

ข้าวไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์รัส
คาร์บอน/ไกลซีนสำหรับการตรวจวัดด้วยกรดเพอรูลิกในข้าวโพด
ด้วยเทคนิคโวลแทมเมทรี

MESOPOROUS CARBON/GLYCINE MODIFIED FLUORINE
DOPED TIN OXIDE ELECTRODE FOR VOLTAMMETRIC
DETERMINATION OF FERULIC ACID IN CORN



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์รัส
คาร์บอน/ไกลซีนสำหรับการตรวจวัดด้วยกรดเพอรูลิกในข้าวโพด
ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี

MESOPOROUS CARBON/GLYCINE MODIFIED FLUORINE
DOPED TIN OXIDE ELECTRODE FOR VOLTAMMETRIC
DETERMINATION OF FERULIC ACID IN CORN



T149274

ฐิติกา สุขสันติสวัสดิ์
นภัสกร พิกุลเงิน
วรศรา วีระสกุลวงศ์

รฟท.
รจ 332 ๗
2568

สงพญ.....
เลขทะเบียน..... 149274
ณ.เดือน.ปี..... 30 อ.ค. 2561

b. 125820145
f.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MESOPOROUS CARBON/GLYCINE MODIFIED FLUORINE
DOPED TIN OXIDE ELECTRODE FOR VOLTAMMETRIC
DETERMINATION OF FERULIC ACID IN CORN



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์ส
คาร์บอน/ไกลซีน สำหรับตรวจวัดกรดเฟอรูลิกในข้าวโพดด้วย
เทคนิคโวลแทมเมตรี
Mesoporous Carbon/Glycine Modified Fluorine Doped
Tin Oxide Electrode for Voltammetric Determination of
Ferulic Acid in Corn

ชื่อนักศึกษา

นางสาวฐิติกา สุขสันติสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 55050632
นางสาวนภัสสร พิกุลเงิน รหัสนักศึกษา 55050697
นางสาววิศรา วีระสกุลวงศ์ รหัสนักศึกษา 55050799

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐฉัตร เจริญ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการ	
รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีนสำหรับการตรวจวัดกรดเฟอรูลิกในข้าวโพดด้วยเทคนิคโวลแทมเมทรี Mesoporous Carbon/Glycine Modified Fluorine Doped Tin Oxide Electrode for Voltammetric Determination of Ferulic Acid in Corn		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวฐิติกา สุขสันติสวัสดิ์	รหัสนักศึกษา	55050632
	นางสาวนภัสสร พิกุลเงิน	รหัสนักศึกษา	55050697
	นางสาววิศรา วีระสกุลวงศ์	รหัสนักศึกษา	55050799
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์		

บทคัดย่อ

การตรวจวัดกรดเฟอรูลิก (FA) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (MSC/Glycine/FTO) เตรียมเมโซพอร์สคาร์บอนจากสารตั้งต้นระหว่างรีซอร์ซินอลกับฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งจะได้ลักษณะทรงกลมมีรูพรุน และขนาดอยู่ในระดับนาโน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค BET FE-SEM XRD และ FT-IR จากนั้นทำการปรับปรุงบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ ด้วยวิธีการหยดเมโซพอร์สคาร์บอน และทำการเกาะติดไกลซีนด้วยวิธีอิเล็กโทรโพลิเมอไรเซชัน (Electropolymerization) และนำไปการตรวจวัดกรดเฟอรูลิกโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าด้วยหลักการโวลแทมเมทรี พบว่ามีช่วงความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดในช่วงความเข้มข้น 0.01 ถึง 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดกรดเฟอรูลิกเท่ากับ 6.5862 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาณต่ำสุดที่ตรวจวัดเท่ากับ 21.9507 มิลลิโมลต่อลิตร ร้อยละการได้คืนกลับอยู่ในช่วง 48.754 ถึง 53.520 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 0.00012 ถึง 0.8712 ขั้วไฟฟ้าถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดกรดเฟอรูลิกในตัวอย่างข้าวโพด

คำสำคัญ : กรดเฟอรูลิก ไกลซีน เมโซพอร์สคาร์บอน โวลแทมเมทรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Mesoporous Carbon/Glycine Modified Fluorine Doped Tin Oxide Electrode for Voltammetric Determination of Ferulic Acid in Corn		
Students	Miss Thitika	Suksantiswad	Student ID 55050632
	Miss Napasakorn	Pikulngoen	Student ID 55050697
	Miss Varisara	Veerasakulwong	Student ID 55050799
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2558		
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suwan Chaiyasith		

Abstract

A novel electrochemical sensor for determination of ferulic acid (FA) was fabricated from mesoporous carbon and glycine (MSC/Gly/FTO). The mesoporous carbon was prepared from resorcinol and formaldehyde. The mesoporous carbon was characterized by BET FE-SEM XRD and FT-IR. The electrode shows an excellent electrochemical catalytic activity towards FA oxidation. Under optimal conditions, the anodic peak current correlates linearly to the FA concentration throughout the range of 0.01 to 0.05 mmol L⁻¹ with a detection limit of 8.1108 mmol L⁻¹ and a quantitation limit of 27.036 mmolL⁻¹, %recovery in the range of 48.754 to 53.520 and 0.00012 to 0.8712 (%RSD). This modified electrode was applied for determination of ferulic in corn.

Keywords : Ferulic acid Glycine Mesoporous carbon Voltammetry

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี โดยได้รับความกรุณาจาก อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนการทำโครงการพิเศษนี้ ซึ่งทางผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณกรรมการในการสอบโครงการพิเศษนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ เขิงชั้น และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่า ในการเป็นกรรมการพิจารณาโครงการพิเศษ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะตลอดจนการช่วยตรวจรายละเอียดต่างๆ ในการจัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษให้เป็นไปอย่างถูกต้อง และเรียบร้อย

ขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี และนักวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาอำนวยความสะดวกในเรื่องการติดต่อขอใช้มอุปกรณ์ การเปิดสารเคมีในการทดลอง การแนะนำในการใช้เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณสมทบ สันติเบญจกุล ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ในการทำโครงการพิเศษ ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดี ทำให้สามารถทำโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิตติกา สุขสันติสวัสดิ์
นภัสกร พิกุลเงิน
วริศรา วีระสกุลวงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ข้าวโพด (Corn).....	3
2.1.1 ชนิดของข้าวโพด.....	4
2.1.2 ประโยชน์ของข้าวโพด.....	5
2.2 สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant).....	5
2.3 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound).....	6
2.4 กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid)	7
2.5 วัสดุนาโนคาร์บอน (Carbon nanomaterial).....	8
2.5.1 คาร์บอนแบล็ค (Carbonblack).....	8
2.5.2 เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofiber).....	9
2.5.3 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube).....	10
2.5.4 เมโซพอร์สคาร์บอน (Mesoporous Carbon).....	11
2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพ	12
2.6.1 การหาพื้นที่ผิวและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊ส ไนโตรเจน.....	12
2.6.2 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM).....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)	14
2.6.4 การวิเคราะห์โดยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR).....	14
2.6.5 เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลลิมพีแดนซ สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS).....	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	22
3.3 การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน	23
3.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์ส คาร์บอน/ไกลซีน	23
3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอน.....	23
3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วย เมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ในการตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะ ไซยาโนเฟอร์เรต ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	24
3.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดเฟอรูลิก ด้วยขั้วไฟฟ้า ฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีนด้วย เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	25
3.7.1 การศึกษาผลของอิเล็กโทรไลต์.....	25
3.7.2 การศึกษาผลของพีเอช.....	26
3.7.3 การศึกษาผลของอัตราการสแกน	27
3.8 การศึกษาการตรวจวัดกรดเฟอรูลิก ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี (Voltammetry method).....	28
3.8.1 การศึกษาการตรวจวัดกรดเฟอรูลิก ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทิน ออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ด้วยเทคนิคไซ คลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry).....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8.2 การศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิก โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล พัลส์โวลแทมเมตรี (Differential Pulse Voltammetry).....	28
3.9 การศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง (Linearity Range).....	29
3.10 ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD).....	29
3.11 ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of Quantitation, LOQ).....	29
3.12 การศึกษาตัวรบกวน (Interference).....	29
3.13 การเตรียมตัวอย่างข้าวโพด	30
3.14 การศึกษาความถูกต้อง (Accuracy).....	30
3.15 การศึกษาความเที่ยง (Precision).....	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย	31
4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอน และข้าวไฟฟ้า ฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน.....	31
4.1.1 เครื่องมือวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและความพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer, BET).....	31
4.1.2 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่อง กราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM).....	32
4.1.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR).....	34
4.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)	35
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของข้าวไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ ไกลซิน.....	35
4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดกรดเพอรูลิก	37
4.3.1 ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม.....	37
4.3.2 พีเอชที่เหมาะสม.....	39
4.3.3 อัตราการสแกนที่เหมาะสม.....	41
4.4 ผลการศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิกด้วยข้าวไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซินด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี	42
4.4.1 การตรวจวัดกรดเพอรูลิกด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี	42
4.4.2 การตรวจวัดกรดเพอรูลิกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี	43

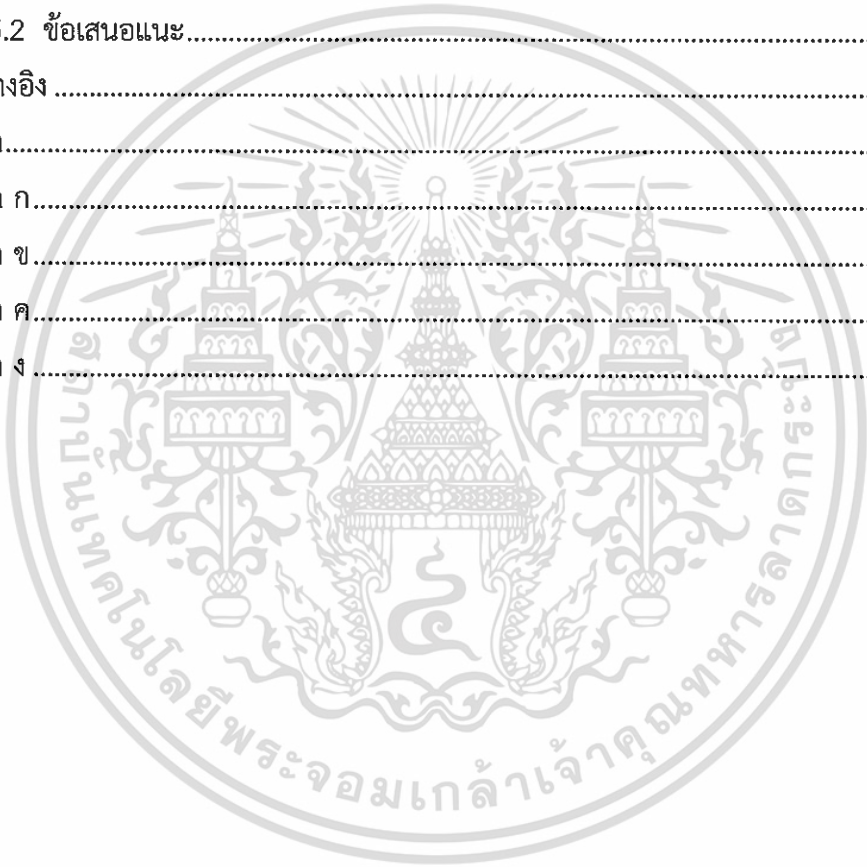
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 ผลการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ในการตรวจวัดกรดเฟอรูลิก.....	44
4.6 ผลการศึกษาตัวรบกวน (Interference)	45
4.7 ผลการศึกษาความถูกต้อง (Accuracy) และการศึกษาความเที่ยง (Precision)	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
เอกสารอ้างอิง	49
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก.....	54
ภาคผนวก ข.....	56
ภาคผนวก ค.....	63
ภาคผนวก ง.....	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 แสดงสภาวะในการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์	26
3.3 แสดงสภาวะในการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสม	27
3.4 แสดงการศึกษากรดเพอรูลิกในตัวอย่าง	30
4.1 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน.....	31
4.2 แสดงตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า กระแสออกซิเดชัน และกระแสรีดักชันของสารละลายกรดเพอรูลิก ในอิเล็กโทรไลต์ต่างๆที่ได้จากไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	38
4.3 ผลการศึกษาตัวรบกวนจากค่าการคำนวณ (%)Relative error ของการวิเคราะห์กรดเพอรูลิกในการศึกษาสารรบกวน	45
4.4 ผลการศึกษากรดเพอรูลิกในสารตัวอย่าง.....	46
ก.1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด	54
ข.1 ตารางแสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดกรดเพอรูลิก	58
ข.2 ตารางแสดงค่าร้อยละการคืนกลับที่เป็นที่ยอมรับตามข้อกำหนด AOAC.....	61
ข.3 ตารางแสดงค่าความแม่นยำที่ยอมรับตามข้อกำหนด AOAC	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูล

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะข้าวโพดหวาน.....	3
2.2 โครงสร้างของสารประกอบพินอลิกแบ่งตามโครงสร้าง	7
2.3 โครงสร้างของกรดเพอรูลิก.....	8
2.4 ลักษณะทั่วไปของคาร์บอนแบล็ค.....	9
2.5 ภาพ TEM ของเส้นใยคาร์บอน.....	10
2.6 ลักษณะของ SWCNT และ MWCNT.....	10
2.7 ภาพ SEM แสดงลักษณะของเมโซพอร์สคาร์บอน.....	12
2.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของอะตอม.....	14
2.9 ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์ θ แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟส (Phase Shift) ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าขนาดของอิมพีแดนซ์หาได้จากอัตราสวนของศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า.....	15
2.10 ในควิสทพล็อตแสดงข้อมูลอิมพีแดนซ์ Z' แสดงสวนจริงและ Z'' แสดงสวนจินตภาพ	17
3.1 เครื่อง Autolab และการจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	24
4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอน A. กำลังขยาย 10,000 เท่า B. กำลังขยาย 50,000 เท่า และ C. กำลังขยาย 100,000 เท่า.....	32
4.2 แสดงความหนาของชั้นเมโซพอร์สคาร์บอนที่หดยดบนขั้วไฟฟ้า.....	33
4.3 FT-IR Spectrum A. รีซอร์ซินอล (Resorcinol) B. สารผสมระหว่างรีซอร์ซินอลกับพอร์มาลดีไฮด์ก่อนเผา (RF ก่อนเผา) และ C. เมโซพอร์สคาร์บอน (MSC).....	34
4.4 XRD pattern สเปกตรัมของ Bare FTO และ MSC/FTO.....	35
4.5 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง 0.8 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	36
4.6 กราฟในควิสต์แสดงการเปรียบเทียบของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เปลือย ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยไกลซิน และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน ในสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายกรดเพอรูลิกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที.....	38
4.8 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายกรดเพอรูลิกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์พีเอช 2.5 ถึง 7 สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที	39
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับค่าพีเอช	40
4.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดเพอรูลิก	40
4.11 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายเพอรูลิกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์พีเอช 3 สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) ที่อัตราการสแกนต่างๆ	41
4.12 ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายเพอรูลิกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0.0 ถึง +0.8 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที	42
4.13 ดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายเพอรูลิกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์)	43
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความเข้มข้น 0.01 ถึง 0.5 มิลลิโมลต่อลิตรกับกระแสไฟฟ้าของกรดเพอรูลิกในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3.....	44

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
FTO electrode	ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์
FT-IR	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์
XRD	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์
FE-SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อีมิสชัน
Ag/AgCl	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
LOD	ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด
LOQ	ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์
%RSD	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
2 θ	มุม 2 ที่ตา
nm	นาโนเมตร
E	ศักย์ไฟฟ้า (V)
μ A	ไมโครแอมแปร์
I	ค่ากระแส
pH	พีเอช
mVs ⁻¹	มิลลิโวลต์ต่อวินาที
mol L ⁻¹	โมลต่อลิตร
C	ความเข้มข้น (mol/cm ³)
C.E	ขั้วไฟฟ้าช่วย
W.E	ขั้วไฟฟ้าทำงาน
R.E	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
CV	ไซคลิกโวลแทมเมตรี
DPV	ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี
FA	กรดเพอรูลิก
MSC	เมโซพอร์สคาร์บอน
ABS	สารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์
PBS	สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสารต้านอนุมูลอิสระได้เข้ามามีบทบาทในส่วนช่วยส่งเสริมสุขภาพ และป้องกันโรคต่างๆ ซึ่งพบได้ในผัก และผลไม้เกือบทุกชนิด ซึ่งไม่นานมานี้มีบทความต่างๆให้นำเสนอเกี่ยวกับสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวโพด นั่นก็คือกรดเฟอร์ูลิก กรดชนิดนี้อยู่ตามผนังเซลล์ของข้าวโพดดิบ เป็นสารต้านมะเร็ง โดยเมื่อข้าวโพดหวานได้ผ่านการต้มหรือปิ้งให้สุกที่อุณหภูมิสูงจำนวนหนึ่งแล้ว จึงจะให้กรดเฟอร์ูลิกออกมา ซึ่งกรดเฟอร์ูลิก [1] (Ferulic acid; 4-hydroxy-3-methoxycinnamic acid) จะกระจายอยู่ทั่วไปตามเนื้อเยื่อของพืช และเป็นส่วนผสมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมากมาย เช่น ผัก ผลไม้ ไวน์ น้ำมันมะกอก และกาแฟ เป็นต้น กรดเฟอร์ูลิกจัดเป็นหนึ่งในกลุ่มของกรดฟีนอลิกที่ต้านอนุมูลอิสระ และถูกพบในการทำงานของระบบต่างๆ ของร่างกาย เช่น ต้านอนุมูลอิสระ ต้านการอักเสบ ระวังการปวด และต้านการเกิดลิ่มเลือดในหลอดเลือด ป้องกันจากการฉาย รังสีอัลตราไวโอเลต และการทำงานของอนุมูลอิสระ และสนับสนุนระบบภูมิคุ้มกันในมนุษย์ ซึ่งกรดเฟอร์ูลิกเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่สำคัญ ซึ่งถูกใช้ในอาหารเพื่อสุขภาพ เครื่องสำอาง และถูกใช้อย่างกว้างขวางในการรักษาโรคหลอดเลือดหัวใจ โรคหลอดเลือดสมอง หลอดเลือดอักเสบ และโรคที่เกี่ยวข้องกับการลดลงของเม็ดเลือดขาว และเกล็ดเลือด จึงมีวิธีการวิเคราะห์ที่หลากหลายถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดกรดเฟอร์ูลิก เช่น โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography (HPLC)) [2] คาปิลารีอิเล็กโทรโฟเรซิส (Capillary Electrophoresis (CE)) [3] โครมาโทกราฟีแบบผิวบาง (Thin Layer Chromatography (TLC)) [4] และหลักการทางเคมีไฟฟ้า [5] วิธีการดังกล่าวค่อนข้างแม่นยำแต่ราคาสูง และใช้เวลานาน ในทางตรงกันข้ามวิธีทางเคมีไฟฟ้าได้รับความสนใจมากกว่า เนื่องจากใช้เวลาในการตรวจวัดน้อย ใช้งานง่าย ความไวสูง ความจำเพาะเจาะจงสูง สะดวกในการตรวจวัด และสามารถปรับให้มีขนาดเล็กกลงได้ ในปีที่ผ่านมา มีการพัฒนาชนิดของขั้วไฟฟ้าหลากหลายรูปแบบที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีมากขึ้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หากกรดเฟอร์ูลิก โดยนำขั้วไฟฟ้าไปปรับปรุงกับโลหะออกไซด์ [1] กราฟีนออกไซด์ [6] และท่อนาโนคาร์บอน [7] เป็นต้น

ในปัจจุบันมีวัสดุชนิดหนึ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก คือ คาร์บอนที่มีรูพรุนหรือเมโซพอร์สคาร์บอน [8] ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้ โครงสร้างเป็นรูพรุนที่เป็นระเบียบ พื้นผิวสูง ปริมาตรรูพรุนมาก ส่งผ่านอิเล็กตรอนได้เร็ว และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาเคมี ซึ่งได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ ดังนี้ ใช้แยกโมเลกุล ใช้เป็นตัวดูดซับ ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเซนเซอร์ ตัวเก็บพลังงาน และตัวเก็บประจุ

เป็นต้น จากการนำมาประยุกต์ใช้ข้างต้นได้มีการศึกษาการใช้งานการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าเพื่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงเร่งด้วยไฟฟ้าของชีวโมเลกุล แต่ค่อนข้างน้อย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน และวิธีการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าเคมีด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน และโกลชินบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ ซึ่งจะทำให้ขั้วไฟฟ้านั้นมีความว่องไวสูง ชัดจำกัดในการตรวจวัดต่ำ ช่วงเวลาในการตอบสนองรวดเร็ว ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้าสูงขึ้น และความจำเพาะเจาะจงสูงในการตรวจวัดหากรดเพอรูติกมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน และศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน และโกลชิน และนำไปประยุกต์ใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สืบค้นข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการในการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน และการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า
- 2) สังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน และศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ
- 3) ปรับปรุงขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน และโกลชิน
- 4) ตรวจวัดกรดเพอรูติกด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน และโกลชินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นแนวทางในการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนที่สามารถลดเวลา และลดขั้นตอนที่ยุ่งยากในการสังเคราะห์ได้
- 2) เป็นแนวทางในการพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดกรดเพอรูติกได้จำเพาะเจาะจง และมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าวโพด (Corn) [9]

ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งของพืชรองจากข้าวเจ้า และข้าวสาลีเป็นพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ในบางประเทศประชาชนจะรับประทานข้าวโพดเป็นอาหารหลัก นอกจากใช้เป็นอาหารมนุษย์ และสัตว์โดยตรงแล้ว เมล็ดข้าวโพด และส่วนอื่นๆ เช่น ลำต้น ใบ และชัง ยังใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้หลากหลายชนิด เมล็ดอาจนำมาสกัดน้ำมัน น้ำตาล และทำแป้ง ซึ่งน้ำตาลที่สกัดจากเมล็ดใช้ทำสารเคมี วัตถุระเบิด และสีย้อมผ้า แป้งใช้ทำสบู่ หมึก และกาว และน้ำมัน นอกจากใช้รับประทานแล้ว ยังใช้ทำสีทาบ้าน และยาขัดเงา ลำต้น และใบใช้ทำกระดาษ และกระดาษอัด ชังใช้ทำจุกขวด เชื้อเพลิง และกล่องยาสูบ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่สำคัญซึ่งใช้ข้าวโพดเป็นส่วนประกอบมีประมาณ 500 ชนิด ข้าวโพดถูกจัดลำดับในพฤกษศาสตร์ ดังนี้

- วงศ์ (Family) Gramineae
- วงศ์ย่อย (Sub-Family) Panicoideae
- เผ่า (Tribe) Maydeae
- สกุล (Genus) Zea
- ชนิด (Species) Mays



รูปที่ 2.1 ลักษณะข้าวโพดหวาน

2.1.1 ชนิดของข้าวโพด

แบ่งตามลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ถือเอาลักษณะของแป้ง และเปลือกหุ้มเมล็ดเป็นหลัก จำแนกได้ 7 ชนิด ดังนี้

1) ข้าวโพดหัวบุบ (Dent Corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ซี เมย์ส อินเดนทาตา (*Zea mays in dutata*) เมล็ดตอมนบนมีรอยบุบ เนื่องจากตอมนบนมีแป้งอ่อน และตอนข้างๆเป็นแป้งชนิดแข็ง เมื่อดากเมล็ดให้แห้งแป้งอ่อนจะยุบหดตัวลง จึงเกิดลักษณะหัวบุบดังกล่าว ขนาดของลำต้น ความสูง เหมือนข้าวไร่ทั่วไป สีของเมล็ดอาจเป็นสีขาว สีเหลืองหรือสีอื่นๆ แล้วแต่พันธุ์ นิยมปลูกกันมากในสหรัฐอเมริกา

2) ข้าวโพดหัวแข็ง (Flint Corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ซี เมย์ส อินดูราตา (*Zea mays in durata*) เมล็ดมีแป้งแข็งห่อหุ้มโดยรอบ หัวเรียบไม่บุบ เมล็ดค่อนข้างกลม มีปลูกกันมากในเอเชีย และอเมริกาใต้ ข้าวโพดไร่ของคนไทยที่นิยมปลูกกันอยู่เป็นชนิดนี้ทั้งสี สีของเมล็ดอาจเป็นสีขาว สีเหลือง สีม่วงหรือสีอื่นแล้วแต่ชนิดของพันธุ์

3) ข้าวโพดหวาน (Sweet Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ซีเมย์ส แซคคาราตา (*Zea mays saccharata*) นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย เพื่อรับประทานฝักสด เพราะฝักมีน้ำตาลมาก ทำให้มีรสหวาน เมื่อแก่เต็มที่หรือแห้ง เมล็ดจะหดตัวเหี่ยวยุบ

4) ข้าวโพดคั่ว (Pop Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ซี เมย์ส อีเวอร์ธา (*Zea mays everta*) เมล็ดมีขนาดค่อนข้างเล็ก มีแป้งประเภทแข็งอยู่ภายใน ภายนอกห่อหุ้มด้วยเยื่อที่เหนียว และยึดตัวได้ เมล็ดมีความชื้นภายในอยู่ พอสมควร เมื่อถูกความร้อนจะเกิดแรงดันภายในเมล็ดระเบิดตัวออกมา เมล็ดอาจมีลักษณะกลมหรือหัวแหลมก็ได้ มีสีต่างๆ กัน เช่น สีเหลือง สีขาว หรือสีม่วง

5) ข้าวโพดข้าวเหนียว (Waxy Corn) ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ซี เมย์ส เซอราทีนา (*Zea mays ceratina*) เมล็ดมีแป้งอ่อนคล้ายแป้งมันสำปะหลัง นิยมปลูกเพื่อรับประทานฝักสดคล้ายข้าวโพดหวานแม้จะไม่หวานมาก แต่เมล็ดนี้ม รสอร่อย ไม่ติดฟัน เมล็ดมีสีต่างๆ กัน เช่น สีเหลือง สีขาว สีส้ม สีม่วงหรือมีหลายสีในฝักเดียว

6) ข้าวโพดแป้ง (Flour Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ซีเมย์ส อะมิโลเซีย (*Zea mays amylocea*) เมล็ดประกอบด้วยแป้งชนิดอ่อนมาก เมล็ดค่อนข้างกลม หัวไม่บุบหรือบุบเล็กน้อย นิยมปลูกในอเมริกาใต้ อเมริกากลาง และสหรัฐอเมริกา ชาวอินเดียนแดงนิยมปลูกไว้รับประทานเป็นอาหาร

7) ข้าวโพดป่า (Pod Corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ซีเมย์ส ทูนิกา (*Zea mays tunica*) มีลักษณะใกล้เคียงข้าวโพดพันธุ์ป่า มีลำต้น และฝักเล็กกว่าข้าวโพดธรรมดาขนาดเมล็ดค่อนข้างเล็กเท่าๆ กับเมล็ดข้าวโพดมีขั้วเปลือกหุ้มทุกเมล็ด และยังมีเปลือกหุ้มฝักอีกชั้นหนึ่งเหมือน

ข้าวโพดธรรมาตต่างๆ ไป เมล็ดมีลักษณะต่างกััน ข้าวโพดชนิดนี้ไม่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจปลูกไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น

2.1.2 ประโยชน์ของข้าวโพด [10]

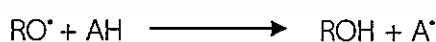
1) ข้าวโพดมีแคลอรีต่ำกว่าธัญพืชอื่นๆ เช่น ข้าว และข้าวสาลี เนื่องจากแคลอรีส่วนใหญ่มาจากคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างอย่างง่ายจำพวกกลูโคส และซูโครสมากกว่าคาร์โบไฮเดรตที่โครงสร้างซับซ้อนอย่างอะไมโลส และอะไมโลเพคติน

2) ข้าวโพดมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากมีทั้งใยอาหาร วิตามิน แร่ธาตุต่างๆ และสารต้านอนุมูลอิสระ

3) ข้าวโพดมีสารต้านอนุมูลอิสระหลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น เบต้าแคโรทีน (β -Carotenes), ลูทีน (Lutein), แซนทีน (Xanthine), คริปโตแซนทีน (Cryptoxanthin) และเฟอร์ulik (Ferulic) ซึ่งเฟอร์ulik ได้ถูกเขียนในงานวิจัยหลายฉบับว่า มีบทบาทในการป้องกันการเกิดมะเร็ง และการเกิดริ้วรอยต่างๆ และรักษาการอักเสบของมนุษย์ได้

2.2 สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) [11]

สารต้านอนุมูลอิสระเป็นโมเลกุลที่ยับยั้งอนุมูลอิสระโดยยับยั้งในปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลอิสระ ในสิ่งมีชีวิตจะมีระบบการป้องกันการทำลายเซลล์ และเนื้อเยื่อจากอนุมูลอิสระ โดยสารต้านอนุมูลอิสระมีทั้งที่เป็นเอนไซม์ และไม่เป็นเอนไซม์ สารประกอบที่ละลายในน้ำ และสารประกอบที่ละลายในไขมัน โดยสารต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้มีกลไกการทำงานต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน เช่น ดักจับอนุมูลอิสระ (Radical Scavenging) การยับยั้งการทำงานของออกซิเจนที่ขาดอิเล็กตรอน (Singlet Oxygen Quenching) การจับกับโลหะที่สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Metal Chelation) การหยุดปฏิกิริยาการสร้างอนุมูลอิสระ (Chain-Breaking) การเสริมฤทธิ์ (Synergism) และการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme Inhibition) ที่เร่งปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ เป็นต้น ตัวอย่างแสดงการดักจับอนุมูลอิสระ ดังปฏิกิริยา



โดย R^{\bullet} และ RO^{\bullet} คือ อนุมูลอิสระ และ AH คือ สารต้านอนุมูลอิสระ

แหล่งที่มาของสารต้านอนุมูลอิสระมี 2 แหล่ง ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ (Synthetic Antioxidants) และสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ (Natural Antioxidants) ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ ได้แก่ Propyl gallate Butylated hydroxyanisole (BHA) Butylated hydroxytoluene (BHT) และ Tertiary butylhydroquinone (TBHQ) สารสังเคราะห์ดังกล่าวนิยม

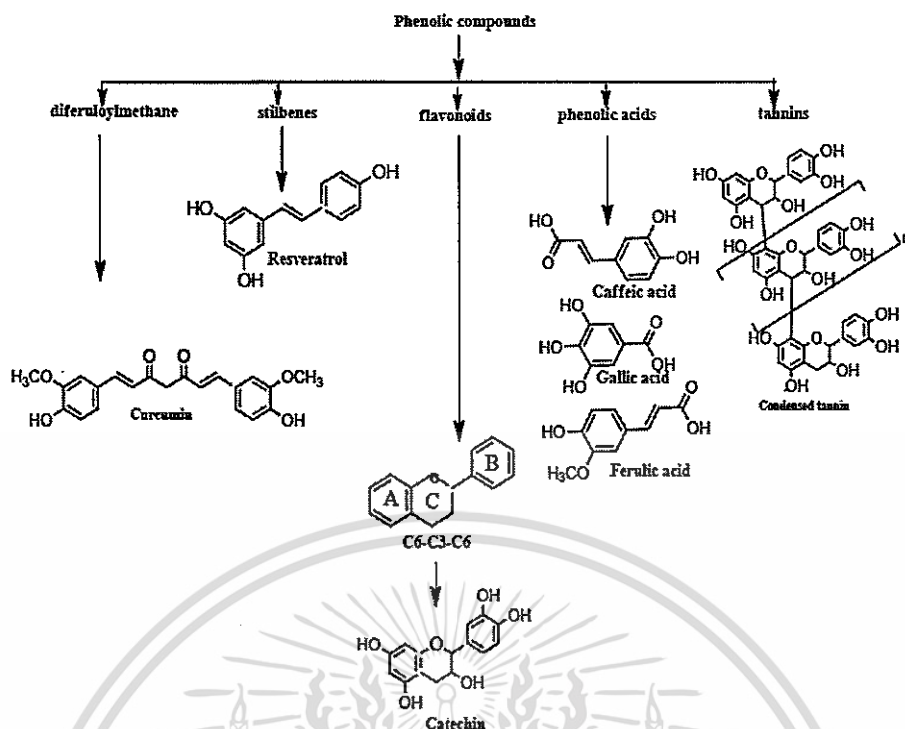
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันที่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารมีกลิ่น สี และรสชาติที่เปลี่ยนไป สารสังเคราะห์นี้มีสภาพคงตัวกว่าสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติสามารถพบได้ในสิ่งมีชีวิตทั้งพืช และสัตว์ซึ่งเป็นที่ตั้งของ เอนไซม์ วิตามิน และสารอื่นๆ ตัวอย่างของสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นวิตามิน เช่น วิตามินซี วิตามินอี และกลูต้าไธโอน ส่วนสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นเอนไซม์ ได้แก่ กลูต้าไธโอนเปอร์ออกซิเดส (Glutathione peroxidase, GPX) กลูต้าไธโอนรีดักเทส (Glutathione Reductase) และกลูต้าไธโอนทรานเฟอร์เรส (Glutathione Transferase) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนโมเลกุลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เป็นออกซิเจน และน้ำ ส่วนเอนไซม์ Superoxide dismutase (SOD) สามารถเปลี่ยน O_2^- เป็น H_2O_2 สารต้านอนุมูลอิสระอื่นๆ ได้แก่ แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) และยูบิควินอล (Ubiquinones) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระสามารถป้องกันอนุมูลอิสระออกซิเจนทั้งภายในเซลล์ และภายนอกเซลล์

ในภาวะปกติร่างกายของคนเราจะมีการป้องกันการสะสมสารอนุมูลอิสระโดยการสร้าง เอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระขึ้นมาควบคุมปริมาณสารอนุมูลอิสระให้อยู่ในภาวะที่สมดุล และอีกส่วนได้จากสารต้านอนุมูลอิสระที่ร่างกายรับประทานเข้าไปซึ่งจะเป็นจำพวกวิตามิน เบต้าแคโรทีน และแคโรทีนอยด์ รวมทั้งสารประกอบโพลีฟีนอล ซึ่งสารดังกล่าวได้จากพืชผัก และผลไม้ ตัวอย่างอาหารที่มีเบต้าแคโรทีนสูง ได้แก่ ผักใบเขียว เช่น ตำลึง และผักบุ้ง อาหารที่มีซีลีเนียม เช่น แครอท ฟักทอง มะเขือเทศ มะละกอสุก และมะม่วงสุก อาหารที่มีวิตามินซี (Ascorbic acid) สูง ได้แก่ พืชผักสีเขียว และผลไม้รสเปรี้ยว เช่น พริกหยวก ฝรั่ง มะขามป้อม ส้ม มะนาว และสับปะรด (วิตามินซีจากพืชผักดังกล่าวมีฤทธิ์ต่อต้านอนุมูลอิสระที่แรงมาก และละลายน้ำได้ดี) วิตามินอี (Tocopherol) ละลายในน้ำมันได้ดี โดยวิตามินอีมีในน้ำมันจากเมล็ดพืชชนิดต่างๆ เช่น รำละเอียด ในพวกธัญพืชที่ไม่ขัดขาว ข้าวโพด ข้าวกล้อง ถั่วแดง ถั่วเหลือง ผักกาดหอม เมล็ดทานตะวัน งา และน้ำมันรำข้าว

2.3 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound)

สารประกอบโพลีฟีนอลิกหรือโพลีฟีนอล เป็นสารที่มีหมู่ OH อยู่บนวงแหวนอะโรมาติกมากกว่า 1 กลุ่มขึ้นไป [12] สารในกลุ่มนี้จะมีสมบัติในการละลายน้ำได้ดี มีสมบัติทางชีวภาพหลายด้าน เช่น การเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ การกระตุ้นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดอนุมูลอิสระ กำจัดสารพิษ ต้านการอักเสบ ต้านมะเร็ง ส่งเสริมระบบภูมิคุ้มกัน ควบคุมวิถีการส่งทอดสัญญาณเข้าสู่เซลล์ สารในกลุ่มนี้จะพบได้มากในธรรมชาติ เช่น พืชผัก ผลไม้ โกโก้ ไวน์แดง ชาเขียว และชาดำ เป็นต้น [13] เนื่องจากสารที่อยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิกมีหลากหลายชนิดเมื่อนำมาจำแนกตามโครงสร้างจะแบ่งได้ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกแบ่งตามโครงสร้าง

จากรูปที่ 1 จะแบ่งโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิกได้ 5 ประเภท ดังนี้

- 1) ไดเฟอรูโลอิลมีเทน (Diferuloylmethane) เช่น คูเคอร์มิน (Curcumin)
- 2) สติลเบน (Stilbenes) เช่น เรสเวราทรอล (Resveratrol)
- 3) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) เช่น แคทเทชิน (Catechin)
- 4) กรดฟีนอลิก (Phenolic acids) เช่น กรดควินิก (Quinic acid) กรดแกลลิก (Gallic acid) กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid)
- 5) แทนนิน (Tannins)

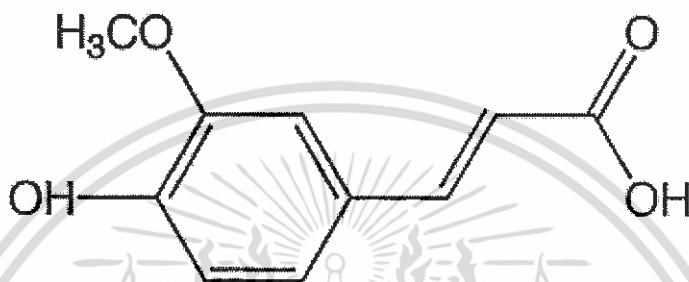
2.4 กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid) [14]

กรดเฟอร์ูลิกเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และเป็นหนึ่งในสารประกอบฟีนอลิก มีชื่อเรียกตามระบบ IUPAC ว่า 4-hydroxy-3-methoxycinnamic acid ลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับกรดคาเฟอิก (Caffeic acid) ถูกพบได้ทั้งในเมล็ดของพืชผักผลไม้ต่างๆ เช่น ข้าวโพด แอปเปิ้ล กาแฟ ส้ม สับปะรด ถั่วลิสง และนอกจากนั้นแล้วยังพบใน โวน์ ชาเขียว น้ำมันมะกอก และน้ำมันรำข้าวโพด กรดเฟอร์ูลิกถูกนำมาใช้งานในด้านต่างๆ มากมายไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์ อุตสาหกรรม และอาหาร จากงานวิจัยพบว่าเป็นสารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) สารต้านจุลชีพ (Antimicrobial) สารต้านการอักเสบ (Anti-inflammatory) และสารต้านมะเร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Anticancer) นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันโรคหลอดเลือดหัวใจ ลดคอเลสเตอรอลในตับ และป้องกันการทำลายผิวของ UVB เป็นต้น

ในข้าวโพดกรดเพอรูลิกจะอยู่ที่เปลือกของเมล็ด บริเวณผนังเซลล์จากพันธะเอสเทอร์ระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกกับแอลฟา-แอล อาราบิโนส (α - L arabinose) ในน้ำตาลไซแลน (Xylans) จากงานวิจัยได้มีการศึกษาการให้ความร้อนแก่ข้าวโพดหวานแล้วนำมาตรวจหาปริมาณของกรดเพอรูลิกพบว่าข้าวโพดหวานมีปริมาณกรดเพอรูลิกมากที่สุด [15]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกรดเพอรูลิก

2.5 วัสดุนาโนคาร์บอน (Carbon nanomaterial) [16]

คาร์บอนเป็นธาตุที่พบได้ในธรรมชาติมี 6 อิเล็กตรอนโดย 2 อิเล็กตรอนติดกับนิวเคลียส และอีก 4 อิเล็กตรอนเป็นอิเล็กตรอนรอบนอก คาร์บอนเป็นธาตุที่มีหลายอัญรูป เช่น คาร์บอนแบล็ค เส้นใยคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอน และเมโซพอร์สคาร์บอน

2.5.1 คาร์บอนแบล็ค (Carbonblack)

เป็นคาร์บอนที่บริสุทธิ์อยู่ในรูปอนุภาค ลักษณะภายนอกเป็นสีดำคล้ายผงแป้งละเอียดตั้งแสดงในรูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของอนุภาคเป็นทรงกลมที่เกาะตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่าง 80-500 นาโนเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ย 9-11 นาโนเมตร จัดเป็นคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) การผลิตส่วนใหญ่ทำในเตาเผาหลอมเกิดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยมีวิธีการในการผลิตที่หลากหลายซึ่งได้แบ่งตามนี้

- 1) Lamp black เป็นกระบวนการผลิตโดยเผา น้ำมันหนัก วิธีการนี้จะได้อนุภาคของคาร์บอนแบล็คที่ใหญ่ที่สุด
- 2) Furnace black เป็นกระบวนการผลิตโดยเผา น้ำมัน วิธีนี้จะได้อนุภาคที่ละเอียดขึ้น เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด
- 3) Gas black เป็นกระบวนการผลิตโดยเผาแก๊สธรรมชาติ วิธีนี้จะได้อนุภาคที่ละเอียดที่สุด เบาที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

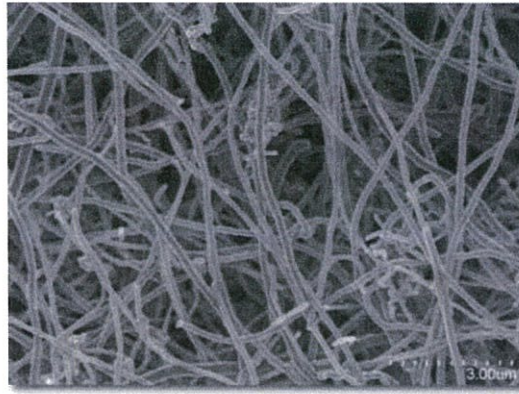
ปัจจุบันได้มีการนำเอาคาร์บอนแบล็คมาใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ และสารเคลือบ



รูปที่ 2.4 ลักษณะทั่วไปของคาร์บอนแบล็ค

2.5.2 เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofiber)

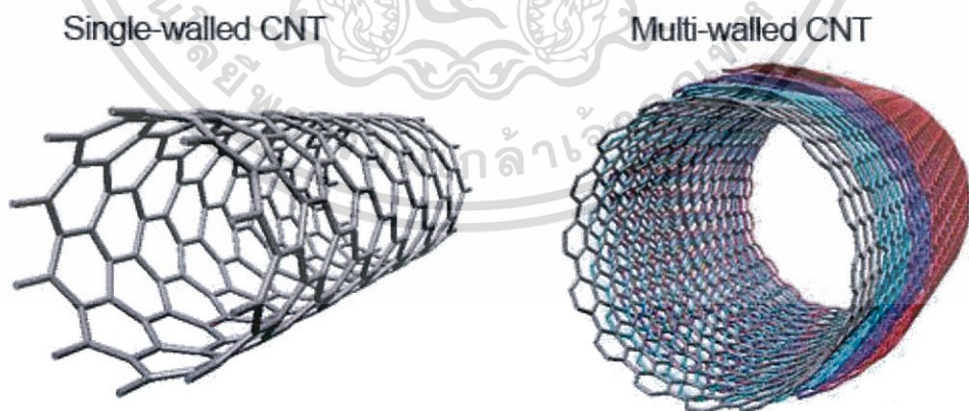
มีลักษณะภายนอกเป็นรูปทรงกระบอกหรือกรวย เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 20-60 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โครงสร้างภายในจะเป็นกราฟิตซ้อนกันหลายๆชั้นเป็นรูปกรวย ลักษณะเด่นของเส้นใยนาโนคาร์บอน คือ การซ้อนกันของแผ่นกราฟิตทำมุมกับแกนของเส้นใยนาโน ที่มุมไม่เท่ากับ 0° แต่เมื่อแผ่นกราฟิตวางตัวในแนวขนานกับแกนเส้นใยนาโนจะเรียงตัวออกมาเป็นท่อนาโนคาร์บอนเนื่องจากมีองค์ประกอบที่จัดเรียงตัวทั้งในระนาบและระหว่างระนาบของการขนส่ง และสมบัติเชิงกลตามแกนเส้นใย ตลอดจนการมีพันธะที่ไม่อิ่มตัวที่คล้ายกับแกรไฟต์ ทำให้ลักษณะเฉพาะของเส้นใยนาโนคาร์บอนแตกต่างจากท่อนาโนคาร์บอน เส้นใยนาโนคาร์บอนเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับตัวเร่งที่เป็นโลหะ (Fe, Ni, Co) เส้นใยจะเกิดในขณะที่มีการสะสมไอระเหยของแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก การควบคุมเพื่อให้เกิดโครงสร้าง และองค์ประกอบที่เป็นเส้นใยนาโนคาร์บอนสามารถทำได้ด้วยการใช้พลาสมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นให้เกิดไอระเหยของสารเส้นใยนาโนคาร์บอนที่ผลิตได้จากอุตสาหกรรมนั้น นำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ วัสดุสำหรับกักเก็บแก๊ส และวัสดุสำหรับการยึดเกาะของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ภาพ TEM ของเส้นใยคาร์บอน

2.5.3 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) [17]

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงสร้างร่างแหตาข่ายขนาดเล็ก ซึ่งสังเคราะห์ได้จากคาร์บอน โดยในการสังเคราะห์จะได้ออกมา 2 ลักษณะ คือ เป็นผนังชั้นเดียว (Single walled carbon nanotubes, SWCNTs) และผนังหลายชั้น (Multi walled carbon nanotubes, MWCNTs) แสดงดังรูปที่ 2.6 เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในระดับนาโนเมตรประมาณ 1-15 นาโนเมตร และความยาวของท่อประมาณ 10 ไมโครเมตร มีคุณสมบัติที่แข็งแกร่งกว่าเหล็กกล้า แต่ขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่น และน้ำหนักเบา สมบัติที่สำคัญ คือ เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือกึ่งนำไฟฟ้า และนำความร้อนได้ดี จึงได้มีการนำเอามาใช้ประโยชน์ในงานหลากหลายประเภท เช่น ทำชิปในคอมพิวเตอร์ ทำสายเคเบิล อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือเซนเซอร์ตรวจวัดระดับสารเคมี เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ลักษณะของ SWCNT และ MWCNT

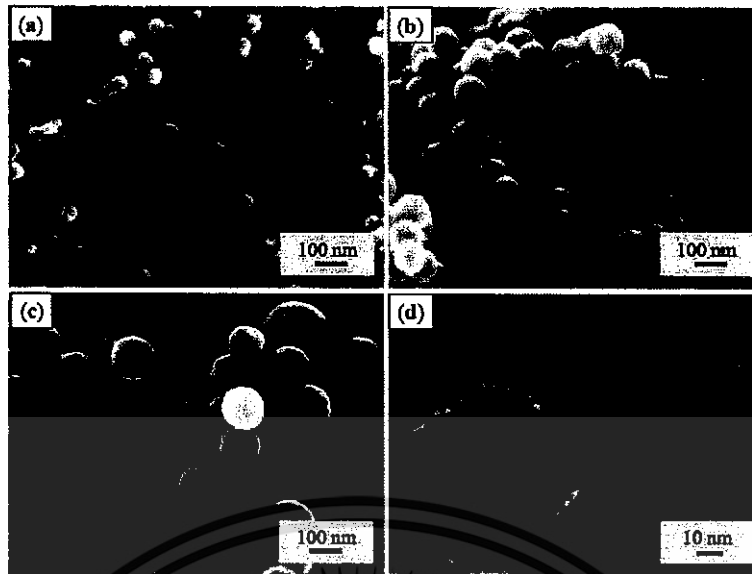
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 เมโซพอร์สคาร์บอน (Mesoporous Carbon) [18]

เป็นคาร์บอนในระดับนาโนที่มีความน่าสนใจเพราะมีพื้นที่ผิวมาก และมีคุณสมบัติทางเคมีที่ดี ในการสังเคราะห์จะได้ขนาดของรูพรุนค่อนข้างหลากหลายดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยถ้าจะแยกขนาดของรูพรุนโดยมาตรฐานของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) สามารถจำแนกรูพรุนได้ 3 ประเภท ประเภทแรก คือ ไมโครพอร์ (Micropore) เป็นรูพรุนที่มีขนาดความกว้างไม่เกิน 2 นาโนเมตร โครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์นี้ถ้ามีอยู่จำนวนมากจะส่งผลให้วัสดุดังกล่าว มีขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก (หมายถึง พื้นที่ผิวของวัสดุที่โมเลกุลใดๆ สามารถเข้าถึงได้ต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุนั้น) และเนื่องจากความกว้างของรูพรุนแบบไมโครพอร์มีขนาดที่โตกว่าขนาดของโมเลกุลทั่วไปไม่มากนักผลที่ตามมา คือ เมื่อมีโมเลกุลใดๆเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในรูพรุนแล้ว โมเลกุลเหล่านั้นจะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงอันตรกิริยาจากผนังของรูพรุน เราเรียกแรงอันตรกิริยานี้ว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Interaction) และแรงแวนเดอร์วาลส์นี้เองที่ทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์สามารถกักเก็บโมเลกุลบางชนิดเอาไว้ได้ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อนำวัสดุที่มีรูพรุนแบบไมโครพอร์ไปประยุกต์ในเทคโนโลยีการดูดซับ (Adsorption) หรือวัสดุสำหรับตรึงรูปตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี ในงานวิจัยด้านวัสดุนักวิจัยมักจะมุ่งเน้นความสำคัญไปที่การสังเคราะห์รูพรุนขนาดไมโครพอร์เป็นหลักเพราะต้องการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเท่านั้น สำหรับรูพรุนประเภทที่ 2 ซึ่งจะมีขนาดรูพรุนกว้างกว่า คือ มีขนาดในช่วง 2-50 นาโนเมตร เรียกว่า เมโซพอร์ (Mesopore) โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูพรุนแบบเมโซพอร์ขนาดเล็ก (ขนาดความกว้างอยู่ระหว่าง 2-10 นาโนเมตร) จะมีประโยชน์คล้ายกับรูพรุนแบบไมโครพอร์ในด้านความสามารถในการกักเก็บโมเลกุลโดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลขนาดใหญ่จำพวกสารชีวโมเลกุลโดยมากมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ในระดับนาโนเมตร จึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์จากผนังของเมโซพอร์ยังคงมีอิทธิพลต่อโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้ ผลที่ตามมาทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบเมโซพอร์ขนาดเล็กยังคงมีศักยภาพในการกักเก็บสารชีวโมเลกุลเหล่านี้ได้เป็นอย่างดี ด้วยลักษณะดังกล่าวจึงทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบเมโซพอร์ขนาดเล็กยังคงมีศักยภาพในการกักเก็บสารชีวโมเลกุลเหล่านี้ได้เป็นอย่างดี จึงทำให้โครงสร้างรูพรุนแบบเมโซพอร์เป็นที่นิยมในการถูกนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการตรึงรูปเอนไซม์ และลักษณะรูพรุนประเภทสุดท้าย คือ แมโครพอร์ (Macropore) หมายถึงรูพรุนที่มีขนาดกว้างตั้งแต่ 50 นาโนเมตรขึ้นไป เดิมทีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่เหล่านี้ไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากไม่ได้มีส่วนช่วยโดยตรงต่อการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุพอรุนรวมถึงการมีขนาดความกว้างของรูพรุนที่ใหญ่กว่าโมเลกุลทั่วไปมากจึงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ไม่มีอิทธิพลภายในรูพรุนเหล่านั้น

สำหรับเมโซพอร์สคาร์บอนจะเป็นคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทำขั้วไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความไวในการในการตรวจวัดสัญญาณ ด้วยสมบัติความเป็นคาร์บอนจึงทำให้เมโซพอร์สคาร์บอนมีสมบัติทางเคมีที่ดี ไม่ว่าจะเป็นสมบัติการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity) สมบัติการนำความร้อน (Thermal Conductivity) และความเสถียรทางเคมี (Chemical Stability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ภาพ SEM แสดงลักษณะของเมโซพอร์สคาร์บอน

2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพ

2.6.1 การหาพื้นที่ผิวและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน [19]

บรูเนอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้า และภายในรูพรุนของวัสดุ พบว่า แก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว จนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือจะแพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น ซึ่งจากผลการศึกษาี้ สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ (W) กับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น เป็นสมการที่ เรียกว่า “สมการของ BET” ได้ดังนี้

$$\frac{1}{W \left[\left(\frac{P_0}{P} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

โดย W = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0

W_m = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว

P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะที่ทำการทดลอง (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)

P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)

ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน ใช้เซลล์สำหรับ

ใส่ตัวอย่าง (Sample cell) จำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่มีวัสดุตัวอย่างแต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้น และโมเลกุลของสารถูกดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิวหน้าของวัสดุตัวอย่าง จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศเพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น ก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ จากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีวัสดุตัวอย่างความดันของแก๊สไนโตรเจนจะคงที่ (P_0) ข้อมูลที่เครื่องบันทึกผล คือค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (W) โดยวัสดุตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก และแก๊สไนโตรเจนจะถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเป็นเช่นนี้จนกระทั่งความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง ($P/P_0 \cong 1$) แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้ว จากข้อมูลค่าความดันสัมพัทธ์ และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้ เครื่องทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผลออกมาเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรของรูพรุน

2.6.2 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์

อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) [20]

เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กในระดับจุลภาค FE-SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ อีกทั้ง FE-SEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่นๆ เพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FE-SEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction; EBSD) จะเห็นได้ว่า FE-SEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค

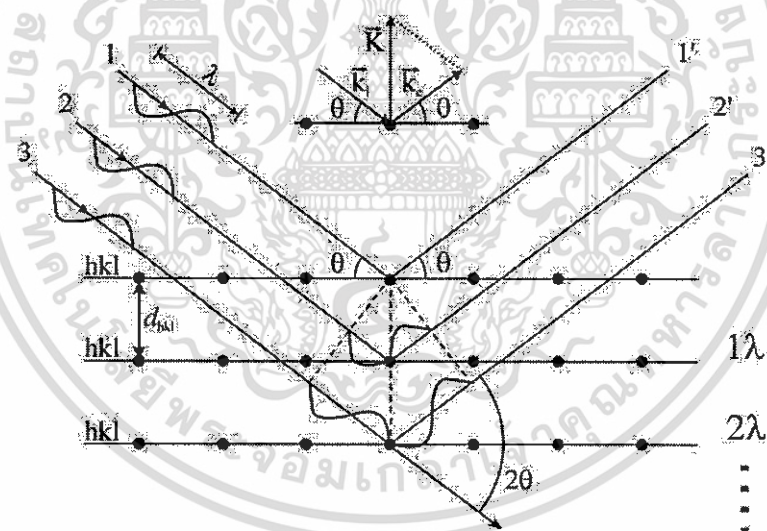
ทำงานโดยการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแรงสูงใกล้ปลาย filament เป็นพิเศษ ขั้วแอโนด (Anode) มี 2 ขั้วเรียงตัวซ้อนกัน เครื่อง SEM ประเภทนี้ให้ระยะการแยกความแตกต่างระหว่างสองจุด (Resolution) แบ่งได้เป็น 2 แบบย่อย คือ Cold Field Emission Electron Gun Emitter (CFE) ทำด้วยโลหะทั้งสแตนด์บายขึ้นรูปเป็นแท่งส่วนปลายมีความแหลมเป็นพิเศษ และ Schottky-Emission Electron Gun (SE Gun) เป็น FE Gun ที่นำไปเคลือบเพิ่มเติมด้วยเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ Field-emission ให้การแจ่มแจ้ง ความคมชัด กำลังขยายที่ดี และอายุการใช้งาน filament ที่ยาวนานกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) [21]

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันเป็นเทคนิคพื้นฐานของการวิเคราะห์ทดสอบวัสดุ สามารถนำมาใช้ในการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุ เพื่อประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพ การพัฒนาวัสดุใหม่ และการแก้ไขปัญหาในกระบวนการผลิต และการใช้งานโดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิด และปริมาณของธาตุหรือสารประกอบในสารตัวอย่าง ความเค้น ปริมาณความเป็นผลึก เป็นต้น

การวิเคราะห์นี้เป็นการตรวจสอบองค์ประกอบของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนพื้นผิวของวัสดุแล้ว เกิดการกระเจิง (Scattering) และเลี้ยวเบน โดยมุมเลี้ยวเบนจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึก และระนาบที่รังสีตกกระทบ ดังนั้นเมื่อทราบมุมที่กระเจิงออกมาสามารถตรวจสอบได้ว่าเป็นเฟสของผลึกชนิดใด นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นขององค์ประกอบในสารตัวอย่าง และสามารถหาความหนาของฟิล์มได้



รูปที่ 2.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของอะตอม

2.6.4 การวิเคราะห์โดยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) [22]

เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ และตรวจสอบโครงสร้างของสารโดยวัดการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดที่อยู่ในช่วงประมาณ $12800-10\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส FT-IR จะใช้การวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกันอย่างต่อเนื่องเปรียบเทียบกับเวลา (Time - Domain Spectrum) จากนั้นจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสเปกตรัมของความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่นเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวคลื่นหรือเลขคลื่นโดยการ Fourier Transform ด้วยคอมพิวเตอร์ได้ออกมาเป็น Fourier Transform Spectrum ด้วย วิธีการนี้จะช่วยให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วเพิ่มขึ้น

2.6.5 เทคนิคอิมพีแดนซ์เคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)

เป็นเทคนิคที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า เทคนิคนี้สามารถใช้ในการทำงานที่เกี่ยวข้องกับโลหะได้แก่ เซมิคอนดักเตอร์ แบตเตอรี่ และอิเล็กโทรดีโพสิท (Electrodeposit) การกัดกร่อน (Corrosion) และการศึกษาลักษณะของการเคลือบแลคเกอร์ (Organic Coating)

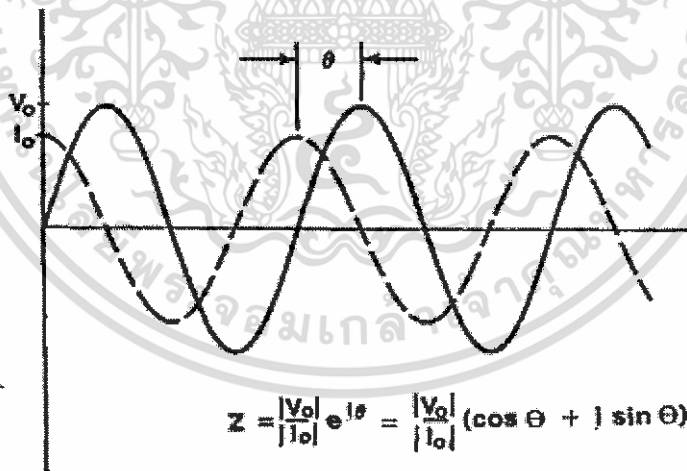
อิมพีแดนซ์ คือ ความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current) จากกฎของโอห์ม แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

$$E = IR$$

เมื่ออยู่ในรูปของกระแสสลับ

$$E = IZ$$

โดยค่าอิมพีแดนซ์ (Z) จะเท่ากับความต้าน (R) ก็ต่อเมื่อค่าความต่างเฟสของศักย์ไฟฟ้า และ กระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ในไฟฟ้ากระแสสลับค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสจะแสดงดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 ศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์ θ แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟส (Phase Shift) ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าขนาดของอิมพีแดนซ์หาได้จากอัตราส่วนของศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า

โดย

$$E = E_0 \sin(\omega t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = I_0 \sin(\omega t + \theta)$$

จากกฎของโอห์มจะได้ค่าอิมพีแดนซ์

$$Z = \frac{E}{I}$$

E คือ ศักย์ไฟฟ้า

I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า

Ω คือ ความถี่เชิงมุมต่อวินาที = $2\pi f$ เมื่อ f คือความถี่ที่มีหน่วยเป็นเฮิรต

θ คือ ความต่างเฟส (Phase Shift) มีหน่วยเป็นเรเดียน

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้อาจแสดงในรูปของปริมาณเชิงซ้อน และความต่างเฟสซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่โดยความถี่ที่ไซจะอยู่ในช่วง 10^3 - 10^5 Hz

ขนาดของอิมพีแดนซ์มีทั้งส่วนจริง (Real Component) และส่วนจินตภาพ (Imaginary Component) และสามารถแสดงในรูปของเวกเตอร์โดยให้แกน X เป็นแกนส่วนจริง และแกน Y แสดงส่วนจินตภาพ ส่วนจริงหมายถึงค่าของความต้านทานโดยศักย์ไฟฟ้าจะอยู่ในเฟสเดียวกับกระแสไฟฟ้า (In Phase) ส่วนจินตภาพหมายถึงค่าของความต้านทานโดยศักย์ไฟฟ้าจะอยู่คนละเฟสกับกระแสไฟฟ้า (Out of Phase) และสามารถแสดงผลรวมของส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้ดังนี้

$$Z = Z' + Z''$$

หรืออาจแสดงในรูปแบบอื่น เช่น

$$Z = Z \angle \theta$$

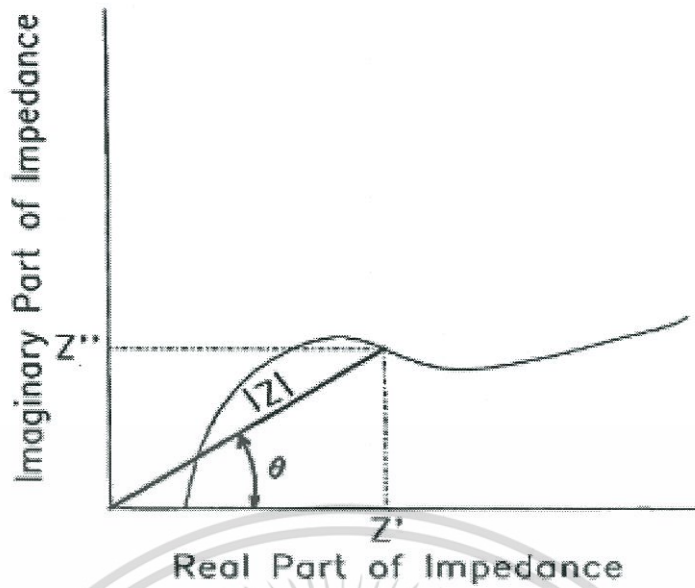
หรือ

$$|Z| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2}$$

และ

$$\tan \theta = \frac{Z''}{Z'}$$

แสดงดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ไนควิสทพล็อตแสดงขอมูลอิมพีแดนซ์ Z' แสดงสวนจริงและ Z'' แสดงสวนจินตภาพ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liqiang LUO et.al. [23] งานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดหาปริมาณกรดเพอรูลิกในตัวอย่างยา ด้วยวิธีอย่างง่ายเป็นการพัฒนาขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพรทด้วย DDAB/Nafion โดยใช้เทคนิคไซคลิก โวลแทมเมตรี ขั้วไฟฟ้าจะแสดงพีคออกซิเดชันที่ 0.44 โวลต์ ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นขั้วคาโลเมล (SCE) จุ่มในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ที่พีเอช 5.5 ภายใต้สภาวะดังนี้ กระแสพีคออกซิเดชันของสารเพิ่ม เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นในช่วง 2.0×10^{-6} ถึง 1.2×10^{-4} โมลาร์ ชัดจำกัดในการตรวจวัด คือ 0.37 นาโนโมลาร์ ($S/N = 3$) วิธีนี้ได้ผลดีในการตรวจวัดหากรดเพอรูลิกในตัวอย่างยา

A.T. Ezhil Vilian • Shen-Ming Chen [24] งานวิจัยนี้รายงานเกี่ยวกับหัววัดทางเคมีไฟฟ้า สำหรับการตรวจวัดกรดเพอรูลิกซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนของ แมงกานีสออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงนี้แสดงถึงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการ ออกซิเดชันของกรดเพอรูลิกที่พีเอช 7 วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรีเผยว่า การลดลง 23 มิลลิโวลต์ในการ แยกพีคต่อพีคของการเกิดออกซิเดชัน และรีดักชัน ซึ่งภายใต้เงื่อนไข กระแสพีคด้านบวกที่ความต่าง ศักย์ 150 มิลลิโวลต์ (เทียบกับ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) ความเป็นเส้นตรงของค่ากระแสในช่วง ความเข้มข้น 0.082 ถึง 220 ไมโครโมลาร์ และชัดจำกัดในการตรวจวัดเป็น 10 นาโนโมลาร์ หัววัดถูก นำประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดของกรดเพอรูลิกในตัวอย่างซีรัมมนุษย์ที่ถูกเติมสารมาตรฐานและได้รับ ผลที่น่าพอใจซึ่งมีค่าการคืนกลับอยู่ในช่วง 97 ถึง 99.2 %

Refat Abdel-Hamid et.al. [25] งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนด้วย โพลีไพร์โรล และ MWCNTs เพื่อทำการตรวจวัดกรดเพอรูลิก ประดิษฐ์หัววัดถูกเตรียมโดยทาง เคมีไฟฟ้าด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี และสมบัติทางกายภาพด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี และ ส่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ขั้วไฟฟ้าแสดงถึงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา เคมีไฟฟ้าของการออกซิเดชัน ภายใต้เงื่อนไข กระแสศักย์ด้านบวก มีความสัมพันธ์กันอย่างเป็นเส้นตรง ของความเข้มข้นของกรดเพอรูลิกอยู่ในช่วง 3.32×10^{-6} ถึง 2.59×10^{-5} โมลาร์ ซึ่งขีดจำกัดในการ ตรวจวัดเท่ากับ 1.17×10^{-6} โมลาร์ เตรียมหัววัดให้มีความจำเพาะเจาะจงสูงต่อกรดเพอรูลิกซึ่งไม่มี ตัวรบกวนของกรดแอสคอร์บิก การประยุกต์ใช้หัววัดถูกนำไปทดสอบกับการวัดกรดเพอรูลิกใน ตัวอย่างข้าวโพดคั่วเชิงพาณิชย์

Zhaohui Zhao และ Mohammed H. Moghadasian [26] จากงานวิจัยนี้กรดเพอรูลิก อุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ ด้านการเกิดมะเร็ง โรคหัวใจ และหลอดเลือด โรคเบาหวาน และโรค อัลไซเมอร์ กรดเพอรูลิกจะมีผลต่อร่างกายเพียงใดขึ้นอยู่กับสมบัติการนำเข้าไป และการดูดซึมเข้า ร่างกาย งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับสารเคมีในธรรมชาติ อาหารที่บริโภคเข้าไป และสมบัติการดูดซึมเข้า ร่างกายของกรดเพอรูลิก การพบกรดเพอรูลิกมักพบทั้งในรูปแบบอิสระ และไม่อิสระในผัก ผลไม้ ธัญพืช และกาแฟ คาดว่าการบริโภคอาหารเหล่านี้อาจส่งผลเมื่อบริโภคกรดเพอรูลิกประมาณ 150-250 มิลลิกรัมต่อวัน กรดเพอรูลิกสามารถดูดซึมตามทางเดินอาหาร และถูกเผาผลาญที่ตับเป็น ส่วนใหญ่ การดูดซึม และการเผาผลาญของกรดเพอรูลิกขึ้นอยู่กับปริมาณที่เรากำหนดในการทดลอง นอกจากการออกฤทธิ์ของยาต่อร่างกาย และการดูดซึมของยาเข้าสู่ร่างกายแล้วยังศึกษาผลกระทบ ของกรดเพอรูลิกต่อสุขภาพของมนุษย์อีกด้วย

Shengqiang Zhao et.al. [27] จากงานวิจัยนี้ เมล็ดข้าวโพด (หรือรำข้าวโพด) มีจำนวน กรดเพอรูลิกที่สูง อย่างไรก็ตามก็พบปัญหาการแยก และการทำให้บริสุทธิ์ของกรดเพอรูลิก จากเมล็ด ข้าวโพด ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษากรดเพอรูลิกจากเมล็ดข้าวโพดโดยผ่านการแยก ด้วยเมมเบรนจาก ไฮโดรไลซิสด้วยสารละลายเอทานอลอัตราส่วนของข้าวโพดที่สกัดโดยใช้ 0.25 โมลต่อลิตรของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใน 50% ของสารละลายเอทานอล ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กรองด้วยวิธีอัลตราฟิวเทชัน ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เมมเบรนขนาด 5000 Da เมื่อใช้เมมเบรน ขนาด 150 Da จะได้ค่าการคืนกลับของกรดเพอรูลิกถึง 91.8% ผลึกของกรดเพอรูลิกมีความบริสุทธิ์ 84.45% หลังปรับค่าพีเอชเป็น 2.0 น้ำตาลรีดิวซ์ที่ถูกปล่อยออกมาจะลดสารตกค้างได้ 54.5% เมื่อเทียบกับเมล็ดข้าวโพด หลังจากได้รับเอนไซม์ย่อยสลายไป 8 ชั่วโมง

Liande Zhu et.al. [28] งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์เมโซพอร์คาร์บอนชนิดที่ถูกจัดให้ เป็นระเบียบโดยใช้เทคนิคการให้เกิดฟิล์ม ซึ่งคาร์บอนชนิดนี้มีสมบัติทางเคมีไฟฟ้าในการสามารถจับ กับสารชีวโมเลกุลเกิดปฏิกิริยา และส่งผลให้สารเหล่านั้นนำไฟฟ้าได้ เช่น Ascorbic acid (AA) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acetaminophenol (AP) Cysteine (CySH) Dopamine (DA) Epinephrine (EP) Uric acid (UA) และ β -nicotinamide adenine dinucleotide (NADH) ซึ่งจะใช้กับขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนโดยขั้วที่ผ่านการปรับปรุงแล้วนำมาเทียบกับท่อนาโนคาร์บอน และแกรไฟต์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดเดียวกัน ปรากฏว่าเมื่อนำไปวัดด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ขั้วไฟฟ้าที่ได้รับการปรับปรุงด้วยแอสคอร์บิก (Ascorbic acid :AA) มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และความไวดีกว่าขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยท่อนาโนคาร์บอน และขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยแกรไฟต์ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อนำขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้ว มาใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ NADH และเป็นแพลตฟอร์มที่เสถียรในการผลิตไบโอเซนเซอร์ กลูโคส และเอทานอลที่ถูกตรึงเอนไซม์

Azmi Mohd Shariff et.al. [29] งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนจากรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันเพื่อดูโครงสร้างของสาร โดยตัวเร่งที่นำมาใช้คือ กรดอะซิติก โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีการในการสังเคราะห์จะใช้รีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ ใส่น้ำ และตามด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ในอัตราส่วน ดังนี้ รีซอร์ซินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ = 0.5 รีซอร์ซินอลต่อน้ำ = 0.125 และรีซอร์ซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา = 400 ในการสังเคราะห์ครั้งนี้ถูกตรวจสอบด้วย XRD TGA SEM BET และ FT-IR ผลที่ได้คือคาร์บอนที่เกิดโดยใช้ตัวเร่งเป็นกรดอะซิติกมีพื้นที่ผิวมากที่สุด (619.26 ตารางเมตรต่อกรัม)

Eghe A.Oyedoh et.al. [30] งานวิจัยนี้ถูกศึกษาโดยการตรวจสอบความเป็นรูพรุน โดยดูจากประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียในอุตสาหกรรม RF คาร์บอนซีโรเจล ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธี sol-gel polymerization ของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ในโซเดียมคาร์บอเนต หลังจากนั้นทำให้แห้งด้วยสูญญากาศ RF เจล ถูกสังเคราะห์ในสภาวะที่มีอุณหภูมิเหมือนกัน ต่างกันที่อัตราส่วนของรีซอร์ซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา และรีซอร์ซินอลต่อน้ำ อิทธิพลของอัตราส่วนของรีซอร์ซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา และรีซอร์ซินอลต่อน้ำ ส่งผลต่อโครงสร้างรูพรุนของซีโรเจล พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของ RF เจล ถูกนำมาวิเคราะห์โดยการดูดซับทางกายภาพโดยแก๊สไนโตรเจนที่ 77 เคลวิน ผลแสดงให้เห็นว่าความเป็นรูพรุนขนาดเมโซ และขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของรีซอร์ซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ขณะที่อัตราส่วนรีซอร์ซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา = 200 ขนาดของรูพรุน และปริมาณของรูพรุนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนรีซอร์ซินอลต่อน้ำ จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ รีซอร์ซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยา และรีซอร์ซินอลต่อน้ำเป็นสองปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างของรูพรุนของซีโรเจล

Jinming Xu et.al. [31] จากงานวิจัยนี้มี 2 วิธีที่พัฒนาการสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนจากรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ สำหรับวิธีนี้เป็นปฏิกิริยาก่อนการเกิดพอลิเมอร์ของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นฐาน จากนั้นนำรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ผสมกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย พลูโรนิค F-127 ตามด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เพื่อจัดวางโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ และเกิดการควบแน่นในขั้นตอนที่ 2 เมื่อเทียบกับรายงานช่วงแรกๆ มักใช้วิธี EISA และ one-step liquid phase self-assembly ในปัจจุบันใช้อยู่สองวิธีคือ liquid method the self-assembly และการควบแน่นกระบวนการสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว โดยการใช้ปริมาณกรด-เบสที่ต่ำ ในอุณหภูมิห้องหลังจากที่กระตุ้นทางเคมีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ เมโซพอร์สคาร์บอนยังคงเป็นวัสดุคาร์บอน และเมื่อวัดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุ ซึ่งมีพื้นที่ผิวถึง 2660 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาณ รูพรุนเพิ่มขึ้นถึง 2.01 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม การกระตุ้นทางเคมีของคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่เพียงแต่สร้างรูพรุนของคาร์บอนแต่ยังขยายขนาดของรูพรุนโดยปฏิกิริยาการดึงออก (ดึงหมู่อะตอมที่เกาะอยู่กับคาร์บอนออกไปเป็นโมเลกุล) ทำให้เกิดรูพรุนบริเวณผิวของคาร์บอน

Balazs Nagy et.al. [32] ได้ทำการพัฒนาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ของรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ วิธีใหม่ด้วยการเจือโลหะโมลิบดีนัมลงไปในช่วงกระบวนการโซลเจลของการเตรียมรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยจะวิธีนี้จะเป็นการเตรียมสารก่อนกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (pre-polymerization) โดยการเตรียมรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ จะถูกเตรียมด้วยวิธีการโซลเจลโดยใช้โซเดียมคาร์บอนเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และนำไปอบภายใต้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์เจลที่เจือด้วยโลหะโมลิบดีนัมจะเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการเกิด pre-polymerization โดยงานวิจัยนี้ทำการเจือโลหะโมลิบดีนัมทำให้เพิ่มการเกิด pre-polymerization เป็นเวลา 110 นาทีซึ่งการเพิ่มระยะเวลาในการเกิด pre-polymerization จะทำให้เกิดพอลิเมอร์ที่มีความเป็นรูพรุนมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	สูตรโมเลกุล	เกรด	ผู้ผลิต
ทรานส์-กรดเฟอร์ูลิก (trans-Ferulic acid)	$C_{10}H_{10}O_4$	99%	Sigma-Aldrich
รีซอร์ซินอล (Resorcinol)	$C_6H_6O_2$	วิเคราะห์	Carlo Erba
ฟอร์มัลดีไฮด์ 37%w/v (Formaldehyde)	CH_2O	วิเคราะห์	Carlo Erba
โซเดียมคาร์บอเนตแอนไฮไดรึส (Sodium carbonate anhydrous)	$NaCO_3$	วิเคราะห์	Carlo Erba
โพแทสเซียมเฟอร์ริกไซยาไนด์ (Potassium ferricyanide)	$K_3[Fe_2(CN)_6]$	วิเคราะห์	Carlo Erba
โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride)	KCl	วิเคราะห์	Carlo Erba
ไกลซีน (Glycine)	$C_2H_5NO_2$	วิเคราะห์	Ajax FineChem
โซเดียมไดไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตแอนไฮไดรึส (Sodium dihydrogen orthophosphate anhydrous)	NaH_2PO_3	วิเคราะห์	Loba Chemie
โซเดียมฟอสเฟตไดเบสิกแอนไฮไดรึส (Sodium phosphate dibasic anhydrous)	Na_2HPO_3	วิเคราะห์	Loba Chemie
กรดอะซิติก (Acetic acid)	CH_3COOH	วิเคราะห์	Thomas baker(Chemical)
โซเดียมอะซิเตทไตรไฮเดรต (Sodium acetate trihydrate)	$CH_3COONa \cdot 3H_2O$	วิเคราะห์	Fisher scientific
D-Glucose anhydrous	$C_6H_{12}O_6$	วิเคราะห์	Ajax Finechem
L-Ascorbic acid	$C_6H_8O_6$	วิเคราะห์	Carlo Erba
แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas)	N_2	99%	Praxair

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่อง Potentiostat รุ่น Autolab PGSTAT302N จาก Metrohm และโปรแกรม NOVA 1.10
- 2) เครื่องกวนสารและเตาให้ความร้อน (Heating magnetic stirrer) รุ่น ARE จาก VELP scientific
- 3) ไมโครปิเปต รุ่น ZY60061 จาก Thermo scientific
- 4) เครื่องปั่นน้ำผลไม้ รุ่น BF-120 จาก Otto
- 5) ตู้อบ (Oven) รุ่น OF-11E จาก Jeio Tech
- 6) กระจกฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide) $\sim 10 \Omega/\text{sq}$. จาก Sigma-Aldrich
- 7) เตาเผา 1500°C (Furnace) รุ่น M8-4U4 จาก Chavachote
- 8) เครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner) รุ่น ME 4.6 จาก Mettler electronics
- 9) เครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) รุ่น UT61B จาก Uni-trend
- 10) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) รุ่น FTIR spectrum Gx จาก Perkin elmer
- 11) เครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer, BET) รุ่น Autosorb-1 จาก Quantachrome
- 12) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) รุ่น S4700 จาก Hitachi
- 13) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD) รุ่น D8 จาก Bruker AXS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสังเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอน [29]

1) ซังรีซอร์ซินอล 3 กรัม โซเดียมคาร์บอเนต 7.5 มิลลิกรัม และเติมน้ำปราศจากไอออน 24 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเติมฟอร์มัลดีไฮด์ 6 มิลลิลิตร และปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2) นำสารละลายในข้อ 1 ไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง และทิ้งให้แห้งในอุณหภูมิห้องนาน 3 วัน และนำไปเผาที่ 900 องศาเซลเซียส ที่ heating rate 10°C/นาที ภายใต้แก๊สไนโตรเจน และนำมาบดให้เป็นผง

3.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ ไกลซิน

1) นำแผ่นขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์มาตัดให้ได้ขนาด 1x1 เซนติเมตร จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าไปทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอล นาน 15 นาที ตามลำดับ ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู จากนั้นกำหนดพื้นที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าให้มีขนาด 3x3 มิลลิเมตร

2) ซังเมโซพอร์สคาร์บอน 0.6 มิลลิกรัม เติมเอทานอล 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกระจายอนุภาคด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) หยดสารละลายที่เตรียมในข้อ 2 ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนพื้นที่ 3x3 มิลลิเมตร ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที เก็บไว้ในโถดูดความชื้นนาน 30 นาที

4) นำขั้วไฟฟ้าที่ได้ในข้อ 3 นำมาเกาะติดด้วยไกลซิน ด้วยวิธีอิเล็กโทรโพลิเมอไรเซชัน (Electropolymerization) โดยการนำขั้วไฟฟ้าในข้อ 3 จุ่มในสารละลายไกลซิน ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตรในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่พีเอช 7 ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง +1.5 โวลต์ อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 2 รอบ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน

5) นำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ไปศึกษาลักษณะทางไฟฟ้า และทางกายภาพ และนำไปทำการตรวจวัดกรดเฟอร์ริก และตัวอย่างข้าวโพดด้วยเทคนิคโวลแทมเมทรี

3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอนและขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนที่ ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน

1) การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและรูพรุนของอนุภาค ด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน

2) การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อีมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)

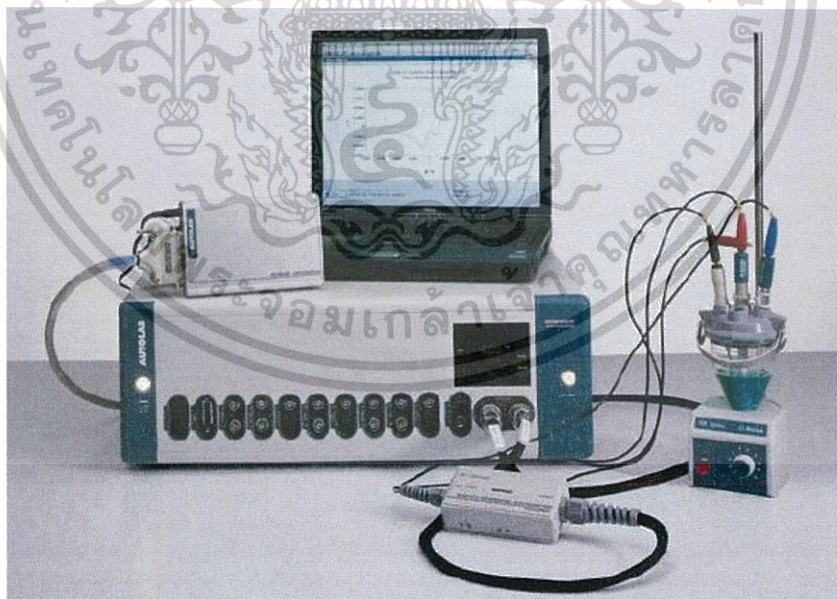
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

4) การวิเคราะห์โดยวิธีฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคป (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วย เมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

1) ศึกษาโดยเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จากขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เปลือย (bare FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไกลซิน (Gly/FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน (MSC/FTO) และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน (Gly/MSC/FTO) โดยนำขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($K_3(Fe(CN)_6)$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตรในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ผ่านแก๊สไนโตรเจนนาน 1 นาที เพื่อไล่แก๊สออกซิเจน ทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีด้วยเครื่อง Autolab พร้อมโปรแกรม NOVA 1.10 ใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงานทั้ง 4 ชนิด ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) และขั้วไฟฟ้าช่วยแพลทินัม (Platinum) แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่อง Autolab และการจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กำหนดพารามิเตอร์ของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ดังต่อไปนี้

Start potential:	-0.7 โวลต์
Upper vertex potential:	+0.8 โวลต์
Low vertex potential:	-0.8 โวลต์
Scan rate:	0.1 โวลต์ต่อวินาที
Step potential:	0.02 โวลต์

3) จากนั้นยกขั้วไฟฟ้าทั้งสามขึ้น ล้างขั้วไฟฟ้าด้วยน้ำปราศจากไอออน ซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู ทำเช่นนี้ทุกครั้งก่อนใช้งาน

3.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดกรดเพอรูลิกด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

3.7.1 การศึกษาผลของอิเล็กโทรไลต์

1) เตรียมไฟฟ้าใช้ฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ตามหัวข้อ 3.4

2) เตรียมสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ได้ดังนี้

- เตรียมกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- เตรียมโซเดียมอะซิเตตไตรไฮเดรตความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร

3) เตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ได้ดังนี้

- เตรียมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- เตรียมไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร

4) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ได้ดังนี้

- เตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนในขวดวัดปริมาตร 250 มิลลิลิตร

5) นำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าช่วยแพลทินัม จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังตารางที่ 3.2 และผ่านแก๊สไนโตรเจนนาน 1 นาที เพื่อไล่แก๊สออกซิเจน

6) บันทึกไซคลิกโวลแทมโมแกรม โดยกำหนดพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

Start potential:	-0.1 โวลต์
Upper vertex potential:	+1.0 โวลต์
Low vertex potential:	-0.2 โวลต์
Scan rate:	0.1 โวลต์ต่อวินาที
Step potential:	0.02 โวลต์

7) ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-3 แต่เปลี่ยนชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่น ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงสถานะในการศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	ความเข้มข้นสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ (โมลต่อลิตร)	พีเอช สารละลาย อิเล็กโทรไลต์	ความเข้มข้น กรดเพอรูลิก (โมลต่อลิตร)
อะซิเตตบัฟเฟอร์ (ABS, CH ₃ COONa+CH ₃ COOH)	0.2	3.00	5×10 ⁻⁴
ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (PBS, Na ₂ HPO ₄ +NaH ₂ PO ₄)	0.2	7.00	5×10 ⁻⁴
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	0.2	13.00	5×10 ⁻⁴

3.7.2 การศึกษาผลของพีเอช

1) เตรียมขั้วไฟฟ้าใช้ฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ตามหัวข้อ 3.4

2) นำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าช่วยแพลทินัม จุ่มในสารละลาย กรดเพอรูลิกในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ ดังตารางที่ 3.3 และผ่านแก๊สไนโตรเจนนาน 1 นาที เพื่อไล่แก๊สออกซิเจน

3) บันทึกไซคลิกโวลแทมโมแกรม โดยกำหนดพารามิเตอร์เหมือนกับข้อ 3.7.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ที่พีเอชต่างๆ (แสดงการคำนวณสารในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 3.3 แสดงสถานะในการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสม

พีเอช	ความเข้มข้นของ สารละลายอะซิเตต (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้น ของกรดเพอรูติก (โมลต่อลิตร)	ปริมาณสารละลาย อะซิเตตบัฟเฟอร์ (มิลลิลิตร)	อัตราการสแกน (มิลลิโวลต์ต่อ วินาที)
2.5	0.2	5×10^{-4}	45	100
3	0.2	5×10^{-4}	45	100
3.5	0.2	5×10^{-4}	45	100
4	0.2	5×10^{-4}	45	100
4.5	0.2	5×10^{-4}	45	100
5	0.2	5×10^{-4}	45	100
5.5	0.2	5×10^{-4}	45	100
6	0.2	5×10^{-4}	45	100
6.5	0.2	5×10^{-4}	45	100
7	0.2	5×10^{-4}	45	100

3.7.3 ศึกษาผลของอัตราการสแกน

1) เตรียมขั้วไฟฟ้าใช้งานฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซินตามหัวข้อ 3.4

2) นำขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าช่วยแพลทินัม จุ่มในสารละลายกรดเพอรูติกในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ ใช้ปริมาณสารดังตารางที่ 3.3 และผ่านแก๊สไนโตรเจน นาน 1 นาที เพื่อไล่แก๊สออกซิเจน

3) บันทึกไซคลิกโวลแทมโมแกรม โดยกำหนดพารามิเตอร์เหมือนกับข้อ 3.7.1 โดยใช้ อัตราการสแกนที่ 50 ถึง 300 มิลลิโวลต์ต่อวินาที (แสดงการคำนวณสารในภาคผนวก ข)

3.8 การศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิกด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีนด้วยเทคนิคโวลแทมเมทรี (Voltammetry method)

3.8.1 การศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิกด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry)

1) การศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตรในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 ทำการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เปลือย (bare FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไกลซีน (Gly/FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน (MSC/FTO) และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (Gly/MSC/FTO)

2) บันทึกไซคลิกโวลแทมโมแกรม โดยกำหนดพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

Start potential:	0.0 โวลต์
Upper vertex potential	+0.8 โวลต์
Low vertex potential:	+0.1 โวลต์
Scan rate:	0.1 โวลต์ต่อวินาที
Step potential:	0.02 โวลต์

3.8.2 การศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิก ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโวลแทมเมทรี (Differential Pulse Voltammetry)

1) การศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตรในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 ทำการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เปลือย (bare FTO)) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไกลซีน (Gly/FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน (MSC/FTO) และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (Gly/MSC/FTO)

2) บันทึกดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมโมแกรม โดยกำหนดพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

Initial potential:	+0.2 โวลต์
End potential:	+0.7 โวลต์
Pulse width:	0.06 วินาที
Amplitude:	50 มิลลิโวลต์
Sample period:	0.02 วินาที
Pulse period:	0.2 วินาที

3.9 การศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง (Linearity Range)

1) เตรียมขั้วไฟฟ้าใช้ฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซินตามหัวข้อ 3.4

2) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าช่วยแพลทินัม จุ่มในสารละลายมาตรฐานกรดเพอรูติกในช่วงความเข้มข้นที่ 0.001 ถึง 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร (แสดงการคำนวณสารในภาคผนวก ข)

3) บันทึกดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมโมแกรม โดยกำหนดพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

Initial potential:	+0.2 โวลต์
End potential:	+0.7 โวลต์
Pulse width:	0.06 วินาที
Amplitude:	50 มิลลิโวลต์
Sample period:	0.02 วินาที
Pulse period:	0.2 วินาที

จากนั้นเขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดเพอรูติก

3.10 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of Detection, LOD)

การศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์เป็นการศึกษาปริมาณของกรดเพอรูติกที่น้อยที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยกราฟมาตรฐาน ใช้เทคนิค และสถานะเช่นเดียวกับข้อ 3.9 กับสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 และทำซ้ำกับสารละลายบัฟเฟอร์จำนวน 10 ครั้ง

3.11 การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of Quantitation, LOQ)

การศึกษาขีดจำกัดของการวิเคราะห์เป็นการศึกษาปริมาณของกรดเพอรูติกที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยกราฟมาตรฐาน ใช้เทคนิค และสถานะเช่นเดียวกับข้อ 3.9 กับสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 และทำซ้ำกับสารละลายบัฟเฟอร์จำนวน 10 ครั้ง

3.12 การศึกษาตัวรบกวน (Interference)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ของสารละลายมาตรฐานกรดเพอรูติก และตัวรบกวนชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร คือ กรดแอสคอบิก และกลูโคส ทำการศึกษาตัวรบกวนในอัตราส่วน 1:100 1:500 1:1000 และ 1:2000 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร โดยใช้ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน บันทึกดิฟเฟอเรนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัลส์โวลแทจโมแกรมตามสภาวะ 3.9 ทำซ้ำความเข้มข้นละ 5 ครั้ง ในการศึกษาตัวรบกวนได้ทำการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ศึกษาคือ $\pm 5\%$ ของค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (สามารถคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) ภาคผนวก ข)

3.13 การเตรียมตัวอย่างในข้าวโพด

1) นำข้าวโพดมาล้างด้วยน้ำ จากนั้นนำแต่ส่วนของเมล็ดข้าวโพดไปต้ม ที่อุณหภูมิ 80 และ 115 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ หลังจากนั้นนำน้ำข้าวโพดที่ปั่นได้มากรองด้วยผ้าขาวบาง

2) เก็บสารตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.14 การศึกษาความถูกต้อง (Accuracy)

การคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ของการวิเคราะห์กรดเพอรูลิก ในตัวอย่างดังตารางที่ 3.4 ซึ่งนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้โดยใช้เทคนิค และสภาวะเช่นเดียวกับข้อ 3.9 กับสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 ที่มีกรดเพอรูลิกที่ความเข้มข้นต่างๆ ในตัวอย่าง ทำซ้ำ 6 ครั้ง ซึ่งนำมาคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับ (คำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับ ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 3.4 แสดงการศึกษากรดเพอรูลิกในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ปริมาณเจือจาง (เท่า)	ความเข้มข้นของสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของกรดเพอรูลิก (โมลต่อลิตร)
ข้าวโพดดิบ	10	0.2	5×10^{-3}
ข้าวโพดต้มที่ 80 °c	10	0.2	5×10^{-3}
ข้าวโพดต้มที่ 115 °c	10	0.2	5×10^{-3}

3.15 การศึกษาความเที่ยง (Precision)

การแสดงค่าในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของการวิเคราะห์กรดเพอรูลิก ในตัวอย่างดังตารางที่ 3.4 ซึ่งนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้โดยใช้เทคนิค และสภาวะเช่นเดียวกับข้อ 3.9 กับสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 ที่มีกรดเพอรูลิกที่ความเข้มข้นต่างๆ ในตัวอย่าง ทำซ้ำ 6 ครั้ง นำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (การคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ภาคผนวก ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยและอภิปรายผล แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

- 1) การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน
- 2) การศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เปลือย (bare FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไกลซีน (Gly/FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน (MSC/FTO) และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (MSC/Gly/FTO)
- 3) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดกรดเพอรูลิก
- 4) การตรวจสอบความถูกต้องของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน

4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอน และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน

4.1.1 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและความพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer, BET)

จากการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนได้ค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $1106 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยปริมาตรของรูพรุนที่วัดได้ $0.8114 \text{ cm}^3/\text{g}$ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่วัดได้ 21.59 nm

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน

Sample	Surface area (m^2/g)	Pore Volume (cm^3/g)	Pore Diameter (nm)
Resorcinol + Formaldehyde (NaCO_3 catalyst)	1106	0.8114	21.59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

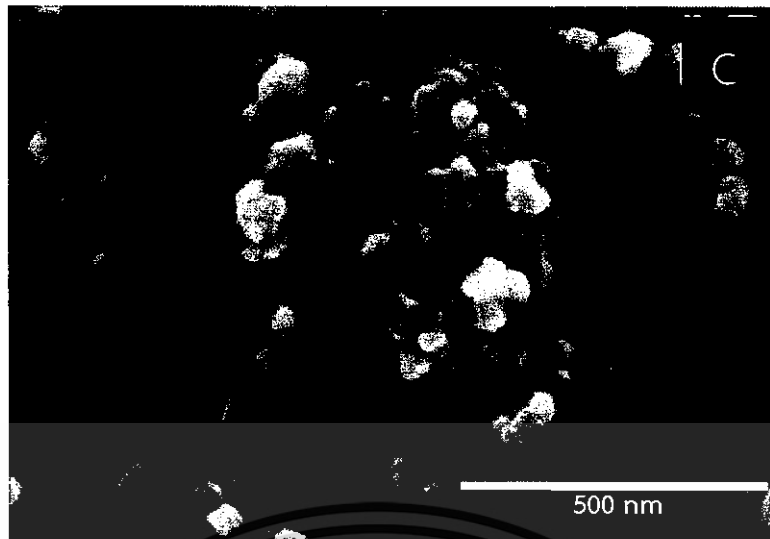
4.1.2 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด ฟิลด์อิมิสซัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะของเมโซพอร์สคาร์บอนจาก FE-SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า 50,000 เท่า และ 100,000 เท่า พบว่า ลักษณะทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ จะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ทรงกลม และเกาะติดกันเป็นกลุ่ม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอน A. ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า
B. ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 C. แสดงลักษณะทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอนที่กำลังขยาย 100,000 เท่า (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์ของเมโซพอร์สคาร์บอนที่ถูกหดยอยู่บนแผ่นกระจก FTO ดังรูปที่ 4.2 แสดงภาพตัดขวางของชั้นเมโซพอร์สคาร์บอนที่อยู่ถูกหดยบนแผ่นกระจก FTO ซึ่งวัดความหนาโดยประมาณเท่ากับ 381 nm



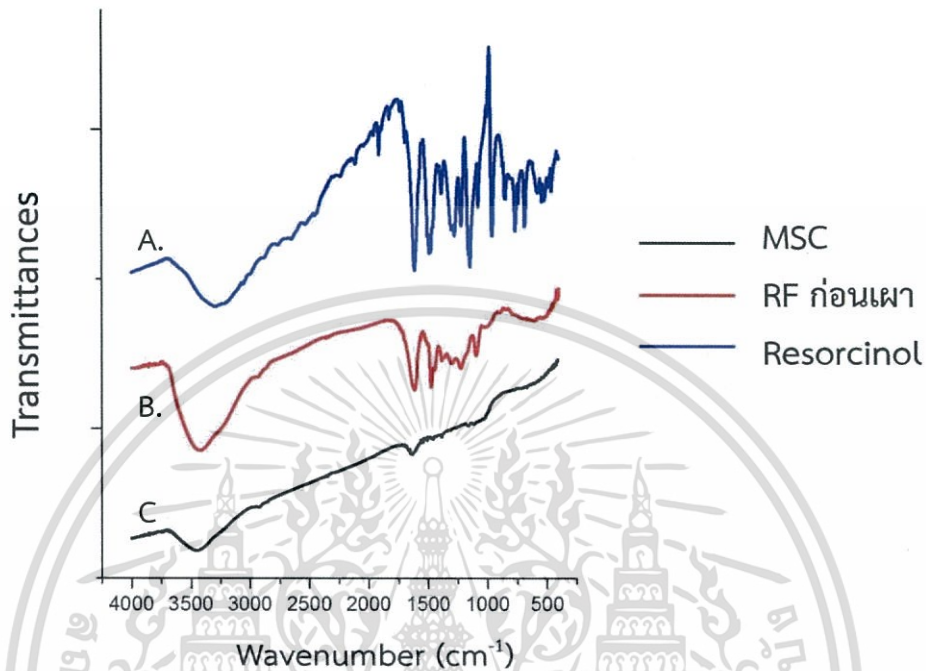
รูปที่ 4.2 แสดงความหนาของชั้นเมโซพอร์สคาร์บอนที่หดยบนขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR)

การวิเคราะห์รีซอร์ซินอล รีซอร์ซินอลผสมฟอร์มัลดีไฮด์ และเมโซพอร์สคาร์บอน แสดงดังรูป

ที่ 4.3



รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของ A. รีซอร์ซินอล (Resorcinol) B. สารผสมระหว่างรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ก่อนเผา (RF ก่อนเผา) และ C. เมโซพอร์สคาร์บอน (MSC)

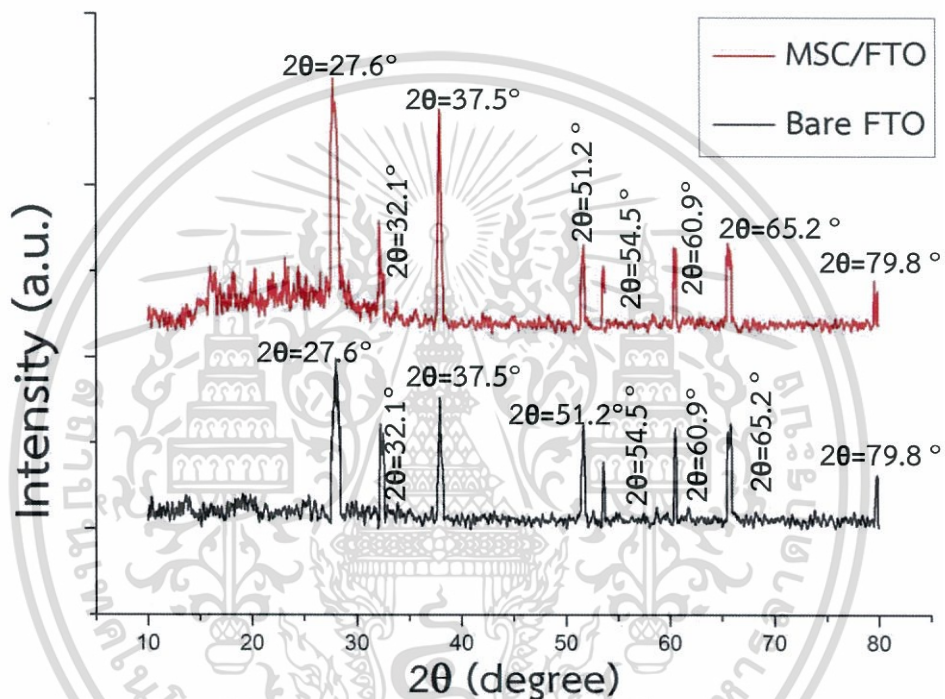
จากรูปที่ 4.3 อธิบายการเปลี่ยนแปลงของสารที่สังเคราะห์โดยเริ่มจากสารตั้งต้นรีซอร์ซินอล สารผสมระหว่างรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ และสุดท้ายเมโซพอร์สคาร์บอนซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 °C

- กราฟของรีซอร์ซินอล พบว่าปรากฏพีคของ C=O stretching อยู่ที่ 1625 cm^{-1} Hydrogen-bonded O-H stretching อยู่ที่ 3400 cm^{-1} H-C-H Bend อยู่ที่ 1450 cm^{-1} C-C=C Asymmetric stretching อยู่ที่ 1500 cm^{-1}
- กราฟของสารผสมระหว่างรีซอร์ซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ พบว่าปรากฏพีคของ C=O stretching อยู่ที่ 1625 cm^{-1} Hydrogen-bonded O-H stretching อยู่ที่ 3400 cm^{-1} C-C=C Asymmetric stretching อยู่ที่ 1500 cm^{-1}
- กราฟของเมโซพอร์สคาร์บอน พบว่าปรากฏพีคของ Hydrogen-bonded O-H stretching อยู่ที่ 3400 cm^{-1} C=O stretching อยู่ที่ 1625 cm^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

การวิเคราะห์เมโซพอร์สคาร์บอนที่อยู่บนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ จากการทดสอบด้วย XRD พบว่า XRD pattern ที่เกิดขึ้นเป็นของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ แต่เมโซพอร์สคาร์บอนนั้นไม่ปรากฏ XRD pattern เพราะเมโซพอร์สคาร์บอนมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) จึงไม่ปรากฏ XRD pattern แต่จะมีลักษณะฟีกคล้ายภูเขาอยู่ได้ XRD pattern ที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.6^\circ$ แสดงในรูปที่ 4.4



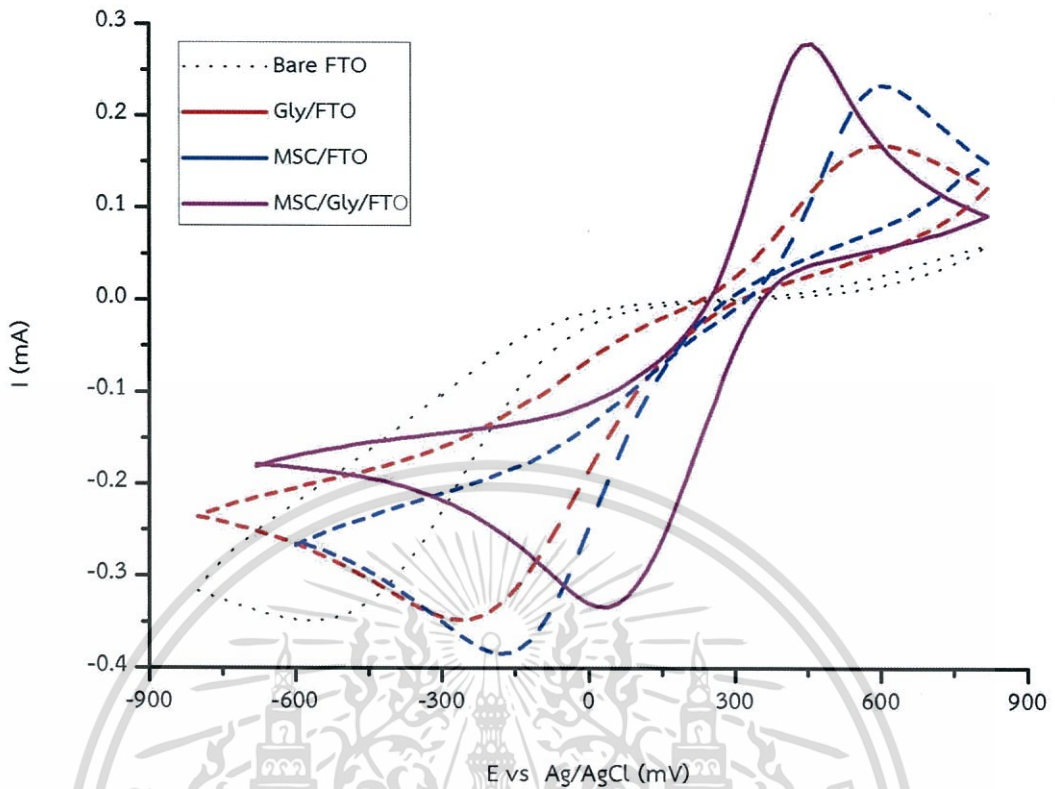
รูปที่ 4.4 XRD pattern สเปกตรัมของ Bare FTO และ MSC/FTO

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน

- เทคนิค Cyclic Voltametry

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ชนิด คือ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ เปลือย (bare FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไกลซิน (Gly/FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน (MSC/FTO) และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน (MSC/Gly/FTO) แสดงดังรูปที่ 4.5 ตรวจวัดในสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง +0.8 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



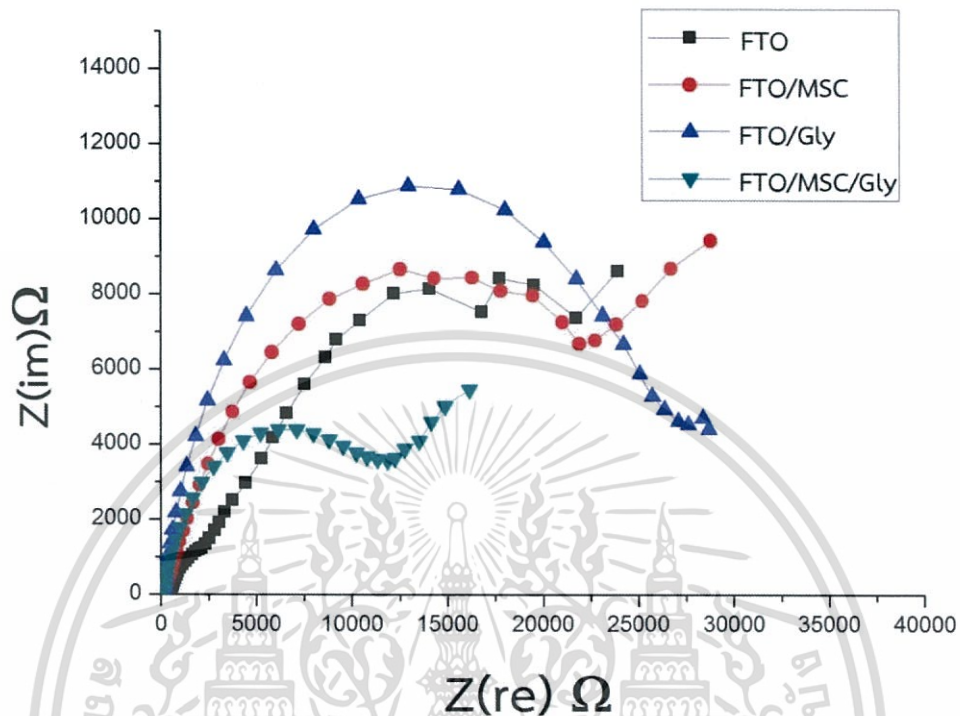
รูปที่ 4.5 โขคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง $+0.8$ โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เมื่อพิจารณาถึงค่ากระแสที่ได้จากโคลิกโวลแทมโมแกรมขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซินให้กระแสที่สูงกว่าขั้วไฟฟ้าชนิดอื่น จึงสรุปได้ว่าการนำเมโซพอร์สคาร์บอน และไกลซินสามารถนำมาปรับปรุงขั้วไฟฟ้า

- เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy

เทคนิค EIS เพื่อตรวจสอบความต้านทาน จึงได้ทำการเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ได้ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน ตรวจวัดในสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ซึ่งจากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของค่าจริง ($Z(re)\Omega$) กับค่าจินตภาพ ($Z(im)\Omega$) ซึ่งได้ค่าความต้านทานดังนี้ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 18000 โอห์ม ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยไกลซินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ 13500 โอห์ม ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน 12500 โอห์ม ขั้วไฟฟ้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน 6250 โอมห์ จะสังเกตได้ว่าเมื่อ
 ขั้วไฟฟ้าได้ถูกปรับปรุงจะมีค่าความต้านทานลดลงตามลำดับ



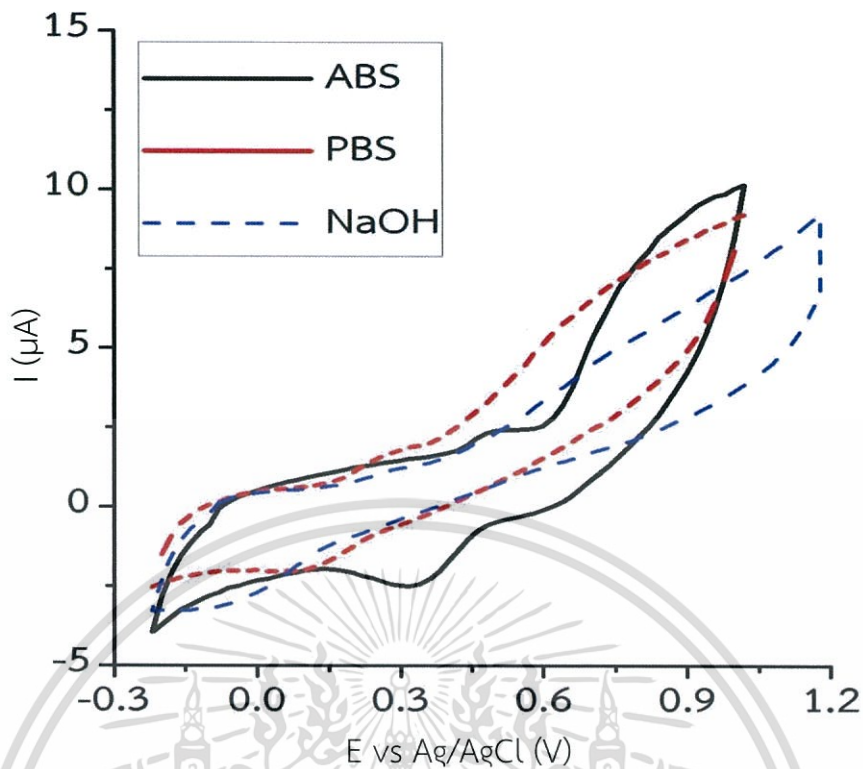
รูปที่ 4.6 กราฟไนควิสต์แสดงการเปรียบเทียบของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เปลือย
 ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีน
 เจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยไกลซีน และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วย
 เมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ในสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความ
 เข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อ
 ลิตร

4.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดกรดเพอรูลิก

4.3.1 ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม

การศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ
 0.2 โมลต่อลิตรของสารละลายอะซีเตตบัฟเฟอร์พีเอช 3 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 7 และโซเดียม
 ไฮดรอกไซด์พีเอช 13 ของสารละลายกรดเพอรูลิก ใช้ขั้วไฟฟ้าปรับปรุงเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน
 ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิง
 ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ผลของไซคลิกโวลแทมโมแกรม
 แสดงดังรูปที่ 4.6 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายกรดเพอรูติกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

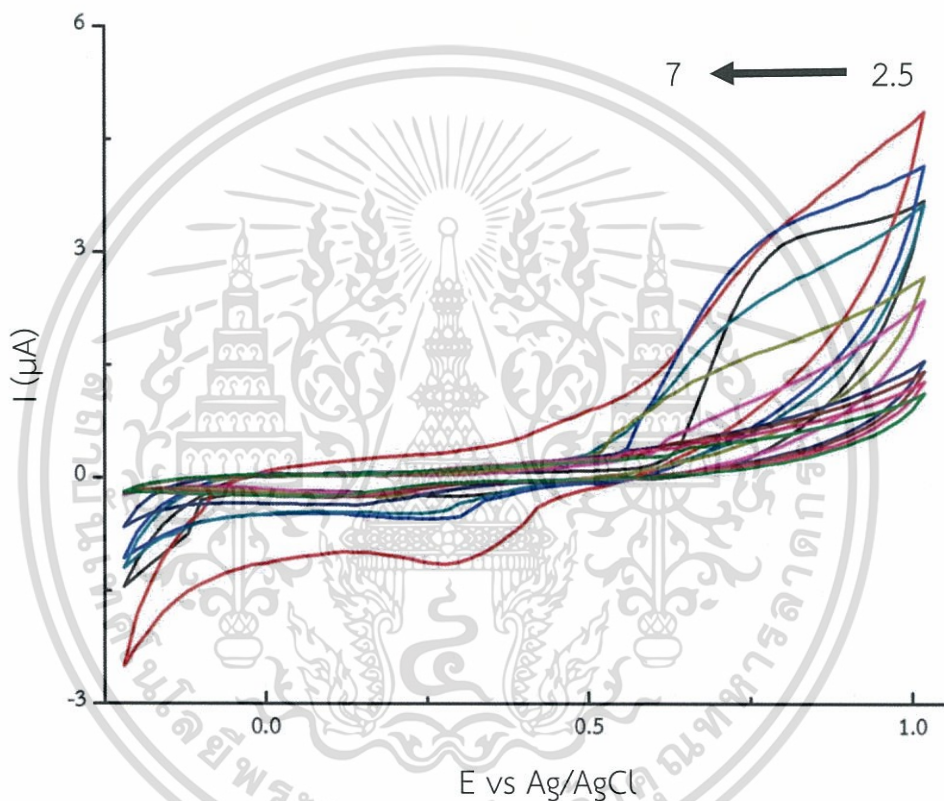
ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า กระแสออกซิเดชัน และกระแสรีดักชันของสารละลายกรดเพอรูติก ในอิเล็กโทรไลต์ต่างๆที่ได้จากไซคลิกโวลแทมโมแกรม

ชนิดของ สารละลายอิเล็ก โทรไลต์ (ความ เข้มข้น 0.2 โมล ต่อลิตร)	กรดเพอรูติก (ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร)			
	ศักย์ไฟฟ้า ออกซิเดชัน (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า ออกซิเดชัน (ไมโครแอม แปร์)	ศักย์ไฟฟ้า รีดักชัน (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า รีดักชัน (ไมโครแอม แปร์)
อะซิเตตบัฟเฟอร์ (pH 3)	5.00	2.40	0.32	-2.50
ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7)	0.29	1.73	0.02	-2.03
โซเดียมไฮดรอก ไซด์ (pH 13)	-	-	0.00	-3.22

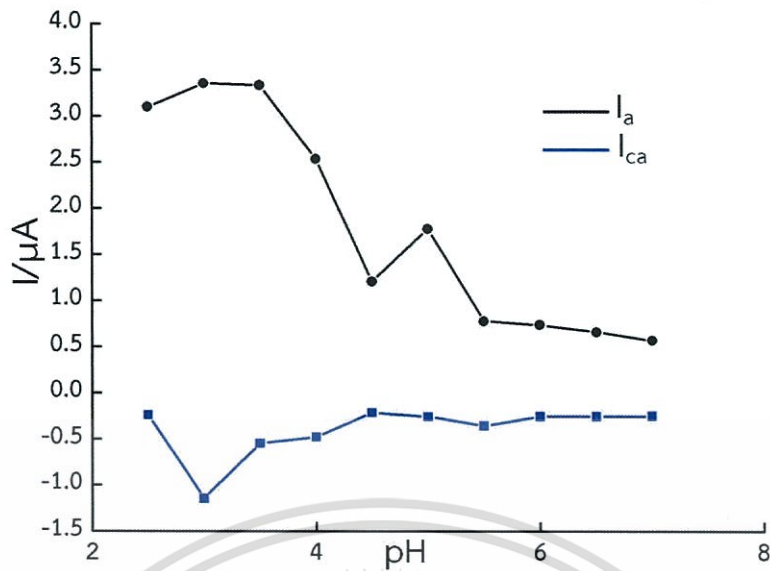
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 พีเอชที่เหมาะสม

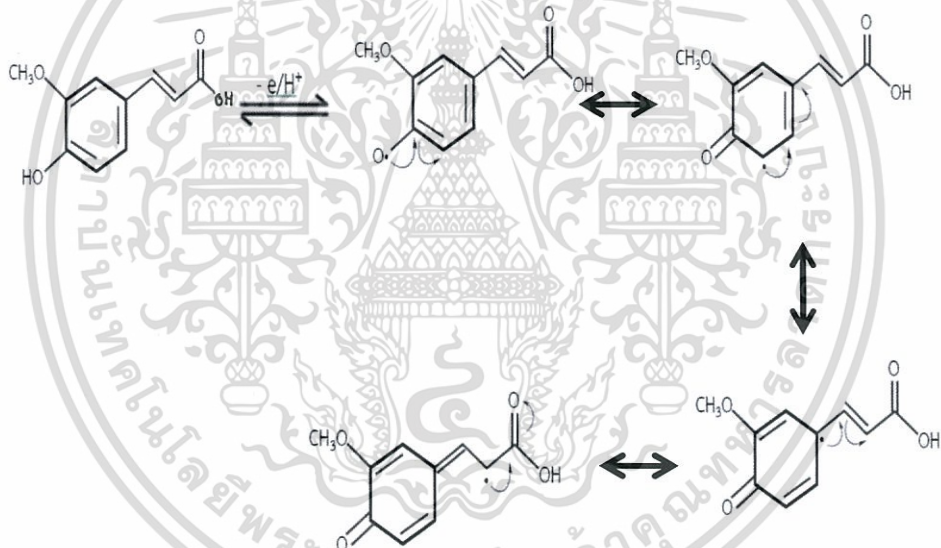
ผลการศึกษาพีเอชของสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ที่พีเอช 2.5 ถึง 7 สำหรับการตรวจวัดกรดเพอรูติก ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ด้วยขั้วไฟฟ้าปรับปรุงเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อนาที ซึ่งผลแสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรม แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับค่าพีเอช



รูปที่ 4.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายกรดเพอรูติกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์พีเอช 2.5 ถึง 7 สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับค่าพีเอช

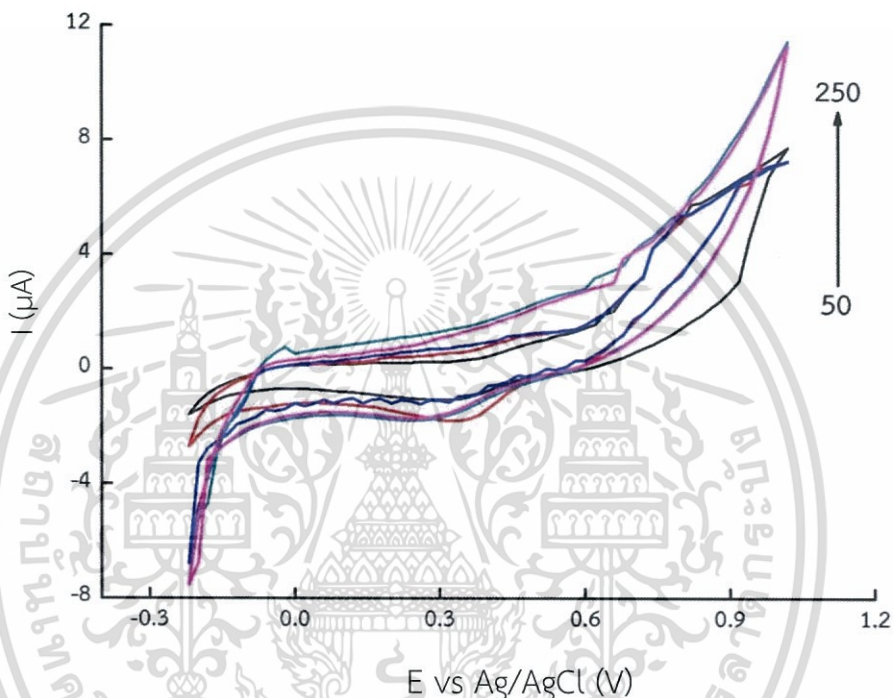


รูปที่ 4.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดเฟอรูลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 อัตราการสแกนที่เหมาะสม

ผลการศึกษาอัตราการสแกนที่มีผลต่อไซคลิกโวลแทมโมแกรมสำหรับการตรวจวัดกรดเพอรูลิก ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ด้วยข้อไฟฟ้าปรับปรุงเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน โดยใช้เทคนิค ไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับข้อไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) ที่อัตราการสแกน 50 ถึง 300 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งผลแสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรม แสดงดังรูปที่ 4.11

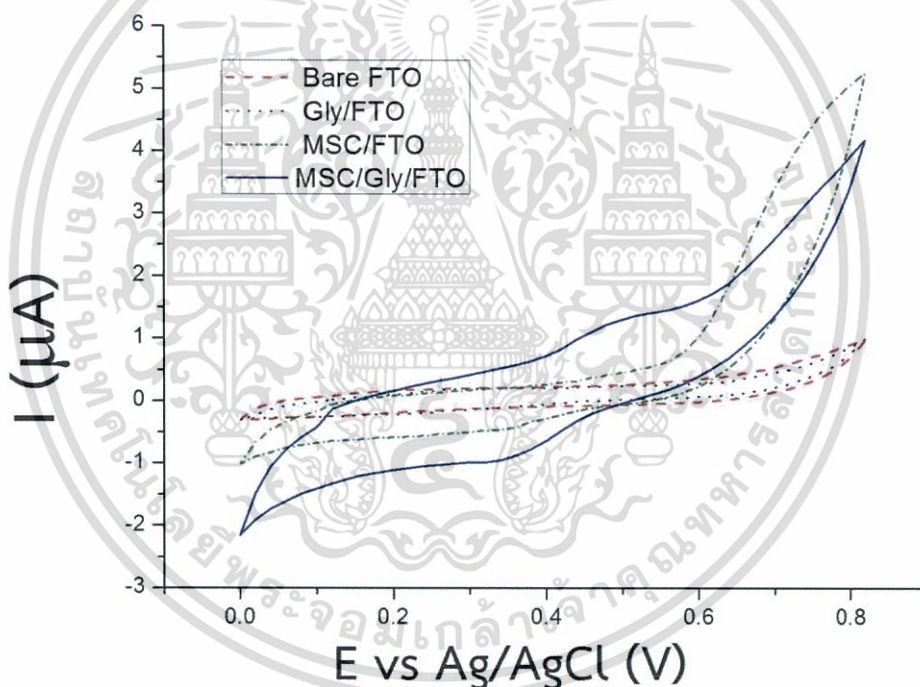


รูปที่ 4.11 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายกรดเพอรูลิกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์พีเอช 3 สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.2 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับข้อไฟฟ้าอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) ที่อัตราการสแกนต่างๆ

4.4 ผลการศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูติกด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซินด้วยเทคนิคโวลแทมเมทรี

4.4.1 การตรวจวัดกรดเพอรูติกด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

ผลการศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูติกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เปลือย (bare FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไกลซิน (Gly/FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน (MSC/FTO) และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน (MSC/Gly/FTO) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0.0 ถึง +0.8 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที แสดงดังรูป 4.12



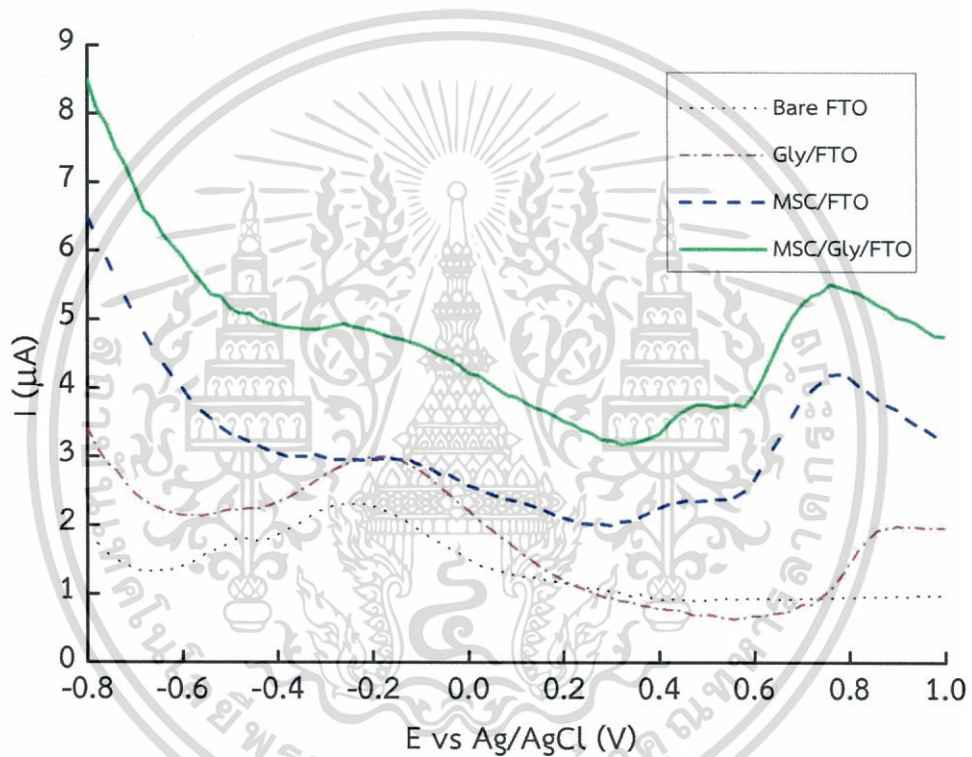
รูปที่ 4.12 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายเพอรูติกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0.0 ถึง +0.8 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

จากรูป 4.12 จะเห็นได้ว่าการเกิดออกซิเดชันของกรดเพอรูติกที่ 0.5 โวลต์ จากรูปแสดงให้เห็นถึงกระแสไฟฟ้าที่ได้สูงเป็น 1 เท่าของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซิน และสูงเป็น 3 เท่าของขั้วไฟฟ้าที่เหลือทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การตรวจวัดกรดเพอรูติก ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี

ผลการศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูติกความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 ด้วยขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์เปลือย (bare FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไกลซีน (Gly/FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน (MSC/FTO) และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (MSC/Gly/FTO) โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) แสดงดังรูป 4.13

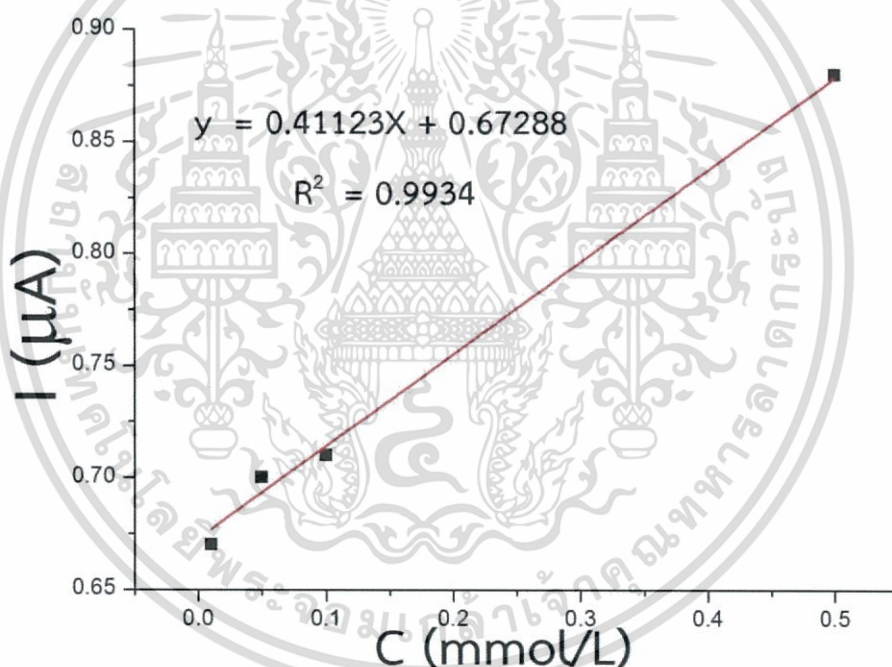


รูปที่ 4.13 ดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมโมแกรมของการวัดตรวจวัดสารละลายเพอรูติกความเข้มข้น 5×10^{-4} โมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง +1.0 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์)

จากรูป 4.13 จะเห็นได้ว่าการเกิดออกซิเดชันของกรดเพอรูติกที่ 0.5 โวลต์ จากรูปแสดงให้เห็นถึงกระแสไฟฟ้าที่ได้สูงเป็น 1 เท่าของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน และสูงเป็น 3 เท่าของขั้วไฟฟ้าที่เหลือทั้งสอง

4.5 ผลการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรง ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ในการตรวจวัดกรดเพอรูลิก

ผลการศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิกในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (MSC/Gly/FTO) โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +0.2 ถึง +0.8 โวลต์ (เทียบกับขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์) พบว่าช่วงความเป็นเส้นตรงของกรดเพอรูลิกอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร สมการเส้นตรงที่ได้ $y = 0.41123x + 0.67288$ ($R^2 = 0.9934$) จากผลการตรวจวัดกรดเพอรูลิกพบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด เท่ากับ 6.5862 มิลลิโมลต่อลิตร และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ เท่ากับ 21.9507 มิลลิโมลต่อลิตร (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ค) แสดงดังรูป 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความเข้มข้น 0.01 ถึง 0.5 มิลลิโมลต่อลิตรกับกระแสไฟฟ้าของกรดเพอรูลิกในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3

4.6 ผลการศึกษาตัวรบกวน (Interference)

ผลการศึกษาสารรบกวนในตัวอย่างทำโดยการตรวจวัดกรดเพอรูลิกที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 3 ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีน เจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (MSC/Gly/FTO) โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี พบว่าปริมาณสารรบกวนแต่ละชนิดที่ศึกษาไม่สามารถรบกวนการตรวจวัด แสดงการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) ดังตารางที่ 4.3 และได้ค่า %Relative error เท่ากับ 2.3541%

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาตัวรบกวนจากค่าการคำนวณ (%)Relative error ของการวิเคราะห์กรดเพอรูลิกในการศึกษาสารรบกวน

	กระแส			เฉลี่ย (X) ค่ากระแส ที่อ่าน ได้	SD	concentration (M)	(Y) ค่ากระแส จริง	Relative error
	1	2	3					
AC	0.56427	0.59357	0.50499	0.55428	3.91932	0.0002	0.6x10 ⁻⁷	3.53x10 ⁻⁹
1:100	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁸			
1:500	0.50354	0.60364	0.59052	0.56590	4.00150	0.001	0.6x10 ⁻⁷	3.41x10 ⁻⁹
	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁸			
1:1000	0.55206	0.54993	0.55115	0.55105	3.89648	0.002	0.6x10 ⁻⁷	4.90x10 ⁻⁹
	3 x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁸			
1:2000	0.65948	0.50781	0.55206	0.57312	3.90367	0.003	0.6x10 ⁻⁷	2.69x10 ⁻⁹
	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁸			
GLU	0.45501	1.0141	0.45501	0.64137	4.53523	0.0002	0.7x10 ⁻⁷	5.86x10 ⁻⁹
1:100	7 x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	7 x10 ⁻⁷	8 x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁸			
1:500	0.31127	0.42511	0.46707	0.40115	2.83658	0.001	0.7x10 ⁻⁷	2.99x10 ⁻⁸
	9 x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	3 x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁸			
1:1000	0.34484	0.50940	0.35522	0.40315	2.85076	0.002	0.7x10 ⁻⁷	2.96x10 ⁻⁸
	9 x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	5 x10 ⁻⁷	8 x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁸			
1:2000	0.30945	0.64636	0.60150	0.51910	3.67061	0.003	0.7x10 ⁻⁷	1.81x10 ⁻⁸
	x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁷	1 x10 ⁻⁷	3 x10 ⁻⁷	x10 ⁻⁸			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการศึกษาความถูกต้อง (Accuracy) และการศึกษาความเที่ยง (Precision)

ผลการศึกษาการตรวจวัดกรดเพอรูลิก ในตัวอย่างข้าวโพด เติร์ยมในสารละลายอะซิเตต บัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร พีเอช 7 ด้วยชีวไฟฟ้าปรับปรุงนาโนคอมโพสิต โดยเทคนิค ด้วยดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรีได้ค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 48.754 ถึง 53.520 และ %RSD อยู่ในช่วง 0.00012 ถึง 0.8712 แสดงดังตารางที่ 4.4 (ภาคผนวก ข. แสดงการคำนวณค่าร้อยละการคืนกลับและ% RSD) ซึ่งชีวไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยนาโนคอมโพสิตชนิด เซอร์โคเนียมออกไซด์/กราฟีน/โคบอลต์ออกไซด์

ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษากรดเพอรูลิกในสารตัวอย่าง

ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมในตัวอย่าง (มิลลิโมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสารที่พบ (มิลลิโมลต่อลิตร)	Recovery (%)	RSD (%)
ข้าวโพดดิบ	-	2.4978±0.0056	-	-
	5	2.5138±0.0056	50.2768	0.00012
ข้าวโพดต้มที่ 80°C	-	2.5364±0.8712	-	-
	5	2.5396±0.8712	50.7944	0.0171
ข้าวโพดต้มที่ 115°C	-	2.6243±0.4337	-	-
	5	2.6268±0.4337	52.5368	0.0083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการปรับปรุงขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีนนำไปตรวจวัดกรดเพอรูลิก โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี และดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรีแบ่งได้ 3 ส่วน

1) ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมโซพอร์สคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น ได้แสดงในบทที่ 4 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนพบว่าเมโซพอร์สคาร์บอนมีความเป็นรูพรุนสูง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อีมิสชันทำให้เห็นลักษณะของเมโซพอร์สคาร์บอนที่เป็นผงและ ลักษณะของเมโซพอร์สคาร์บอนเมื่อเกาะติดบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันยืนยันได้ว่าเมโซพอร์สคาร์บอนที่ได้เป็นคาร์บอนไม่มีสารโมเลกุลอื่นปะปนอยู่ และยืนยันว่ามีบนขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์มีเมโซพอร์สเกาะติดอยู่จริง

2) ผลการศึกษาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีโดยการตรวจวัดในสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($K_3[Fe(CN)_6]$) ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตรในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง -0.7 ถึง +0.8 โวลต์ อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า 4 ชนิด คือ ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ (Bare FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยไกลซีน (Gly/FTO) ขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน (MSC/FTO) และขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (MSC/Gly/FTO) พบว่าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน (MSC/Gly/FTO) มีประสิทธิภาพสูงสุด และทำการตรวจวัดความต้านทานด้วยเทคนิคอิเล็กโทรเคมีคัลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีปรากฏว่าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีนมีความต้านทานต่ำที่สุด จึงนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด

3) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวัดกรดเพอรูลิกด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมคือ สารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ พีเอช 3 สแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0.0 ถึง +0.8 โวลต์ อัตราการสแกน 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในการตรวจวัดกรดเพอรูลิกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรีจะสแกนศักย์ไฟฟ้าในช่วง +0.2 ถึง +0.7 โวลต์ ในการตรวจวัดความเป็นเส้นตรงของกรดเพอรูลิกอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร ในการตรวจวัดซ้ำพบข้อพบข้อพบว่าขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน สามารถทำการตรวจวัด %recovery ได้มีช่วง 48.754 ถึง 53.520 และ %RSD อยู่ในช่วง 0.00012 ถึง 0.8712 ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสารรบกวนในปริมาณความเข้มข้นมากกว่าสารที่ทำการวิเคราะห์พบว่าชีวไฟฟ้าที่ได้รับการปรับปรุงยังสามารถวัดได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) สารตั้งต้นในการเตรียมเมโซพอร์สคาร์บอนเป็นสารที่อันตราย และต้องผ่านกระบวนการที่ยุ่งยาก
- 2) ในขั้นตอนการสังเคราะห์เมโซพอร์สในส่วนของกาเหาะในแต่ละครั้งจะได้เมโซพอร์สคาร์บอนในปริมาณที่น้อย
- 3) การหาสภาวะที่ใช้ในการตรวจวัดต้องใช้ระยะเวลาานาน
- 4) ชิวไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ถูกปรับปรุงหลุดง่ายเพราะเนื่องจากใช้วิธีการหยด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. T. Ezhil Vilian & Shen-Ming Chen “ Preparation of Carbon Nanotubes Decorated with Manganese Dioxide Nanoparticles for Electrochemical Determination of Ferulic Acid” *Microchim Acta* (2014) 1-5.
- [2] Hasim Kelebek et.al. “ HPLC Determination of Organic Acids, Sugars, Phenolic Compositions and Antioxidant Capacity of Orange Juice and Orange Wine Made From a Turkish cv. Kozan” *Sciencedirect* (2009) 187-192.
- [3] Ji Song-gang et.al. “ Determination of Ferulic Acid in Angelica Sinensis and Chuanxiong by Capillary Zone Electrophoresis” *Biomedical Chromatography* (1999) 1-9
- [4] Om Prakash Sharma et.al. “ Thin layer Chromatography of Gallic Acid, Methyl Gallate, Pyrogallol, Phloroglucinol, Catechol, Resorcinol, Hydroquinone, Catechin, Epicatechin, Cinnamic Acid, p-Coumaric Acid, Ferulic Acid and Tannic Acid” *Elsevier* (1998) 167-171.
- [5] S. Kallel Trabelsi et.al. “ Electrochemical Oxidation of Ferulic Acid in Aqueous Solutions At Gold Oxide and Lead Dioxide Electrodes” *Journal of Applied Electrochemistry* (2005) 967–973.
- [6] Linjie Liu et.al. “ Electrochemically Reduced Graphene Oxide-based Electrochemical Sensor for The Sensitive Determination of Ferulic Acid in A. Sinensis and Biological Samples” *Elsevier* (2014) 227-233.
- [7] Yan-Yan Yu et.al. “Electrochemical Determination of Ferulic Acid in Chinese Traditional Medicine Xiao Yao Pills at Electrode Modified with Carbon Nanotube” *Journal of Electrochemistry* (2009) 170-184.
- [8] Chengdu Liang et.al. “ Mesoporous Carbon Materials: Synthesis and Modification” *Chem. Int. Ed* (2009) 3696 – 3717.
- [9] นายสุทัศน์ ศรีวัฒนพงศ์ “สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เรื่อง ข้าวโพด” *สารานุกรมไทย* (2516)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Paolo Torre et.al. “Release of ferulic acid from corn cobs by alkaline hydrolysis” *Biochemical Engineering Journal* (2008) 500-506.
- [11] Buran Phansawan “Free radicals, Antioxidants and Antioxidant Activity Determination” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* ปีที่ 21 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม - กันยายน 2556.
- [12] Lynnette R. Ferguson “Role of plant polyphenols in genomic stability” *Elsevier* (2001) 89–111.
- [13] Monthana Weerawatanakorn “Chemical Reactions between Proteins and Polyphenols and Human Biological Consequences of Reaction” ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [14] Shengqiang Zhao et.al. “Preparation of Ferulic Acid from Corn Bran:Its Improved Extraction and Purification By Membrane Separation” *Elsevier* (2014) 309-313.
- [15] Hiroe Kikuzaki et.al. “Antioxidant Properties of Ferulic Acid and Its Related Compounds” *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (2002) 2161-2168.
- [16] Eduard Llobet “Gas sensors using carbon nanomaterials: A review” *Elsevier* (2013) 32-45.
- [17] ดร. ณัฐพันธุ์ ศุภกา “สร้างแบรนด์ไทยด้วยวัสดุนาโนจากการผลิต” *ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ*
- [18] ดร. อติศักดิ์ ไสยสุข “วัสดุที่มีรูพรุนแบบลำดับชั้น: ความสำคัญและประโยชน์” ปีที่ 20 เดือน กรกฎาคม - กันยายน 2557.
- [19] สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล “การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ” *วารสารสรรสาระ*
- [20] ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ “Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)”

Available : <http://thep-center.org/src2/files/eq/feSEM.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] Wikimedia common. 2011. X-ray Differential [Online].
Available : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bragg_XRD.svg?uselang=th
- [22] นางสาวจิตรรา นาไชยเวศน์ “Detertor (GC-FID) และเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)” รายงานผลการวิจัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [23] Li Qiang Luo et.al. “ Voltammetric determination of ferulic acid by didodecyldimethylammonium bromide/naftion composite film-modified carbon paste electrode.” Analytical Sciences (2010) 907-911.
- [24] A. T. Ezhil Vilian & Shen-Ming Chen “ Preparation of Carbon Nanotubes Decorated with Manganese Dioxide Nanoparticles for Electrochemical Determination of Ferulic Acid” Microchim Acta (2014) 1-5.
- [25] Refat Abdel-Hamid et.al. “ Voltammetric Determination of Ferulic Acid Using Polypyrrole-Multiwalled Carbon Nanotubes Modified Electrode with Sample Application” (2015) 1704-1715.
- [26] Zhaohui Zhao et.al. “ Chemistry, natural sources, dietary intake and pharmacokinetic properties of ferulic acid” Elsevier (2008) 691-702.
- [27] Shengqiang Zhao et.al. “ Preparation of Ferulic Acid from Corn Bran : Its Improved Extraction and Purification By Membrane Separation” Elsevier (2014) 309-313.
- [28] Liande Zhu et.al. “Bioanalytical Application of the Ordered Mesoporous Carbon Modified Electrodes” School of Chemistry, Northeast Normal University, Changchun (2008) 2518-2525.
- [29] Azmi Mohd Sharif et.al. “Some Studies on the Synthesis and Characterization of Carbon Aerogel” Trans indian ceramic society (2010) 1-4.
- [30] Eghe A.Oyedoha et.al. “ Preparation of Controlled Porosity Resorcinol Formaldehyde Xerogels for Adsorption Applications” Chemical Engineering Transactions (2013) 1651-1656.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [31] Jinming Xu et.al. “ A two-step synthesis of ordered mesoporous resorcinol-formaldehyde polymer and carbon” Elsevier (2012) 1807-1816.
- [32] Balázs Nagy et.al. “ Novel Synthesis Route of Metal Doped Resorcinol-Formaldehyde Polymer Xerogels with Tuned Porosity” Elsevier (2014) 66-71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ก.1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันบางชนิด

ตารางที่ ก.1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด

Function group name	Absorption range (cm ⁻¹)	Type of Vibration
Alkanes	3000-2800	H-C-H Asymmetric & Symmetric Stretch
	1500-1440	H-C-H Bend
Alkenes	3100-3000	C=C-H Asymmetric Stretch
	1675-1600	C=C Symmetric Stretch
Alkynes	3300-3200	≡C H Stretch
	2200-2100	C ≡C Stretch
Aromatic Rings	3100-3000	C=C-H Asymmetric Stretch
	1600-1580	C=C Symmetric Stretch
	1500-1450	C=C Asymmetric Stretch
Phenols & Alcohols	3600-3100	Hydrogen-bonded O-H Stretch
Carboxylic Acids	3400-2400	Hydrogen-bonded O-H Stretch
Ketones	1750-1625	C=O Stretch
Aldehydes	1750-1625	C=O Stretch
	2850-2800	C-H Stretch off C=O
	2750-2700	C-H Stretch C=O
Esters	1755-1650	C=O Stretch
	(1300-1000)	(C-O Stretch)
Ethers	(1300-1000)	(C-O Stretch)
Amines - Primary	3500-3100	N-H Stretch
	(Two peak)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันที่สามัญบางชนิด (ต่อ)

Function group name	Absorption range (cm ⁻¹)	Type of Vibration
Amines - Secondary	3500-3100	N-H Stretch
	(One peak)	
	1550-1450	N-H Bend
Nitriles	2300-2200	C≡N Stretch
Nitro Groups	1600-1500	N=O Stretch
	1400-1300	
Amides	3500-3100	N-H Stretch (similar to amines)
	1670-1600	
	1640-1550	
		C=O Stretch
		N-H Bend



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณสารและอื่นๆ

ข.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดเพอรูติก

1) เตรียมสารละลายมาตรฐานกรดเพอรูติกที่มีมวลโมเลกุล 194.18 g/mol ที่มีความเข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร

จากสูตร

$$\frac{CV}{1000} = \frac{g}{MW}$$

$$\frac{(0.005)(250)}{1000} = \frac{g}{194.18}$$

$$g = 0.2427$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายกรดเพอรูติกที่มีความเข้มข้น 0.005 โมลต่อลิตร ต้องชั่งสารมา 0.2427 กรัม ปรับปริมาตรจนเป็น 250 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

2) เตรียมสารละลายกรดเพอรูติกที่มีความเข้มข้น 0.0005 โมลต่อลิตร จากสารละลายมาตรฐานกรดเพอรูติกความเข้มข้น 0.005 โมลต่อลิตร

จากสูตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(0.005)(V_1) = (0.0005)(25)$$

$$V_1 = 2.5 \text{ ml}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายกรดเพอรูติกที่มีความเข้มข้น 0.005 โมลต่อลิตรจากสารละลายมาตรฐานกรดเพอรูติก ต้องปิเปตสารมา 2.5 มิลลิลิตร

3) เตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก ($K_3[FeCN]_6$) ที่มีความเข้มข้น 0.005 โมลต่อลิตร

จากสูตร

$$\frac{CV}{1000} = \frac{g}{MW}$$

$$\frac{(0.005)(100)}{1000} = \frac{g}{329.24}$$

$$g = 1.6462$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็ก ($K_3[FeCN]_6$) ที่มีความเข้มข้น 0.005 โมลต่อลิตร ต้องชั่งสารมา 1.6462 กรัม แล้วละลายด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 100 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \frac{CV}{1000} &= \frac{g}{MW} \\ \frac{(0.01)(100)}{1000} &= \frac{g}{74.10} \\ g &= 0.0741 \end{aligned}$$

ดังนั้น การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตรต้องชั่งสารมา 0.0741 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ข.2 การคำนวณขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

การคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดกรดเพอรูลิกโดยใช้ขั้วไฟฟ้าทินออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ด้วยเทคนิคดีฟเฟอร์เชียลพัลส์

จากตารางเมื่อได้ค่าผลรวมของความแตกต่างของกระแสจากการตรวจวัดและกระแสจากสมการ เส้นตรงยกกำลังสองนำค่าผลรวมมาคำนวณหาค่า $S_{x/y}$ มาหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

$$\text{จากสมการ} \quad S_{x/y} = \frac{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}}{n-1}$$

จากนั้นจะนำค่า $S_{x/y}$ มาแทนค่า y ในสมการเส้นตรง

สูตรการคำนวณหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

$$\text{ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด} \quad LOD = \frac{3SD_b \text{ of blank}}{\text{slope}}$$

$$\text{ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์} \quad LOQ = \frac{10SD_b \text{ of blank}}{\text{slope}}$$

การหาค่าขีดจำกัดต่ำการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดปริมาณต่ำสุดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ) ข (ทำการทดลอง 10 ครั้ง)

$$\text{สมการเส้นตรง} \quad y = 0.41123x + 0.67288$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{LOD} &= \frac{3(0.90268)}{0.41123} \\ &= 6.5852 \\ \text{LOQ} &= \frac{10(0.90268)}{0.41123} \\ &= 21.9507 \end{aligned}$$

ดังนั้น ขีดจำกัดการตรวจวัดกรดเพอรูลิกในสารละลายอะซิติกบัฟเฟอร์ 0.2 โมลต่อลิตร ได้ต่ำสุดที่ความเข้มข้น 6.5852 มิลลิโมลต่อลิตร และขีดจำกัดปริมาณต่ำสุดของการวิเคราะห์ 21.9507 มิลลิโมลต่อลิตร

กำหนดให้ X_i คือ ค่าความเข้มข้นของกรดเพอรูลิก
 Y_i คือ ค่ากระแสของ blank
 \bar{Y} คือ ค่ากระแสที่ได้จากโวลแทมโมแกรม

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงการคำนวณขีดจำกัดการตรวจวัดกรดเพอรูลิก

X_i	Y_i	\bar{Y}	$Y_i - \bar{Y}$	$(Y_i - \bar{Y})^2$
0.0005	0.354462	-0.67267	1.027136	1.055009
0.001	0.354462	-0.67247	1.02693	1.054586
0.005	0.354462	-0.67082	1.025286	1.05121
0.01	0.354462	-0.66877	1.023229	1.046998
0.05	0.354462	-0.65232	1.00678	1.013606
0.1	0.354462	-0.63176	0.986219	0.972627
0.5	0.354462	-0.46727	0.821727	0.675235
1	0.354462	-0.26165	0.616112	0.379594
2	0.354462	0.14958	0.204882	0.041977
3	0.354462	0.56081	-0.20635	0.04258
			$\Sigma(Y_i - \bar{Y})^2$	7.333422
			SD	0.90268

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 การคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD)

- การคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)

การคำนวณค่าร้อยละของการคืนกลับของการตรวจวัดกรดเพอรูลิกข้าวโพดโดยใช้ข้าวไฟฟ้าหิน ออกไซด์เจือฟลูออรีนที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน ด้วยเทคนิคดีฟเฟอร์เชียลพัลส์จะได้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับกระแส ซึ่งนำมาคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับได้จากสมการ

$$\%Recovery = \frac{C_{spiked\ samples} - C_{sample}}{C_{standard}} \times 100$$

$C_{spiked\ sample}$ = ค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมตัวอย่าง

C_{sample} = ตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารมาตรฐาน

$C_{standard}$ = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

- คำนวณหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD) ความแม่นยำ (precision)

โดยการวัดตัวอย่างเดียวกันซ้ำหลายครั้ง ความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ซ้ำนี้แสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{X}}$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ย

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับกระแสของการตรวจวัดกรดเพอรูลิกโดยใช้ ข้าวไฟฟ้าฟลูออรีนเจือหินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน/ไกลซีน เมื่อศึกษาผลของความเป็นเส้นตรงจากรูปที่ 4.14 ได้สมการเส้นตรงและสามารถนำมาหาความเข้มข้น และค่าร้อยละของการคืนกลับได้

$$\begin{aligned} \text{กรดเพอรูลิก } y &= 0.41123x + 0.67288 \\ R^2 &= 0.9934 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณของตัวอย่างข้าวโพดดิบ

1) ตรวจวัดโดยวิธีไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide, FTO)

จากสมการเส้นตรง $y = 0.41123x + 0.67288$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } y = 0 \qquad x &= \frac{0.67288}{0.41123} \\ &= 1.6363 \text{ mM} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นที่ได้คือความเข้มข้นในถ้วยแก้ว ดังนั้น ความเข้มข้นจริง คือ

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

$$C_1(2\text{ml}) = (1.6363)(27.00 \text{ ml})$$

$$C_1 = 22.0901 \text{ mM}$$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นก่อน spike

V_1 คือ ปริมาตรที่ spike

C_2 คือ ความเข้มข้นหลัง spike ลงถ้วยแก้ว

V_2 คือ ปริมาตรรวมของ Blank และ ตัวอย่าง

คิดเป็นปริมาตร คือ ใน 1000 mL มี 22.0901 mmol

$$\begin{aligned} \text{ใน 2 mL มี} &= \frac{22.0901 \times 2 \times 10^{-3} \text{ L}}{1000 \times 10^{-3}} \\ &= 0.0442 \text{ mmol} \end{aligned}$$

ถ้าปีเปตมา 2 mL มี [FA] = 0.0442 mmol

$$\begin{aligned} \text{ถ้าปีเปตมา 100 mL มี [FA]} &= \frac{0.0442 \text{ mmol} \times 100 \times 10^{-3} \text{ L}}{2 \times 10^{-3} \text{ L}} \\ &= 2.21 \text{ mmol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad n &= \frac{g}{Mw} \\ 2.21 \times 10^{-3} \text{ mol} &= \frac{g}{194.18 \frac{g}{\text{mol}}} \\ &= 0.4291 \text{ g} \end{aligned}$$

เจือจางมา 10 เท่า

$$g = 0.4291 \text{ g} \times 10$$

$$g = 4.291 \text{ g}$$

$$= 4291 \text{ mg}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ตารางแสดงค่าร้อยละการคืนกลับที่เป็นที่ยอมรับตามข้อกำหนด AOAC

ความเข้มข้นของสารที่ทำการวิเคราะห์	ค่าร้อยละของการคืนกลับ
100%	98-102
> 10%	98-102
> 1%	97-103
> 0.1%	95-105
100 ppm	90-107
10 ppm	80-110
1 ppm	80-110
100 ppb	80-110
10 ppb	60-115
1ppb	40-120

ตารางที่ ข.3 ตารางแสดงค่าความแม่นยำที่ยอมรับตามข้อกำหนด AOAC

Analyte Conc (%)	Analyte	Ratio Unit	RSD%
100	1	100%	1.3
10	10^{-1}	10%	2.8
1	10^{-2}	1 %	2.7
0.1	10^{-3}	0.1%	3.7
0.01	10^{-4}	100 ppm	5.3
0.001	10^{-5}	10 ppm	7.3
0.0001	10^{-6}	1 ppm	11
0.00001	10^{-7}	100 ppb	15
0.000001	10^{-8}	10 ppb	21
0.0000001	10^{-9}	1 ppb	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) หรือ Percent Error (%Error)

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) หรือ Percent Error (%Error) คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนได้จากค่าความคลาดเคลื่อนได้จากค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เปรียบเทียบกับค่าจริงคำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{ Relative error} = \frac{X_i - Y_i}{X_i} \times 100$$

เมื่อ X_i คือ ค่ากระแสจริงที่ได้จากการวัดจริง

Y_i คือ ค่ากระแสที่อ่านได้จากการวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การเตรียมสารสำหรับตรวจวัดคุณลักษณะทางกายภาพ

1. เครื่องมือวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและความพรุน (Surface Area and Porosity Analyzer, BET)

ในการตรวจวัดจะให้เซลล์ 2 เซลล์โดยเซลล์หนึ่งบรรจุสารตัวอย่าง ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่สารตัวอย่างใช้เป็นเซลล์อ้างอิง

- ชั่งสารตัวอย่างที่จะวัดมา 0.2 กรัมใส่ลงไปในเซลล์นำไปให้ความร้อนที่ 300 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น และโมเลกุลของสารชนิดอื่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศเพื่อไม่ให้มีโมเลกุลชนิดอื่นปะปนเข้าไป
- นำไปจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว เพื่อให้เซลล์อยู่ในอุณหภูมิต่ำ
- ผ่านแก๊สไนโตรเจนลงไปในเซลล์ทั้ง 2 เซลล์ โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้าไปในเซลล์ที่มีสารตัวอย่างจะเข้าไปดูดซับบนผิวของสารตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจึงคำนวณค่าออกมา

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)

2.1 การเตรียมตัวอย่างแบบผง

- ชั่งเมโซพอร์สคาร์บอน 0.6 มิลลิกรัม เติมน้ำ 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกระจายอนุภาคด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- หยดสารละลายที่เตรียมได้ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนกระจกสไลด์ ทิ้งไว้ให้แห้ง
- นำสารที่อยู่บนกระจกสไลด์ไปติดบนเทปนำไฟฟ้าสองหน้าซึ่งอยู่บน stub
- ทำการโค้ทด้วยแพลตตินัม เพื่อช่วยให้เกิดการสะท้อนเพื่อช่วยให้เกิดการสะท้อนของอิเล็กตรอน
- นำตัวอย่างไปวิเคราะห์

2.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวัดภาคตัดขวาง (Cross Section)

- ชั่งเมโซพอร์สคาร์บอน 0.6 มิลลิกรัม เติมน้ำ 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกระจายอนุภาคด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- หยดสารละลายที่เตรียมได้ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร มิลลิเมตร ของขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที เก็บไว้ในโถดูดความชื้นนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัดตัวอย่างบริเวณที่สนใจให้มีขนาดเท่า stub ตัดตัวอย่าง ด้านที่ไม่ต้องการศึกษา ด้วยกาวหรือเทปสองหน้าตามความเหมาะสม
- นำตัวอย่างไปวิเคราะห์

3. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR)

การเตรียมสารตัวอย่าง

- บดตัวอย่างให้มีความละเอียด
- ผสมตัวอย่างเข้ากับโพแทสเซียมโบรไมด์ในโกร่งบดสาร โดยให้ตัวอย่างมีความเข้มข้น ประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และบดสารให้ละเอียดโดยให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
- ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ให้มีความดันประมาณ 15000 ทิ้งไว้ 1-2 นาที
- ถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใส และตัวอย่างจะกระจายอยู่บนโพแทสเซียมโบรไมด์ แล้วนำตัวอย่างเข้าเครื่อง FT-IR ได้เลย
- การทำความสะอาดแม่พิมพ์ ใช้ช้อนตักสารสแตนเลส ขูดตัวอย่างออกมา เช็ดด้วยกระดาษทิชชู และล้างด้วยอะซิโตนแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง

4. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

1) การเตรียมตัวอย่างแบบผง

- นำตัวอย่างมาบดให้ละเอียดเป็นผง บรรจุลงในเพลท
- นำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ โดยนำเข้าเครื่อง X-ray Diffractometer ในขั้นตอนนี้สามารถกำหนดเวลาในการตรวจวัดความเข้มของรังสีเลี้ยวเบน จากนั้นจะได้ข้อมูลตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน

2) การเตรียมตัวอย่างขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์

- นำแผ่นขั้วไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์มาตัดให้ได้ขนาด 1x1 เซนติเมตร จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าไปทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอล นาน 15 นาทีตามลำดับ ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู
- นำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ โดยนำเข้าเครื่อง X-ray Diffractometer ในขั้นตอนนี้สามารถกำหนดเวลาในการตรวจวัด ความเข้มของรังสีเลี้ยวเบน จากนั้นจะได้ข้อมูลตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน

3) การเตรียมตัวอย่างชีวไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยเมโซพอร์สคาร์บอน

- นำแผ่นชีวไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์มาตัดให้ได้ขนาด 1x1 เซนติเมตร จากนั้นนำชีวไฟฟ้าไปทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน เอทานอล อะซิโตน และไอโซโพรพานอล นาน 15 นาทีตามลำดับ ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู
- ชั่งเมโซพอร์สคาร์บอน 0.6 มิลลิกรัม เติมนีเอทานอล 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกระจายอนุภาคด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- หยดสารละลายที่เตรียมในข้อ 2 ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ลงบนพื้นที่ 3x3 มิลลิเมตร ของชีวไฟฟ้าฟลูออรีนเจือทินออกไซด์ นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที เก็บไว้ในโถดูดความชื้นนาน 30 นาที
- นำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ โดยนำเข้าเครื่อง X-ray Diffractometer ในขั้นตอนนี้สามารถกำหนดเวลาในการตรวจวัด ความเข้มของรังสีเลี้ยวเบน จากนั้นจะได้ข้อมูลตำแหน่งมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มข้นสัมพันธ์ของเส้นการเลี้ยวเบน

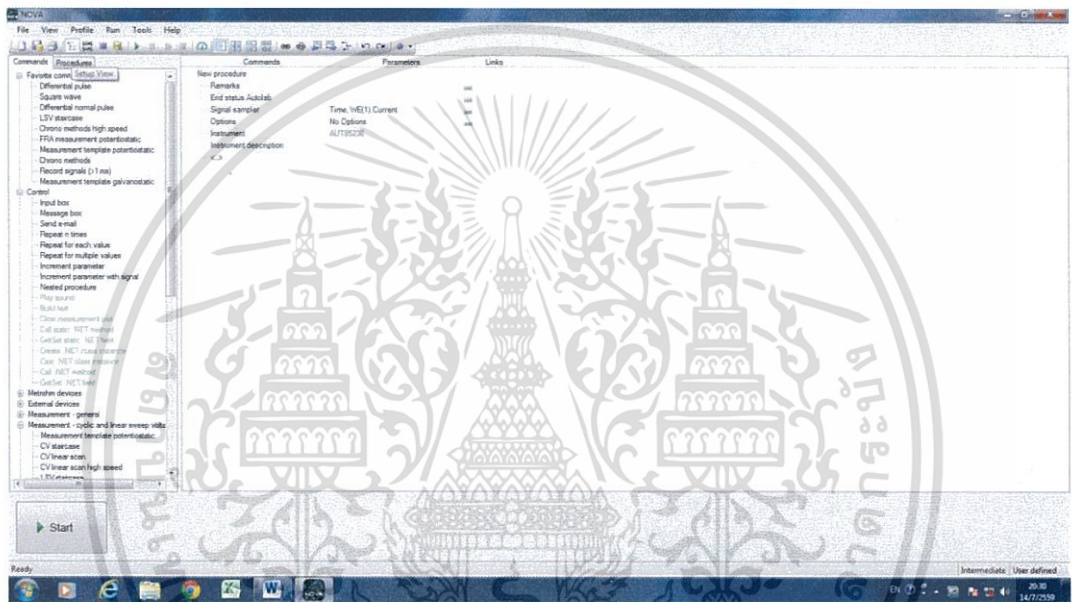
ภาคผนวก ง

การใช้เครื่องออตโต้แลป

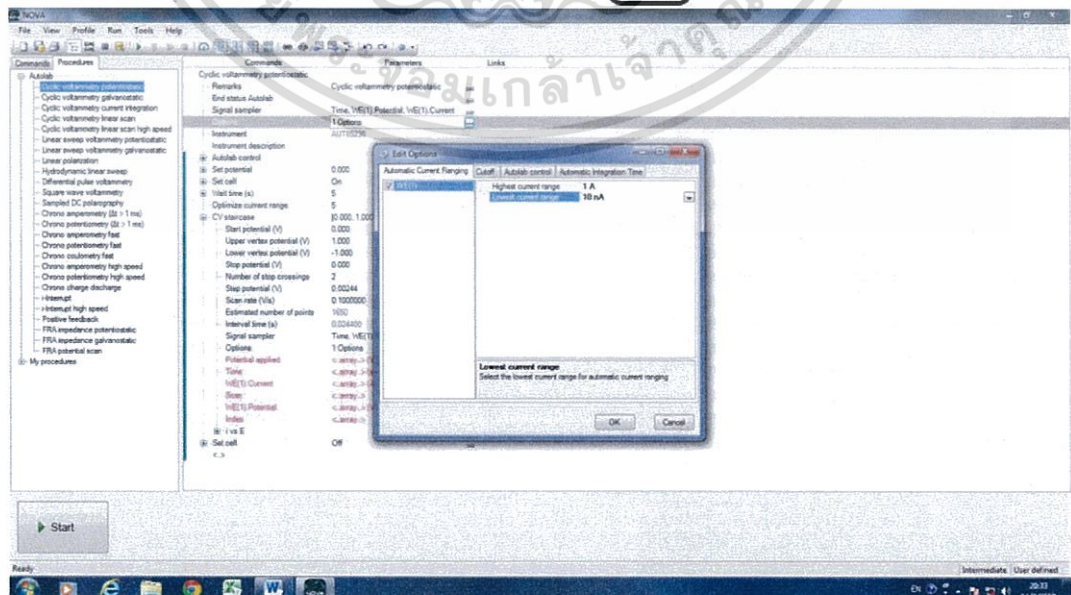
1) การตั้งค่าการใช้งานวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)



เลือก → Procedures → Cyclic Voltammetry Potentiostatic

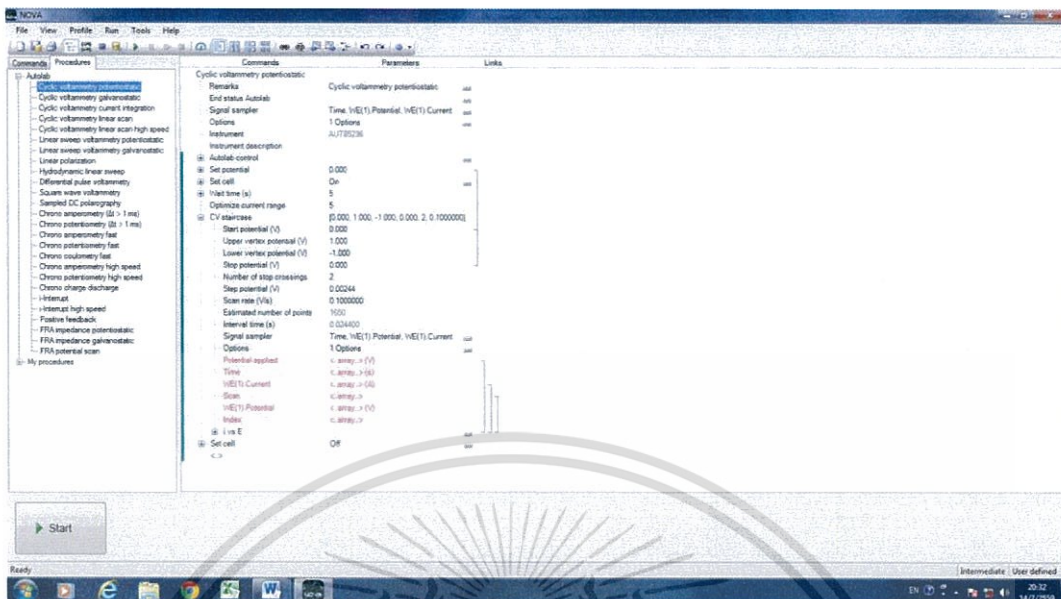


คลิก Options เพื่อเลือกช่วงของสัญญาณ → คลิก 



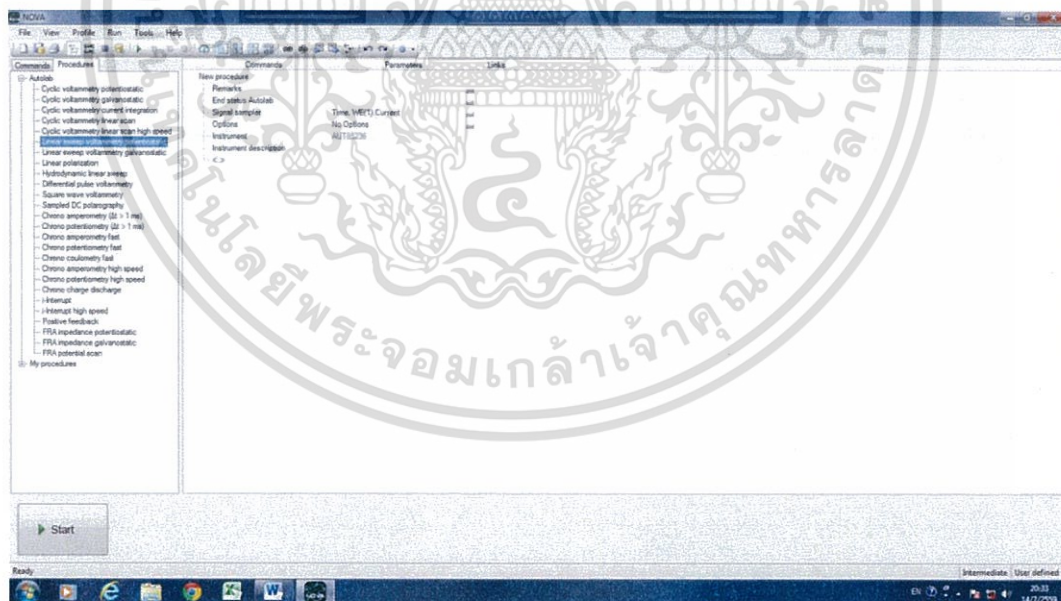
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลิก CV staircase → ตั้งค่าสภาวะที่ใช้



2) การตั้งค่าการใช้งานวิธีดีฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมทรี (Differential pulse voltammetry)

เลือก → Procedures → Linear Sweep Voltammery Potentiostatic



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

