออนุภาคที่นำไฟฟ้าจะเคลื่อนที่จากชั้นสารละลายบัลค์โดยการแพร่เข้าสู่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของไอออน โมเลกุล หรืออนุภาคที่นำไฟฟ้า

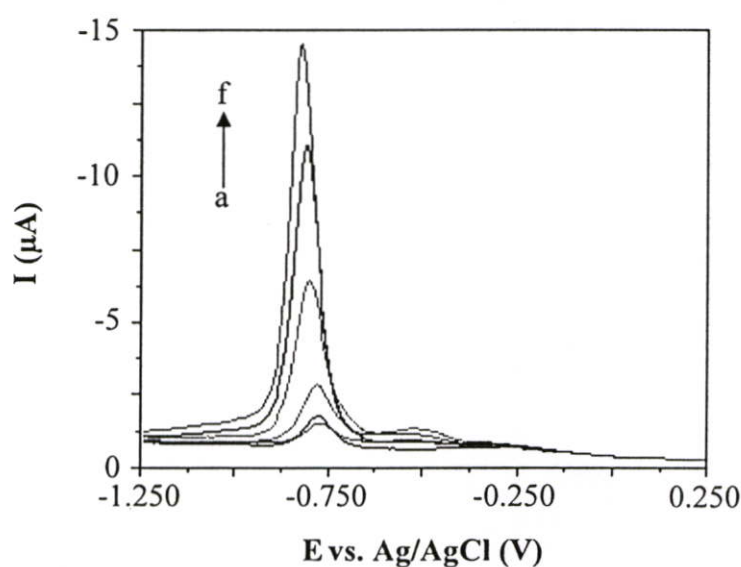
เมื่อต้องการแยกฟิสิกส์ว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Diffusion-control หรือว่าเป็นปฏิกิริยาแบบ Surface-control ทำได้โดยการพลอตกราฟระหว่าง  $\log I$  กับ  $\log V$  ซึ่งจะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงแล้วพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟ ถ้าเส้นกราฟมีความชันเท่ากับ 0.5 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Diffusion-control และถ้าเส้นกราฟมีความชันเป็น 1 แสดงว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Surface-control ถ้ากราฟมีความชันเท่ากับ 1 ที่อัตราการสแกนต่ำ และมีความชันเท่ากับ 0.5 ที่อัตราการสแกนสูง หมายความว่าปฏิกิริยาเป็นแบบผสมระหว่าง Surface-control กับ Diffusion-control ดังจะเห็นได้ว่าฟิสิกส์ของขั้วกราฟไฟต์มีทั้งปฏิกิริยาแบบ Diffusion-control และแบบ Surface-control แต่ส่วนใหญ่เป็น

แบบ Diffusion-control ส่วนฟิกระแสของขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion มีปฏิกิริยาแบบ Surface-control อย่างเดียว ฟิกระแสของขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion มีทั้งปฏิกิริยาแบบ Diffusion-control และแบบ Surface-control แต่ส่วนใหญ่เป็นแบบ Surface-control และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มีทั้งปฏิกิริยาแบบ Diffusion-control และแบบ Surface-control แต่ส่วนใหญ่เป็นแบบ Diffusion-control (ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของ ขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆและการคำนวณ แสดงในภาคผนวก ข.8)

#### 4.1.10 ผลการศึกษาช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของขั้วไฟฟ้า (Linear range)

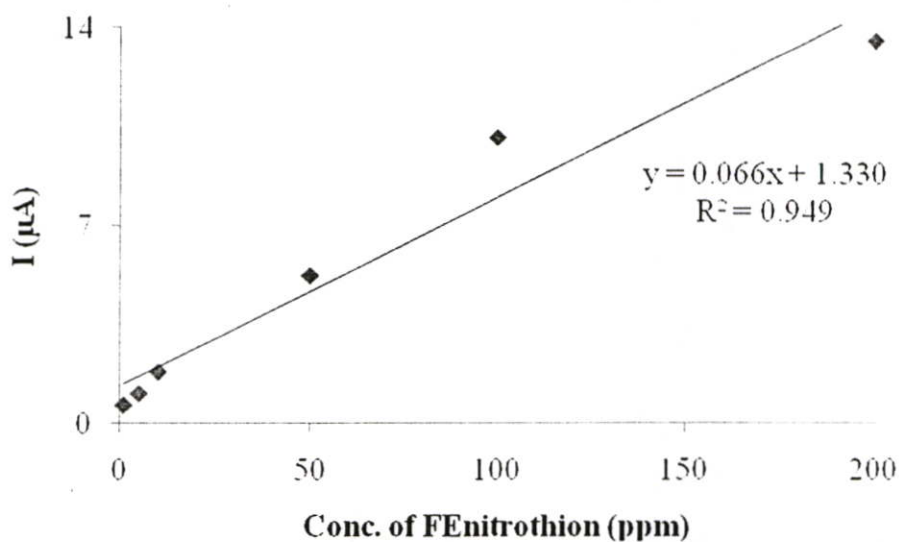
จากการตรวจวัดฟิโนโตรไทออนที่ความเข้มข้น 1 5 10 50 100 และ 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/ZnO/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลพัลส์ โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV

นำค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆของฟิโนโตรไทออนกับกระแสไฟฟ้า แล้วเลือกช่วงความเข้มข้นที่ให้สัญญาณเป็นเส้นตรง ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.32 4.33 4.34 4.35 4.36 4.37 4.48 และ 4.39 ตามลำดับ

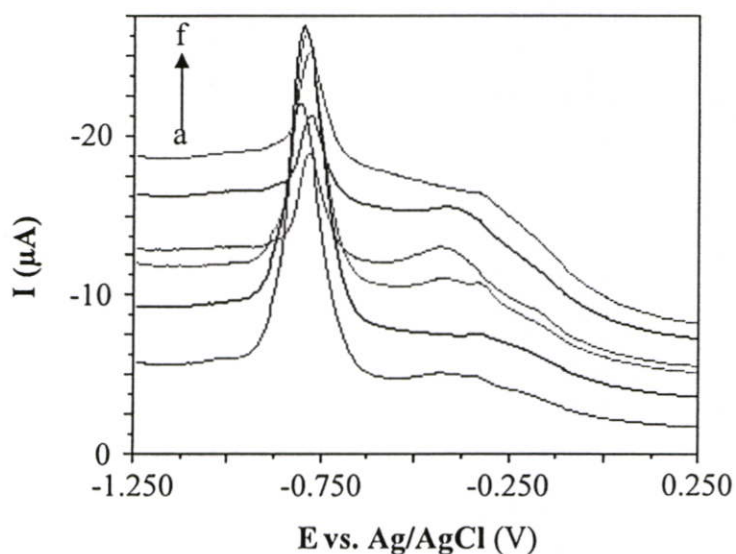


รูปที่ 4.32 โวลแทมโมแกรมของฟิโนโตรไทออนที่ความเข้มข้น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 50 (e) 100

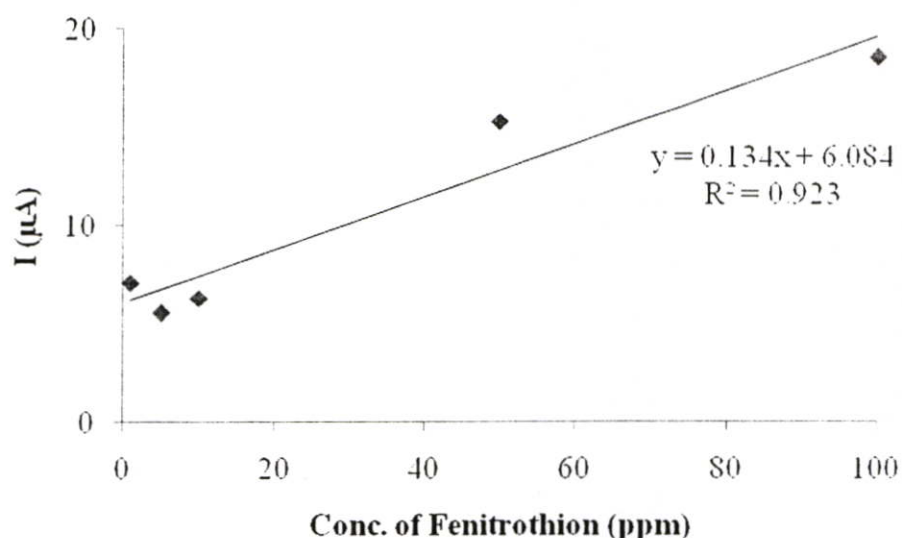
และ (f) 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกน ศักย์ไฟฟ้าในช่วง+1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการ สแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV



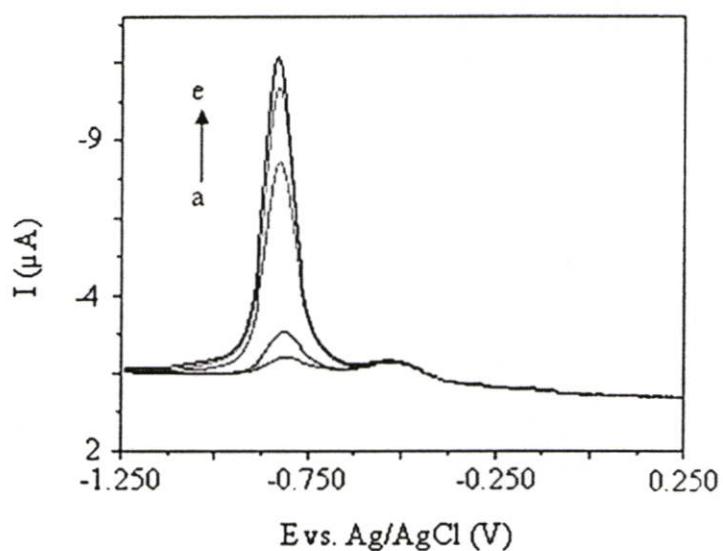
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆกับกระแสไฟฟ้าของฟีนีโตรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์



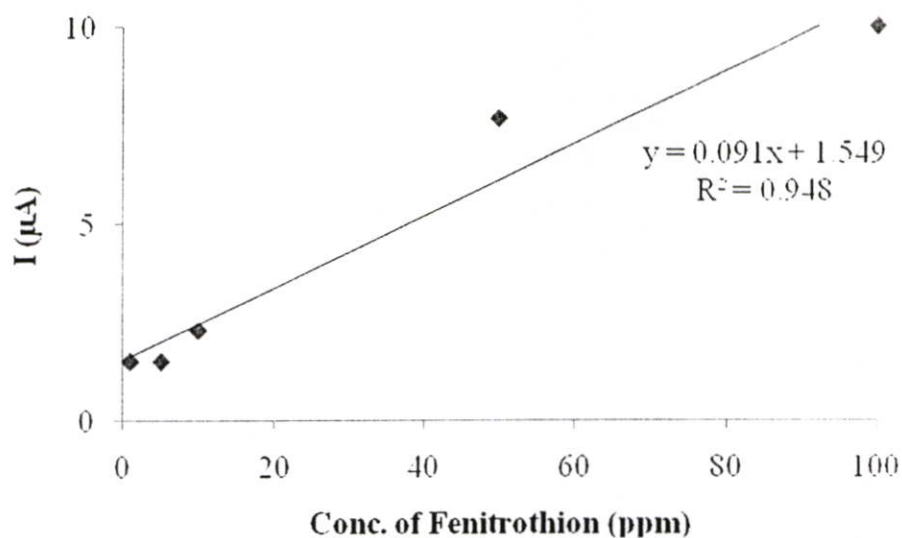
รูปที่ 4.34 โวลแทมโมแกรมของฟีนีโตรไทออนที่ความเข้มข้น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 50 (e) 100 และ (f) 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs /0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV



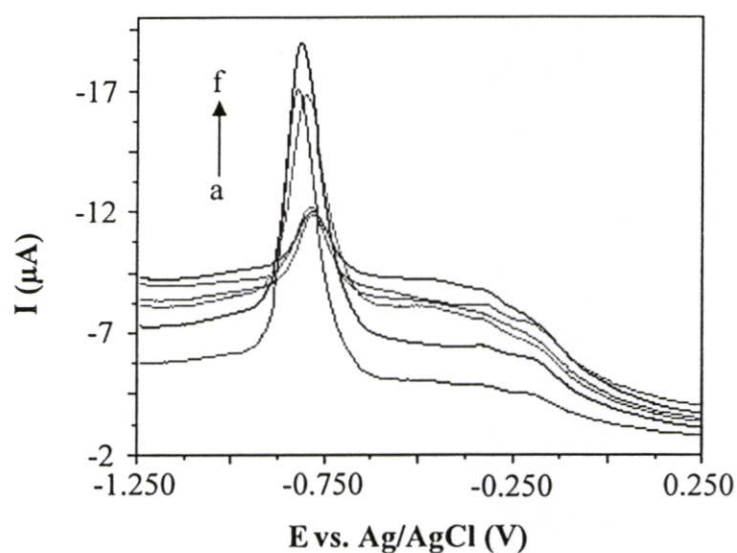
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆกับกระแสไฟฟ้าของฟีนโตรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion



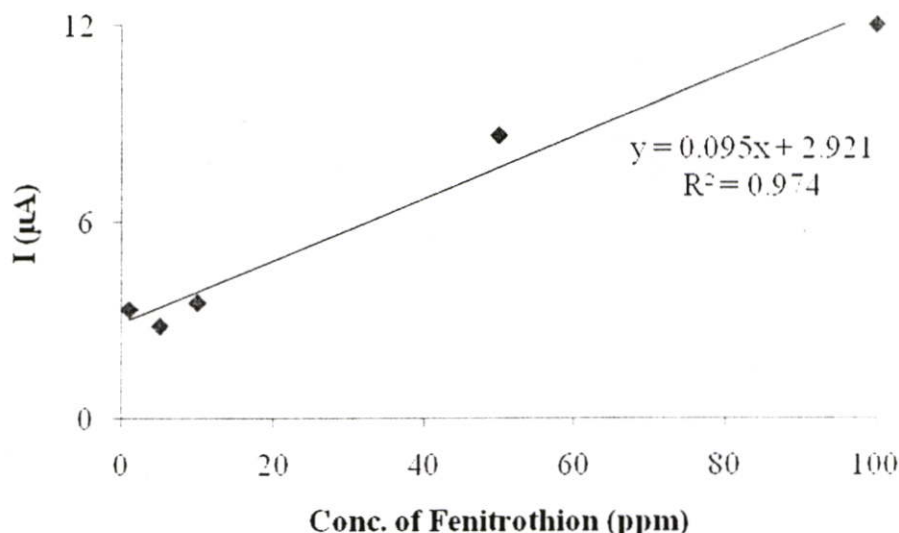
รูปที่ 4.36 โวลแทมโมแกรมของฟีนโตรไทออนที่ความเข้มข้น (a) 1 (b) 10 (c) 50 (d) 100 และ (e) 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆกับกระแสไฟฟ้าของฟีนโตรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion



รูปที่ 4.38 โวลแทมโมแกรมของฟีนโตรไทออนที่มีความเข้มข้น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 50 (e) 100 และ (f) 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 6 mg/ml (อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 2 : 4) ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นต่างๆกับกระแสไฟฟ้าของฟีนโตรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion

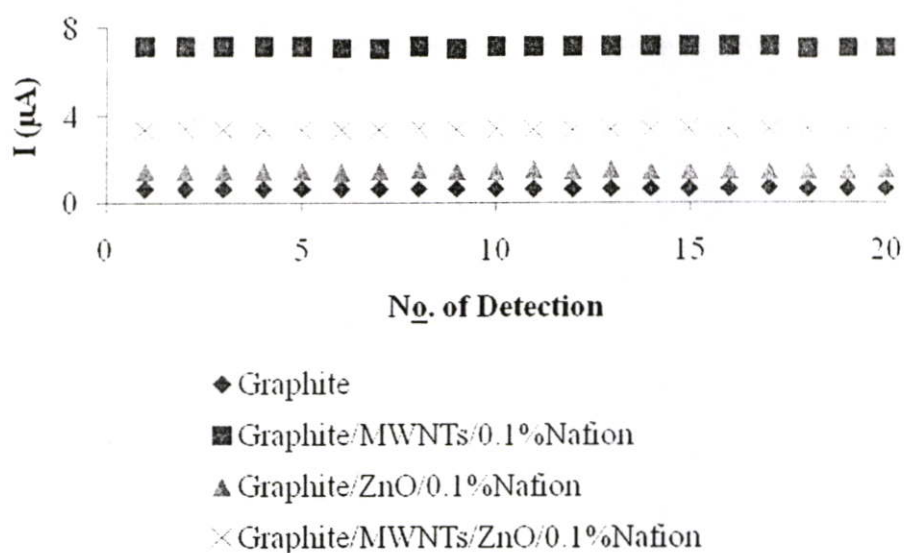
#### 4.1.11 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด (Detection limit)

จากการนำขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มาตรวจวัดสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคคิฟเฟอร์เรนเซียลพัลส์โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากสัญญาณ Noise 30 จุด แล้วหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นนำค่าความชันในช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงที่ได้จากการทดลอง 4.1.10 ไปคำนวณหาค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด (การคำนวณในภาคผนวก ข.10) และให้ผลดังตารางที่ 4.1

## 4.2 การศึกษาสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาได้

### 4.2.1 ค่าการทำซ้ำ (Reproducibility)

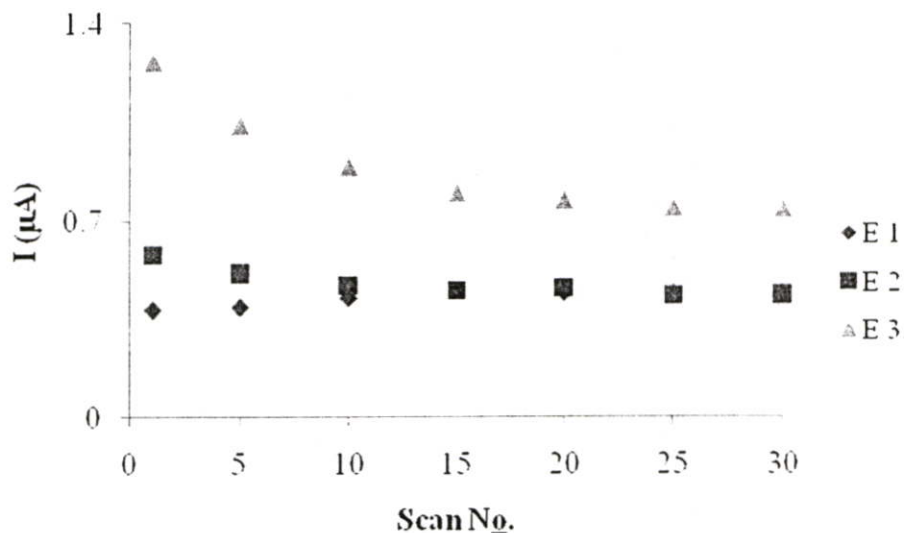
จากการนำขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มาตรวจวัดฟีนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคคิฟเฟอร์เรนเซียลพัลส์โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV ทำซ้ำ 20 ครั้ง (ทุกครั้งมีการเตรียมขั้วไฟฟ้าใหม่) บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ แล้วนำค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) (การคำนวณในภาคผนวก ข.11) ให้ผลแสดงดังรูปที่ 4.40 และดังตารางที่ 4.3



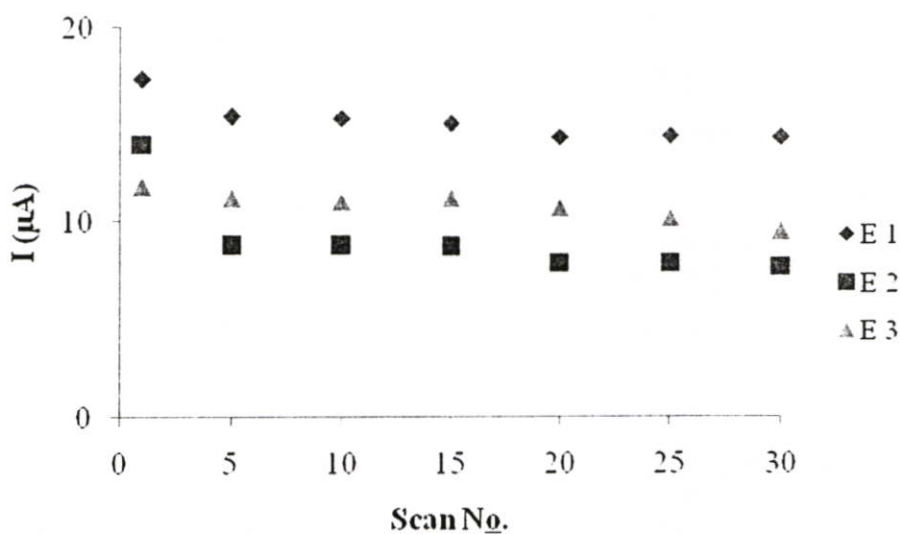
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าของการตรวจวัดซ้ำของการตรวจฟิโนโตรไทอนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ

#### 4.2.2 อายุการใช้งานขั้วไฟฟ้า (Life time)

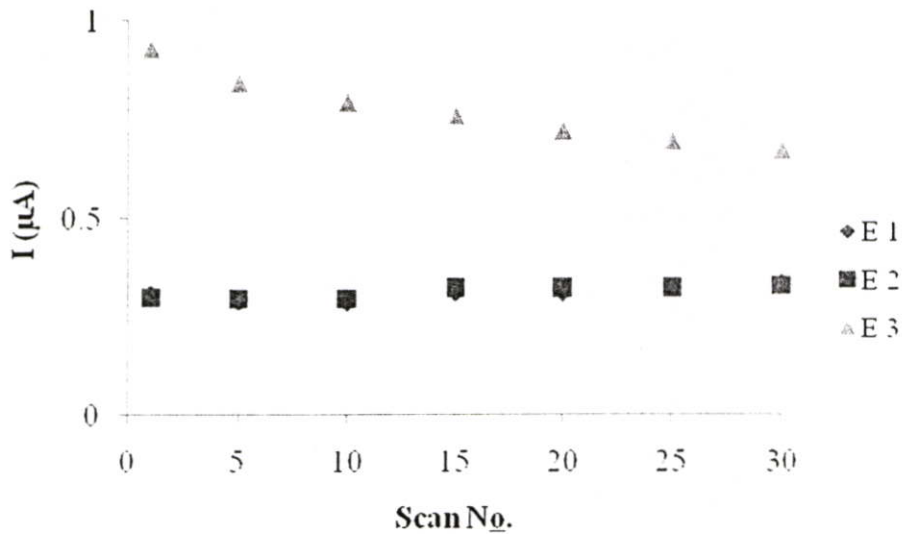
จากการนำขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ไปตรวจวัดฟิโนโตรไทอนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยพิจารณาจากจำนวนรอบของการสแกนที่ทำให้กระแสไฟฟ้าลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของการตรวจวัดครั้งแรก ให้ผลดังรูปที่ 4.41 4.42 4.43 และ 4.44 ตามลำดับ และผลในตารางที่ 4.3



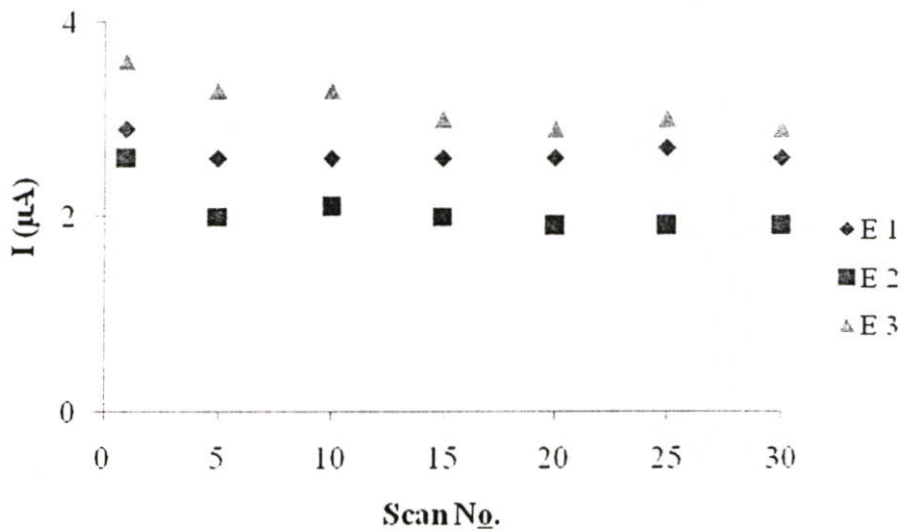
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการสแกนของการตรวจวัดฟิโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการสแกนของการตรวจวัดฟิโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการสแกนของการตรวจวัดฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆกับจำนวนรอบของการสแกนของการตรวจวัดฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion

จากกราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆของการตรวจวัดฟีนีโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion พบว่าจากจำนวนรอบของการสแกนพบว่าฟิสิกส์กระแสออกซิเดชันและรีดักชันของฟีนีโตรไทออนยังไม่

ค่อยลดลงซึ่งแสดงว่าขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆที่ใช้ตรวจวัดนั้นสามารถตรวจซ้ำได้ถึง 30 ครั้งหรืออาจมากกว่านั้น เนื่องจากว่าฟิโนโตรโทอนไม่ได้เกิดการดูดซับที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเมื่อทำการวัดซ้ำๆ หลายๆรอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จึงไม่ลดลงมากนัก

#### 4.2.3 ผลของการตรวจวัดพีโนโตรไทออน

จากการนำขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มาตรวจวัดพีโนโตรไทออน ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 38 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลติกโวลต์ถึง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และเทคนิคโพร์โรซิวิตีพัลส์โวลต์แอมเพอริ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV ดังตารางที่ 4.3 และเมื่อนำวิธีพัฒนาขึ้นไปเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นให้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าต่างๆของการตรวจวัดพีโนโตรไทออนด้วยขั้วไฟฟ้าต่างๆ

Statistic	Graphite	Graphite/MWNTs/0.1%Nafion	Graphite/ZnO/0.1%Nafion	Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion
Equation	$Y = 0.066X + 1.330$	$Y = 0.134X + 6.084$	$Y = 0.091X + 1.549$	$Y = 0.095X + 2.921$
Linearity	1 – 200 ppm	1 – 100 ppm	1 – 100 ppm	1 – 100 ppm
R <sup>2</sup>	0.949	0.923	0.948	0.974
Detection limit	3.742 ppm	1.241 ppm	0.989 ppm	0.498 ppm
%RSD	1.724	0.592	1.107	0.263
Life time (times)	30	30	30	30

ตารางที่ 4.4 แสดงการตรวจวัดพีในโตรโทอนด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion กับเทคนิคอื่น

Name	Method/Technical	Linearity	Detection limit
Sánchez-Ortega, A. และคณะ [11]	SPME และ HPLC	1-1000 µg/l	1.2-11.8 µg/l
Zen, J. M. และคณะ [14]	GC/Nafion	15 µM	50 nM (S/N = 3)
This thesis	Graphite/MWNTs/0.1%Nafion	1 – 100 ppm	1.241 ppm

### 4.3 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผักตัวอย่าง

จากการนำผักตัวอย่างได้แก่ ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้หนู ไปตรวจวัดด้วยเทคนิคโพลาไรซ์เรโซแนนซ์โวลแทมเมตรีด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า และนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานและคำนวณหาร้อยละการคืนกลับของฟีนอลในโตรโทออนในตัวอย่างผัก (การคำนวณในภาคผนวก ข14) ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดฟีนอลในโตรโทออนในตัวอย่างผักด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ

Sample	%Recovery			
	Graphite	Graphite/MWNTs /0.1%Nafion	Graphite/ZnO/ 0.1%Nafion	Graphite/MWNTs /ZnO/0.1%Nafion
Kana	552	877.200	400.840	807.907
Bean	679	197.355	219.395	259.789
Chili	6.590	2.105	19.890	50.686

## บทที่ 5

# สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการตรวจวิเคราะห์ฟีนโทรไทออนด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 พบว่าขั้วไฟฟ้าทั้งหมดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของฟีนโทรไทออนที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ -0.3 โวลต์ -0.5 โวลต์ และ -0.7 โวลต์ แต่ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ให้กระแสไฟฟ้าสูง เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีและยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำให้เกิด Electron transfer reaction ได้ดีขึ้น จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์ฟีนโทรไทออนด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีพบว่าสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมและจากการศึกษาชนิดของสารละลายที่ใช้ทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ระหว่างสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์และสารละลายแอฟอนพบว่าสารละลายแอฟอนเข้มข้น 0.1% ให้พีคกระแสไฟฟ้าสูงและเมื่อใช้สารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เข้มข้น 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร จะทำให้ได้พีคกระแสออกซิเดชันและรีดักชันสูง อัตราการสแกนในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมของฟีนโทรไทออนคือ 50 mV/s และการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าของฟีนโทรไทออนในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 เป็นกระบวนการเกิดแบบ Diffusion control พบว่าขั้วกราไฟต์มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดฟีนโทรไทออนอยู่ในช่วง 1 ถึง 200 ppm ( $R^2 = 0.949$ ) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 3.742 (S/N = 3) และมีค่าการทำซ้ำเท่ากับ 1.724 %RSD (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 30 ครั้ง ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดฟีนโทรไทออน อยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ppm ( $R^2 = 0.923$ ) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 1.241 (S/N = 3) และมีค่าการทำซ้ำเท่ากับ 0.592 %RSD (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 30 ครั้ง ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดฟีนโทรไทออนอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ppm ( $R^2 = 0.948$ ) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.989 (S/N = 3) และมีค่าการทำซ้ำเท่ากับ 1.107 %RSD (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 30 ครั้ง และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion มีช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงในการตรวจวัดฟีนโทรไทออนอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ppm ( $R^2 = 0.974$ ) มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.498 (S/N = 3) และมีค่าการทำซ้ำเท่ากับ 0.263 %RSD (n = 20) อายุการใช้งานเท่ากับ 30 ครั้ง

และจากการตรวจวัดพีไอในโตรโทออนในตัวอย่างผักได้แก่ ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้หนู  
 ด้วยขั้วกราไฟต์ให้ร้อยละของการคืนกลับเป็น 552 664 และ 143 ตามลำดับ ส่วนขั้ว Graphite/  
 MWNTs/0.1%Nafion ให้ร้อยละของการคืนกลับเป็น 877 197 และ 64.9 ตามลำดับ ขั้ว Graphite/  
 ZnO/0.1%Nafion ให้ร้อยละของการคืนกลับเป็น 400 219 และ 41.7 ตามลำดับ และขั้ว Graphite/  
 MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ให้ร้อยละของการคืนกลับเป็น 807 260 และ 126 ppm ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการปรับปรุงขั้วกราไฟต์ด้วยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์พบว่ามัลติวอลล์  
 คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เคลือบที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นยึดติดดี แต่เมื่อนำไปผสมกับผงอนุภาคของซิงค์  
 ออกไซด์ในสารละลายแนฟิออนเข้มข้น 0.1% พบว่าสารแขวนลอยยังกระจายตัวได้ไม่ค่อยดีและ  
 สังเกตการกระจายตัวของผงอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ในมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ยากจึง  
 ควรหาชนิดของสารละลายที่ใช้ในการทำเป็นสารแขวนลอยใหม่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] "Pesticide facts in Thailand," *Pesticides New*. 35 : 8 ; March 1997. [Online]. Available : <https://secure.virtuality.net/panukcom/subs.htm>; Search : November 10, 2006.
- [2] Department of Natural Resources. **Organophosphate Toxicity**. [Online]. Available : [http://www.michigan.gov/dnr/0,1607,7-153-10370\\_12150\\_12220-27249--,00.html](http://www.michigan.gov/dnr/0,1607,7-153-10370_12150_12220-27249--,00.html) ; Search : November, 10 2006.
- [3] Barrio, C. S., Asensio, J. S., Medina, M. P., and Clavijo, M. P. "Evaluation of the decay of malathion, dichlofluanid and fenitrothion pesticides in apple samples, using gas chromatography". *Food Chemistry*. vol. 52, 1995. pp. 305-309.
- [4] Karamfilov, V.K., Fileman, T.W., Evans, K.M., and Mantoura, R.F.C., "Determination of dimethoate and fenitrothion in estuarine samples by C- 18 solid-phase extraction and high-resolution gas-chromatography with nitrogen-phosphorus detection" *Anal. Chim. Acta*. vol. 335, 1996. pp. 51-61.
- [5] Morzycka, B. "Simple method for the determination of trace levels of pesticides in honeybees using matrix solid-phase dispersion and gas chromatography." *J. Chromatogr. A*. vol.982, 2002. pp. 267-273.
- [6] Tsoukali, H., Raikos, N., Theodoridis, G., and Psaroulis, D., "Headspace solid phase microextraction for the gas chromatographic analysis of methyl-parathion in post-mortem human samples Application in a suicide case by intravenous injection" *Forensic Science International*. vol.143, 2004. pp. 127-132.
- [7] Schellin, M., Hauser, B., and Popp, P., "Determination of organophosphorus pesticides using membrane-assisted solvent extraction combined with large volume injection-gas chromatography-mass spectrometric detection" *J. Chromatogr. A*. vol. 1040, 2004. pp. 251-258.
- [8] Baroja, O., Unceta, N., Sampedro, M. C., Goicolea, M. A, and Barrio, R. J., "Optimization and validation of a method of analysis for fenitrothion and its main metabolites in forestry air samples using sorbent tubes with thermal desorption cold trap injection and gas chromatography-mass spectrometry" *J. Chromatogr. A*. vol. 1059, 2004. pp. 165-170.

- [9] Ferrer, C., Gómez, M. J., García-Reyes, J. F., Ferrer, I., Thurman, E. M., and Fernández-Alba, A. R., "Determination of pesticide residues in olives and olive oil by matrix solid-phase dispersion followed by gas chromatography/mass spectrometry and liquid chromatography/tandem mass spectrometry". **J. Chromatogr. A.** vol. 1069, 2005. pp. 183–194.
- [10] Sankaramakrishnan, N., Sharma, A. K., and Sanghi, R., "Organochlorine and organophosphorous pesticide residues in ground water and surface waters of Kanpur, Uttar Pradesh, India" **Environment International.** vol. 31, 2005. pp. 113– 120.
- [11] Sánchez-Ortega, A., Sampedro, M. C., Unceta, N., Goicolea, M. A., and Barrio, R. J., "Solid-phase microextraction coupled with high performance liquid chromatography using on-line diode-array and electrochemical detection for the determination of fenitrothion and its main metabolites in environmental water samples" **J. Chromatogr. A.** vol. 1094, 2005. pp. 70-76.
- [12] Sanz, C. P., Halko, R., Ferrera, Z. S., and Rodríguez, J. J. S., "Micellar extraction of organophosphorus pesticides and their determination by liquid chromatography" **Anal. Chim. Acta.** vol. 524, 2004. pp. 265–270.
- [13] Hernández, F., Sancho, J. V., and Pozo, O. J., "An estimation of the exposure to organophosphorus pesticides through the simultaneous determination of their main metabolites in urine by liquid chromatography–tandem mass spectrometry" **J. Chromatogr. B.** vol. 808, 2004. pp. 229–239.
- [14] Zen, J. M., Jou, J. J., and Kumar, A. S., "A sensitive voltammetric method for the determination of parathion insecticide" **Anal. Chim. Acta.** vol. 396, 1999. pp. 39-44.
- [15] Ni, Y., Qiu, P., and Kokot, S., "Simultaneous determination of three organophosphorus pesticides by differential pulse stripping voltammetry and chemometrics" **Anal. Chim. Acta.** vol. 516, 2004. pp. 7–17.
- [16] Carlo, M. D., Mascini, M., Pepe, A., Diletti, G., and Compagnone, D., "Screening of food samples for carbamate and organophosphate pesticides using an electrochemical bioassay" **Food Chemistry.** vol. 84, 2004. pp. 651–656.
- [17] Law, K. A., and Higson, S. P. J., "Sonochemically fabricated acetylcholinesterase microelectrode arrays within a flow injection analyser for the determination of organophosphate pesticides" **Biosensors and Bioelectronics.** vol. 20, 2005. pp. 1914–1924.

- [18] Li, C., Wang, C., Guan, B., Zhang, Y., and Hu, S., "Electrochemical sensor for the determination of parathion based on *p*-tert-butylcalix[6]arene-1,4-crown-4 sol-gel film and its characterization by electrochemical methods" **Sensors and Actuators B**. vol. 107, 2005. pp. 411–417.
- [19] Tsoukali, H., Theodoridis, G., Raikos, N., and Grigoratou, I., "Solid phase microextraction gas chromatographic analysis of organophosphorus pesticides in biological samples" **J. Chromatogr. B**. vol. 822, 2005. pp. 194–200.
- [20] Matsushita, T., Matsui, Y., Taniwaki, S., Inoue, T. "Changes in mutagenicity during biodegradation of fenitrothion". **Chemosphere**. vol. 47, 2002. pp. 9-14.
- [21] Uygun, U., Özkara, R., Özbey, A., and Koksel, H. "Residue levels of malathion and fenitrothion and their metabolites in postharvest treated barley during storage and malting". **Food Chemistry**. vol. 100, 2007. pp. 1165-1169.
- [22] International Programme on Chemical Safety. **Fenitrothion**. [Online]. Available : <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc133.htm> ; Search : November, 10 2006.
- [23] Wikimedia the free encyclopedia. **Nafion**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Nafion> ; Last Update : November, 29 2006.
- [24] ILJIN Nanotech. **Carbon Nanotubes**. [Online]. Available : <http://www.iljinnanotech.co.kr/en/home.html> ; Search : August, 15 2006.
- [25] Applied Nanotechnologies. **Basic Properties of Carbon Nanotubes**. [Online]. Available : <http://www.applied-nanotech.com/cntproperties.htm#Carbon%20Nanotube> ; Search : August, 15 2006.
- [26] Harris, P., **A Carbon Nanotube Page**. [Online]. Available : <http://rdg.ac.uk/~scsharip/tubes.htm> ; Search : August, 15 2006.
- [27] Adams, T. A. II., **Physical Properties of Carbon Nanotubes : Introduction**. [Online]. Available : <http://pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties/main.html#intro> ; Search : August, 15 2006.
- [28] Adams, T. A. II., **Physical Properties of Carbon Nanotubes : Equilibrium Structure**. [Online]. Available : <http://pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties/equilibriumstructure.html> ; Search : August, 15 2006.

- [29] Rice Quantum Institute. **Carbon Nanotechnology Laboratory**. Rice University. [Online]. Available : <http://rqi.rice.edu/research/areas/carbon/carbon.php> ; Search : November, 23 2006.
- [30] Wikimedia the free encyclopedia. **Diamond**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Diamond> ;Last Update : November,16 2006.
- [31] Wikimedia the free encyclopedia. **Graphite**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Graphite> ;Last Update : November,15 2006.
- [32] Wikimedia the free encyclopedia. **Fullerene**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Fullerenes> ; Last Update : November,14 2006.
- [33] Pevaner, B., **Buckyball : a C<sub>60</sub> Molecule**. [Online]. Available : <http://godunov.com/Bucky/buckyball-1.gif> ; Search : November, 23 2006.
- [34] **Carbon Nano Tubes**. [Online]. Available : [http://web.nmsu.edu/~jccecil/current-initiatives/NanoTechnology\\_Research/Nano-intro.htm](http://web.nmsu.edu/~jccecil/current-initiatives/NanoTechnology_Research/Nano-intro.htm); Search : November, 23 2006.
- [35] Ahwahnee. **Technology : Image Gallery**. [Online] Available : [http://www.ahwahneetech.com/technology/images/nanotube%20bundle%20\\_%20multi\\_colored%20bonds%20MWSnap.jpg](http://www.ahwahneetech.com/technology/images/nanotube%20bundle%20_%20multi_colored%20bonds%20MWSnap.jpg) ; Search : November, 27 2006.
- [36] Daenen, M. J. M., Fouw. R. D., Hamers, B., Janssen, P. G. A., Schouteden, K., and Veld, M. A. J., **Laser Vaporization**. Wondrous World of Carbon Nanotubes. [Online]. Available : <http://students.chem.tue.nl/ifp03/synthesis.html> ; Search : November, 23 2006.
- [37] Adams, T. A. II., **Physical Properties of Carbon Nanotubes : Elastic Behavior**. [Online]. Available : <http://pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties/elasticbehavior.html> ; Search : August, 15 2006.
- [38] Adams, T. A. II., **Physical Properties of Carbon Nanotubes : Electrical Transport**. [Online]. Available : <http://pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties/electricaltransport.html> ; Search : August, 15 2006.
- [39] Adams, T. A. II., **Physical Properties of Carbon Nanotubes : Thermal Transport**. [Online]. Available : <http://pa.msu.edu/cmp/csc/ntproperties/thermaltransport.html> ; Search : August, 15 2006.
- [40] **Inframat Advanced Materials LLC. Zinc Oxide (ZnO) nanopowder**. [Online] Available : <http://www.advancedmaterials.us/30N-0801.htm>. Search : October, 17 2007. Search : October, 17 2007.

- [41] Wikimedia the free encyclopedia. **Zinc Oxide**. [Online]. Available : [http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide) ; Last update : October, 14 2007.
- [42] Muthukumar, S., Sheng, H., Zhong, J., Zhang, Z., Emanetoglu, N.W., and Lu, Y. "ZnO Based Nanostructures Device Applications". **Nanotechnology**. vol. 2, 2003. [Online]. Available : [http://www.ece.rutgers.edu/ZnO Based Nanostructures DeviceApplications.htm](http://www.ece.rutgers.edu/ZnO_Based_Nanostructures_DeviceApplications.htm) ; Search : October, 17 2007.
- [43] Wikimedia the free encyclopedia. **Mass Transfer**. [Online]. Available : [http://en.wikipedia.org/wiki/Mass\\_transfer](http://en.wikipedia.org/wiki/Mass_transfer) ; Last Update : June, 4 2006.
- [44] Wang, J., **Analytical Electrochemistry**. 2<sup>nd</sup> ed. New York : John Wiley & Sons. 2000. pp. 4, 5, 28, 29, 31-33, 100-107.
- [45] Library 4 Science. **Diffusion**. [Online]. Available : <http://www.chromatography-online.org/topics/diffusion.html> ; Search : November, 10 2006.
- [46] Wikimedia the free encyclopedia. **Diffusion**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion> ; Last update : November, 21 2006
- [47] Hyperphysics. **Diffusion**. [Online]. Available : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/diffus.html#c1> ; Search : November 10, 2006.
- [48] **Diffusion Simulator**. [Online]. Available : [http://www.jhu.edu/~virtlab/diffus/diff\\_txt.htm](http://www.jhu.edu/~virtlab/diffus/diff_txt.htm) ; Search : November 10, 2006.
- [49] Anderson, D., **Biology Labs Online**. [Online]. Available : [http://www.okc.cc.ok.us/biologylabs/Documents/Cells%20Membranes/Diffusion\\_Definition.htm](http://www.okc.cc.ok.us/biologylabs/Documents/Cells%20Membranes/Diffusion_Definition.htm) ; Search : November, 21 2006.
- [50] IUPAC Gold Book. **Migration Current**. [Online]. Available : <http://goldbook.iupac.org/M0392> ; Search : November, 27 2006.
- [51] Skoog, D. A., and Leary, J. J., **Principle of Instrumental Analysis**. 4<sup>th</sup> ed. Fort Worth : Saunder College. 1992. pp. 535-564.
- [52] Gosser, D. K. Jr., **Cyclic Voltammetry : Simulation and Analysis of Reaction Mechanisms**. New York : VCH Publishers. 1994. pp.27-36, 97-100.
- [53] Wikimedia the free encyclopedia. **Cyclic Voltammetry**. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Convection> ; Last Update : September, 27 2006.

- [54] Epsilon Systems. **Cyclic Voltammetry : Data Analysis**. [Online]. Available : [http://www.epsilon-web.net/Ec/manual/Techniques/CycVolt/cv\\_analysis.html](http://www.epsilon-web.net/Ec/manual/Techniques/CycVolt/cv_analysis.html) ; Search : November 10, 2006.
- [55] **Cyclic Voltammetry**. [Online]. Available : <http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Chemistry/Electrochemis/Electrochemical/CyclicVoltammetry/CyclicVoltammetry.htm> ; Search : November 10, 2006.
- [56] **Cyclic Voltammetry Primer**. [Online]. Available : [http://www-biol.paisley.ac.uk/marco/Enzyme\\_Electrode/Chapter1/Cyclic\\_Voltammetry1.htm](http://www-biol.paisley.ac.uk/marco/Enzyme_Electrode/Chapter1/Cyclic_Voltammetry1.htm)
- [57] Cunningham, A. J., **Introduction to Bioanalytical Sensor**. New York : John Wiley & Sons. 1998. pp. 234.
- [58] Sawyer, D. T., Sobkowiak, A., and Roberts, J. L. Jr., **Electrochemistry for Chemists**. 2<sup>nd</sup> ed. New York : John Wiley & Sons. 1995. pp. 330, 333, 444.
- [59] Hall, E. A. H., **Biosensor**. Buckingham : Open University. 1990. pp. 99-101.
- [60] **The Randles-Sevcik equation**. [Online]. Available : [http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/randles\\_sevcik\\_equation.htm](http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/randles_sevcik_equation.htm) ; Search : November, 27 2006.
- [61] Bard, A. J., and Faulkner, L. R., **Electrochemical Methods : Fundamentals and Applications**. New York : John Wiley & Sons. 1980. pp.15-22, 236.
- [62] Monk, P. M. S., **Fundamentals of Electroanalytical Chemistry**. Chichester : John Wiley & Sons. 2001. pp.176-185.
- [63] Epsilon Systems. **Pulse Voltammetric Techniques**. [Online]. Available : <http://www.epsilon-web.net/Ec/manual/Techniques/Pulse/pulse.html> ; Search : November, 23 2006.
- [64] Cypress Systems. **Pulsed Voltammetry Techniques**. [Online]. Available : <http://www.cypresssystems.com/Experiments/pulsetechniques.html> ; Search : November, 23 2006.
- [65] Bank Elektronik-Intelligent Controls GmbH. **Cells and Electrodes**. [Online]. Available : [http://www.bank-ic.de/encms/knowhow/1\\_zellen.html](http://www.bank-ic.de/encms/knowhow/1_zellen.html) ; Search : November, 23 2006.
- [66] Ciucu, A. A., Negulescu, C., and Baldwin, R. P., "Detection of pesticides using an amperometric biosensor based on ferophthalocyanine chemically modified carbon paste electrode and immobilized bienzymatic system" **Biosensors and Bioelectronics**. vol. 18, 2003. pp. 303-310.

- [67] Deo, R. P., Wang, J., Block, I., Mulchandani, A., Joshic, K. A., Trojanowicz, M., Scholz, F., Chen, W., and Line, Y., "Determination of organophosphate pesticides at a carbon nanotube/organophosphorus hydrolase electrochemical biosensor" **Anal. Chim. Acta.** vol. 530, 2005. pp. 185-189.
- [68] Solná, R., Sapelnikova, S., Skládal, P., Winther-Nielsen, M., Carlsson, C., Emnéus, J., and Ruzgas, T. "Multienzyme electrochemical array sensor for determination of phenols and pesticides". **Talanta.** Vol. 65, 2005. pp. 349-357.
- [69] Zhao, E., Han, L., Jiang, S., Wang, Q., and Zhou, Z. "Application of a single-drop microextraction for the analysis of organophosphorus pesticides in juice". **Journal of Chromatography. A**, vol. 1114, 2006. pp. 269-273.
- [70] The International on Programme Chemical Safety. **The World Health Organization Classification of Pesticides by Hazard.** [Online] Available : [http://www.who.int/ipcs/publications/pesticides\\_hazard\\_rev\\_3.pdf](http://www.who.int/ipcs/publications/pesticides_hazard_rev_3.pdf) ; Search : November, 10 2006.

ภาคผนวก ก  
การเตรียมสารเคมี

ก1 การเตรียมสารละลายแอฟอนเข้มข้น 0.1% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

$$\text{จาก} \quad M_1V_1 = M_2V_2 \quad (\text{ก1})$$

เมื่อ  $M_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายแอฟอนเริ่มต้น (%)

$M_2$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายแอฟอนที่ต้องการ (%)

$V_1$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ปีเปตมา

$V_2$  คือ ปริมาณสารละลายแอฟอนที่ต้องการ (ml)

$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad 5\% \times V_1 &= 0.1\% \times 25\text{ml} \\ V_1 &= 0.5\text{ml} \end{aligned}$$

ปีเปตสารละลายแอฟอน 0.5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยสารละลายเอทานอลจะได้สารละลายแอฟอนเข้มข้น 0.1 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

ก2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

จากของแข็ง

$$\text{จาก} \quad \frac{g}{MW} = \frac{MV}{1000} \quad (\text{ก2})$$

เมื่อ  $g$  คือ น้ำหนักของสารที่ต้องการชั่ง (g)

$MW$  คือ มวลโมเลกุลของสาร (g / mol)

$M$  คือ ความเข้มข้นของสารที่ต้องการ (mol / l)

$V$  คือ ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการ (ml)

$$\begin{aligned} \frac{g}{40} &= \frac{1 \times 100}{1000} \\ g &= 4 \end{aligned}$$

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน เกล่งขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

จากนั้นนำมาเตรียมเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้สมการ (ก1) จะเตรียมสารได้ดังตารางที่ ก1

ตารางที่ ก1 แสดงการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จาก stock solution

Conc.NaOH (M)	ปริมาตรที่ต้องปิเปต (มิลลิลิตร)	ปริมาตรที่ต้องการ (มิลลิลิตร)
0.01	1	100
0.1	10	100
0.2	20	100

ปิเปตโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นตามต้องการ

**ก3 การเตรียมสารละลายกรดบอริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากของแข็ง**

ชั่งกรดบอริก 3.09 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน เกล่งขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก4 การเตรียมสารละลายกรดอะซีติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากสารละลายเข้มข้น**

$$\text{จาก} \quad M = \frac{10\%D}{MW} \quad (\text{ก3})$$

เมื่อ M คือ ความเข้มข้นของสารละลายเข้มข้น (M)

MW คือ มวลโมเลกุลของสาร (g / mol)

- % คือ ความบริสุทธิ์ของสารละลายเข้มข้น  
D คือ ความหนาแน่นของสารละลายเข้มข้น (g / ml)

ปิเปตกรดอะซีติก 5.74 มิลลิลิตร ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก5 การเตรียมสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากสารละลายเข้มข้น**

ปิเปตกรดฟอสฟอริก 6.62 มิลลิลิตร เทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรโดยใช้น้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก6 การเตรียมสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากของแข็ง**

ชั่งโปแตสเซียมคลอไรด์ 7.4555 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน เทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก7 การเตรียมสารละลาย โปแตสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตรจาก stock solution**

ปิเปตโปแตสเซียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรโดยใช้น้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก8 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากสารละลายเข้มข้น**

ปิเปตกรดไฮโดรคลอริก 8.35 มิลลิลิตร ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก9 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร**

**จาก stock solution**

ปีเปตกรดไฮโดรคลอริก 10 มิลลิลิตร ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก10 การเตรียมสารละลายโซเดียมอะซีเตตเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากของแข็ง**

ชั่งโซเดียมอะซีเตต 13.698 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน เทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก11 การเตรียมสารละลายกรดอะซีติกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จาก**

**stock solution**

ปีเปตกรดอะซีติก 20 มิลลิลิตร ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก12 การเตรียมสารละลายโซเดียมอะซีเตตเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร**

**จาก stock solution**

ปีเปตโซเดียมอะซีเตต 20 มิลลิลิตร ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก13 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.067 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร**

ชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.918 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน เทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.067 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก14 การเตรียมสารละลายโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.067 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร**

ชั่งโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 1.1926 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน เกล่งขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.067 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

**ก15 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์**

อัตราส่วนของสารละลายในการเตรียมเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆดังตารางที่ ก2

**ตารางที่ ก2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์**

pH Buffer solution	Solution 1 (ml)	Solution 2 (ml)
Acetate buffer pH 3.6	0.2 M CH <sub>3</sub> COONa 7.5 ml	0.2 M CH <sub>3</sub> COOH 92.5 ml
Phosphate buffer pH 7.0	0.067 M Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O 61.1 ml	0.067 M KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 38.9 ml
Phosphate buffer pH 8.0	0.067 M Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O 94.5 ml	0.067 M KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 5.5 ml
Britton-Robinson buffer pH 10.38	0.2 M NaOH 80 ml	0.04 M Mixed Acid (CH <sub>3</sub> COOH + H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + Boric Acid) 100 ml

**ก16 การเตรียมสารละลายบอแรกซ์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากของแข็ง**

ชั่งบอแรกซ์ 3.8137 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน เกล่งขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

จากนั้นนำไปเตรียมเป็นสารละลายบอแรกซ์เข้มข้น 0.025 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยปีเปตมา 25 มิลลิลิตร ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายบอแรกซ์ ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปเตรียมเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH ต่างๆ ดังตารางที่ ก3

ตารางที่ ก3 การเตรียมสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ที่ pH ต่างๆ

pH Borax buffer	0.025 M Borax (ml)	0.1M HCl (ml)	0.1M KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (ml)	0.1M NaOH (ml)
1.52	25	100		
2.26	23	14		
5.44	20	11		
6.19	12.3		87.7	
7.00	37.7		62.3	
8.37	61.3		38.7	
8.82	72.4		27.6	
10.38	50			22.1
11.11	40			20
12.16	40			30

#### ก17 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟิโนโตรไทออน

ซึ่งฟิโนโตรไทออน 250 มิลลิกรัม ละลายในเอทานอลเข้มข้น 50% จากนั้นนำไป sonicated เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 5000 ppm จากนั้นนำไปเตรียมเป็นสารละลายมาตรฐานฟิโนโตรไทออนที่ความเข้มข้นต่างๆและปรับปริมาตรด้วยสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ดังตารางที่ ก4

ตารางที่ ก4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟิโนโตรไทออนที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38

Conc.Fenitrothion (ppm)	Stock Fenitrothion (μl)	Final Volume (ml)
1	10	10
5	50	10
10	100	10
50	500	10
100	1000	10
200	2000	10

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองและการคำนวณ

ข1 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดพีในโตรไทออน

จากการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าในการตรวจวัดพีในโตรไทออนเข้มข้น 100 ppm ในบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วแพลทินัมสแกนสก็ย์ไฟฟ้าในช่วง -0.50 V ถึง +1.4 V ขั้วกลาสคาร์บอน ขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนสก็ย์ไฟฟ้า ในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s โดยใช้ เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ให้ผลดังตารางที่ ข1

ตารางที่ ข1 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการตรวจวัดพีในโตรไทออน

Pt				
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A
	0.605	10.800	-0.205	-6.400
	0.602	10.560	-0.208	-6.500
	0.603	10.850	-0.210	-6.450
Average	0.603 $\pm$ 0.002	10.737 $\pm$ 0.155	-0.208 $\pm$ 0.008	-6.450 $\pm$ 0.050

GC						
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
	-0.206	3.100	-0.387	-4.000	-0.926	-7.000
	-0.208	3.050	-0.389	-3.980	-0.934	-6.880
	-0.207	3.120	-0.388	-4.210	-0.922	-6.980
Average	-0.207 $\pm$ 0.001	3.090 $\pm$ 0.036	-0.388 $\pm$ 0.001	-4.063 $\pm$ 0.127	-0.927 $\pm$ 0.006	-6.953 $\pm$ 0.064

## ตารางที่ ข1 (ต่อ)

Graphite						
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
	-0.213	3.900	-0.429	-5.200	-0.913	-9.400
	-0.216	3.800	-0.425	-5.220	-0.902	-9.350
	-0.223	3.980	-0.431	-5.290	-0.923	-9.480
Average	-0.217 $\pm$	3.893 $\pm$	-0.428 $\pm$	-5.237 $\pm$	-0.913 $\pm$	-9.410 $\pm$
	0.005	0.090	0.003	0.047	0.011	0.066

Graphite/MWNTs/DMF						
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
	-0.097	7.100	-0.518	-8.500	-1.071	-12.800
	-0.095	7.050	-0.521	-8.580	-1.088	-12.750
	-0.094	7.120	-0.519	-8.490	-1.075	-12.830
Average	-0.095 $\pm$	7.090 $\pm$	-0.519 $\pm$	-8.523 $\pm$	-1.078 $\pm$	-12.793 $\pm$
	0.002	0.036	0.002	0.049	0.009	0.040

Graphite/MWNTs/0.1%Nafion						
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
	-0.218	13.700	-0.397	-13.800	-0.887	-17.100
	-0.219	13.500	-0.395	-13.750	-0.885	-17.210
	-0.220	13.850	-0.399	-13.810	-0.898	-17.150
Average	-0.219 $\pm$	13.683 $\pm$	-0.397 $\pm$	-13.787 $\pm$	-0.890 $\pm$	-17.153 $\pm$
	0.001	0.176	0.002	0.032	0.007	0.055

### ข2 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดพีในโตรโทออน

จากการตรวจวัดพีในโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ ได้แก่ 0.1M HCl อะซิเตตบัฟเฟอร์ pH 3.6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 8 บอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 บริทตันโรบินสันบัฟเฟอร์ pH 10.3 และ 0.1 M NaOH ขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ให้ผลดังตารางที่ ข2

ตารางที่ ข2 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดพีในโตรโทออน

Type of Electrolyte	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
0.1 M HCl	0.466	0.510	-0.613	-1.440	*	*	0.434	32.000	0.824	34.000	0.366	-19.000
	0.450	0.530	-0.650	-1.450	*	*	0.465	35.000	0.818	33.000	0.365	-18.500
	0.464	0.525	-0.635	-1.320	*	*	0.443	31.000	0.825	31.500	0.358	-18.900
Average	0.460 $\pm$	0.522 $\pm$	-0.633 $\pm$	-1.403 $\pm$	*	*	0.447 $\pm$	32.667 $\pm$	0.822 $\pm$	32.833 $\pm$	0.363 $\pm$	-18.800 $\pm$
Acetate	0.009	0.010	0.019	0.072			0.016	2.082	0.004	1.258	0.004	0.265
pH 3.7	0.171	0.490	0.682	0.870	-0.560	-0.750	0.334	24.900	0.740	23.600	-0.560	-36.300
	0.175	0.500	0.665	0.890	-0.550	-0.780	0.322	23.900	0.750	23.400	-0.550	-36.500
	0.177	0.450	0.658	0.840	-0.532	-0.710	0.325	24.500	0.755	23.560	-0.590	-36.510

ตารางที่ ข2 (ต่อ)

Type of Electrolyte	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
Average	0.174 $\pm$ 0.003	0.480 $\pm$ 0.026	0.668 $\pm$ 0.012	0.867 $\pm$ 0.025	-0.547 $\pm$ 0.014	-0.747 $\pm$ 0.035	0.327 $\pm$ 0.006	24.433 $\pm$ 0.503	0.748 $\pm$ 0.008	23.520 $\pm$ 0.106	-0.567 $\pm$ 0.021	-36.437 $\pm$ 0.118
Phosphate pH 6	0.219	0.370	-0.292	-0.320	-0.960	-1.960	0.134	21.500	0.076	-12.100	-0.265	-14.300
Average	0.223	0.330	-0.285	-0.330	-0.950	-1.950	0.133	21.450	0.079	-12.500	-0.289	-14.250
Phosphate pH 8	0.215	0.350	-0.289	-0.320	-0.970	-1.980	0.142	21.390	0.076	-12.150	-0.255	-14.510
Average	-0.219 $\pm$ 0.004	0.350 $\pm$ 0.020	-0.289 $\pm$ 0.004	-0.323 $\pm$ 0.006	-0.960 $\pm$ 0.010	-1.963 $\pm$ 0.015	0.136 $\pm$ 0.005	21.447 $\pm$ 0.055	0.077 $\pm$ 0.002	-12.250 $\pm$ 0.218	-0.270 $\pm$ 0.017	-14.353 $\pm$ 0.138
Phosphate pH 8	-0.279	0.360	-0.343	-0.580	-0.838	-1.350	-0.237	17.300	-0.295	-15.300	-0.775	-11.500
Average	-0.289	0.380	-0.348	-0.580	-0.848	-1.380	-0.232	17.000	-0.270	-15.000	-0.765	-12.100
Phosphate pH 8	-0.277	0.360	-0.344	-0.580	-0.838	-1.350	-0.247	17.300	-0.290	-15.200	-0.754	-11.000
Average	-0.282 $\pm$ 0.006	0.367 $\pm$ 0.012	-0.345 $\pm$ 0.003	-0.580 $\pm$ 0.000	-0.841 $\pm$ 0.006	-1.360 $\pm$ 0.017	-0.239 $\pm$ 0.008	17.200 $\pm$ 0.173	-0.285 $\pm$ 0.013	-15.167 $\pm$ 0.153	-0.765 $\pm$ 0.011	-11.533 $\pm$ 0.551

ตารางที่ ข2 (ต่อ)

Type of Electrolyte	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
Britton-robison pH 10.38	-0.234	0.350	-0.376	-0.460	-0.845	-0.840	-0.244	17.300	-0.287	-13.800	-0.805	-12.000
	-0.242	0.380	-0.355	-0.450	-0.855	-0.850	-0.232	17.500	-0.289	-13.500	0.004	-11.800
	-0.225	0.330	-0.365	-0.480	-0.875	-0.832	-0.235	17.000	-0.295	-13.450	-0.808	-12.200
Average	-0.234 $\pm$	0.353 $\pm$	-0.365 $\pm$	-0.463 $\pm$	-0.858 $\pm$	-0.841 $\pm$	-0.237 $\pm$	17.267 $\pm$	-0.059 $\pm$	13.450 $\pm$	-0.290 $\pm$	-13.583 $\pm$
0.1 M NaOH	0.009	0.025	0.011	0.015	0.015	0.009	0.006	0.252	0.006	0.180	0.004	0.189
	*	*	-0.534	-0.550	-0.892	-0.640	-0.202	10.000	-0.387	-16.000	-0.845	-19.000
	*	*	-0.544	-0.580	-0.875	-0.660	-0.232	10.200	-0.356	-15.900	-0.850	-19.420
Average	*	*	-0.524	-0.550	-0.868	-0.710	-0.251	9.980	-0.389	-16.230	-0.865	-19.050
	*	*	-0.534 $\pm$	-0.560 $\pm$	-0.878 $\pm$	-0.670 $\pm$	-0.228	10.060	-0.377 $\pm$	-16.043 $\pm$	-0.853 $\pm$	-19.157 $\pm$
			0.010	0.017	0.012	0.036	$\pm$ 0.025	$\pm$ 0.122	0.019	0.169	0.010	0.229

หมายเหตุ \* คือ อ่านค่าไม่ได้

### ข3 ผลการศึกษาผล pH ของสารละลายบอแรกซ์ที่เฟอไรในการตรวจวัดพีในโตรไทออน

จากการตรวจวัดพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์ที่เฟอไรที่ pH ต่างๆ ได้แก่ 1.51 2.26 5.44 6.19 7.00 8.37 8.82 10.38 11.12 และ 12.16 ด้วย ขั้วกราไฟต์และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ให้ผลดังตารางที่ ข3

ตารางที่ ข3 ผลการศึกษา pH ของสารละลายบอแรกซ์ที่เฟอไรที่เหมาะสมในการตรวจวัดพีในโตรไทออน

pH	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
1.51	0.410	0.553	*	*	-0.480	-0.461	0.469	41.000	-0.411	-30.000	*	*
	0.380	0.534	*	*	-0.464	-0.471	0.448	40.000	-0.411	-25.000	*	*
	0.422	0.534	*	*	-0.485	-0.471	0.464	40.000	-0.422	-25.000	*	*
Average	0.404 $\pm$	0.540 $\pm$	*	*	-0.476 $\pm$	-0.468 $\pm$	0.460 $\pm$	40.333 $\pm$	-0.415 $\pm$	-26.667 $\pm$	*	*
	0.022	0.011			0.011	0.006	0.011	0.577	0.006	2.887		
2.26	0.353	0.510	*	*	-0.538	-0.870	0.501	13.600	-0.638	-21.300	*	*
	0.353	0.560	*	*	-0.533	-0.870	0.501	13.600	-0.654	-21.700	*	*
	0.590	0.560	*	*	-0.548	-0.870	0.506	13.400	-0.617	-20.900	*	*
Average	0.432 $\pm$	0.543 $\pm$	*	*	-0.540 $\pm$	-0.870 $\pm$	0.503 $\pm$	13.533 $\pm$	-0.636 $\pm$	-21.300 $\pm$	*	*
	0.137	0.029			0.008	0.000	0.003	0.115	0.019	0.400		

ตารางที่ ๓ (ต่อ)

pH	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
5.44	0.074	0.374	-0.206	-0.263	-0.744	-0.524	-0.021	21.800	-0.712	-17.700	*	*
	0.079	0.367	-0.206	-0.257	-0.744	-0.504	-0.016	22.100	-0.722	-17.700	*	*
	0.079	0.346	-0.200	-0.257	-0.744	-0.496	-0.021	22.100	-0.717	-17.900	*	*
Average	0.077 $\pm$	0.362 $\pm$	-0.204 $\pm$	-0.259 $\pm$	-0.744 $\pm$	-0.508 $\pm$	-0.019 $\pm$	22.000 $\pm$	-0.717 $\pm$	-17.767 $\pm$	*	*
	0.003	0.015	0.003	0.003	0.000	0.014	0.003	0.173	0.005	0.115		
6.19	0.200	0.590	*	*	-0.696	-0.880	0.158	26.900	*	*	-0.880	-23.600
	0.200	0.590	*	*	-0.680	-0.870	0.158	26.100	*	*	-0.890	-23.600
	0.206	0.580	*	*	-0.696	-0.880	0.163	26.100	*	*	-0.880	-23.600
Average	0.202 $\pm$	0.587 $\pm$	*	*	-0.691 $\pm$	-0.877 $\pm$	0.160 $\pm$	26.367 $\pm$	*	*	-0.880 $\pm$	-23.600 $\pm$
	0.003	0.006	-0.200	-0.270	0.009	0.006	0.003	0.462	-0.707	-17.200	0.010	0.000
7.00	0.063	0.380	-0.206	-0.263	-0.744	-0.613	-0.047	20.500	-0.707	-17.000	-0.940	-21.100
	0.064	0.387	-0.206	-0.263	-0.738	-0.627	-0.063	21.000	-0.717	-17.000	-0.990	-21.100
	0.069	0.387	-0.211	-0.263	-0.754	-0.613	-0.057	20.500	-0.707	-17.500	-0.990	-21.100
Average	0.065 $\pm$	0.385 $\pm$	-0.206 $\pm$	-0.265 $\pm$	-0.745 $\pm$	-0.648 $\pm$	-0.056 $\pm$	20.667 $\pm$	-0.710 $\pm$	-17.233 $\pm$	-0.970 $\pm$	-21.100 $\pm$
	0.003	0.004	0.006	0.004	0.008	0.008	0.008	0.289	0.006	0.252	0.030	0.000

ตารางที่ ข3 (ต่อ)

pH	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
8.37	-0.063	0.353	-0.285	-0.296	-0.791	-0.606	-0.137	23.700	-0.738	-17.500	*	*
	-0.063	0.355	-0.290	-0.298	-0.810	-0.610	-0.147	22.800	-0.748	-17.200	*	*
	-0.062	0.340	-0.280	-0.295	-0.795	-0.606	-0.132	23.700	-0.738	-17.000	*	*
Average	-0.063 $\pm$	0.349 $\pm$	-0.285 $\pm$	-0.296 $\pm$	-0.799 $\pm$	-0.607 $\pm$	-0.139 $\pm$	23.400 $\pm$	-0.741 $\pm$	-17.233 $\pm$	*	*
	0.001	0.008	0.005	0.002	0.010	0.002	0.008	0.520	0.006	0.252		
8.821	-0.069	0.397	-0.322	-0.379	-0.818	-0.982	-0.163	23.000	-0.770	-20.100	-1.023	-24.900
	-0.060	0.397	-0.320	-0.377	-0.812	-0.963	-0.163	23.200	-0.700	-21.000	-1.110	-25.000
	-0.069	0.397	-0.342	-0.370	-0.812	-0.982	-0.163	23.100	-0.780	-20.100	-1.030	-24.500
Average	-0.066 $\pm$	0.397 $\pm$	-0.328 $\pm$	-0.375 $\pm$	-0.814 $\pm$	-0.976 $\pm$	-0.163 $\pm$	23.100 $\pm$	-0.750 $\pm$	-20.400 $\pm$	-1.054 $\pm$	-24.800 $\pm$
	0.005	0.000	0.012	0.005	0.003	0.011	0.000	0.100	0.044	0.520	0.048	0.265
10.382	-0.279	0.360	-0.343	-0.580	-0.838	-1.350	-0.237	17.300	-0.295	-15.300	-0.775	-11.500
	-0.289	0.380	-0.348	-0.580	-0.848	-1.380	-0.232	17.000	-0.270	-15.000	-0.765	-12.100
	-0.277	0.360	-0.344	-0.580	-0.838	-1.350	-0.247	17.300	-0.290	-15.200	-0.754	-11.000
Average	-0.282 $\pm$	0.367 $\pm$	-0.345 $\pm$	-0.580 $\pm$	-0.841 $\pm$	-1.360 $\pm$	-0.239 $\pm$	17.200 $\pm$	-0.285 $\pm$	-15.167 $\pm$	-0.765 $\pm$	-11.533 $\pm$
	0.006	0.012	0.003	0.000	0.006	0.017	0.008	0.173	0.013	0.153	0.011	0.551

ตารางที่ ข3 (ต่อ)

pH	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
11.116	-0.274	0.340	-0.364	-0.470	-0.860	-0.930	-0.306	21.900	*	-0.833	*	-20.900
	-0.267	0.330	-0.364	-0.500	-0.848	-0.930	-0.316	21.900	*	-0.863	*	-21.000
	-0.264	0.350	-0.364	-0.430	-0.876	-0.930	-0.345	21.900	*	-0.800	*	-20.700
Average	-0.268 $\pm$	0.340 $\pm$	-0.364 $\pm$	-0.467 $\pm$	-0.861 $\pm$	-0.930 $\pm$	-0.322 $\pm$	21.900 $\pm$	*	-0.832 $\pm$	*	-20.867 $\pm$
	0.005	0.010	0.000	0.035	0.014	0.000	0.020	0.000		0.032		0.153
12.162	-0.353	0.370	-0.411	-0.420	-0.870	-0.650	-0.374	21.000	-0.406	-0.865	-24.000	-25.000
	-0.380	0.343	-0.454	-0.411	-0.866	-0.650	-0.367	21.100	-0.410	-0.870	-24.300	-25.100
	-0.366	0.367	-0.420	-0.430	-0.880	-0.650	-0.370	21.000	-0.408	-0.833	-24.120	-25.000
Average	-0.366 $\pm$	0.360 $\pm$	-0.428 $\pm$	-0.420 $\pm$	-0.872 $\pm$	-0.650 $\pm$	-0.370 $\pm$	21.033 $\pm$	-0.408 $\pm$	-0.856 $\pm$	-24.140 $\pm$	-25.033 $\pm$
	0.014	0.015	0.023	0.010	0.007	0.000	0.004	0.058	0.002	0.020	0.151	0.058

หมายเหตุ \* คือ อ่านค่าไม่ได้

#### ข4 ผลการศึกษาชนิดสารละลายที่ใช้ในการทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโน

##### ทิวป์ในการตรวจวัดพีโนโตรโทออน

จากการตรวจวัดพีโนโตรโทออนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/DMF และขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ให้ผลดังตารางที่ ข4

ตารางที่ ข4 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายที่ใช้ทำสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดพีโนโตรโทออน

Graphite						
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
	-0.213	3.900	-0.429	-5.200	-0.913	-9.400
	-0.216	3.800	-0.425	-5.220	-0.902	-9.350
	-0.223	3.980	-0.431	-5.290	-0.923	-9.480
Average	-0.217 $\pm$	3.893 $\pm$	-0.428 $\pm$	-5.237 $\pm$	-0.913 $\pm$	-9.410 $\pm$
	0.005	0.090	0.003	0.047	0.011	0.066
Graphite/MWNTs/DMF						
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
	-0.097	7.100	-0.518	-8.500	-1.071	-12.800
	-0.095	7.050	-0.521	-8.580	-1.088	-12.750
	-0.094	7.120	-0.519	-8.490	-1.075	-12.830
Average	-0.095 $\pm$	7.090 $\pm$	-0.519 $\pm$	-8.523 $\pm$	-1.078 $\pm$	-12.793 $\pm$
	0.002	0.036	0.002	0.049	0.009	0.040
Graphite/MWNTs/0.1%Nafion						
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
	-0.218	13.700	-0.397	-13.800	-0.887	-17.100
	-0.219	13.500	-0.395	-13.750	-0.885	-17.210
	-0.220	13.850	-0.399	-13.810	-0.898	-17.150
Average	-0.219 $\pm$	13.683 $\pm$	-0.397 $\pm$	-13.787 $\pm$	-0.890 $\pm$	-17.153 $\pm$
	0.001	0.176	0.002	0.032	0.007	0.055

### ข5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดพีในโตรไทออน

จากการตรวจวัดพีในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ในสารแขวนลอยของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ความเข้มข้น 0 2 4 6 8 และ 10 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ได้ผลแสดงดังตารางที่ ข5

ตารางที่ ข5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่เหมาะสมในการตรวจวัดพีในโตรไทออนด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion

Conc.MWNTs (mg/ml)	E1 / V	I / $\mu$ A	E2 / V	I / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
0	-0.279	0.360	-0.343	-0.580	-0.838	-1.350
	-0.289	0.380	-0.348	-0.580	-0.848	-1.380
	-0.277	0.360	-0.344	-0.580	-0.838	-1.350
Average	-0.282 $\pm$	0.367 $\pm$	-0.345 $\pm$	-0.580 $\pm$	-0.841 $\pm$	-1.360 $\pm$
	0.006	0.012	0.003	0.000	0.006	0.017
2	0.103	10.600	-0.434	-8.000	-0.750	-9.200
	0.111	10.600	-0.463	-8.100	-0.745	-9.600
	0.124	10.100	-0.455	-8.600	-0.724	-9.100
Average	0.113 $\pm$	10.433 $\pm$	-0.451 $\pm$	-8.233 $\pm$	-0.740 $\pm$	-9.300 $\pm$
	0.011	0.289	0.015	0.321	0.014	0.265
4	0.108	32.000	-0.345	-16.000	-0.729	-17.000
	0.121	32.100	-0.334	-16.000	-0.720	-17.100
	0.112	32.500	-0.355	-16.000	-0.749	-17.600
Average	0.114 $\pm$	0.265 $\pm$	0.011 $\pm$	-16.000 $\pm$	-0.733 $\pm$	-17.233 $\pm$
	0.007	32.200	0.345	0.000	0.015	0.321
6	0.103	27.000	-0.361	-13.000	-0.745	-13.000
	0.108	27.100	-0.371	-13.500	-0.745	-13.500
	0.111	27.000	-0.334	-13.000	-0.745	-13.100

ตารางที่ ข5 (ต่อ)

Conc.MWNTs (mg/ml)	E1 / V	I / $\mu$ A	E2 / V	I / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
Average	0.107 $\pm$	27.033 $\pm$	-0.355 $\pm$	-13.167 $\pm$	-0.745 $\pm$	-13.200 $\pm$
	0.004	0.058	0.019	0.289	0.000	0.265
8	0.113	27.000	-0.371	-13.000	-0.745	-14.000
	0.103	27.000	-0.377	-13.100	-0.755	-14.000
	0.111	27.000	-0.367	-13.000	-0.768	-14.000
Average	0.109 $\pm$	27.000 $\pm$	-0.372 $\pm$	-13.033 $\pm$	-0.756 $\pm$	-14.000 $\pm$
	0.005	0.000	0.005	0.058	0.012	0.000
10	0.097	17.400	-0.387	-9.400	-0.755	-9.900
	0.113	17.700	-0.371	-9.100	-0.755	-9.100
	0.108	17.200	-0.380	-9.600	-0.755	-9.600
Average	0.106 $\pm$	17.433 $\pm$	-0.379 $\pm$	-9.367 $\pm$	-0.755 $\pm$	-9.533 $\pm$
	0.008	0.252	0.008	0.252	0.000	0.404

#### ข6 ผลการศึกษาปริมาณของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ในการ ตรวจวัดพีในโครไทออน

จากการตรวจวัดพีในโครไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ในสารแขวนลอยของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์เข้มข้น 2 mg/ml ปริมาตร 1 ถึง 10 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ได้ผลดังแสดง ตารางที่ ข.6

ตารางที่ ข6 ผลการศึกษาปริมาณของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ที่เหมาะสมใน  
การตรวจวัดพีในโครไทออนด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion

Volume of MWNTs ( $\mu$ l)	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
0	-0.279	0.36	-0.343	-0.58	-0.838	-1.35
	-0.289	0.38	-0.348	-0.58	-0.848	-1.38
	-0.277	0.36	-0.344	-0.58	-0.838	-1.35

ตารางที่ ข6 (ต่อ)

Volume of MWNTs ( $\mu\text{l}$ )	E1 / V	I1 / $\mu\text{A}$	E2 / V	I2 / $\mu\text{A}$	E3 / V	I3 / $\mu\text{A}$
Average	-0.282 $\pm$ 0.006	0.370 $\pm$ 0.012	-0.345 $\pm$ 0.003	-0.580 $\pm$ 0.000	-0.841 $\pm$ 0.006	-1.360 $\pm$ 0.017
1	0.145	18.1	-0.429	-11.8	*	*
	0.124	18.1	-0.424	-11.8	*	*
	0.155	18.6	-0.455	-12.1	*	*
Average	0.141 $\pm$ 0.016	18.300 $\pm$ 0.290	-0.436 $\pm$ 0.017	-11.900 $\pm$ 0.173	*	*
2	-0.237	17.3	-0.295	-15.3	-0.775	-11.5
	-0.232	17.0	-0.270	-15.0	-0.765	-12.1
	-0.247	17.3	-0.290	-15.2	-0.754	-11.0
Average	-0.239 $\pm$ 0.008	17.200 $\pm$ 0.173	-0.285 $\pm$ 0.013	-15.200 $\pm$ 0.153	-0.765 $\pm$ 0.011	-11.500 $\pm$ 0.551
3	0.118	34.0	-0.429	-22.0	*	*
	0.120	34.2	-0.429	-22.1	*	*
	0.178	34.1	-0.429	-22.5	*	*
Average	0.139 $\pm$ 0.034	34.100 $\pm$ 0.100	-0.429 $\pm$ 0.000	-22.200 $\pm$ 0.265	*	*
4	0.140	28.0	-0.345	-18.0	*	*
	0.156	28.1	-0.344	-18.0	*	*
	0.150	28.4	-0.357	-18.0	*	*
Average	0.149 $\pm$ 0.008	28.200 $\pm$ 0.208	-0.349 $\pm$ 0.007	-18.000 $\pm$ 0.000	*	*
5	0.150	21.900	-0.424	-20.300	*	*
	0.158	22.000	-0.397	-20.300	*	*
	0.162	22.300	-0.429	-20.300	*	*
Average	0.157 $\pm$ 0.006	22.100 $\pm$ 0.208	-0.417 $\pm$ 0.017	-20.300 $\pm$ 0.000	*	*

ตารางที่ ๖ (ต่อ)

Volume of MWNTs ( $\mu\text{l}$ )	E1 / V	I1 / $\mu\text{A}$	E2 / V	I2 / $\mu\text{A}$	E3 / V	I3 / $\mu\text{A}$
6	0.166	23.0	-0.334	-21.0	-0.750	-26.000
	0.187	23.1	-0.380	-21.0	-0.750	-26.100
	0.172	23.0	-0.354	-21.0	-0.750	-25.500
Average	0.175 $\pm$	23.000 $\pm$	-0.356 $\pm$	-21.000 $\pm$	-0.750 $\pm$	-25.900 $\pm$
	0.011	0.058	0.023	0.000	0.000	0.321
7	-0.239	13.500	-0.266	-10.300	-0.755	-18.700
	-0.248	13.100	-0.250	-10.100	-0.770	-18.700
	-0.233	13.800	-0.278	-10.300	-0.845	-18.700
Average	-0.240 $\pm$	13.500 $\pm$	-0.265 $\pm$	-10.200 $\pm$	-0.790 $\pm$	-18.700 $\pm$
	0.008	0.351	0.014	0.115	0.048	0.000
8	0.071	23.000	-0.266	-14.000	-0.745	-23.100
	0.085	23.100	-0.230	-14.000	-0.765	-23.100
	0.067	23.400	-0.254	-14.200	-0.734	-23.600
Average	0.074 $\pm$	23.200 $\pm$	-0.250 $\pm$	-14.100 $\pm$	-0.748 $\pm$	-23.300 $\pm$
	0.009	0.208	0.018	0.115	0.016	0.289
9	-0.239	19.3	-0.255	-14.4	-0.739	-24.9
	-0.239	19.8	-0.255	-14.8	-0.739	-25.4
	-0.239	19.0	-0.255	-14.1	-0.739	-25.1
Average	-0.239 $\pm$	19.400 $\pm$	-0.255 $\pm$	-14.400 $\pm$	-0.739 $\pm$	-25.100 $\pm$
	0.000	0.404	0.000	0.351	0.000	0.252
10	-0.124	27.000	-0.471	-26.600	-0.845	-32.300
	-0.129	26.500	-0.471	-27.200	-0.845	-33.400
	-0.125	27.100	-0.471	-27.000	-0.845	-33.200
Average	-0.126 $\pm$	26.900 $\pm$	-0.471 $\pm$	-26.900 $\pm$	-0.845 $\pm$	-33.000 $\pm$
	0.003	0.321	0.000	0.306	0.000	0.586

หมายเหตุ

\* คือ อ่านค่าไม่ได้

### ข7 ผลการศึกษาพิกษณภกนโนของซงค่ออกซคดใการตรวจวดฟในโทรไทออน

จากการตรวจวัดฟในโทรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ในอัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 0 : 0 2 : 0 2 : 4 2 : 6 2 : 8 และ 2 : 14 ปริมาตร 2 ไมโครลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s ได้ผลดังแสดงตารางที่ ข7

ตารางที่ ข7 แสดงตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าและพิกษณแสดต่างๆของการตรวจวดฟในโทรไทออนด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ในอัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO

Wt.of MWNTs (mg)	Wt.of ZnO (mg)	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
0	0	-0.279	0.360	-0.343	-0.580	-0.838	-1.350
		-0.289	0.380	-0.348	-0.580	-0.848	-1.380
		-0.277	0.360	-0.344	-0.580	-0.838	-1.350
		Average	-0.282 $\pm$ 0.006	0.370 $\pm$ 0.012	-0.345 $\pm$ 0.003	-0.580 $\pm$ 0.000	-0.841 $\pm$ 0.006
2	0	-0.237	17.300	-0.295	-15.300	-0.775	-11.500
		-0.232	17.000	-0.270	-15.000	-0.765	-12.100
		-0.247	17.300	-0.290	-15.200	-0.754	-11.000
		Average	-0.239 $\pm$ 0.008	17.200 $\pm$ 0.173	-0.285 $\pm$ 0.013	-15.200 $\pm$ 0.153	-0.765 $\pm$ 0.011
2	2	-0.273	7.300	-0.519	-17.000	-0.892	-18.600
		-0.270	7.150	-0.515	-17.500	-0.890	-18.500
		-0.269	7.250	-0.510	-17.100	-0.885	-18.650
		Average	-0.271 $\pm$ 0.002	7.233 $\pm$ 0.076	-0.515 $\pm$ 0.005	-17.200 $\pm$ 0.265	-0.889 $\pm$ 0.004
2	4	-0.305	6.200	-0.484	-13.400	-0.784	-17.400
		-0.305	6.150	-0.485	-13.350	-0.785	-17.450

ตารางที่ ข7 (ต่อ)

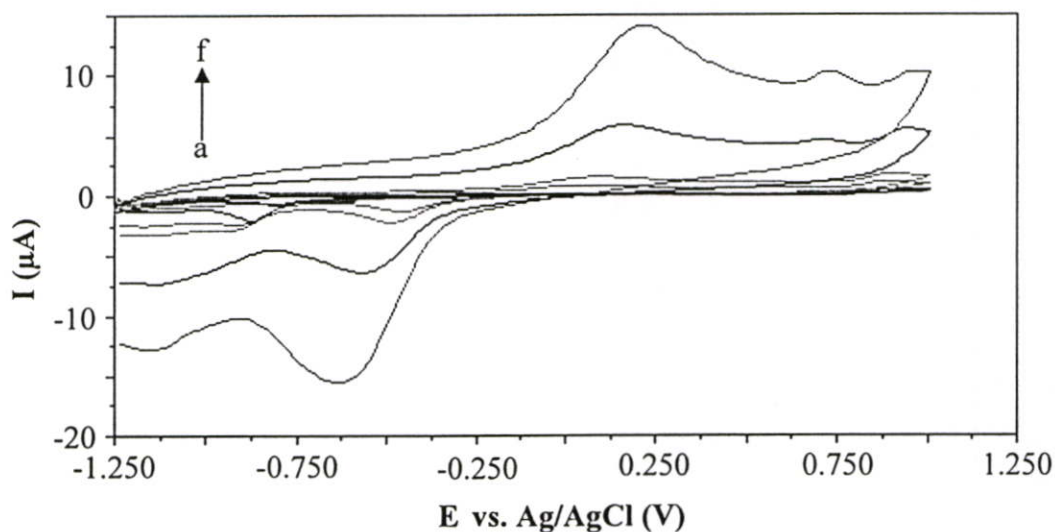
Wt.of MWNTs (mg)	Wt.of ZnO (mg)	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
Average		-0.310	6.200	-0.480	-13.450	-0.783	-17.390
		-0.307 $\pm$ 0.003	6.183 $\pm$ 0.029	-0.483 $\pm$ 0.003	-13.400 $\pm$ 0.050	-0.784 $\pm$ 0.001	-17.413 $\pm$ 0.032
2	6	-0.317	6.000	-0.452	-15.600	-0.756	-21.000
		-0.315	5.500	-0.451	-15.500	-0.755	-20.900
Average		-0.314	5.900	-0.449	-15.550	-0.754	-21.000
		-0.315 $\pm$ 0.002	5.800 $\pm$ 0.265	-0.451 $\pm$ 0.002	-15.550 $\pm$ 0.050	-0.755 $\pm$ 0.001	-20.967 $\pm$ 0.058
2	8	-0.295	5.700	-0.467	-14.600	-0.780	-19.500
		-0.290	5.750	-0.465	-14.500	-0.775	-19.450
Average		-0.295	5.700	-0.467	-14.500	-0.780	-19.500
		-0.293 $\pm$ 0.003	5.717 $\pm$ 0.029	-0.466 $\pm$ 0.001	-14.533 $\pm$ 0.058	-0.778 $\pm$ 0.003	-19.483 $\pm$ 0.029
2	14	-0.220	5.300	-0.489	-14.900	-0.840	-19.900
		-0.210	5.200	-0.485	-14.890	-0.850	-19.800
Average		-0.220	5.300	-0.488	-14.900	-0.840	-19.900
		-0.217 $\pm$ 0.006	5.267 $\pm$ 0.058	-0.487 $\pm$ 0.002	-14.897 $\pm$ 0.006	-0.843 $\pm$ 0.006	-19.867 $\pm$ 0.058

หมายเหตุ

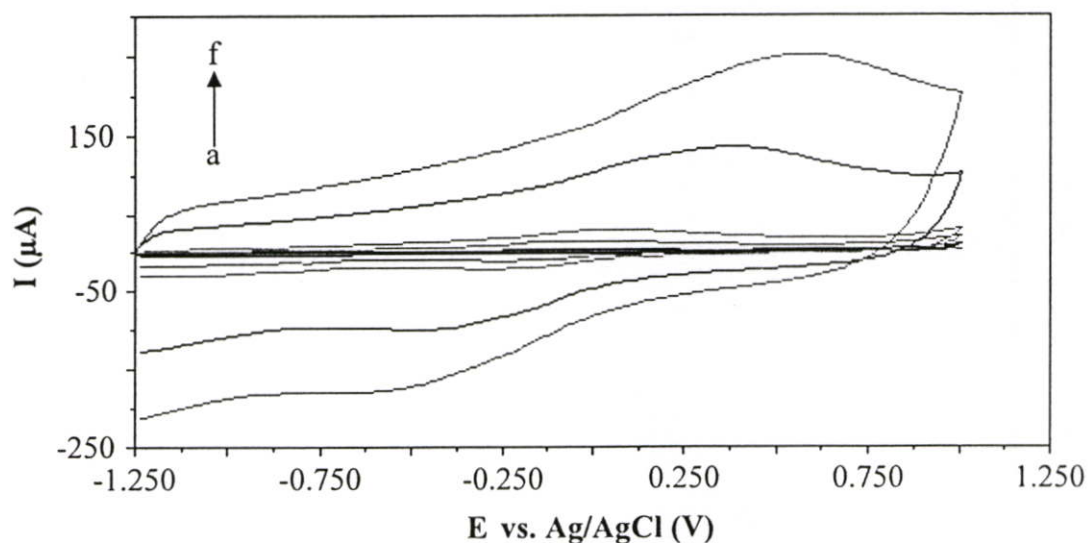
\* คือ อ่านค่าไม่ได้

### ข8 ผลการศึกษาอัตราการสแกนต่อการเกิดปฏิกิริยาในการตรวจวัดฟีนโตรโทอนบน ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

จากการตรวจวัดฟีนโตรโทอนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 1 10 25 50 100 250 500 และ 1000 mV/s ให้ผลดังรูปที่ ข1 ข2 ข3 และ ข4 ตามลำดับ และค่ากระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ได้ผลแสดงดังตารางที่ ข8 จากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง รากที่สองของอัตราการสแกนกับกระแสไฟฟ้า ค่าลอกกาติทึมของอัตราการสแกนกับลอกกาติทึมของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ผลแสดงดังตารางที่ ข9

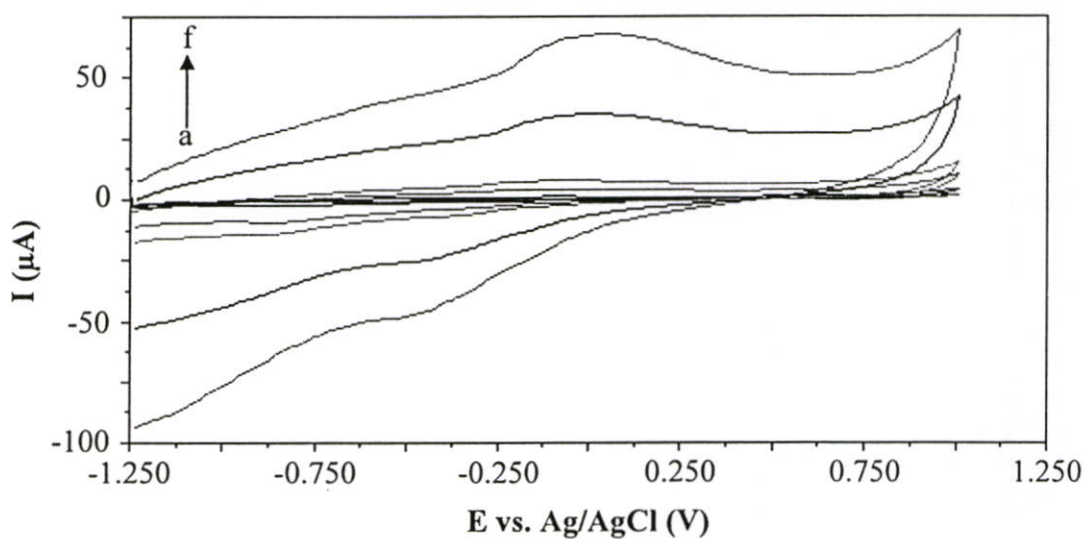


รูปที่ ข1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนโตรโทอนเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 1 (b) 10 (c) 50 (d) 100 (e) 500 และ (f) 1000 mV/s



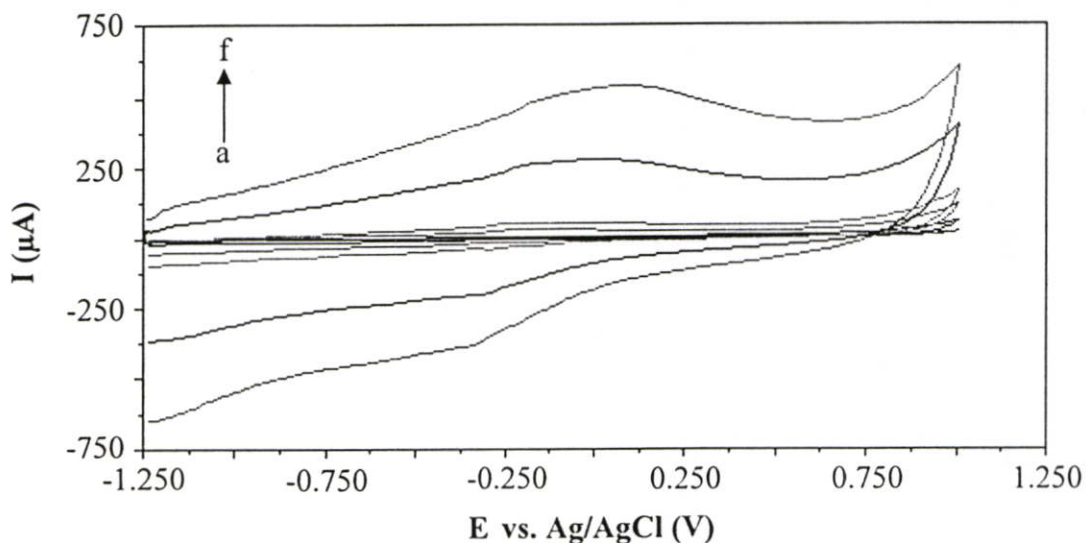
รูปที่ ข2 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์

บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ที่เข้มข้นของสารแขวนลอยเม็ด  
 คิวลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง  
 -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 1  
 (b) 10 (c) 50 และ (d) 100 (e) 500 และ (f) 1000 mV/s



รูปที่ ข3 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของพีโนโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์

บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion ที่เข้มข้นของสารแขวนลอย  
 ของผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกน  
 ศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการ  
 สแกนเท่ากับ (a) 1 (b) 10 (c) 50 (d) 100 (e) 500 และ (f) 1000 mV/s



รูปที่ ๗4 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของฟิโนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้ว Graphite/ZnO/MWNTs/0.1%Nafion ที่เข้มข้นของสารแขวนลอยมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และผงอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 2 mg/ml (อัตราส่วนระหว่าง MWNTs : ZnO เท่ากับ 1 : 1) ปริมาตร 2 ไมโครลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) เมื่ออัตราการสแกนเท่ากับ (a) 1 (b) 10 (c) 50 และ (d) 100 (e) 500 และ (f) 1000 mV/s

ตารางที่ ข8 แสดงอัตราการสแกนของขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ

Scan Rate (mV/s)	Graphite						Graphite/MWNTs(0.1%Nafion)					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
1	0.861	0.180	-0.618	-0.340	-0.808	-0.860	-0.281	0.310	-0.313	-0.220	-0.666	-1.150
	0.850	0.170	-0.622	-0.360	-0.815	-0.880	-0.290	0.300	-0.290	-0.240	-0.655	-1.190
	0.845	0.190	-0.619	-0.330	-0.809	-0.790	-0.275	0.290	-0.375	-0.280	-0.640	-1.130
Average	0.852 $\pm$	0.180 $\pm$	-0.620 $\pm$	-0.343 $\pm$	-0.811 $\pm$	-0.843 $\pm$	-0.282 $\pm$	0.300 $\pm$	-0.326 $\pm$	-0.247 $\pm$	-0.654 $\pm$	-1.157 $\pm$
10	0.008	0.010	0.002	0.015	0.004	0.047	0.008	0.010	0.044	0.031	0.013	0.031
	0.866	0.460	-0.403	-0.230	-0.876	-2.150	-0.171	2.800	-0.213	-1.900	-0.718	-4.100
	0.858	0.510	-0.411	-0.251	-0.880	-2.110	-0.730	2.700	-0.220	-1.750	-0.723	-4.000
	0.920	0.458	-0.405	-0.225	-0.831	-2.193	-0.767	2.870	-0.235	-1.880	-0.713	-3.990
Average	0.881 $\pm$	0.476 $\pm$	-0.406 $\pm$	-0.235 $\pm$	-0.862 $\pm$	-2.151 $\pm$	-0.556 $\pm$	2.790 $\pm$	-0.223 $\pm$	-1.843 $\pm$	-0.718 $\pm$	-4.030 $\pm$
25	0.034	0.029	0.004	0.014	0.027	0.042	0.334	0.085	0.011	0.081	0.005	0.061
	0.876	0.740	-0.418	6.600	-0.897	-2.210	-0.150	6.800	-0.239	-4.900	-0.745	-7.100
	0.825	0.752	-0.399	6.300	-0.880	-2.350	-0.145	6.500	-0.240	-4.500	-0.752	-6.900
	0.880	0.735	-0.461	6.540	-0.875	-2.252	-0.126	6.810	-0.229	-4.680	-0.728	-7.300
Average	0.860 $\pm$	0.742 $\pm$	-0.426 $\pm$	6.480 $\pm$	-0.884 $\pm$	-2.271 $\pm$	-0.140 $\pm$	6.703 $\pm$	-0.236 $\pm$	-4.693 $\pm$	-0.742 $\pm$	-7.100 $\pm$
	0.031	0.009	0.032	0.159	0.012	0.072	0.013	0.176	0.006	0.200	0.012	0.200

ตารางที่ ๗8 (ต่อ)

Scan Rate (mV/s)	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
50	0.897	1.130	-0.455	-1.320	-0.913	-2.430	-0.134	13.700	-0.250	-11.600	-0.771	-12.800
	0.825	1.150	-0.454	-1.350	-0.921	-2.550	-0.153	13.900	-0.195	-11.400	-0.765	-12.500
	0.843	1.110	-0.440	-1.420	-0.911	-2.340	-0.181	12.950	-0.280	-11.900	-0.743	-12.680
Average	0.855 $\pm$	1.130 $\pm$	-0.450 $\pm$	-1.363 $\pm$	-0.915 $\pm$	-2.440 $\pm$	-0.156 $\pm$	13.517 $\pm$	-0.242 $\pm$	-11.633 $\pm$	-0.760 $\pm$	-12.660 $\pm$
100	0.037	0.020	0.008	0.051	0.005	0.105	0.024	0.501	0.043	0.252	0.015	0.151
	0.661	1.170	-0.487	-2.190	-0.934	-2.950	0.034	28.300	-0.281	-21.400	-0.802	-23.600
	0.590	1.190	-0.430	-2.000	-0.910	-2.870	0.029	28.100	-0.250	-21.500	-0.810	-23.500
Average	0.636 $\pm$	1.150 $\pm$	-0.472 $\pm$	-2.163 $\pm$	-0.925 $\pm$	-2.907 $\pm$	0.032 $\pm$	28.100 $\pm$	-0.274 $\pm$	21.300 $\pm$	-0.801 $\pm$	-23.333 $\pm$
250	0.040	0.053	0.037	0.152	0.013	0.040	0.003	0.200	0.021	0.265	0.010	0.379
	0.676	2.680	-0.523	-4.860	-1.092	-5.130	0.299	70.200	-0.334	-51.700	*	*
	0.656	2.540	-0.515	-4.770	-1.095	-5.120	0.310	69.550	-0.320	-51.500	*	*
Average	0.672 $\pm$	2.623 $\pm$	-0.523 $\pm$	-4.833 $\pm$	-1.110	-5.110	0.289	70.340	-0.339	-51.100	*	*
	0.015	0.074	0.008	0.055	0.010	0.010	0.011	0.422	0.010	0.306	*	*

ตารางที่ ข8 (ต่อ)

Scan Rate (mV/s)	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
500	0.713	4.620	-0.566	-6.340	-1.129	-7.370	0.382	132.000	-0.339	-94.000	*	*
	0.711	4.500	-0.565	-6.220	-1.135	-7.280	0.350	135.000	-0.343	-97.000	*	*
	0.709	4.650	-0.546	-6.350	-1.210	-7.300	0.387	131.000	-0.336	-95.000	*	*
Average	0.711 $\pm$	4.590 $\pm$	-0.559 $\pm$	-6.303 $\pm$	-1.158 $\pm$	-7.317 $\pm$	0.373 $\pm$	132.667 $\pm$	-0.339 $\pm$	-95.333 $\pm$	*	*
	0.002	0.079	0.011	0.072	0.045	0.047	0.020	2.082	0.004	1.528		
1000	0.734	10.200	-0.613	-15.400	-1.134	-12.800	0.592	250.000	-0.455	-170.000	*	*
	0.723	10.120	-0.650	-15.350	-1.120	-12.790	0.600	253.000	-0.465	-175.000	*	*
	0.739	10.250	-0.615	-15.250	-1.143	-12.820	0.559	249.580	-0.449	-169.960	*	*
Average	0.732 $\pm$	10.190 $\pm$	-0.626 $\pm$	-15.333 $\pm$	-1.132 $\pm$	-12.803 $\pm$	0.584 $\pm$	250.860 $\pm$	-0.456 $\pm$	-171.653	*	*
	0.008	0.066	0.021	0.076	0.012	0.015	0.022	1.865	0.008	$\pm$ 2.898		

หมายเหตุ \* คือ อ่านค่าไม่ได้

ตารางที่ ๗8 (ต่อ)

Scan Rate (mV/s)	Graphite/ZnO/0.1%Nafion						Graphite/MWNTs/Zno/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
1	-0.202	0.008	-0.255	-0.014	-0.750	-0.123	-0.239	0.050	-0.261	-0.070	-0.713	-0.420
	-0.203	0.008	-0.245	-0.011	-0.766	-0.124	-0.239	0.040	-0.256	-0.070	-0.730	-0.410
	-0.202	0.008	-0.255	-0.016	-0.755	-0.126	-0.239	0.050	-0.271	-0.070	-0.718	-0.420
Average	-0.202 $\pm$	0.008 $\pm$	-0.252 $\pm$	-0.014 $\pm$	-0.757 $\pm$	-0.124 $\pm$	-0.239 $\pm$	0.047 $\pm$	-0.263 $\pm$	-0.070 $\pm$	-0.720 $\pm$	-0.417 $\pm$
	0.001	0.000	0.006	0.003	0.008	0.002	0.000	0.006	0.008	0.000	0.009	0.006
10	-0.208	0.097	-0.276	-0.079	-0.787	-0.285	-0.239	0.570	-0.429	-1.110	-0.718	-1.810
	-0.207	0.095	-0.277	-0.079	-0.765	-0.280	-0.239	0.540	-0.425	-1.130	-0.716	-1.810
	-0.206	0.095	-0.265	-0.079	-0.776	-0.283	-0.239	0.560	-0.429	-1.160	-0.718	-1.810
Average	-0.207 $\pm$	0.096 $\pm$	-0.273 $\pm$	-0.079 $\pm$	-0.776 $\pm$	-0.283 $\pm$	-0.239 $\pm$	0.557 $\pm$	-0.428 $\pm$	-1.133 $\pm$	-0.717 $\pm$	-1.810 $\pm$
	0.001	0.001	0.007	0.000	0.011	0.003	0.000	0.015	0.002	0.025	0.001	0.000
25	-0.224	0.216	-0.313	-0.202	-0.824	-0.456	-0.250	1.400	-0.455	-2.100	-0.739	-3.100
	-0.220	0.216	-0.320	-0.206	-0.830	-0.430	-0.254	1.100	-0.465	-2.100	-0.769	-3.100
	-0.225	0.216	-0.333	-0.201	-0.824	-0.441	-0.265	1.300	-0.474	-2.100	-0.745	-3.100
Average	-0.223 $\pm$	0.216 $\pm$	-0.322 $\pm$	-0.203 $\pm$	-0.826 $\pm$	-0.442 $\pm$	-0.256 $\pm$	1.267 $\pm$	-0.465 $\pm$	-2.100 $\pm$	-0.751 $\pm$	-3.100 $\pm$
	0.003	0.000	0.010	0.003	0.003	0.013	0.008	0.153	0.010	0.000	0.016	0.000

ตารางที่ ๖8 (ต่อ)

Scan Rate (mV/s)	Graphite/ZnO/0.1%Nafion						Graphite/MWNTs/Zno/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
50	-0.213	0.390	-0.292	-0.330	-0.855	-0.970	-0.244	2.800	-0.471	-2.900	-0.755	-4.000
	-0.211	0.390	-0.275	-0.350	-0.870	-0.950	-0.240	2.800	-0.470	-2.700	-0.749	-4.100
	-0.215	0.390	-0.282	-0.361	-0.839	-0.961	-0.254	2.800	-0.476	-3.100	-0.777	-4.100
Average	-0.213 $\pm$	0.390 $\pm$	-0.283 $\pm$	-0.347 $\pm$	-0.855 $\pm$	-0.960 $\pm$	-0.246 $\pm$	2.800 $\pm$	-0.472 $\pm$	-2.900 $\pm$	-0.760 $\pm$	-4.067 $\pm$
100	0.002	0.000	0.009	0.016	0.016	0.010	0.007	0.000	0.003	0.200	0.015	0.058
	-0.218	0.720	-0.350	-0.670	-0.876	-1.490	-0.244	5.300	-0.523	-5.500	-0.787	-6.900
	-0.217	0.716	-0.345	-0.661	-0.878	-1.481	-0.261	5.500	-0.520	-5.500	-0.780	-7.000
	-0.220	0.722	-0.374	0.645	-0.876	-1.478	-0.254	5.100	-0.554	-5.500	-0.776	-6.800
Average	-0.218 $\pm$	0.719 $\pm$	-0.356 $\pm$	-0.229 $\pm$	-0.877 $\pm$	-1.483 $\pm$	-0.253 $\pm$	5.300 $\pm$	-0.532 $\pm$	-5.500 $\pm$	-0.718 $\pm$	-6.900 $\pm$
250	0.002	0.003	0.016	0.757	0.001	0.006	0.009	0.200	0.019	0.000	0.006	0.100
	-0.115	1.780	-0.329	-1.250	-0.887	-2.540	-0.224	13.200	*	*	-0.760	-13.700
	-0.110	1.745	-0.330	-1.250	-0.890	-2.500	-0.220	13.200	*	*	-0.770	-13.700
	-0.115	1.770	-0.345	-1.250	-0.876	-2.530	-0.230	13.200	*	*	-0.773	-13.700
Average	-0.113 $\pm$	1.765 $\pm$	-0.335 $\pm$	-1.250 $\pm$	-0.884 $\pm$	-2.523 $\pm$	-0.225 $\pm$	13.200 $\pm$	*	*	-0.768 $\pm$	-13.700 $\pm$
	0.003	0.018	0.009	0.000	0.007	0.021	0.005	0.000	0.007	0.007	0.007	0.000

ตารางที่ ๖8 (ต่อ)

Scan Rate (mV/s)	Graphite/ZnO/0.1%Nafion					Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion						
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $\mu$ A	E3 / V	I3 / $\mu$ A
500	*	*	-0.434	-2.580	-0.908	-4.090	-0.166	26.500	-0.308	-20.700	-0.855	-28.000
	*	*	-0.434	-2.560	-0.910	-4.100	-0.166	26.000	-0.310	-20.700	-0.865	-28.100
	*	*	-0.434	-2.550	-0.912	-4.090	-0.166	26.200	-0.312	-20.700	-0.847	-28.300
Average	*	*	-0.434 $\pm$	-2.563 $\pm$	-0.910 $\pm$	-4.093 $\pm$	-0.166 $\pm$	26.233 $\pm$	-0.310 $\pm$	-20.700 $\pm$	-0.856 $\pm$	-28.133 $\pm$
1000	*	*	0.000	0.015	0.002	0.006	0.000	0.252	0.002	0.000	0.009	0.153
	*	*	-0.518	-4.700	-0.839	-6.200	*	*	-0.361	-38.700	-0.792	-45.600
	*	*	-0.508	-4.700	-0.840	-6.200	*	*	-0.360	-38.700	-0.750	-46.200
	*	*	-0.511	-4.700	-0.865	-6.200	*	*	-0.371	-38.700	-0.770	-46.300
Average	*	*	-0.512 $\pm$	-4.700 $\pm$	-0.848 $\pm$	-6.200 $\pm$	*	*	-0.364 $\pm$	-38.700 $\pm$	-0.771 $\pm$	-46.033 $\pm$
			0.005	0.000	0.015	0.000			0.006	0.000	0.021	0.379

หมายเหตุ \* คือ อ่านค่าไม่ได้

ตารางที่ ๗9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสแกน รากที่สองของอัตราการสแกน ค่าลอกกาติซึมของอัตราสแกน กระแสไฟฟ้า และลอกกาติซึมของ กระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ในการตรวจวัดพีโนไดรไทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดต่างๆ

V (mV/s)	V <sup>1/2</sup>	log V	Graphite						Graphite/MWNTs(0.1%Nafion)					
			I1	I2	I3	log I1	log I2	log I3	I1	I2	I3	log I1	log I2	log I3
10	3.2	1.0	0.48	0.24	2.15	-0.322	-0.628	0.333	2.79	1.84	4.03	0.446	0.266	0.605
25	5.0	1.4	0.74	0.67	2.27	-0.129	-0.174	0.356	6.70	4.69	7.10	0.826	0.671	0.851
50	7.1	1.7	1.13	1.36	2.44	0.053	0.135	0.387	13.52	11.63	12.66	1.131	1.066	1.102
100	10.0	2.0	1.15	2.16	2.91	0.061	0.335	0.463	28.10	21.30	23.33	1.449	1.328	1.368
250	15.8	2.4	2.62	4.83	5.12	0.419	0.684	0.709	70.03	51.43	54.76	1.845	1.711	1.738

ตารางที่ ๗9 (ต่อ)

V mV/s	V <sup>1/2</sup>	log V	Graphite/ZnO(0.1%Nafion)						Graphite/MWNTs/ZnO(0.1%Nafion)					
			I1	I2	I3	log I1	log I2	log I3	I1	I2	I3	log I1	log I2	log I3
10	3.2	1.0	0.096	0.079	4.03	-1.019	-1.102	0.605	0.557	1.13	1.81	-0.254	0.054	0.258
25	5.0	1.4	0.216	0.203	7.10	-0.666	-0.693	0.851	1.267	2.10	3.10	0.103	0.322	0.491
50	7.1	1.7	0.390	0.347	12.66	-0.409	-0.460	1.102	2.800	2.90	4.07	0.447	0.462	0.609
100	10.0	2.0	0.719	0.229	23.33	-0.143	-0.641	1.368	5.300	5.50	6.90	0.724	0.740	0.839
250	15.8	2.4	1.765	1.250	24.76	0.247	0.097	1.394	13.200	7.23	13.70	1.121	0.859	1.137

**ข8 ผลการศึกษาช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของชีวไฟฟ้า (Linear range)**

จากการตรวจวัดฟิโนโตร ไทออนที่ความเข้มข้น 1 5 10 50 100 และ 200 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยชีวกราไฟต์ชีว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ชิว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และชีว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion และทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคโพเรเรนเซียลพลัสโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV แล้วนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟิโนโตร ไทออนกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากนั้ทำการเลือกช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงได้ผลแสดงดังตารางที่ ข10

**ตารางที่ ข10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟิโนโตร ไทออนกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เมื่อตรวจวัดด้วยชีวไฟฟ้าชนิดต่างๆ**

Conc.FT (ppm)	Graphite		Graphite/MWNTs/0.1%Nafion		Graphite/ZnO/0.1%Nafion		Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion	
	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A
1	-0.777	0.655	-0.782	7.120	-0.812	1.500	-0.788	3.380
	-0.775	0.654	-0.781	7.110	-0.811	1.490	-0.785	3.350
	-0.778	0.655	-0.782	7.120	-0.799	1.500	-0.787	3.370
Average	-0.777 $\pm$	0.655 $\pm$	-0.782 $\pm$	7.117 $\pm$	-0.807 $\pm$	1.497 $\pm$	-0.787 $\pm$	3.367 $\pm$
	0.002	0.001	0.001	0.006	0.007	0.006	0.002	0.015

ตารางที่ ๗10 (ต่อ)

Conc.FT (ppm)	Graphite		Graphite/MWNTs/0.1%Nafion		Graphite/ZnO/0.1%Nafion		Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion	
	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A
5	-0.782	1.070	-0.782	5.590	-0.795	1.500	-0.777	2.840
	-0.781	1.050	-0.781	5.580	-0.798	1.498	-0.775	2.850
Average	-0.782	1.070	-0.782	5.550	-0.798	1.499	-0.778	2.810
	-0.782 $\pm$	1.063 $\pm$	-0.782 $\pm$	5.573 $\pm$	-0.797 $\pm$	1.499 $\pm$	-0.777 $\pm$	2.833 $\pm$
10	0.001	0.012	0.001	0.210	0.002	0.001	0.002	0.021
	-0.782	1.820	-0.782	6.320	-0.818	2.300	-0.782	3.540
Average	-0.781	1.810	-0.782	6.310	-0.808	2.290	-0.781	3.520
	-0.782	1.810	-0.775	6.320	-0.815	2.300	-0.782	3.550
50	-0.782 $\pm$	1.813 $\pm$	-0.780 $\pm$	6.317 $\pm$	-0.814 $\pm$	2.297 $\pm$	-0.782 $\pm$	3.537 $\pm$
	0.001	0.006	0.004	0.006	0.005	0.006	0.001	0.015
Average	-0.803	5.260	-0.793	15.300	-0.828	7.700	-0.798	8.670
	-0.802	5.250	-0.791	15.320	-0.825	7.710	-0.795	8.650
Average	-0.803	5.260	-0.792	15.300	-0.828	7.702	-0.797	8.660
	-0.803 $\pm$	5.257 $\pm$	-0.792 $\pm$	15.307 $\pm$	-0.823 $\pm$	7.704 $\pm$	-0.797 $\pm$	8.660 $\pm$
	0.001	0.006	0.001	0.012	0.002	0.005	0.002	0.010

ตารางที่ ข10 (ต่อ)

Conc.FT (ppm)	Graphite		Graphite/MWNTs/0.1%Nafion		Graphite/ZnO/0.1%Nafion		Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion	
	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A
100	-0.808	10.100	-0.798	18.500	-0.833	10.000	-0.813	12.100
	-0.807	10.120	-0.795	18.500	-0.835	10.020	-0.811	12.100
	-0.808	10.100	-0.795	18.450	-0.833	10.001	-0.812	12.100
Average	-0.808 $\pm$	10.107 $\pm$	-0.796 $\pm$	18.483 $\pm$	-0.834 $\pm$	10.007 $\pm$	-0.812 $\pm$	12.100 $\pm$
200	0.001	0.012	0.002	0.029	0.001	0.011	0.001	0.000
	-0.823	13.500	-0.808	16.900	-0.833	11.000	-0.823	11.700
	-0.821	13.450	-0.805	16.800	-0.835	11.001	-0.821	11.650
Average	-0.822 $\pm$	13.487 $\pm$	-0.807 $\pm$	16.850 $\pm$	-0.834 $\pm$	11.004 $\pm$	-0.822 $\pm$	11.683 $\pm$
	0.001	0.032	0.002	0.050	0.001	0.007	0.001	0.029

### ข10 ผลค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด (Detection limit)

จากการนำขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และ ขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ไปตรวจวัด ฟีนโทรไทออนในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคโพลาไรซ์เรโซแนนซ์พัลส์โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากสัญญาณ Noise 30 จุด สามารถหาค่าต่างๆได้ ดังนี้

หาค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนจากสมการ ข1

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{ข1})$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณรบกวนจากสมการ ข2

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{ข2})$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}\right)^2}{n-1}}$$

เมื่อ  $SD$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)  
 $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ย (Average)

และหาค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด ( $C_L$ ) จากสมการ ข3

$$C_L = \frac{3SD}{slope} \quad (\text{ข3})$$

และได้ผลแสดงดังตารางที่ ข11

ตารางที่ ข11 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าจากสัญญาณ Noise 30 จุดในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion

No. of Detection	I ( $\mu$ A)			
	Graphite	Graphite/MWNTs/ 0.1%Nafion	Graphite/ZnO/ 0.1%Nafion	Graphite/MWNTs/ ZnO/0.1%Nafion
1	0.480	0.480	0.100	0.086
2	0.450	0.498	0.110	0.085
3	0.390	0.510	0.120	0.084
4	0.440	0.470	0.100	0.082
5	0.480	0.476	0.130	0.083
6	0.460	0.488	0.100	0.025
7	0.470	0.481	0.110	0.015
8	0.350	0.480	0.170	0.088
9	0.420	0.450	0.140	0.084
10	0.413	0.390	0.180	0.064
11	0.360	0.440	0.190	0.081
12	0.323	0.480	0.170	0.079
13	0.365	0.460	0.180	0.075
14	0.321	0.470	0.150	0.075
15	0.392	0.350	0.170	0.076
16	0.254	0.420	0.190	0.077
17	0.252	0.413	0.150	0.077
18	0.231	0.360	0.180	0.079
19	0.293	0.323	0.190	0.079
20	0.454	0.365	0.170	0.079
21	0.445	0.321	0.180	0.076
22	0.390	0.392	0.121	0.077
23	0.386	0.454	0.136	0.079
24	0.445	0.489	0.154	0.077
25	0.481	0.451	0.129	0.076

ตารางที่ ข11 (ต่อ)

No. of Detection	I ( $\mu\text{A}$ )			
	Graphite	Graphite/MWNTs/ 0.1%Nafion	Graphite/ZnO/ 0.1%Nafion	Graphite/MWNTs/ ZnO/0.1%Nafion
26	0.452	0.499	0.124	0.088
27	0.229	0.501	0.151	0.077
28	0.354	0.487	0.132	0.077
29	0.323	0.495	0.159	0.079
30	0.224	0.448	0.188	0.079
Average	0.378	0.445	0.149	0.075
SD	0.082	0.055	0.030	0.016
Slope	0.066	0.134	0.091	0.095
$C_L$	3.742	1.241	0.989	0.498

### ข11 ผลค่าการทำซ้ำ (Reproducibility)

ผลของการทำซ้ำของขั้วไฟฟ้าดูจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variation : CV) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความคลาดเคลื่อนของวิธีที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราวเช่นเดียวกันกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation : SD) แต่ CV เป็นค่าสัมพัทธ์ นิยมแสดงเป็นค่าร้อยละจึงใช้เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ความเข้มข้นต่างระดับ และบอก precision ของวิธีได้ จากสมการ ข4

$$\%CV = \%RSD = \frac{SD \times 100}{\bar{x}} \quad (\text{ข4})$$

เมื่อ  $SD$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

$\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ย (Average)

จากการนำขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และ ขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ไปวัดพีโนโตรโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV ทำซ้ำ 20 ครั้ง (ทุกครั้งมีการเตรียมขั้วไฟฟ้าใหม่) บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ แล้วนำค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ตารางที่ ข12

ตารางที่ 12 แสดงค่าการทำซ้ำของขั้วกราฟไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion

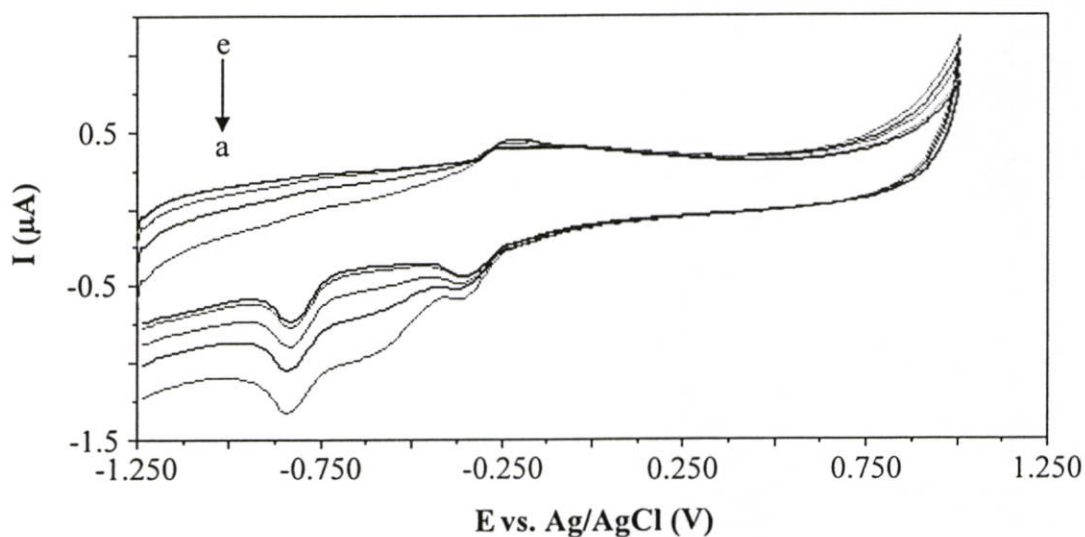
No. of Detection	Graphite		Graphite/MWNTs/0.1%Nafion		Graphite/ZnO/0.1%Nafion		Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion	
	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A	E / V	I / - $\mu$ A
1	-0.777	0.655	-0.782	7.120	-0.812	1.500	-0.788	3.380
2	-0.775	0.654	-0.781	7.110	-0.811	1.490	-0.785	3.350
3	-0.778	0.655	-0.782	7.120	-0.799	1.500	-0.787	3.370
4	-0.772	0.650	-0.780	7.110	-0.832	1.500	-0.787	3.380
5	-0.777	0.660	-0.790	7.110	-0.811	1.500	-0.788	3.370
6	-0.775	0.645	-0.785	7.100	-0.825	1.400	-0.782	3.370
7	-0.778	0.655	-0.788	7.000	-0.820	1.500	-0.777	3.380
8	-0.777	0.667	-0.784	7.110	-0.812	1.520	-0.787	3.360
9	-0.776	0.657	-0.777	7.000	-0.821	1.500	-0.782	3.380
10	-0.767	0.670	-0.782	7.120	-0.811	1.480	-0.779	3.360
11	-0.770	0.640	-0.780	7.120	-0.812	1.520	-0.797	3.380
12	-0.778	0.655	-0.767	7.110	-0.825	1.490	-0.780	3.370
13	-0.780	0.670	-0.780	7.120	-0.799	1.520	-0.780	3.380
14	-0.760	0.660	-0.777	7.120	-0.811	1.500	-0.782	3.380
15	-0.774	0.643	-0.785	7.120	-0.810	1.500	-0.788	3.360

ตารางที่ ๑12 (ต่อ)

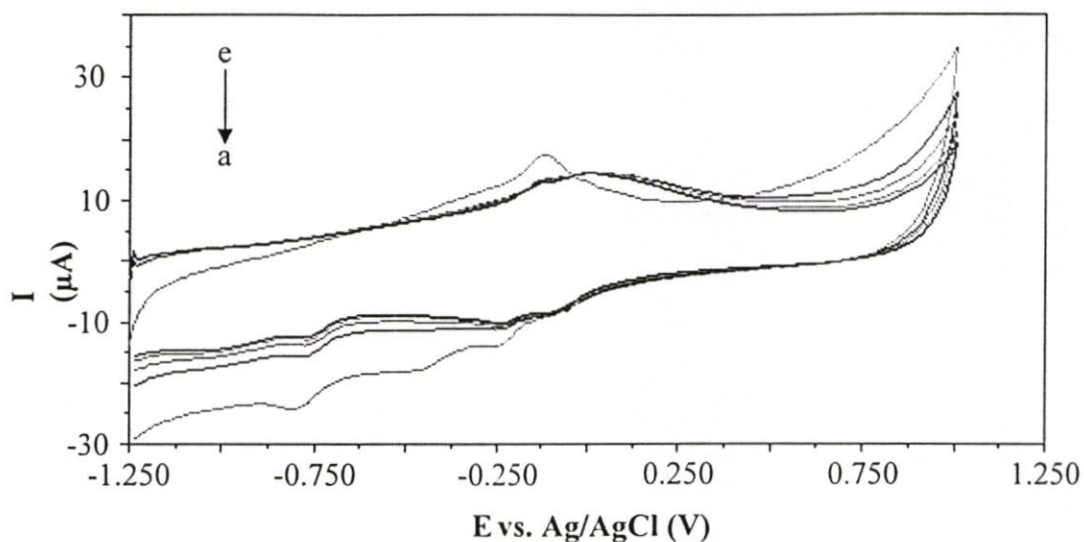
No. of Detection	Graphite		Graphite/MWNTs/0.1%Nafion		Graphite/ZnO/0.1%Nafion		Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion	
	E / V	I / $\mu$ A	E / V	I / $\mu$ A	E / V	I / $\mu$ A	E / V	I / $\mu$ A
16	-0.776	0.675	-0.788	7.120	-0.811	1.500	-0.787	3.370
17	-0.777	0.685	-0.772	7.110	-0.810	1.490	-0.788	3.370
18	-0.778	0.654	-0.790	7.000	-0.800	1.480	-0.779	3.360
19	-0.770	0.650	-0.788	7.100	-0.812	1.500	-0.782	3.370
20	-0.770	0.670	-0.780	7.100	-0.830	1.520	-0.780	3.370
SD	0.005	0.011	0.006	0.042	0.009	0.025	0.005	0.009
Average	-0.774	0.659	-0.782	7.096	-0.814	1.496	-0.784	3.371
%RSD	0.623	1.724	0.748	0.592	1.143	1.701	0.608	0.263

## ข12 อายุการใช้งานขั้วไฟฟ้า (Life time)

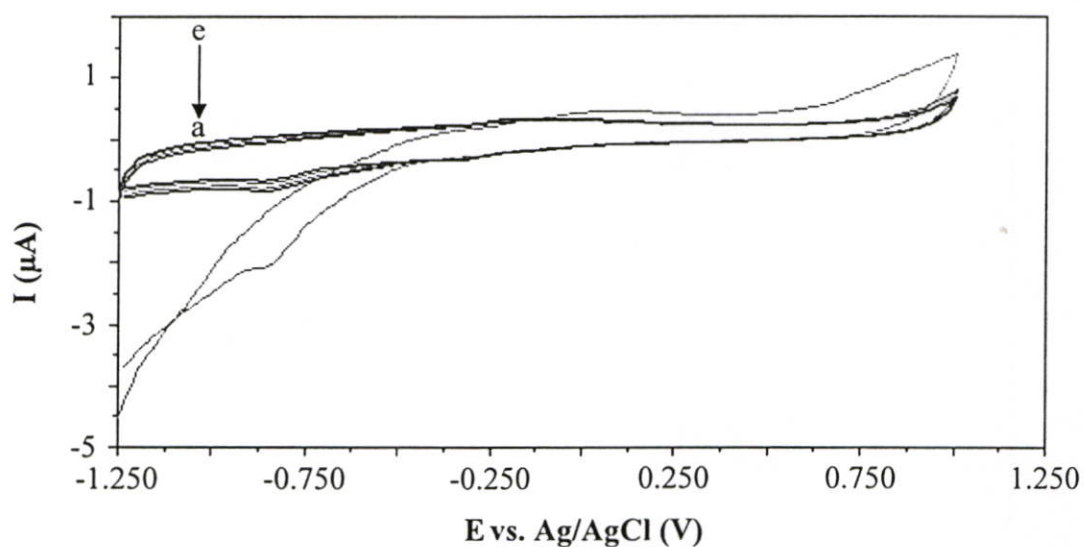
นำขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion ไปวัดพีใน โครโทออนเข้มข้น 1 ppm ในสารละลายบอแรกซ์ บัฟเฟอร์ pH 10.38 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s บันทึกค่ากระแสไฟฟ้า ให้ผลดังรูปที่ ข.1 ข.2 ข.3 และข.4 และตารางที่ ข.11 (อายุการใช้งานของขั้วไฟฟ้าจะพิจารณาจากจำนวนครั้งที่วัดที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดลงครึ่งหนึ่งของการตรวจวัดครั้งแรก



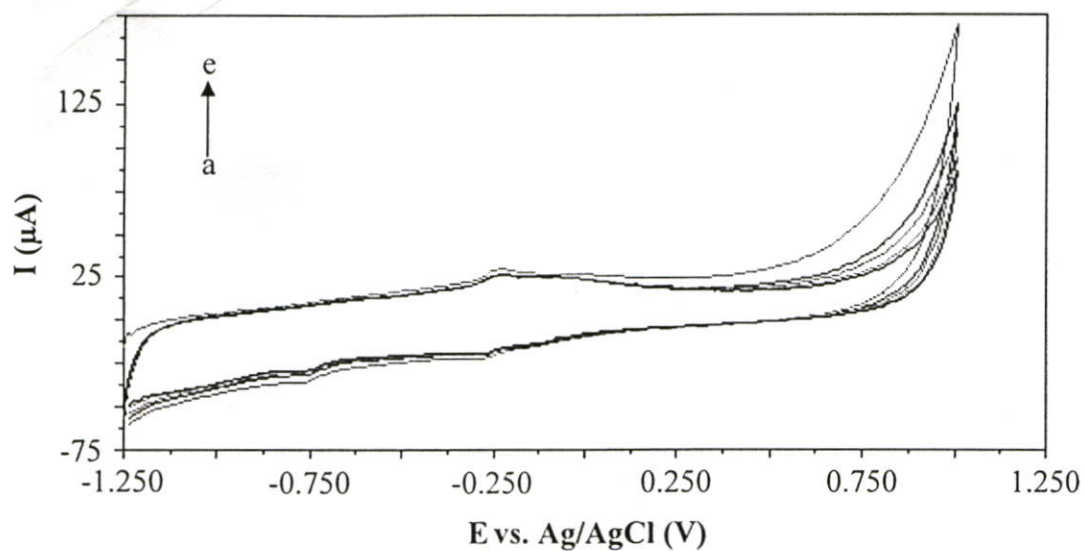
รูปที่ ข5 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของพีในโครโทออนเข้มข้น 1 ppm ตรวจวัดด้วยขั้วกราไฟต์ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อจำนวนรอบของการสแกนเป็น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 20 และ (e) 30



รูปที่ ข2 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ตรวจวัดด้วยขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อจำนวนรอบของการสแกนเป็น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 20 และ (e) 30



รูปที่ ข3 ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ตรวจวัดด้วยขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อจำนวนรอบของการสแกนเป็น (a) 1 (b) 5 (c) 10 (d) 20 และ (e) 30



รูปที่ ข4 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของฟีนโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ตรวจวัดด้วยขั้ว Graphite/  
ZnO/MWNTs/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.25 โวลต์ ถึง +1.00 โวลต์ (เทียบกับ  
ขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s เมื่อจำนวนรอบของการสแกนเป็น (a) 1 (b)  
5 (c) 10 (d) 20 และ (e) 30

ตารางที่ ข13 แสดงกระแสไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับจำนวนรอบของการตรวจวัดไฟฟ้าในโตรไทออนเข้มข้น 1 ppm ด้วยหัวไฟฟ้าชนิดต่างๆ

Scan No.	Graphite						Graphite/MWNTs(0.1%Nafion)					
	E1 / V	I1 / - $\mu$ A	E2 / V	I2 / - $\mu$ A	E3 / V	I3 / - $\mu$ A	E1 / V	I1 / - $\mu$ A	E2 / V	I2 / - $\mu$ A	E3 / V	I3 / - $\mu$ A
1	-0.244	0.380	-0.355	0.580	-0.839	0.132	-0.250	17.300	-0.308	14.000	-0.782	11.800
5	-0.276	0.390	-0.361	0.510	-0.834	1.040	-0.261	0.390	-0.361	0.510	-0.839	11.200
10	-0.250	0.425	-0.355	0.471	-0.834	0.891	-0.244	0.425	-0.361	0.480	-0.839	11.040
15	-0.234	0.452	-0.355	0.452	-0.839	0.799	-0.244	10.900	-0.287	8.700	-0.771	11.200
20	-0.229	0.443	-0.355	0.461	-0.829	0.772	-0.229	0.452	-0.350	0.461	-0.834	10.700
25	-0.208	0.443	-0.350	0.434	-0.829	0.745	-0.244	18.500	-0.281	7.900	-0.771	10.200
30	-0.218	0.441	-0.355	0.431	-0.829	0.742	-0.244	11.700	-0.276	7.700	-0.766	9.500

ตารางที่ ข.13 (ต่อ)

Scan No.	Graphite/ZnO/0.1%Nafion						Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion					
	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $-\mu$ A	E3 / V	I3 / $-\mu$ A	E1 / V	I1 / $\mu$ A	E2 / V	I2 / $-\mu$ A	E3 / V	I3 / $-\mu$ A
1	-0.202	0.310	-0.318	0.300	-0.855	0.930	-0.234	2.900	-0.261	2.600	-0.766	3.600
5	-0.208	0.288	-0.297	0.297	-0.871	0.845	-0.224	2.600	-0.281	2.000	-0.755	3.300
10	-0.234	0.286	-0.313	0.297	-0.866	0.793	-0.234	2.600	-0.271	2.100	-0.760	3.300
15	-0.218	0.310	-0.334	0.321	-0.871	0.760	-0.229	2.600	-0.281	2.000	-0.755	3.000
20	-0.229	0.310	-0.308	0.321	-0.866	0.721	-0.234	2.600	-0.287	1.900	-0.755	2.900
25	-0.213	0.319	-0.318	0.321	-0.860	0.697	-0.234	2.700	-0.281	1.900	-0.760	3.000
30	-0.213	0.334	-0.350	0.329	-0.860	0.673	-0.229	2.600	-0.287	1.900	-0.750	2.900

### ข13 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผักตัวอย่าง

จากการนำผักตัวอย่าง ได้แก่ ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกขี้หนูมา 50 กรัม นำไปหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ลงในเครื่องปั่น เติมน้ำปราศจากไอออนไป 50 มิลลิลิตรและปั่นให้ละเอียด จากนั้นนำไปกรองแยกน้ำและกากออกจากกัน ได้น้ำที่แยกออกมาและบีบเคี้ยว 1 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบอแรกซ์บัฟเฟอร์ pH 10.38 จากนั้นนำไปตรวจวัดด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรีด้วยขั้วกราไฟต์ ขั้ว Graphite/MWNTs/0.1%Nafion ขั้ว Graphite/ZnO/0.1%Nafion และขั้ว Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +1.00 โวลต์ ถึง -1.25 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง Ag/AgCl) อัตราการสแกน 50 mV/s และ Pulse amplitude 25 mV บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานและคำนวณหาร้อยละการคืนกลับของฟีนโทรไทออนในตัวอย่างผักให้ผลดังตารางที่ ข14

ตัวอย่างการคำนวณ จากตัวอย่างผักคะน้า ตรวจวัดฟีนโทรไทออนด้วยขั้วกราไฟต์

#### • หาฟีนโทรไทออนในตัวอย่างผัก

เมื่อนำตัวอย่างผักคะน้าไปตรวจวัดหาฟีนโทรไทออนด้วยขั้วกราไฟต์ได้ค่ากระแสเท่ากับ 1.135 ไมโครแอมแปร์ นำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานจะความเข้มข้นเป็น 2.960 ppm สามารถคำนวณหาปริมาณฟีนโทรไทออนได้ดังนี้คือ

จากสารละลาย	1	มิลลิลิตร	มีฟีนโทรไทออน	2.960	ไมโครกรัม
สารละลาย	10	มิลลิลิตร	มีฟีนโทรไทออน	$2.960 \times 10$	ไมโครกรัม
				29.60	ไมโครกรัม
บีบเคี้ยวสารละลาย	1	มิลลิลิตร	มีฟีนโทรไทออน	29.60	ไมโครกรัม
สารละลาย	50	มิลลิลิตร	มีฟีนโทรไทออน	29.60	ไมโครกรัม
ตัวอย่าง	50	กรัม	มีฟีนโทรไทออน	29.60	ไมโครกรัม

ดังนั้นในตัวอย่างผักคะน้ามีฟีนโทรไทออนเท่ากับ 29.60 ไมโครกรัม

#### • หาตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานฟีนโทรไทออน

หลังจากนั้นเติมสารละลายมาตรฐานฟีนโทรไทออนเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ลงในตัวอย่างผักคะน้า วัดค่ากระแสได้ 8.816 ไมโครแอมแปร์ นำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานจะความเข้มข้นเป็น 113.419 ppm สามารถคำนวณหาปริมาณฟีนโทรไทออนได้ดังนี้คือ

จากสารละลาย	1	มิลลิลิตร	มีฟีนโทรไทออน	113.419	ไมโครกรัม
สารละลาย	10	มิลลิลิตร	มีฟีนโทรไทออน	$113.419 \times 10$	ไมโครกรัม
				1134.19	ไมโครกรัม
บีบเคี้ยวสารละลาย	1	มิลลิลิตร	มีฟีนโทรไทออน	1134.19	ไมโครกรัม

สารละลาย	50	มิลลิลิตร	มีฟีนโตรไทออน	1134.19	ไมโครกรัม
ตัวอย่าง	50	กรัม	มีฟีนโตรไทออน	1134.19	ไมโครกรัม

ดังนั้นในตัวอย่างผักคะน้าที่เติมสารละลายมาตรฐานฟีนโตรไทออนมีฟีนโตรไทออนเท่ากับ 1134.19 ไมโครกรัม

- หาสารละลายมาตรฐานฟีนโตรไทออนที่เติมลงไป

จากสารละลาย	1	มิลลิลิตร	มีฟีนโตรไทออน	1000	ไมโครกรัม
จากสารละลาย	0.2	มิลลิลิตร	มีฟีนโตรไทออน	$1000 \times 0.2$	ไมโครกรัม
				200	ไมโครกรัม

ดังนั้นในตัวอย่างผักคะน้ามีสารละลายมาตรฐานฟีนโตรไทออนที่เติมลงไปเท่ากับ 200 ไมโครกรัม

- การหาร้อยละของการคืนกลับ (%recovery)

$$\%Recovery = \frac{[Sample + Std.] - [Sample]}{[Std.]} \times 100 \quad (ข4)$$

เมื่อ	Sample	คือ จำนวนสารตัวอย่าง (ไมโครกรัม)
	Sample + Std.	คือ จำนวนสารตัวอย่างรวมกับสารมาตรฐาน (ไมโครกรัม)
	Std	คือ จำนวนสารมาตรฐาน (ไมโครกรัม)

$$\%Recovery = \frac{1134.19 - 29.60}{[200]} \times 100$$

$$\%Recovery = 552$$

ดังนั้น ร้อยละการคืนกลับของผักคะน้าคือ 552

ตารางที่ ข14 แสดงปริมาณการตรวจวัดพีใน โตรไทออนในตัวอย่างผักด้วยหัวไฟฟ้าชนิดต่างๆ

Sample	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion							
	Sample			Sample + Std			%Recovery	Sample			Sample + Std			
	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)		I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	%Recovery
Kana	1.137			8.867				0.129			32.090			
	1.135			8.800				0.130			32.000			
	1.132			8.780				0.130			32.000			
	1.135 $\pm$			8.816 $\pm$				0.130 $\pm$			32.030			
Average	0.003	2.960	29.60	0.046	113.419	1134.19	552	0.001	18.187	1818.7	$\pm$ 0.052	193.627	1936.27	877
Bean	0.064			11.380				1.658			12.140			
	0.070			11.500				1.700			12.000			
	0.075			11.200				1.680			12.100			
	0.070 $\pm$			11.360				1.679 $\pm$			12.080			
Average	0.006	19.098	190.98	$\pm$ 0.151	151.970	1519.70	664	0.021	5.293	52.93	$\pm$ 0.072	44.746	447.46	197
Chili	1.328			3.200				0.167			10.100			
	1.330			3.370				0.168			10.200			
	1.320			3.120				0.167			10.250			

ตารางที่ ๑14 (ต่อ)

Sample	Graphite						Graphite/MWNTs/0.1%Nafion						
	Sample			Sample + Std			Sample			Sample + Std			
	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	
Average	1.326 $\pm$	0.005	0.61	3.230 $\pm$	1.379	13.79	0.167 $\pm$	17.616	176.16	10.183	30.952	309.52	64.88
Sample	Graphite/ZnO/0.1%Nafion						Graphite/MWNTs/ZnO/0.1%Nafion						
	Sample			Sample + Std			Sample			Sample + Std			
	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	
Kana	0.260	0.260	0.270	10.190	10.200	10.000	0.627	0.630	0.600	20.440	20.500	20.780	
Average	0.263 $\pm$	0.006	141.29	10.130	94.297	942.97	0.619 $\pm$	24.233	242.33	20.573	185.814	1858.14	807
Bean	0.971	0.980		6.097			1.187			9.597			
				6.100			1.200			9.600			

ตารางที่ ข14 (ต่อ)

Sample	Graphite						Graphite/MWNTs(0.1%Nafion							
	Sample			Sample + Std			%Recovery	Sample			Sample + Std			
	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)		I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	I / $\mu$ A	Conc.FT (ppm)	Wt. of FT ( $\mu$ g)	%Recovery
Average	0.975			6.150										
	0.975 $\pm$			6.116 $\pm$										
Chili	0.005	6.304	63.04	0.030	50.183	501.83	219	17.811	178.11		69.768	697.68	260	
	1.451			2.340										
	1.400			2.450										
	1.500			2.430										
Average	1.450 $\pm$			2.407 $\pm$										
	0.05	1.084	10.84	0.059	9.425	94.25	41.7	8.726	87.26		18.863	188.63	126	

## ภาคผนวก ค

# ความเป็นพิษของยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต

ความเป็นพิษของยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตจะมีความแตกต่างกัน แม้ว่าจะมีกลไกการออกฤทธิ์เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วความเป็นพิษมากหรือน้อยของยาฆ่าแมลง หรือสารพิษใดๆ สังเกตได้จากค่า  $LD_{50}$  ( $LD_{50}$  หมายถึง ค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไปจำนวน 50% ของสัตว์ทดลองที่ได้รับสารเคมีนั้น) ดังตารางที่ ค1 [70]

ตารางที่ ค1 ความเป็นพิษของยาฆ่าแมลงประเภทสารออร์กาโนฟอสเฟต แบ่งตามระดับอันตราย หรือความเป็นพิษ [70]

ระดับอันตราย	ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต
Ia ( $LD_{50} < 5$ mg/kg)	<ul style="list-style-type: none"><li>● Chorfenvinphos</li><li>● EPN</li><li>● Disulfoton</li><li>● Fonofos</li><li>● Mephosfolan</li><li>● Mevinphos</li><li>● Parathion</li><li>● Parathion-methyl</li><li>● Phoxim</li><li>● Sulfotep</li></ul>

## ตารางที่ ค1 (ต่อ)

ระดับอันตราย	ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต
Ib (LD <sub>50</sub> 5-50 mg/kg)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Azinphos-ethyl</li> <li>● Azinphos-methyl</li> <li>● Bromophos-ethyl</li> <li>● Carbophenothion</li> <li>● Dichlorvos</li> <li>● Dicrotophos</li> <li>● Fenthion</li> <li>● Isazofos Isofenphos</li> <li>● Mithamidophos</li> <li>● Monocrotophos</li> <li>● Omethoate</li> <li>● Oxydemeton-methyl</li> <li>● Thiometon</li> <li>● Triazophos</li> <li>● Triazophos</li> <li>● Vamidothion</li> </ul>
II (LD <sub>50</sub> 50-500 mg/kg)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Chlorpyrifos</li> <li>● Diazinon</li> <li>● Dimethoate</li> <li>● Ethion</li> <li>● Etrimfos</li> <li>● Fenitrithion</li> <li>● Formothion</li> <li>● Methacrifos</li> <li>● Naled</li> <li>● Phenthoate</li> <li>● Phosalone</li> <li>● Phosmet</li> </ul>

## ตารางที่ ๑1 (ต่อ)

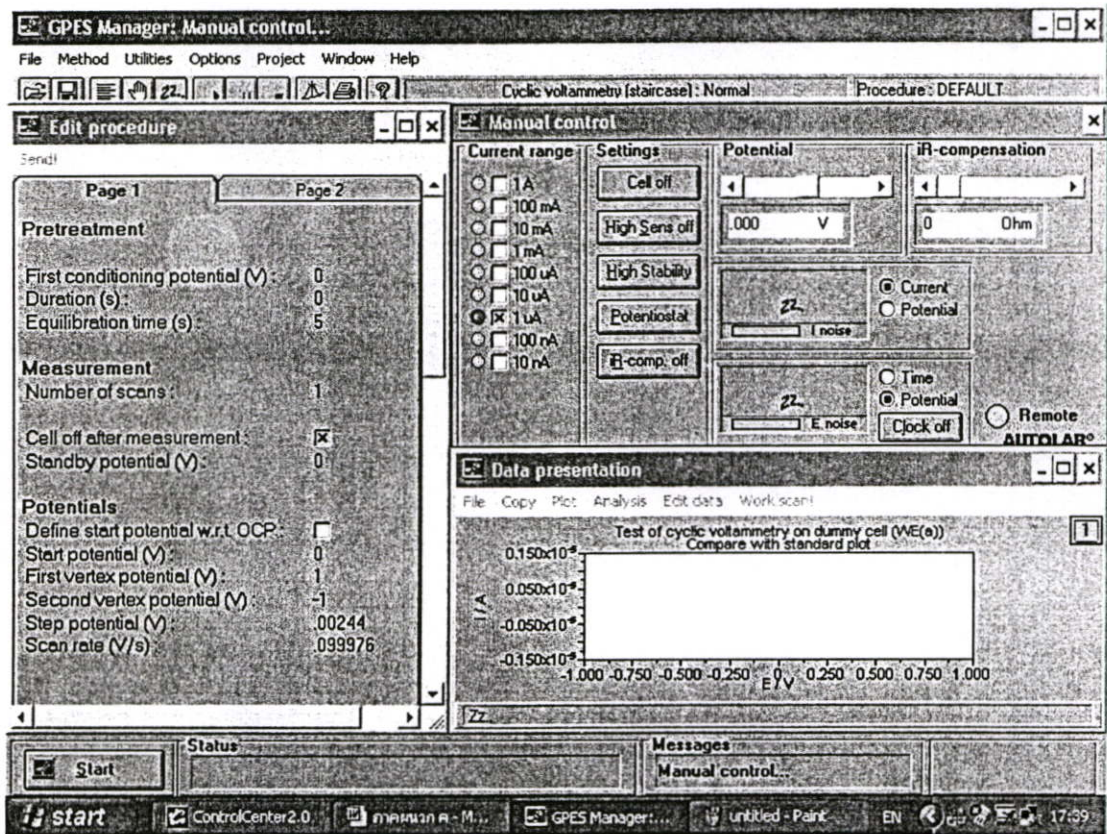
ระดับอันตราย	ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต
III ( $LD_{50} > 500$ mg/kg)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Profenophos</li> <li>● Prothiofos</li> <li>● Quinalphos</li> <li>● Sulprofos</li> <li>● Acephate</li> <li>● Azamethiphos</li> <li>● Bromophos</li> <li>● Malathion</li> <li>● Pirimiphos-methyl</li> <li>● Tetradifon</li> <li>● Trichlorfon</li> </ul>

หมายเหตุ      Ia คือ Extremely Hazardous  
 Ib คือ Highly Hazardous  
 II คือ Moderately Hazardous  
 III คือ Slightly Hazardous

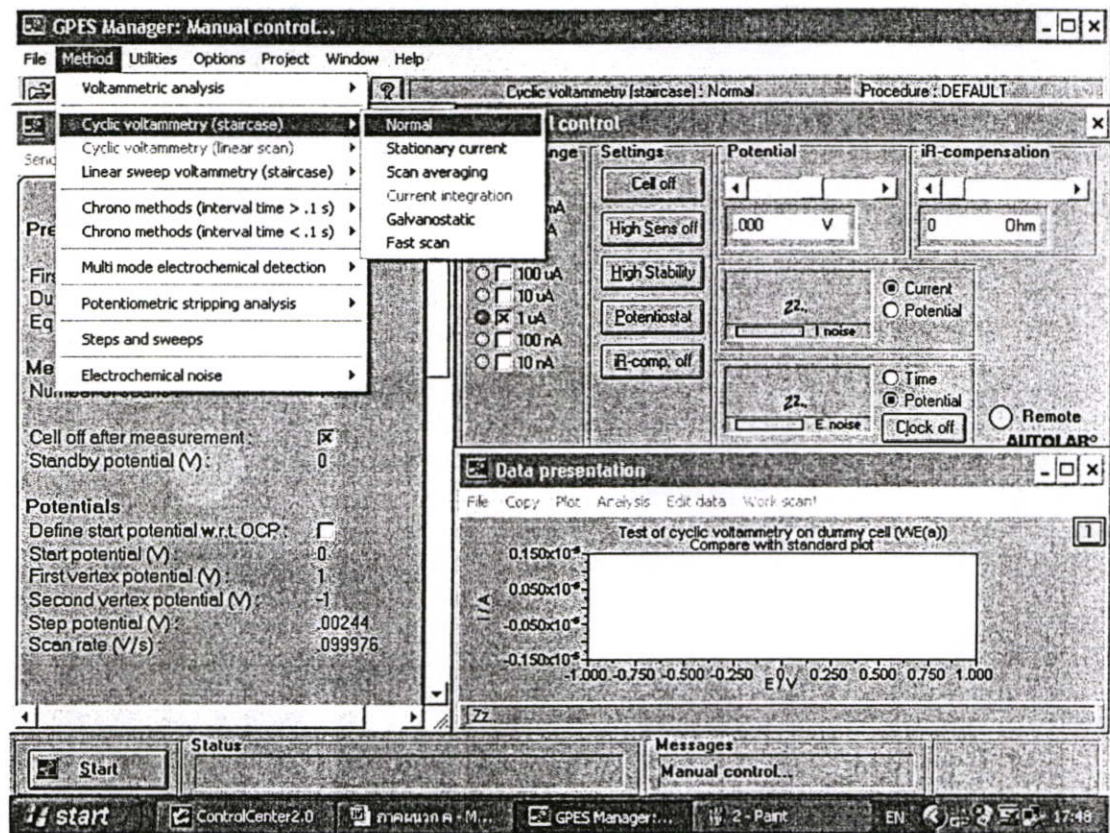
# ภาคผนวก การใช้เครื่อง Auto Lab

เปิดเครื่อง

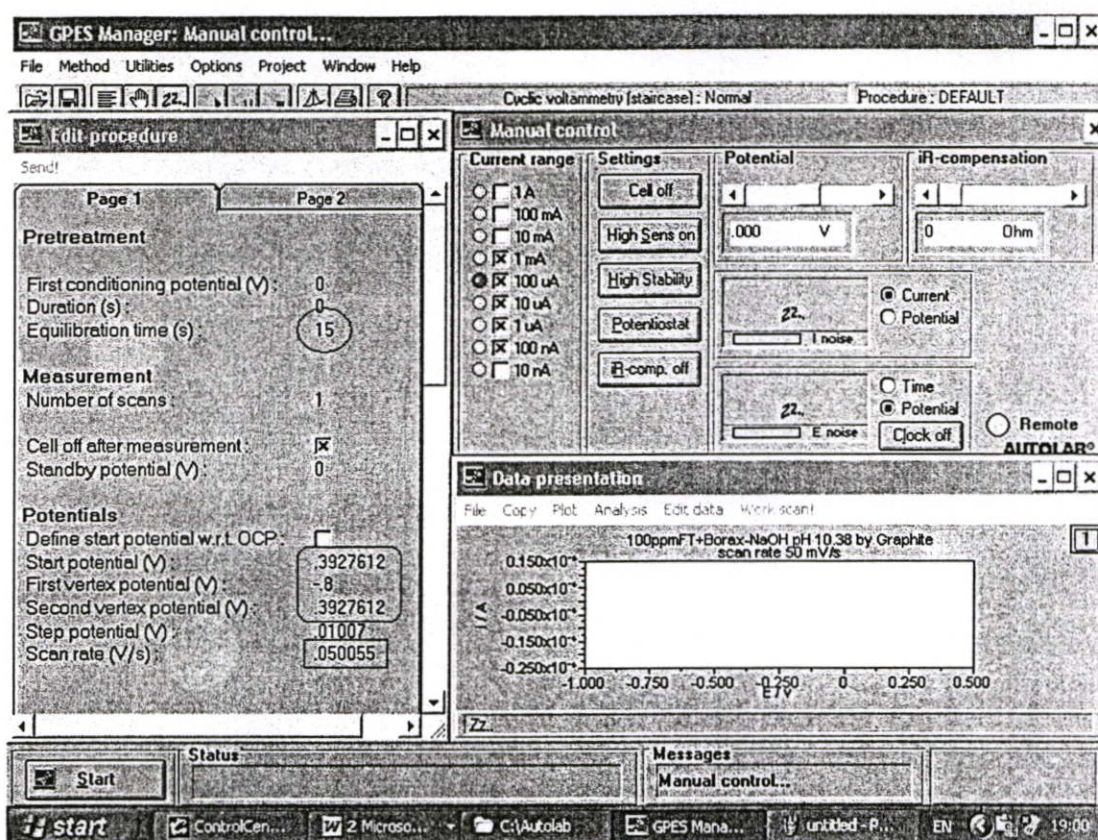
ขึ้นหน้าจอแถบดำให้เลือก Autolab Application → Enter → เข้าสู่เมนู GPES Manager



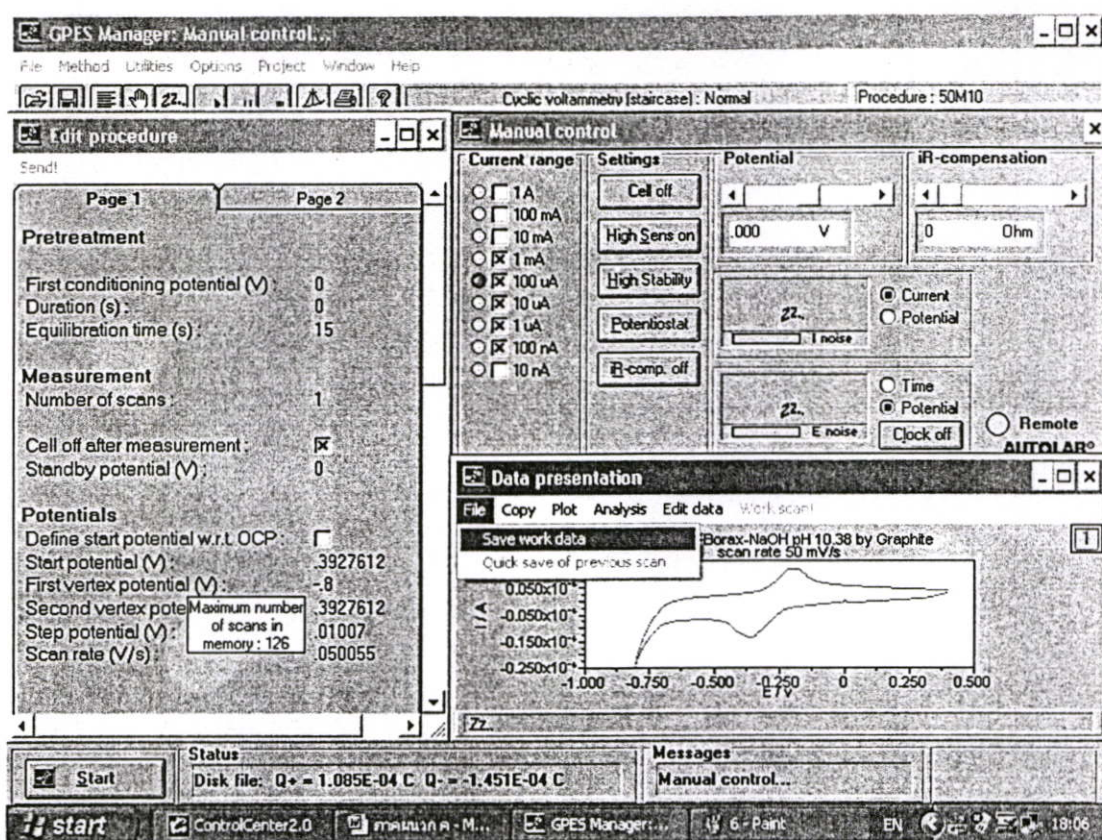
เลือกวิธีที่ใช้ในการตรวจวัด โดยไปที่ Methode → เลือกเทคนิคที่ใช้ ตัวอย่างเช่น Cyclic voltammetry (staircase) → Normal



ตั้งค่าสภาวะต่างๆ ดังนี้ Pure time (s) Start potential (V) First vertex potential (V) Second vertex potential (V) และ Scan rate (V/s) โดยค่าเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสารที่ใช้ในการตรวจวัด



กดปุ่ม Start จากนั้นเครื่องจะทำการตรวจวัดสารอัตโนมัติ และเมื่อวัดเสร็จแล้วจะให้สัญญาณไซคลิก หลังจากนั้นทำการเก็บข้อมูลลงในแฟ้มงานที่สร้างไว้ โดยไปที่ Window Data presentation เลือก File  $\rightarrow$  Save work data  $\rightarrow$  ตั้งชื่อไฟล์  $\rightarrow$  Save



การหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เข้าสู่เมนู GPES Manager → โดยไปที่ Window Data presentation เลือก Analysis → Peak search... → Search จะได้ค่าตามต้องการ

GPES Manager: Manual control

File Method Utilities Options Project Window Help

Cyclic voltammetry (staircase): Normal Procedure: 50M10

Edit procedure

Send!

Page 1 Page 2

**Pretreatment**

First conditioning potential (V): 0  
 Duration (s): 0  
 Equilibration time (s): 15

**Measurement**

Number of scans: 1  
 Cell off after measurement:   
 Standby potential (V): 0

**Potentials**

Define start potential w.r.t. OCP:   
 Start potential (V): 0.3927612  
 First vertex potential (V): -0.8  
 Second vertex potential (V): 0.3927612  
 Step potential (V): 0.01007  
 Scan rate (V/s): 0.050055

Maximum number of scans in memory: 126

**Manual control**

Current range:  1A  100 mA  10 mA  1 mA  100  $\mu$ A  10  $\mu$ A  1  $\mu$ A  100 nA  10 nA

Settings: Cell off High Sens on High Stability Potentiostat i-comp. off

Potential: 0.000 V

iR-compensation: 0 Ohm

Current  Potential

Time  Potential

Remote  AUTOLAR

**Data presentation**

File Copy Plot Analysis Edit data Work scan

Peak search...  
 Find minimum and maximum  
 Interpolate  
 Linear regression  
 Integrate between markers  
 Fit and Simulation

Wave log analysis  
 Tafel slope analysis  
 Corrosion rate  
 Current Density  
 Mark start point

Status  
 Disk file: Q+ = 1.085E-04 C Q- = -1.451E-04 C

start ControlCenter2.0 GPES Manager... 7 - Paint EN 18:13

GPES Manager: Manual control

**Peak search results**

No.	Position	Height	Area [C]	Width [1/2]	Derivative	Ep-Ep/2 [V]
01	-0.363	9.068e-6	2.751e-5	0.141	1.707e-4	-0.072
02	-0.191	9.354e-6	4.285e-5	0.151	1.560e-4	0.076

Clear OK

**Peak search**

Automatic Whole peak Linear baseline

Search Options >>

Show results Close

**Manual control**

Equilibration time (s): 15

**Measurement**

Number of scans: 1  
 Cell off after measurement:   
 Standby potential (V): 0

**Potentials**

Define start potential w.r.t. OCP:   
 Start potential (V): 0.3927612  
 First vertex potential (V): -0.8  
 Second vertex potential (V): 0.3927612  
 Step potential (V): 0.01007  
 Scan rate (V/s): 0.050055

Maximum number of scans in memory: 126

**Data presentation**

File Copy Plot Analysis Edit data Work scan

100ppmFT+borax-NaOH pH 10.38 by Graphite scan rate 50 mV/s

**Messages**

6 of 24 - Clipboard Item collected.

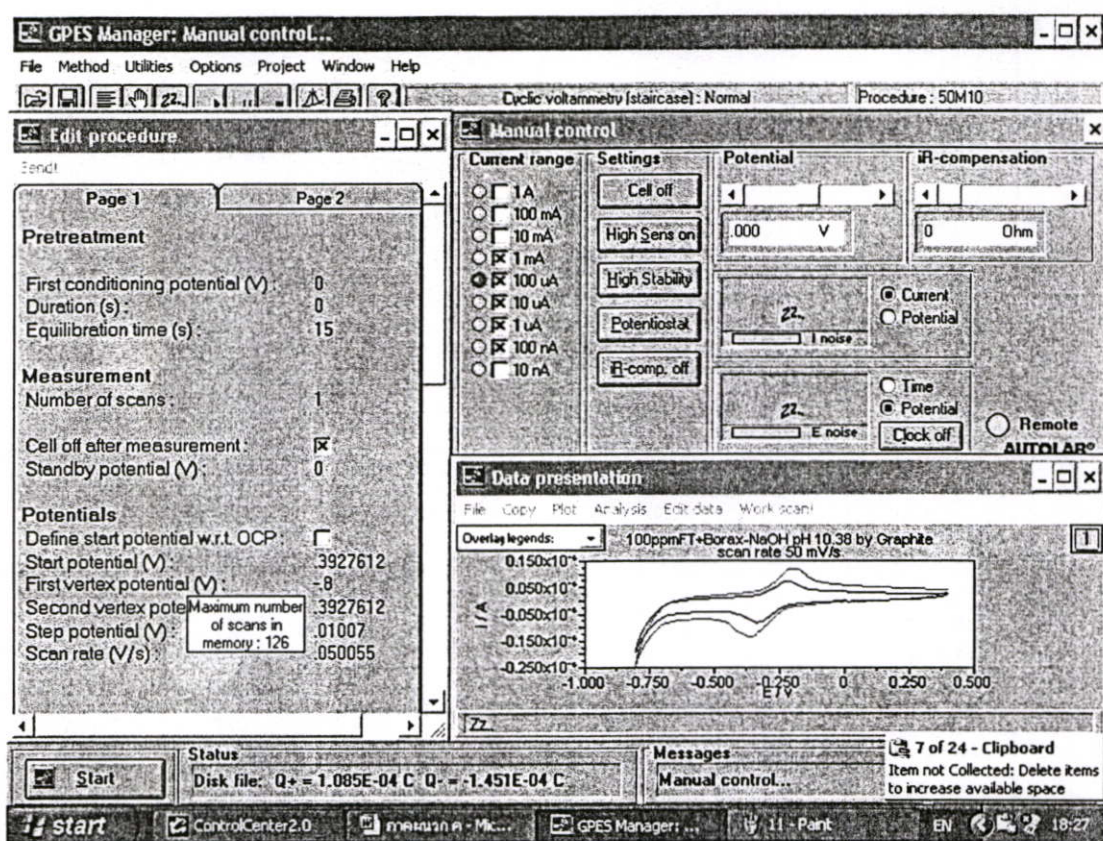
Status  
 Disk file: Q+ = 1.085E-04 C Q- = -1.451E-04 C

start ControlCenter2.0 GPES Manager... 8 - Paint EN 18:15

## การเปรียบเทียบกราฟแต่ละอัน

เข้าสู่เมนู GPES Manager → โดยไปที่ Window Data presentation เลือก Plot → Load overlay File → เลือกไฟล์ที่ต้องการเปรียบเทียบ จะได้กราฟซ้อนทับกัน (สามารถซ้อนทับกันได้สูงถึง 7 กราฟ)

The screenshot displays the GPES Manager software interface. The main window is titled "Manual control" and shows various settings for cyclic voltammetry, including "Current range" (1 A, 100 m, 10 m, 1 mA, 100 u, 10 u, 1 uA, 100 n, 10 n) and "Potential" (F4). A context menu is open over the "Manual control" window, with "Load overlay file" selected. The "Data plot" window shows a cyclic voltammogram for "100ppmFT+Borex-NaOH pH 10.38 by Graphite" with a scan rate of 50 mV/s. The plot shows current (A) versus potential (V) with two overlapping curves. The status bar at the bottom shows "Disk file: Q+ = 1.085E-04 C Q- = -1.451E-04 C" and a message about clipboard space.



การเรียกข้อมูลที่มีอยู่ขึ้นมาอีกครั้ง หลังจากที่ได้เก็บไว้แล้ว

เข้าสู่เมนู GPES Manager → File → Load scan... → เลือกแฟ้มที่เก็บข้อมูล → คลิกที่ข้อมูล  
→ Open จะได้ข้อมูลตามต้องการ

GPES Manager: Manual control...

File Method Utilities Options Project Window Help

Cyclic voltammetry (staircase): Normal Procedure: DEFAULT

Manual control

Current range:  1 A  100 mA  10 mA  1 mA  100  $\mu$ A  10  $\mu$ A  100 nA  10 nA

Settings: Cell off High Sens off High Stability Potentiostat iR-comp. off

Potential: 0.000 V

iR-compensation: 0 Ohm

Current  Potential

Time  Potential

Remote AUTOLAB

Number of scans: 1

Cell off after measurement:

Standby potential (V): 0

Potentials

Define start potential w.r.t. OCP:

Start potential (V): 0

First vertex potential (V): 1

Second vertex potential (V): -1

Step potential (V): 0.00244

Scan rate (V/s): 0.099976

Data presentation

Test of cyclic voltammetry on dummy cell (WE(a))  
Compare with standard plot

Start

Status

Messages

Manual control...

start ControlCenter2.0 GPES Manager: 1 - Paint EN 17:58

GPES Manager: Manual control...

File Method Utilities Options Project Window Help

Cyclic voltammetry (staircase): Normal Procedure: 50M10

Edit procedure

Send

Page 1 Page 2

Pretreatment

First conditioning potential (V): 0

Duration (s): 0

Equilibration time (s): 15

Measurement

Number of scans: 1

Cell off after measurement:

Standby potential (V): 0

Potentials

Define start potential w.r.t. OCP:

Start potential (V): 3927612

First vertex potential (V): -8

Second vertex potential (V): 3927612

Step potential (V): 0.01007

Scan rate (V/s): 0.050055

Maximum number of scans in memory: 126

Current range:  1 A  100 mA  10 mA  1 mA  100  $\mu$ A  10  $\mu$ A  1  $\mu$ A  100 nA  10 nA

Settings: Cell off High Sens on High Stability Potentiostat iR-comp. off

Potential: 0.000 V

iR-compensation: 0 Ohm

Current  Potential

Time  Potential

Remote AUTOLAB

Data presentation

100ppmFT+ Borax- NaOH pH 10.38 by Graphite  
scan rate 50 mV/s

Start

Status

Disk file: Q+ = 1.085E-04 C Q- = -1.451E-04 C

Messages

Manual control...

start ControlCenter2.0 GPES Manager: 5 - Paint EN 18:02

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวศุภาณี พรทอง
วัน/เดือน/ปี เกิด	15 สิงหาคม 2523
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	
ปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2545
มัธยมศึกษา	โรงเรียนคำสร้อยพิทยาสรรค์ อำเภอนิคมน้ำอ้อย จังหวัดมุกดาหาร พ.ศ. 2541