

**การวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินอี
โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากหมึกคาร์บอน เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบฉีดไหล**

**DETERMINATION OF VITAMIN E USING THE CARBON INK
ELECTRODE APPLIED IN FLOW INJECTION ANALYSIS**



**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2551**

KMITL-2008-SC-M-012-054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DETERMINATION OF VITAMIN E USING THE CARBON INK
ELECTRODE APPLIED IN FLOW INJECTION ANALYSIS**

CHATCHAI NGAMKAM



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY**

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2008

KMITL-2008-SC-M-012-054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2008

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินอี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากหมึกคาร์บอน เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบฉลิตไหล
นักศึกษา	นายจักรชัย งามขำ
รหัสประจำตัว	46068806
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี (เคมีวิเคราะห์)
พ.ศ.	2551
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาการสร้างขั้วไฟฟ้าที่ทำจากหมึกคาร์บอนสำหรับการวิเคราะห์วิตามินอี (α -tocopherol) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายบัฟเฟอร์ของ 0.06M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06M กรดซิตริก ในเมทานอล พบว่าที่ pH 2.5 ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด ช่วง scan rate ที่ใช้เท่ากับ 10-500 mV/s และความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ระหว่าง 20-100 ppm มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.9990 การวิเคราะห์ α -tocopherol โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าแบบ thin-layer กับขั้วไฟฟ้าที่ทำจากหมึกคาร์บอนในระบบฉลิตไหล โดยเทคนิคแอมเพโรเมตรี พบว่าไฮโดรไดนามิกโวลแทมโมแกรมของ α -tocopherol ให้ค่ากระแสสูงสุดที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V. อัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์คือ 1.0 mL/min ขีดจำกัดการตรวจวัดของ α -tocopherol ที่สามเท่าของสัญญาณรบกวน (S/N=3) เท่ากับ 1.0 ppm และความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ระหว่าง 20-100 ppm มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.9999 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 2.73 % ความเสถียรของขั้วไฟฟ้าที่ทำจากหมึกคาร์บอน เมื่อทำการวัด 30 ครั้ง ลดลง 22.74 %

จากการศึกษา นำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้กับวิเคราะห์วิตามินอี ในตัวอย่างน้ำมันพืช 3 ชนิด คือ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันรำข้าว พบว่า มีปริมาณ α -tocopherol เท่ากับ 37.40, 66.91 และ 250.00 ppm ตามลำดับ และพบว่า ร้อยละคืนกลับโดยเทคนิคการเติมสารมาตรฐาน มีค่าอยู่ระหว่าง 101.93-105.21 , 104.50-121.47และ 110.29-124.27 ตามลำดับ และมีความเที่ยงในการทวนซ้ำที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ร้อยละ 0.87, 2.89 และ 1.51 ตามลำดับ

Thesis Title	Determination of Vitamin E Using the Carbon Ink Electrode Applied in Flow Injection Analysis
Student	Mr. Chatchai Ngamkam
Student ID.	46068806
Degree	Master of Science
Programme	Chemistry (Analytical Chemistry)
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Arunee Kongsakphaisal

ABSTRACT

This research studied the application of carbon ink electrode for determination of Vitamin E (α -tocopherol) by cyclic voltammetry technique. In the buffer solution of 0.06M tetrabutylammonium perchlorate and 0.06M citric acid in methanol at pH 2.5, the highest current performed at scan rate 10-500 mV/s and correlation coefficients (r) for calibration curve was 0.9981 for α -tocopherol in the concentration range 20-100 ppm. The determination of α -tocopherol using thin-layer electrochemical flow through cell with carbon ink electrode in Flow Injection Analysis (FIA) and amperometric detection were studied. The hydrodynamic voltammogram of α -tocopherol had a peak potential at 0.52V. The optimum flow rate of buffer solution was 1.0 ml/min and limit of detection (S/N = 3) was 1.0 ppm, and the correlation coefficients (r) for calibration curve was 0.997 at 20-100 ppm level and the precision as relative standard deviation (% RSD) is less than 2.73 %. The stability of carbon ink electrode replicated for 30 times, the signal decreased 22.74%.

This developed technique was applied to determine the concentration of Vitamin E as α -tocopherol in three oil samples such as palm oil, soybean oil and rice bran oil, the results were 37.40, 66.91 and 250.00 ppm, respectively with the precision illustrated as relative standard deviation (% RSD) were 0.87, 2.89 and 1.51 % respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล เสมือนแม่คนที่สองที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำสิ่งต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ตีรวมถึงความรู้อีกอบอวนให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณกรรมการสอบหัวข้อ และโครงร่างวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ และผศ.ดร.วินัย นุตมากุล ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณพี่ไพโรจน์ จันทร์หอมที่ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือ อุปกรณ์วิทยาศาสตร์ต่าง ๆ และสถานที่สำหรับทำการวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีที่ให้ความช่วยเหลือ และแนะนำสิ่งต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณณัญญา ตะพิมพ์ สำหรับความรักและกำลังใจที่มีให้ตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ต่าง ๆ ให้แก่ข้าพเจ้า

(นาย ฉัตรชัย งามขำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า.....	4
2.1.1 Potential step voltammetry.....	4
2.1.2 Linear sweep voltammetry.....	7
2.1.3 ไชคลิก โวลแทมเมตรี.....	9
2.1.3.1 การแปรผลข้อมูล.....	11
2.1.3.2 ระบบที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้.....	12
2.1.3.3 ระบบที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ และกึ่งผันกลับได้.....	14
2.2 การตรวจวัดด้วยแอมเพอโรเมทรีในระบบชนิดไหลต่อเนื่อง.....	15
2.3 วิตามินอี.....	20
2.3.1 หน้าที่ของวิตามินอี.....	20
2.3.2 ประโยชน์ของวิตามินอี.....	21
2.3.3 ปริมาณที่แนะนำให้รับประทาน.....	22
2.3.4 ผลจากการที่ได้รับวิตามินอีน้อยเกินไป.....	23
2.3.5 ผลจากการที่ได้รับวิตามินอีมากเกินไป.....	23
2.3.6 แหล่งอาหารที่มีวิตามินอีสูง.....	23
2.3.7 ผลของการหุงต้ม.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.8 tocopherols.....	24
2.3.9 tocotrienols.....	25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 สารเคมี.....	27
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	27
3.2.1 การจัดตั้งอุปกรณ์การวิจัย.....	28
3.2.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์.....	30
3.3 การเตรียมสารละลาย.....	30
3.3.1 การเตรียม stock solution ของสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol 1000 ppm.....	30
3.3.2 การเตรียมสารละลาย α -tocopherol 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 ppm.....	30
3.3.3 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล.....	30
3.4 การดำเนินการวิจัย.....	30
3.4.1 การศึกษาไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	30
3.4.1.1 การศึกษากระแสพื้น.....	31
3.4.1.2 การศึกษา pH ที่เหมาะสม.....	31
3.4.1.3 การศึกษา scan rate ที่เหมาะสม.....	31
3.4.1.4 การศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง.....	32
3.4.2 การตรวจวัด α -tocopherol ในระบบฉีดไหลต่อเนื่องโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี.....	33
3.4.2.1 การศึกษาไฮโดรไดนามิกโวลแทมเมตรี.....	33
3.4.2.2 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย.....	33
3.4.2.3 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน.....	34
3.4.2.4 การศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์.....	35
3.4.2.5 การศึกษาความเที่ยง.....	35
3.4.2.6 การศึกษาความเสถียรภาพของขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	35
3.4.2.7 การศึกษาความแม่นยำ.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การวิเคราะห์หา α -tocopherol ในน้ำมันปาล์ม.....	36
3.4.4 การวิเคราะห์หา α -tocopherol ในน้ำมันถั่วเหลือง.....	36
3.4.5 การวิเคราะห์หา α -tocopherol ในน้ำมันรำข้าว.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	38
4.1 ไชคลิกโวลแทมเมตรี.....	38
4.1.1 การศึกษากระแสพื้น.....	38
4.1.2 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์.....	39
4.1.3 การศึกษา scan rate ที่เหมาะสม.....	40
4.1.4 การศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง.....	43
4.2 การตรวจวัด α -tocopherol ในระบบฉีดไหลต่อเนื่องโดยเทคนิคแอมเพอโรเมตรี.....	45
4.2.1 การศึกษาไฮโดรไดนามิกโวลแทมเมตรี.....	45
4.2.2 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลายเคลื่อนที่.....	46
4.2.3 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานในระบบฉีดไหลต่อเนื่อง.....	47
4.2.4 การศึกษาขีดจำกัดในการวิเคราะห์.....	48
4.2.5 ความเที่ยง.....	49
4.2.6 การศึกษาความเสถียรภาพของขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	49
4.2.7 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก ก การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์.....	57
ภาคผนวก ข การศึกษา pH ที่เหมาะสม.....	59
ภาคผนวก ค การศึกษา scan rate ที่เหมาะสม.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง การศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง.....	65
ภาคผนวก จ การศึกษาไฮโดรไดนามิกโวลเทมเมทรี.....	68
ภาคผนวก ฉ การศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย.....	72
ภาคผนวก ช การศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน.....	74
ภาคผนวก ซ การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า k และ α ของเซลล์เคมีไฟฟ้าแต่ละชนิด.....	16
2.2 ปริมาณของวิตามินอีในต้องการในแต่ละวัน.....	22
2.3 ปริมาณวิตามินอีในอาหารที่รับประทานได้ 100 กรัม.....	24
2.4 ชนิดไอโซเมอร์ของ tocotrienol.....	25
3.1 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษากระแสพื้น.....	31
3.2 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษา pH ที่เหมาะสม.....	31
3.3 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษา scan rate ที่เหมาะสม.....	32
3.4 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง.....	32
3.5 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษาไฮโดรไดนามิกโวลแทมเมตรี.....	33
3.6 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย.....	34
3.7 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน.....	34
4.1 ข้อมูลที่ได้จากการการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริก ในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate 50 mV/s ที่ได้จากขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนต์ และขั้วกลาสคาร์บอน.....	40
4.2 แสดงค่า %Recovery ของของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันปาล์มตรามรดกโดยเทคนิคแอมเพอโรเมตรีในระบบชนิดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนต์.....	51
4.3 แสดงค่า %Recovery ของของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันถั่วเหลืองตรามรดกโดยเทคนิคแอมเพอโรเมตรีในระบบชนิดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนต์.....	52
4.4 แสดงค่า %Recovery ของของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันรำข้าวตราคิงโดยเทคนิคแอมเพอโรเมตรีในระบบชนิดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนต์.....	53
ข.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมของสาร α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล scan rate 50 mV/s และ pH 1.00-4.50 ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนต์.....	61
ค.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา scan rate ของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate ต่าง ๆ ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนต์.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>ง.1 ข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ได้จากไซคลิก โวลแทมโมแกรมของ α-tocopherol ความเข้มข้นต่าง ๆ ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริก ในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate 100 mV/s ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่.....</p>	67
<p>จ.1 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่ของสารละลาย α-tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ศักย์ไฟฟ้า 0.45-0.60 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μL และอัตราเร็วในการไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1 mL/min.....</p>	70
<p>ฉ.1 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่ของ α-tocotrienol ความเข้มข้น 100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μL และ อัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่อัตราการไหลต่างๆ.....</p>	73
<p>ช.1 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่ของสารละลาย α-tocopherol ความเข้มข้น 20-100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μL และอัตราไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่อัตราการไหล 1.00 mL/min.....</p>	76
<p>ซ.1 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันปาล์มตรามรดกแบบการเติมสารมาตรฐานของสารละลาย α-tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μL และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min.....</p>	79
<p>ซ.2 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันถั่วเหลืองตรามรดกแบบการเติมสารมาตรฐานของสารละลาย α-tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μL และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min.....</p>	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- ช.3 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัด โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้า สกรีน-พริ้นท์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันรำข้าวตรากิจแบบการเดิมสารมาตรฐานของ สารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราการไหล ของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min.....

83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การให้ศักย์ไฟฟ้าใน potential step Voltammetry.....	4
2.2 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้าช่วง V_1 ถึง V_2 ของสารละลาย Fe^{3+}	5
2.3 ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในชั้นของการแพร่ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน ณ เวลาต่าง ๆ.....	5
2.3 รูปแบบการให้ศักย์ไฟฟ้าของ linear sweep voltammetry (ก) แสดงศักย์ไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ และ(ข) แสดง linear sweep voltammogram.....	7
2.5 linear sweep voltammograms ที่ scan rate ต่าง ๆ ของสารละลาย Fe^{3+}	8
2.6 การบันทึก linear sweep voltammogram โดยใช้ค่า voltage sweep rate ค่าเดียวกัน แต่มีค่าคงที่ของ reduction rate (k_{red}) ต่างกัน.....	9
2.7 การให้ศักย์ไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับเวลาของไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	10
2.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	10
2.9 การแปรผลข้อมูลของไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	11
2.10 การเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้าของ Specie.....	12
2.11 รูปลักษณะของ ไซคลิกโวลแทมโมแกรมสำหรับปฏิกิริยาเคมีของ Nernst.....	12
2.12 ลักษณะขั้วไฟฟ้าทำงานแบบต่าง ๆ ของเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง.....	18
2.13 เซลล์แบบ thin-layer ที่ใช้สำหรับเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง.....	18
2.14 รูปองค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่องที่ออกแบบโดย S.M. Lunte C.E. Lunte และ P.T. Kissinger.....	19
2.15 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ tocopherols.....	24
2.16 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ tocotrienols.....	25
3.1 เซลล์เคมีไฟฟ้าระบบชนิดไหลต่อเนื่องแบบ thin-layer.....	28
3.2 ขนาดท่อและทิศทางการไหลของสารละลายภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าระบบชนิดไหลต่อเนื่อง.....	28
3.3 ทิศทางการไหลของสารละลายในระบบชนิดไหลต่อเนื่องที่ใช้ศึกษาทางเคมีไฟฟ้า โดยเทคนิคแอมเพอโรเมตรี.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.1	เปรียบเทียบไซคลิก โวลแทมโมแกรมของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล ที่ได้จากขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ (—) และ กลาสติคาร์บอน(----) โดยใช้ scan rate 50 mV/s.....	38
4.2	พลอตค่า pH กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ได้จากสัญญาณ ไซคลิก โวลแทมโมแกรมของ สารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 1.00-4.50 ที่ได้จาก ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ (—) และกลาสติคาร์บอน(—) โดยใช้ scan rate 50 mV/s.....	39
4.3	พลอตค่า scan rate (10-500 mV/s) กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการสัญญาณ ไซคลิก โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ในสารละลาย α -tocopherol ที่ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5.....	41
4.4	พลอตค่า scan rate ^{1/2} กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการสัญญาณ ไซคลิก โวลแทมโมแกรม ของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ในสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลาย บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5.....	41
4.5	พลอตค่า scan rate (10-500 mV/s) กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการสัญญาณ ไซคลิก โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสติคาร์บอนในสารละลายสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5.....	42
4.6	พลอตค่า scan rate ^{1/2} กับค่าของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการสัญญาณ ไซคลิก โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสติคาร์บอนในสารละลาย α -tocopherol ที่ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5.....	42
4.7	พลอตค่าความเข้มข้นของ α -tocopherol (20-100 ppm) ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 กับค่า กระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณ ไซคลิก โวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ scan rate 100 mV/s.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.8 พลอตค่าความเข้มข้นของ α -tocopherol (20-100 ppm) ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสคาร์บอน scan rate 100 mV/s..... 44
- 4.9 พลอตศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณในเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm และอัตราเร็วในการไหลของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min..... 45
- 4.10 พลอตศักย์ไฟฟ้ากับค่า (S-B)/B ที่ได้จากการคำนวณสัญญาณในเทคนิคแอมเพอโร เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm และอัตราเร็วในการไหลของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min..... 46
- 4.11 การพลอตอัตราเร็วในการไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 (0.50-2.00 mL/min) กับสัญญาณที่วัดได้จากเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ของสารละลาย α -tocopherol เข้มข้น 100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L..... 47
- 4.12 พลอตค่าความเข้มข้นของ α -tocopherol (20-100 ppm) กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณในเทคนิคแอมเพอโรเมทรีของระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และใช้อัตราเร็วในการไหลของบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min..... 48
- 4.13 สัญญาณที่วัดได้จากเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ของสารละลาย α -tocopherol เข้มข้น 1 ppm และศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และใช้อัตราเร็วในการไหลของบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min..... 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 สัญญาณที่วัดได้จากเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์ของสารละลาย α -tocopherol เข้มข้น 100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และใช้อัตราเร็วในการไหลของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min จำนวน 30 ซ้ำ.....	50
4.15 กราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันปาล์ม ตรามรดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์.....	51
4.16 กราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมัน ถั่วเหลือง ตรามรดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์.....	52
4.17 กราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันรำข้าว ตราคิงโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์.....	53
ข.1 ไชคลิกโวลเทมโมแกรมที่ได้จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล scan rate 50 mV/s และ pH 1.00-4.50 ที่ปั๊มไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์.....	60
ค.1 ไชคลิกโวลเทมโมแกรมที่ได้จากการศึกษา scan rate ของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate ต่าง ๆ ที่ปั๊มไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์.....	63
ง.1 ไชคลิกโวลเทมโมแกรมของ α -tocopherol ความเข้มข้นต่าง ๆ ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate 100 mV/s ที่ปั๊มไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์.....	66
จ.1 สัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ศักย์ไฟฟ้า 0.45-0.60 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราเร็วในการไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1 mL/min....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ช.1 สัญญาณตรวจวัด โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 20-100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่อัตราการไหล 1.00 mL/min.....	75
ช.1 สัญญาณตรวจวัด โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันปาล์มตรมกรดแบบการเติมสารมาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min.....	78
ช.2 สัญญาณตรวจวัด โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันถั่วเหลืองตรมกรดแบบการเติมสารมาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min.....	80
ช.3 สัญญาณตรวจวัด โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันรำข้าวตราคิงแบบการเติมสารมาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min.....	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

หลายปีมานี้ สารต้านอนุมูลอิสระเริ่มเป็นที่รู้จักกันมากขึ้นจากการขายผลิตภัณฑ์เสริมอาหารทางสื่อต่างๆ เนื่องจากประโยชน์ของสารต้านอนุมูลอิสระนั้นมีมากมายและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้ เช่น ในเรื่องของการช่วยชะลอการเกิดริ้วรอยเหี่ยวย่นบนใบหน้าและส่วนอื่นๆ ของร่างกาย ช่วยลดความเสี่ยงเกี่ยวกับโรคทางประสาท ระบบภูมิคุ้มกัน การเกิดโรคหัวใจ และช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง ทั้งนี้เนื่องมาจากคนในยุคปัจจุบันมีพฤติกรรมบริโภคอาหารที่ให้พลังงานสูงและไม่นิยมออกกำลังกาย ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักของการเพิ่มความเครียดต่อการเป็นหัวใจและโรคมะเร็งต่างๆ

ในโมเลกุลของสารเคมีจะมีอิเล็กตรอนอยู่เป็นคู่ แต่เมื่ออิเล็กตรอนได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าก็อาจแปรเปลี่ยนจนเกิดการแยกคู่ได้ โดยสิ่งเร้าที่ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการแยกออกจากกันได้เช่น มลพิษในอากาศ, แสง, ความร้อน หรือพลังงานอื่นๆ, การออกกำลังกายอย่างหักโหม, ยาบางชนิด เช่น ดอกโซรูบิซิน, เพนิซิลลามิน, พาราเซตามอล และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ซึ่งเป็นผลให้โมเลกุลมีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่ อิเล็กตรอนที่เกิดการแยกออกจากกันนี้ทำให้โมเลกุลถูกเรียกว่า **อนุมูลอิสระ** ซึ่งมีอายุสั้นมาก ประมาณ 10^{-10} - 10^{-3} วินาที มีความว่องไวต่อการดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลข้างเคียง ทำให้โมเลกุลที่ถูกดึงอิเล็กตรอนไปกลายเป็นอนุมูลอิสระ และจะไปดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงต่อๆ กันไปกลายเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่

การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระในร่างกาย เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายแก่เซลล์ของอวัยวะในร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผนังเซลล์ ส่งผลให้เซลล์ตายหรือทำงานไม่ได้ จนอาจถึงขั้นเกิดเป็นเซลล์มะเร็ง อนุมูลอิสระจึงเป็นสารพิษต่อเซลล์ ถ้ามีมากในเซลล์ก็เป็นอันตรายได้ โดยจะเข้าทำลายดีเอ็นเอ เยื่อหุ้มเซลล์ แต่เซลล์เม็ดเลือดขาวจะใช้อนุมูลอิสระในการกำจัดแบคทีเรีย หลังจากเซลล์กินแบคทีเรียเข้าไปในเซลล์แล้ว ซึ่งการทำลายโมเลกุลที่เป็นต้นเหตุของการเกิดอนุมูลอิสระ นับเป็นกลไกการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญกลไกหนึ่ง ซึ่งเป็นการทำงานที่อาศัยเอนไซม์หรือไม่ก็ได้

สารต้านอนุมูลอิสระที่พบในร่างกายและจัดเป็นเอนไซม์ ได้แก่ Superoxide dismutase, Catalase, Glutathione peroxidase, Glutathione reductase และ Glutathione S-transferase

สารต้านอนุมูลอิสระที่พบในร่างกายและไม่จัดเป็นเอนไซม์ ได้แก่ Glutathione, Lipoic acid, Ceruloplasmin, Albumin, Transferrin, Haptoglobin, Hemopexin, Uric acid, Bilirubin และ Cysteine

สารต้านอนุมูลอิสระที่พบในอาหารและไม่จัดเป็นเอนไซม์ ได้แก่ Vitamin E, Carotenoids, Ascorbic acid, Steroids, Ubiquinones, Thiols, Inosine และ Taurine

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินอีในน้ำมันพืชที่ผลิตจากโรงงานด้วยความถูกต้อง และความรวดเร็วของการวิเคราะห์ เพื่อให้ น้ำมันพืชที่ผลิตได้มาตรฐานตามสำนักงานคณะกรรมการอาหาร และยา กำหนด โดยอาศัยองค์ประกอบต่างๆ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง เช่น เทคนิคในการวิเคราะห์ สารเคมี เครื่องมือวิเคราะห์ และความจำเพาะในการวิเคราะห์ เป็นต้น ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์โดยทั่วไป สิ่งที่ได้กล่าวมานี้เป็นผลทำให้เกิดข้อจำกัดหลายประการในการวิเคราะห์ เช่น เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์บางเครื่องมีราคาสูงเป็นการยากที่โรงงานผลิตจัดหามาใช้งาน มีความจำเพาะต่อสารที่วิเคราะห์ต่ำ ทำให้ความถูกต้องในการวิเคราะห์น้อย ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน เครื่องมือมีความซับซ้อน ผู้ทำการวิเคราะห์ต้องมีความชำนาญ และความชำนาญสูง อายุการใช้งานของอุปกรณ์บางชิ้นส่วนสั้น และสิ่งที่สำคัญเครื่องมือเหล่านั้นต้องนำเข้าจากต่างประเทศทำให้ประเทศไทยต้องเสียดุลการค้า เมื่อเครื่องมือเกิดการชำรุดหรือเสียหาย อันเนื่องมาจากการใช้งาน ผู้ใช้ไม่สามารถทำการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมได้ จำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญเฉพาะด้านในการซ่อม หรือต้องส่งซ่อมยังต่างประเทศต้องใช้ระยะเวลาซ่อมนาน จึงเป็นปัญหาที่สำคัญของโรงงานที่ผลิต และหน่วยงานที่รับผิดชอบ จากปัญหาต่างๆ ที่พบ จึงเป็นประเด็นสำคัญของการศึกษา และพัฒนาเครื่องมือทางเคมีวิเคราะห์ในครั้งนี้ เพื่อให้เป็นเครื่องมือที่มีความจำเพาะต่อวิตามินอีที่วิเคราะห์ ใช้ปริมาณสารเคมีในการวิเคราะห์น้อย ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์สั้น และเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างได้โดยใช้วัสดุภายในประเทศลดการนำเข้าอุปกรณ์ และเครื่องมือจากต่างประเทศ

เทคนิคในการวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินอีมีหลายเทคนิคด้วยกัน เทคนิคหนึ่งที่ได้รับค่านิยมใช้ คือ เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical techniques) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะสูงมาก อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความซับซ้อนน้อย ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญที่สุด คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สามารถสร้าง และพัฒนาใช้ในห้องปฏิบัติการได้ จึงเป็นประเด็นสำคัญของการนำเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของวิตามินอี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้างขั้วไฟฟ้าทำงานสกรีน-พริ้นท์ สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าในระบบชนิดไหลต่อเนื่อง
2. ศึกษาการนำขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ α -tocopherol
3. พัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าให้ใช้ร่วมกับระบบชนิดไหล เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ α -tocopherol

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. สร้างขั้วไฟฟ้าทำงานสกรีน-พริ้นท์ สำหรับการวิเคราะห์โดยเทคนิคเคมีไฟฟ้าในระบบชนิดไหลต่อเนื่อง
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในเทคนิคทางไซคลิกโวลเทมเมทรี และเทคนิคแอมเพอโรเมทรีเพื่อใช้ในการตรวจวัด α -tocopherol
3. ศึกษาการนำขั้วไฟฟ้าทำงานที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณ α -tocopherol โดยใช้เทคนิคทางแอมเพอโรเมทรีในระบบชนิดไหลต่อเนื่อง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างขั้วไฟฟ้าใช้งานที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ปริมาณสาร และราคาถูก
2. สามารถนำขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ทำมาได้ มาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า
3. สามารถวิเคราะห์หาปริมาณของ α -tocopherol ที่มีราคาถูก ใช้งานง่าย สะดวก และใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่น้อย
4. เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการนำขั้วไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สารในกลุ่มต่าง ๆ ต่อไป

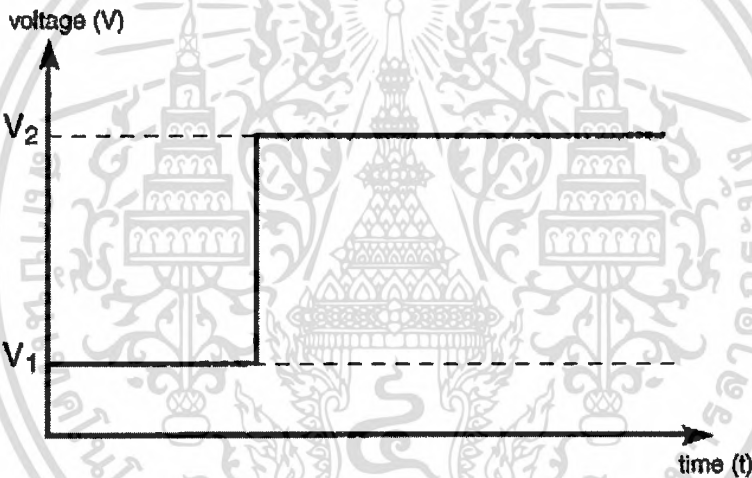
บทที่ 2

ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

2.1.1 Potential step voltammetry [1]

เป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงานในระบบสารละลายอยู่นิ่ง โดยให้ศักย์ไฟฟ้าจาก V_1 ถึง V_2 ดังรูปที่ 2.1

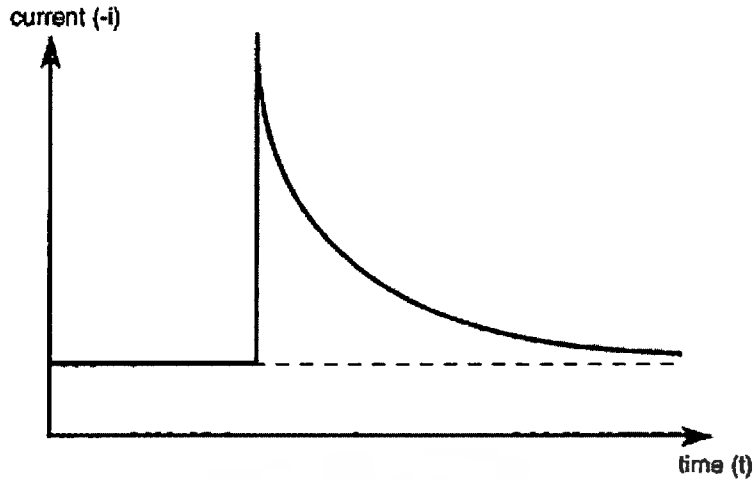


รูปที่ 2.1 การให้ศักย์ไฟฟ้าใน potential step Voltammetry [1]

โดยพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาของ Fe^{3+}

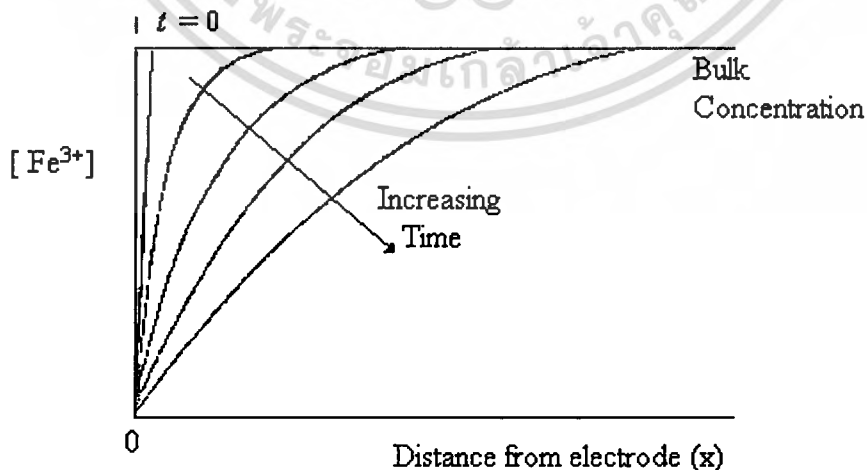


การให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง V_1 ถึง V_2 โดยที่ศักย์ไฟฟ้า V_1 คงที่ Fe^{3+} ไม่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนศักย์ไฟฟ้า V_2 คงที่เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชันภายใต้สภาวะนี้ จะเกิดสัญญาณกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ให้ศักย์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่ได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้าช่วง V_1 ถึง V_2 ของสารละลาย Fe^{3+} [1]

จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ V_2 จะเกิดสัญญาณกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งศักย์ไฟฟ้า V_2 เป็นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาของ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า V_2 ต่อเนื่องไป Fe^{3+} ที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานจะลดลงทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในชั้นการแพร่ โดยอัตราการแพร่จะถูกควบคุมด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นในชั้นการแพร่กับความเข้มข้นของสารละลาย bulk ดังนั้นจะเกิดการแพร่ของ Fe^{3+} มาสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน การแพร่นี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับค่า diffusion flux เช่น ที่ระยะเวลาเวลาสั้น ๆ ค่าของ diffusion flux จะมีค่าสูงทำให้ระยะห่างของชั้นการแพร่กับความเข้มข้นของ bulk มีระยะห่างน้อย ถ้ายังคงให้เกิดปฏิกิริยา อิเล็กโทรไลซิสโดยให้ศักย์ไฟฟ้า V_2 ต่อไปจะทำให้ความเข้มข้นที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานลดลง และส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.3 ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในชั้นของการแพร่ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน ณ เวลาต่างๆ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นในชั้นการแพร่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน ณ เวลาต่าง ๆ ความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในชั้นการแพร่จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ณ เวลาต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.2 และใช้สมการที่ (2.2-2.5) ในการอธิบาย

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Fe^{3+} เทียบกับเวลา จะสามารถอธิบายได้ว่าความเข้มข้นของ Fe^{3+} จะแปรผกผันกับเวลาที่เพิ่มขึ้น และแปรผกผันกับระยะห่างในชั้นการแพร่ดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$$\frac{\delta [Fe^{3+}]}{\delta t} = D_{Fe^{3+}} \left(\frac{\delta^2 [Fe^{3+}]}{\delta x^2} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ x คือระยะห่างระยะห่างจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน

เมื่อพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าของการเกิดอิเล็กโทรไลซิสในปฏิกิริยารีดักชันแล้วจะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$i_c = -nFAk_{red} [Fe^{3+}]_{surface} \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในสารละลาย bulk แล้วพบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของ Fe^{3+} ในสารละลาย bulk โดยเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลในเทอมของ flux โดยใช้สมการที่ (2.4) ในการอธิบาย

$$|i_c| = nFAk_{red} [Reactant]_{bulk} \left(\frac{D}{\pi t} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

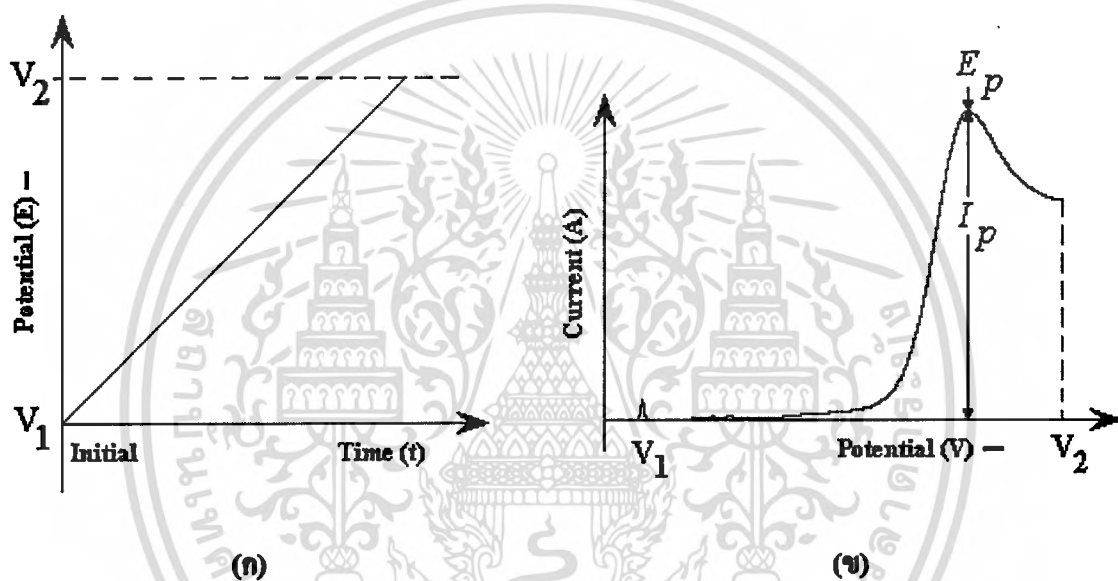
และเมื่อพิจารณาสมการที่ (2.4) พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นฟังก์ชันแปรผกผันกับรากที่สองของเวลา (\sqrt{t}) ดังแสดงในสมการที่ (2.5)

$$i \text{ vs. } \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (2.5)$$

2.1.2 Linear sweep voltammetry [1]

เป็นเทคนิคที่กำหนดช่วงศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าจาก V_1 ถึง V_2 ในลักษณะที่เป็นเส้นตรงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้าทำงานจะเพิ่มตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยค่าอัตราศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามเวลาเรียกว่าค่า scan rate ซึ่งสามารถคำนวณจากค่าความชันของการให้ศักย์ไฟฟ้า

ในการบันทึกโวลแทมโมแกรมสามารถบอกคุณสมบัติของสารได้ คือ (1) อัตราเร็วของการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยา (2) ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า และ (3) บอกระยะศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้ scan rate ค่าหนึ่ง ๆ



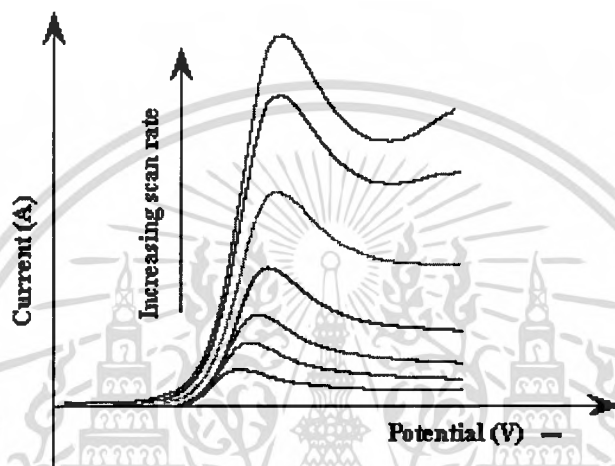
รูปที่ 2.4 รูปแบบการให้ศักย์ไฟฟ้าของ linear sweep voltammetry (ก) แสดงศักย์ไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ และ(ข) แสดง linear sweep voltammogram [1]

การวัดกระแสไฟฟ้าของ linear sweep voltammetry จะเป็นการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้ ยกตัวอย่างเช่นในการเกิดปฏิกิริยาของ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ($Fe^{3+} + e^- \longrightarrow Fe^{2+}$) โดยให้ scan rate คงที่ค่าเดียวตลอดการทดลอง ดังรูป 2.4 (A) และทำการพลอตค่ากระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าจากซ้ายไปขวา ค่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้า และให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด หลังจากนั้นก็ลดลง ซึ่งศักย์ไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดคือศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาจาก Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ณ กระแสไฟฟ้าสูงสุดนั้นจะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เร็วมากเมื่อเทียบกับค่า voltage sweep rate ดังนั้นบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานจะเกิดสมดุลไดนามิกเกิดขึ้น ซึ่งเราเรียกว่าสมดุลเคมีไฟฟ้าโดยใช้สมการสมดุลของ Nernst ในการอธิบาย ดังแสดงในสมการที่ (2.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}]} \right) \quad (2.6)$$

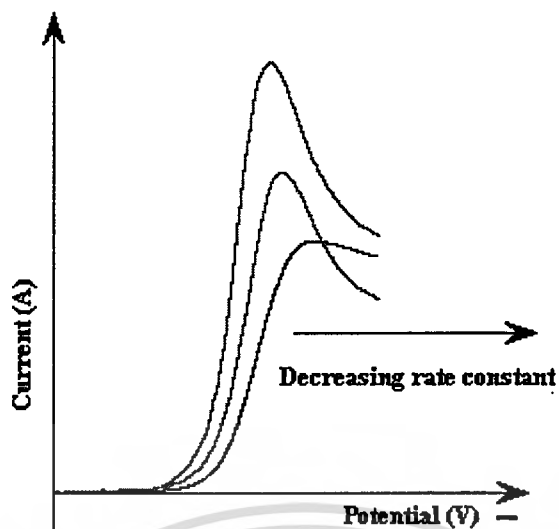
จากสมการที่ (2.6) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้น Fe^{3+}/Fe^{2+} กับศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ (E) และ E° เป็นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน โดยตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าที่สมดุลจะเกิดการเลื่อนไปตาม E°



รูปที่ 2.5 linear sweep voltammograms ที่ scan rate ต่าง ๆ ของสารละลาย Fe^{3+}

รูปที่ 2.5 แสดง linear sweep voltammogram ที่ scan rates ต่าง ๆ ของสารละลาย Fe^{3+} พบว่า ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามค่า scan rate ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดของ diffusion layer ที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานแล้วจะเห็นว่า ค่าของ diffusion layer จะแปรผันตรงกับค่า scan rate เมื่อค่า scan rate มีค่ามากขึ้น ค่าของ diffusion layer สูงขึ้นตาม เป็นผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานได้เร็วมากขึ้นส่งผลทำให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น

ในกรณีที่ปฏิกิริยาเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเร็ว ปฏิกิริยานั้นจะเป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ และในกรณีที่ปฏิกิริยามีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนช้าจะเกิดปฏิกิริยาแบบกึ่งย้อนกลับหรือแบบย้อนกลับไม่ได้

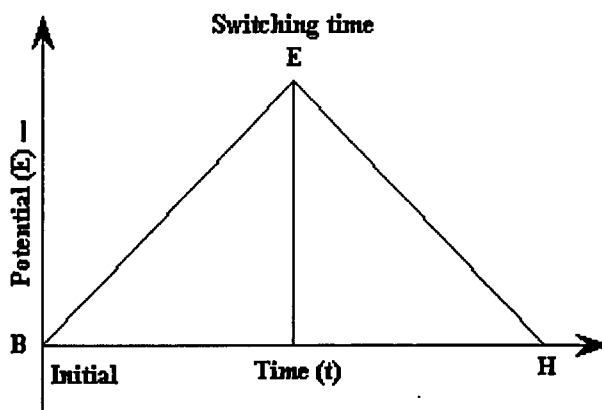


รูปที่ 2.6 การบันทึก linear sweep voltammogram โดยใช้ค่า voltage sweep rate ค่าเดียวกัน แต่มีค่าคงที่ของ reduction rate (k_{red}) ต่างกัน

รูปที่ 2.6 แสดงผลการให้ voltage sweep rate คงที่ค่าเดียว แต่มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (k_{red}) ต่างกัน จะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่างกัน และตำแหน่งของ E_p เลื่อนตำแหน่งไป และเมื่อค่าของ k_{red} สูงปริมาณกระแสไฟฟ้าก็จะสูงด้วย

2.1.3 ไชคลิกโวลแทมเมทรี [2, 3]

ไชคลิกโวลแทมเมทรีเป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าในลักษณะสามเหลี่ยมหน้าจั่วแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน ดังแสดงตามรูปที่ 2.7 ซึ่งพัฒนาโดย Nicholson และ Shain [2] เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสารบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน ตลอดจนใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าอื่น ๆ ต่อไป การบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยจะทำการพลอตค่ากระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าไชคลิกโวลแทมโมแกรม (cyclic voltammogram) ดังรูปที่ 2.8

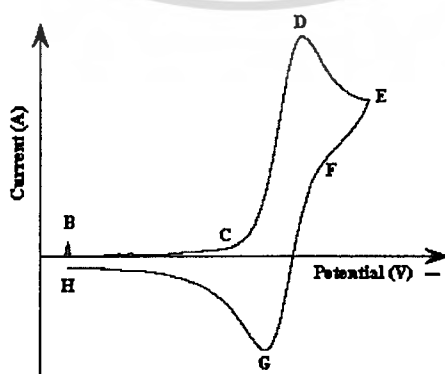


รูปที่ 2.7 การให้ศักย์ไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับเวลาของไซคลิกโวลแทมเมตรี

การให้ศักย์ไฟฟ้าในไซคลิกโวลแทมเมตรีจะเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าตามค่า scan rate เมื่อเทียบกับเวลาจนถึงจุดสูงสุดและลดศักย์ไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามด้วย scan rate เดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุไฟฟ้าทำงานกับเวลา ณ จุดต่างๆ ตามความสัมพันธ์สมการที่ (2.7)

$$V = \frac{dE}{dt} \quad (2.7)$$

การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในเคมีไฟฟ้า เช่นการให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางที่เป็นลบแก่วัสดุไฟฟ้าทำงาน สารที่อยู่ในรูปของออกซิไดซ์ตอนเริ่มแรกของการให้ศักย์ไฟฟ้ายังไม่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จนกระทั่งให้ศักย์ไฟฟ้าใกล้จะถึง E^0 จะเริ่มเกิดกระแสแคโทดิกเกิดขึ้น ($O + e^- \rightarrow R$) จนกระทั่งมีการให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางย้อนกลับจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ($R \rightarrow e^- + O$) และให้กระแสแอโนดิก



รูปที่ 2.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม

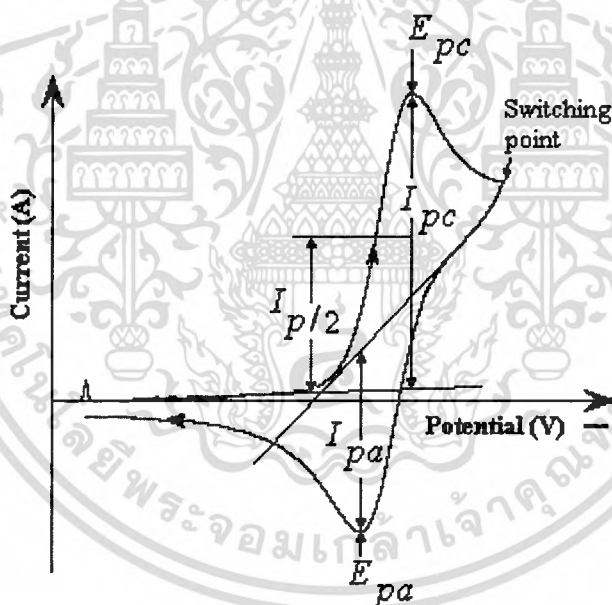
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 สามารถแสดงตำแหน่งใน ไซคลิก โวลแทม โมแกรมของการเกิดปฏิกิริยาที่ ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ

- B เป็นจุดเริ่มการให้ศักย์ไฟฟ้า
- C เป็นจุดที่เริ่มเกิดปฏิกิริยารีดักชัน
- D เป็นพีกแอโนดิก
- E เป็นจุดที่เปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าในทิศทางบวก
- F เป็นจุดที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- D เป็นพีกแคโทดิก
- H เป็นจุดสิ้นสุดการให้ศักย์ไฟฟ้า

2.1.3.1 การแปรผลข้อมูล

การแปรผลข้อมูลของ ไซคลิก โวลแทม โมแกรมจะแปรผลเพื่อหาค่าของศักย์ไฟฟ้า ที่ให้จากค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งพัฒนา โดย Nicholson และ Shain [2]

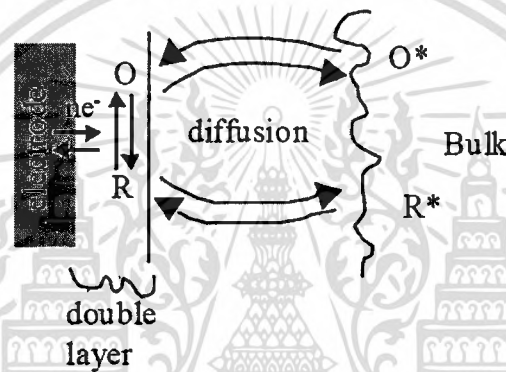


รูปที่ 2.9 การแปรผลข้อมูลของ ไซคลิก โวลแทม โมแกรม

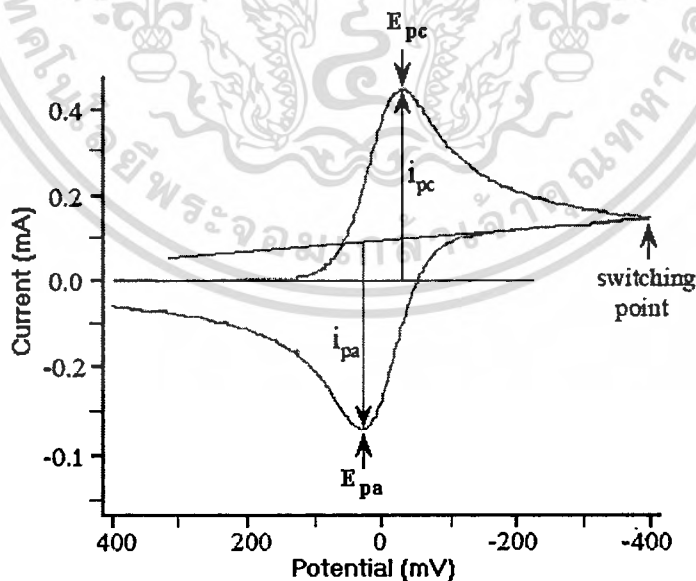
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 ระบบที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ [3]

ในระบบที่เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (reversible reaction) จะต้องเป็นระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็ว ตามรูปที่ 2.10 แสดงปฏิกิริยาของสารออกซิไดซ์ที่อยู่ในรูป O รับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนอยู่ในรูป R และเกิดการแพร่ของของสารในชั้นการแพร่ของสารละลาย กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่นี้ เรียกว่ากระแสแคโทดิก (cathodic current) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เรียกว่า ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามจะเกิดปฏิกิริยาของสารรีดิวส์ (reduced) ที่อยู่ในรูปของ R ให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนไปเป็น O กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่นี้เรียกว่ากระแสแอโนดิก (anodic current) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation)



รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้าของ Specie [4]



รูปที่ 2.11 รูปลักษณะของ ไซคลิกโวลแทมโมแกรมสำหรับปฏิกิริยาเคมีของ Nernst

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ จากการให้ศักย์ไฟฟ้าตามรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถใช้สมการของ Randles-Sevcik อธิบายดังแสดงในสมการที่ (2.8)

$$i_p = (2.69 \times 10^5) n^{3/2} A C D^{1/2} \nu^{1/2} \quad (2.8)$$

เมื่อค่า	n	คือ จำนวนของอิเล็กตรอน
	A	คือ พื้นที่ของอิเล็กโทรดในการเกิดปฏิกิริยา (cm^2)
	C	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (mol/cm^3)
	D	คือ diffusion coefficient (cm^2/s)
	ν	คือ scan rate (V/s)

เงื่อนไขการพิจารณาของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ผันกลับได้ของ Nernst สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. การแยกกันของ $\Delta E_p = (E_{pa} - E_{pc})$ ต้องมีค่าแตกต่างกันเป็น $\Delta E_p = 59/n \text{ mV}$ ที่ 25°C
2. ค่าของ E_p ไม่ขึ้นนั้นอยู่กับ scan rate
3. i_p นั้นจะเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับค่า $\nu^{1/2}$
4. อัตราส่วนของพีค $\frac{i_{pa}}{i_{pc}}$ ต้องมีค่าเท่ากับ 1 ทุก scan rate
5. ค่าของ $E^o = \frac{(E_{p,a} + E_{p,c})}{2}$
6. ค่าของ $E_{p/2} = E_{1/2} \pm \frac{0.028}{n} \text{ V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 ระบบที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ และกึ่งผันกลับได้ [2, 3, 4, 5]

ในกระบวนการที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ (Irreversible reaction) จะมีการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอนในการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าทำให้เกิดพีกเดี่ยว และเกิดการเลื่อนของศักย์ไฟฟ้า โดยการเลื่อนของศักย์ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับค่า scan rate ที่ใช้ สามารถใช้สมการที่ (2.9) ในการอธิบาย

$$E_p = E^\circ + \left(\frac{RT}{\alpha n_a F} \right) \left[-0.78 + \ln \left(\frac{k^\circ}{D^{1/2}} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\alpha n_a F v}{RT} \right)^{1/2} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ α คือ transfer coefficient

k° คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาการเคลื่อนที่อิเล็กตรอน (heterogeneous rate)

n_a คือจำนวนอิเล็กตรอนในขั้นตอนการกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการอิเล็กโทรด (the number of electrons in the rate-determination step of electrode process)

E_p คือค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีกระแสสูงสุด

ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าของพีก (peak potential) (E_p) และค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งพีก (half-peak potential) ($E_{p/2}$) ที่ 25 °C จะแตกต่างกันเท่ากับ $|E_p - E_{p/2}| = \frac{1.857 RT}{\alpha F} = \frac{47.7}{\alpha} \text{ mV}$ และปริมาณกระแสไฟฟ้าสามารถใช้สมการที่ (2.9) ในการอธิบาย

$$i_p = (2.99 \times 10^5) n (\alpha n_a)^{1/2} A C D^{1/2} v^{1/2} \quad (2.10)$$

ค่าปริมาณกระแสจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มข้นสารละลาย แต่ปริมาณกระแสที่เกิดจากการให้ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางย้อนกลับจะลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ α เช่น ถ้าค่าของ $\alpha = 0.5$ อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าในปฏิกิริยาผันกลับได้หารด้วยกระแสในปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ (reversible/irreversible) จะมีค่าเท่ากับ 1.27 ซึ่งค่าของกระแสไฟฟ้าในปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ จะมีค่าเป็น 80% ของกระแสไฟฟ้าในปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ส่วนในกรณีปฏิกิริยากึ่งผันกลับได้ค่า k° จะอยู่ระหว่าง $10^{-5} - 10^{-1} \text{ cm/s}$ ปริมาณของกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยความเร็วในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน และการเคลื่อนที่ของมวล รูปร่างของไซคลิกโวลแทมโมแกรมจะเป็นฟังก์ชันของ $k^\circ / \sqrt{\pi a D}$ (เมื่อ $a = n F v / RT$) เมื่ออัตราส่วนของ $k^\circ / \sqrt{\pi a D}$ มีค่าเพิ่มขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ ถ้าอัตราส่วนมีค่าลดลงจะเป็นปฏิกิริยาที่ย้อนกลับไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การตรวจวัดด้วยแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่อง [6, 7, 8]

เป็นวิธีการทางเคมีไฟฟ้าใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ในระบบฉีดไหล (FIA) เพื่อใช้ตรวจวัดปริมาณสารเคมี และโดยใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์สั้น เริ่มเกิดขึ้นในกลางปี ค.ศ. 1970 ใช้หลักการทาง electrochemical voltammetry (อาศัยหลักที่ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสาร) กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการแพร่ (diffusion) และการนำพาไอออน (convection) ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของสารที่ทำการวิเคราะห์เรียกกระบวนการนี้ว่าไฮโดรไดนามิกโวลแทมเมทรี (hydrodynamic voltammetry) ในสถานะที่ทำการวิเคราะห์ต้องมีการเคลื่อนที่ของสารละลายอยู่ตลอดเวลา และเกิด polarizing ขึ้น ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดประกอบด้วยขั้วหลัก 3 ขั้วคือ

1. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode)
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode)
3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (auxiliary electrode)

การตรวจวัดในแอมเพอโรเมทรีเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ และวัดปริมาณกระแสจำกัดหรือกระแสสูงสุด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานะไฮโดรไดนามิกที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน ในการอธิบายปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดขั้วของแข็งในระบบไหลต่อเนื่อง สามารถอธิบายได้ดังสมการ (2.11-2.13)

$$i_l = knFD(Sc)^{1/3} \omega (Re_x)^\alpha \quad (2.11)$$

$$Sc = \nu D^{-1} \quad (2.12)$$

$$Re_x = \nu l \nu^{-1} \quad (2.13)$$

เมื่อ	Sc	คือ Schmidt number
	ν	คือ kinematic viscosity
	Re_x	คือ modified Reynold number
	ν	คือ ค่าเฉลี่ย linear velocity ของสารละลาย
	l	คือ ความยาวของขั้วไฟฟ้าทำงาน

ตารางที่ 2.1 ค่า k และ α ของเซลล์เคมีไฟฟ้าแต่ละชนิด

ชนิดของเซลล์	ค่า k	α
Tubular	8.0	$l^{2/3} r^{2/3}$ (0.33)
Thin-layer	0.8	b (0.5)
Wall-jet	0.5	a (0.75)

เมื่อ l คือ ความยาว

r คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของขั้วไฟฟ้าทำงานแบบท่อ

b คือ ความสูงของขั้วไฟฟ้าทำงานแบบ thin-layer

a คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสารละลายไหลเข้าในเซลล์แบบ wall-jet

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสสูงสุดหรือ flow injection peak (i_p) กับปริมาณของกระแสที่มีการไหลของสารละลายภายใต้สภาวะ steady-state (i_{ss}) สามารถใช้สมการที่ (2.14) ในอธิบาย

$$i_p = i_{ss} \left[\frac{3.4V_s}{\pi a^2} \right] \left[\frac{D}{v_f} (0.5V_s + V_R) \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

เมื่อ V_s คือ ปริมาตรสารตัวอย่างที่ฉีดเข้าสู่ระบบชนิดไหล

a คือ รัศมีของท่อในระบบชนิดไหล

v_f คือ อัตราการไหลของสารละลายในระบบชนิดไหล

V_R คือ ปริมาตรภายในเซลล์ที่เกิดปฏิกิริยา

ในสภาวะแอมเพอโรเมตริกที่มีการเคลื่อนที่ของสารละลายตลอดเวลานั้น ทำให้ความหนาของชั้น boundary ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงานลดลง เป็นผลให้วัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้น และจะมีค่ามากขึ้นตามอัตราการไหลของสารละลายในระบบชนิดไหลต่อเนื่อง ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้สมการที่ (2.11)

ในการหาค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการใช้เซลล์แบบต่าง ๆ ดังได้แสดงในสมการที่ (2.15-2.18) และแสดงลักษณะของขั้วไฟฟ้าทำงานแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.12

Tubular

$$i = 1.61nFC \left(\frac{DA}{r} \right)^{2/3} \nu^{1/3} \quad (2.15)$$

Planar (parallel flow in channel)

$$i = 1.47nFC \left(\frac{DA}{r} \right)^{2/3} \nu^{1/3} \quad (2.16)$$

Planar (perpendicular flow)

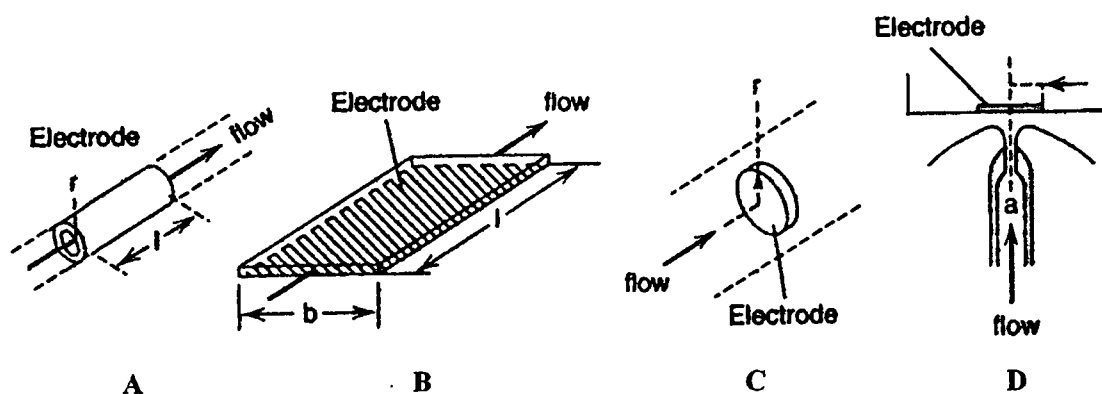
$$i = 0.903nFCD^{2/3} \nu^{-1/6} A^{3/4} U^{1/2} \quad (2.17)$$

Wall-jet

$$i = 0.898nFCD^{2/3} \nu^{-5/12} a^{-1/2} A^{3/8} \nu^{3/4} \quad (2.18)$$

เมื่อ

- a คือเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ไหลเข้าของเซลล์แบบ wall-jet
- A คือพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าทำงาน (cm^2)
- b คือความสูงของท่อ
- C คือความเข้มข้นของสารละลาย (mol/cm^3)
- D คือ diffusion coefficient (cm^2/s)
- ν คือ kinematic viscosity
- r คือรัศมีของอิเล็กโทรดแบบท่อ
- ν คือค่าเฉลี่ยอัตราเร็วในการไหล (cm^3/s)
- U คือความหนืดในการไหล (cm/s)



รูปที่ 2.12 ลักษณะขั้วไฟฟ้าทำงานแบบต่าง ๆ ของเซลล์เคมีไฟฟ้าในระบบชนิดไหลต่อเนื่อง [5]

A คือ tubular electrode

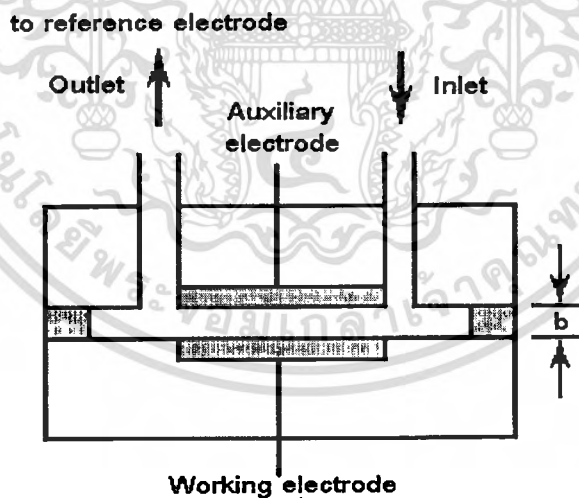
B คือ planar electrode (parallel flow in channel)

C คือ planar electrode (perpendicular flow)

D คือ wall-jet electrode

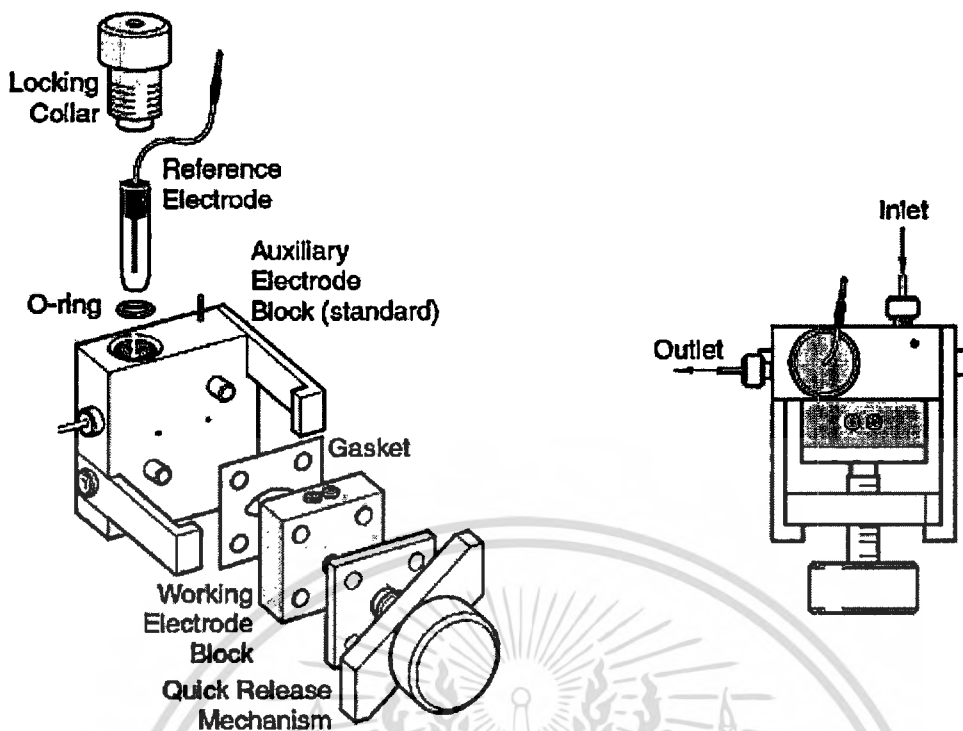
เซลล์เคมีไฟฟ้าในระบบชนิดไหลต่อเนื่องแบบ thin-layer ที่ออกแบบโดย S.M. Lunte C.E.

Lunte และ P.T. Kissinger มีลักษณะตามรูปที่ 2.13-2.14



รูปที่ 2.13 เซลล์แบบ thin-layer ที่ใช้สำหรับเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 รูปองค์ประกอบของเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่องที่ออกแบบโดย S.M. Lunte C.E. Lunte และ P.T. Kissinger [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วิตามินอี

ในปี ค.ศ. 1920 มีผู้สังเกตว่าหนูที่กินนมวัวอย่างเดียวไม่สามารถสืบพันธุ์ได้ตามปกติ ใน 2-3 ปีต่อมา มีผู้ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอาหารและการสืบพันธุ์ พบว่าน้ำมันพืชโดยเฉพาะ น้ำมันที่สกัดจากจมูกข้าวสาลี (wheat germ oil) มีสารประกอบซึ่งช่วยให้สัตว์สืบพันธุ์ได้ตามปกติ ดังนั้นจึงได้ทำการแยกหรือสกัดสารนี้จากน้ำมันดังกล่าวในปี ค.ศ.1936 และให้ชื่อว่า **วิตามินอี**

วิตามินอีเป็นสารพวกแอลกอฮอล์ไม่อิ่มตัว ซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างออกได้เป็น 2 ชนิด คือ tocopherols และ tocotrienols เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญในร่างกาย ร่างกายไม่สามารถสร้างขึ้นได้ วิตามินอีที่บริสุทธิ์จะมีสีเหลืองอ่อนค่อนข้างเหนียวเหมือนน้ำมัน สามารถละลายได้ในไขมันและตัวทำละลายไขมัน ทนความร้อนได้สูงถึง 200 องศาเซลเซียส ทนต่อกรด แต่ถูกทำลายได้ง่ายในด่าง และในรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นสารที่สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้รวดเร็ว จึงใช้เป็นสารกันการเติมออกซิเจน (antioxidant) หรือใช้ป้องกันไม่ให้ไขมันเหม็นหืนและไม่ให้วิตามินเอและวิตามินซีสลายตัว

เมื่อร่างกายได้รับวิตามินอีพร้อมกับอาหาร วิตามินอีจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายที่ผนังลำไส้เล็กพร้อมกับไขมันและวิตามินที่ละลายในไขมันอื่นๆ เช่น วิตามินเอ, วิตามินดี และวิตามินเค ปกติเมื่อร่างกายได้รับวิตามินอีแล้วจะเก็บสะสมไว้ในไขมันในร่างกาย แต่พบว่าคนที่รับประทานกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids) หรือฮอร์โมนเอสโตรเจน เช่น ยาเม็ดคุมกำเนิด (contraceptive pill) จะมีผลทำให้วิตามินอีที่สะสมในร่างกายถูกขับออกมา จนอาจทำให้เกิดภาวะขาดวิตามินอีได้

2.3.1 หน้าที่ของวิตามินอี

ในปัจจุบันวิตามินอีเป็นที่ยอมรับ โดยทั่วไปว่าเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันรักษาสุขภาพ รักษาความคงทนของเนื้อเยื่อและเซลล์ของร่างกาย เนื้อเยื่อของร่างกายประกอบด้วยสารจำพวกฟอสโฟลิปิด (ไขมันชนิดหนึ่ง) กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว แรงยึดเหนี่ยวของกรดไขมันชนิดนี้ถูกออกซิเจนทำลายได้โดยง่าย ทำให้เซลล์ของร่างกายสูญเสียความคงทน และสลายตัวกลายเป็นกรดไขมันชนิดใหม่ซึ่งเป็นอันตรายต่อเซลล์ของร่างกาย กรดไขมันที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ของร่างกายนี้เป็นพวกสารเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยก็ขึ้นกับปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในเนื้อเยื่อ ตัวอย่างการเกิดสารเปอร์ออกไซด์ทั่วไปคือ เนยและน้ำมันพืชที่มีกลิ่นเหม็นหืน วิตามินอีจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวของกรดไขมันนี้ โดยผ่านกระบวนการทางเอนไซม์อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นทั้งภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ของร่างกายเป็นสารที่ไม่อยู่ตัว สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้รวดเร็ว อนุมูลอิสระหรือที่เรียกว่าอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์สามารถผลิตขึ้นได้ในเซลล์ของร่างกายด้วยวิธีออกซิโคซ์ตัวมันเอง หรือผ่านกระบวนการทางเอนไซม์ สารเหล่านี้เป็นพิษต่อเซลล์ของร่างกาย ทำให้เซลล์สูญเสียความคงทน แต่ก็มีประโยชน์อยู่

บ้าง เช่น เม็ดเลือดขาวในร่างกายใช้สารนี้ทำลายเชื้อโรคและตอบสนองต่อการอักเสบ อย่างไรก็ตาม ถ้าเกิดสารนี้มากเกินไปโดยไม่มีการควบคุม ก็จะทำลายเนื้อเยื่อและดีเอ็นเอให้เสื่อมสลายได้

2.3.2 ประโยชน์ของวิตามินอี

วิตามินอีเป็นสารด้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีมาก ให้ผลในการป้องกันการทำลายเซลล์ หรือลดความเสื่อมของอวัยวะต่างๆ ที่มีสาเหตุมาจากอนุมูลอิสระ (free radical)

นักวิทยาศาสตร์พบว่า การรับประทานไขมัน โดยเฉพาะชนิดที่มีการเติมสารไฮโดรเจน (hydrogenated oil) เพื่อเปลี่ยนกรดไขมันไม่อิ่มตัวให้เป็นกรดไขมันอิ่มตัว และการรับประทานไขมันที่มีกลิ่นเหม็นหืน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระจากกรดไขมันดังกล่าวในร่างกายจำนวนมาก ชั้นอนุมูลอิสระนี้จะมีผลทำให้เนื้อเยื่อระคายเคืองและ โคนทำลาย ก่อให้เกิดอาการอักเสบเรื้อรังตามมา ซึ่งมักเกิดกับเซลล์ผนังหลอดเลือด มีผลทำให้เกิดภาวะผนังหลอดเลือดแข็งตัว โรคหัวใจ ภาวะความดันโลหิตสูง ภาวะปวดอักเสบข้อ ความแก่ และภาวะมะเร็งตามมาได้ในระยะยาว ดังนั้นการรับประทานวิตามินอีก็จะสามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อภาวะดังกล่าวได้

มีรายงานเกี่ยวกับประโยชน์ของการใช้วิตามินอีเป็นอาหารเสริมในผู้ป่วยโรคเบาหวาน และศึกษาผลกระทบต้อปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจล้มเหลวในผู้ป่วยโรคเบาหวาน จากผลการทดลองพบว่าผู้ป่วยจะมีโอกาสเสี่ยงของโรคลดลงตามรายงานของ Technion-Israel Institute of Technology และตีพิมพ์ในวารสาร “Diabetes care ปี 2004 ” ผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวานมีแนวโน้มการสะสมอนุมูลอิสระจำนวนมาก จึงเป็นไปได้ที่วิตามินอีจะไปช่วยลดอนุมูลอิสระดังกล่าวแต่อย่างไรก็ตาม การใช้วิตามินอีเสริมนั้นมีประโยชน์กับผู้ป่วยเท่านั้น ไม่มีประโยชน์ที่จะเสริมวิตามินอีในคนปกติที่ไม่เป็นโรค และวิตามินอียังให้ผลในการลดการเกาะตัวกันของเกล็ดเลือด และยังส่งผลทำให้เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจมีประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้น โดยใช้ก๊าซออกซิเจนน้อยลง ซึ่งช่วยลดอัตราเสี่ยงการเป็นโรคระบบหลอดเลือดและหัวใจ

นอกจากวิตามินอีเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ดีต่อเซลล์แล้ว วิตามินอียังมีผลในการช่วยปกป้องเยื่อหุ้มเซลล์ที่อวัยวะต่างๆ เช่น เซลล์ของผิวหนัง ตา ตับ หน้ำอก และลูกอัณฑะ ทำให้อวัยวะต่างๆ ดังกล่าวมีประสิทธิภาพการทำงาน และอายุการใช้งานนานขึ้น

ประโยชน์ของการทาครีมที่มีส่วนผสมของวิตามินอีในการป้องกันและรักษาผิวหนังได้แก่

- ช่วยลดอัตราการทำลายของแสงแดดที่ทำให้เซลล์เกิดการไหม้
- ลดอัตราการเกิดมะเร็งผิวหนังจากแสงแดด
- ช่วยลดริ้วรอยเหี่ยวย่น
- ลดความหยابกร้านของผิวหนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ปริมาณที่แนะนำให้รับประทาน

การวิจัยในทารกพบว่า วิตามินอีซึมผ่านรกได้น้อยมากในระหว่างที่เด็กอยู่ในครรภ์ ดังนั้น เด็กหรือสัตว์แรกเกิดจึงมีวิตามินอีในร่างกายต่ำ การกินวิตามินอี 2-10 หน่วยสากลจะช่วยป้องกันการสลายตัวของเม็ดเลือดแดงในทารกได้ (1 หน่วยสากล = 1 มิลลิกรัม) โดยทารกที่คลอดก่อนกำหนดจะต้องการวิตามินอีสูงกว่านี้ ทารกที่กินนมมารดามากไม่มีปัญหาการขาดวิตามินอี เพราะนมมารดามีวิตามินอีสูง (ลิตรละ 2-5 หน่วยสากล) งานวิจัยปัจจุบันพบว่ามีสารพวคซีลีเนียม และสารกันการเติมออกซิเจนประเภทอื่น อาจจะใช้แทนวิตามินอีบางส่วนได้

ในผู้ชายพบว่าถ้ากินอาหารที่มีไขมันร้อยละ 25 ของแคลอรีทั้งหมดและมีวิตามินอีวันละ 3 หน่วยสากลจะเกิดการขาดวิตามินอี เมื่อกินไขมันหรือกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวสูงเพิ่มขึ้นจะต้องการวิตามินอีมากขึ้น เช่น ถ้ากินกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวสูงน้อยกว่าวันละ 7 กรัม จะต้องการวิตามินอีวันละ 10 หน่วยสากล แต่ถ้ากินมากกว่าวันละ 35 กรัม และกินไขมันทั้งหมดร้อยละ 40 ของแคลอรีทั้งหมด จะต้องการวิตามินอีวันละ 30 หน่วยสากล โดยทั่วไปความต้องการวิตามินอีไม่ขึ้นกับน้ำหนักร่างกายหรือปริมาณแคลอรีที่รับประทาน อาหารทั่วไปมีวิตามินอีประมาณ 2-66 หน่วยสากล ซึ่งถือว่าเพียงพอกับความต้องการของร่างกาย โดยที่ปริมาณของวิตามินอีที่แนะนำให้รับประทาน (ในหน่วยสากล) สามารถแบ่งตามช่วงอายุได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของวิตามินอีในต้องการในแต่ละวัน (หน่วยสากล) [10]

ช่วงอายุ	ปริมาณต่ำสุด	ปริมาณทั่วไป
ทารก (infants)	5-7	30
เด็ก (children)	8-12	30
วัยรุ่น (adolescent)	12-15	30-50
ชายวัยทำงาน (adult Males)	15	100
หญิงวัยทำงาน (adult Females)	12	50-100
หญิงระยะตั้งครรภ์ (pregnant)	15	100
หญิงระยะให้นมบุตร (lactation)	18	100

2.3.4 ผลจากการที่ได้รับวิตามินอีน้อยเกินไป

วิตามินอีจำเป็นสำหรับการสืบพันธุ์ของสัตว์ถ้าขาดจะทำให้เป็นหมันเพราะเซลล์สืบพันธุ์สลายตัวแท้งบุตรได้ง่ายหนูที่ขาดวิตามินอีจะมีครีเอทีน (creatine) ในปัสสาวะสูงผิดปกติแสดงว่าเกิดการสลายตัวของกล้ามเนื้อ หลอดไตอักเสบ ขนเปลี่ยนสี ในกระต่ายมีอาการเจ็บปวดกล้ามเนื้อและเชื้อหุ้มสมองอักเสบ ในลิงมีอาการคล้ายกันและมีโรคโลหิตจางเกิดขึ้นด้วย ในไก่จะมีอาการเลือดไหลไม่หยุดและไข่ไม่ฟักเป็นตัว ในคนจะมีโรคเกี่ยวกับตับอ่อนหรือท่อน้ำดี การรับประทานน้ำมันแร่ เช่น น้ำมันพาราฟินเป็นประจำจะทำให้วิตามินอีดูดซึมเข้าร่างกายน้อยลง

2.3.5 ผลจากการที่ได้รับวิตามินอีมากเกินไป

ยังไม่พบโทษแม้จะให้กินวิตามินอีวันละ 800 หน่วยสากล เป็นเวลา 5 เดือน วิตามินอีที่มีมากเกินไปไม่สะสมในตับแต่จะไปเก็บในกล้ามเนื้อ ไขมันในร่างกาย ต่อมาได้สมองและที่ต่อมหมวกไตจะมีวิตามินอีมากกว่าต่อมไม่มีที่อื่นๆ

จากการศึกษาของ Edgar R. Miller ที่ตีพิมพ์ในวารสาร “Annuals of International Medicine” ทำการทดลองโดยให้วิตามินอีแก่อาสาสมัครมากกว่า 130,000 คน โดยระดับวิตามินอีที่ทดลองอยู่ในช่วง 16.5 หน่วยสากลถึง 2,000 หน่วยสากล ผลการทดลองพบว่าระดับวิตามินอีที่ 150 หน่วยสากลหรือต่ำกว่า จะไม่มีผลเสียต่อร่างกายและยังช่วยทำให้สุขภาพดีขึ้นด้วย ในขณะที่ระดับวิตามินอีที่ 400 หน่วยสากล จะมีโอกาสเสี่ยงอย่างมีนัยสำคัญต่อร่างกายเช่น ก่อโรคเรื้อรังต่อร่างกายได้ แต่ยังไม่มียารักษาการเสียชีวิตจากการใช้วิตามินอีในระดับที่สูงขึ้น

2.3.6 แหล่งอาหารที่มีวิตามินอีสูง

น้ำมันสกัดจากจมูกข้าวสาลี และน้ำมันพืชอื่นๆ เช่น น้ำมันรำ น้ำมันข้าวโพดมีวิตามินอีมากที่สุดอาหารที่มีรองลงมาคือ ถั่วเมล็ดแห้ง ผักใบเขียว ธัญพืชที่ขัดสีแต่น้อย ไข่ ดับ เนยเหลว และผักอื่นๆ น้ำมันพืชมีวิตามินอีมากกว่าไขมันจากสัตว์จึงเหม็นหืนน้อยกว่า

2.3.7 ผลของการหุงต้ม

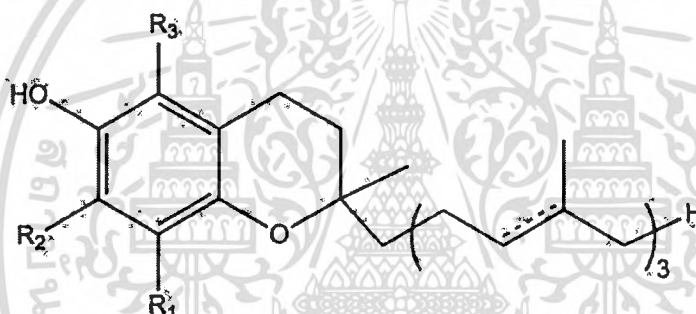
ในที่ที่ไม่มีอากาศหรือออกซิเจน วิตามินอีทนต่อความร้อนและกรด แต่สลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต ออกซิเจนและด่าง ดังนั้นการหุงต้มปกติ ไม่ทำให้เสียวิตามินอี การสูญเสียอาจมีบ้างในขบวนการเก็บและผลิตอาหารทางอุตสาหกรรม เช่น การแช่แข็ง

ตารางที่ 2.3 ปริมาณวิตามินอีในอาหารที่รับประทานได้ 100 กรัม [11]

อาหาร	มิลลิกรัม	อาหาร	มิลลิกรัม
น้ำมันรำ	264	น้ำมันดอกคำฝอย	89
น้ำมันถั่วเหลือง	194	น้ำมันข้าวโพด	87
น้ำมันถั่วลิสง	130	เนยเทียม	54
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	90	น้ำมันมะพร้าว	26

2.3.8 tocopherols

Tocopherols เป็นอนุพันธ์หนึ่งในกลุ่มของวิตามินอี มีอยู่หลายไอโซเมอร์ ได้แก่ alpha-, beta-, gamma- และ zigma-tocopherol ซึ่งในกลุ่ม alpha-tocopherol มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของ dl-alpha-tocopherol ซึ่งจำหน่ายในชื่อ “Natural Vitamin E”



α -tocopherol, $R_1 = R_2 = R_3 = \text{CH}_3$

γ -tocopherol, $R_1 = R_2 = \text{CH}_3$, $R_3 = \text{H}$

β -tocopherol, $R_1 = R_3 = \text{CH}_3$; $R_2 = \text{H}$

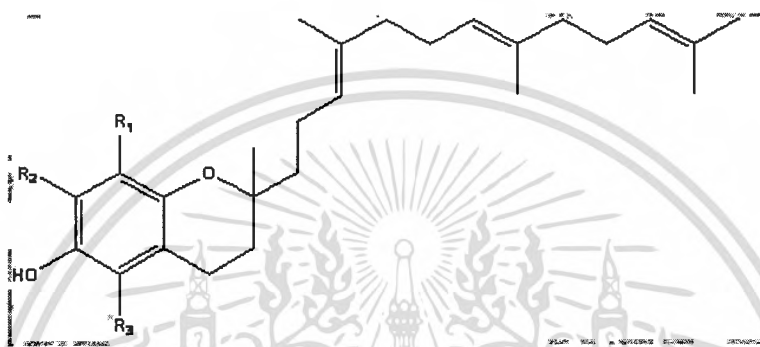
δ -tocopherol, $R_1 = R_2 = R_3 = \text{H}$

รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ tocopherols [12]

แหล่งธรรมชาติที่พบ tocopherols พบมากในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันจมูกข้าวสาลี, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันดอกทานตะวัน, ถั่วเหลือง และข้าวโพด โดยที่ tocopherol ที่พบในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป dl-alpha-tocopherol

2.3.9 tocotrienols

tocotrienols เป็นอีกหนึ่งอนุพันธ์ในกลุ่มของวิตามินอี โดยที่ tocotrienols นั้นก็จะมีอยู่หลายไอโซเมอร์ ได้แก่ alpha-, beta-, gamma- และ delta-tocotrienol ซึ่งทุกไอโซเมอร์เป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สำคัญ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลในการต่อต้านโรคมะเร็งของ tocotrienols อีกด้วย โดยเฉพาะมะเร็งที่ผิวหนังและที่เต้านม ซึ่ง tocotrienol จะมีประสิทธิภาพในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และต่อต้านโรคมะเร็งได้ดีกว่า tocopherols เนื่องจากสามารถซึมผ่านชั้นไขมันได้ดี และยังมีประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมทางด้านความงาม



รูปที่ 2.16 แสดง โครงสร้างทางเคมีของ tocotrienols [13]

ตารางที่ 2.4 ชนิด ไอโซเมอร์ของ tocotrienol [13]

ชนิด ไอโซเมอร์	R1	R2	R3
alpha-tocotrienol	CH ₃	CH ₃	CH ₃
beta-tocotrienol	CH ₃	H	CH ₃
gamma-tocotrienol	CH ₃	CH ₃	H
delta-tocotrienol	CH ₃	H	H

เมื่อพูดถึงแหล่งธรรมชาติที่พบ tocotrienols จะพบมากในเมล็ดธัญพืชต่างๆ เช่น ข้าวโอ๊ต, ข้าวบาร์เลย์, ข้าวไรน์, แกลบ, ไร่ข้าว และปาล์ม โดยที่ tocotrienols ที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป delta-tocotrienol

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

T. Galeano Diaz, I. Duran Meras, A. Guiberteau Cabanillas, M.F. Alexandre Franco [14] ได้ใช้เทคนิคโวลแทมเมทริกในการหาปริมาณ tocopherols โดยใช้ glassy carbon electrode ในสารตัวกลางเฮกเซน-เอทานอล ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น วิธีการวัดกระแสตรงของสารตัวอย่าง, วิธี differential pulse และสแควร์เวฟโวลแทมเมทรี ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมเฮกเซน-เอทานอล, ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกและสถานะของเครื่องมือ จะได้พีคของ α -, β -, γ - และ δ -tocopherol เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดโดยวิธีกระแสตรงและ differential pulse มาเปรียบเทียบกัน พบว่าการทำแบบ differential pulse จะให้ข้อมูลที่ดีกว่า ซึ่งวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หา tocopherols ในน้ำมันพืชต่างๆ โดยสารตัวอย่างน้ำมันมะกอกต้องทำการกำจัดสิ่งรบกวนด้วย solid-phase extraction โดยใช้ silica cartridge ผลการวิจัยที่ได้เป็นที่ยอมรับ

Marie Coatanea, Andre Darchen, Didier Hauchard [15] ใช้เทคนิค Differential pulse voltammetry ที่ Ultramicroelectrode(UME) เพื่อประยุกต์ใช้เพื่อหาปริมาณของวิตามินอีในน้ำมันพืชและไขมันผสมด้วยตัวทำละลายที่อุณหภูมิที่ 60 °C การใช้ UME จะใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายน้อย ตัวทำละลายที่ใช้คือ N-methyl-pyrrolidone ที่มีความเข้มข้น quaternary ของเกลือ ammonium เพื่อใช้รองรับ electrolyte ต้องมีความเข้มข้นที่น้อยกว่า 0.01 M เพื่อป้องกันการ formation ของสอง non-miscible phases พิคออกซิเดชันเดี่ยวเท่านั้นจะถูกตรวจจับโดย differential pulse voltammetry พิคนี้เชื่อว่าเกิดจากการออกซิเดชันของ tocopherols ซึ่งเป็นองค์ประกอบในวิตามินอี α -tocopherol ถูกเติมสารมาตรฐานในการหาปริมาณทั้งหมดของวิตามินอี ในน้ำมันพืชและไขมันหมูเป็น electroanalysed วิธีวิเคราะห์นี้จะทำให้หาปริมาณรวมของวิตามินอีที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับผลจาก chromatographic ปริมาณที่ใช้วัดในน้ำมันอยู่ในช่วงความเข้มข้นที่ 5×10^{-5} ถึง 1×10^{-4} M

E.V. Mikheeva และ L.S. Anisimova [16] ทำการหาสถานะของการทดลองของ วิตามินอี โดยใช้เทคนิคโวลแทมเมทรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานคาร์บอนชนิดต่างๆกัน และทำการศึกษาปฏิกิริยารวมถึงค่าสถานะต่างๆ ที่เกิดกับขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีส่วนสำคัญที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป สำหรับขั้นตอนในการหาวิตามินอีในวิตามินรวมนั้นใช้เทคนิค differential voltammetry

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

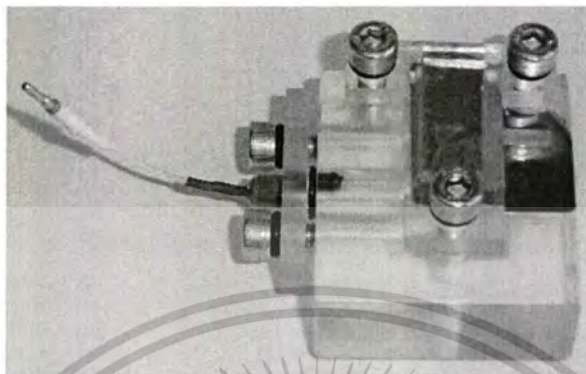
1. α -tocopherol ($C_{29}H_{50}O_2$) >98% (Fluka)
2. น้ำมันปลาล์มตรามรกต
3. น้ำมันถั่วเหลืองตรามรกต
4. น้ำมันรำข้าวตราคิง
5. Methanol (CH_3OH) Analytical reagent grade, Fisher
6. Sodium hydroxide (NaOH) Analytical reagent grade, Fisher
7. Hydrochloric acid (HCl) Analytical reagent grade, Fisher
8. Citric Acid ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$) Analytical reagent grade, Fisher
9. Tetrabutylammonium perchlorate ($C_{16}H_{36}ClNO_4$) Analytical reagent grade, Fluka
10. Carbon Ink (Acheson)

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ที่สร้างขึ้น
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrodes) รุ่น MF-2078 ของ BAS ชนิด Ag/AgCl
3. เซลล์เคมีไฟฟ้าระบบหยดนิ่ง
4. เซลล์เคมีไฟฟ้าระบบฉีดไหลต่อเนื่องแบบ thin-layer
5. เครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้า และวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า (Autolab Potentiostat) รุ่น PGSTAT20 ของบริษัท Ecochemie
6. ชุดอุปกรณ์ในระบบฉีดไหล
7. เครื่องวัด pH รุ่น 716 DMS Titrino ของบริษัท Metrohm
8. ฝาสกรีน 140T ซิงบนอะลูมิเนียมเฟรมขนาด 8x10 นิ้ว
9. แผงวงจรไฟฟ้า (Printed circuit board)

3.2.1 การจัดตั้งอุปกรณ์การวิจัย

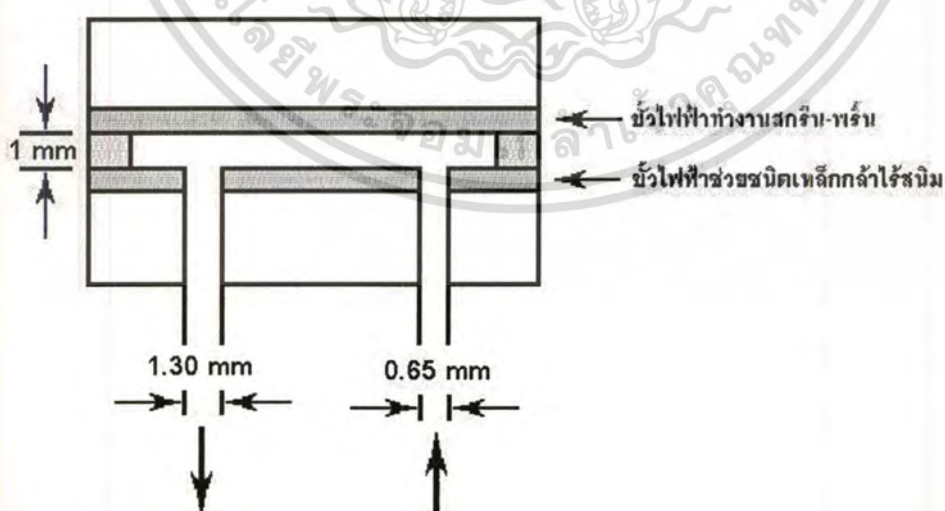
สำหรับการศึกษาทางเคมีไฟฟ้าโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบชนิดไหลต่อเนื่องนั้นมีอุปกรณ์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยกันหลายชนิด ดังนั้นจึงต้องมีการจัดตั้งอุปกรณ์การทดลองให้เหมาะสม



รูปที่ 3.1 เซลล์เคมีไฟฟ้าในระบบชนิดไหลต่อเนื่องแบบ thin-layer

เซลล์เคมีไฟฟ้าในระบบชนิดไหลต่อเนื่องแบบ thin-layer จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงานสกรีน-พรีนัท, ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl และขั้วไฟฟ้าช่วยชนิดแผ่นสแตนเลส ดังแสดงในรูปที่ 3.1

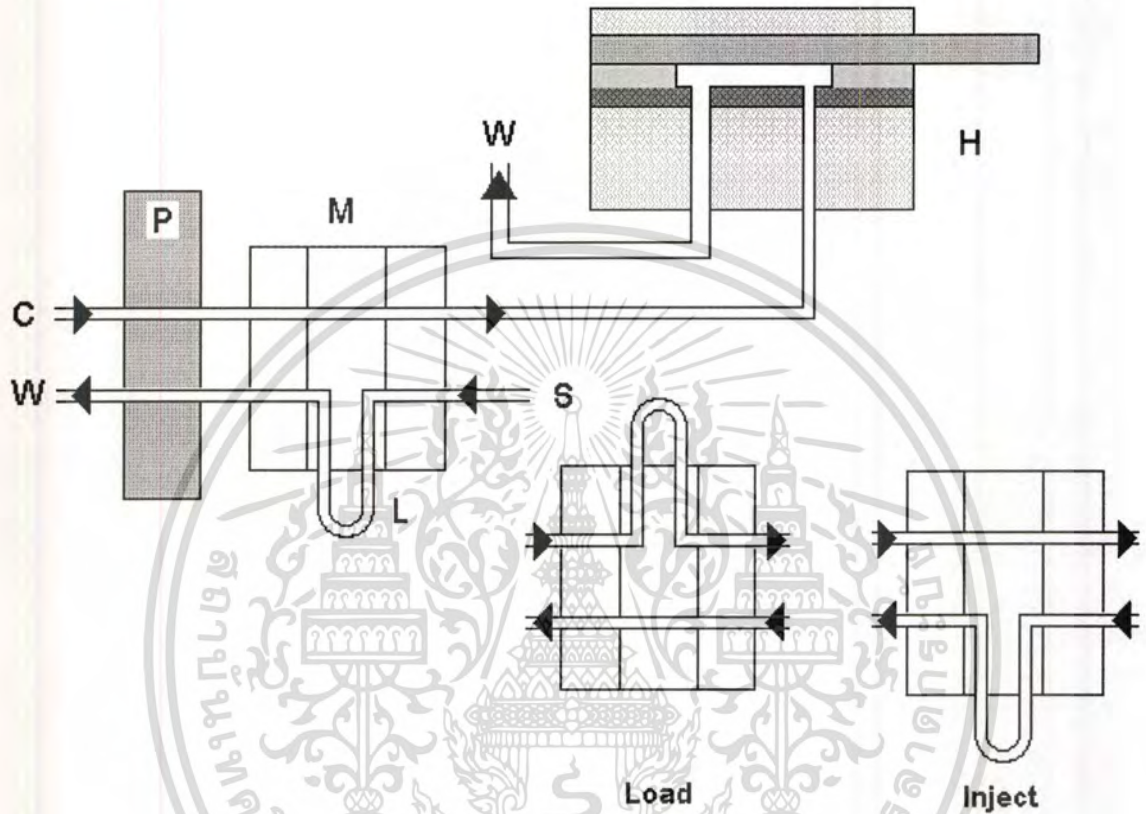
ทิศทางการไหลของสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้าระบบชนิดไหลต่อเนื่องนั้นมีทิศทางการไหล 2 ทิศทาง คือทางไหลเข้าของสารละลายมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.65 mm และทางไหลออกของสารละลายมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.30 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขนาดท่อและทิศทางการไหลของสารละลายภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าระบบชนิดไหลต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.2 แสดงทิศทางการไหลของสารละลายในระบบฉีดไหลต่อเนื่องที่ใช้ศึกษาทางเคมีไฟฟ้าโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีด้วยขั้วไฟฟ้าทำงานสกรีน-พรีนธ์ ประกอบด้วย Peristaltic pump ยี่ห้อ GILSON อุปกรณ์ฉีดสารตัวอย่าง และตัวเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อกับเครื่อง Autolab Potentiostat รุ่น PGSTAT20



รูปที่ 3.3 ทิศทางการไหลของสารละลายในระบบฉีดไหลต่อเนื่องที่ใช้ศึกษาทางเคมีไฟฟ้าโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี

- C คือ ทางเข้าของสารละลายเคลื่อนที่
- P คือ Peristaltic pump
- M คือ Manual injection
- H คือ เซลล์เคมีไฟฟ้าระบบฉีดไหลต่อเนื่อง
- W คือ ทางออกของสารละลาย
- L คือ ปริมาตรของสารละลายตัวอย่างที่ฉีดเข้าไปในระบบ
- S คือ ทางเข้าของสารละลายตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์

เตรียมเฟรมสกรีน โดยการนำผ้าสกรีนเบอร์ 140 มาซึ่งลงบนกรอบอลูมิเนียม และทำการสกรีนด้วย Carbon Ink บนแผงวงจรไฟฟ้าขนาด 12x12 นิ้ว แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำแผงวงจรไฟฟ้ามาตัดแบ่งเป็นแผ่นเล็กๆ ขนาด 3x3 เซนติเมตร

3.3 การเตรียมสารละลาย

3.3.1 การเตรียม stock solution ของสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol 1000 ppm

ชั่ง α -tocopherol มา 0.1000 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ละลายและปรับปริมาตรด้วยเมทานอล เก็บไว้ในภาชนะที่บดแสงในตู้เย็น

3.3.2 การเตรียมสารละลาย α -tocopherol 0, 20, 40, 60 และ 100 ppm

ปีเปิดสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol 1000 ppm มา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ละลายและปรับปริมาตรด้วยเมทานอล เก็บไว้ในภาชนะที่บดแสงในตู้เย็น

3.3.3 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล

ชั่ง Tetrabutylammonium perchlorate 5.1286 กรัม และชั่งกรดซิตริก 3.152 กรัม ผสมและละลายในเมทานอล ปรับปริมาตรด้วยเมทานอลจนถึงปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้อัตรา pH ประมาณ 2.6 หลังจากนั้นทำการปรับ pH ให้ได้ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 และ 4.5 โดยใช้ 0.1M NaOH หรือ 0.1M HCl ในการปรับ pH

3.4 การดำเนินการวิจัย

3.4.1 การศึกษาไซคลิกโวลแทมเมทรี

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาของ α -tocopherol โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยการวัดกระแสไฟฟ้าเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ ด้วยเครื่องควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า AUTOLAB PGSTAT20

ช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีของ α -tocopherol คือ -0.5 ถึง 1 V เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิด Ag/AgCl

3.4.1.1 การศึกษากระแสพื้น

การศึกษากระแสพื้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยที่เป็นตัวทำละลายของ α -tocopherol โดยจะศึกษาปริมาณกระแสพื้นที่วัดจากขั้วไฟฟ้าทำงาน 2 ชนิด คือ ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่ทำการขึ้น และขั้วกลาสคาร์บอน

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษากระแสพื้น

สารละลายบัฟเฟอร์	Scan rate (mV/s)
0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล	50

3.4.1.2 การศึกษา pH ที่เหมาะสม

การศึกษา pH ที่เหมาะสมจะศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนของสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol สภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษา pH ที่เหมาะสม

สาร	ความเข้มข้น (ppm)	Scan rate (mV/s)	สารละลายบัฟเฟอร์	pH
α -tocopherol	100	50	0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิทริกในเมทานอล	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 และ 4.5

3.4.1.3 การศึกษา scan rate ที่เหมาะสม

การศึกษา Scan rate ที่เหมาะสมจะศึกษาโดยการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับค่า Scan rate ที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้าทำงานของ α -tocopherol โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำงาน 2 ชนิด คือขั้วสกรีน-พรีนที่ทำการขึ้น และขั้วกลาสคาร์บอน สภาวะที่ใช้ทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษา Scan rate ที่เหมาะสม

สาร	ความเข้มข้น (ppm)	สารละลายบัฟเฟอร์	Scan rate (mV/s)
α -tocopherol	100	0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล	10, 25, 50, 100, 250 และ 500

3.4.1.4 การศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง

การศึกษาช่วงความเข้มข้นที่เป็นเป็นเส้นตรง α -tocopherol จะศึกษาโดยการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของยามาตรฐานแต่ละชนิด และเปรียบเทียบจากข้อไฟฟ้าทำงาน 2 ชนิด คือข้อสกรีน-พรีนท์ที่ทำงาน และข้อกลาสคาร์บอน สภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง

สาร	ความเข้มข้น (ppm)	สารละลายบัฟเฟอร์	Scan rate (mV/s)	pH
α -tocopherol	20, 40, 60, 80 และ 100	0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล	Scan rate ที่ได้จากการทดลองที่ 3.4.1.3	pH ที่ได้จากการทดลองที่ 3.4.1.2

3.4.2 การตรวจวัด α -tocopherol ในระบบฉีดไหลต่อเนื่องโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี

การนำระบบฉีดไหลต่อเนื่องมาใช้ร่วมกับเทคนิคแอมเพอโรเมทรี ประกอบด้วยอุปกรณ์ คือ injection port ท่อสำหรับนำสารละลายเคลื่อนที่ขนาดต่าง ๆ และ Peristaltic pump ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.4.2.1 การศึกษาไฮโครไดนามิกโวลแทมเมทรี

การศึกษาไฮโครไดนามิกโวลแทมเมทรีเป็นการศึกษาเพื่อหาศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในระบบฉีดไหลต่อเนื่องก่อนการตรวจวัดปริมาณ α -tocopherol โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีโดยบันทึกปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เทียบกับปริมาณกระแสไฟฟ้าของสารมาตรฐาน α -tocopherol ปริมาตรของสารมาตรฐานที่ฉีดเข้าระบบ 50 μ L และอัตราการไหล 1 mL/min โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สภาวะที่ใช้ในการทดลองศึกษาไฮโครไดนามิกโวลแทมเมทรี

สาร	ความเข้มข้น (ppm)	สารละลายพอสเฟตบัฟเฟอร์	ศักย์ไฟฟ้า (V)
α -tocopherol	100	0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล	0.45, 0.47, 0.50, 0.52, 0.54, 0.56, 0.58 และ 0.60

3.4.2.2 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย

การศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลายในระบบฉีดไหลต่อเนื่อง จะทำการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าของสารละลายเทียบกับอัตราเร็วในการไหลของสารละลายในระบบ สภาวะที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย

สาร	ความเข้มข้น (ppm)	สารละลายบัฟเฟอร์	ศักย์ไฟฟ้า (V)	อัตราเร็วในการไหล (mL/min)
α -tocopherol	100	0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล	ศักย์ไฟฟ้าของสารแต่ละชนิดได้จากการทดลองที่ 3.4.2.1	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75 และ 2.00

3.4.2.3 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

การศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานในระบบนิโคไลต์ต่อเนื่องของสารละลายมาตรฐานจะศึกษาโดยการเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารมาตรฐานแต่ละชนิด โดยวัดปริมาณกระแสที่ได้จากขั้วไฟฟ้าทำงานสกรีน-พรีนท์ที่ทำงานของสารละลาย α -tocopherol สภาพที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 สภาพที่ใช้ในการทดลองศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

สาร	ความเข้มข้น (ppm)	สารละลายบัฟเฟอร์	ศักย์ไฟฟ้า (V)	อัตราเร็วในการไหล (mL/min)
α -tocopherol	20, 40, 60, 80 และ 100	0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล	ศักย์ไฟฟ้าของสารแต่ละชนิดได้จากการทดลองที่ 3.5.2.1	อัตราเร็วในการไหล ได้จากการทดลองที่ 3.5.2.2

3.4.2.4 การศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์

การศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Detection limit) จะเป็นการศึกษาปริมาณของสารมาตรฐานที่น้อยที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยอาศัยกราฟมาตรฐานในการทดลองที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.3 โดยเทียบค่ากระแสไฟฟ้าซึ่งเป็น 3 เท่าของสัญญาณรบกวน (S/N=3) มาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของซิดจังก์ตการวิเคราะห์ของสารแต่ละชนิด

3.4.2.5 การศึกษาความเที่ยง

การศึกษาความเที่ยง (Precision) ของการวิเคราะห์สามารถหาได้ค่า Repeatability โดยค่าของ Repeatability หาได้จากการฉีดสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในการทดลอง 3.4.2.3 ฉีดจำนวน 5 ซ้ำ

3.4.2.6 การศึกษาความเสถียรภาพของขั้วไฟฟ้าทำงาน

การศึกษาความเสถียรภาพของขั้วไฟฟ้าทำงานทำการศึกษาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้วไฟฟ้าทำงานสกรีน-พรีนท์ที่ทำขึ้น โดยใช้สภาวะในการทดลองที่ 3.4.2.4 ของสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ช่วงความเข้มข้น 100 ppm ฉีด 30 ซ้ำ และทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของสัญญาณในเทคนิคแอมเพอโรเมทรีของระบบฉีดไหลต่อเนื่อง

3.4.2.7 การศึกษาความแม่นยำ

การศึกษาความแม่นยำ (Accuracy) ของการวิเคราะห์พิจารณาจากค่า % recovery ที่ได้จากการคำนวณการเติมสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ในเทคนิคการเติมสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนในสารละลายตัวอย่าง

3.4.3 การวิเคราะห์หา α -tocopherol ในน้ำมันปาล์ม

การวิเคราะห์ปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันปาล์มในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี สามารถหาปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันปาล์มตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการเติมสารละลายมาตรฐาน (Standard addition method)

นำน้ำมันปาล์ม 50 มิลลิลิตรเติมด้วยเมทานอลปริมาตร 50 มิลลิลิตรนำไปทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จะเกิดการแยกชั้นอย่างชัดเจน โดยที่ชั้นของเมทานอลจะอยู่ส่วนบน แล้วทำการแยกชั้นเมทานอลออกมา 5 มิลลิลิตรใส่ขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการปิเปตสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ความเข้มข้น 1000 ppm จำนวน 1 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ แล้วทำการตรวจวัด

ทำในลักษณะเดียวกันโดยเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ความเข้มข้น 1000 ppm เป็น 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเป็น 40, 60, 80 และ 100 ppm ตามลำดับแล้วทำการตรวจวัดแล้วนำไปสร้างกราฟของ standard addition

3.4.4 การวิเคราะห์หา α -tocopherol ในน้ำมันถั่วเหลือง

การวิเคราะห์ปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันถั่วเหลืองในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี สามารถหาปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันปาล์มตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการเติมสารละลายมาตรฐาน (Standard addition method)

นำน้ำมันถั่วเหลือง 50 มิลลิลิตรเติมด้วยเมทานอลปริมาตร 50 มิลลิลิตรนำไปทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จะเกิดการแยกชั้นอย่างชัดเจน โดยที่ชั้นของเมทานอลจะอยู่ส่วนบน แล้วทำการแยกชั้นเมทานอลออกมา 5 มิลลิลิตรใส่ขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการปิเปตสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ความเข้มข้น 1000 ppm จำนวน 1 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ แล้วทำการตรวจวัด

ทำในลักษณะเดียวกันโดยเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ความเข้มข้น 1000 ppm เป็น 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเป็น 40, 60, 80 และ 100 ppm ตามลำดับแล้วทำการตรวจวัดแล้วนำไปสร้างกราฟของ standard addition

3.4.4 การวิเคราะห์หา α -tocopherol ในน้ำมันรำข้าว

การวิเคราะห์ปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันรำข้าวในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี สามารถหาปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันรำข้าวตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการเติมสารละลายมาตรฐาน (Standard addition method)

น้ำมันรำข้าว 50 มิลลิลิตรเติมด้วยเมทานอลปริมาตร 50 มิลลิลิตรนำไปทำการปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที จะเกิดการแยกชั้นอย่างชัดเจน โดยที่ชั้นของเมทานอลจะอยู่ส่วนบน แล้วทำการแยกชั้นเมทานอลออกมา 5 มิลลิลิตรใส่ขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการบีบอัดสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ความเข้มข้น 1000 ppm จำนวน 1 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ แล้วทำการตรวจวัด

ทำในลักษณะเดียวกันโดยเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน α -tocopherol ความเข้มข้น 1000 ppm เป็น 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้นเป็น 40, 60, 80 และ 100 ppm ตามลำดับแล้วทำการตรวจวัดแล้วนำไปสร้างกราฟของ standard addition



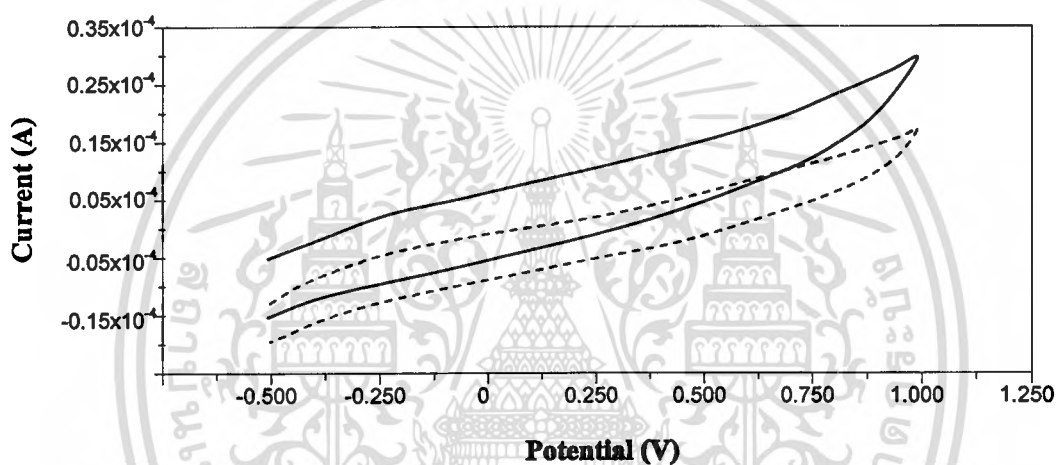
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ไชคลิกโวลแทมเมทรี

4.1.1 การศึกษากระแสพื้น

ผลการทดลองศึกษากระแสพื้นของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ และกลาสติคาร์บอน โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.50 ซึ่งเป็นสารละลายเคลื่อนที่ (mobile phase) ของ α -tocopherol ในรูปที่ 4.1



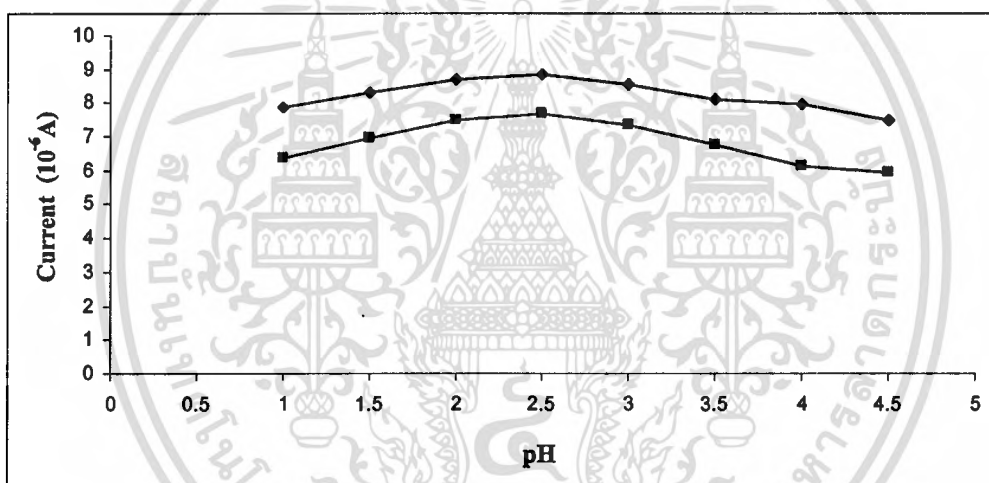
รูปที่ 4.1

เปรียบเทียบไชคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิทริกในเมทานอล ที่ได้จากขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ (—) และกลาสติคาร์บอน(---) โดยใช้ scan rate 50 mV/s

จากไชคลิกโวลแทมโมแกรมที่ในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นกระแสพื้นที่วัดจากขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ และกลาสติคาร์บอนในสารละลายเคลื่อนที่ของ α -tocopherol จะเห็นได้ว่ากระแสพื้นของทั้งสองขั้วนั้นมีค่าไม่แตกต่างกัน จึงทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ซึ่งสามารถผลิตขึ้นเองได้และมีราคาต้นทุนที่ต่ำกว่า นำมาใช้ทดแทนขั้วกลาสติคาร์บอนซึ่งมีราคาแพงกว่ามาก

4.1.2 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์

ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm สารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล ที่ pH ต่าง ๆ (ไซคลิกโวลแทมโมแกรมแสดงในภาคผนวก รูปที่ ง.1) และเมื่อพลอตค่า pH เทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้ และปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อ pH สูงขึ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสูงสุดที่ pH 2.50 แล้วปริมาณกระแสไฟฟ้าก็จะลดลงในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า α -tocopherol ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล ณ pH ต่าง ๆ สรุปได้ว่าที่ pH 2.50 ให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงกว่าที่ pH อื่น ๆ ดังนั้นจึงใช้สารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอลที่ pH 2.50 ในการวิเคราะห์ α -tocopherol



รูปที่ 4.2 พลอตค่า pH กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า ที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 1.00-4.50 ที่ได้จากขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ (—) และกลาสคาร์บอน(—) โดยใช้ scan rate 50 mV/s

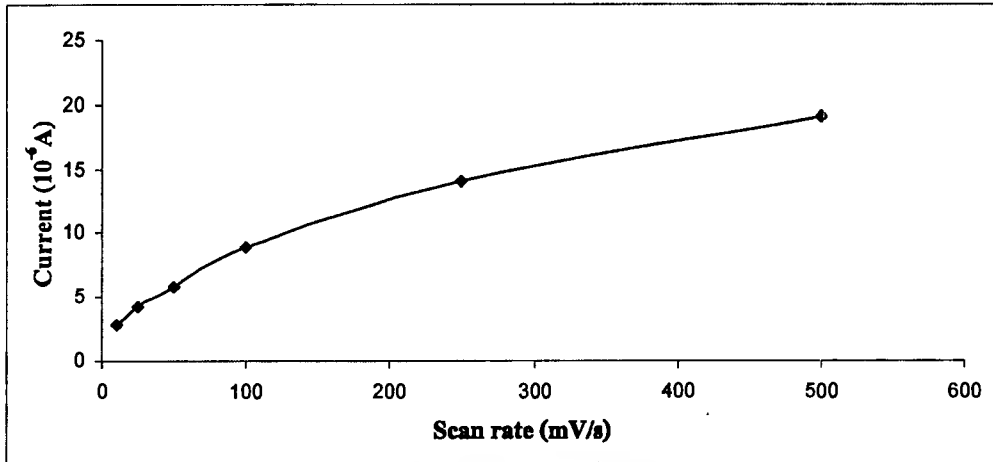
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ได้จากการการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate 50 mV/s ที่ได้จากขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ และขั้วกลาสติคาร์บอน

ขั้วไฟฟ้าทำงาน	ศักย์ไฟฟ้า (V)	ค่ากระแสไฟฟ้า (10^{-6} A)
สกรีน-พรีนท์	0.539 ± 0.000	8.855 ± 0.007
กลาสติคาร์บอน	0.513 ± 0.000	7.705 ± 0.003

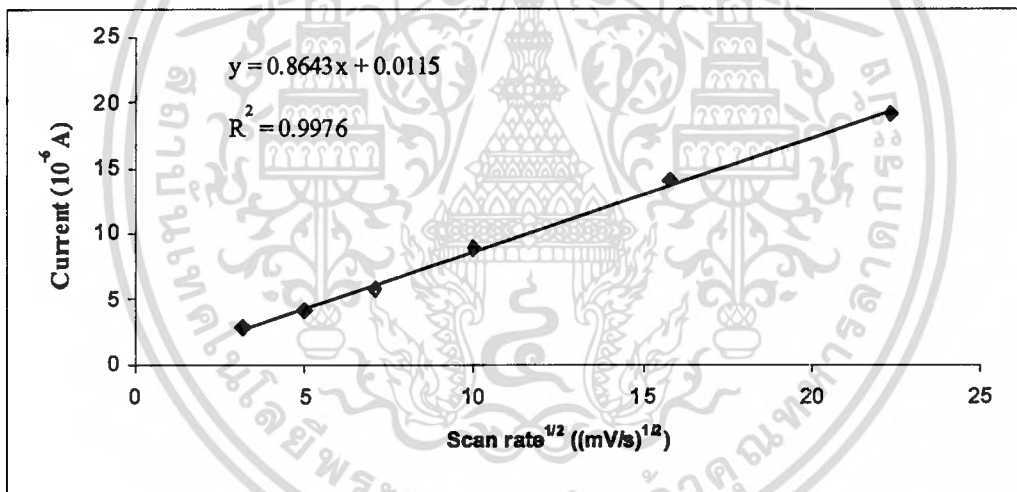
4.1.3 การศึกษา scan rate ที่เหมาะสม

ผลการศึกษา scan rate ที่เหมาะสมของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 2.50 และช่วง scan rate ที่ใช้ศึกษา คือ $10\text{-}500\text{ mVs}^{-1}$

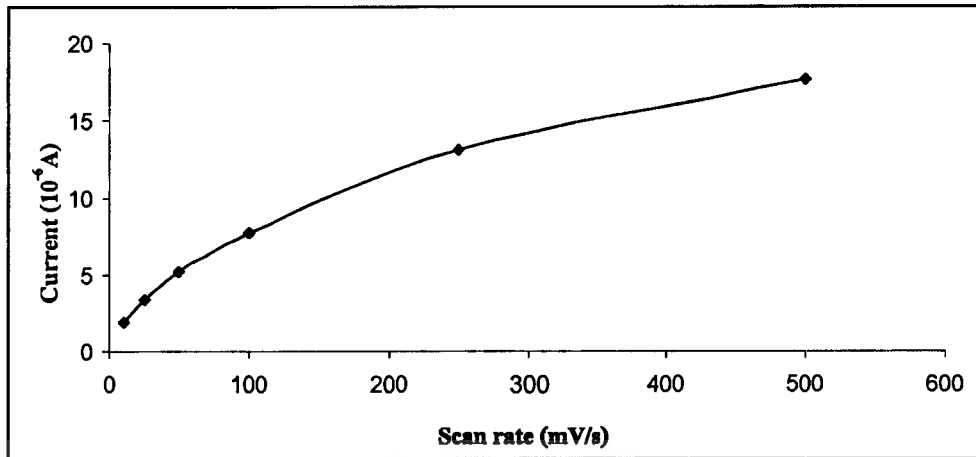
เมื่อนำค่า scan rate ที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ และขั้วกลาสติคาร์บอนมาพลอตกับค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากไซคลิกโวลแทมโมแกรม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.5 ตามลำดับจะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามค่า scan rate ในลักษณะเป็นเส้นโค้ง[ภาคผนวก จ.1] และเมื่อพลอตค่ากระแสไฟฟ้ากับค่า scan rate^{1/2} ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามค่า scan rate ในลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.9976 และ 0.9971 ของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ และขั้วกลาสติคาร์บอนตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R² ที่มีค่า ≈ 1 ค่ากระแสที่เกิดขึ้นเกิดจากการแพร่ของ α -tocopherol ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน และสามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ α -tocopherol โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ไซคลิกโวลแทมเมทรี หรือ differential pulse voltammetry สามารถใช้ค่า scan rate ได้ในช่วง $10\text{-}500\text{ mVs}^{-1}$ แก่ใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานสกรีน-พรีนท์ และขั้วกลาสติคาร์บอน



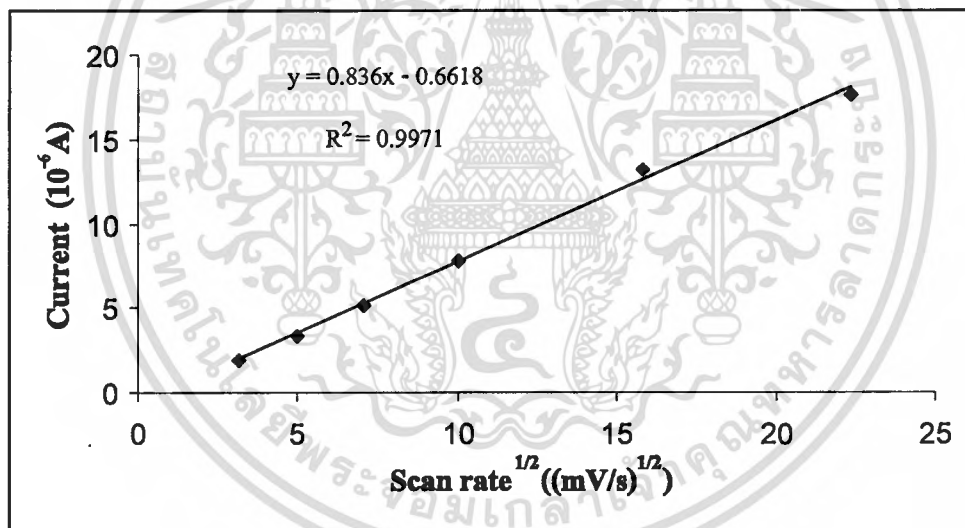
รูปที่ 4.3 พล็อตค่า scan rate (10-500 mV/s) กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พริ้นท์ของสารละลาย α -tocopherol ที่ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5



รูปที่ 4.4 พล็อตค่า scan rate $^{1/2}$ กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พริ้นท์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5



รูปที่ 4.5 พล็อตค่า scan rate (10-500 mV/s) กับค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสคาร์บอนในสารละลายสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5



รูปที่ 4.6 พล็อตค่า scan rate $^{1/2}$ กับค่าของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสคาร์บอนในสารละลาย α -tocopherol ที่ความเข้มข้น 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิทริกในเมทานอล pH 2.5

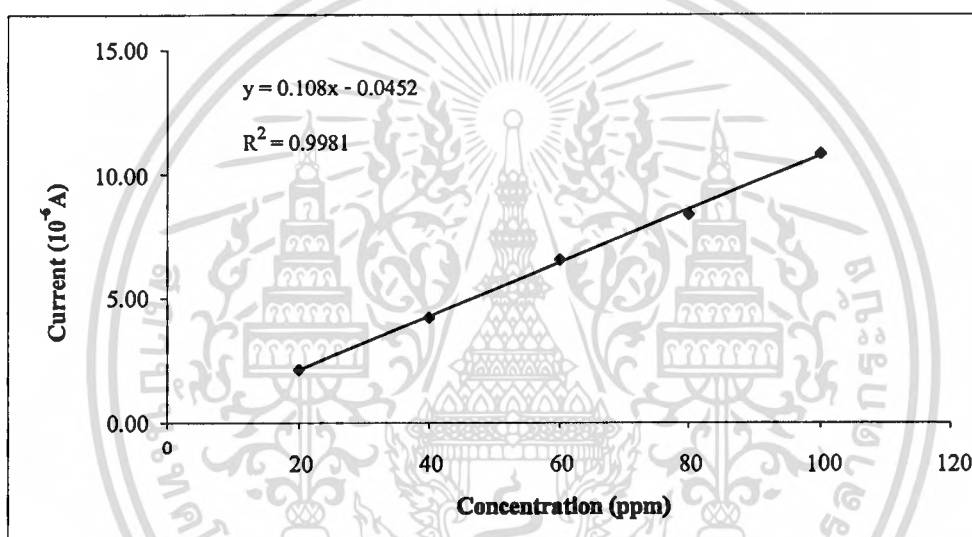
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง

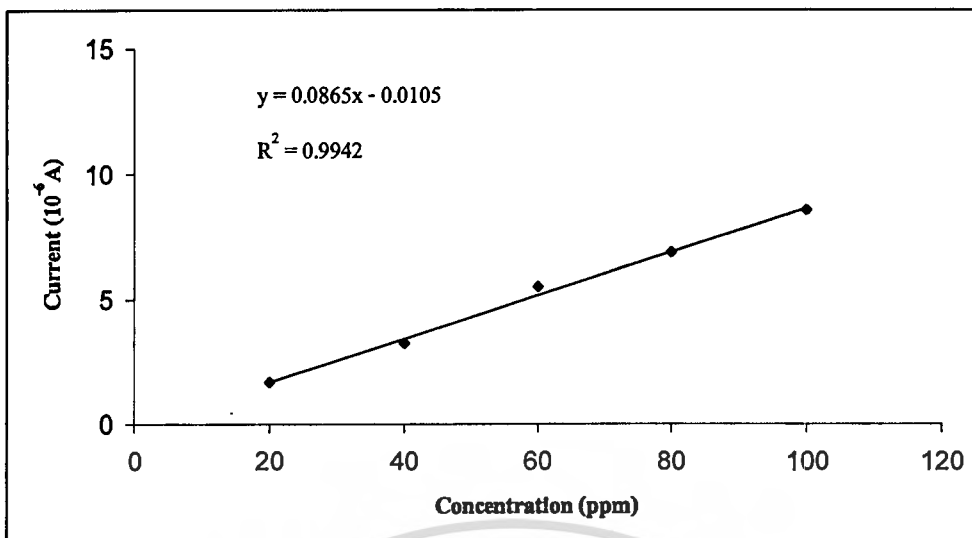
ผลการศึกษาระยะความเข้มข้นของ α -tocopherol ที่เป็นเส้นตรงโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ และขั้วกลาสติคาร์บอน ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 โดยใช้ scan rate ที่ 100 mV/s เพื่อลดระยะเวลาในการทดลอง

พบว่าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ที่ความเข้มข้น 20-100 ppm นั้นมีช่วงความเป็นเส้นตรง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9981 ดังแสดงในรูปที่ 4.7

และเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสติคาร์บอน ก็พบว่าในช่วงความเข้มข้น 20-100 ppm มีช่วงความเป็นเส้นตรง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9942 ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ผลลดค่าความเข้มข้นของ α -tocopherol (20-100 ppm) ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิทริกในเมทานอล pH 2.5 กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ scan rate 100 mV/s



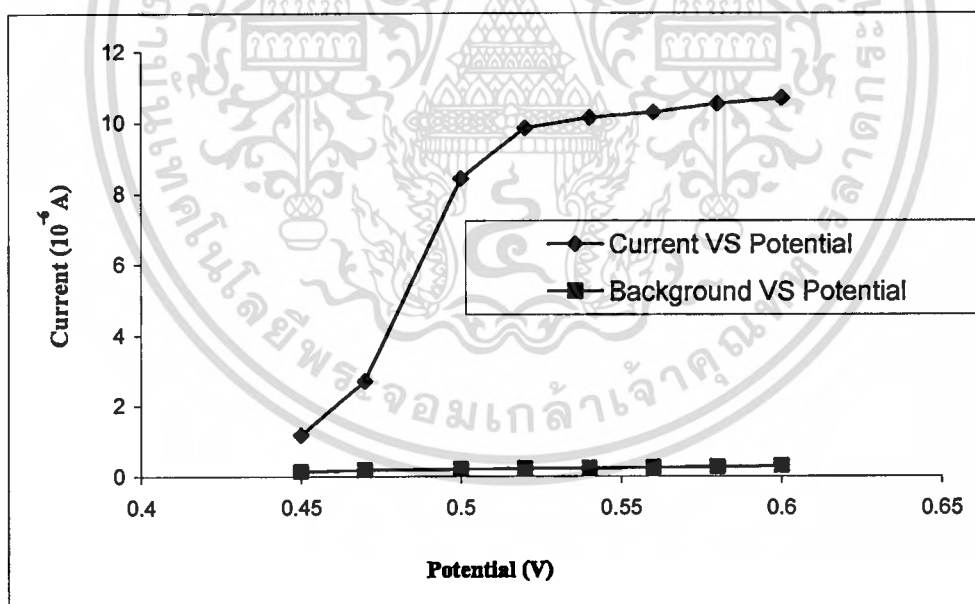
รูปที่ 4.8 พล็อตค่าความเข้มข้นของ α -tocopherol (20-100 ppm) ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณไซคลิกโวลแทมโมแกรมของขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสคาร์บอน scan rate 100 mV/s

4.2 การตรวจวัด α -tocopherol ในระบบฉีดไหลต่อเนื่องโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรี

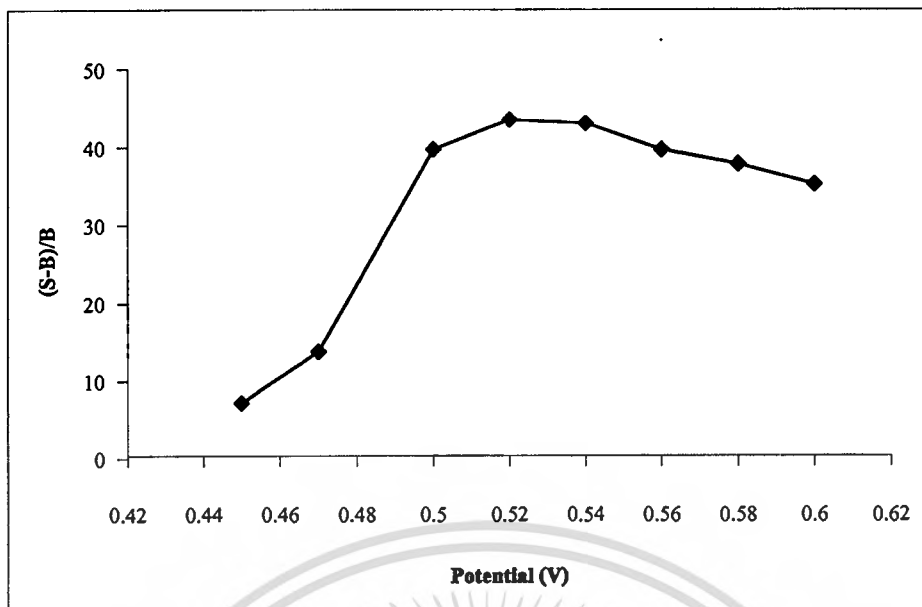
4.2.1 การศึกษาไฮโดรไดนามิกโวลแทมเมทรี

ผลจากการศึกษาไฮโดรไดนามิกโวลแทมเมทรีของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 2.5 ในช่วงศักย์ไฟฟ้า 0.45-0.60 V โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ ในระบบฉีดไหลต่อเนื่อง เนื่องจากการทดลองในระบบหยุดนิ่งนั้นได้ทดสอบให้เห็นแล้วว่า ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ที่ทำงาน สามารถนำมาใช้ทดแทนขั้วไฟฟ้ากาสติคาร์บอนได้

เมื่อนำค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากสัญญาณแอมเพอโรเมทรีของ α -tocopherol และสัญญาณกระแสพื้น (Background current) มาพลอตดังแสดงในรูปที่ 4.9 และเพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างของศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาของ α -tocopherol อย่างแท้จริง สามารถทำการพลอตค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่าอัตราส่วนสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ต่อกระแสพื้น (S/B) ดังในรูปที่ 4.10 จะพบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าค่าของ (S/B) จะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ 0.52 V และหลังจากนั้นก็ลดลง ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจวัด α -tocopherol โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีด้วยระบบฉีดไหล คือ 0.52 V



รูปที่ 4.9 พลอตศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณในเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm และอัตราเร็วในการไหลของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min

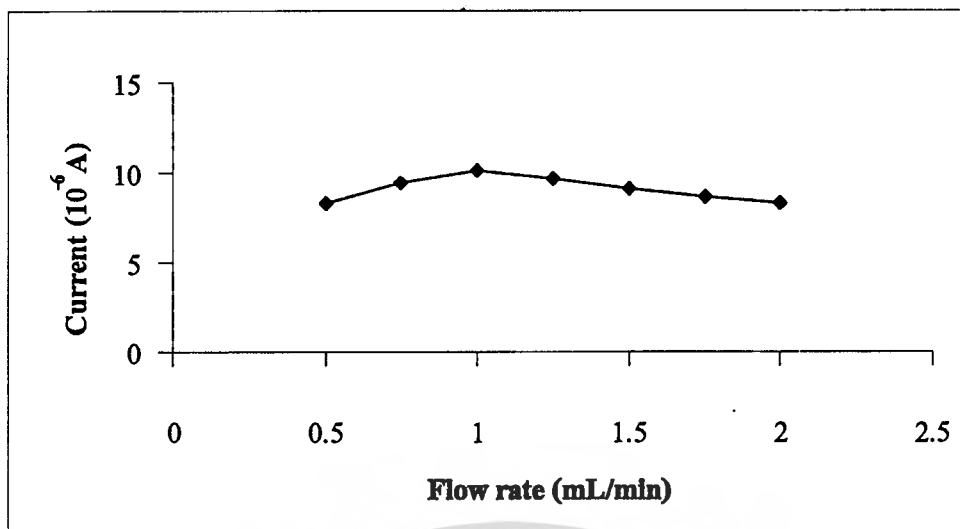


รูปที่ 4.10 พลอตศักย์ไฟฟ้ากับค่า (S-B)/B ที่ได้จากการคำนวณสัญญาณในเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm และอัตราเร็วในการไหลของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min

4.2.2 การศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลายเคลื่อนที่

จากการศึกษาอัตราเร็วในการไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 (0.50-2.00 mL/min) ของสารละลายเคลื่อนที่จากสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ จะพบว่ากระแสที่วัดได้จะมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.0 mL/min ดังแสดงในรูปที่ 4.11

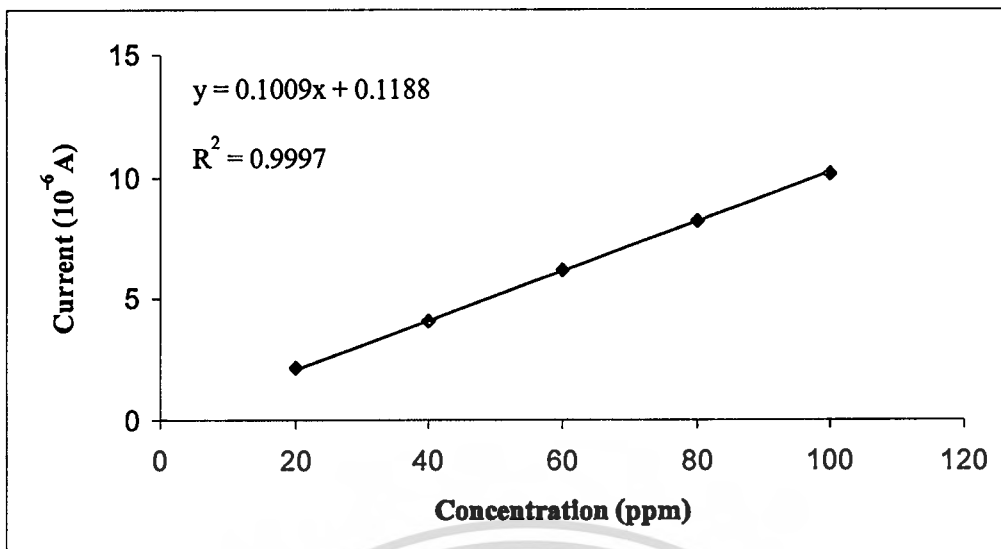
ดังนั้นสำหรับเซลล์นี้ใช้อัตราเร็วในการไหลของสารละลายเคลื่อนที่ในการตรวจวัด α -tocopherol โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีด้วยหัวไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ในระบบฉีดไหลต่อเนื่องนี้คือ 1.0 mL/min



รูปที่ 4.11 การพลอตอัตราเร็วในการไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 2.5 (0.50-2.00 mL/min) กับสัญญาณที่วัดได้จากเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ของสารละลาย α -tocopherol เข้มข้น 100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L

4.2.3 การศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานในระบบฉีดไหลต่อเนื่อง

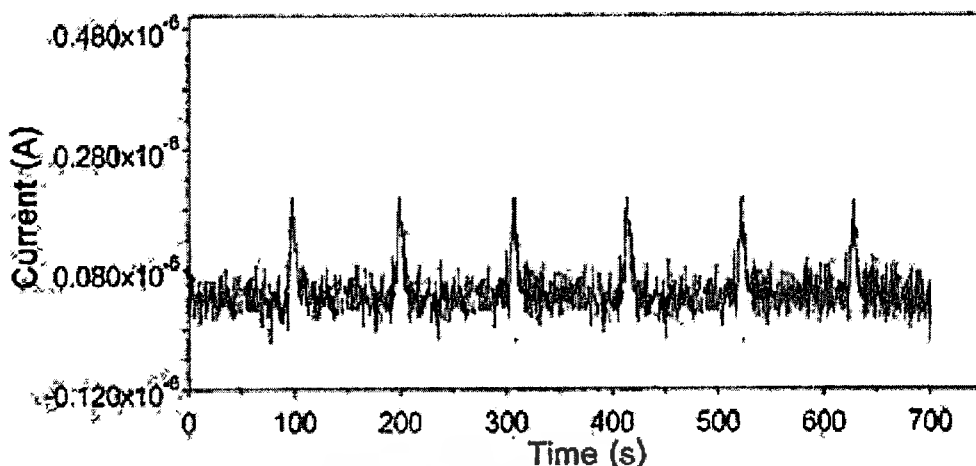
ผลการศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราเร็วในการไหลของบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีด้วยหัวไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ในระบบฉีดไหลต่อเนื่อง พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 20-100 ppm โดยมีค่า R^2 0.9997 จุดตัดแกน y เท่ากับ 0.1188 และมีความชัน เท่ากับ 0.1009 ดังแสดงในรูป 4.12



รูปที่ 4.12 พล็อตค่าความเข้มข้นของ α -tocopherol (20-100 ppm) กับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณในเทคนิคแอมเพอโรเมทรีของระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และใช้อัตราเร็วในการไหลของบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min

4.2.4 การศึกษาขีดจำกัดในการวิเคราะห์

ขีดจำกัดในการตรวจวัด α -tocopherol ในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ ทำการคำนวณจากสัญญาณกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นสามเท่าของสัญญาณกระแสไฟฟ้ารบกวน (S/N=3) เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน α -tocopherol แล้วจะมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 ppm และเมื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานของ α -tocopherol ความเข้มข้น 1.0 ppm แล้วตรวจวัดด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้าทำงานสกรีน-พรีนท์ ดังแสดงในรูป 4.13



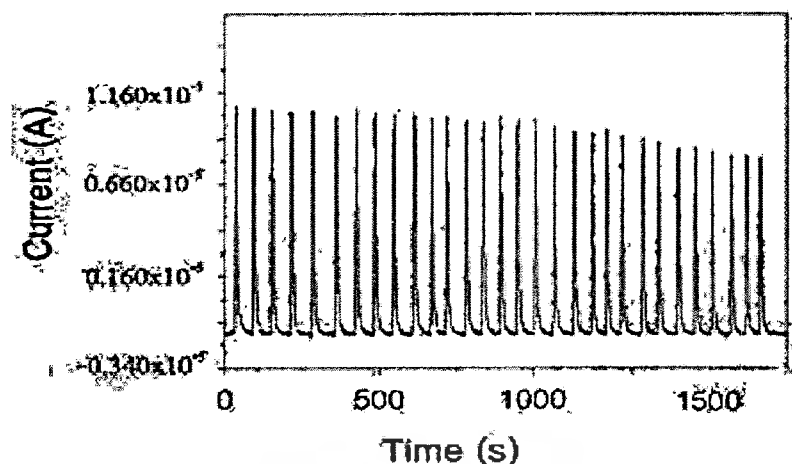
รูปที่ 4.13 สัญญาณที่วัดได้จากเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยหัวไฟฟ้า สกรีน-พรีนท์ของสารละลาย α -tocopherol เข้มข้น 1 ppm และศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และใช้อัตราเร็วในการไหลของบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิดริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min

4.2.5 ความเที่ยง

ความเที่ยงในการวิเคราะห์จากค่า repeatability พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การผันแปร (%RSD) ของการวัด 5 ซ้ำในทุกความเข้มข้น จากกราฟมาตรฐาน α -tocopherol ที่ความเข้มข้น 20-100 ppm พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การผันแปรคือ 2.006%

4.2.6 การศึกษาความเสถียรภาพของหัวไฟฟ้าทำงาน

การศึกษาความเสถียรภาพของหัวไฟฟ้าทำงานในการตรวจวัด α -tocopherol จะศึกษาที่ความเข้มข้น 100 ppm ฉีดซ้ำจำนวน 30 ครั้งพบว่าหัวไฟฟ้าทำงานมีความเสถียรภาพสูงซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การผันแปรที่ได้คือ 7.201 เมื่อเทียบสัญญาณกระแสไฟฟ้าพีกแรกของการฉีดเป็น 100% (10.163×10^{-6} A) และกระแสไฟฟ้าสุดท้ายของ α -tocopherol การฉีดซ้ำจำนวน 30 ครั้ง คือ 77.26 % (7.854×10^{-6} A) ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเริ่มต้น ดังนั้นเมื่อฉีดซ้ำ 30 ครั้ง กระแสไฟฟ้าลดลง 22.74%



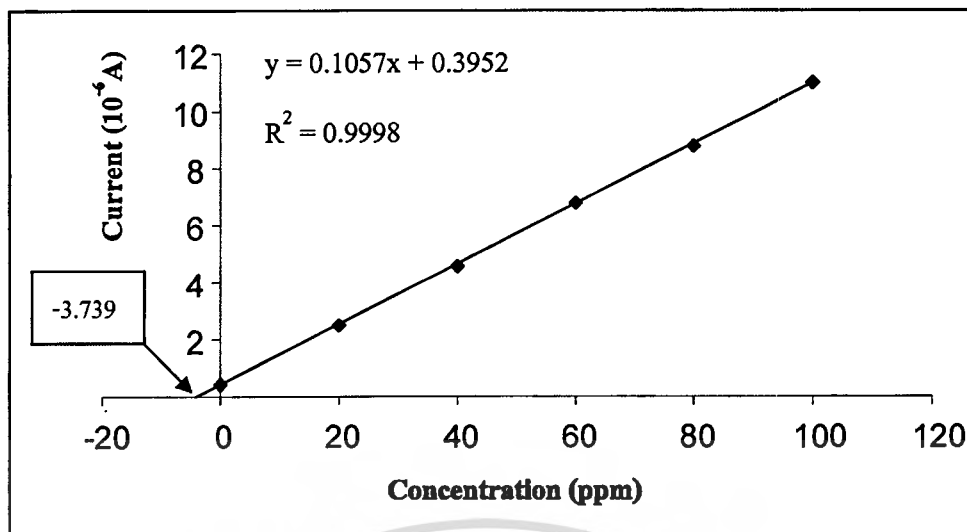
รูปที่ 4.14 สัญญาณที่วัดได้จากเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรินท์ของสารละลาย α -tocopherol เข้มข้น 100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และใช้อัตราเร็วในการไหลของสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.0 mL/min จำนวน 30 ซ้ำ

4.2.7 การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

การตรวจวัดปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันพืชสามารถตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเติมสารมาตรฐานในตัวอย่าง (standard addition method)

ผลการตรวจวัดปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันพืชตัวอย่าง 3 ชนิดคือ น้ำมันปาล์มตรามรกต, น้ำมันถั่วเหลืองตรามรกต และน้ำมันรำข้าวตราคิง โดยวิธีเติมสารมาตรฐานได้แสดงกราฟของวิธีการเติมสารมาตรฐานของ α -tocopherol ในรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ และแสดงผลของปริมาณ α -tocopherol ของน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิดในตารางที่ 4.3

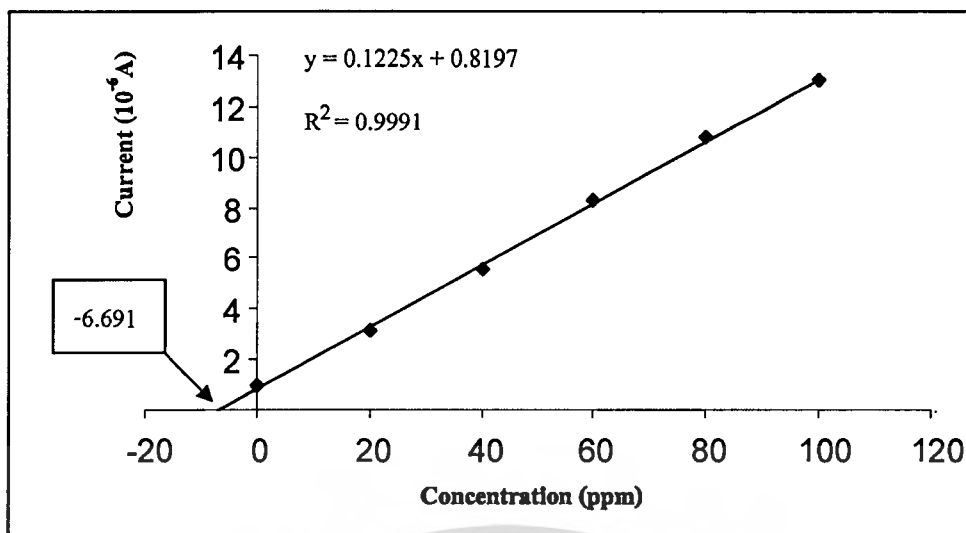
การหาค่า % recovery ของ α -tocopherol ในของการวิเคราะห์ ผลที่ได้จากการเติมสารมาตรฐาน α -tocopherol ทั้งหมด 5 ความเข้มข้น คือ 20, 40, 60, 80 และ 100 ppm ซึ่งค่า % recovery ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.15 กราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันปาล์มตรามรดกโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนธ์

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า %Recovery ของของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันปาล์มตรามรดกโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนธ์

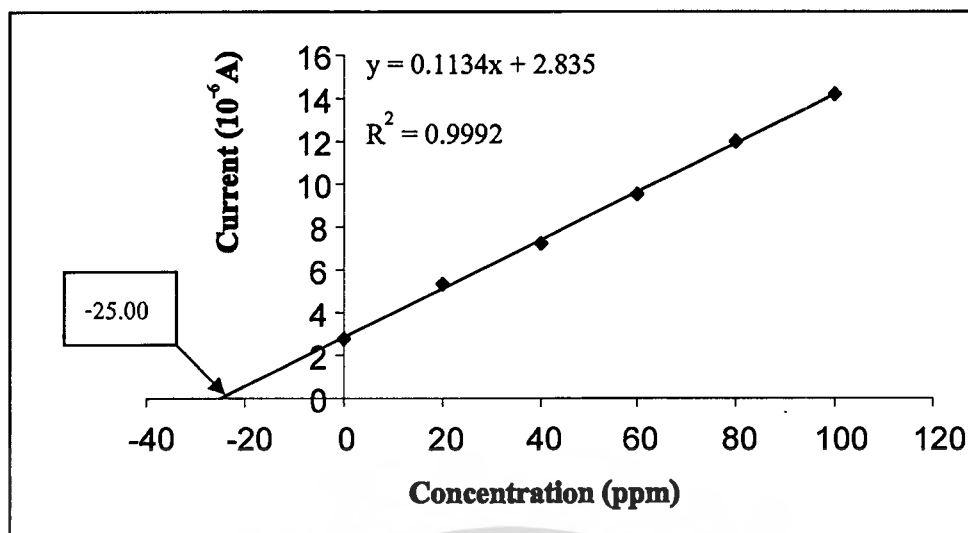
ความเข้มข้นที่เติม (ppm)	ความเข้มข้นที่ทำได้ (ppm) เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน	ค่า % recovery
20	20.386	101.933
40	41.150	102.874
60	63.128	105.214
80	83.125	103.906
100	104.870	104.870



รูปที่ 4.16 กราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันถั่วเหลืองตรามรดกโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบจลิตไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า %Recovery ของของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันถั่วเหลืองตรามรดกโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบจลิตไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์

ความเข้มข้นที่เติม (ppm)	ความเข้มข้นที่ทำได้ (ppm) เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน	ค่า % recovery
20	20.900	104.498
40	45.474	113.685
60	72.564	120.940
80	97.175	121.470
100	119.432	119.432



รูปที่ 4.17 กราฟมาตรฐานแบบการเติมสารมาตรฐานของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันรำข้าวตราคิงโดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบชนิดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนัท

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า %Recovery ของของการวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันรำข้าวตราคิง โดยเทคนิคแอมเพอโรเมทรีในระบบชนิดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนัท

ความเข้มข้นที่เติม (ppm)	ความเข้มข้นที่ทำได้ (ppm) เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน	ค่า % recovery
20	24.853	124.265
40	44.116	110.291
60	67.162	111.937
80	91.404	114.255
100	112.861	112.861

ผลการตรวจวัดปริมาณ α -tocopherol ในน้ำมันพืชตัวอย่าง 3 ชนิดคือ น้ำมันปาล์มตรา มรกต น้ำมันถั่วเหลืองตรามรกต และน้ำมันรำข้าวตราคิง เมื่อได้ทำการคำนวณย้อนกลับได้ความเข้มข้น 37.39, 66.91 และ 250.00 ppm ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์ α -tocopherol โดยใช้ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่ ทั้งระบบอยู่นิ่ง และระบบฉีดไหลต่อเนื่อง สามารถนำวัสดุที่สร้างจากวัสดุที่หาง่ายเพื่อนำมาใช้ในงานวิเคราะห์ α -tocopherol ในน้ำมันพืชตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ราคาถูก และตรงกับความต้องการในงานเคมีวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของผลสัมฤทธิ์ของไฟฟ้าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนจะให้ค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าในไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ α -tocopherol เทียบกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าพื้นที่ใกล้เคียงกับขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน ซึ่งสามารถนำขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนมาใช้ทดแทนได้ และจะเห็นว่าขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่มีความเสถียร และมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสติคาร์บอน โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนของ S/B (signal to background ratio) ที่ได้จากการศึกษาเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสติคาร์บอนในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

การวิเคราะห์ α -tocopherol ใช้สารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 เป็นสารละลายเคลื่อนที่ในระบบฉีดไหลต่อเนื่องโดยเทคนิคแอมเพอร์โรเมตรีด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีน พบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุดของ α -tocopherol ให้ศักย์ไฟฟ้าที่ 0.52 V โดยมีขีดจำกัดการตรวจวัดของ α -tocopherol คือ 1 ppm และช่วงความเข้มข้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของ α -tocopherol คือ 20-100 ppm และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับตัวอย่างน้ำมันพืชได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิเคราะห์ปริมาณ α -tocopherol โดยใช้เทคนิคแอมเพอร์โรเมตรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้าสกรีนพรีนที่มีปัญหาที่สำคัญประการหนึ่ง คือมีสัญญาณรบกวนที่สูงจึงทำให้ความสามารถในการตรวจวัดปริมาณ α -tocopherol ที่มีความเข้มข้นต่ำมาก ๆ ในระดับ ppb ไม่ได้ และสารที่จะนำมาวิเคราะห์ในเทคนิคนี้จะต้องเป็นสารที่สารเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าเท่านั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Joseph Wang. 2000. **Analytical Electrochemistry**. 2nd ed. New York : Wiley-VCH.
- [2] Richard S. Nicholson and Irving Shain. 1964. **“Theory of stationary electrode polarography**
Analytical Chemistry” 36(4) : 706-723.
- [3] Enzyme Electrode “Cyclic Voltammetry” [Online]. Available :
http://www.biol.paisley.ac.uk/marco/Enzyme_Electrode/Chapter1/Cyclic_Voltammetry1.htm. 2005
- [4] Department of Chemistry Michigan State University “Experiment Cyclic Voltammetry”
[Online]. Available :
<http://poohbah.cem.msu.edu/courses/cem419/cem372cyclicvoltammetry.pdf>. 2005.
- [5] Allen J. Bard and Larry R. Faulkner. 2001. **Electrochemical methods**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- [6] Marek Trojanowicz. 2000. **Flow injection analysis**. 1st ed. New Jersey : World scientific publishing.
- [7] Jaromir Ruzika. 1988. **Flow injection analysis**. 2nd Ed. New York : John Wiley & Sons.
- [8] Flow injection “Flow injection” [Online]. Available : <http://www.flowinjection.com>. 2005
- [9] BASi “BASi LCEC Flowcells” [Online]. Available :
<http://www.bioanalytical.com/products/lc/flowcells.html>. 2005
- [10] Vitamin E (Tocopherol) [Online]. Available :
[http://elibrary.eduzones.com/index.php?title=%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%B5\(TOCOPHEROL\)](http://elibrary.eduzones.com/index.php?title=%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%B5(TOCOPHEROL))
- [11] Vitamin E (Tocopherol) [Online]. Available :
http://www.md.chula.ac.th/th/public/medinfo/food/vitamin/vi_e.html
- [12] Tocopherol [Online]. Available :
<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:VitE.png>
- [13] Tocotrienol [Online]. Available :
<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Image-Tocotrienol.jpg>
- [14] T.Galeano Diaz, I. Duran Maras, A. Guiberteau Cabanillas and M.F.Alexandre Franco., 2004
“Voltammetric behavior and determination of tocopherols with partial least squares calibration: analysis in vegetable oil samples” Analytica Chimica Acta. 511 : 231-238

- [15] Marie Coatanea., Andre Darchen., Didier Hauchard., 2001. **“Electroanalysis at ultramicroelectrodes of oils and fats Application to the determination of vitamin E”** Sensor and Actuators B. 76 : 539-544
- [16] E.V.Mikheeva and L.S.Anisimova., 2007. **“Voltammetric Determination of vitamin E (α-Acetate) in Multicomponent Vitaminized Mixtures”** Journal of Analytical Chemistry. 62 : 373-376
- [17] Gosser, D. K. Jr., **Cyclic Voltammetry : Simulation and Analysis of Reaction Mechanisms**. New York : VCH Publishers. 1994. pp.27-36, 97-100.
- [18] Wikimedia the free encyclopedia. Cyclic Voltammetry. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Convection> ; Last Update : September, 27 2006.94
- [19] Epsilon Systems. Cyclic Voltammetry : Data Analysis. [Online]. Available : http://www.epsilon-web.net/Ec/manual/Techniques/CycVolt/cv_analysis.html ; Search :November 10, 2006.
- [20] Cyclic Voltammetry. [Online]. Available : <http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Chemistry/Electrochemis/Electrochemical/CyclicVoltammetry/CyclicVoltammetry.htm> ;Search : November 10, 2006.
- [21] Cyclic Voltammetry Primer. [Online]. Available : http://www-biol.paisley.ac.uk/marco/Enzyme_Electrode/Chapter1/Cyclic_Voltammetry1.htm
- [22] Sawyer, D. T., Sobkowiak, A., and Roberts, J. L. Jr., **Electrochemistry for Chemists**. 2nd^{ed}. New York : John Wiley & Sons. 1995. pp. 330, 333, 444.



ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล

ชั่ง Tetrabutylammonium perchlorate 5.1286 กรัม และชั่งกรดซิติริก 3.152 กรัม ผสมและละลายในเมทานอล ปรับปริมาตรด้วยเมทานอลจนถึงปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้ pH ประมาณ 2.6 หลังจากนั้นทำการปรับ pH ให้ได้ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 และ 4.5 โดยใช้ 0.1M NaOH หรือ 0.1M HCl ในการปรับ pH

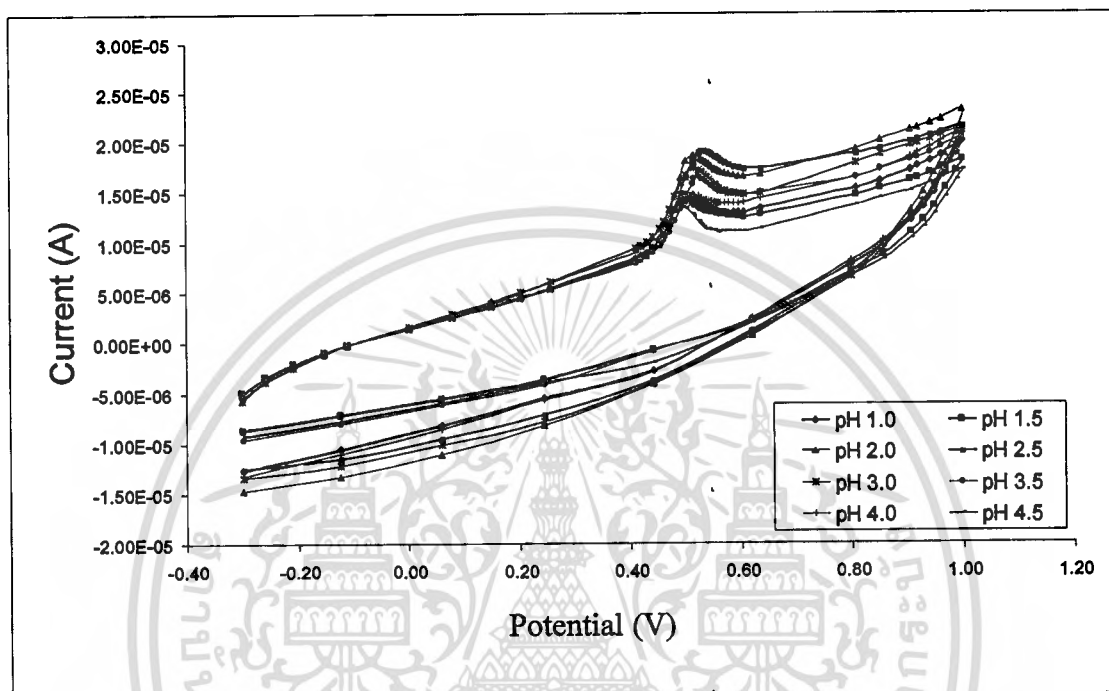


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ไชคคลิกโวลเทมโมแกรมและข้อมูลที่ได้จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล scan rate 50 mV/s และ pH 1.00-4.50 ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีน



รูปที่ ข.1 ไชคคลิกโวลเทมโมแกรมที่ได้จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล scan rate 50 mV/s และ pH 1.00-4.50 ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา pH ที่เหมาะสมของสาร α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล scan rate 50 mV/s และ pH 1.00-4.50 ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์

pH	ศักย์ไฟฟ้า (V)	ค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (μ A)	ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (μ A)
1.00	0.495	0.494 \pm 0.001	7.892	7.891 \pm 0.006
	0.493		7.885	
	0.494		7.897	
1.50	0.501	0.501 \pm 0.001	8.325	8.329 \pm 0.013
	0.501		8.334	
	0.502		8.318	
2.00	0.529	0.527 \pm 0.002	8.695	8.694 \pm 0.007
	0.527		8.687	
	0.525		8.701	
2.50	0.539	0.538 \pm 0.001	8.855	8.863 \pm 0.009
	0.539		8.873	
	0.538		8.862	
3.00	0.524	0.524 \pm 0.001	8.541	8.536 \pm 0.005
	0.525		8.537	
	0.524		8.531	
3.50	0.515	0.516 \pm 0.001	8.125	8.127 \pm 0.002
	0.515		8.127	
	0.517		8.128	
4.00	0.508	0.507 \pm 0.001	7.975	7.979 \pm 0.004
	0.505		7.984	
	0.507		7.977	
4.50	0.499	0.499 \pm 0.001	7.504	7.507 \pm 0.003
	0.498		7.507	
	0.499		7.511	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

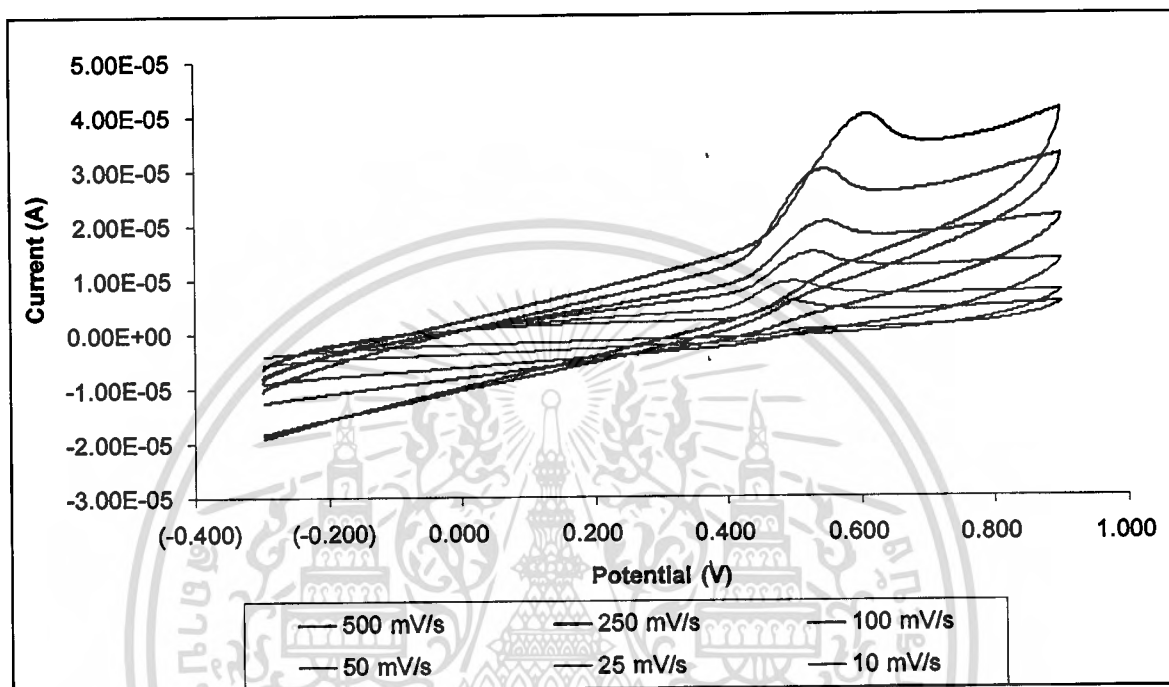


ภาคผนวก ค

การศึกษา scan rate ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 ไซคลิกโวลเทมโมแกรม และข้อมูลที่ได้จากการศึกษา scan rate ของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate ต่าง ๆ ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนัท



รูปที่ ค.1 ไซคลิกโวลเทมโมแกรมที่ได้จากการศึกษา scan rate ของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิทริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate ต่าง ๆ ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนัท

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษา scan rate ของสารละลาย α -tocopherol 100 ppm ใน 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิตริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate ต่าง ๆ ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พริ้นท์

Scan rate (mV/s)	ศักย์ไฟฟ้า (V)	ค่าเฉลี่ยศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (μ A)	ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (μ A)
10	0.497	0.497 ± 0.000	2.881	2.881 ± 0.002
	0.497		2.883	
	0.498		2.880	
25	0.495	0.495 ± 0.000	4.184	4.184 ± 0.002
	0.496		4.185	
	0.495		4.182	
50	0.523	0.523 ± 0.000	5.763	5.763 ± 0.003
	0.522		5.767	
	0.523		5.761	
100	0.543	0.543 ± 0.000	8.875	8.874 ± 0.002
	0.543		8.872	
	0.542		8.876	
250	0.539	0.539 ± 0.000	14.100	14.103 ± 0.003
	0.538		14.106	
	0.539		14.102	
500	0.605	0.605 ± 0.000	19.070	19.071 ± 0.002
	0.604		19.071	
	0.605		19.073	

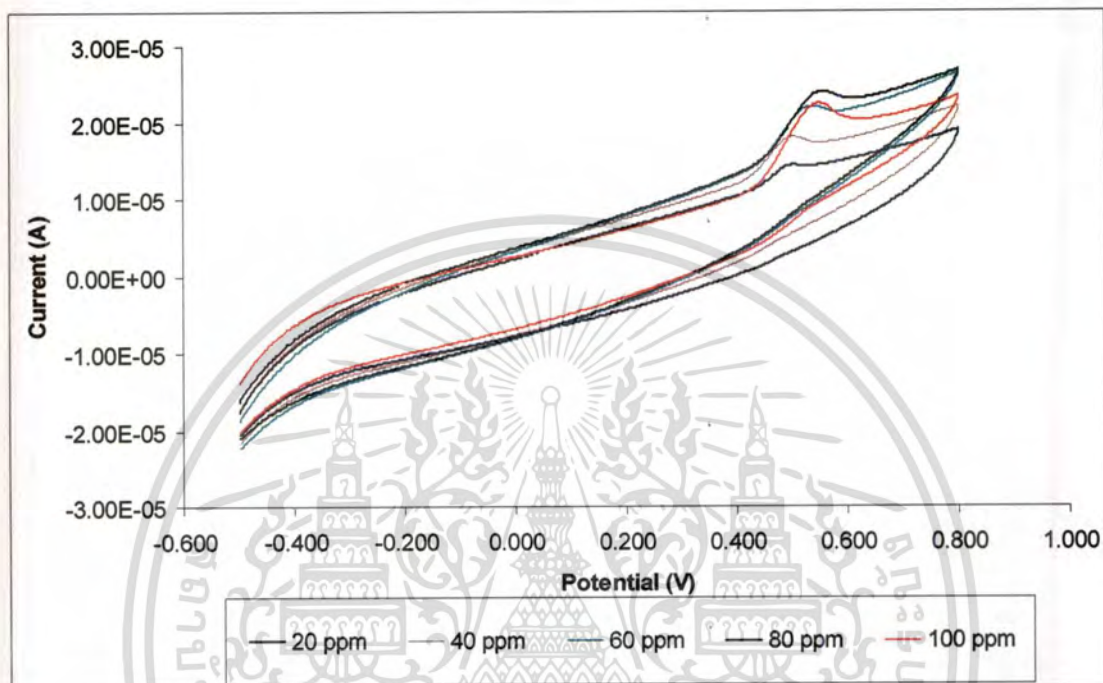
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก
การศึกษาช่วงของความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

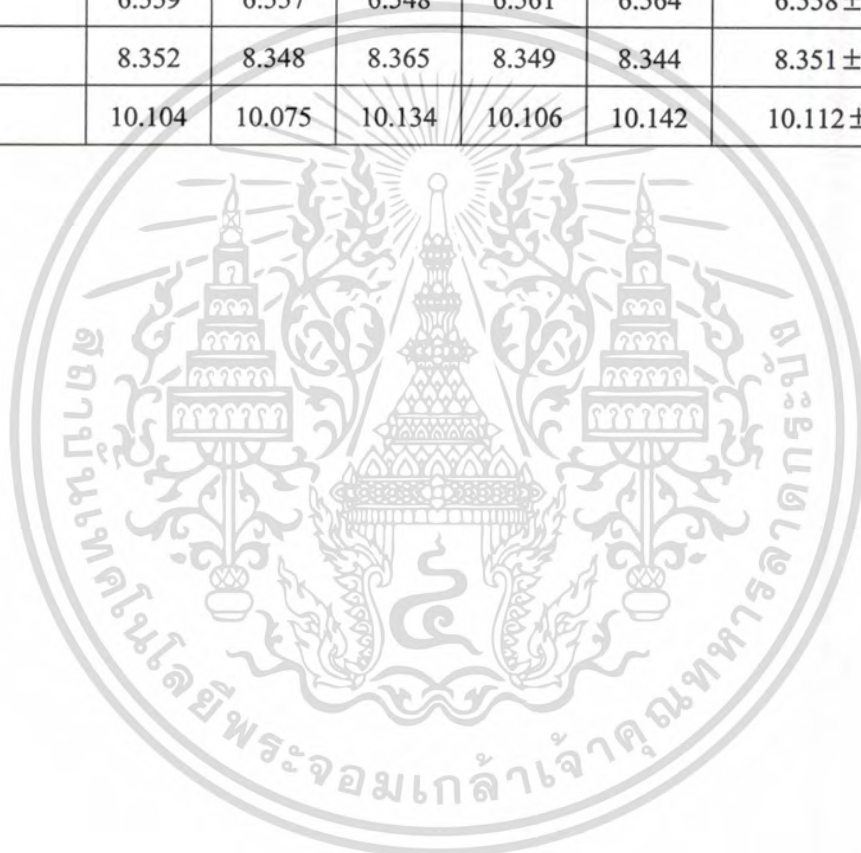
ง.1 ไชคติกโวลเทมโมแกรม และข้อมูลของไชคติกโวลเทมโมแกรมของ α -tocopherol ความเข้มข้นต่าง ๆ ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate 100 mV/s ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์



รูปที่ ง.1 ไชคติกโวลเทมโมแกรมของ α -tocopherol ความเข้มข้นต่าง ๆ ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate 100 mV/s ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ได้จากไซคลิกโวลเทมโมแกรมของ α -tocopherol ความเข้มข้นต่าง ๆ ในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 และ scan rate 100 mV/s ที่ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนที่

ความเข้มข้น (ppm)	กระแสไฟฟ้า (μ A)					ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (μ A)
	1	2	3	4	5	
20	2.132	2.144	2.138	2.135	2.142	2.138 \pm 0.005
40	4.252	4.231	4.237	4.217	4.245	4.236 \pm 0.013
60	6.559	6.557	6.548	6.561	6.564	6.558 \pm 0.006
80	8.352	8.348	8.365	8.349	8.344	8.351 \pm 0.008
100	10.104	10.075	10.134	10.106	10.142	10.112 \pm 0.003

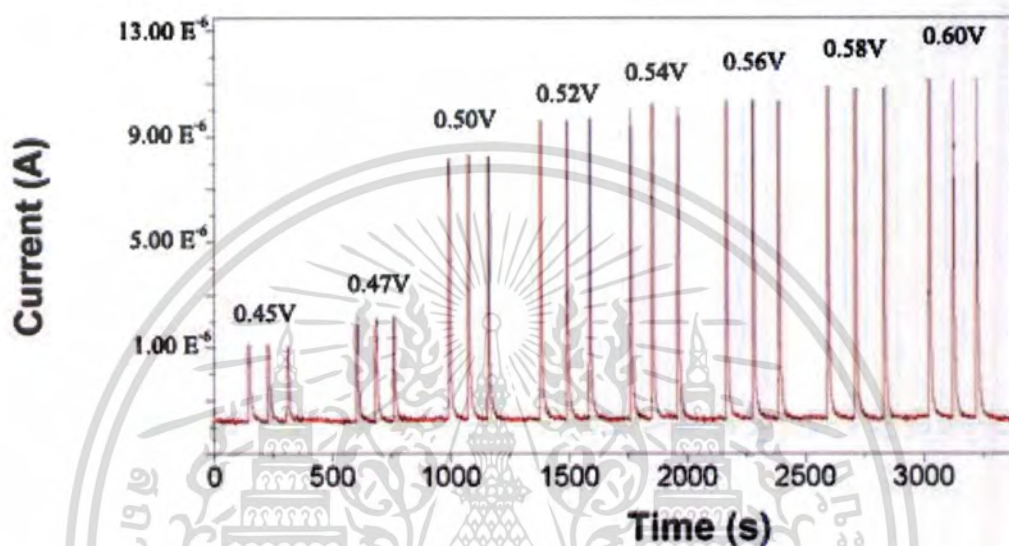


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.1 สัญญาณ และข้อมูลการตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วย
 ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์และข้อมูลของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ศักย์ไฟฟ้า
 0.45-0.60 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราเร็วในการไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์
 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่
 1 mL/min



รูปที่ จ.1 สัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยขั้วไฟฟ้า
 สกรีน-พรีนท์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ศักย์ไฟฟ้า
 0.45-0.60 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราเร็วในการไหลของสารละลายเคลื่อนที่
 บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิทริกในเมทานอล
 pH 2.5 ที่ 1 mL/min

ตารางที่ ๑.1 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วย
 ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรินท์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 100 ppm ศักย์ไฟฟ้า
 0.45-0.60 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราเร็วในการไหลของสารละลาย
 เคลื่อนที่บีฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริก
 ในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1 mL/min

ศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (10^{-6} A)	ค่าเฉลี่ย กระแสไฟฟ้า (10^{-6} A)	กระแสด้าน (10^{-6} A)	(S-B)	((S-B)/B) ratios	ค่าเฉลี่ย ((S-B)/B) ratios
0.45	1.134	1.179 \pm 0.069	0.143	0.991	6.930	7.242
	1.143			1.000	6.993	
	1.259			1.116	7.804	
0.47	2.663	2.689 \pm 0.135	0.182	2.481	13.632	13.773
	2.835			2.653	14.577	
	2.568			2.386	13.110	
0.50	8.448	8.427 \pm 0.028	0.207	8.241	39.811	39.708
	8.437			8.230	39.758	
	8.395			8.188	39.556	
0.52	9.857	9.845 \pm 0.045	0.221	9.636	43.602	43.546
	9.882			9.661	43.715	
	9.795			9.574	43.321	
0.54	10.124	10.132 \pm 0.039	0.230	9.894	43.017	43.054
	10.175			9.945	43.240	
	10.098			9.868	42.904	
0.56	10.278	10.292 \pm 0.039	0.253	10.025	39.624	39.680
	10.336			10.083	39.854	
	10.262			10.009	39.561	
0.58	10.558	10.531 \pm 0.118	0.271	10.278	37.926	37.847
	10.633			10.362	38.236	
	10.401			10.130	37.380	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 (ต่อ)

ศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (10^{-4} A)	ค่าเฉลี่ย กระแสไฟฟ้า (10^{-4} A)	กระแสที่ (10^{-4} A)	(S-B)	((S-B)/B) ratios	ค่าเฉลี่ย ((S-B)/B) ratios
0.60	10.759	10.689 ± 0.078	0.295	10.464	35.471	35.232
	10.605			10.310	34.949	
	10.701			10.406	35.275	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
การศึกษาผลของอัตราเร็วในการไหลที่เหมาะสมของสารละลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.1 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วย
 ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรินท์ของ α -tocotrienol ความเข้มข้น 100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V
 ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และ อัตราไหลของสารละลายเคลื่อน 0.06 M
 Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่อัตรา
 การไหลต่างๆ

อัตราเร็วในการไหล (mL/min)	กระแสไฟฟ้า (10^{-4} A)			ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (10^{-4} A)
	1	2	3	
0.50	8.397	8.105	8.564	8.345 ± 0.230
0.75	9.245	9.545	9.486	9.425 ± 0.159
1.00	10.162	10.245	10.065	10.157 ± 0.090
1.25	9.764	9.561	9.563	9.629 ± 0.117
1.50	9.045	8.956	9.261	9.087 ± 0.157
1.75	8.546	8.656	8.541	8.581 ± 0.065
2.00	8.146	8.321	8.532	8.333 ± 0.193

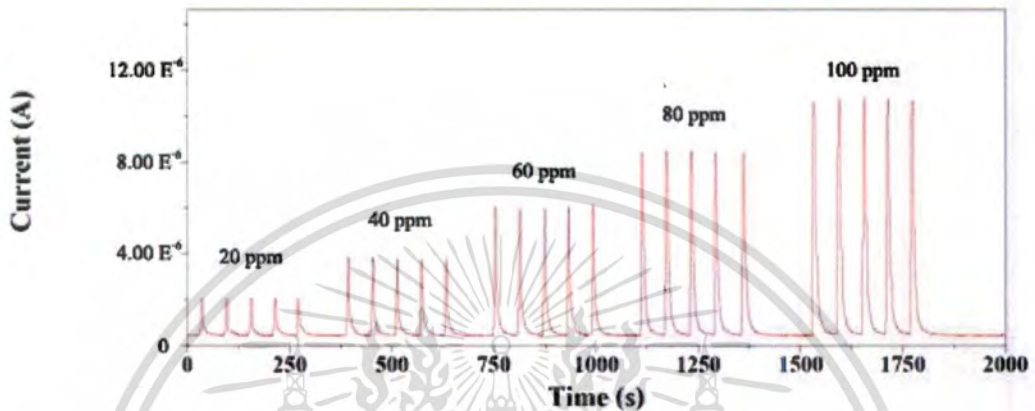
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
การศึกษาความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช.1 สัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้า สกรีน-พริ้นท์และข้อมูลของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 20-100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min



รูปที่ ช.1 สัญญาณตรวจวัด โดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้า สกรีน-พริ้นท์ของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 20-100 ppm ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่อัตรา การไหล 1.00 mL/min

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัด โดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วย
 ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนึ่งของสารละลาย α -tocopherol ความเข้มข้น 20-100 ppm ที่
 ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราไหลอัตราไหลของสารละลาย
 เคลื่อนที่ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกใน
 เมทานอล pH 2.5 ที่อัตราการไหล 1.00 mL/min

ความเข้มข้น (ppm)	กระแสไฟฟ้า (10^{-4} A)					ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า (10^{-4} A)
	1	2	3	4	5	
20	2.036	2.164	2.348	2.023	2.142	2.143 \pm 0.131
40	4.106	4.062	4.235	4.001	4.023	4.085 \pm 0.093
60	6.055	6.125	6.410	6.364	6.245	6.240 \pm 0.151
80	8.249	8.311	8.035	8.467	8.064	8.225 \pm 0.176
100	10.162	10.245	10.065	10.117	10.204	10.159 \pm 0.071

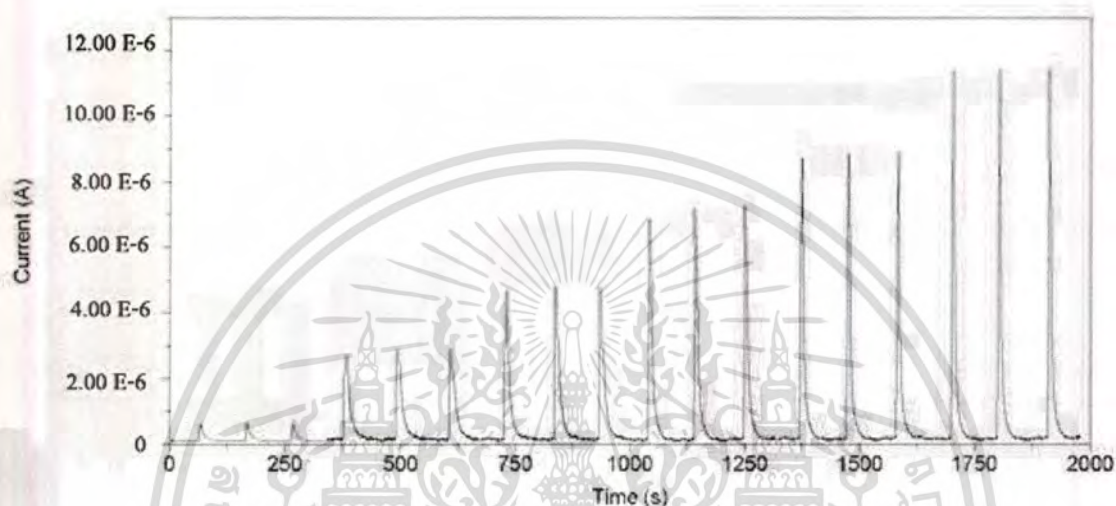
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
การประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช.1 สัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ และข้อมูลการหาความเข้มข้นในน้ำมันพืชแบบการเติมสารมาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราการไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min

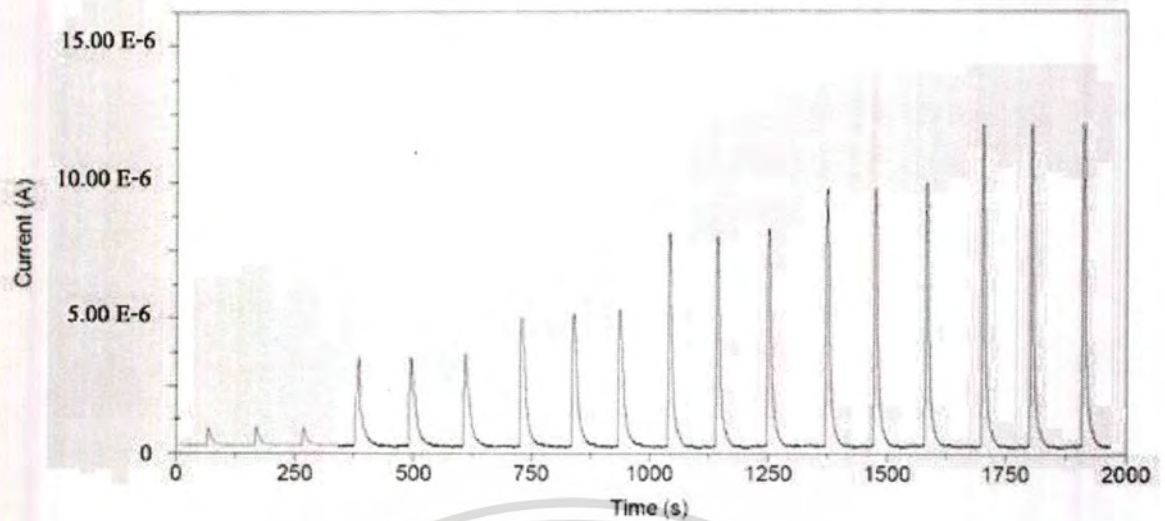


รูปที่ ช.1 สัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้าสกรีน-พรีนท์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันปาล์มตรามรดกแบบการเติมสารมาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วย
 ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันปาล์มตรามรดกแบบการเติม
 สารมาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง
 50 μ L และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M
 Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่
 1.00 mL/min

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ที่เติม (ppm)	กระแสไฟฟ้า (10^{-6} A)			ค่าเฉลี่ย กระแสไฟฟ้า (10^{-6} A)
	1	2	3	
0	0.419	0.421	0.417	0.442 ± 0.039
20	2.509	2.454	2.465	2.476 ± 0.029
40	4.555	4.554	4.604	4.571 ± 0.029
60	6.748	6.776	6.842	6.789 ± 0.048
80	8.812	8.835	8.772	8.806 ± 0.032
100	11.125	10.921	10.955	11.000 ± 0.109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



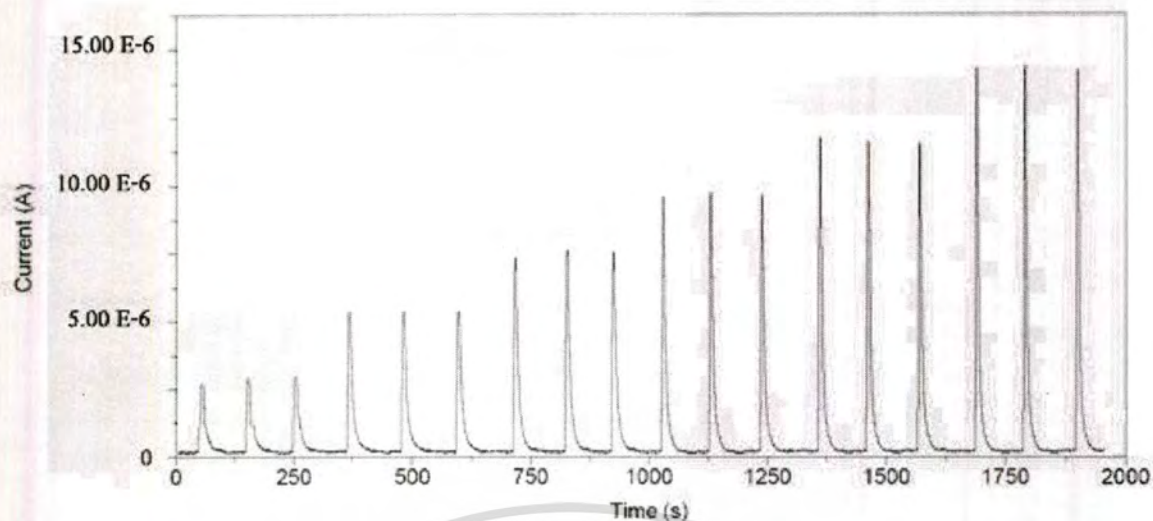
รูปที่ ๗.๒ สัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันถั่วเหลืองตรามรกดแบบการเติมสารมาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μ L และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซिटริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗.2 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วย
 ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันถั่วเหลืองตรามรกดแบบการ
 เติมสารมาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสาร
 ตัวอย่าง 50 μ L และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M
 Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่
 1.00 mL/min

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ที่เติม (ppm)	กระแสไฟฟ้า (10^{-6} A)			ค่าเฉลี่ย กระแสไฟฟ้า (10^{-6} A)
	1	2	3	
0	0.904	0.954	0.985	0.948 ± 0.041
20	3.175	3.121	3.198	3.165 ± 0.040
40	5.645	5.585	5.378	5.536 ± 0.140
60	8.384	8.248	8.176	8.269 ± 0.106
80	10.825	10.789	10.644	10.753 ± 0.096
100	13.086	12.954	12.964	12.998 ± 0.077

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗.3 สัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วยปั๊มไฟฟ้า สกรีน-พรีนซ์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันรำข้าวตราคิงแบบการเติมสารมาตรฐานของ สารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50 μL และอัตราการไหล อัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิติริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00 mL/min

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลสัญญาณตรวจวัดโดยเทคนิคแอมเพอร์เมทรีในระบบฉีดไหลต่อเนื่องด้วย
 ขั้วไฟฟ้าสกรีน-พรีนซ์ของการหาความเข้มข้นในน้ำมันรำข้าวตราคิงแบบการเติมสาร
 มาตรฐานของสารละลาย α -tocopherol ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.52 V ปริมาตรสารตัวอย่าง 50
 μL และอัตราการไหลอัตราไหลของสารละลายเคลื่อนที่บัฟเฟอร์ 0.06 M
 Tetrabutylammonium perchlorate และ 0.06 M กรดซิดริกในเมทานอล pH 2.5 ที่ 1.00
 mL/min

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน ที่เติม (ppm)	กระแสไฟฟ้า (10^{-6}A)			ค่าเฉลี่ย กระแสไฟฟ้า (10^{-6}A)
	1	2	3	
0	2.765	2.775	2.808	2.783 ± 0.022
20	5.258	5.397	5.213	5.290 ± 0.095
40	7.245	7.216	7.241	7.234 ± 0.016
60	9.416	9.541	9.721	9.559 ± 0.153
80	12.045	11.926	12.045	12.005 ± 0.069
100	14.154	14.166	14.191	14.170 ± 0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้