



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแคปไซซินในพริก
โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน

Development of electrochemical method for determination of capsaicin
in chilli peppers using screen-printed electrodes

ชื่อนิสิต นางสาวกัจจิรา ตั้งคจิวงกูร เลขประจำตัว 5833070523

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2561

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแคปไซซินในพริก
โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน

Development of electrochemical method for determination of capsaicin
in chilli peppers using screen-printed electrodes

โดย

นางสาวภักจิรา ตังคจิวงกูร

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

โครงการ การพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแคปไซซินในพริก
โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน

โดย นางสาวกัจจิรา ดังคจีวางกูร

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.จัญจุตา อุ่นเรืองศรี)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

..... หัวหน้าภาควิชาเคมี

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

วันที่ ๒๕ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๖๒

Project title Development of electrochemical method for determination of capsaicin in chilli peppers using screen-printed electrodes

Student Name Miss Pakjira Tungkachivangoon Student ID 5833070523

Advisor Name Janjira Panchompoo, D.Phil.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2018

Abstract

Chilli is one of the important economic spices and has primarily been a part of Thai culinary culture for a long time. Each chilli species typically has different pungent flavor. The spicy taste of chilli results from a chemical compound called “capsaicin”. The quantitative analysis of capsaicin can be done by several methods. In this work, the electrochemical technique has been developed for the detection of capsaicin as it is simple, sensitive and rapid, as well as the device can be miniaturized with small volume of solution used for the analysis. The measurement of capsaicin has been investigated in various types of supporting electrolytes by cyclic voltammetry (CV) and square wave voltammetry (SWV) at different types of screen-printed electrodes, prepared in the laboratory. The results show that capsaicin in 10% v/v ethanol and sulfuric acid electrolyte, recorded at the graphene screen-printed electrode, gives a well-define oxidation peak at a less positive potential value with the highest oxidation peak current. This developed electrochemical method is then applied to detect capsaicin in chilli sauce, and the obtained results are satisfactory.

Keywords: chilli, capsaicin, supporting electrolyte, cyclic voltammetry, square wave voltammometry, graphene screen-printed electrodes

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากความอนุเคราะห์ของอาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ เอื้อเฟื้อสถานที่และสารเคมีที่ใช้ในการทำงานวิจัย รวมถึงตรวจทาน แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งกำลังใจ และแรงจูงใจต่าง ๆ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา และ อาจารย์ ดร.จัญจดา อุ้นเรืองศรี ที่สละเวลาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบการวิจัย และตรวจสอบแก้ไขรายงานให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ปันรัตน์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือสำหรับทำงานวิจัย รวมถึงนางสาว สุรินทร์ยา ไตรภพ นักวิจัยหลังปริญญาเอกในกลุ่มวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา จอนุวัฒน์กุล และนางสาวสุชานา นารานถมล นิสิตปริญญาโทในกลุ่มวิจัยของอาจารย์ ดร.เจนจิรา ปานชมพู ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำขณะทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งในห้องเรียนและในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัย รวมถึงกำลังใจจากครอบครัวและเพื่อน ๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ.....	1
1.2. วัตถุประสงค์.....	2
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
1.4.1 เคมีไฟฟ้า (electrochemistry)	3
1.4.2 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า (electroanalytical chemistry)	3
1.4.2.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า (electrochemical cell).....	4
1.4.2.2 ขั้วไฟฟ้า (electrode).....	4
1.4.2.3 ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน (screen-printed electrode).....	5
1.4.3 โวลแทมเมตรี (voltammetry).....	5
1.4.3.1 ลิเนียร์สวீปโวลแทมเมตรี (linear sweep voltammetry).....	6
1.4.3.2 ไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry)	7
1.4.3.3 พัลส์โวลแทมเมตรี (pulse voltammetry).....	8
1.4.3.3.1 สแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry).....	8

1.4.4	ของเหลวไอออนิก (ionic liquid)	9
1.5.	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 2 การทดลอง		13
2.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	13
2.2	สารเคมี	13
2.3	การเตรียมสารละลาย.....	14
2.3.1	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 1 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M.....	14
2.3.2	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล.....	14
2.3.3	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M.....	14
2.3.4	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M.....	14
2.3.5	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 30% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M.....	15
2.3.6	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 40% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M.....	15
2.3.7	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M.....	15
2.3.8	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v [Emim][HSO ₄] ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M.....	15
2.3.9	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร.....	15
2.3.10	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร.....	16

2.3.11	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄]	16
2.3.12	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc]	16
2.3.13	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M.....	16
2.3.14	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M.....	16
2.3.15	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M.....	17
2.3.16	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] และกรดซัลฟิวริก 0.1 M	17
2.3.17	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M.....	17
2.3.18	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] และกรดอะซิติก 0.1 M.....	17
2.3.19	สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดอะซิติก 0.1 M.....	17
2.4	การเตรียมขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดต่าง ๆ	18
2.5	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี	19
2.6	การสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve)	19
2.7	การทดลอง.....	20
2.7.1	การศึกษาหาขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซิน	20
2.7.2	การศึกษาหาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน	20

2.7.3	การศึกษาผลของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) ต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน	22
2.7.4	การศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำ (reusability) ของขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่เตรียมเองในห้องปฏิบัติการ	22
2.7.5	การเปรียบเทียบการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคลิเนียร์สวEEP โวลแทมเมตรี (linear sweep voltammetry) และสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry).....	23
2.7.6	การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry)	23
2.7.7	การวิเคราะห์ปริมาณแคปไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี.....	23
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....		25
3.1	การศึกษาหาขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซิน	25
3.2	การศึกษาหาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน	27
3.2.1	ศึกษาหาปริมาณเอทานอลที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน	27
3.2.2	ศึกษาผลของของเหลวไอออนิกสำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน	29
3.2.3	ศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม (สารละลายผสมของเอทานอลและกรด 3 ชนิด) สำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน.....	38
3.3	การศึกษาผลของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) ต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน	40
3.4	การศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำ (reusability) ของขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่เตรียมเองในห้องปฏิบัติการ	43
3.5	การเปรียบเทียบการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคลิเนียร์สวEEP โวลแทมเมตรี (linear sweep voltammetry) และสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry)	44

3.6	การศึกษาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคสแควร์เวฟ โวลแทมเมตรี (square wave voltammetry).....	46
3.7	การสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve)	51
3.8	การวิเคราะห์ปริมาณแคปไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce ด้วยเทคนิค สแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry).....	54
บทที่ 4	สรุปผลการทดลอง.....	56
	เอกสารอ้างอิง.....	58
	ประวัติผู้วิจัย	60

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 1 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ (1) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (2) ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน และ (3) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกราฟีนพิมพ์สกรีน	27
ตารางที่ 3.2	กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (3) สารละลายผสมของ 30% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (4) สารละลายผสมของ 40% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน	29
ตารางที่ 3.3	กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน	31
ตารางที่ 3.4	กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v [Emim][HSO ₄] ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร (3) สารละลายผสมของ 10% เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร (4) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน	33

- ตารางที่ 3.5 กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้อาจจากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M และ (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน35
- ตารางที่ 3.6 กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้อาจจากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก 0.1 M และ (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน36
- ตารางที่ 3.7 กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้อาจจากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดอะซิติก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดอะซิติก 0.1 M และ (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน38
- ตารางที่ 3.8 กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้อาจจากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M และ (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน40
- ตารางที่ 3.9 กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้อาจจากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ กัน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน42
- ตารางที่ 3.10 กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้อาจจากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน44

ตารางที่ 3.11 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคลป์ไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ด้วยเทคนิคลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมตรี และสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยใช้ชั่วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....45

ตารางที่ 3.12 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคลป์ไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.25 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V โดยใช้ชั่วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....47

ตารางที่ 3.13 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคลป์ไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 10, 25 และ 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V โดยใช้ชั่วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน49

ตารางที่ 3.14 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคลป์ไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 2, 5, 8 และ 10 mV โดยใช้ชั่วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....50

ตารางที่ 3.15 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคลป์ไซซิน ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้ชั่วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....53

ตารางที่ 3.16 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคลป์ไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce) 0.2 g ที่สกัดด้วยเอทานอลปริมาตร 1 mL โดยใช้ชั่วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน55

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	โครงสร้างของแคปไซซิน2
รูปที่ 1.2	สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้าลิเนียร์สแกนของเทคนิคลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมตรี7
รูปที่ 1.3	สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้ารูปสามเหลี่ยมของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี7
รูปที่ 1.4	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี8
รูปที่ 1.5	สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้าสแควร์เวฟของเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี9
รูปที่ 1.6	ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของแคปไซซิน.....10
รูปที่ 2.1	ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการ.....18
รูปที่ 2.2	จุดเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ ของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน19
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce24
รูปที่ 3.1	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 1 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (สีชมพู) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกราฟีนพิมพ์สกรีน (สีน้ำเงิน) และขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน (สีเขียว).....26
รูปที่ 3.2	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีน้ำเงิน) สารละลายผสมของ 30% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีเขียว) และ สารละลายผสมของ 40% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีส้ม) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....28

- รูปที่ 3.3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] (สีชมพู) และสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] (สีน้ำเงิน) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....30
- รูปที่ 3.4 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v [Emim][HSO₄] ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร (สีน้ำเงิน) สารละลายผสมของ 10% เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร (สีเขียว) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีส้ม) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน32
- รูปที่ 3.5 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีน้ำเงิน) และสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีเขียว) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....34
- รูปที่ 3.6 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีน้ำเงิน) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน36

รูปที่ 3.7	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO ₄] และกรดอะซิติก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดอะซิติก 0.1 M และ (สีน้ำเงิน) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M (สีเขียว) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....	37
รูปที่ 3.8	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีน้ำเงิน) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M (สีเขียว) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....	39
รูปที่ 3.9	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน (แสดงเฉพาะสแกนแรก).....	41
รูปที่ 3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากที่สอง (square root) ของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....	42
รูปที่ 3.11	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....	44
รูปที่ 3.12	ลิเนียร์สวี่ปโวลแทมโมแกรม และสแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....	45
รูปที่ 3.13	สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.25 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E _{step}) 0.01 V โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....	47

- รูปที่ 3.14 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 10, 25 และ 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน48
- รูปที่ 3.15 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 2, 5, 8 และ 10 mV โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....50
- รูปที่ 3.16 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....52
- รูปที่ 3.17 กราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve) สำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน.....54
- รูปที่ 3.18 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce 0.2 g ที่สกัดด้วยเอทานอลปริมาตร 1 mL โดยทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน55

บทที่ 1

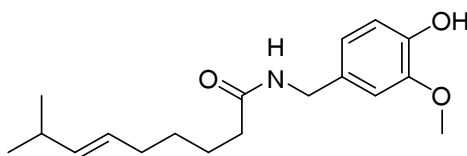
บทนำ

1.1. ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

“พริก” เป็นเครื่องเทศที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง และมีความสัมพันธ์กับวิถีชีวิตของคนไทยมาเป็นเวลาช้านาน เนื่องจากคนไทยชอบรับประทานอาหารที่มีรสเผ็ด พริกจึงเป็นส่วนประกอบของอาหารไทยชนิดต่าง ๆ พริกมีแหล่งกำเนิดในเขตร้อนของทวีปอเมริกาใต้และอเมริกากลาง และเชื่อว่าถูกนำเข้ามาในประเทศไทยโดยชาวโปรตุเกสเมื่อหลายร้อยปีที่ผ่านมา ซึ่งได้รับความนิยมในการนำมาปรุงอาหารเป็นอย่างมาก¹

พริก เป็นพืชในสกุลแคปซิกัม (genus *Capsicum*) ผลมีลักษณะเป็นกระเปาะ สีของผลมีทั้ง สีเหลือง สีเขียว สีม่วง สีส้ม และสีแดง² พริกอุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น วิตามินเอ วิตามินบี 6 วิตามินซี ธาตุแมกนีเซียม ธาตุโพแทสเซียม ธาตุเหล็ก โยอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารต่อต้านอนุมูลอิสระ ช่วยชะลอวัย ทำให้ร่างกายหลั่งสารเอ็นโดรฟิน ช่วยให้อารมณ์ดี ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกัน บำรุงสายตา ช่วยรักษาโรคหลอดเลือดหัวใจตีบตัน บรรเทาอาการเจ็บปวดต่าง ๆ ลดความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็ง และป้องกันการเกิดโรคหัวใจล้มเหลว³ จึงมีการนำพริกมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ทั้งในทางเภสัชกรรม และอุตสาหกรรมอาหาร โดยพริกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) *Capsicum frutescens* หรือพริกกลุ่มที่มีความเผ็ดมาก ได้แก่ พริกขี้หนู พริกเหลือง และ (2) *Capsicum annuum* หรือพริกกลุ่มที่มีความเผ็ดน้อย ได้แก่ พริกหยวก พริกชี้ฟ้า⁴ โดยสารสำคัญที่ทำให้พริกมีรสชาติเผ็ดร้อน คือ แคปไซซิน (capsaicin)

แคปไซซิน มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{18}H_{27}NO_3$ และมีชื่อทางเคมีตามระบบ IUPAC คือ 8-methyl-N-vanillyl-6-nonenamide โครงสร้างของแคปไซซินแสดงดังรูปที่ 1.1⁴ โดยแคปไซซินเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในไขมัน น้ำมัน และตัวทำละลายอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น แอลกอฮอล์ (alcohol) และเฮกเซน (hexane) เป็นต้น² แคปไซซินมักพบอยู่ในบริเวณรก (placenta) ของผลพริก โดยพริกแต่ละสายพันธุ์นั้นจะมีรสชาติความเผ็ดแตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ยังพบว่าพริกที่มีสภาพการเพาะปลูกที่แตกต่างกัน (ทั้งในด้านแหล่งเพาะปลูก วิธีการ หรือฤดูกาลในการเพาะปลูก) จะมีความเผ็ดไม่เท่ากันอีกด้วย⁵



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของแคปไซซิน

ในการวิเคราะห์หาปริมาณแคปไซซินทำได้หลายวิธี ตั้งแต่การทดสอบความเผ็ดแบบดั้งเดิมของวิลเบอร์ ลินคอล์น สโกวิลล์ (Wilbur Lincoln Scoville) เรียกว่าการทดสอบทางประสาทสัมผัสสโกวิลล์ (Scoville Organoleptic Test) เป็นต้นแบบของมาตรวัดสโกวิลล์ (Scoville scale) ซึ่งบอกระดับความเผ็ดร้อนของพริกได้ในหน่วยสโกวิลล์ (Scoville Heat Unit, SHU) โดยจะทำการสกัดสารแคปไซซินในพริกด้วยสารละลายแอลกอฮอล์ จากนั้นนำมาเจือจางในน้ำเชื่อม แล้วให้ผู้ทดลองที่ได้รับการฝึกฝนมาเป็นอย่างดีชิมจนกระทั่งไม่รับรู้ถึงความเผ็ดอีก การเจือจางนี้เองจะเป็นตัวบอกระดับความเผ็ดร้อนของพริกในหน่วยสโกวิลล์ แต่วิธีดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดคือ ค่าความเผ็ดที่ได้ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความชำนาญของผู้ชิมเป็นหลัก⁶ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความเผ็ดด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น โครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography, HPLC)⁷⁻⁹ แก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography, GC)¹⁰ แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)^{8,11} อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (electrochemical impedance spectroscopy, EIS)¹² แคปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส (capillary electrophoresis, CE)¹³ และสเปกโตรโฟโตเมตรี (spectrophotometry)^{9,14} เป็นต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นมีความแม่นยำสูง แต่เครื่องมือมีราคาแพง และไม่สะดวกในการพกพาไปตรวจวัดในสถานที่ต่าง ๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาวิธีการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย มีความไวสูง วิเคราะห์สารได้รวดเร็ว อุปกรณ์มีขนาดเล็ก และใช้สารปริมาณน้อยในการวิเคราะห์

1.2. วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ออกแบบและพัฒนาขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้สะดวก สามารถใช้แล้วทิ้งได้ สำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน

- 1.2.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซิน ณ สถานะต่าง ๆ ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรินที่เตรียมขึ้นเอง
- 1.2.3 ศึกษาหาสถานะที่เหมาะสมในการตรวจวัดแคปไซซิน และทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรินที่พัฒนาขึ้นนี้

1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ตัวรับรู้ทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรินซึ่งมีขนาดเล็ก สามารถพกพาได้สะดวก ใช้งานง่าย สำหรับการตรวจวัดแคปไซซินด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

1.4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.1 เคมีไฟฟ้า (electrochemistry)

เป็นวิชาเคมีแขนงหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้า (ศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ประจุไฟฟ้า) กับค่าทางเคมี (ความเข้มข้น ปริมาณของสาร) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้เคมีไฟฟ้าอย่างกว้างขวางทั้งในด้านปริมาณวิเคราะห์และคุณภาพวิเคราะห์ เช่น การชุบเคลือบโลหะ เซ็นเซอร์การวิเคราะห์ด้วยไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งจัดเป็นชนิดหนึ่งของเคมีวิเคราะห์ เรียกว่า เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า

1.4.2 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า (electroanalytical chemistry)

เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการให้และรับอิเล็กตรอนของสารที่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยสารหนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน มีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เรียกว่า สารนั้นถูกออกซิไดซ์ หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และอีกสารหนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน มีเลขออกซิเดชันลดลง เรียกว่า สารนั้นถูกรีดิวซ์ หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งปฏิกิริยารวมนี้ว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction)

เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

1. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นสารที่ต้องการตรวจวัดในสารละลายที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้
2. อุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า อาจเป็นโวลต์มิเตอร์และแอมมิเตอร์ สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าตามลำดับ
3. ขั้วไฟฟ้า ต้องมีอย่างน้อย 2 ขั้ว ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า

1.4.2.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า (electrochemical cell)

ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าในการให้หรือรับอิเล็กตรอนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาการให้หรือรับอิเล็กตรอนของแต่ละขั้วไฟฟ้านี้เรียกว่าครึ่งปฏิกิริยา (half reaction) โดยครึ่งเซลล์ที่มีการให้อิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นขั้วแอโนด (anode) ส่วนครึ่งเซลล์ที่มีการรับอิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นขั้วแคโทด (cathode) เซลล์เคมีไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เซลล์แกลวานิก (galvanic cell) เป็นเซลล์ที่ให้พลังงานไฟฟ้าจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ
2. เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (electrolytic cell) เป็นเซลล์ที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับ

1.4.2.2 ขั้วไฟฟ้า (electrode)

เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เคมีไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้า ซึ่งขั้วไฟฟ้าต้องอย่างน้อย 2 ขั้ว และไม่เกิน 3 ขั้ว ซึ่งแต่ละขั้วมีหน้าที่ตามชื่อขั้วไฟฟ้า ดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่สำคัญในการทำเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา สำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรี ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้า คือ มีขนาดเล็ก เพื่อให้มีพื้นที่สัมผัสสารตัวอย่างได้น้อย และอยู่ในสถานะโพลาริเซชัน ตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าใช้งาน เช่น แพลทินัม ทองคาร์บอนอสัณฐาน (glassy carbon) เป็นต้น¹⁵
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้ครบวงจรไฟฟ้า ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่ต้องมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในวงจรด้วยเสมอ โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอน ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณของสารตัวอย่างได้ ค่าศักย์ที่แสดงบนเครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้าเป็นค่าผลต่างของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่าง ตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เช่น ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน (standard hydrogen electrode, SHE) ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล (calomel electrode) ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (silver/silver chloride electrode, Ag/AgCl electrode) เป็นต้น¹⁶
3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ช่วยส่งผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน ไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารที่สนใจ สำหรับเทคนิคโวลแทมเมตรี

ขั้วไฟฟ้าช่วยมีลักษณะเป็นขั้วไฟฟ้าเฉื่อย คือ เป็นเพียงตัวนำไฟฟ้าที่ดี โดยขั้วไฟฟ้าช่วยต้องมีพื้นที่ผิวมากกว่าพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าใช้งาน ตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าช่วย เช่น ลวดแพลทินัม เป็นต้น¹⁵

1.4.2.3 ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน (screen-printed electrode)

ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีขนาดเล็ก โดยทั่วไป ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วย อยู่ด้วยกันบนวัสดุรองรับเดียวกัน โดยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่นิยมใช้คือ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วยที่นิยมใช้คือ คาร์บอน ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนนี้สามารถเตรียมได้เองในห้องปฏิบัติการโดยใช้การพิมพ์สกรีนหมึกลงบนวัสดุรองรับที่มีผิวเรียบ เช่น แผ่นโพลีเมอร์ ซึ่งสามารถนำมาปรับปรุงให้มีคุณสมบัติได้ตามความต้องการด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การผสมสารที่ต้องการปรับปรุงลงไปในหมึกที่ใช้พิมพ์สกรีนโดยตรง ข้อดีของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน คือ มีขนาดเล็ก ราคาไม่แพง ใช้งานง่าย ช่วยลดสัญญาณรบกวน (background) เนื่องจากขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับสารโดยตรง ลดการปนเปื้อน เนื่องจากสามารถใช้แล้วทิ้งได้ นอกจากนี้ยังสามารถพกพาไปตรวจวัดในสถานที่ต่าง ๆ ได้

เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิคหลัก คือ

1. โปเทนชิอเมตรี (potentiometry) เป็นเทคนิคที่มีการใช้มานาน จัดเป็นเซลล์กัลวานิก ใช้ขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ขั้วเท่านั้น สารตัวอย่างสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก แล้ววัดค่าความต่างศักย์ที่รอยต่อผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและสารละลายตัวอย่างภายใต้สภาวะสมดุล (ไม่มีกระแสไหลในวงจร)
2. โวลแทมเมตรี (voltammetry) จัดเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ใช้ขั้วไฟฟ้า 2 หรือ 3 ขั้ว โดยให้พลังงานศักย์มากพอในช่วงเวลาที่กำหนด สารตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยาที่หน้าขั้วไฟฟ้าใช้งาน ภายใต้สภาวะการเกิดโพลาริเซชัน (ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าระหว่างที่มีกระบวนการฟาราเดอิก โดยเกิดตรงรอยต่อระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและสารละลาย) จากนั้นจึงวัดค่ากระแสไฟฟ้า

1.4.3 โวลแทมเมตรี (voltammetry)

เป็นเทคนิคที่มีการกระตุ้นเซลล์ไฟฟ้าเคมีด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ กัน แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา¹⁷ เรียกปริมาณศักย์ไฟฟ้าในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ว่า สัญญาณกระตุ้น ซึ่งการให้สัญญาณกระตุ้นในรูปแบบ ระยะเวลา และปริมาณที่แตกต่างกัน

มีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง และการไหลของกระแสจากผลของปฏิกิริยาต่างกันด้วย สัญญาณกระตุ้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

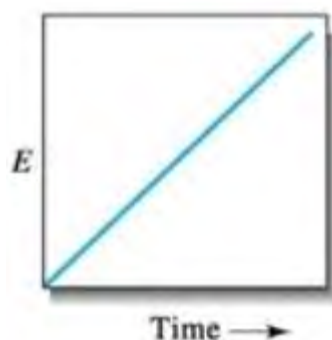
1. ลิเนียร์สแกน (linear scan) เป็นการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าอย่างเป็นสัดส่วนกับเวลา
2. รูปสามเหลี่ยม (triangular) เป็นการเพิ่มและลดศักย์ไฟฟ้าอย่างเป็นสัดส่วนกับเวลา
3. พัลส์ (pulse) เป็นการให้ศักย์ที่มีการเพิ่มและลดในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ

กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ตามศักย์ไฟฟ้าจะถูกนำมาสร้างกราฟ โดยให้แกน x เป็นค่าศักย์ไฟฟ้า และแกน y เป็นค่ากระแสไฟฟ้า เรียกกราฟนี้ว่า โวลแทมโมแกรม (voltammogram; volt-amp-diagram)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคลิเนียร์สวีปโวลแทมเมตรี (linear sweep voltammetry) ไชคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry) และสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry) สำหรับการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ

1.4.3.1 ลิเนียร์สวีปโวลแทมเมตรี (linear sweep voltammetry)

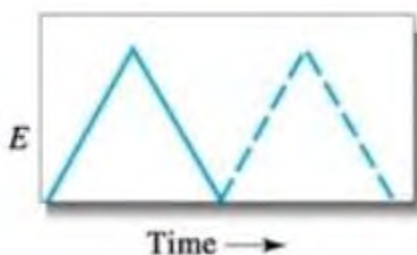
เป็นเทคนิคทางโวลแทมเมตริกกลุ่มแรกและซับซ้อนน้อยที่สุด โดยให้สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นเส้นตรง (linear scan) ดังรูปที่ 1.2 ภายใต้สภาวะการเกิดโพลาไรเซชัน อันเนื่องมาจากความเข้มข้น (concentration polarization) อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีการไหลของกระแสไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ จากการเกิดปฏิกิริยาของสารที่รอยต่อผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและสารละลาย เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปได้ระยะหนึ่ง โดยความเข้มข้นของไอออนสารตัวอย่างลดลง ไอออนที่ได้จากผลปฏิกิริยามากขึ้น ทำให้การแพร่ของไอออนสารตัวอย่างไปที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าและการแพร่ของไอออนที่ได้จากผลปฏิกิริยาออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเกิดช้าลง ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 1.2 สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้าลิเนียร์สแกนของเทคนิคลิเนียร์สควิปโวลแทมเมตรี¹⁸

1.4.3.2 ไชคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry)

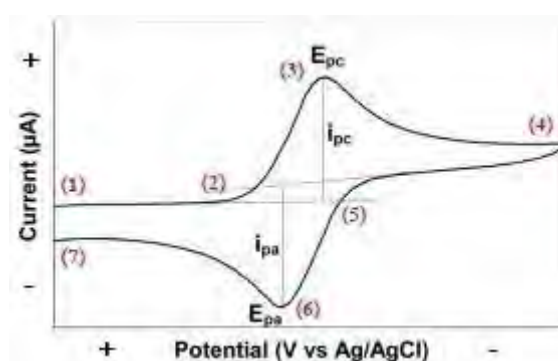
เป็นเทคนิคโวลแทมเมตรีที่นิยมใช้ โดยให้สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้าของวงจรเพิ่มอย่างเป็นสัดส่วนกับเวลา จนถึงค่าศักย์ที่กำหนด แล้วจึงกลับทิศทางของศักย์ไฟฟ้าในสัดส่วนเวลาเดิมจนกลับมาที่ค่าศักย์เดิม รูปแบบสัญญาณกระตุ้นมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 1.3 โดยจะต้องไม่มีการกวนสารละลายตัวอย่าง ไอออนจะเคลื่อนที่ด้วยกลไกการแพร่ (diffusion) เมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้ามากพอ จะเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร



รูปที่ 1.3 สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้ารูปสามเหลี่ยมของเทคนิคไชคลิกโวลแทมเมตรี¹⁸

เซลล์เคมีไฟฟ้าของไชคลิกโวลแทมเมตรีประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า มีทั้งแบบ 2 ขั้ว และ 3 ขั้ว อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกลือหนูน (supporting electrolyte) และมีอุปกรณ์ควบคุมศักย์ไฟฟ้า เรียกว่า โปเทนชิโอสแตต (potentiostat) เซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แปลงข้อมูล แสดงผลเป็นไชคลิกโวลแทมโมแกรม (cyclic voltammogram) ดังรูปที่ 1.4 แสดงปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (reversible reaction) ของสารที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า จากตำแหน่ง (1) ถึง (4) เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

โดยสารจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง (2) เมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้าที่มากพอ และมีการเพิ่มขึ้นของกระแสสูงสุดที่ตำแหน่ง (3) เรียกกระแสด้านบวกนี้ว่า กระแสแคโทด (i_{pc}) และมีศักย์ไฟฟ้าที่จุดยอดกระแสเป็น จุดยอดศักย์แคโทด (E_{pc}) จากนั้นมีการสลับเป็นลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง (4) เรียกว่า จุดศักย์สลับ (switching potential) ค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดจนถึงตำแหน่ง (7) ซึ่งเท่ากับตอนเริ่มต้น จากตำแหน่ง (4) ไป (7) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีการเพิ่มขึ้นของกระแสสูงสุดที่ตำแหน่ง (6) เรียกกระแสด้านลบนี้ว่า กระแสแอนโนด (i_{pa}) และมีศักย์ไฟฟ้าที่จุดยอดกระแสเป็น จุดยอดศักย์แอนโนด (E_{pa})¹⁶



รูปที่ 1.4 ไชคลิกโวลแทมโมแกรม ของเทคนิคไชคลิกโวลแทมเมตรี¹⁹

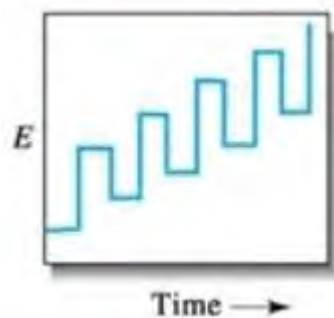
1.4.3.3 พัลส์โวลแทมเมตรี (pulse voltammetry)

เป็นเทคนิคทางโวลแทมเมตรีที่ปรับการให้สัญญาณกระตุ้นจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าอย่างเป็นสัดส่วนกับเวลา เป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในวงจรเป็นช่วง ๆ เรียกว่า พัลส์ (pulse) ซึ่งสามารถเลือกตำแหน่งการวัดค่ากระแสบนพัลส์แทนการบันทึกผลตลอดการวิเคราะห์ โดยเริ่มจากการให้ศักย์ไฟฟ้าแบบลิเนียร์สแกน แต่หยุดเป็นช่วง ๆ ที่แต่ละพัลส์มีค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เรียกว่า พัลส์ปกติ (normal pulse) แล้วจึงมีการปรับเป็นดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ (differential pulse) และสแควร์เวฟ (square wave) ตามลำดับ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการวิเคราะห์ได้มากขึ้น

1.4.3.3.1 สแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry)

เป็นพัลส์โวลแทมเมตรีที่มีการปรับเพิ่มเติมจากดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ ในการลดกระแสนอนฟาราเดอิก (non-faradaic current) เพื่อเพิ่มขีดความสามารถ และลดเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ สารตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบสแควร์เวฟโวลแทมเมตรีและไชคลิกโวลแทมเมตรี พบว่า การทำสแควร์เวฟโวลแทมเมตรีสามารถอธิบายกระบวนการที่ขั้วไฟฟ้าในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่กว้าง และ

วิเคราะห์สารตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่าไซคลิกโวลแทมเมตรี แต่การทำไซคลิกโวลแทมเมตรีที่มีความสะดวกของการปรับเวลาการสแกนศักย์ไฟฟ้าได้ดีกว่า



รูปที่ 1.5 สัญญาณกระตุ้นศักย์ไฟฟ้าสแควร์เวฟของเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี¹⁸

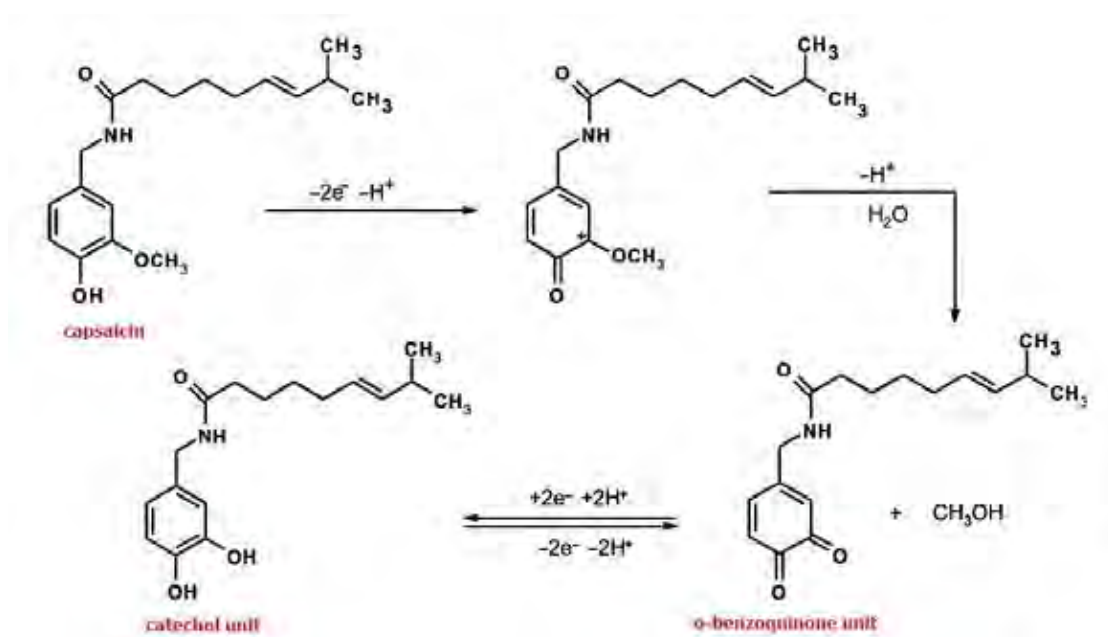
1.4.4 ของเหลวไอออนิก (ionic liquid)

เป็นสารประกอบไอออนิก (เกลือ) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ตามปกติ สารประกอบไอออนิกประกอบด้วย อะตอมของไอออนบวกและไอออนลบที่ยึดเหนี่ยวกันด้วย พันธะไอออนิก ส่วนของเหลวไอออนิกประกอบด้วยไอออนบวกอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่ไม่สมมาตร (bulky asymmetric organic cation) และไอออนลบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ยึดกันด้วยแรงคูลอมบ์ (coulomb interaction)²⁰ ของเหลวไอออนิกมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า และมีความเสถียร ที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในทางเคมีไฟฟ้า²¹

1.5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2008 Kachoosangi, R.T. และคณะ²² ได้ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินใน ซอสพริกในระบบสารละลายผสมของ 40% เอทานอลและ 60% Britton-Robinson buffer pH 1.0 ด้วยเทคนิคแอดซอร์บทีฟสตรipping โวลแทมเมตรี (adsorptive stripping voltammetry) โดยใช้ ขั้วไฟฟ้าไพโรไลติกแกรไฟต์ที่ดัดแปรด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (multiwalled carbon nanotube modified basal plane pyrolytic graphite electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ด้วยวิธีการ เติมสารมาตรฐาน (standard addition method) พบว่าวิธีนี้มีขีดจำกัดการตรวจวัด (limit of detection, LOD) คือ 0.31 μM และกลไกการเกิดปฏิกิริยาของแคปไซซิน แสดงดังรูปที่ 1.6 โดยเริ่มจากหมู่ ไฮดรอกซี (hydroxy group) ในแคปไซซินเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible oxidation) จากนั้น หมู่เมทอกซี (methoxy group) ในแคปไซซินเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

(hydrolysis) เกิดเป็นหมู่อร์โธ-เบน โซควิโนน (o-benzoquinone unit) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชัน/ออกซิเดชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ไปเป็นแคทาคอล (catechol unit) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ มีการสะสมของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผันกลับไม่ได้ (irreversible oxidation) ของแคปไซซินบนหน้าขั้วไฟฟ้า ทำให้ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (electrode passivation) ซึ่งส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าใช้งานนั้น ไม่สามารถใช้ตรวจวัดซ้ำได้ ต้องมีขั้นตอนการขัดขั้วไฟฟ้าและคัดแปรพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าใหม่ก่อนตรวจวัดทุกครั้ง



รูปที่ 1.6 ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของแคปไซซิน²²

ในปี ค.ศ. 2013 Randviir, E. P. และคณะ¹² ได้ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (electrochemical impedance spectroscopy) และไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่คัดแปรด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (single-walled carbon nanotube screen printed electrode) และผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube screen printed electrode) ผู้วิจัยพบว่า ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่คัดแปรด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นและเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าเหมาะสำหรับการตรวจวัดแคปไซซินที่ความเข้มข้นสูง ส่วนขั้วไฟฟ้า

พิมพ์สกรีนที่ดัดแปรด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวและเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี
เหมาะสำหรับการตรวจวัดแคปไซซินที่ความเข้มข้นต่ำ

ในปี ค.ศ. 2013 Yardim, Y. และคณะ⁴ ได้ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินและ
ไดไฮโดรแคปไซซินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกลือหนูน (supporting electrolyte) 4 ชนิด ได้แก่
กรดเปอร์คลอริก (perchloric acid) ความเข้มข้น 0.1 M, acetate buffer pH 4.8 ความเข้มข้น 0.1 M,
Britton-Robinson buffer pH 9 ความเข้มข้น 0.1 M และ phosphate buffer pH 2.5, 7.4 และ 12.0
ความเข้มข้น 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเพนซิลกราไฟต์ (pencil graphite electrode) ด้วยเทคนิค
สแควร์เวฟแอดซอร์บทีฟสตรipping โวลแทมเมตรี (square wave adsorptive stripping voltammetry)
ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.1 V เป็นเวลา 120 วินาที พบว่าฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินสามารถเห็นได้ชัดเจน
ที่สุด (well-defined) ใน Britton-Robinson buffer pH 9 โดยวิธีนี้มีขีดจำกัดการตรวจวัด (limit of
detection, LOD) ของแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซิน คือ 1.12 ng mL^{-1} ($3.7 \times 10^{-9} \text{ M}$) และ
 0.28 ng mL^{-1} ($9.1 \times 10^{-10} \text{ M}$) ตามลำดับ แต่วิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ การสกัดแคปไซซินจากพริกนั้น
มีสารประกอบที่รบกวนไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ (interfering electroactive compound) ปนออกมาด้วย
ซึ่งขั้วไฟฟ้าเพนซิลกราไฟต์นั้นจะมีความไว (sensitivity) และความเฉพาะ (individual) ในการ
ตรวจวัดมาก ภายหลังจากการแยกโดยโครมาโทกราฟี (chromatographic separation)

ในปี ค.ศ. 2015 Lau, B. B. Y. และคณะ²¹ ได้ศึกษาการสกัดแคปไซซินจากพริกสดด้วย
ของเหลวไอออนิก (ionic liquid) 2 ชนิด คือ 1-เอทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียมแอสเตต (1-ethyl-3-
methylimidazolium acetate, [Emim][OAc]) และ 1-เอทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียมไฮโดรเจนซัลเฟต
(1-ethyl-3-methylimidazolium hydrogen sulfate, [Emim][HSO₄]) จากนั้นทำการตรวจวัดในระบบ
สารละลายผสมของของเหลวไอออนิกและกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) ด้วยเทคนิค
ไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน (glassy carbon
electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน พบว่าเมื่อใช้ตัวสกัดเป็น [Emim][OAc] จะมีปริมาณกระแส (peak
current) ที่วัดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงสุด รองลงมาคือ [Emim][HSO₄] และเอทานอล
ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การสกัดแคปไซซินจากพริกโดยใช้ของเหลว
ไอออนิกเป็นตัวทำละลายนั้นให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงกว่าการสกัดโดยใช้เอทานอล
แต่วิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ ใช้สารปริมาณเยอะมากในการวิเคราะห์ เนื่องจากใช้ขั้วไฟฟ้า
ที่มีขนาดใหญ่ (macroelectrodes)

ในปี ค.ศ. 2016 Wang, Y. และคณะ⁶ ได้ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินด้วยเทคนิค
แอดซอร์บทีฟสตรipping โวลแทมเมตรี (adsorptive stripping voltammetry) และเทคนิค
ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์สตรipping โวลแทมเมตรี (differential pulse stripping voltammetry) โดยใช้

ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่ดัดแปรด้วย Ag/Ag₂O-loaded poly(sodium 4-styrenesulfonate) functionalized reduced graphene oxide composite (Ag/Ag₂O-PSS-rGO) เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode) พบว่าวิธีนี้มีขีดจำกัดการตรวจวัด (limit of detection, LOD) คือ 0.40 μ M

ในปี ค.ศ. 2018 Abdalla, A. A. และคณะ⁸ ได้ศึกษาการสกัดแคปไซซินจากพริกเขียวด้วย อะซิโตไนไตรล์ (acetonitrile) และตรวจวัดด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS/MS) แต่วิธีดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์มีราคาแพง และมีความยากในการเตรียมสารตัวอย่าง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมด พบว่า การตรวจวัดแคปไซซินสามารถทำได้หลายวิธี แต่การตรวจวัดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้านั้นมีข้อดีเหนือกว่าเทคนิคอื่น ๆ นั่นคือสามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว มีความไวในการตรวจวัดสูง เครื่องมือใช้งานง่าย สามารถพัฒนาให้อุปกรณ์ตรวจวัดมีขนาดเล็ก พกพาได้สะดวก และใช้สารปริมาณน้อยในการวิเคราะห์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาวิธีวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแคปไซซินในพริก โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ มีขนาดเล็ก ราคาไม่แพง และสามารถใช้งานได้

บทที่ 2

การทดลอง

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องโพเทนชิโอสแตต/กัลวานอสแตต PStTrace5.4 (PalmSens BV, the Netherlands)
2. คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม PStTrace5.4 (PalmSens BV, the Netherlands)
3. ไมโครปิเปตขนาด 0.02, 0.2 และ 1 mL (Eppendorf, Germany)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 5 ตำแหน่ง (Mettler-Toledo, Switzerland)
5. แบบสกรีนขั้วสำหรับขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
6. แผ่น PVC
7. เครื่องโซนิเคเตอร์ (sonicator) (Elma, Germany)
8. สายไฟปากจระเข้
9. เตาให้ความร้อน (hot plate)
10. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic stirrer)
11. ตู้อบความร้อน
12. ตู้ดูดความชื้น
13. เครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) (Velp scientifica, Italy)
14. หลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 และ 1.5 mL (Eppendorf, Germany)
15. ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 5 mL (Witeg, Germany)
16. เครื่องวัดพีเอช (Mettler toledo, Switzerland)

2.2 สารเคมี

1. capsaicin, $\geq 95\%$, from Capsicum sp. (Sigma-Aldrich, Singapore)
2. 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate ([Emim][OAc]), $\geq 95\%$ (Sigma-Aldrich, Singapore)
3. 1-ethyl-3-methylimidazolium hydrogen sulfate ([Emim][HSO₄]), 95% (Sigma-Aldrich, Singapore)
4. carbon sensor paste ink (Gwent group, United Kingdom)

5. carbon graphene sensor paste ink (Gwent group, United Kingdom)
6. silver/silver chloride ink (Gwent group, United Kingdom)
7. ethanol (Merck, Germany)
8. acetone (Merck, Germany)
9. hydrochloric acid (HCl) (Merck, Germany)
10. sulfuric acid (H₂SO₄) (Merck, Germany)
11. acetic acid (CH₃COOH) (Merck, Germany)
12. น้ำบริสุทธิ์ Milli-Q ความต้านทาน ≥ 18.2 M Ω cm จาก Milli-Q Ultrapure Water Purification System (Millipore, USA)
13. ตัวอย่างจริง ได้แก่ ซอสพริก Tabasco

2.3 การเตรียมสารละลาย

2.3.1 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 1 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M

ชั่งแคปไซซิน 0.00153 g ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 5 mL เติมเอทานอล 1 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 2.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.2 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล

ชั่งแคปไซซิน 0.00153 g ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

2.3.3 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M

ปิเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 10 μ L เติมเอทานอล 90 μ L เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 mL ด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.4 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M

ปิเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 10 μ L เติมเอทานอล 0.19 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 mL ด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.5 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 30% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M

ปิเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 10 μ L เติมเอทานอล 0.29 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 mL ด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.6 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 40% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M

ปิเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 10 μ L เติมเอทานอล 0.39 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 mL ด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.7 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M

ชั่งแคปไซซิน 0.00076 g ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 5 mL เติมเอทานอล 0.5 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 2.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

ปิเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.8 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v [Emim][HSO₄] ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M

ชั่งแคปไซซิน 0.00076 g ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 5 mL เติม [Emim][HSO₄] 1 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 2.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.9 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร

ชั่งแคปไซซิน 0.00076 g ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 5 mL เติมเอทานอล 0.5 mL เติม [Emim][HSO₄] 0.5 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 2.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.10 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร

ชั่งแคปไซซิน 0.00076 g ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 5 mL เติมเอทานอล 0.5 mL เติม [Emim][HSO₄] 1 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 1.75 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.11 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ใน [Emim][HSO₄]

ปีเปิดสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม [Emim][HSO₄] 0.9 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.12 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ใน [Emim][OAc]

ปีเปิดสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.5 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม [Emim][OAc] 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.13 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ใน [Emim][OAc] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M

ปีเปิดสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม [Emim][OAc] 0.1 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.14 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ในกรดซัลฟิวริก 0.1 M

ปีเปิดสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 0.25 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.15 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม [Emim][HSO₄] 0.1 mL เติม 0.2 M กรดไฮโดรคลอริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.16 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ใน [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก 0.1 M

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม [Emim][HSO₄] 0.1 mL เติม 0.2 M กรดซัลฟิวริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.17 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ในกรดอะซิติก 0.1 M

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม 0.2 M กรดอะซิติก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.3.18 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ใน [Emim][HSO₄] และกรดอะซิติก 0.1 M

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม [Emim][HSO₄] 0.1 mL เติม 0.2 M กรดอะซิติก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

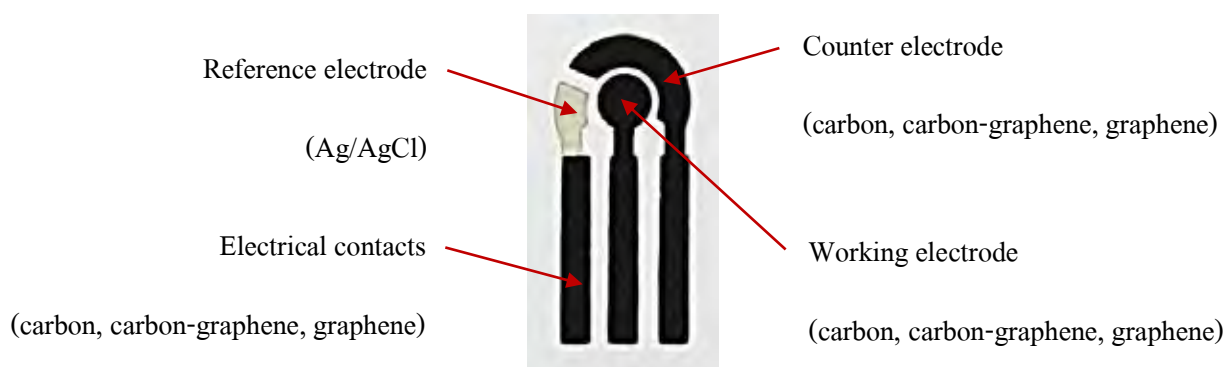
2.3.19 สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอล

ใน [Emim][OAc] และกรดอะซิติก 0.1 M

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 5 mM ในเอทานอล 0.1 mL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติม [Emim][OAc] 0.1 mL เติม 0.2 M กรดอะซิติก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q

2.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดต่าง ๆ (ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาร์บอน ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกราฟีน และขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน)

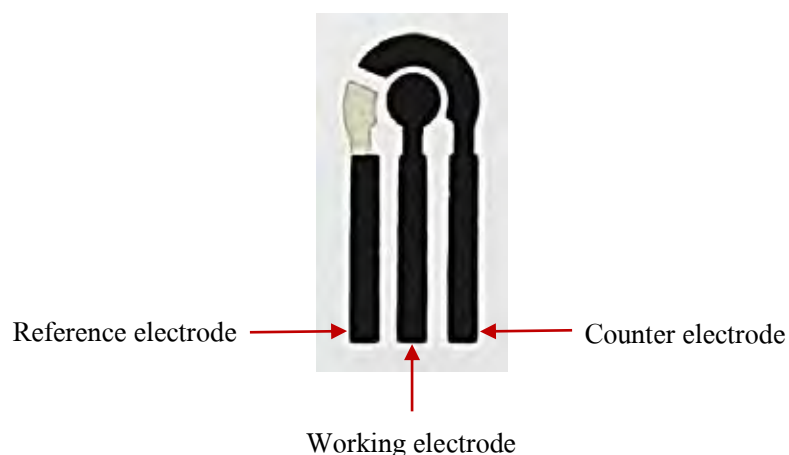
1. ตัดแผ่น PVC ให้มีขนาด 14×13 เซนติเมตร
2. นำมาทำความสะอาดโดยเช็ดด้วยเอทานอล (ethanol) แล้วรอให้แห้ง
3. นำแบบสกรีนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (acetone) ตามด้วยเอทานอล แล้วรอให้แห้ง
4. นำแบบสกรีนวางบนแผ่น PVC นำหมึกพิมพ์ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (silver/silver chloride ink) มาป้ายด้านข้างแบบสกรีน
5. ปาดหมึกพิมพ์ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ผ่านแบบสกรีนให้ทั่วช่องสกรีน 2 ครั้ง จากนั้นยกแบบสกรีนออก
6. ล้างแบบสกรีนด้วยอะซิโตน ตามด้วยเอทานอล แล้วรอให้แห้ง
7. นำแผ่น PVC ไปอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
8. ทำซ้ำข้อ 3 ถึง 7 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนเป็นแบบสกรีนขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วย โดยใช้หมึกพิมพ์คาร์บอน หมึกพิมพ์คาร์บอนผสมกราฟีนในอัตราส่วน 1:1 และหมึกพิมพ์กราฟีน ในการพิมพ์สกรีน
9. เก็บขั้วที่พร้อมใช้งานแล้วในตู้ดูดความชื้น



รูปที่ 2.1 ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้ในห้องปฏิบัติการ

2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี

1. เปิดเครื่องโพเทนชิโอสแตต (potentiostat) และเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม
2. นำสายไฟของขั้วไฟฟ้าเครื่องโพเทนชิโอสแตตต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน โดยสายสำหรับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (สีฟ้า) ต่อบริเวณแถบคาร์บอนด้านซ้าย สายสำหรับขั้วไฟฟ้าใช้งาน (สีแดง) ต่อบริเวณแถบคาร์บอนตรงกลาง และสายสำหรับขั้วไฟฟ้าช่วย (สีดำ) ต่อบริเวณแถบคาร์บอนด้านขวา ดังรูป



รูปที่ 2.2 จุดเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าต่าง ๆ ของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน

2.6 การสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve)

เตรียมสารละลายแคปไซซิน ความเข้มข้น 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70, 90 และ 100 μM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0 V ถึง +0.9 V และใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการตรวจวัด ดังนี้

เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลก่อนการตรวจวัด ($T_{\text{equilibration}}$) = 2 s

ขั้นของศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (step potential, E_{step}) = 10 mV

แอมพลิจูด (amplitude) = 0.1 V

ความถี่ (frequency) = 50 Hz

2.7 การทดลอง

2.7.1 การศึกษาหาขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซิน

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 1 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดต่าง ๆ ที่จะศึกษาซึ่งได้แก่ (1) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (2) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกราฟีนพิมพ์สกรีน และ (3) ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน จากนั้นศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิก-โวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) 0.05 V/s

2.7.2 การศึกษาหาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

2.7.2.1 ศึกษาหาปริมาณเอทานอลที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (3) สารละลายผสมของ 30% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M และ (4) สารละลายผสมของ 40% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 V ถึง +0.8 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.05 V/s

2.7.2.2 ศึกษาผลของของเหลวไอออนิกสำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน

2.7.2.2.1 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอลและของเหลวไอออนิก 2 ชนิด

สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.05 V/s

2.7.2.2.2 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอล [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v [Emim][HSO₄] ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน ([Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร) (3) สารละลายผสมของ 10% เอทานอลใน ([Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร) (4) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.05 V/s

2.7.2.2.3 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอลของเหลวไอออนิก 2 ชนิด และกรดไฮโดรคลอริก

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.05 V/s

2.7.2.2.4 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอล [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.05 V/s

2.7.2.2.5 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอลของเหลวไอออนิก 2 ชนิด และกรดอะซิติก

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดอะซิติก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดอะซิติก 0.1 M (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.05 V/s

2.7.2.3 ศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม (สารละลายผสมของเอทานอลและกรด 3 ชนิด) สำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิก-โวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.05 V/s

2.7.3 การศึกษาผลของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) ต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน จากนั้นศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.01, 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.2 V/s ตามลำดับ

2.7.4 การศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำ (reusability) ของขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่เตรียมเองในห้องปฏิบัติการ

ปีเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน โดยศึกษาและเปรียบเทียบสัญญาณทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินบนขั้วไฟฟ้าทั้งหมด

3 ชั่วโมงด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง $+0.9$ V และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 0.05 V/s

2.7.5 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมตรี (linear sweep voltammetry) และสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry)

ปิเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน โดยศึกษาและเปรียบเทียบสัญญาณทางเคมีไฟฟ้าของแคปไซซินบนหน้าขั้วไฟฟ้า ด้วยเทคนิคลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0 V ถึง $+0.9$ V ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล ($t_{\text{equilibration}} = 2$ s) ขั้นของศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (step potential, $E_{\text{step}} = 0.01$ V) และอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) = 0.05 V/s ส่วนเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี จะสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วงเดียวกัน เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุล และขั้นของศักย์ไฟฟ้าที่ให้เท่ากัน ใช้ค่าแอมพลิจูด (amplitude) = 0.1 V และความถี่ (frequency) = 50 Hz

2.7.6 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry)

ปิเปตสารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ที่เตรียมไว้มาปริมาตร 100 μ L หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน แล้วเริ่มทดลองโดยใช้เทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0 V ถึง $+0.9$ V ใช้ช่วงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการตรวจวัด ดังนี้

เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลก่อนการตรวจวัด ($t_{\text{equilibration}} = 2$ s

ขั้นของศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (step potential, $E_{\text{step}} = 2$ ถึง 10 mV

แอมพลิจูด (amplitude) = 0.05 ถึง 0.25 V

ความถี่ (frequency) = 10 ถึง 50 Hz

2.7.7 การวิเคราะห์ปริมาณแคปไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี

ซึ่งตัวอย่างซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce 0.2 g ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1.5 mL เติมเอทานอล 1 mL คนสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็ว 5000 rpm อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนสารละลายตัวอย่างเก็บไว้ จากนั้น

ปิเปตสารละลายตัวอย่างนี้มา 100 μL ลงในหลอดไมโครทิวบ์ขนาด 1 mL เติมกรดซัลฟิวริก 0.5 mL แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 mL ด้วยน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q จากนั้นปิเปตสารละลายที่เตรียมได้นี้มา ปริมาตร 100 μL หยดลงบนหน้าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน แล้วตรวจวัดด้วยเทคนิค สแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0 V ถึง +0.9 V และใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล ก่อนการตรวจวัด ($t_{\text{equilibration}}$) = 2 s ชั้นของศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (step potential, E_{step}) = 0.01 V แอมพลิจูด (amplitude) = 0.1 V และความถี่ (frequency) = 50 Hz



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce

บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

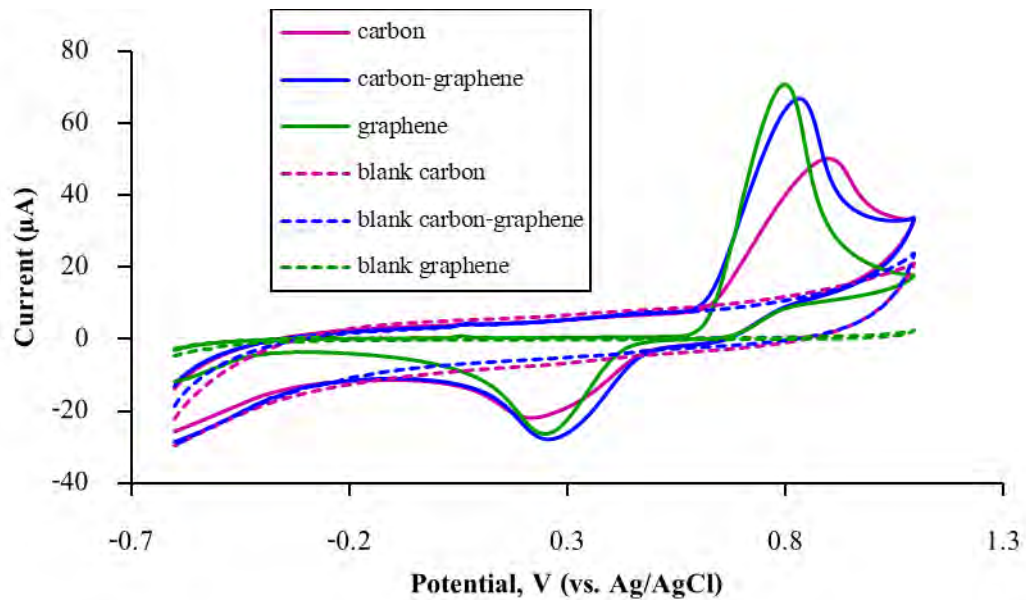
งานวิจัยนี้ได้พัฒนาการตรวจวัดแคปไซซิน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ได้ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้น และนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการหาแคปไซซินในตัวอย่างซอสพริกซึ่งถูกสกัดด้วยเอทานอล ได้ผลการทดลองดังนี้

3.1 การศึกษาหาขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซิน

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดต่าง ๆ ที่ออกแบบและเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ สำหรับการวิเคราะห์แคปไซซินในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ (1) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (2) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกราฟีนพิมพ์สกรีน และ (3) ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V vs Ag/AgCl ต่อเนื่องกัน 3 สแกน (3 consecutive scans) และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 V/s

จากการทดลองวิเคราะห์แคปไซซิน ความเข้มข้น 1 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1 (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่า แคปไซซินสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้บนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนทั้ง 3 ชนิดนี้ และพีกออกซิเดชัน (oxidation peak) ของแคปไซซินเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ +0.80 ถึง +0.90 V (vs. Ag/AgCl) แต่อย่างไรก็ตาม พีกออกซิเดชันของแคปไซซินบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีนนั้นมีลักษณะกว้าง (broad) ทำให้ไม่สามารถเห็นความเป็นพีกได้ชัดเจน (ill-defined peak) อีกทั้งค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของพีกออกซิเดชัน (oxidation peak current) ที่วัดได้นั้นมีค่าต่ำที่สุด (41.17 μA) เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกราฟีนพิมพ์สกรีน (57.89 μA) และขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่ให้ค่ากระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันของแคปไซซินเฉลี่ยสูงสุด คือ 69.25 μA และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 4.85 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ พีกออกซิเดชันของแคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนนี้เกิดที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ +0.80 V (vs. Ag/AgCl) ซึ่งเลื่อนมาทางศักย์ไฟฟ้าด้านที่เป็นบวกน้อยลง แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้านี้มีส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคปไซซินเกิดได้ง่าย

ขึ้นเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ศึกษามา ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนสำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน



รูปที่ 3.1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 1 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (สีชมพู) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกราฟีนพิมพ์สกรีน (สีน้ำเงิน) และขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน (สีเขียว)

ตารางที่ 3.1 กระแสไฟฟ้าของฟีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 1 mM ในสารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ (1) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (2) ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน และ (3) ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกราฟีนพิมพ์สกรีน

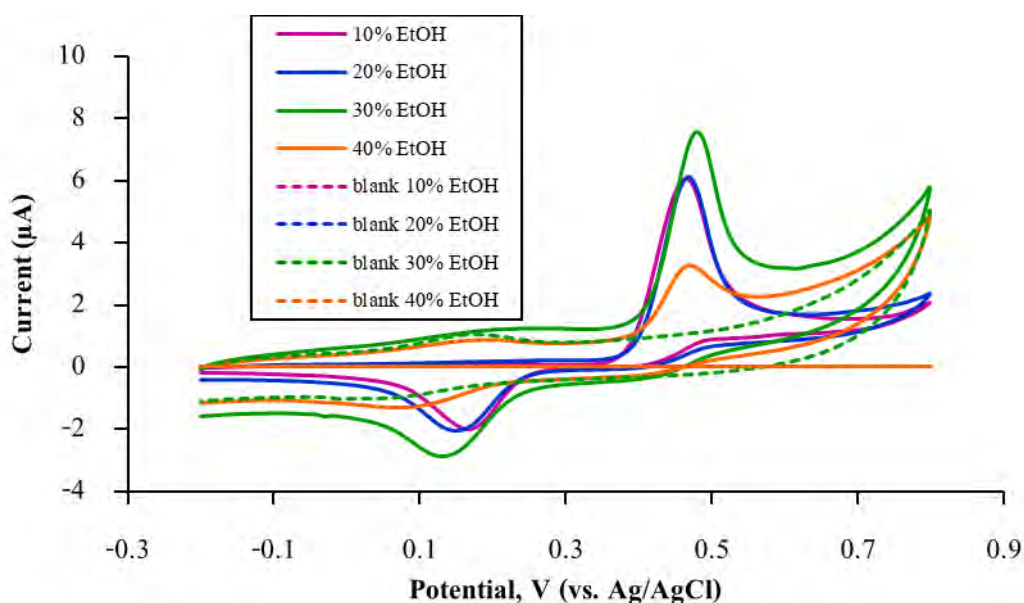
ชนิดของขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน	กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
คาร์บอน	40.22	40.73	42.55	41.17	2.98
คาร์บอนกราฟีน	57.02	57.57	59.08	57.89	1.84
กราฟีน	72.15	70.04	65.57	69.25	4.85

3.2 การศึกษาหาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

3.2.1 ศึกษาหาปริมาณเอทานอลที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน

หลังจากเลือกขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนมาใช้ในการทดลองแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (3) สารละลายผสมของ 30% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M และ (4) สารละลายผสมของ 40% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่ออกแบบและเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 V ถึง +0.8 V (vs. Ag/AgCl) ต่อเนื่องกัน 3 สแกน และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 V/s จากการทดลองวิเคราะห์แคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ นั้นได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.2 (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ พบว่า ในสารละลายผสมที่มีเอทานอลอยู่ 40% v/v จะให้กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินต่ำที่สุด ($2.63 \mu\text{A}$) และในสารละลายผสมที่มีเอทานอลอยู่ 30% v/v นั้น จะมีสัญญาณของกระแสพื้นหลัง (background current) ของสารละลายแบบดังก์ (blank solution) สูง ซึ่งอาจจะรบกวนการตรวจวัดแคปไซซินได้ แต่เมื่อทำการศึกษาใน

สารละลายผสมของ 10% v/v และ 20% v/v เอทานอล พบว่า กระแสพื้นหลัง (background current) ของละลายเบลงค์ (blank solution) ในระบบดังกล่าวมีลักษณะเรียบ และไม่มีฟีกออกซิเดชันของเบลงค์รบกวนการตรวจวัด นอกจากนี้ สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v และ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M นั้นให้ค่ากระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้ใกล้เคียงกัน คือ 5.93 และ 5.61 μA และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 0.97 และ 3.01 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ซึ่งเป็นสัดส่วนของเอทานอลที่ใช้น้อยที่สุด



รูปที่ 3.2 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีน้ำเงิน) สารละลายผสมของ 30% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีเขียว) และสารละลายผสมของ 40% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีส้ม) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.2 กระแสไฟฟ้าของฟีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 20% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (3) สารละลายผสมของ 30% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (4) สารละลายผสมของ 40% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

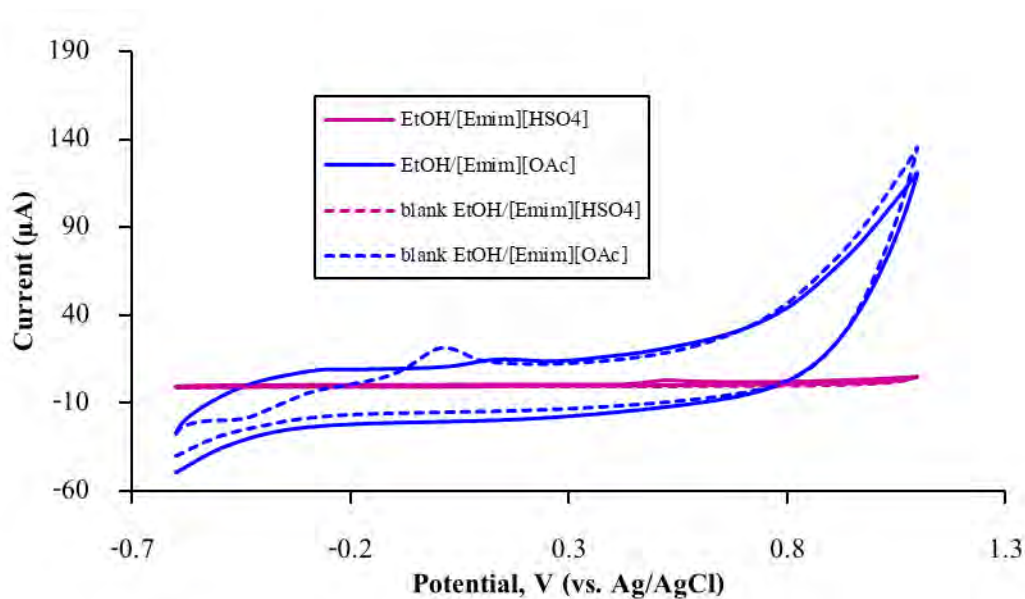
% v/v เอทานอลใน กรดซัลฟิวริก 0.1 M	กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชัน ที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของ ฟีกออกซิเดชันที่ วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน สัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	5.86	5.96	5.97	5.93	0.97
20	5.42	5.67	5.74	5.61	3.01
30	5.92	5.18	5.59	5.56	6.70
40	3.32	2.27	2.31	2.63	22.61

3.2.2 ศึกษาผลของของเหลวไอออนิกสำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน

3.2.2.1 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอลและของเหลวไอออนิก 2 ชนิด

ต่อมาผู้วิจัยได้นำของเหลวไอออนิก (ionic liquid) มาใช้เพื่อเพิ่มค่าความไวในการตรวจวัด (sensitivity) โดยทำการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน $[\text{Emim}][\text{HSO}_4]$ และ (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน $[\text{Emim}][\text{OAc}]$ โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่ออกแบบและเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) ต่อเนื่องกัน 3 สแกน และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 V/s จากการทดลองวิเคราะห์แคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ นั้น ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3 (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่า ในสารละลายผสมทั้งสองให้กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.33 และ 3.78 μA และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 5.06 และ 4.77 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสของฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินในระบบที่มีเอทานอล (10% v/v) ในของเหลวไอออนิกนั้นมีค่าต่ำกว่าฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินในระบบที่มีเอทานอล (10% v/v) ในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ที่ได้ศึกษาไปแล้ว อีกทั้งกระแสพื้นหลัง (background current) ของสารละลายเบลงค์ (blank solution) ในระบบที่มี [Emim][OAc] นั้นมีค่าสูงอีกด้วย



รูปที่ 3.3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] (สีชมพู) และสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] (สีน้ำเงิน) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.3 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีโดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

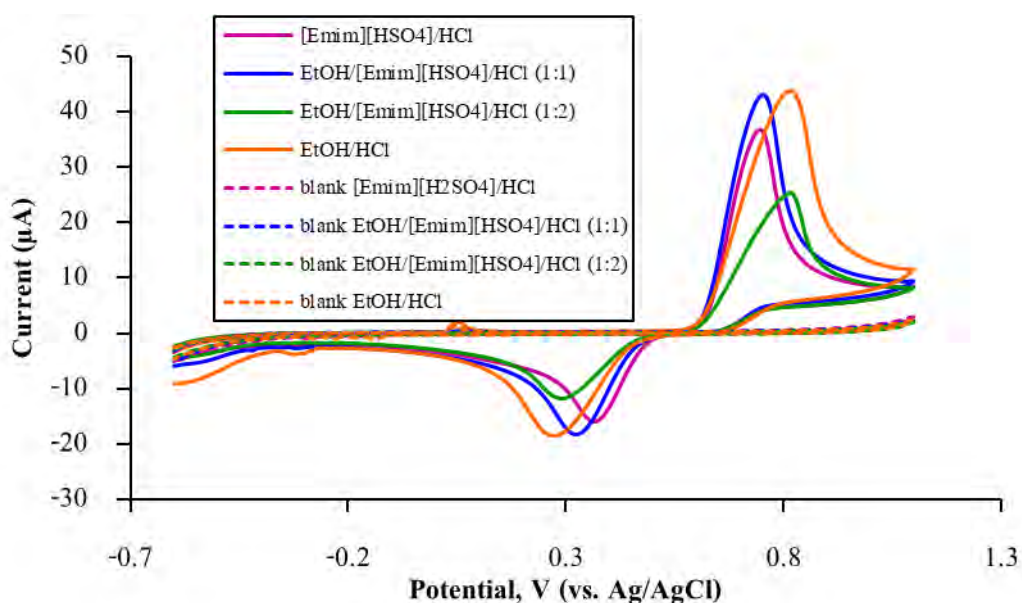
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	กระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
EtOH/[Emim][HSO ₄]	2.41	2.20	2.38	2.33	5.06
EtOH/[Emim][OAc]	3.91	3.65	-*	3.78	4.77

* ไม่พบสัญญาณ ซึ่งอาจเกิดจากขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่นำมาใช้นี้มีความไวทางไฟฟ้าแตกต่างจากขั้วอื่นที่เตรียมขึ้นพร้อมกัน

3.2.2.2 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอล [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก

ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มสัดส่วนของของเหลวไอออนิก เพื่อศึกษาว่าของเหลวไอออนิกส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันลดลงหรือไม่ โดยทำการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v [Emim][HSO₄] ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีเอทานอล) (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน ([Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร) (3) สารละลายผสมของ 10% เอทานอลใน ([Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร) (4) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มี [Emim][HSO₄]) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่ออกแบบและเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) ต่อเนื่องกัน 3 สแกน และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 V/s จากการทดลองวิเคราะห์แคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ นี้ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4 (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่า ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (ที่ไม่มี [Emim][HSO₄]) จะให้ค่ากระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันของ

แคปไซซินที่วัดได้สูงที่สุด (43.47 μA) ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน $[\text{Emim}][\text{HSO}_4]$ และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร (42.54 μA) ผู้วิจัยจึงได้ทำการเพิ่มอัตราส่วนของ $[\text{Emim}][\text{HSO}_4]$ และกรดไฮโดรคลอริก เป็น 1:2 โดยปริมาตร พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินลดลงเหลือ 24.59 μA แสดงให้เห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินนั้นลดลงในระบบที่มี $[\text{Emim}][\text{HSO}_4]$ ผสมอยู่



รูปที่ 3.4 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v $[\text{Emim}][\text{HSO}_4]$ ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน $[\text{Emim}][\text{HSO}_4]$ และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร (สีน้ำเงิน) สารละลายผสมของ 10% เอทานอลใน $[\text{Emim}][\text{HSO}_4]$ และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร (สีเขียว) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีส้ม) โดยใช้หัวไฟฟ้ากราไฟท์พิมพ์สกรีน

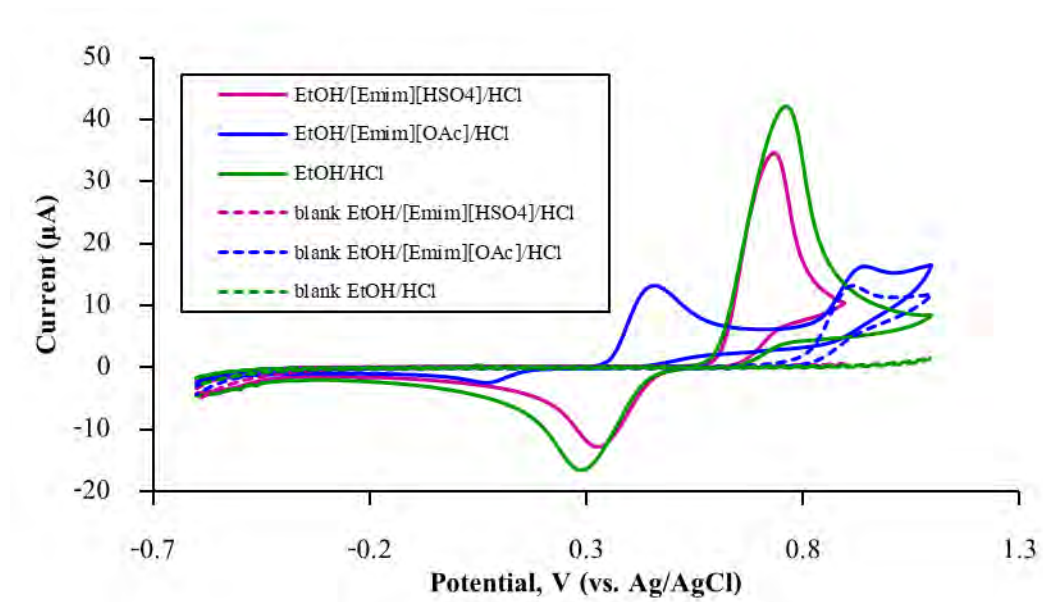
ตารางที่ 3.4 กระแสไฟฟ้าของฟีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v [Emim][HSO₄] ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร (3) สารละลายผสมของ 10% เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร (4) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราไฟท์พิมพ์สกรีน

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
	[Emim][HSO ₄]/HCl	36.28	34.85		
EtOH/[Emim][HSO ₄]/HCl (1:2)	25.13	23.42	25.23	24.59	4.14
EtOH/[Emim][HSO ₄]/HCl (1:1)	43.42	41.49	42.71	42.54	2.29
EtOH/HCl	43.04	43.72	43.65	43.47	0.86

3.2.2.3 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอล ของเหลวไอออนิก 2 ชนิด และกรดไฮโดรคลอริก

โดยทำการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M และ (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีของเหลวไอออนิกผสมอยู่) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราไฟท์พิมพ์สกรีนที่ออกแบบและเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) ต่อเนื่องกัน 3 สแกน และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 V/s จากการทดลองวิเคราะห์แคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ นี้ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5 (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่าในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M จะให้ค่ากระแสไฟฟ้าของ

พิกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้สูงที่สุด ($42.65 \mu\text{A}$) ดังแสดงในตารางที่ 3.5



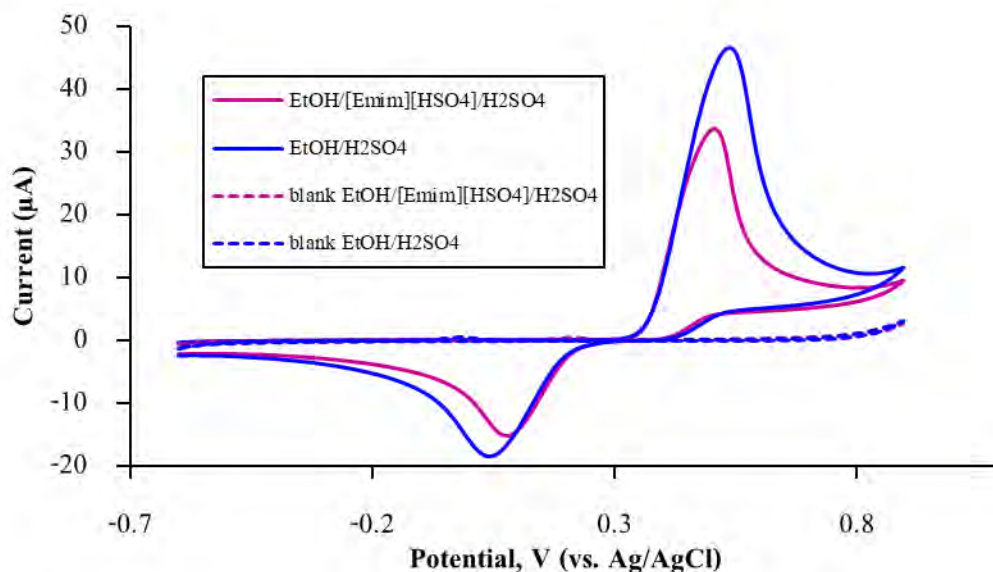
รูปที่ 3.5 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีน้ำเงิน) และสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีเขียว) โดยใช้หัวไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.5 กระแสไฟฟ้าของฟีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M และ (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
EtOH/[Emim][HSO ₄]/HCl	37.52	34.30	34.26	35.36	5.29
EtOH/[Emim][OAc]/HCl	12.59	12.96	12.66	12.74	1.54
EtOH/HCl	41.70	45.88	40.38	42.65	6.73

3.2.2.4 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอล [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก

โดยทำการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก 0.1 M และ (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่ออกแบบและเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) ต่อเนื่องกัน 3 สแกน และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 V/s จากการทดลองวิเคราะห์แคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่า ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ให้ค่ากระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้สูงที่สุด (44.70 μA) ดังแสดงในตารางที่ 3.6



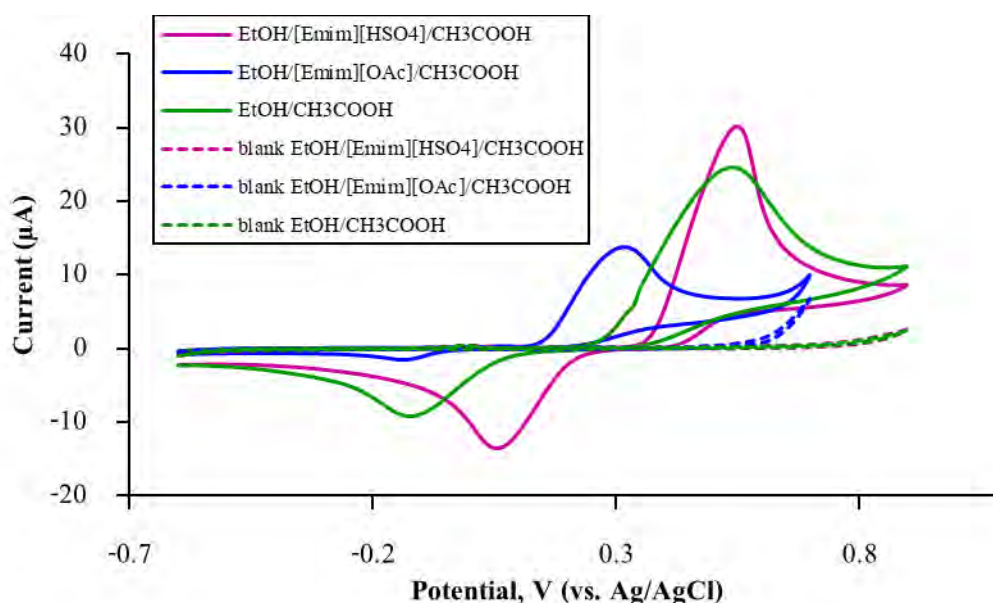
รูปที่ 3.6 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีน้ำเงิน) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราไฟท์พิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.6 กระแสไฟฟ้าของพีคที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดซัลฟิวริก 0.1 M และ (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไชคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราไฟท์พิมพ์สกรีน

สารละลาย อิเล็กโทรไลต์	กระแสไฟฟ้าของพีคออกซิเดชัน ที่วัดได้ (µA)			กระแสไฟฟ้า ของพีคออกซิ เดชันที่วัดได้ เฉลี่ย (µA)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน สัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
EtOH/[Emim][HSO ₄]/H ₂ SO ₄	32.02	33.48	35.22	33.57	4.77
EtOH/H ₂ SO ₄	38.71	46.48	48.91	44.70	11.92

3.2.2.5 ศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของเอทานอล ของเหลวไอออนิก 2 ชนิด และกรดอะซิติก

โดยทำการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดอะซิติก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดอะซิติก 0.1 M และ (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่ออกแบบและเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) ต่อเนื่องกัน 3 สแกน และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 V/s จากการทดลองวิเคราะห์แคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3 (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่า สารละลายแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดอะซิติก 0.1 M ให้ค่ากระแสไฟฟ้าของฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้สูงที่สุด (29.09 μ A) ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งในระบบที่มีกรดอะซิติกให้ค่ากระแสโดยเฉลี่ยค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับในระบบที่มีกรดซัลฟิวริก



รูปที่ 3.7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้ (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดอะซิติก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน

[Emim][OAc] และกรดอะซิติก 0.1 M และ (สีน้ำเงิน) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M (สีเขียว) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราไฟท์พิมพ์สกรีน

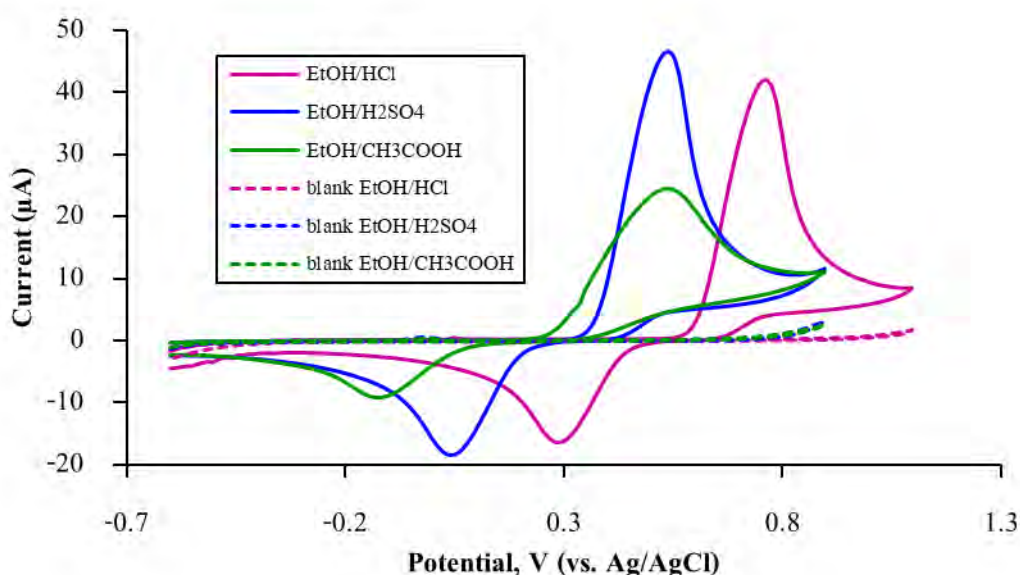
ตารางที่ 3.7 กระแสไฟฟ้าของพิกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][HSO₄] และกรดอะซิติก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลใน [Emim][OAc] และกรดอะซิติก 0.1 M และ (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราไฟท์พิมพ์สกรีน

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	กระแสไฟฟ้าของพิกออกซิเดชันที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของพิกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
EtOH/[Emim][HSO ₄]/CH ₃ COOH	30.08	29.27	27.92	29.09	3.75
EtOH/[Emim][OAc]/CH ₃ COOH	13.11	13.27	14.25	13.54	4.56
EtOH/CH ₃ COOH	23.73	24.45	24.82	24.33	2.28

3.2.3 ศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม (สารละลายผสมของเอทานอลและกรด 3 ชนิด) สำหรับการตรวจวัดแคปไซซิน

โดยทำการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราไฟท์พิมพ์สกรีนที่ออกแบบและเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) ต่อเนื่องกัน 3 สแกน และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.05 V/s จากการทดลองวิเคราะห์แคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.8 (แสดงเฉพาะสแกนแรก) จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่า ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก 0.1 M ให้ค่ากระแสไฟฟ้าของ

ฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินสูงพอ ๆ กัน คือ 42.65 และ 44.70 μA ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.8 แต่ในระบบที่มีกรดซัลฟิวริก ตำแหน่งของพีคจะเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.54 V (vs. Ag/AgCl) ซึ่งเลื่อนมาทางศักย์ไฟฟ้าด้านที่เป็นบวกน้อยลง แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ทั้งนี้คาดว่า เป็นผลมาจากค่า pH ของกรดแต่ละชนิด โดยในระบบที่มีกรดซัลฟิวริกจะมีค่า pH เท่ากับ 1.26 ซึ่งมีความเป็นกรดมากกว่าในระบบที่มีกรดไฮโดรคลอริกและกรดอะซิติกที่มีค่า pH เท่ากับ 1.29 และ 2.94 ตามลำดับ ทั้งนี้ ควรทำการศึกษาในสภาวะ pH ต่าง ๆ เพิ่มเติม (เช่น ตั้งแต่ช่วง pH 1 ถึง pH 10)



รูปที่ 3.8 โพลติกรัฟของแคปไซซินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (สีชมพู) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M (สีน้ำเงิน) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M (สีเขียว) โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟิฟิมพ์สกรีน

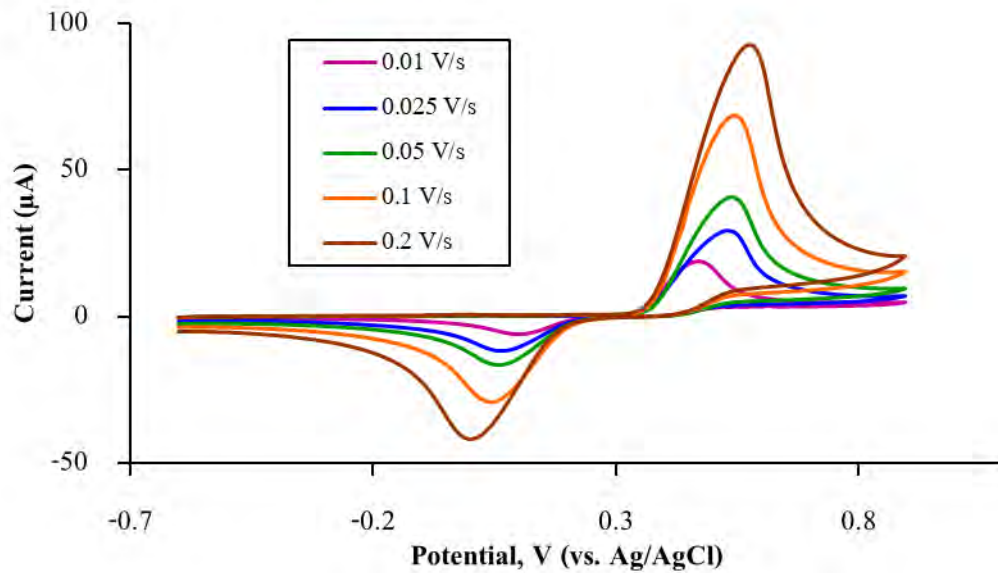
ตารางที่ 3.8 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ได้แก่ (1) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M (2) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M และ (3) สารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดอะซิติก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	กระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
EtOH/HCl	41.70	45.88	40.38	42.65	6.73
EtOH/H ₂ SO ₄	38.71	46.48	48.91	44.70	11.92
EtOH/CH ₃ COOH	23.73	24.45	24.82	24.33	2.28

3.3 การศึกษาผลของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) ต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคปไซซิน โดยทดลองตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M บนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) และใช้อัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ 0.01, 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.2 V/s ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.9 จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่า ความสูงของพีกออกซิเดชันของแคปไซซินมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น เมื่อวัดความสูงพีกออกซิเดชันในแต่ละชุดการทดลองแล้วนำมาสร้างกราฟระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้กับค่ารากที่สอง (square root) ของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า จะได้กราฟความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยมีค่า R-squared (R^2) ซึ่งแสดงความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.9923 ในขณะที่เมื่อสร้างกราฟระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้กับอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า จะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ที่ได้ไม่เป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยา

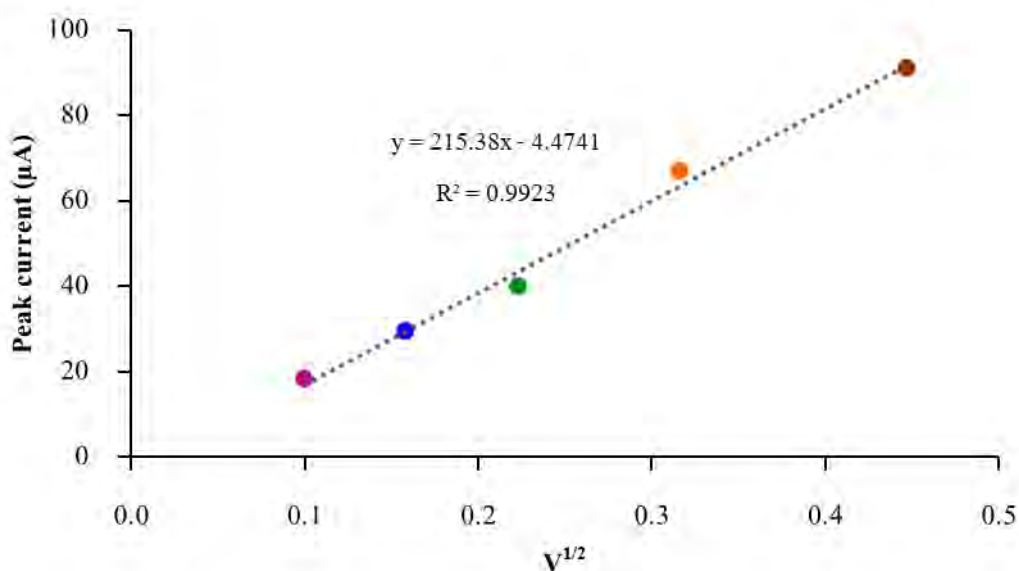
การถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนนี้ จะถูกควบคุมด้วยวิธีการแพร่ (diffusion-controlled process)



รูปที่ 3.9 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน (แสดงเฉพาะสแกนแรก)

ตารางที่ 3.9 กระแสไฟฟ้าของฟีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ด้วยอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ กัน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

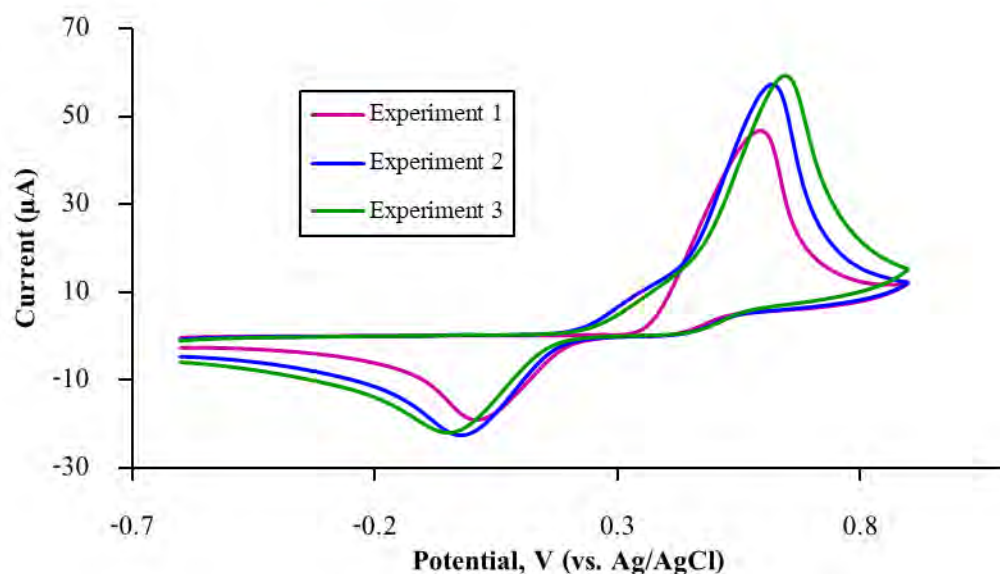
$V^{1/2}$	scan rate (V/s)	กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้ (μA)		กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
0.10	0.01	18.62	17.85	18.24	2.99
0.16	0.03	28.98	29.87	29.43	2.14
0.22	0.05	40.08	40.06	40.07	0.04
0.32	0.10	68.25	65.85	67.05	2.53
0.45	0.20	91.69	90.38	91.04	1.02



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารากที่สอง (square root) ของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

3.4 การศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำ (reusability) ของขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนที่เตรียมเองในห้องปฏิบัติการ

เมื่อได้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนเป็นขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดแคปไซซินแล้ว ลำดับต่อมา ผู้วิจัยได้ศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำ (reusability) ของขั้วไฟฟ้างกล่าว โดยตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.5 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.6 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) จำนวน 3 ชุดการทดลอง (ในแต่ละชุดการทดลอง ทำการวัด 3 สแกนต่อเนื่องกัน) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าขั้วเดิม และทำความสะอาดขั้วไฟฟ้างกล่าวระหว่างชุดการทดลองโดยล้างด้วยน้ำกลั่นและทำให้แห้ง แล้วจึงนำขั้วไฟฟ้างกล่าวไปใช้ซ้ำสำหรับการวิเคราะห์แคปไซซินในชุดการทดลองถัดไป เมื่อเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของพิกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้จากการทดลองแต่ละชุด ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 3.11 และตารางที่ 3.10 จะเห็นว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มจำนวนชุดการทดลอง เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้ามาคำนวณหาความเที่ยงของการวัด จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 8.18 % ซึ่งมีค่าสูงเกินกว่าที่จะยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่า การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้างกล่าวระหว่างชุดการทดลองนั้นไม่สามารถชะล้างสิ่งทีเกาะติดอยู่บนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าออกได้หมด ทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งการใช้ขั้วไฟฟ้าซ้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนดังกล่าวแบบใช้แล้วทิ้ง ไม่สามารถนำขั้วไฟฟ้าที่ใช้แล้วมาใช้วัดซ้ำได้



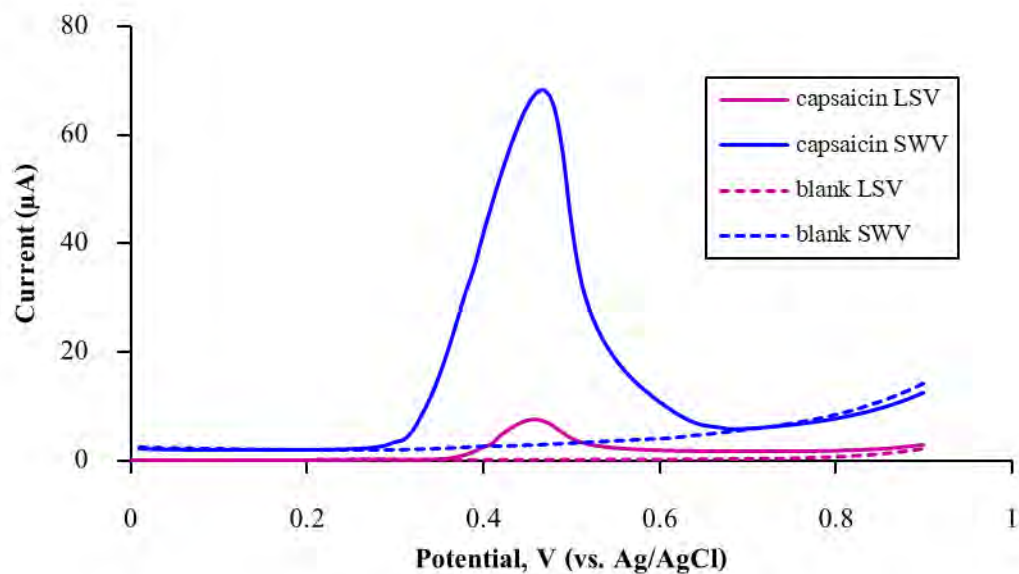
รูปที่ 3.11 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.10 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

กระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันที่วัดได้ (µA)			กระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (µA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
46.46	57.40	58.81	54.22	12.47

3.5 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมตรี (linear sweep voltammetry) และสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry)

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงปริมาณวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนด้วยเทคนิคลิเนียร์สวิตช์โวลแทมเมตรี และสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน พบว่า สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมจะให้ค่ากระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชันของแคปไซซินสูงกว่าลิเนียร์สวิตช์โวลแทมโมแกรม จึงเลือกใช้เทคนิคสแควร์เวฟ-โวลแทมเมตรี ซึ่งมีความไว (sensitivity) ในการตรวจวัดที่สูงกว่า



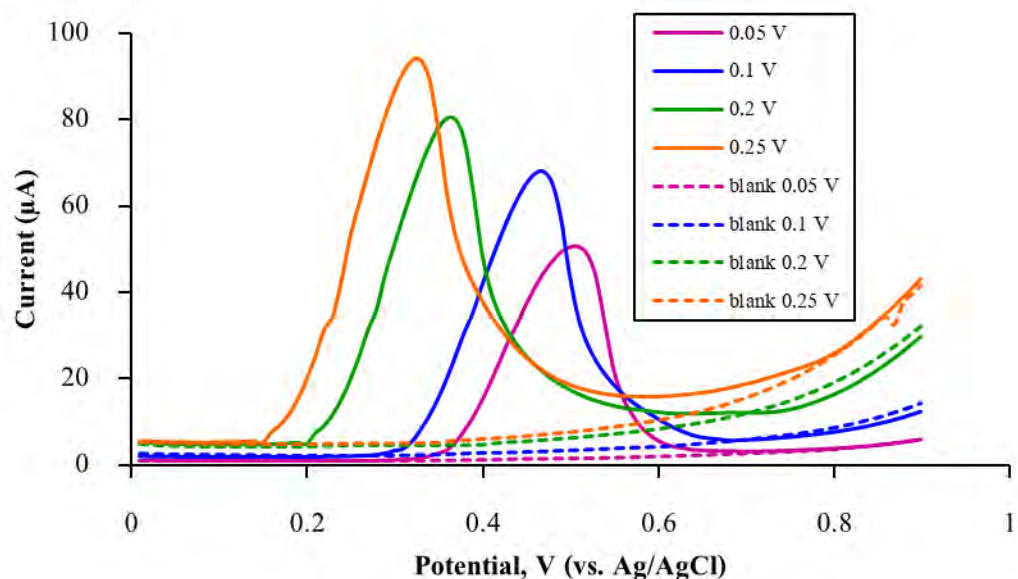
รูปที่ 3.12 ลิเนียร์สวี่ปโวลแทมโมแกรม และสแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.11 กระแสไฟฟ้าของพีคที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM ด้วยเทคนิคลิเนียร์สวี่ปโวลแทมเมตรี และสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

เทคนิค	กระแสไฟฟ้าของพีคออกซิเดชันที่วัดได้ (µA)			กระแสไฟฟ้าของพีคออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (µA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ลิเนียร์สวี่ปโวลแทมเมตรี (LSV)	6.98	7.41	7.36	7.25	3.22
สแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (SWV)	60.84	64.66	64.19	63.23	3.29

3.6 การศึกษาเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคสแควร์เวฟ-โวลแทมเมตรี (square wave voltammetry)

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงปริมาณวิเคราะห์ ผู้วิจัยจึงศึกษาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน โดยได้ปรับตัวแปร (parameter) ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แอมพลิจูด (amplitude) ความถี่ (frequency) และขั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) เป็นต้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์แคปไซซินด้วยเทคนิคนี้ เมื่อตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้น 0.05 mM ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M จำนวน 3 ชุดการทดลอง ชุดแรก ได้ใช้ค่าแอมพลิจูด (amplitude) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.25 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ขั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.13 และตารางที่ 3.12 เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าของพีคออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้ในแต่ละชุดการทดลองมาเปรียบเทียบกันพบว่า ที่แอมพลิจูด 0.25 V ให้ค่ากระแสไฟฟ้าของพีคออกซิเดชันของแคปไซซินสูงที่สุด (84.46 μA) แต่เนื่องจากมีค่าสัญญาณของสารละลายเบลงค์ (blank solution) สูงที่สุดเช่นกัน จึงไม่เลือกใช้นี้ ซึ่งจะเลือกใช้แอมพลิจูด 0.1 V เนื่องจากยังคงให้ค่ากระแสไฟฟ้าของพีคออกซิเดชันของแคปไซซินสูงอยู่ (63.23 μA) โดยที่ค่าสัญญาณเบลงค์ไม่สูงจนเกินไป

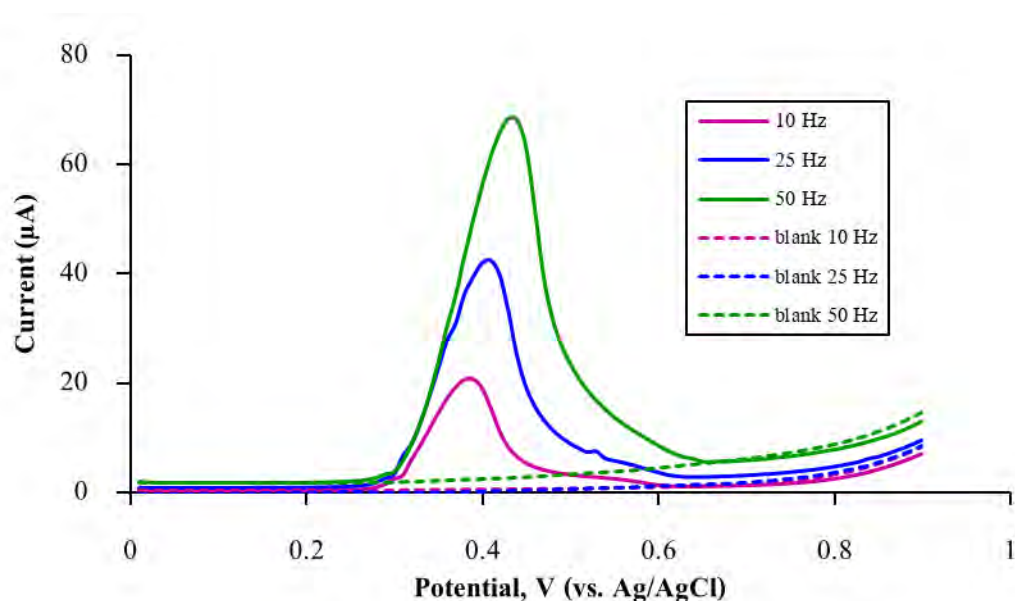


รูปที่ 3.13 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคดเมียม ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.25 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ขั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.12 กระแสไฟฟ้าของพีคที่ได้จากการตรวจวัดแคดเมียม ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.25 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ขั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

แอมพลิจูด (V)	กระแสไฟฟ้าของพีคออกซิเดชัน ที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของ พีคออกซิเดชัน ที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน สัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.05	53.30	48.58	48.81	50.23	5.30
0.1	60.84	64.66	64.19	63.23	3.29
0.2	72.38	73.62	75.25	73.75	1.95
0.25	84.55	84.36	84.46	84.46	0.11

ชุดที่สอง ได้ใช้ค่าแอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 10, 25 และ 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.14 และตารางที่ 3.13 เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้ในแต่ละชุดการทดลองมาเปรียบเทียบกันพบว่า จะเลือกใช้ความถี่ 50 Hz เนื่องจากให้ค่ากระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินสูงที่สุด (65.00 μA)

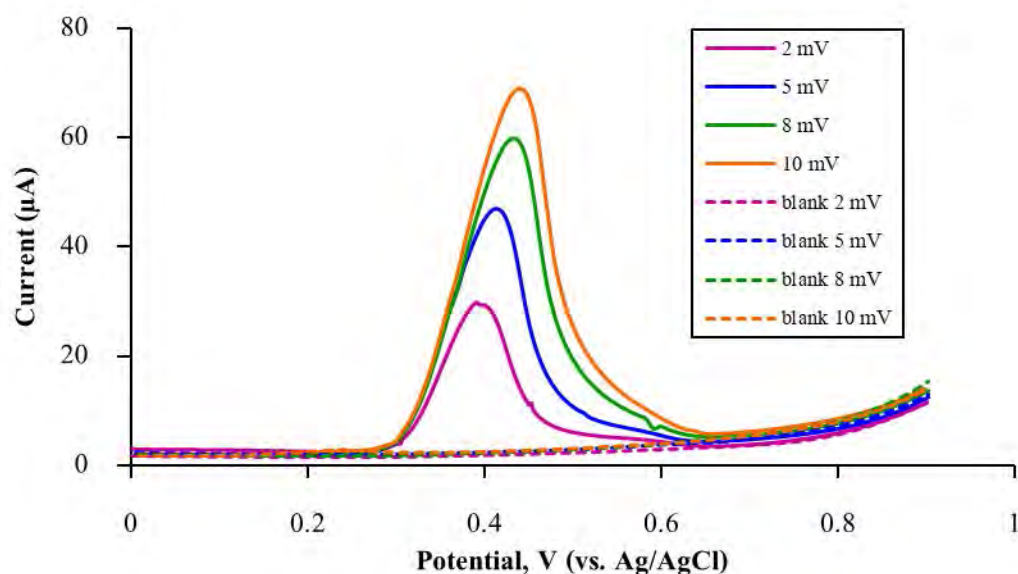


รูปที่ 3.14 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 10, 25 และ 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.13 กระแสไฟฟ้าของฟีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซิน ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 10, 25 และ 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) 0.01 V โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ความถี่ (Hz)	กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันที่วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	20.11	21.58	20.04	20.58	4.23
25	39.36	41.73	40.70	40.60	2.93
50	66.91	63.13	64.95	65.00	2.91

ชุดที่สาม ได้ใช้ค่าแอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ชั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 2, 5, 8 และ 10 mV ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.15 และตารางที่ 3.14 เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้ในแต่ละชุดการทดลองมาเปรียบเทียบกันพบว่า จะเลือกใช้ชั้นของศักย์ไฟฟ้า 10 mV เนื่องจากให้ค่ากระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชันของแคปไซซินสูงที่สุด (64.60 μA)



รูปที่ 3.15 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคดเมียม ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ขั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 2, 5, 8 และ 10 mV โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

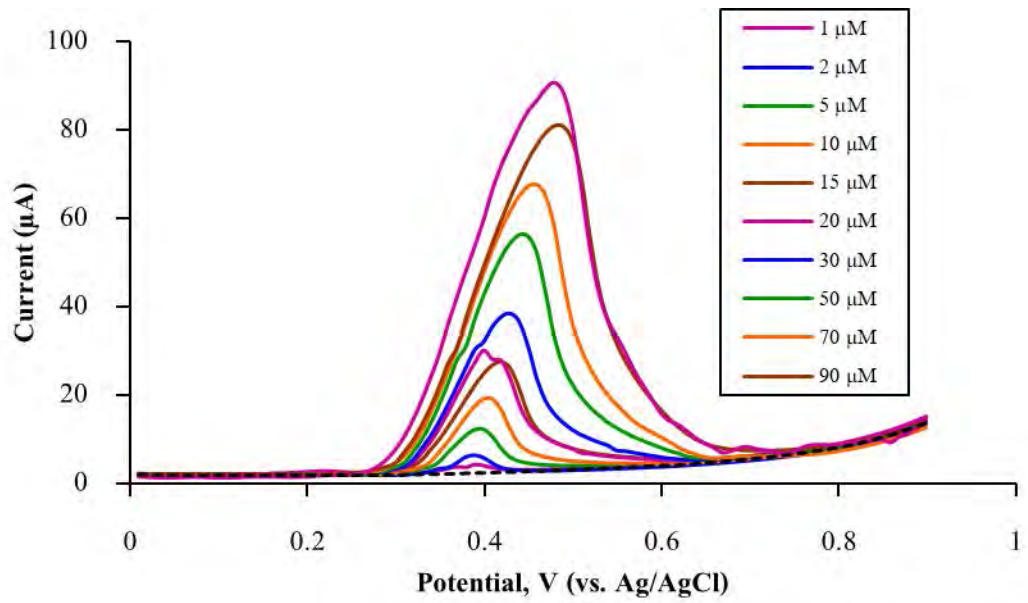
ตารางที่ 3.14 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคดเมียม ความเข้มข้น 0.05 mM โดยใช้แอมพลิจูด (amplitude) 0.1 V; ความถี่ (frequency) 50 Hz; ขั้นของศักย์ไฟฟ้า (step potential, E_{step}) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 2, 5, 8 และ 10 mV โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ขั้นของ ศักย์ไฟฟ้า (mV)	กระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชัน ที่วัดได้เฉลี่ย (μA)			กระแสไฟฟ้าของ พีกออกซิเดชันที่ วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน สัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
2	26.96	28.57	26.96	27.50	3.38
5	43.73	43.91	43.93	43.86	0.25
8	55.67	56.49	58.00	56.72	2.08
10	63.61	64.71	65.49	64.60	1.46

3.7 การสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve)

เมื่อได้เทคนิคและสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M แล้ว ผู้วิจัยจึงตรวจวัดแคปไซซินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70, 90 และ 100 μM ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.16 และตารางที่ 3.15 จากนั้นนำกระแสไฟฟ้าของพีคออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้ในแต่ละชุดการทดลองมาสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve) พบว่า กราฟเทียบมาตรฐานที่ได้จะมีช่วงความเป็นเส้นตรง 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่มีความเข้มข้นของแคปไซซินเท่ากับ 1 ถึง 15 μM โดยมีสมการเส้นตรง $y = 1.5701x + 0.7065$ และมีค่า R-squared (R^2) เท่ากับ 0.9965 และช่วงที่สองความเข้มข้นของแคปไซซินเท่ากับ 15 ถึง 100 μM โดยมีสมการเส้นตรง $y = 0.7191x + 13.517$ และมีค่า R-squared (R^2) เท่ากับ 0.9953 ดังแสดงในรูปที่ 3.17 เมื่อทำการหาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (limit of detection, LOD) โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากกราฟเทียบมาตรฐานซึ่งได้แก่ ค่าความชัน (slope) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่มีค่าเท่ากับ 1.5701 $\mu\text{A}/\mu\text{M}$ และ 0.7065 μA ตามลำดับ และเมื่อนำมาคำนวณด้วยวิธี 3SD ตามสมการที่แสดงด้านล่างนี้ พบว่ามีขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M ของวิธีวิเคราะห์นี้มีค่าเท่ากับ 1.211 μM

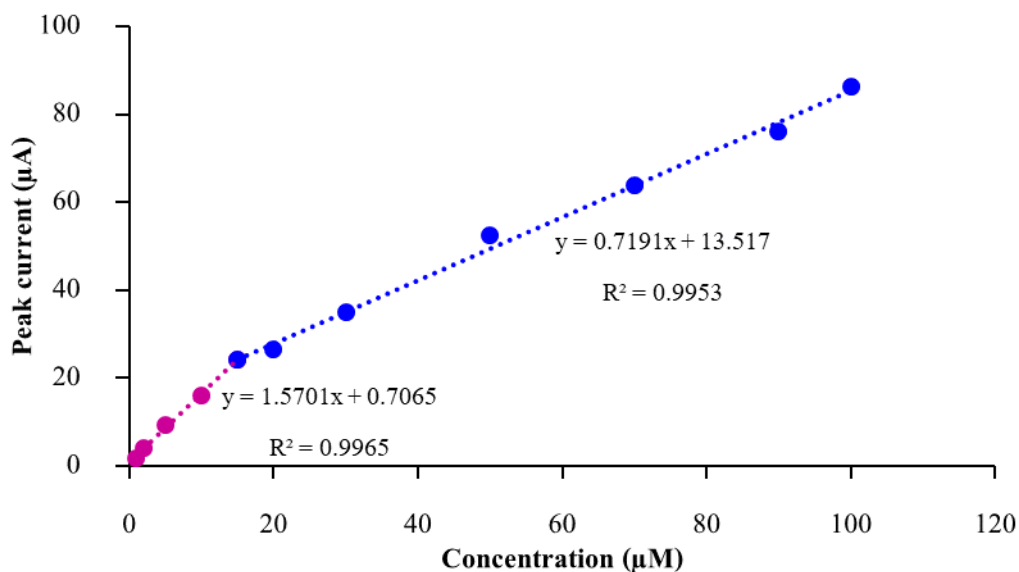
$$\text{LOD} = \frac{3\text{SD}}{\text{slope}}$$



รูปที่ 3.16 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.15 กระแสไฟฟ้าของฟีกที่ได้จากการตรวจวัดแคลป์ไซซิน ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้
ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ความเข้มข้นของ แคลป์ไซซิน (μM)	กระแสไฟฟ้าของฟีกออกซิเดชัน ที่วัดได้ (μA)			กระแสไฟฟ้าของ ฟีกออกซิเดชันที่ วัดได้เฉลี่ย (μA)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน สัมพัทธ์ (%RSD)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	1.80	1.56	1.62	1.66	7.65
2	4.03	3.97	3.83	3.94	2.69
5	9.17	10.30	8.79	9.42	8.33
10	16.18	15.99	16.31	16.16	1.00
15	24.46	23.99	24.04	24.16	1.07
20	26.96	26.62	26.14	26.57	1.55
30	35.33	34.55	34.80	34.89	1.14
50	52.58	51.58	53.46	52.54	1.79
70	64.84	63.15	63.66	63.88	1.36
90	75.37	76.63	76.00	76.00	0.83
100	85.71	87.00	85.99	86.23	0.79

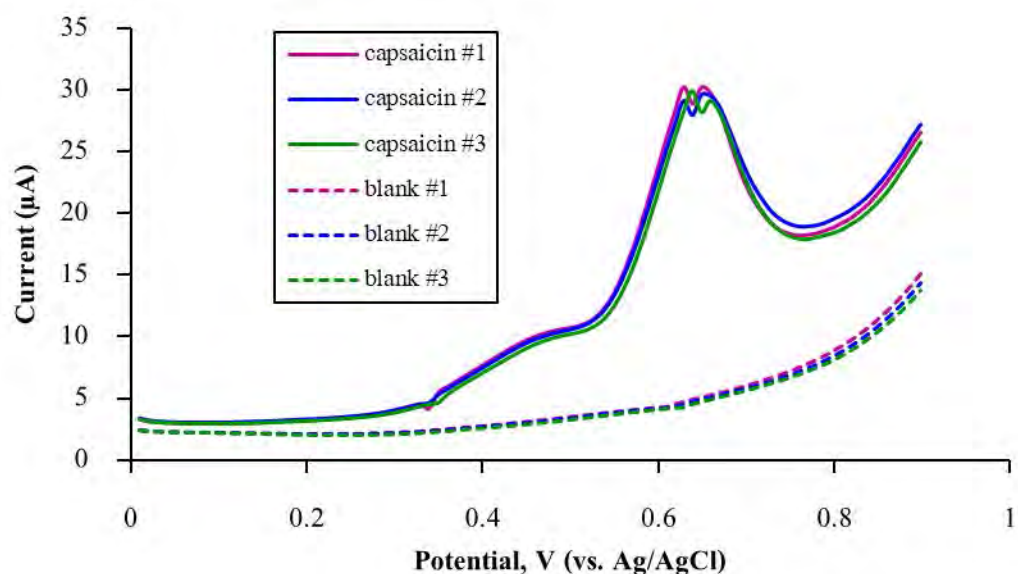


รูปที่ 3.17 กราฟเทียบมาตรฐาน (calibration curve) สำหรับการตรวจวัดแคปไซซินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

3.8 การวิเคราะห์ปริมาณแคปไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี (square wave voltammetry)

ผู้วิจัยทดลองตรวจวัดแคปไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce น้ำหนักแน่นอนใกล้เคียง 0.2 g ในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการสกัดแคปไซซินจากซอสพริกนี้ด้วยวิธีการคน โดยใช้แท่งเหล็กกวนสาร (magnetic stirrer bar) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้การสกัดเกิดขึ้น 100% (complete extraction) จากนั้นนำไปเซนตริฟิวจ์ แล้วจึงนำส่วนสารละลายของเอทานอลมาปรับปริมาตรด้วยกรดซัลฟิวริก 0.1 M และวิเคราะห์ปริมาณแคปไซซินที่สกัดได้ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0 V ถึง +0.9 V (vs. Ag/AgCl) ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3.18 จากสแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้พบว่า กระแสไฟฟ้าของฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินที่สกัดได้จากซอสพริกนี้ทั้งสามหลอด (จากการทดลองสกัดและตรวจวัดทั้งหมด 3 ซ้ำ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 15.84, 14.79 และ 15.93 μA ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 2.79, 5.56 และ 2.56 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.16 เมื่อนำมาคำนวณความเข้มข้นของแคปไซซินจากกราฟเทียบมาตรฐาน จะได้เท่ากับ 0.014, 0.013 และ

0.014 %w/w ตามลำดับ ทั้งนี้ ควรมีการตรวจวัดด้วยวิธีการเติมสารมาตรฐาน (standard addition method) เพื่อลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนอื่น ๆ ในซอสพริกตัวอย่าง และควรทำการเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น โครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography, HPLC) เป็นต้น



รูปที่ 3.18 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce 0.2 g ที่สกัดด้วยเอทานอลปริมาตร 1 mL โดยทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ตารางที่ 3.16 กระแสไฟฟ้าของพีกที่ได้จากการตรวจวัดแคปไซซินในซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce) 0.2 g ที่สกัดด้วยเอทานอลปริมาตร 1 mL โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน

ปริมาณตัวอย่าง ที่ใช้ (g) ในการ สกัดด้วย เอทานอล 1 mL	กระแสไฟฟ้าของพีกออกซิเดชัน ที่วัดได้ (µA)			กระแสไฟฟ้าของ พีกออกซิเดชันที่ วัดได้เฉลี่ย (µA)	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน สัมพัทธ์ (%RSD)	ความ เข้มข้นของ แคปไซซิน (% w/w)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
0.2062	15.89	16.25	15.37	15.84	2.79	0.014
0.2047	14.15	14.51	15.72	14.79	5.56	0.013
0.2095	16.40	15.73	15.66	15.93	2.56	0.014

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้ขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนที่เตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาร์บอน ขั้วไฟฟ้ากราฟีน และขั้วไฟฟ้าคาร์บอนผสมกราฟีนในอัตราส่วน 1:1 จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนนั้นให้ค่ากระแสไฟฟ้าของฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินเฉลี่ยสูงสุด คือ $69.25 \mu\text{A}$ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 4.85 % ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนในการตรวจวัด จากนั้นได้ศึกษาเพื่อหาสัดส่วนของเอทานอลที่เหมาะสมในสารละลายผสมของเอทานอลและกรดซัลฟิวริก และพบว่าในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M นั้นให้ค่ากระแสไฟฟ้าของฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินสูงสุด โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 0.97 % นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทดลองนำของเหลวไอออนิก ได้แก่ [Emim][HSO₄] และ [Emim][OAc] มาช่วยเพิ่มความไวในการตรวจวัด (sensitivity) แต่กลับพบว่าความไวในการตรวจวัดมีค่าลดลงในระบบที่มีของเหลวไอออนิกผสมอยู่ จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกทำการตรวจวัดแคปไซซินในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M

จากนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาผลของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าต่อการเกิดปฏิกิริยาของออกซิเดชันของแคปไซซินในสารละลายผสมของ 10% v/v เอทานอลในกรดซัลฟิวริก 0.1 M เมื่อนำกระแสไฟฟ้าของฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้กับค่ารากที่สอง (square root) ของอัตราการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้ามาสร้างกราฟ จะได้กราฟความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง โดยมีค่า R-squared (R^2) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.9923 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคปไซซินบนขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีนนี้จะถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่ (diffusion-controlled process) เมื่อตรวจวัดแคปไซซินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70, 90 และ 100 μM ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟ โวลแทมเมตรี จากนั้นนำกระแสไฟฟ้าของฟิสิกออกซิเดชันของแคปไซซินที่วัดได้ในแต่ละชุดการทดลองมาสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรง 2 ช่วง คือ ช่วงแรกที่มีความเข้มข้นของแคปไซซินเท่ากับ 1 ถึง 15 μM โดยมีสมการเส้นตรง $y = 1.5701x + 0.7065$ และมีค่า R-squared (R^2) เท่ากับ 0.9965 และช่วงที่สองความเข้มข้นของแคปไซซินเท่ากับ 15 ถึง

100 μM โดยมีสมการเส้นตรง $y = 0.7191x + 13.517$ และมีค่า R-squared (R^2) เท่ากับ 0.9953 สามารถคำนวณหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (limit of detection) ได้ 1.211 μM

จากนั้น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์แคปไซซินในตัวอย่างซอสพริก Tabasco สูตร Habanero sauce โดยทำการสกัดแคปไซซินจากตัวอย่างจริงอย่างสมบูรณ์โดยใช้เอทานอล แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยใช้ขั้วไฟฟ้ากราฟีนพิมพ์สกรีน ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของแคปไซซินเฉลี่ยที่สกัดได้จากซอสพริกมีค่า 0.014 % w/w

เอกสารอ้างอิง

1. บ้านจอมยุทธ, พริก (Capsicum spp.). https://www.baanjommyut.com/library_2/extension-3/chilli/index.html. 2562.
2. พรเฉลิมพงศ์, พ.; รัตนาปนนท์, น., Capsicum / พริก. <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2589/capsicum-พริก>. 2562.
3. Medthai, พริก สรรพคุณและประโยชน์ของพริก 36 ข้อ !. <https://medthai.com/พริก/>. 2560.
4. Yardim, Y.; Şentürk, Z., Electrochemical evaluation and adsorptive stripping voltammetric determination of capsaicin or dihydrocapsaicin on a disposable pencil graphite electrode. *Talanta* **2013**, *112*, 11-19.
5. กองบรรณาธิการนิตยสารเทคโนโลยีชาวบ้าน, พริก คู่ครัวไทย ปลูกง่าย รายได้งาม. มติชน: กรุงเทพมหานคร, 2557.
6. Wang, Y.; Huang, B.; Dai, W.; Ye, J.; Xu, B., Sensitive determination of capsaicin on Ag/Ag₂O nanoparticles/reduced graphene oxide modified screen-printed electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry* **2016**, *776*, 93-100.
7. Al Othman, Z. A.; Ahmed, Y. B.; Habila, M. A.; Ghafar, A. A., Determination of capsaicin and dihydrocapsaicin in Capsicum fruit samples using high performance liquid chromatography. *Molecules (Basel, Switzerland)* **2011**, *16* (10), 8919-29.
8. Abdalla, A. A.; Afify, A. S.; Hasaan, I. E.; Mohamed, A., Studying the Effect of Household-Type Treatment and Processing on the Residues of Ethion and Profenofos Pesticides and on the Contents of Capsaicinoids in Green Chili Pepper Using GC-MS/MS and HPLC. *Food Analytical Methods* **2018**, *11* (2), 382-393.
9. Perucka, I.; Oleszek, W., Extraction and determination of capsaicinoids in fruit of hot pepper *Capsicum annuum* L. by spectrophotometry and high-performance liquid chromatography. *Food Chemistry* **2000**, *71* (2), 287-291.
10. Thomas, B. V.; Schreiber, A. A.; Weisskopf, C. P., Simple Method for Quantitation of Capsaicinoids in Peppers Using Capillary Gas Chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **1998**, *46* (7), 2655-2663.

11. Peña-Alvarez, A.; Ramírez-Maya, E.; Alvarado-Suárez, L. Á., Analysis of capsaicin and dihydrocapsaicin in peppers and pepper sauces by solid phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* **2009**, *1216* (14), 2843-2847.
12. Randviir, E. P.; Metters, J. P.; Stainton, J.; Banks, C. E., Electrochemical impedance spectroscopy versus cyclic voltammetry for the electroanalytical sensing of capsaicin utilising screen printed carbon nanotube electrodes. *Analyst* **2013**, *138* (10), 2970-81.
13. Liu, L.; Chen, X.; Liu, J.; Deng, X.; Duan, W.; Tan, S., Determination of capsaicin and dihydrocapsaicin in *Capsicum anuum* and related products by capillary electrophoresis with a mixed surfactant system. *Food Chemistry* **2010**, *119* (3), 1228-1232.
14. Davis, C. B.; Markey, C. E.; Busch, M. A.; Busch, K. W., Determination of capsaicinoids in habanero peppers by chemometric analysis of UV spectral data. *J Agric Food Chem* **2007**, *55* (15), 5925-33.
15. สุขศรีเมือง, ธ., การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry). https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/218_76-79.pdf. 2562.
16. ทองนพเนื่อ, พ., เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร, 2561.
17. Jakmune, J., 203232 Electroanalytical Chemistry. <http://www.chem.science.cmu.ac.th/userfiles/chm009/file/203232%20p1%20to%20p3%20voltammetry.ppt>. 2019.
18. Lee, D. S., Chapter 23 Voltammetry. <https://slideplayer.com/slide/6361282/>. 2012.
19. WikiPremed, Typical cyclic voltammogram. https://www.wikipremed.com/image.php?img=021500_68zzzz196650_Cyclovoltammogram_68.jpg&image_id=196650. 2019.
20. เอี่ยมละมัย, ป., มาทำความรู้จักกับของเหลวไอออนิกกันเถอะ. https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/297_71.pdf. **2558**.
21. Lau, B. B. Y.; Panchompoo, J.; Aldous, L., Extraction and electrochemical detection of capsaicin and ascorbic acid from fresh chilli using ionic liquids. *New Journal of Chemistry* **2015**, *39* (2), 860-867.
22. Kachosangi, R. T.; Wildgoose, G. G.; Compton, R. G., Carbon nanotube-based electrochemical sensors for quantifying the 'heat' of chilli peppers: the adsorptive stripping voltammetric determination of capsaicin. *Analyst* **2008**, *133* (7), 888-95.

ประวัติผู้วิจัย

นางสาวภัคจิรา ตั้งคจิวงกูร เกิดเมื่อวันที่ 24 เดือนเมษายน พ.ศ. 2540 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏ พระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เมื่อปีการศึกษา 2557 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2558 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 28 พี.เอส.เค แมนชั่น ถนนมหรณพ แขวงเสาชิงช้า เขตพระนคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10200 อีเมล pakjira.my@gmail.com