

การเพิ่มประสิทธิภาพของไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคการใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล
ร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวตสำหรับการตรวจวัดกลูเตน

ENHANCEMENT OF ELECTROCHEMICAL GLUTEN DETECTION BY USING
MOLECULAR-IMPRINTED POLYMER COMPOSITED WITH
SUPERPARAMAGNETIC IRON OXIDE NANOPARTICLES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-NT-M-001-007

การเพิ่มประสิทธิภาพของไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคการใช้พอลิเมอร์ลอกแบบ
โมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์สำหรับการตรวจวัดกลูเตน

ENHANCEMENT OF ELECTROCHEMICAL GLUTEN DETECTION BY
USING MOLECULAR-IMPRINTED POLYMER COMPOSITED WITH
SUPERPARAMAGNETIC IRON OXIDE NANOPARTICLES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

พ.ศ. 2562

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2019-NT-M-001-007

ENHANCEMENT OF ELECTROCHEMICAL GLUTEN DETECTION BY
USING MOLECULAR-IMPRINTED POLYMER COMPOSITED WITH
SUPERPARAMAGNETIC IRON OXIDE NANOPARTICLES



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ในห้องสมุดของสถาบันฯ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2019
KMITL-2019-NT-M-001-007



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
COPYRIGHT 2019
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพของไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคการใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดสำหรับการตรวจวัดกลูเตน
นักศึกษา	นางสาวดารารวรรณ ลิมถิน
รหัสประจำตัว	59607003
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ดารินี พรหมโยธิน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.อรรณพ คล้าชื่น

บทคัดย่อ

กลูเตนถูกพบใน ธัญพืช ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาร์เลย์ มักถูกใช้เป็นส่วนประกอบของอาหาร เมื่อได้รับประทานเพียงเล็กน้อยก็จะเป็นอันตรายต่อร่างกายของผู้ที่มีระบบภูมิคุ้มกันโปรตีนกลูเตนผิดปกติ หรือเรียกว่าโรคแพ้กลูเตน ผู้ป่วยจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงอาหารที่มีกลูเตนเป็นส่วนประกอบเพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงของร่างกายที่อาจเกิดขึ้น งานวิจัยนี้จึงสนใจการตรวจวัดกลูเตนโดยใช้เทคนิคการวัดทางเคมีไฟฟ้า เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ป่วยในการใช้ชีวิตประจำวัน เทคนิคการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า มักถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ และสารปนเปื้อนของอาหาร เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความจำเพาะเจาะจงและความไวในการตอบสนองสูง นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาสำหรับใช้พกพาได้ เพื่อความสะดวกและง่ายในการตรวจวัด ทั้งนี้เทคนิคการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความจำเพาะเจาะจงได้ด้วยการใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล และเพิ่มประสิทธิภาพความไวในการตอบสนองจากการวัดโดยใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด ในงานวิจัยนี้ศึกษาการตรวจวัดกลูเตนด้วยอนุภาคแม่เหล็กพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล โดยเทคนิคการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งอนุภาคนาโนแม่เหล็ก ถูกเตรียมด้วยกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี และนำไปเตรียมลงบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนร่วมกับพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล โดยใช้เมทิลเมทาคริเลตเป็นมอนอเมอร์ ตรวจสอบลักษณะและสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การกระเจิงแสงแบบไดนามิกส์ (DLS) และ แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น (VSM) ตามลำดับ ทำการตรวจสอบลักษณะของอนุภาคแม่เหล็กพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิชัน (FE-SEM) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า ด้วยเทคนิคไซคลิกโวล

ลแทมเมตรีและแอมแปโรเมตรี พบว่าสามารถเตรียมอนุภาคนาโนแม่เหล็กขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร มีคุณสมบัติแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กพาราแมกเนติก สามารถเตรียมอนุภาคแม่เหล็กพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลลงบนขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีนและการตรวจวัดกลูเตนโดยเทคนิคการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าที่ปริมาณกลูเตนต่ำสุดถึง 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความจำเพาะเจาะจงต่อกลูเตน ทั้งนี้ขั้วไฟฟ้าตรวจวัดกลูเตนที่เตรียมได้สามารถนำไปพัฒนาและต่อยอดในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ : กลูเตน เทคนิคการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า อนุภาคแม่เหล็กพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Enhancement of Electrochemical Gluten Detection by using Molecular-Imprinted Polymer Compositied with Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles
Student Name	Miss Dalawan Limthin
Student ID	59607003
Degree	Master of Science
Department	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Darinee Phromyothin
Thesis Co-advisor (if any)	Dr. Annop Klamchuen

Abstract

The allergy of gluten, which usually composes in some rice and flour, is extremely and highly dangerous. Even a few gluten levels in a diet may bring enormous symptoms. Low- level detection of gluten in food and bakery products is tremendous attention. The rapid and simple method for organic molecule detection is electrochemical analysis, additionally, which can be applied to portable devices. The molecularly imprinted polymers (MIP) have widely used to enhance the selectivity of electrochemical detection. Moreover, magnetic molecularly imprinted polymers (MMIP) as known as Fe_3O_4 magnetic nanoparticles can be combined with a polymer as well to improve the sensitivity of detection that confirmed by electrochemical measurement. In this work, the gluten detection was studied using the electrochemical technique. The Fe_3O_4 magnetic nanoparticles were synthesized by chemical reaction and then encapsulated with methyl methacrylate (MMA) as a functional group. Dynamic light scattering measurement clearly illustrates the average size of as-synthesized Fe_3O_4 nanoparticles about 10 nm. Moreover, morphology, crystal structure, and magnetic properties were characterized by transmission electron microscopy (TEM), X-ray diffractometer (XRD), and vibrating sample magnetometer (VSM), respectively.

Keywords : Gluten Magnetic molecularly imprinted polymers Electrochemical analysis



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพของไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคการใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์สำหรับการตรวจวัดกลูเตน สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ดารินี พรหมโยธิน และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.อรรณพ คล้าชื่น ซึ่งได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งการอำนวยความสะดวกในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์ จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.มติ ห่อประทุม ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานโดยมี ผศ.ดร. นงลักษณ์ หวงกำแหง ผศ.ดร. นวพันธ์ ชัยนิกิจ และ ดร.สากร ระหงษ์ เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณคณาจารย์วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี ตลอดจนเพื่อนและพี่ที่ให้คำปรึกษา แนะนำและเป็นกำลังใจนำมาซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายนี้ขอขอบคุณ พระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีในการศึกษาและทำงานวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี คุณประโยชน์ของโครงการพิเศษฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ดาราวรรณ ลิมถิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย	3
1.4 สมมติฐานงานวิจัย	4
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กลูเตน (Gluten)	5
2.2 การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า	7
2.2.1 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า	7
2.2.2 เทคนิควิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า	7
2.2.3 ขั้วไฟฟ้า	8
2.2.4 ศักย์ไฟฟ้าของวงจรเคมีไฟฟ้า	12
2.2.5 สมการเนินสต์	12
2.2.6 ศักย์ไฟฟ้าของขั้วมาตรฐาน	13
2.2.7 บทบาทเซลล์เคมีไฟฟ้าในการวิเคราะห์	13
2.2.8 โวลแทมเมตรี	15
2.2.9 แอมแปโรเมตรี	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.10 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า	19
2.3 พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (Molecularly imprinted polymer; MIP)	21
2.3.1 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบ	23
2.4 อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ (Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles ; SPIONs).....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	45
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	45
3.1.1 สารเคมี	45
3.1.2 เครื่องมือวิเคราะห์	45
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	45
3.2.1 สังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ (SPIONs)	46
3.2.2 สังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กอ็อกไซด์ (magnetic molecularly imprinted polymer; MMIP) พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล ร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์โดยไม่ใส่กลูเตน (magnetic non- molecularly imprinted polymer; MNIP) พอลิเมอร์ลอกแบบ (molecularly imprinted polymer; MIP) และพอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (non-molecularly imprinted polymer; NIP) และดัดแปลงขั้วคาร์บอนสำหรับตรวจวัดกลูเตน	46
3.3.3 การตั้งระบบการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า	48
3.3.3.1 ไชคลิกโวลแทมเมตรี.....	48
3.3.3.2 แอมป์โรเมตรี	49
3.3.3.3 อิมพีแดนซ์.....	49
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	51
4.1 คุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วย ปฏิกิริยาเคมี.....	53
4.2 คุณลักษณะของพื้นผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอนดัดแปลง.....	53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงร้อยละของปริมาณกลูเตนทั้งหมดในโปรตีนของธัญพืช.....	5
2.2 เทคนิควิธีทางเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า.....	8
2.3 ข้าวไฟฟ้าอ้างอิงชนิดต่าง ๆ.....	10
2.4 การเลือกใช้ข้าวไฟฟ้าอ้างอิง.....	10
2.5 สารตัวอย่างการตรวจจับอย่างจำเพาะเจาะจงโดยใช้เทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบ.....	22
2.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์ของเซนเซอร์ด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ.....	28
2.7 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของเหล็กออกไซด์ต่าง ๆ.....	30
2.8 เปรียบเทียบขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กแมกนีไทต์ ฮีมาไทต์ และแมกนีไทต์.....	32
2.9 ตัวอย่างกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด (SPIONs).....	35
2.10 เปรียบเทียบกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด (SPIONs).....	37
2.11 การตรวจวัดด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแมกนีไทต์.....	43
4.1 ตารางเปรียบเทียบความเสถียรภาพในการสร้างข้าวฟ้าดัดแปลง.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ร้อยละของปริมาณผู้ป่วยโรคแพ้กลูเตนในแต่ละช่วงอายุ.....	6
2.2 ส่วนประกอบของของอุปกรณ์การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า	11
2.3 ขั้วพิมพ์สกรีน (Screen-printed electrode)	11
2.4 การเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน.....	14
2.5 การแพร่ของไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้า	14
2.6 กระบวนการนำพาอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย.....	15
2.7 ค่าความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้า ณ เวลาต่าง ๆ.....	16
2.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic Voltammogram).....	17
2.9 แอมแปโรเมตรี (Amperometry).....	18
2.10 แสดงความต่างเฟสของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า	20
2.11 กราฟไนควิสต์ (Nyquist plots) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ส่วนจริงและอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ	21
2.12 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบ	22
2.13 สมการการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ	24
2.14 ปฏิกิริยาของมอนอเมอร์เป็นอนุมูลอิสระ	24
2.15 ปฏิกิริยาขั้นแพร่ขยาย (propagation).....	25
2.16 ปฏิกิริยาขั้นขั้นยุติ (TERMINATION)	25
2.17 เปรียบเทียบการใช้มอนอเมอร์ในการจับอย่างจำเพาะเจาะจงของdimethoate ในแตงกวา. 26	
2.18 กระบวนการแสดงผลของตรวจจับอย่างจำเพาะเจาะจงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ	27
2.19 แบบจำลองการไหลของอิเล็กตรอนที่ถูกขัดขวางโดยพอลิเมอร์ลอกแบบ	29
2.20 โครงสร้างผลึกของแมกนีไทต์ และแมกนีไซต์	30
2.21 ทิศทางการสปีนของอิเล็กตรอนในโมเลกุลแมกนีไทต์.....	33
2.22 รูปแบบเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ไดอะแมกเนติก, พาราแมกเนติก, เฟอร์โรแมกเนติก และพาราอิมกเนติก.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 อิทธิพลของขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กพาราแมกเนติก.....	40
2.24 ปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุภาคนาโนแม่เหล็กกับโพลิเมอร์.....	41
2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับทิศทางของสปินของอนุภาคซึ่งเป็นผลจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก.....	42
2.26 การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติก (MMIP) เพื่อตรวจวัดกลูตาไมน.....	43
3.1 กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติก.....	46
3.2 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติก และกระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าดัดแปลงบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอน.....	48
3.3 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ถูกดัดแปลงในรูปแบบต่าง ๆ.....	48
3.4 ไตอะแกรมกระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าดัดแปลง.....	50
4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	51
4.2 กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกคำนวณจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน.....	52
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติก.....	52
4.4 อิทธิพลของแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกต่อคุณสมบัติของ.....	53
4.5 ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจากการถูกดัดแปลงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง.....	54
4.6 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดกลูตาไมนด้วยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกที่ความเข้มข้น 50 ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	55
4.7 การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงแบบต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นสารละลายกลูตาไมน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	57
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (concentration) และกระแส (current) เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายกลูตาไมนที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ในควิสต์พล็อตจากการวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของขั้วไฟฟ้าดัดแปลง ในลักษณะต่าง ๆ	59
4.10 ในควิสต์พล็อตขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด (MMIP)	60
4.11 แผนผังแสดงส่วนประกอบและกลไกการทำงานของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงที่ได้จากการวัดทางไฟฟ้า เคมีด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี.....	61
4.12 ในควิสต์พล็อตขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด (MMIP) เมื่อทำการวัดสารละลายจากหมู่อะมิโนและแป้งแต่ละชนิด.....	62
4.13 การทดสอบความจำเพาะเจาะจงของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับ อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด (MMIP) ต่อโมเลกุลกลูเตน.....	63
4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าสัญญาณของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	64
4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าสัญญาณของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงในการใช้งานซ้ำ.....	65
4.16 เปรียบเทียบทิศทางของสนามแม่เหล็กในการตรวจวัดสารละลายกลูเตน	66
4.17 เปรียบเทียบความแรงของสนามแม่เหล็กที่ 0.18 เทสลา 0.08 เทสลา และแบบไม่มี สนามแม่เหล็ก	67
4.18 ในควิสต์พล็อตเปรียบเทียบการตรวจวัดแบบมีสนามสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

อาหารเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ซึ่งในส่วนประกอบของอาหารจะมีสารอาหารทั้งคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน วิตามิน และเกลือแร่ ซึ่งมีประโยชน์ทั้งให้พลังงาน ช่วยเสริมสร้างการเจริญเติบโตของร่างกาย ซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ และต้านทานเชื้อโรค ซึ่งสารอาหารเหล่านี้ได้มาจากข้าว ธัญพืช เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้ ถึงแม้ว่าสารอาหารเหล่านี้จะมีประโยชน์ต่อร่างกาย แต่สำหรับในผู้บริโภครายกลุ่มที่มีระบบภูมิคุ้มกันผิดปกติหรือเกิดอาการแพ้ อาหารบางชนิดเช่น แพ้แลคโตส แพ้เคซีน แพ้อาหารทะเล และแพ้กลูเตน มีความจำเป็นอย่างมากในการเลือกบริโภคอาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากสารอาหารเหล่านั้น

วัฒนธรรมการรับประทานอาหารของชาติตะวันตกอย่างยุโรปและอเมริกา มักมีอาหารจำพวกขนมปัง พาสต้าหรือสปาเกตตี เป็นองค์ประกอบหลักในอาหารแต่ละมื้อ ทำให้อุตสาหกรรมด้านอาหารทั้งขนมปัง เค้ก เบเกอรี่ พาสต้า อาหารพาสต์ฟู้ด และ เนื้อเทียมในอาหารมังสวิรัตเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว อาหารเหล่านี้มักมีส่วนประกอบของธัญพืชจำพวก ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาเลย์ เป็นต้น ซึ่งในธัญพืชเหล่านี้มีส่วนประกอบของโมเลกุลกลูเตนซึ่งอาจก่อให้เกิดการแพ้ได้ กลูเตนเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งช่วยเพิ่มรสชาติในผลิตภัณฑ์ ทำให้ได้รสสัมผัสของอาหารเช่น ขนมปังฟูและนุ่ม และยังมีคุณประโยชน์ของโปรตีนต่อร่างกาย แต่สำหรับผู้บริโภคที่แพ้กลูเตนควรหลีกเลี่ยงอาหารที่มีส่วนประกอบของกลูเตน จากการสำรวจพบว่ามีอัตราการแพ้กลูเตนเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆปี ของผู้บริโภค ทำให้ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากกลูเตนวางจำหน่ายตามท้องตลาด ซึ่งสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (The U.S food and drug administration, FDA) มีข้อกำหนดสินค้าอาหารที่มีโปรตีนกลูเตนในปริมาณน้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm) เป็นผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตน (free-gluten) สำหรับคนที่เป็นโรคแพ้กลูเตนการบริโภคอาหารที่มีส่วนประกอบของกลูเตนอาจก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกาย เช่น ทำให้เกิดผื่น หรือแผลตามผิวหนัง เป็นโรคเลือดจาง อาเจียนเป็นเลือด ทำให้ระบบย่อยอาหารทำงานผิดปกติทำให้ปวดท้อง ท้องอืด เกิดแผลที่ลำไส้เล็ก การดูดซึมวิตามินหรือเกลือแร่ผิดปกติ หรือมีอาการแพ้ขั้นรุนแรงอาจเสียชีวิต ดังนั้นการตรวจวัดกลูเตนในอาหารจึงมีความสำคัญ เพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภค ซึ่งการตรวจวัดกลูเตนโดยทั่วไปเช่น การใช้ปฏิกิริยาที่เฉพาะเจาะจงของแอนติบอดี (antibody) และแอนติเจน (antigen) โดยใช้เอนไซม์ (enzyme, ELISA) แมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectroscopy, MS) และเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography, HPLC) เครื่องมือตรวจวัดเหล่านี้สามารถตรวจวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ มีความจำเพาะเจาะจง และมีความละเอียด แต่มีข้อเสียคือเป็นวิธีที่ยุ่งยากในการเตรียมสารวิเคราะห์ ใช้เวลานานในการตรวจวัด เครื่องมือขนาดใหญ่

และราคาสูง ต้องวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและควบคุมด้วยผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น ดังนั้นการพัฒนาเครื่องมือหรืออุปกรณ์ในการตรวจวัดกลูเตนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเพื่อให้ง่าย สะดวก และได้ผลที่น่าเชื่อถือในการตรวจวัด ซึ่งเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical technique) เป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจและถูกนำมาพัฒนาในการตรวจวัดสาร เนื่องจากมีคุณลักษณะเด่น ทั้งเป็นเทคนิคที่ใช้งานง่าย การตอบสนองสูง วิเคราะห์ผลได้รวดเร็ว ผลน่าเชื่อถือและสามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์สำหรับพกพาได้ แต่ข้อเสียคือความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ตรวจวัดค่อนข้างต่ำ ซึ่งพบว่ามีการวิจัยที่ผ่านมามีการปรับปรุงและพัฒนาการตรวจวัดด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยการทำการดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าในวิธีต่าง ๆ เช่น การตรึงเอนไซม์ การตรึงด้วยเอนไซม์ และสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลเป็นต้น ทำให้การตรวจวัดมีความจำเพาะเจาะจงต่อสาร มีความแม่นยำ และน่าเชื่อถือ แต่เนื่องจากการตรึงเอนไซม์ การตรึงด้วยเอนไซม์เป็นสารประเภทโปรตีน ทำให้ต้นทุนสูง การจัดเก็บยุ่งยาก ความเสถียรต่อเคมีและอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่การสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลเป็นวิธีที่เตรียมง่าย ต้นทุนต่ำ มีความเสถียรต่อเคมีและอุณหภูมิ การจัดเก็บไม่ยุ่งยาก และถูกนำมาใช้สำหรับการตรวจวัดอย่างจำเพาะเจาะจงของสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน สารยาฆ่าแมลง และสารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น แต่ทั้งนี้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลยังมีข้อเสียคือ การตอบสนองค่อนข้างต่ำ เนื่องจากพอลิเมอร์สำหรับทำโครงสร้างแม่แบบไม่นำไฟฟ้าทำให้ขัดขวางการไหลของอิเล็กตรอน เพื่อการตรวจวัดด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น การปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณให้สูงขึ้นในการตรวจวัดโดยการใช้วัสดุอนุภาคนาโนจึงสำคัญ อนุภาคนาโนของ ทอง เงิน และท่อนาโนคาร์บอน เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ เกิดการรวมกลุ่มได้ง่าย ออกซิไดซ์และเสียสภาพง่าย ในขณะที่อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกมีความน่าสนใจ เนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สังเคราะห์ง่าย กระจายในเนื้อพอลิเมอร์ได้ง่าย และด้วยสมบัติแม่เหล็กพาราแมกเนติกเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขยายสัญญาณได้ ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลทำงานร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการตรวจวัดทั้งการตรวจวัดที่มีความจำเพาะเจาะจง และ การตอบสนองสูง สามารถตรวจวิเคราะห์สารในปริมาณและความเข้มข้นน้อยได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจวัดกลูเตนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า โดยการดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าโดยการใช้วิธีสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกลงบนแผ่นขั้วคาร์บอน โดยเสนอผลการวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าในรูปแบบของไซคลิกโวลแทมเมตรีและแอมแปร์เมตรี นำมาซึ่งการวิเคราะห์กลูเตนที่มีความจำเพาะเจาะจง ความแม่นยำและถูกต้อง น่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ที่ง่าย รวดเร็ว พกพาได้สะดวก และสามารถนำมาพัฒนา

และประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดกลูเตนในอาหารได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 สังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมายด์ด้วยปฏิกิริยาเคมี และตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา คุณสมบัติทางแม่เหล็ก และคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า

1.2.2 สังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมายด์ และดัดแปลงพื้นผิวด้วยพิมพ์สกรีนคาร์บอน ทำการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา และคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของพิมพ์สกรีนคาร์บอนอิเล็กทรอนิกส์ที่ดัดแปลง

1.2.3 ตรวจวิเคราะห์กลูเตนในรูปสารละลายอย่างจำเพาะเจาะจง โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการดัดแปลงชีวไฟฟ้าคาร์บอนเพื่อตรวจวัดกลูเตนโดยการประยุกต์ใช้การสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมายด์โดยมีกลูเตนเป็นโมเลกุลแม่แบบ หลังจากนั้นนำชีวไฟฟ้าที่ดัดแปลงเรียบร้อยแล้วมาวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยจะแบ่งขั้นตอนเป็นดังนี้

1.3.1 สังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กด้วยปฏิกิริยาเคมี แล้วทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) และ วิเคราะห์คุณสมบัติแม่เหล็กด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่น (vibrating sample magnetometer, VSM)

1.3.2 สังเคราะห์และดัดแปลงชีวไฟฟ้าคาร์บอนด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลเตรียมโดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมายด์สังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล ประกอบด้วย เมทิล เมทาครีเลท (Methyl methacrylate, MMA) เป็นมอนอเมอร์ (Monomer) เอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาครีเลท (Ethylene glycol dimethacrylate, EGDMA) 2,2-เอโซบิสไอโซบิวโรไนไตรล์ (2,2-Azobisisobutyronitrile, AIBN) และกลูเตน ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง (cross-linking) ตัวริเริ่ม (initiator) และแม่แบบ (template) ตามลำดับ และทำการดัดแปลงชีวไฟฟ้าคาร์บอน ทำการตรวจพิสูจน์การดัดแปลงพื้นผิวชีวไฟฟ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์อิมิสชัน (field-Emission scanning electron microscope , FE-SEM)

1.3.3 นำชีวไฟฟ้าคาร์บอนที่ถูกดัดแปลงพื้นผิวโดยการประยุกต์ใช้การสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมายด์ทำการตรวจวัดกลูเตนด้วยเคมีไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry, CV) แอมแปโรเมตรี (amperometry, AMP) และอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1.3.4 วิเคราะห์และประเมินผลงานวิจัย ได้แก่ ค่าความไวในการตอบสนองของชีวไฟฟ้าดัดแปลง ความเข้มข้นต่ำสุดของกลูเตนที่ชีวไฟฟ้าดัดแปลงสามารถตรวจวัดได้ ความสามารถในการใช้

ซ้ำ ความเสถียรภาพในการใช้งานของขั้วไฟฟ้า ความเสถียรภาพในการดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้า และ ความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัดกลูเตนของขั้วไฟฟ้าดัดแปลง

1.4 สมมติฐานงานวิจัย

1.4.1 สามารถเตรียมอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราวยังยวดด้วยปฏิกิริยาเคมี

1.4.2 สามารถเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราวยังยวดลงบน ขั้วไฟฟ้าคาร์บอน

1.4.2 พอลิเมอร์ลอกแบบที่สังเคราะห์มีความจำเพาะเจาะจงต่อกลูเตน

1.4.3 อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราวยังยวดช่วยขยายสัญญาณในการตรวจวัดกลูเตน

1.4.4 พอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราวยังยวดมีความจำเพาะเจาะจงและ ช่วยขยายสัญญาณในการตรวจวัดกลูเตน

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 สังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กและตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก

1.5.2 ดัดแปลงขั้วไฟฟ้าคาร์บอนให้มีความจำเพาะต่อกลูเตนด้วยการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอก แบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราวยังยวดทำการตรวจวัดสัณฐานวิทยา และคุณสมบัติ ทางเคมีไฟฟ้า

1.5.3 ทดสอบการทำงานการตรวจวัดกลูเตนด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า ไชคลิกโวลแทมเมตรี (CV) แอมแปโรเมตรี (AMP) และอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) รวมถึงพัฒนาประสิทธิภาพ การทำงานของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลูเตน (Gluten)

กลูเตนเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่เกิดจากการรวมกันของกลูเตนินและไกลอะดิน พบในส่วนที่เป็นเอนโดสเปิร์มของธัญพืชบางชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ และข้าวไรซ์ เป็นต้น ธัญพืชเหล่านี้มักถูกนำมาทำเป็นแป้ง ทำให้ถูกนำมาใช้ประกอบอาหารมากมายเช่น ขนมปัง ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้ขนมปังเหนียวนุ่มน่ารับประทาน รวมถึงเป็นส่วนประกอบในเส้นพาสต้า เค้ก พาย เบียร์ วิสกี้ และถูกผสมลงในซอสถั่วเหลือง ซอสปรุงรสต่าง ๆ เพื่อให้ซอสมีความเข้มข้นขึ้น นอกจากนี้เนื่องจากกลูเตนมีคุณสมบัติของโปรตีนจึงมักถูกนำมาทำเป็นเนื้อเทียมในอาหารมังสวิรัตอีกด้วย จะเห็นได้ว่ากลูเตนมักจะเป็นส่วนประกอบในอาหารหลายชนิด แต่เนื่องจากกลูเตนส่งผลกระทบต่อบางคนที่มีระบบภูมิคุ้มกันผิดปกติ หรือมีสภาวะแพ้กลูเตน กลูเตนจึงอาจเป็นอันตรายต่อกลุ่มคนเหล่านั้นได้ [1]

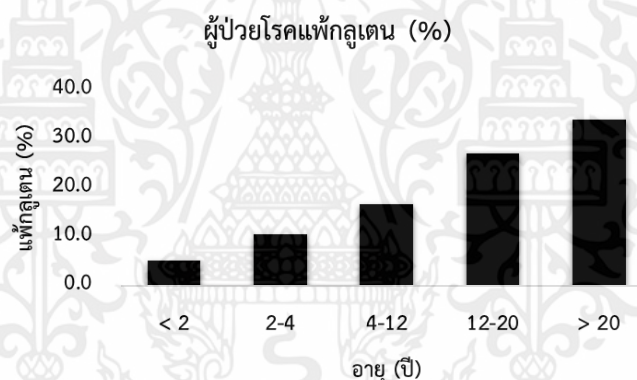
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงร้อยละของปริมาณกลูเตนทั้งหมดในโปรตีนของธัญพืช

ธัญพืช	ร้อยละของปริมาณกลูเตนในโปรตีนของธัญพืช
ข้าวสาลี	31.1
ข้าวไรซ์	23.6
ข้าวบาร์เลย์	24.8
ข้าวโอ๊ต	19.5
ข้าวโพด	17.1
ข้าวฟ่าง	17.7
ข้าว	10.4

(ที่มา: A. Cebolla et al. Nutrients 2018,10, 1927)

โรคแพ้กลูเตน เป็นโรคเกี่ยวกับระบบภูมิคุ้มกันผิดปกติ ซึ่งสาเหตุของโรคอาจเกิดจากพันธุกรรม หรือจากการกระตุ้นโดยสารที่อยู่ในสภาวะแวดล้อม รวมทั้งไวรัสและการติดเชื้อหรือจากสภาวะความเครียด ผู้ป่วยที่แพ้กลูเตนจะมีการตอบสนองแบบไม่พึงประสงค์ของร่างกายที่มีต่อสิ่งแปลกปลอมที่มากกระตุ้น เมื่อร่างกายได้รับกลูเตนโดยผ่านกระบวนการย่อยกลูเตนจะผ่านเข้าสู่ลำไส้เล็กโดยมีวิลลี (Villi) ทำหน้าที่ช่วยดูดซึมสารอาหาร สำหรับคนที่แพ้กลูเตน ระบบภูมิคุ้มกัน

อัตราส่วนของร่างกายจะผลิตแอนติบอดีออกมามากขึ้นของไวไลต์ออกฤทธิ์ที่มากเกาะอยู่บนผิวเซลล์จะเหมือนเป็นสิ่งแปลกปลอม และทำลายไวไลต์ทำให้เกิดการอักเสบ บวมแดง ทำให้ผู้ป่วยเมื่อได้รับกลูเตนจะมีอาการต่าง ๆ เช่นปวดท้อง ท้องเสีย และอาเจียน และเนื่องจากลำไส้เล็กเกิดอักเสบและถูกทำลาย ทำให้การดูดซึมสารอื่น ๆ ไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เป็นโรคขาดสารอาหาร รวมทั้งเกลือแร่ ทำให้เกิดโรคอื่น ๆ ตามมา รวมถึงมะเร็ง นอกจากนี้โรคแพ้กลูเตนยังจัดเป็นโรคเรื้อรังตลอดชีวิต ซึ่งปัจจุบันยังไม่มียารักษา วิธีป้องกันที่ดีที่สุดคือการหลีกเลี่ยงการรับประทานอาหารที่มีกลูเตนเป็นส่วนประกอบ หรือต้องรับประทานอาหารปราศจากกลูเตน จากการรายงานขององค์การอนามัยโลกและองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (WHO/FAO) พบว่าโดยทั่วไปผู้ป่วยที่เป็นโรคแพ้กลูเตนไม่ควรบริโภคอาหารที่มีกลูเตนเกิน 20 มิลลิกรัมต่อวัน นอกจากนี้จากข้อมูลพบว่ากลุ่มคนที่เป็โรคแพ้กลูเตนมีจำนวนสูงถึงร้อยละ 1 ของประชากรโลก และมีแนวโน้มของผู้ป่วยที่เพิ่มสูงขึ้นในทุกเพศทุกวัย [2] ดังรูปที่ 2.1 อีกทั้งยังมีผู้ป่วยที่แพ้กลูเตนอีกจำนวนมากที่ไม่ได้รับการวินิจฉัย



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ร้อยละของปริมาณผู้ป่วยโรคแพ้กลูเตนในแต่ละช่วงอายุ (ที่มา: p. Jnawali et al. food science and human wellness, 5, 169–176 (2016))

ปัจจุบันพบว่าการผลิตอาหารปราศจากกลูเตนตามท้องตลาดมากขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อกลุ่มผู้ป่วยที่แพ้กลูเตน แต่ก็ยังมีอาหารอีกจำนวนมากที่มีความเสี่ยงหรือมีส่วนประกอบของกลูเตนโดยทั่วไปไม่สามารถแยกความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของกลูเตนหรือเป็นผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนออกจากกันได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ป่วยที่แพ้กลูเตน การมีเครื่องสำหรับตรวจวิเคราะห์กลูเตนในอาหารจึงเป็นสิ่งสำคัญ

กระบวนการในการตรวจวัดกลูเตนในอาหารมีหลายวิธี จากงานวิจัยพบว่าการตรวจวัดกลูเตนโดยใช้เทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี [3, 4] และเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง [5, 6] ทั้งนี้เนื่องจากมีความจำเพาะเจาะจงต่อกลูเตน และมีการตอบสนองสูง แต่เนื่องจากแต่มีข้อจำกัดคือต้องทำในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ความยุ่งยากซับซ้อน ใช้ระยะเวลานาน เครื่องมือขนาด

ใหญ่ ราคาค่อนข้างสูง และต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ ทำให้ปัจจุบันมีงานวิจัยหลากหลายงานที่พยายามแก้ข้อจำกัดในข้อนี้ จากงานวิจัยพบว่าเทคนิคเคมีไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่มีการตอบสนองสูง ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สะดวกและรวดเร็วในการตรวจวัด ใช้ซ้ำได้ สามารถพัฒนาเป็นเครื่องพกพาได้ ทำให้มีความสะดวกในการพัฒนาเป็นเครื่องมือสำหรับการตรวจวัดกลูเตนต่อไป

2.2 การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า

เคมีไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่ว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยหลักการของเคมีไฟฟ้าถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาทางเคมี เช่น การศึกษาปรากฏการณ์การกัดกร่อน การศึกษากลไกและจลศาสตร์ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารอินทรีย์ และอินทรีย์ด้วยไฟฟ้า และการใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้าในทางเคมีวิเคราะห์ เป็นต้น การนำหลักการทางเคมีไฟฟ้ามาศึกษาในทางเคมีวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์จากการวัดการตอบสนองทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาเคมี โดยเกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนหรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (ออกซิเดชัน-รีดักชัน) ภายใต้เซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้เช่น กระแสไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า และความต้านทานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณ หรือความเข้มข้นของสารที่ต้องการศึกษา

2.2.1 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า

เซลล์เคมีไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดตามหน้าที่ของเซลล์ ประกอบด้วย เซลล์กัลวานิก และเซลล์อิเล็กโทรไลต์

เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) เป็นเซลล์ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์กัลวานิกเป็นเซลล์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเองได้โดยไม่ต้องกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าถูกนำไปใช้ประโยชน์มากมายตัวอย่างเช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์แอลคาไลน์ และแบตเตอรี่เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น

เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (electrolytic cell) เป็นเซลล์ที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเองได้ ต้องอาศัยการให้พลังงานภายนอกเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ ซึ่งการดำเนินไปของปฏิกิริยาจะไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปศักย์ไฟฟ้าที่ได้รับ ถูกนำมาใช้ประโยชน์ตัวอย่างเช่น เซลล์แยกน้ำด้วยไฟฟ้า การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ในด้านวิเคราะห์เซลล์อิเล็กโทรไลต์ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารที่ต้องการ โดยเทคนิคการวิเคราะห์แบบต่าง ๆ เช่น โวลแทมเมตรี และแอมแปโรเมตรี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.2.2 เทคนิควิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เทคนิคของการวิเคราะห์โดยหลักการทางเคมีไฟฟ้า เป็นการให้สัญญาณไฟฟ้าแก่สารตัวอย่าง แล้ววัดค่าทางไฟฟ้าของสารละลายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ทั้งนี้วิธีการวิเคราะห์

ทางเคมีไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ 5 เทคนิคดังตารางที่ 2.2 ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาปริมาณขึ้นอยู่กับลักษณะข้อมูลที่ต้องการ

ตารางที่ 2.2 เทคนิควิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า [7]

เทคนิควิธี	สัญญาณไฟฟ้าที่ให้	สัญญาณไฟฟ้าที่วัด
โพเทนชิอเมตรี	กระแสไฟฟ้า=0	ศักย์ไฟฟ้า
แอมแปโรเมตรี	ศักย์ไฟฟ้าคงที่	กระแสไฟฟ้า
โวลแทมเมตรี	ศักย์ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า
คูลอมเมตรี	กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า	ปริมาณไฟฟ้า
อิเล็กโทรแกรวิเมตรี	กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า	น้ำหนักของสาร

งานวิจัยนี้สนใจการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าในทางเคมีวิเคราะห์โดยการใช้เทคนิควิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าแบบ แอมแปโรเมตรี และโวลแทมเมตรี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าแล้วตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2.2.3 ขั้วไฟฟ้า

ระบบวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญอย่างน้อย 3 ส่วนคือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่สามารถนำกระแสได้ อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งอาจจะเป็นศักย์ไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้า และสุดท้ายขั้วไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ หลักการพื้นฐานของเทคนิคเคมีไฟฟ้าจะต้องอาศัยการครบรอบของวงจรไฟฟ้าโดยที่ประจุไฟฟ้าจะสามารถไหลครบได้ทั้งวงจร ซึ่งจะต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อยสองขั้วคือ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งในสองจะเรียกว่า รีเทินอิเล็กโทรด (return electrode) ซึ่งจะทำหน้าที่ให้ประจุไฟฟ้าไหลกลับให้ครบวงจร [7-9] ซึ่งส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 2.2 ทั้งนี้ระบบการทำงานในเทคนิควิธีวิเคราะห์จำเป็นต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้วต่อเข้ากับวงจร

ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode, WE) เป็นขั้วที่มีการตอบสนองต่อไอออนของสารตัวอย่างในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ตอบสนองโดยการนำส่งอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลาย ซึ่งขนาดขั้วไฟฟ้ามีขนาดเล็กเพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารตัวอย่างน้อยๆ ทำให้เกิดเกิดปฏิกิริยาและส่งผ่านอิเล็กตรอนตลอดเวลา สามารถแบ่งประเภท

เอกสารนี้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานเพื่อให้เหมาะสมแก่วัตถุประสงค์การใช้งานได้ 3 ประเภท ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขั้วโลหะ (metal electrode) ได้แก่ขั้วที่ประกอบขึ้นด้วยการนำลวดโลหะชนิดต่าง ๆ มาจุ่มไว้ในสารละลายที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถนำไปใช้วัดเฉพาะไอออนของสารละลายที่ต้องการได้หรือใช้เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับให้สัมผัสกับสารละลายตัวอย่าง

2. ขั้วโลหะเฉื่อย (inert metal electrode) ขั้วประเภทนี้ใช้ในงานที่ตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้าอันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารละลาย ซึ่งผลการตรวจวัดขึ้นกับไอออนของสารละลายตัวอย่างในรูปออกซิไดซ์และรีดิวซ์ และเป็นไปตามสมการเนินสต์ เช่น ครึ่งเซลล์ของลวดแพลทินัมในสารละลายซีเรียม (Ce^{4+}) ดังแผนภาพ [Pt | $\text{Ce}^{4+}, \text{Ce}^{3+}$] ปฏิกิริยาครึ่งเซลล์มีดังนี้



ศักย์ครึ่งเซลล์ตามสมการเนินสต์

$$E = E_{\text{Ce}^{4+}, \text{Ce}^{3+}}^0 - 0.0592 \log \frac{a_{\text{Ce}^{3+}}}{a_{\text{Ce}^{4+}}}$$

การตรวจวิเคราะห์โดยส่วนใหญ่มักใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นโลหะเฉื่อย เช่น แพลทินัม ทอง กราไฟต์ และกลาสสิคาร์บอน เป็นต้น

ขั้วไฟฟ้าเฉพาะเจาะจงไอออน (ion-selective membrane electrode) เป็นขั้วที่ประกอบขึ้นด้วยการนำเอาเยื่อเลือกผ่านที่เหมาะสมมาใช้เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยามราเจาะจงเฉพาะสำหรับไอออนชนิดต่าง ๆ ตัวใดตัวหนึ่ง ที่ต้องการจะทำการวัดวิเคราะห์เท่านั้น ซึ่งในเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่ใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้า จะใช้ขั้วชนิดนี้เป็นส่วนใหญ่ เช่น เครื่องวัด pH meter

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าในทางเคมีวิเคราะห์ซึ่งวิเคราะห์ผลได้จากการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารละลายตัวอย่าง ดังนั้นขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ถูกนำมาใช้ในระบบจึงเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะเฉื่อย เช่น ขั้วคาร์บอน เป็นต้น

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode, RE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้เทียบศักย์ไฟฟ้าที่ต้องการให้กับขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนี้จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอนหรือไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจร และส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ดีต้องมีส่วนประกอบคงตัว ไม่เปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อเก็บไว้ และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ โดยปกติแล้วค่าศักย์ของวงจรที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดสัญญาณ ไฟฟ้าเป็นค่าที่เกิดจากผลต่างของศักย์จากขั้วไฟฟ้าทั้งสองของวงจร อาจเรียกศักย์ของวงจรที่วัดได้ว่า ค่าศักย์สัมพันธ์ (relative potentials) คือถ้าขั้วไฟฟ้าตัวหนึ่งของวงจรเป็นขั้วอ้างอิงที่รู้ค่าแน่นอน ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงานย่อมทำให้สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงานได้แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดต่าง ๆ [7]

ขั้วไฟฟ้า	แผนภาพครึ่งเซลล์	ศักย์ขั้วไฟฟ้า(โวลต์)	
		20°	24°
ไฮโดรเจนมาตรฐาน (SHE)	Pt H ₂ (g),(H ⁺)	0.000	0.000
คาโลเมลอิ่มตัว (SCE)	Hg HgCl ₂ ,KCl (sat'd)	0.248	0.244
คาโลเมล โมลาร์(MCE)	Hg HgCl ₂ ,KCl (1M)	0.282	0.280
คาโลเมล เดซิโมลาร์(DCE)	Hg HgCl ₂ ,KCl (0.1M)	0.334	0.334
เมอร์คิวรี-เมอร์คิวรัสซัลเฟต	Hg Hg ₂ SO ₄ ,K ₂ SO ₄ (sat'd)	-0.573	-0.577
ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์	Ag AgCl,KCl (sat'd)	0.204	0.199

การตรวจวิเคราะห์หรือการนำไปใช้งานอย่างหลากหลายของเทคนิคเคมีไฟฟ้า เพื่อนำมาซึ่งข้อมูลที่ต้องการ การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงควรเลือกให้เหมาะสมกับงานวิเคราะห์จึงสำคัญ ทั้งนี้ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงในการนำมาใช้งานมี 3 ชนิดหลักๆ คือขั้วไฟฟ้าคาโลเมล ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ และขั้วไฟฟ้าเมอร์คิวรี-เมอร์คิวรัสซัลเฟต มีลักษณะและข้อจำกัดในการใช้งานที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง [7]

สภาวะการณ	ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง		
	SCE	Ag/AgCl	Hg/Hg ₂ SO ₄
มีน้ำได้	✓	✓	
ไม่มีน้ำ		✓	
มีคลอไรด์			✓
อุณหภูมิสูงมากกว่า 80°		✓	
ขั้วจุลภาค		✓	

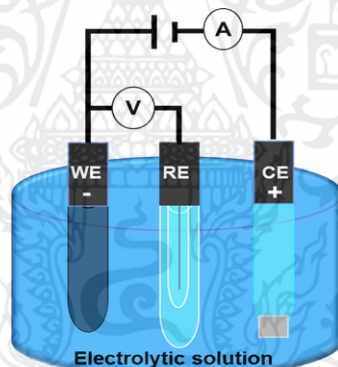
*SCE ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล, Ag/AgCl ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์, Hg/Hg₂SO₄ ขั้วไฟฟ้าเมอร์คิวรี-เมอร์คิวรัสซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการนำไปใช้โดยไม่หวังผลตอบแทน การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ใช้ควรตรวจสอบข้อมูลก่อนการใช้งานทุกครั้ง
ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ด้วยคุณสมบัติเฉพาะคือ มีความเสถียรภาพสูง ทนอุณหภูมิสูงได้ถึง 275 องศาเซลเซียสเหมาะแก่การใช้งานที่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ใช้ได้ทั้งกับสารละลายที่มีน้ำและไม่มีน้ำ และเป็นมิตรต่อ

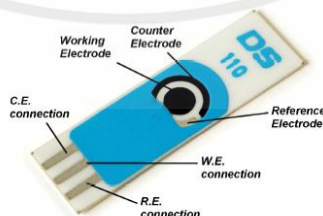
สิ่งแวดล้อมและ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ปรอทจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงแบบคาโลเมลซึ่งเป็นสารก่อมลพิษเป็นอันตรายทั้งต่อผู้ใช้งานและสภาพแวดล้อม ดังนั้นขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์จึงถูกนำมาใช้เป็นขั้วอ้างอิงในระบบเคมีไฟฟ้าของงานวิจัยนี้

ขั้วไฟฟ้าช่วย (auxiliary electrode, AE) หรือ ขั้วไฟฟ้าร่วม (counter electrode, CE) มีคุณลักษณะที่เฉพาะคือ ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นขั้วไฟฟ้าที่ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือ กระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงาน ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนครบวงจร โดยการไหลของอิเล็กตรอนหรือ กระแสไฟฟ้าจะไม่ผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร ซึ่งขั้วไฟฟ้าช่วยมักมีพื้นที่ผิวมากเพื่อนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งมักถูกสร้างมาจากโลหะที่ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แพลทินัม (Pt)

ขั้วไฟฟ้าปัจจุบันถูกพัฒนาเป็นฟิล์มหนาโดยการสร้างด้วยการพิมพ์สกรีน (screen-print) แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งง่ายในการสร้างให้มีความทนทานต่อการใช้งาน เมื่อพิจารณาขั้วไฟฟ้าทั้งหมดจะทำงานภายใต้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของไอออน ซึ่งลักษณะการทำงานดังกล่าวจะเป็นข้อจำกัดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น การวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ อาจจะอยู่ในรูปของความต้านทาน ศักย์ไฟฟ้าหรือ กระแสไฟฟ้าก็ได้ [8]



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิ

รูปที่ 2.3 ขั้วพิมพ์สกรีน (screen-printed electrode) ครั้งที่มีการนำไปใช้
ที่มา : http://www.dropsens.com/en/screen_printed_electrodes_pag.html

2.2.4 ศักย์ไฟฟ้าของวงจรเคมีไฟฟ้า

ค่าศักย์ไฟฟ้าของวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆเป็นค่าศักย์สัมพันธ์ สามารถนำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าได้ต่อเมื่อรู้ค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนั้น ศักย์ไฟฟ้าของระบบเคมีไฟฟ้าจึงอาจกำหนดเป็นค่าจำกัดความได้ว่า ค่าศักย์ของเซลล์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด โดยทั่วไปแล้วการกำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่าผลลัพธ์ศักย์ไฟฟ้าของวงจรถือเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้านั้น โดยเครื่องหมายของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้เป็นบวกแสดงว่าวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้างดังกล่าวเป็นแบบกัลวานิก การดำเนินปฏิกิริยารีดักชันเป็นไปอย่างต่อเนื่องโดยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ในทางกลับกันถ้าผลลัพธ์ศักย์ไฟฟ้าของวงจรเป็นลบ ปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นแอโนด

2.2.5 สมการเนินสต์

ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่วัดได้จากครึ่งเซลล์หนึ่งๆแปรเปลี่ยนไปได้ ถ้าสารละลายตัวอย่างมีความเข้มข้นเปลี่ยนไป โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่ตรวจวัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณไอออนในสารละลายที่มีจำนวนมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและสารละลายเกิดได้ดี ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น จากทฤษฎีความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ากับการเกิดปฏิกิริยาของตัวทำปฏิกิริยา และผลของปฏิกิริยาแสดงได้ด้วยสมการที่เรียกว่า สมการเนินสต์ (Nernst equation) ดังสมการ 2.1 และ 2.2

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.1)$$

E = ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์

E^0 = ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มาตรฐาน

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล)

T = อุณหภูมิองศาสัมพัทธ์

F = ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,491 คุลอมบ์ต่อน้ำหนักสมมูล)

n = จำนวนอิเล็กตรอน

a,b,c,d = ค่าแอกทิวิตีของสาร A,B,C และ D

Q = ค่าเฉลี่ยแอกทิวิตี หรือความเข้มข้นที่ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปใช้

$$E = E^0 - \frac{0.0592}{n} \log \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (2.2)$$

2.2.6 ศักย์ไฟฟ้าของขั้วมาตรฐาน

ศักย์เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งๆประกอบด้วย ศักย์อุณหภูมิวัตต์ ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าทางทฤษฎีที่คำนวณได้ เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซลล์ กับศักย์ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจริงทางปฏิบัติ ได้แก่ ศักย์ที่รอยต่อสารละลาย ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ และศักย์จากการเกิดโพลาไรเซชัน

ศักย์อุณหภูมิวัตต์ (E_{cell}) เป็นผลจากแต่ละขั้วไฟฟ้าในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการเนินสต์ ซึ่งตามสมการ 2.3

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (2.3)$$

เมื่อ E_{cathode} และ E_{anode} คือศักย์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดและขั้วแอโนดของวงจรไฟฟ้า ดังนั้นค่า E_{cell} ที่คำนวณได้เป็นการหาผลต่างของศักย์ไฟฟ้าจากขั้วแคโทดและขั้วแอโนดซึ่งได้จากการคำนวณของสมการเนินสต์ ทั้งนี้ค่าศักย์อุณหภูมิวัตต์เป็นการหาค่าจะการคำนวณจึงไม่ใช่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่แท้จริงแต่สามารถทำนายความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์ไฟฟ้า

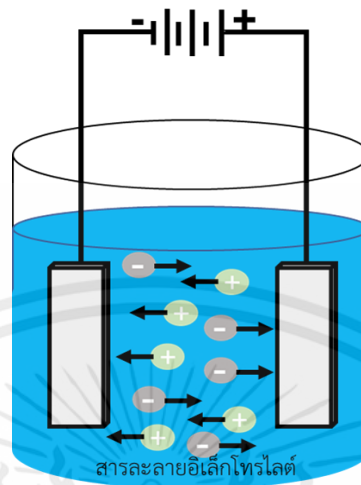
2.2.7 บทบาทเซลล์เคมีไฟฟ้าในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์หาปริมาณสารโดยการใส่เซลล์เคมีไฟฟ้าเป็นการอาศัยการป้อนพลังงานแล้ววัดค่ากระแสที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมี เกิดการให้และรับอิเล็กตรอนในสารละลายบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า โดยไอออนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีการเคลื่อนย้ายหรือถูกนำพามาถึงพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ก่อนจะเข้าสู่การส่งผ่านประจุหรืออิเล็กตรอนข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

การนำพาไอออนในสารละลาย (mass transfer) การนำพาไอออนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามีกลไกการนำพา 3 วิธี คือ ไมเกรชัน (migration) การแพร่ (diffusion) และการพา (convection) กลไกการนำพาไอออนเหล่านี้เกิดขึ้นได้ทั้งในกรณีของขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

ไมเกรชัน (migration) เป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดนอาศัยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลาย โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ และไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก แสดงดังรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเข้าหาขั้วไฟฟ้า หรือไอออนเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย นอกจากนี้ ถ้าไอออนอื่นที่มีประจุชนิดเดียวกันกับไอออนที่ต้องการอยู่ในสารละลาย จะเกิดการแย่งกันเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ส่งผลให้การไหลของกระแสในวงจรของไอออนที่ต้องการตรวจวัดมีค่าลดลง ด้วยกลไกนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์

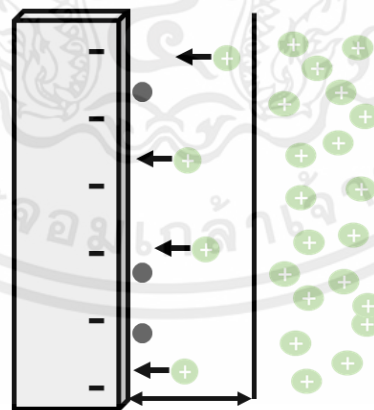
สารตัวอย่างจากการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชันของไอออนที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ได้ และสามารถควบคุมกลไกการเคลื่อนที่ได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน

การแพร่ (diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นที่ต่ำกว่าจะเกิดการแพร่จนความเข้มข้นทั้งสองบริเวณเท่ากัน อัตราความเร็วในการแพร่ขึ้นอยู่กับความต่างความเข้มข้น แสดงดังรูปที่ 2.5

ขั้วไฟฟ้า ชั้นการแพร่ สารละลาย

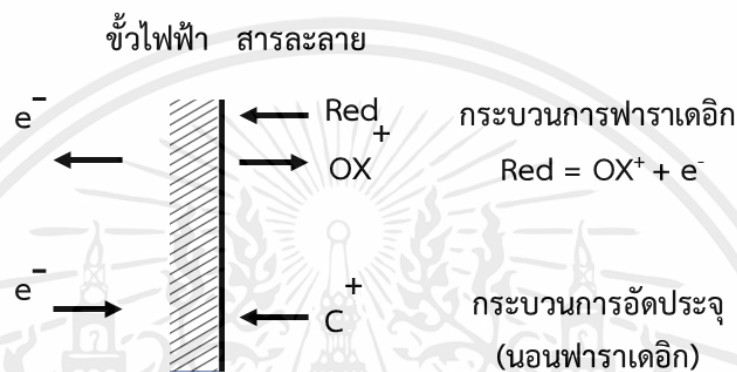


รูปที่ 2.5 การแพร่ของไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้า [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพา (convection) ไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลาย หรือจากกลไกภายนอกเช่น จากการคนหรือเขย่าสารละลาย ซึ่งเป็นการช่วยเร่งการเคลื่อนที่ไอออนในสารละลาย

กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เมื่อไอออนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีการเคลื่อนย้ายหรือถูกนำพามายังพื้นผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยกลไกต่าง ๆ เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการนำพาอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย [7]

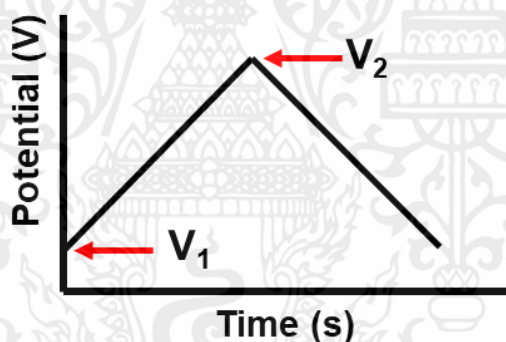
ไอออนหรือประจุของสารละลายอิเล็กโทรไลต์บริเวณผิวขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลาย และเกิดปฏิกิริยาของการรับและให้อิเล็กตรอน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นไปตามกฎฟาราเดย์ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก ซึ่งกระบวนการฟาราเดอิก ส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้า เรียกว่า กระแสฟาราเดอิก ในกรณีการนำพาไอออนหรือประจุของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ผิวหน้าขั้ว ไม่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ แต่เกิดการดูดซับบริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายและผิวหน้าขั้วไฟฟ้า โดยประจุที่ดูดซับเกิดการจัดเรียงตัวบริเวณรอยต่อนั้น ในขณะที่เกิดการดูดซับและ เกิดการจัดเรียงตัวส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าหรือ ศักย์ไฟฟ้าขึ้น เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นว่า กระบวนการนอน-ฟาราเดอิก และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระแสไฟฟ้านอน-ฟาราเดอิก ซึ่งกระบวนการเกิดฟาราเดอิก ไม่ขึ้นอยู่กับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า แต่ขึ้นอยู่กับสภาวะการวิเคราะห์ เช่นเคมี อุณหภูมิ หรือพลังงานจลน์ที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์บริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.2.8 โวลแทมเมตรี

หลักการการทำงานจะใช้เทคนิคโวลแทมเมตรี (voltammetry) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับ ศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกที่กำกับขั้วไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า

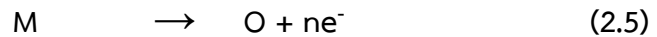
ที่เห็นทำให้ขั้วไฟฟ้าทำงานมีค่าศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอน (electron transfer reaction) ของสารละลายตัวอย่างบนผิวของขั้วไฟฟ้าทำงาน เป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทำงาน จากการรับและให้อิเล็กตรอน กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะถูกตรวจวัดโดยวงจรวัดอิเล็กตรอนิกส์ภายนอกซึ่งขนาดของกระแสมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการตรวจวัดด้วย ไชคลิกโวลแทมเมตรี เป็นกระบวนการวัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (quantitative analysis) ทางด้านสาขาเคมีและสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังนำมาศึกษาในด้านที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรีดอกซ์ (redox process) ซึ่งรูปแบบของศักย์ไฟฟ้าของเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีจะเป็นไซเคิลแบบสามเหลี่ยม โดยจะป้อนศักย์ไฟฟ้าไปที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งควบคุมให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเส้นตรงจากความต่างศักย์ไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกความต่างศักย์ไฟฟ้าหนึ่ง เช่น จาก V_1 ไปยัง V_2 เราเรียกค่าความต่างศักย์ทั้งสองนี้ว่า สวิตซิงโพเทนเชียล ความสัมพันธ์ของความต่างศักย์กับเวลาในการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า ณ เวลาต่าง ๆ

เมื่อเริ่มวิเคราะห์ความต่างศักย์จะอยู่ที่ค่า V_1 แล้วค่อยๆ เปลี่ยนไปในทางลบมากขึ้นไปสู่ค่า V_2 การเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้เป็นการป้อนอิเล็กตรอนให้กับสารที่ต้องการวิเคราะห์บริเวณขั้วไฟฟ้าทำงาน เพราะฉะนั้นถ้าสารที่ทำการวิเคราะห์สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันดังสมการที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นและเราเรียกกระแสนี้ว่ากระแสแคโทดิก (cathodic current) เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้เปลี่ยนจนถึงค่าสวิตซิงโพเทนเชียลที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นโพเทนเชียลจะเปลี่ยนทิศทางของความต่างศักย์ในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือจะเปลี่ยนในทางบวกมากขึ้น จากตำแหน่ง V_2 กลับไปสู่ V_1 และถ้าสารที่ทำการวิเคราะห์สามารถเกิดปฏิกิริยาในช่วงที่สองนี้จะปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการที่ 2.5 และการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนี้

จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นเช่นกัน และเราเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ว่า กระแสแอโนดิก (anodic current) [9-13]

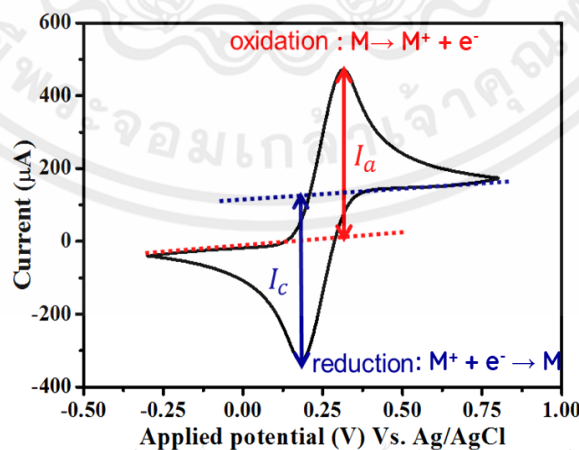


โดยที่ O คือสารประกอบในสถานะถูกออกซิไดซ์

M คือสารประกอบในสถานะถูกรีดิวซ์

n คือจำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา

โดยทั่วไปการวิเคราะห์ผลจะสามารถแสดงผลเป็นไซคลิกโวลแทมเมตรีและแอมแปโรเมตรี ไซคลิกโวลแทมเมตรีวัดได้จากกระแสไฟฟ้าชั่วทำงานในระหว่างการสแกนศักย์ไฟฟ้า เมื่อนำมาพลอต กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) กับศักย์ไฟฟ้า (แกนนอน) หรือที่เรียกว่ากราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรม (cyclic voltammogram) ดังรูปที่ 2.8 เมื่อพิจารณาพิกัดบนจากจุดยอดของพีกลากเส้นมา ตัดแกนศักย์ไฟฟ้าจะได้ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าของพีกทางด้านพีกแอโนดิก (anodic peak potential) หรือ E_{pa} ซึ่งมีค่าเป็นบวก และมีพีกกระแสแอโนดิก (anodic peak current) ซึ่งเป็นผลที่เกิดจาก ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในทำนองเดียวกันพีกด้านล่างเป็นพีกแคโทดิก (cathodic peak potential) หรือ E_{pc} และกระแสของพีกแคโทดิก (cathodic peak current) I_{pc} ซึ่งเป็นผลที่เกิดมาจากปฏิกิริยา รีดักชัน ซึ่งกระแสของพีกจะแปรผันตามความเข้มข้นของสาร และตำแหน่งศักย์ของพีกก็เป็นค่า เฉพาะของสารแต่ละตัว[13, 14]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงไปใช้บนระบบคอมพิวเตอร์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

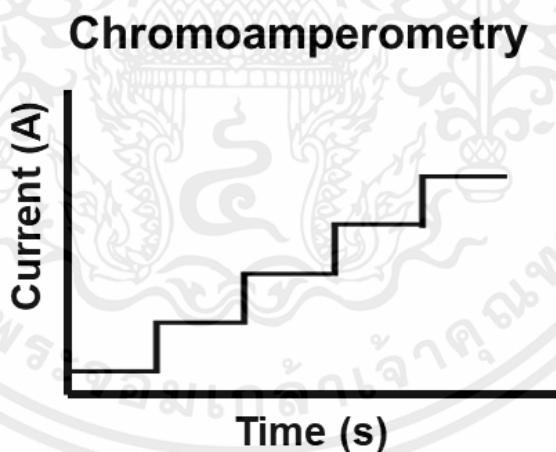
รูปที่ 2.8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม

พารามิเตอร์ที่สำคัญในไซคลิกโวลแทมโแกรม คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และกระแสสูงสุดของสัญญาณแบบแอนอดิก หรือแคโทดิก ตามแต่สารเหล่านั้นจะแสดงออกมา หากสารนั้นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือมีการให้อิเล็กตรอน ตำแหน่งของสัญญาณกระแสที่ได้จะเป็นกระแสแคโทดิก ในทางกลับกันหากสารนั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชัน คือมีการรับอิเล็กตรอน ตำแหน่งของสัญญาณกระแสที่ได้จะเป็นกระแสแอนอดิก และหากปฏิกิริยาที่สารออกซิเดชันรับอิเล็กตรอน หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชัน มีอัตราเร็วเท่ากับสารรีดิวซ์ให้อิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกปฏิกิริยาแบบนี้ว่า เป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าแบบย้อนกลับได้ (Electrochemically reversible) และระยะห่างระหว่างพีค (Peak separation) จะมีค่าเท่ากับ E_p [14] ดังสมการที่ 2.6

$$\Delta E_p = [E_{pa} - E_{pc}] = 2.303 \frac{RT}{nF} \quad (2.6)$$

2.2.9 แอมแปโรเมตรี

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่แก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้านั้น ต้องมีค่าที่เพียงพอ ที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้านั้น [15] แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แอมแปโรเมตรี

เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานกับสารละลาย ซึ่งขั้วไฟฟ้าทำงานโดยทั่วไปมีข้อจำกัดในการตรวจวัดคือ ความจำเพาะเจาะจงค่อนข้างต่ำ ทำให้มีงานวิจัยจำนวนมากที่การพัฒนาความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัด โดยการดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้า เช่น วิธีตรึงเอนไซม์ [16, 17] และพอลิเมอร์ลอกแบบ [18, 19] เป็นต้น กระบวนการตรึงเอนไซม์ เป็น

การใช้อนุพันธ์ของโปรตีน ซึ่งมีความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจจับ ความตอบสนองสูง แต่ทั้งนี้ เนื่องจากการเตรียมการสังเคราะห์เอนไซม์มีต้นทุนสูง เนื่องจากเป็นสารเชิงชีววิทยา ทำให้ไม่มีความเสถียรต่อสารเคมีและความร้อน การจัดเก็บยุ่งยาก เป็นผลให้มีการพัฒนาโดยการใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล เป็นกระบวนการสร้างโครงสร้างแม่แบบลงบนพอลิเมอร์ทำให้มีความจำเพาะเจาะจงสูง มีความเสถียรภาพต่อสารเคมี ความร้อนและสภาพแวดล้อม ทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บ นอกจากนี้การเตรียมใช้ต้นทุนต่ำ เป็นผลให้มีการพัฒนาตัดแปลงพันธุวิศวกรรมเพื่อตรวจวัดที่มีความจำเพาะเจาะจง ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งการตรวจวัดโปรตีน ยาฆ่าแมลง ยากำจัดศัตรูพืช และทางด้านเภสัชภัณฑ์

2.2.10 อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า

เป็นเทคนิคเชิงเคมีไฟฟ้า เทคนิคนี้ถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะของระบบเซลล์เคมีไฟฟ้าหรือขั้วไฟฟ้า และศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ หลักการในการทำงานของเทคนิคอิมพีแดนซ์เป็นการควบคุมการป้อนศักย์ไฟฟ้าในระบบ แล้วทำการศึกษากระแสไฟฟ้าในรูปฟังก์ชันไซน์ (sine wave) ซึ่งมีค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้าในระดับมิลลิโวลต์หรือในระดับต่ำ และปรับเปลี่ยนความถี่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-5} เฮิร์ต ทั้งนี้เนื่องจากการป้อนศักย์ไฟฟ้า ทำให้เกิดการรบกวนไอออนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำให้มีการสั่น เป็นผลให้สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าในรูปฟังก์ชันไซน์ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นผลเนื่องมาจากอุปกรณ์หรือลักษณะทางกายภาพของขั้วไฟฟ้า ทำให้เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของชั้นพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าที่ถูกตัดแปลง

อิมพีแดนซ์ คือความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถแสดงค่าอิมพีแดนซ์ได้โดยอาศัยกฎของโอห์ม (Ohm law) แสดงดังสมการที่ 2.7

$$E = IZ \quad (2.7)$$

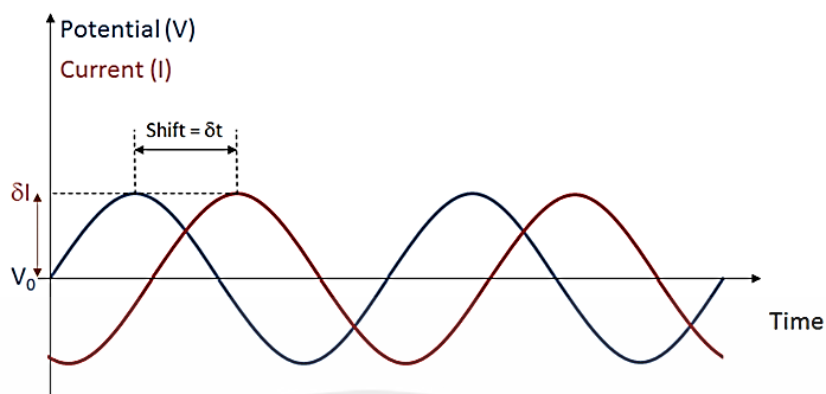
เมื่อ E คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า

I คือ กระแสไฟฟ้า

Z คือ อิมพีแดนซ์ หรือความต้านทานในรูปกระแสสลับ

ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับค่าของความต้านทานไฟฟ้า (resistance, R) เมื่อค่าต่างเฟส (phase shift) ของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งในไฟฟ้ากระแสสลับจะมีค่าต่างเฟสของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้างดรูปที่ 2.10 ดังนั้นการหาขนาดอิมพีแดนซ์จึงสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ความต่างเฟสของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

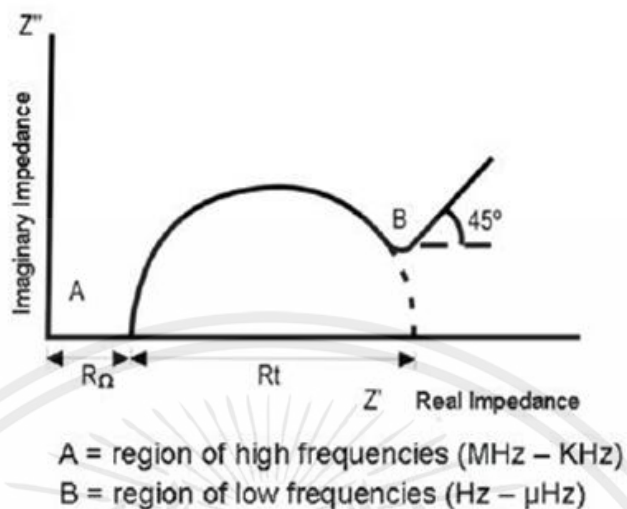
ที่มา : www.comsol.com/blogs/electrochemical-impedance-spectroscopy-experiment-model-and-app/

$$Z = \frac{E_r}{I_t} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \theta)} \quad (2.8)$$

โดยที่ ω คือ ความถี่เชิงมุมต่อวินาที มีค่าเท่ากับ $2\pi f$ เมื่อ f คือความถี่หน่วยเป็นเฮิรต
 θ คือ ความต่างเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

ขนาดอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ส่วนจริงและอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ โดยอิมพีแดนซ์ส่วนจริงคือค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งอยู่ในเฟสเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามเมื่ออิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าซึ่งอยู่เฟสต่างกัน เมื่อนำอิมพีแดนซ์ทั้งสองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ส่วนจริงและอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ โดยให้ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริงอยู่แกน x ขณะที่อิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพอยู่แกน y ซึ่งกราฟที่ได้จะเรียกว่า ไนควิสต์ (Nyquist plots) ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ของไนควิสต์ที่ได้จะถูกนำมาแปลงข้อมูลเพื่อวิเคราะห์การออกแบบวงจรของขั้วไฟฟ้า รวมถึงศึกษาความต้านทานไฟฟ้าและกระบวนการที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



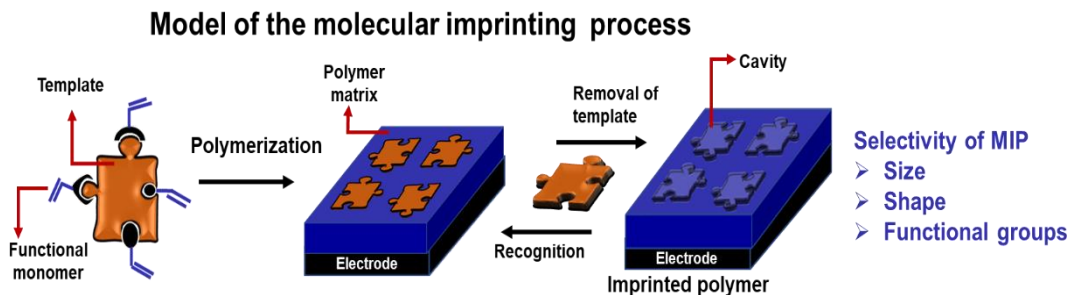
รูปที่ 2.11 กราฟไนควิสต์ (nyquist plots) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ส่วนจริงและอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ

ที่มา : D.V. Ribeiro et al. “use of electrochemical impedance spectroscopy (eis) to monitoring the corrosion of reinforced concrete” ibracon structures and materials journal 2015 vol. 8

2.3 พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (Molecularly imprinted polymer; MIP)

พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ถูกใช้สำหรับการเลือกจับโมเลกุลอย่างจำเพาะเจาะจง ด้วยการลอกแบบพอลิเมอร์ หลักการการจับโมเลกุลของสาร คือ จะเลือกจับเฉพาะสารที่มีขนาด รูปร่าง และหมู่ฟังก์ชันโมเลกุลเหมือนหรือจำเพาะกับรอยพิมพ์ที่อยู่บนผิวของพอลิเมอร์ [18] กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบประกอบด้วย สารแม่แบบ (template) มอนอเมอร์ (monomer) สารเชื่อมขวาง (cross-linking) และตัวริเริ่ม (initiator) ซึ่งเตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันโดยผสมสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือแม่แบบกับมอนอเมอร์เพื่อใช้เป็นรอยพิมพ์แม่แบบ หลังจากนั้นทำการเชื่อมขวาง และเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยตัวริเริ่มปฏิกิริยา เกิดเป็นเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งแรงที่ใช้จับระหว่างสารแม่แบบกับมอนอเมอร์จะเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจนและ อันตรกิริยาไพ-ไพ (π - π interaction) หลังจากนั้นทำการชะตัวแม่แบบออก ทำให้เกิดช่องว่างของแม่แบบที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อแม่แบบ ด้วยขนาด รูปร่าง และหมู่ฟังก์ชันโมเลกุลแม่แบบ [19] ดังแบบจำลองในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบ

พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลเป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง มีความทนต่อสภาพแวดล้อมเสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน ต้นทุนต่ำ นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการนำมาตรวจจับโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โมเลกุลโปรตีน ยาฆ่าแมลง ยากำจัดศัตรูพืช ซึ่งถูกพัฒนาเป็นตัวตรวจจับในหลายๆเทคนิค [21] ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สารตัวอย่างการตรวจจับอย่างจำเพาะเจาะจงโดยใช้เทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบ[21]

ประเภท	ตัวอย่างการตรวจจับ	
โมเลกุล อแกนิก	สารกำจัด ศัตรูพืช	Atrazine, 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, benzimidazole fungicides
	สารรบกวนการ ทำงานของต่อม ไร้ท่อ	bisphenol A, estradiol, oestrone, polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)
	ระเบิด	2,4,6,-trinitrotoluene (TNT)
	ยา	Tetracycline, quinolones, propranolol, digoxin, sulfonamides
	อะมิโนและ เปปไทด์	Tyrosine, alanine, tripeptides, helical peptides, cinchona alkaloids, N-terminal histidine sequence of dipeptides
	น้ำตาล	D-fructose, D-glucose, D-galactose

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เอกสารนี้สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) สารตัวอย่างการตรวจจับอย่างจำเพาะเจาะจงโดยใช้เทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบ [21]

ประเภท	ตัวอย่างการตรวจจับ
สารชีวโมเลกุล	Lysozyme, adenosine, 3,5-cyclic monophosphate (cAMP), bovine serum albumin (BSA)
เซลล์และไวรัส	Tobacco mosaic virus, bovine leukemia virus, dengue virus, gut-homing T

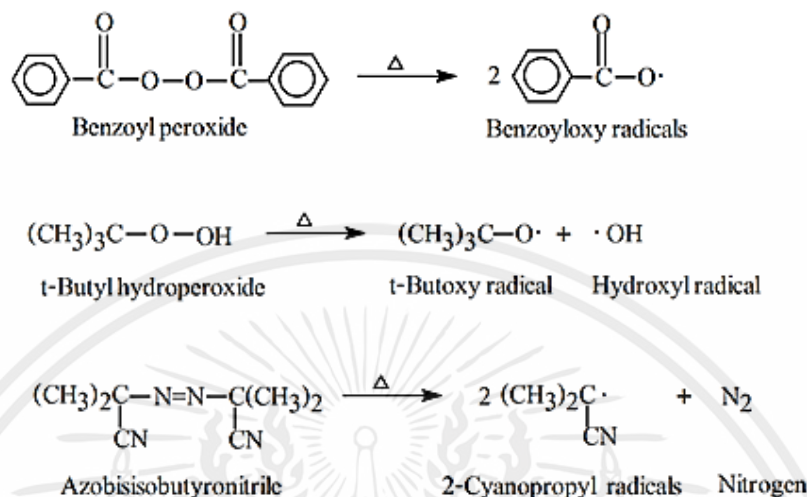
2.3.1 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบ

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (chain addition polymerization) และปฏิกิริยาแบบควบแน่นหรือแบบขั้น (condensation หรือ step growth polymerization) โดยที่ปฏิกิริยาแต่ละประเภทจะเกี่ยวข้องกับสารตั้งต้นมอนอเมอร์ที่มีโครงสร้างต่างกันอย่างชัดเจน โดยปฏิกิริยาแบบลูกโซ่มักจะเกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน เช่น เอทิลีน โพรพิลีน ไวนิลคลอไรด์ และสไตรีน ในขณะที่ปฏิกิริยาแบบควบแน่นจะเกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป เช่น เอทิลีนไกลคอล เฮกซะเมทิลีนไดเอมีน และกรดเทเรพธาลิก เป็นต้น

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบเป็นการเตรียมด้วยกระบวนการเตรียมแบบพอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ (free radical chain polymerization) ซึ่งอนุมูลอิสระ หมายถึง อะตอมโมเลกุล หรือไอออน ที่มีอิเล็กตรอนไม่เป็นคู่ (unpair electron) อยู่ในวงอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence orbital) พอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่ที่เริ่มต้นด้วยหมู่ฟังก์ชันว่องไวต่อปฏิกิริยาที่เป็นอนุมูลอิสระ เรียกว่า พอลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ ลักษณะเด่นของปฏิกิริยาแบบลูกโซ่คือการที่ปฏิกิริยาขั้นแผ่ขยายสามารถเกิดได้รวดเร็วมาก เตรียมได้ง่าย ซึ่งขั้นตอนการเตรียมถูกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ ขั้นริเริ่ม (initiation) ขั้นแผ่ขยาย (propagation) และขั้นยุติ (termination) ตามลำดับ

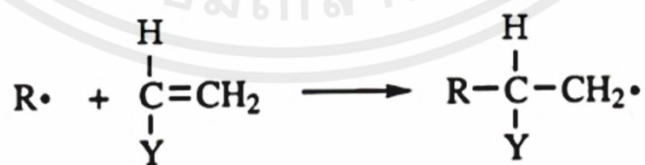
1. ขั้นริเริ่ม ประกอบด้วย การเกิดอนุมูลอิสระและปฏิกิริยาอนุมูลอิสระกับมอนอเมอร์กลายเป็นหมู่ริเริ่มต้น (chain initiating species) ซึ่งการเกิดอนุมูลอิสระเกิดจากการแยกสลายของพันธะเดี่ยวระหว่างอะตอมในสารประกอบ เรียกว่า โฮโมลิซิส (homolysis) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการให้ความร้อนตัวริเริ่มปฏิกิริยา ที่เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน (thermolysis) ตัวของของตัวริเริ่มปฏิกิริยา เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) เทอเชียรีบิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (t-butyl hydroperoxide) และเอโซบิสไอโซบิวทิลโรไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile) อุณหภูมิการแยกสลาย

ให้อนุมูลอิสระของตัวริเริ่มปฏิกิริยาดังกล่าวอยู่ในช่วง 50 – 100 องศาเซลเซียสทำให้เกิดอนุมูลอิสระแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สมการการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ
(ที่มา: <https://pslc.ws/macro/radical.htm>)

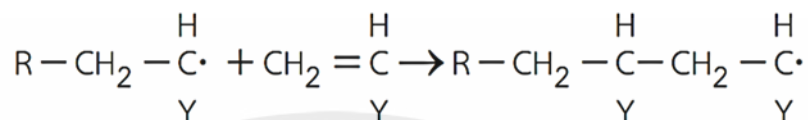
อนุมูลอิสระที่เกิดจากตัวริเริ่มปฏิกิริยา เข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของมอนอเมอร์โดยเปิดพันธะคู่ของมอนอเมอร์ออก ได้เป็นหมู่เริ่มต้นซึ่งมีมอนอเมอร์อนุมูลอิสระว่องไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งอนุมูลอิสระสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ประเภทไวโนลมอนอเมอร์ได้ดังรูปที่ 2.14 เช่น เมธิลเมทาคริเลต สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในแบบอนุมูลอิสระ เนื่องจากหมู่เอสเทอร์ที่เป็นหมู่แทนที่ในโมเลกุลมอนอเมอร์ เมธิลเมทาคริเลตจะมีลักษณะเป็นหมู่ที่ดึงอิเล็กตรอน (electron withdrawing group) ซึ่งจะช่วยให้สารว่องไวปฏิกิริยาที่เป็นอนุมูลอิสระ



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาของมอนอเมอร์เป็นอนุมูลอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ที่มา: <https://pslc.ws/macro/radical.htm>) ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ขั้นแผ่ขยาย สายโซ่พอลิเมอร์จะขยายด้วยมอนอเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระเป็นหมู่เริ่มต้นสายโซ่ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ต่อไปเรื่อย ๆ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งจะเกิดโซ่อนุมูลอิสระ (chain radicals) ใหม่ขึ้นดังรูปที่ 2.15 โซ่อนุมูลอิสระใหม่นี้มีสมบัติเหมือนกับโซ่อนุมูลอิสระเดิมทุก และการยกเว้นแต่จำนวนมอนอเมอร์ในโซ่เพิ่มมากขึ้นครั้งละ 1 โมเลกุล



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาขั้นแผ่ขยาย

3. ขั้นยุติ พอลิเมอร์สิ้นสุดปฏิกิริยาการแผ่ขยายจากอนุมูลอิสระจะสิ้นสุดโดยปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่อนุมูลอิสระ 2 โมเลกุล (bimolecular reaction) โดยอาจเกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัวกัน (combination) ของโซ่อนุมูลอิสระ 2 โมเลกุล ได้เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ 1 โมเลกุล ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาขั้นยุติ (termination)

เนื่องจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบมีสารประกอบหลักประกอบด้วย สารแม่แบบมอนอเมอร์ สารเชื่อมขวาง และตัวริเริ่ม [19,21]

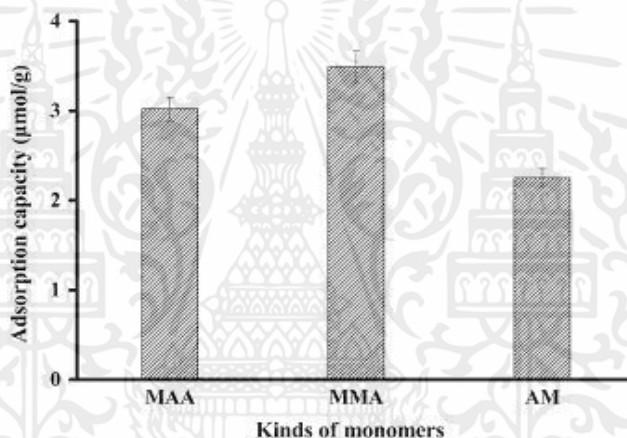
1. แม่แบบ หรือสารที่ต้องการตรวจจับ โดยการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบหมู่ฟังก์ชันของแม่แบบจะจับกับหมู่ฟังก์ชันของมอนอเมอร์เพื่อนำมาซึ่งความจำเพาะเจาะจงของหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างพอลิเมอร์ลอกแบบ ดังนั้นตัวแม่แบบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กต้องมีความเสถียรต่อสารเคมีและความร้อนขณะทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สารแม่แบบต้องไม่ละลายในตัวทำละลายที่ทำให้พอลิเมอร์ ปัจจุบันการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานด้านเซนเซอร์ในการตรวจจับอย่างจำเพาะเจาะจง ทั้งการจับโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สายโซ่โปรตีนดังแสดงในตารางที่

2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2. มอนอเมอร์ จากข้างต้นเนื่องจากการการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบเป็นการเตรียมด้วยกระบวนการเตรียมแบบพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ (free radical chain polymerization) ดังนั้นมอนอเมอร์ที่ใช้จึงเป็นมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน โดย

มอนอเมอร์จะจับกับแม่แบบประกอบขึ้นมาจากอันตรกิริยาแบบอ่อนด้วยพันธะไฮโดเจน แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) และอันตรกิริยาไพ-ไพ (π - π stacking interactions) โดยส่วนใหญ่มักใช้มอนอเมอร์ เมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate ; MMA) และเมทาคริลิกแอซิด (methacrylic acid ; MAA) ด้วยสมบัติมอนอเมอร์สภาวะเป็นกลางและเป็นกรดตามลำดับ ซึ่งมอนอเมอร์เหล่านี้ถูกใช้เป็นพื้นฐานในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบ ทั้งนี้การเลือกมอนอเมอร์ความเหมาะสมต่อแม่แบบ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ในปี ค.ศ.2014 Jiao-Jiao Duc และคณะ ได้มีการเปรียบเทียบการใช้มอนอเมอร์ในการทำพอลิเมอร์ลอกแบบ สำหรับตรวจวัดไดเมทไทโอเอต (Dimethoate) ในแตงกวาดังรูปที่ 2.17 พบว่าเมทิลเมทาคริเลตเป็นมอนอเมอร์ที่สามารถดักจับสารได้ในปริมาณที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเมทาคริลิกแอซิดและอะคริลาไมด์ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเลือกจับพันธะของมอนอเมอร์และแม่แบบที่ดีกว่า [22]



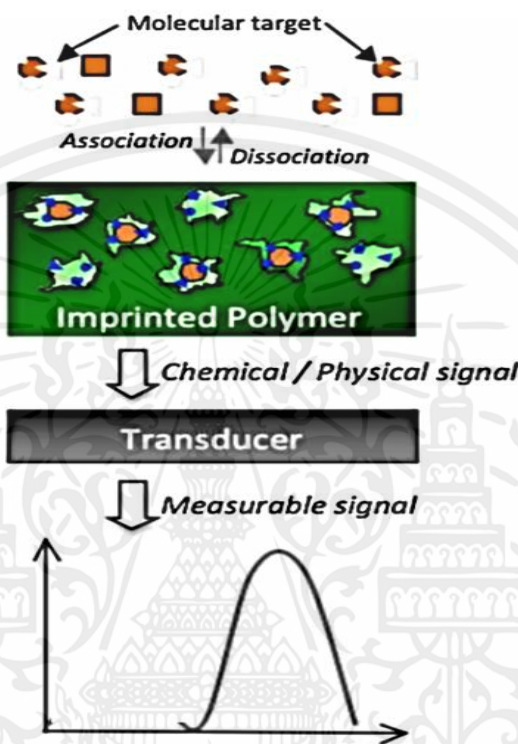
รูปที่ 2.17 การเปรียบเทียบการใช้มอนอเมอร์ในสร้างพอลิเมอร์ลอกแบบที่มีความจำเพาะเจาะจงในการจับไดเมทไทโอเอตในแตงกวา [22]

3. สารเชื่อมขวาง การนำมาซึ่งการสังเคราะห์พอลิเมอร์มีโครงสร้างร่างแหโดยการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล โดยทั่วไปมักใช้ เอทิลีนไกลคอล ไดเมทาคริเลต, ไดไวนิลเบนซีน และไตรเมทิลลอลโพรเพนไตรเมทาคริเลต เป็นต้น ทั้งนี้ควรเลือกให้เหมาะสมกับมอนอเมอร์ และสารเชื่อมขวางควรมีความแข็งแรง ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างพอลิเมอร์มีความแข็งแรงและทนต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งเอทิลีนไกลคอล ไดเมทาคริเลต เป็นสารเชื่อมขวางที่ใช้กันทั่วไปเนื่องจากเป็นการรวมคุณสมบัติทั้งความยืดหยุ่นของโครงสร้างสายโซ่และความแข็งแรงและสามารถใช้ร่วมกับใช้มอนอเมอร์ เมทิลเมทาคริเลต และเมทาคริลิกแอซิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คำปรึกษาฟรี และต้องอ้างอิงถึงงานวิจัยของเราทุกครั้งการนำไปใช้

4. ตัวริเริ่ม เพื่อนำมาซึ่งการเกิดพอลิเมอร์เซชันแบบลูกโซ่อนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์มักใช้ เอโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile) เป็นสารตั้งต้น

ด้วยสมบัติความจำเพาะเจาะจงและมีความเสถียรต่อสารเคมี ความร้อน และสภาพแวดล้อม นำมาซึ่งการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายรวมทั้งการเป็นเซนเซอร์ สามารถจำลองส่วนประกอบโดยมีพอลิเมอร์ลอกแบบเป็นตัวกระตุ้นหรือตรวจจับให้กับอุปกรณ์เซนเซอร์เป็นตัวแปลงพลังงานใด ๆ เป็นสัญญาณทางเคมีไฟฟ้า [23] แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กระบวนการแสดงผลของตรวจจับอย่างจำเพาะเจาะจงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ (ที่มา: Y. Fuchs et al., Analytica Chimica Acta, 717 (2012) 7-20)

การใช้เทคนิคพอลิเมอร์ลอกแบบในการตรวจวัดด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าโดยทำการดัดแปลงพื้นผิวขั้วเคมีไฟฟ้าเพื่อให้มีการตรวจวัดอย่างจำเพาะเจาะจง ด้วยขนาด รูปร่างและหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ลอกแบบ [24] ดังตารางที่ 2.6

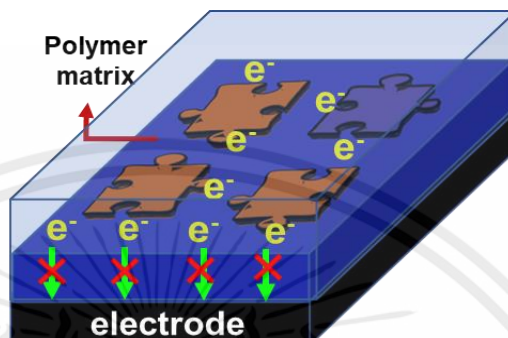
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์ของเซนเซอร์ด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ [24]

ตัวอย่าง	เทคนิคการตรวจวัด	ช่วงการตรวจวัด	ปริมาณต่ำสุดในการตรวจวัด
Prostate specific antigen	Electrochemistry (capacitance)	0.1–10,000 pg/mL	0.08 pg/mL
	Electrochemistry (EIS)	100 pg/mL–100 ng/mL	1 pg/mL
	Potentiometry	2.0–89.0 ng/mL	<2.0 ng/mL
	Electrochemistry (SWSV)	–	0.25 fg/mL
	Electrochemistry (DPSV)	–	3.04 fg/mL
Prostate specific antigen	Electrochemistry (SWSV)	0.10–700 pg/mL	24.6 fg/mL
	Optic (SPR)	0.1–50 ng/mL	91 pg/mL
	Electrochemistry (DPV)	0.8–10,000 ng/mL	0.096 ng/mL
Alpha-fetoprotein	Optic (fluorescence)	3.96–80.0 ng/mL	0.42 ng/mL
	Electrochemistry (CV, EIS, SWV)	0.05–1.25 pg/mL	–
Carcinoembryonic antigen	Electrochemistry (EIS, DPV)	0.5–400 U/mL	0.5 U/mL
Cancer antigen 125	Electrochemistry (CV)	128–588 ng/mL	–
Nuclear matrix protein 22	Electrochemistry (DPSV)	9.99 pg/mL–7919 ng/mL	3.09 pg/mL
Calcitonin	Photoelectrochemistry	0.3–280 mM	0.01 mM
Bilirubin	Piezoelectric (QCM)	10–500 mg/mL	45 mg/mL
	Potentiometry	0.15–2.5 mM	22 mM
Neopterin	Piezoelectric (acoustic wave)	–	<1 ppm
Modified nucleosides	Electrochemistry (CV, EIS)	0.1–100 pg/mL	–

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เนื่องจากการดัดแปลงขั้วด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบมีข้อจำกัด เพราะโครงสร้างที่ใช้สำหรับทำพอลิเมอร์ลอกแบบมีความนำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ทำให้การไหลของอิเล็กตรอนถูกขัดขวางดังรูปที่ 2.19
 เป็นผลให้การตรวจวัดด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบมีการตอบสนองค่อนข้าง

ต่ำ ไม่สามารถตรวจวัดในปริมาณต่ำ ๆ ได้ เพื่อให้การตรวจวัดด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้ามีความจำเพาะเจาะจงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ และมีการตอบสนองสูง ทำให้มีการพัฒนาโดยการเพิ่มวัสดุนาโนเพื่อปรับปรุงการไหลของอิเล็กตรอน (electron transfer efficiency) เป็นการขยายสัญญาณ และเพิ่มการตอบสนองในการตรวจวัด



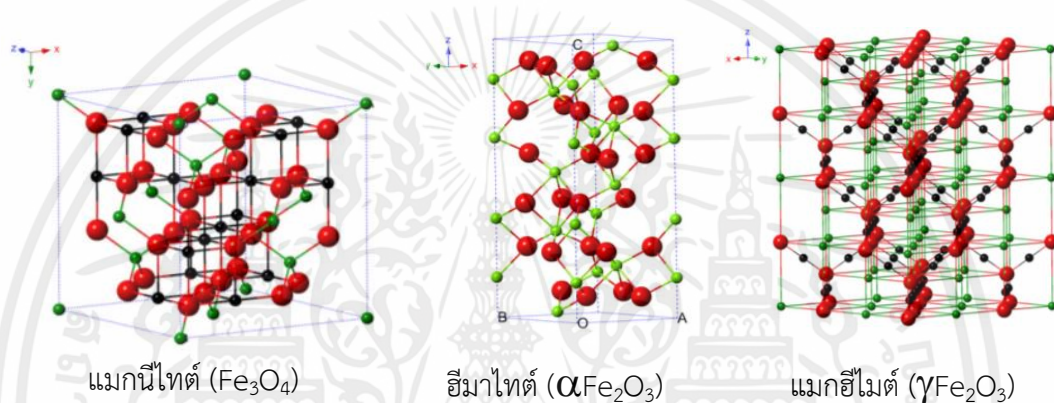
รูปที่ 2.19 แบบจำลองการไหลของอิเล็กตรอนที่ถูกขัดขวางโดยพอลิเมอร์ลอกแบบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการนำอนุภาควัสดุนาโนเข้ามาเพื่อช่วยในการไหลของอิเล็กตรอนเช่น ทอง เงิน และท่อคาร์บอนนาโนชนิดผนังหลายชั้น เนื่องจากเป็นวัสดุนำไฟฟ้า ช่วยเพิ่มการไหลของอิเล็กตรอน แต่ทั้งนี้วัสดุเหล่านี้มีข้อเสียคือ ต้นทุนสูง ไม่เสถียร เตรียมยากและการกระจายตัวค่อนข้างทำได้ยาก นอกจากนี้วัสดุเหล่านี้ยังมีงานวิจัยใช้คุณสมบัติ อนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดเข้ามาเพิ่มความสามารถในการตอบสนองต่อการตรวจวัดด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าให้กับพอลิเมอร์ลอกแบบ เนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดี และมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กที่ส่งผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก [25]

2.4 อนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด (Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles ; SPIONs)

ปัจจุบันอนุภาคนาโนแม่เหล็ก (Iron Oxide Nanoparticles, IONs) ถูกนำมาใช้งานมากมายหลายด้านทั้งทางด้านการแพทย์ในการขนส่งทางยา ทางด้านสิ่งแวดล้อมในการตรวจวัดหรือดูดซับมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ทางด้านเคมีใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า และอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง เป็นต้น เนื่องจากข้อดีของอนุภาคนาโนแม่เหล็กคือไม่มีความเป็นพิษกับร่างกาย สามารถเข้ากับวัสดุทางชีวภาพได้ดี และอีกทั้งยังเป็นอนุภาคที่มีความเสถียรมากเมื่อนำมาใช้งาน และเนื่องด้วยคุณสมบัติการเป็นวัสดุนาโนส่งผลเป็นผลให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุทั่วไป เช่น ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางแสง ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้า หรือความเป็นแม่เหล็กพารายิ่งยวดที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุนี้

เองเป็นผลให้อนุภาคแม่เหล็กนาโนได้รับความนิยมประยุกต์ใช้งานมากมายหลายด้วย โดยทั่วไปแล้วอนุภาคแม่เหล็กนาโนเป็นอนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 6-30 นาโนเมตร [26] โดยมีรูปร่างอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบหลักๆแบ่งตามลักษณะทางโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน คือแมกนีไทต์ (magnetite, Fe_3O_4) ฮีมาไทต์ (hematite, $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) และแมกฮีไมต์ (maghemite, $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) ขึ้นอยู่กับวิธีการสังเคราะห์ ซึ่งรูปร่างที่แตกต่างกัน [27] แสดงดังรูปที่ 2.20 ความแตกต่างกันของรูปร่างผลึกนี้ส่งผลให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติและความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กดังตารางที่ 2.8 [28]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างผลึกของแมกนีไทต์ และแมกฮีไมต์ (สีดำ = Fe^{2+} , สีเขียว = Fe^{3+} และสีแดง = O^{2-})

(ที่มา: W. WU ET AL., SCIENCE AND TECHNOLOGY OF ADVANCED MATERIALS, 16 (2015))

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของเหล็กออกไซด์ต่าง ๆ [27]

เหล็กออกไซด์	ฮีมาไทต์	แมกฮีไมต์	แมกนีไทต์
สูตรโมเลกุล	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	Fe_3O_4
ลักษณะรูปร่าง	เฮกซะโกนอล	ลูกบาศก์	ลูกบาศก์
โครงสร้าง	คอร์รันดัม (Corundum)	อินเวอร์สสปินเนล (Inverse spinel)	อินเวอร์สสปินเนล (Inverse spinel)
ค่าคงที่ผลึก	$a = 5.038 \text{ \AA}$ $c = 13.772 \text{ \AA}$	$a = 8.33 \text{ \AA}$	$a = 8.3941 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้สงวนลิขสิทธิ์ไว้ด้วย

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของเหล็กออกไซด์ต่าง ๆ [27]

เหล็กออกไซด์	ฮีมาไทต์	แมกนีไทต์	แมกนีไทต์
ค่าคงที่ผลึก	a = 5.038 Å c = 13.772 Å	a = 8.33 Å	a = 8.3941 Å
ตำแหน่ง	Fe ³⁺ oct	Fe ³⁺ oct Fe ³⁺ tet	Fe ³⁺ oct Fe ³⁺ tet Fe ²⁺ oct
อ้างอิง	R. L. Blake ET AL., American Mineralogist 51, 123 (1966).	C. Pecharroman ET AL., Physics and Chemistry of Minerals 22, 21 (1995).	M. E. Fleet. ET AL., Acta Crystallographica Section B 37, 917 (1981).

* oct=ทรงแปดหน้า, tet=ทรงสี่หน้า

เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันที่แสดงข้างต้นทำให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก และลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน เป็นผลให้ทำให้มีการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน โดยแมกนีไทต์ และฮีมาไทต์ จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประเภทเซมิคอนดักเตอร์ชนิดเอ็นไทป์เหมือนกัน แต่มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน แมกนีไทต์รูปทรงส่วนใหญ่จะมีลักษณะทรงกลม ขรุขระ ฮีมาไทต์จะมีลักษณะเป็นโครงผลึกหรือลูกบาศก์ อนุภาคแม่เหล็กนาโนทั้งสองชนิดนี้นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และแก๊สเซนเซอร์ อีกทั้งยังมีข้อดีคือราคาถูก และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง ส่วนแมกนีไทต์ อนุภาคส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลม และมีความคุณสมบัติเด่นคือมีความเป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติก หรือพาราแมกเนติก (superparamagnetic iron oxide nanoparticles, spions) ซึ่งทำงานได้ที่อุณหภูมิห้องภายใต้สภาวะมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระตุ้นได้ดีกว่าอนุภาคนาโนแม่เหล็กสองชนิดก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ อนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ยังมีคุณสมบัติเป็นทั้งเซมิคอนดักเตอร์ชนิดเอ็นไทป์และพีไอป์ จึงทำให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ได้รับความนิยมในการสังเคราะห์ และนำมาประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่นการทำเป็นเซนเซอร์ และตัวขนส่งทางยาทางการแพทย์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

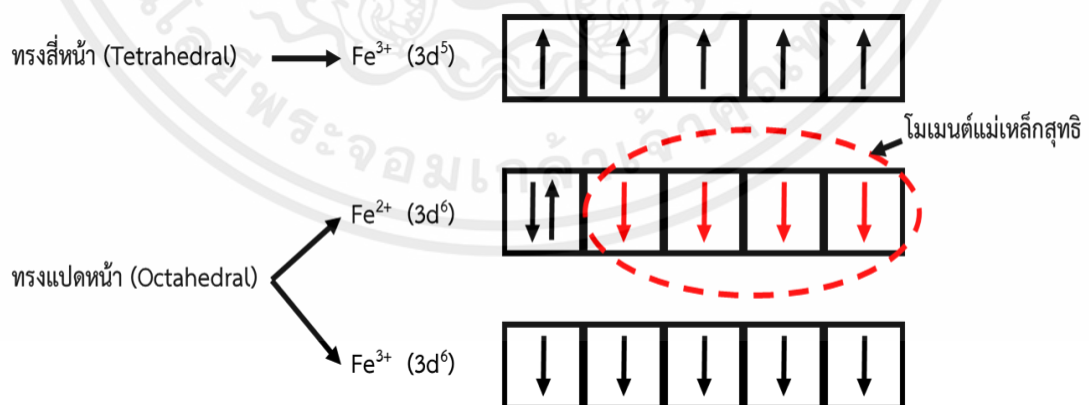
ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก แมกนีไทต์ ฮีมาไทต์ และแมกฮีไมต์ [28]

อนุภาคนาโนแม่เหล็ก	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	ลักษณะรูปร่าง	M_s (emu/g)	H_c (Oe)	M_r (emu/g)
แมกนีไทต์	4	ทรงกลม	31.8	12	0
	11.5	ทรงกลม	60.1	34	3.9
	47.7	ทรงกลม	65.4	156	16.4
	~150	ทรงกลม	75.6	323	18.9
	~200	ทรงกระบอก	60.9	340.2	18.6
	9-12	แท่ง	-	250	0.02
ฮีมาไทต์	~400	โครงสร้างผลึก	-	99.21	1.657×10^{-3}
	~230	โครงสร้างผลึก	-	77.75	³
	19	แท่ง	-	31	1.043×10^{-3}
	46	ลูกบาศก์	-	10	³
	36	ลูกบาศก์	8.6	106	1.6×10^{-3}
					6.1×10^{-4}
แมกฮีไมต์	4.6	ทรงกลมขรุขระ	55	510	-
	2.7	ทรงกลมขรุขระ	48	680	-
	~200	ทรงกระบอก	42.7	342.2	13.56

แมกนีไทต์เป็นสารประกอบออกไซด์ชนิดหนึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น Fe_3O_4 มีโครงสร้างผลึก 2 แบบคือแบบสปินเนล (spinel) และแบบอินเวอร์สสปินเนล (inverse spinel) โครงสร้างผลึกสปินเนล มีสูตรโมเลกุลทั่วไปทางเคมีแบบ AB_2O_4 ประกอบด้วย A มี 1 อะตอม ไอออนของโลหะมีค่าเวเลนซ์เท่ากับ +2 หรือเรียกว่าไอออนบวกประจุคู่ (divalent cation) เป็นอะตอมของโลหะมีการจัดเรียงตัวแบบทรงสี่หน้า (tetrahedral) และ B มี 2 อะตอม ไอออนของโลหะมีค่าเวเลนซ์เท่ากับ +3 หรือเรียกว่า ไอออนบวกประจุ 5 (trivalent cation) เป็นอะตอมของโลหะมีการจัดเรียงตัวแบบทรงแปดหน้า (octahedral) โครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบอินเวอร์สสปินเนลมีการจัดเรียงในลักษณะของอะตอม A และ B อย่างละ 1 อะตอมจัดเรียงตัวแบบทรงแปดหน้า ซึ่งจะทำให้เหลืออะตอม B อีก 1 อะตอม โดยอะตอม B ที่เหลืออยู่ 1 อะตอมจะมีการจัดเรียงตัวแบบทรงสี่หน้า ดังรูปที่ 2.20

เนื่องจากแมกนีไทต์เกิดการรวมตัวกันของเหล็กเฟอร์รัส (ferrous iron, Fe^{2+}) จำนวน 1 อะตอม และเหล็กเฟอร์ริก (ferric iron, Fe^{3+}) จำนวน 2 อะตอม ส่งผลให้มีการจัดเรียงอะตอมของเหล็กเฟอร์ริมีการจัดเรียงแบบอะตอม A ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวเฉพาะแบบทรงแปดหน้าเท่านั้น ขณะที่เหล็กเฟอร์ริกมีการจัดเรียงเป็นอะตอม B ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวแบบทรงแปดหน้า 1 อะตอมและ จัดเรียงตัวแบบทรงสี่หน้าอีก 1 อะตอม การจัดเรียงตัวของอะตอมแมกนีไทต์ในลักษณะนี้ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนทำให้แมกนีไทต์เกิดสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

จากการจัดเรียงโครงสร้างระหว่างอะตอม และลักษณะการจัดเรียงตัวของธาตุของสารประกอบ ส่งผลให้เกิดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยหลักกลศาสตร์ควอนตัม เนื่องจากภายในนิวเคลียสของอะตอมประกอบด้วยนิวคลีออน (nucleon) ได้แก่โปรตอนและนิวตรอน เคลื่อนที่ทั้งในแนววงกลมและหมุนรอบตัวเอง หรือที่เรียกว่า สปิน (spin) โดยสปินภายนอก โมเมนตัมเชิงมุม (angular momentum) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน) และสปินภายในที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน ส่งผลให้นิวเคลียสมีโมเมนต์แม่เหล็กเกิดขึ้น ทำให้สารมีสภาพความเป็นแม่เหล็ก โดยทั่วไปค่า โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) อาจจะใช้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าโบร์แมกนีตอน (Bohr magneton, μ_B) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.27×10^{-24} แอมแปร์ตารางเมตร โดยการสปินของอิเล็กตรอนจะทิศทางขึ้นและลง เป็นผลให้อิเล็กตรอนที่มีสมบัติเป็นแม่เหล็กขั้วคู่ (magnetic dipole moment) สนามแม่เหล็กรวมของนิวเคลียสจะมีค่าเท่ากับศูนย์คือไม่แสดงสมบัติแม่เหล็ก ขณะที่สารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กนั้นเกิดจากการที่อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนมีการสปินขึ้นและลงไม่เท่ากัน เกิดขึ้นได้เฉพาะในกรณีที่อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่มีคู่ (unpaired electron) ในชั้นพลังงานย่อย ส่งผลทำให้ค่าโมเมนต์เชิงมุม หรือโมเมนต์แม่เหล็กมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ [30-31]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.21 ทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนในโมเลกุลแมกนีไทต์ วิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมกนีไทต์เป็นวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กแบบกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) จากรูปที่ 2.21 เป็นการแสดงทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนในโมเลกุลแมกนีไทต์ โดยทิศการสปินของอิเล็กตรอนในโครงสร้างอะตอมแมกนีไทต์มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนวงนอกในชั้นระดับพลังงาน ดี-ออร์บิทัล ทั้งในโครงสร้างแบบทรงแปดหน้าและทรงสี่หน้า โดยทิศการสปินของอิเล็กตรอนมีทิศตรงข้ามกัน ทั้งนี้เนื่องจากแมกนีไทต์เกิดการรวมตัวกันของเหล็กเฟอร์รัส และเหล็กเฟอร์ริก ลักษณะการจัดเรียงสปินของอิเล็กตรอนของเหล็กเฟอร์ริกจะมีสปินของอิเล็กตรอนทั้งโครงสร้างทรงแปดหน้าและทรงสี่หน้าอย่างละครึ่ง ขณะที่ลักษณะการจัดเรียงสปินของอิเล็กตรอนเหล็กเฟอร์รัสจะมีสปินของอิเล็กตรอนเฉพาะการจัดเรียงโครงสร้างแบบทรงแปดหน้า โดยอะตอมที่มีจำนวนอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ (unpaired electron) ในชั้นพลังงานย่อย เป็นผลให้ค่าโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิไม่เท่ากับศูนย์ ทำให้แมกนีไทต์มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณที่มีทิศของการสปินของอิเล็กตรอนหรือโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมหันไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก (magnetic domain) การรวมกันของโดเมนแม่เหล็กหลายๆโดเมนจะถูกกันด้วยกำแพงโดเมน (domain wall) ซึ่งจะเป็นการกั้นระหว่างแต่ละโดเมน เนื่องจากอนุภาคแมกนีไทต์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีคุณสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) คือ มีการจัดเรียงของโดเมนแม่เหล็กอย่างเป็นระเบียบและมีทิศทางขนานกันในบริเวณเล็ก ๆ ของโดเมนแม่เหล็ก เมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกแมกนีไทต์จะแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็ก และจะคงแสดงสภาวะแม่เหล็กอยู่แม้จะเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกก็ตาม หรือที่เรียกว่าเกิดสภาวะแม่เหล็กคงค้าง (remanent magnetic) แต่เมื่อมีอนุภาคแมกนีไทต์มีขนาดเล็กมากพอก็จะทำให้กำแพงโดเมนมีค่าพลังงานไม่มั่นคงส่งผลให้ทั้งอนุภาคมีโดเมนแม่เหล็กเสมือนเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว (single magnetic domain) และเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงจนถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะทำให้โดเมนแม่เหล็กเดี่ยวมีความไม่เสถียรคือเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากกระทำโดเมนแม่เหล็กภายในของอนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มทำให้วัสดุไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กคงค้าง และเมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากกระทำโมเมนต์แม่เหล็กภายในแต่ละอนุภาคจะมีการหมุน และจัดเรียงตัวใหม่ตามทิศของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ทำให้เกิดสมบัติแม่เหล็กแบบใหม่ที่เรียกว่า พฤติกรรมแม่เหล็กพาราแมกเนติกยิ่งยวด (superparamagnetic behavior) [31]

ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกยิ่งยวดสามารถทำได้หลากหลายวิธีซึ่งให้ขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน ตารางที่ 2.9 แสดงกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติกยิ่งยวด [29, 32]

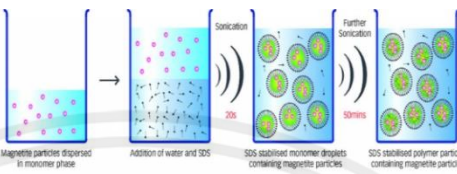
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอียวด (SPIONS) [29, 32]

วิธีการสังเคราะห์	ตัวอย่างกระบวนการสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์ที่ได้
วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)		Fe ₃ O ₄ ขนาดอนุภาค อยู่ระหว่าง 4-40 นา โนเมตร
วิธีแตกตัวด้วยความร้อน (Thermodecomposition)		Fe ₃ O ₄ ขนาดอนุภาค อยู่ระหว่าง 4-60 นา โนเมตร
การเผาไหม้ด้วยความยาว คลื่น (combustion wave)		Fe ₃ O ₄ ขนาดอนุภาค อยู่ระหว่าง 5-20 นา โนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 (ต่อ) ตัวอย่างกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ (SPIONS) [29, 32]

วิธีการสังเคราะห์	ตัวอย่างกระบวนการสังเคราะห์	ผลิตภัณฑ์ที่ได้
การสังเคราะห์แบบอีมัลชัน (Emulsion synthesis)		คอมโพสิตของ Fe_3O_4 ขนาดอนุภาคอยู่ ระหว่าง 500 นาโน เมตร
กระบวนการสังเคราะห์อื่น ๆ	การสังเคราะห์แบบใช้จุลินทรีย์ (Microbial synthesis) การสังเคราะห์แบบเคมีสีเขียว (Green synthesis) กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical synthesis) เป็นต้น	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

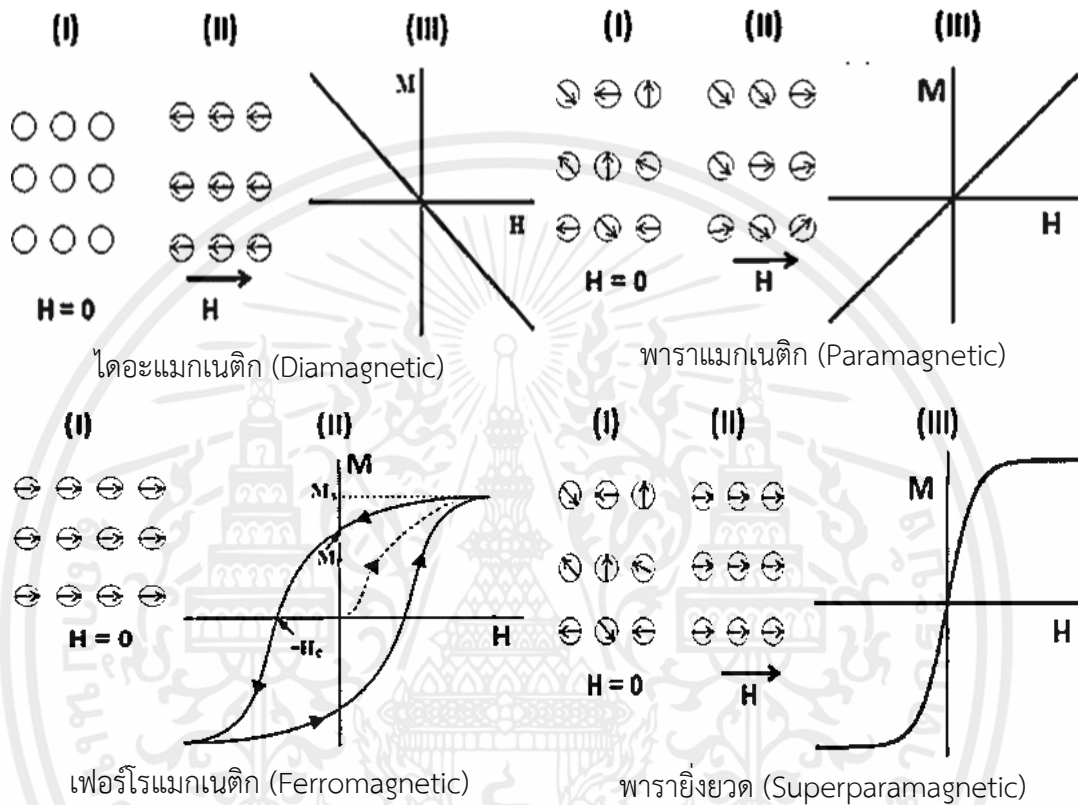
ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ (SPIONS)

วิธีสังเคราะห์	กระบวนการและตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิในการสังเคราะห์ (°C)	ช่วงระยะเวลาในการสังเคราะห์	ความกระจายตัวของขนาดอนุภาค	การควบคุมรูปร่าง	ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้
การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)	สังเคราะห์ง่ายในรูปสารละลาย	20-150	หลายนาที่	อนุภาคค่อนข้างเล็ก	ไม่ดี	มาก
การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal decomposition)	กระบวนการซับซ้อนภายใต้ความดันบรรยากาศ	100-350	หลายชั่วโมงถึงหลายวัน	อนุภาคขนาดเล็กมาก	ดีมาก	มาก
ไฮโดรเทอร์มอลและเซอร์โวเทอร์มอล (Hydro- and Solvothermal synthesis)	สังเคราะห์ง่ายภายใต้ความดันสูง	150-220	หลายชั่วโมงถึงหลายวัน	อนุภาคขนาดเล็กมาก	ดีมาก	มาก
กระบวนการโซลเจล (Sol-gel and polyol method)	กระบวนการซับซ้อนในรูปสารละลาย	25-200	หลายชั่วโมง	อนุภาคขนาดเล็ก	ดี	ปานกลาง
ไมโครอิมัลชัน (micro-emulsion)	กระบวนการซับซ้อนในรูปสารละลาย	20-80	หลายชั่วโมง	อนุภาคขนาดเล็ก	ดี	น้อย

ตารางที่ 2.10 (ต่อ) เปรียบเทียบกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ (SPIONS)

วิธีสังเคราะห์	กระบวนการและตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิในการสังเคราะห์ (°C)	ช่วงระยะเวลาในการสังเคราะห์	ความกระจายตัวของขนาดอนุภาค	การควบคุมรูปร่าง	ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้
วิธีโซโนไลซิส และโซโนเคมีคอล (Sonolysis or sonochemical method)	สังเคราะห์ง่าย ในรูปสารละลาย	20-50	หลายนาที	อนุภาคขนาดเล็ก	ไม่สามารถควบคุมรูปร่างได้	ปานกลาง
กระบวนการสังเคราะห์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave-assisted synthesis)	สังเคราะห์ง่าย ในรูปสารละลาย	100-200	หลายนาที	อนุภาคขนาดกลาง	ดี	ปานกลาง
กระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Biosynthesis)	กระบวนการซับซ้อน ในรูปสารละลาย	อุณหภูมิห้อง	หลายชั่วโมงถึงหลายวัน	อนุภาคขนาดใหญ่	ไม่สามารถควบคุมรูปร่างได้	น้อย
กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical synthesis)	กระบวนการซับซ้อนในรูปสารละลาย	อุณหภูมิห้อง	หลายชั่วโมงถึงหลายวัน	อนุภาคขนาดกลาง	ควบคุมได้ปานกลาง	ปานกลาง
วิธี แอโรซอล เวปเปอร์ (Aerosol/vapor method)	กระบวนการซับซ้อนภายใต้ความดันบรรยากาศ	>100	หลายนาทีถึงหลายชั่วโมง	อนุภาคค่อนข้างเล็ก	ควบคุมได้ปานกลาง	มาก

จากตารางที่ 2.10 เห็นได้ว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายังยวดสามารถทำได้หลายหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กพารายังยวด (superparamagnetic) นิยมวิเคราะห์จากรูปแบบของเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก (magnetic hysteresis curve) แสดงดังรูปที่ 2.22

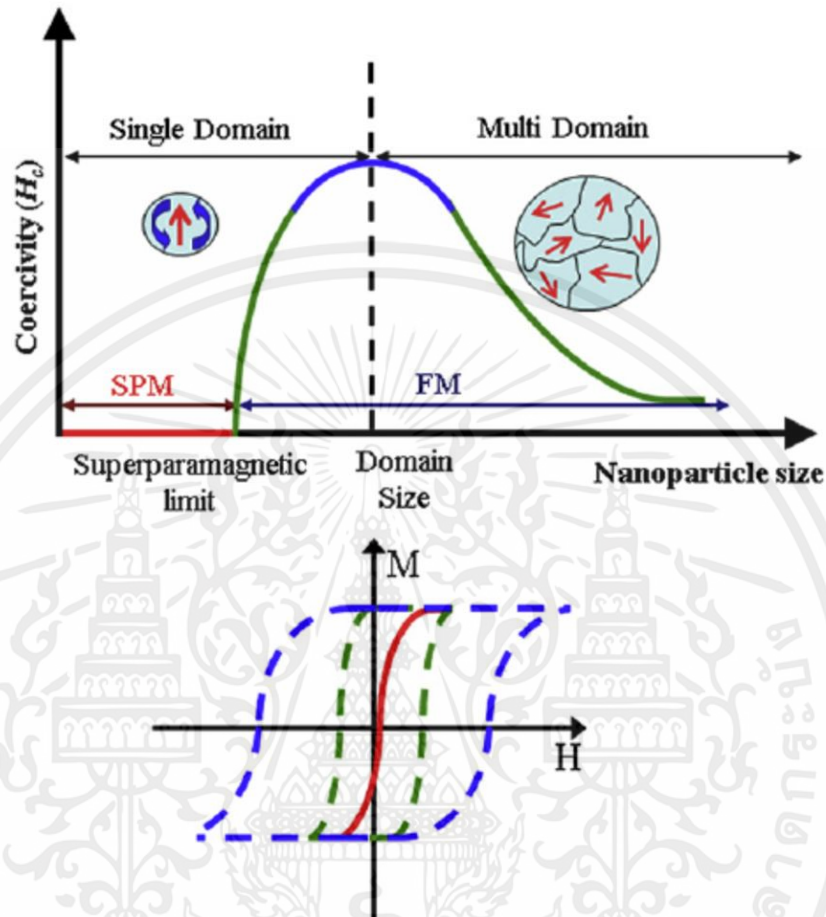


รูปที่ 2.22 รูปแบบเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ไดอะแมกเนติก, พาราแมกเนติก, เฟอร์โรแมกเนติก และพารายังยวด

(ที่มา: B. Sodipo, et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2016.)

อนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายังยวดจะมีลักษณะรูปแบบเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็กที่แตกต่างจากแม่เหล็กชนิดอื่น ๆ เป็นผลมาจากการที่มีโดเมนแม่เหล็กเป็นโดเมนเดี่ยว (single domain) ของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีขนาดไม่เกิน 30 นาโนเมตร เมื่ออยู่ในสภาวะปกติปราศจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก วัสดุหรืออนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดนี้จะประพฤติตัวเหมือนพาราแมกเนติก แต่เมื่อมีการให้หรือกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกแก่วัสดุ ทิศทางของแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันซึ่งประพฤติตัวเหมือนเฟอร์โรแมกเนติก และมีค่าแม่เหล็กคงค้างน้อยมาก หรือเทียบเท่าศูนย์จึงส่งผลให้ลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสแสดงดังรูปที่ 2.22 [31]

นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติความเป็นพาราแมกเนติกยิ่งยวด แสดงดังรูปที่ 2.23



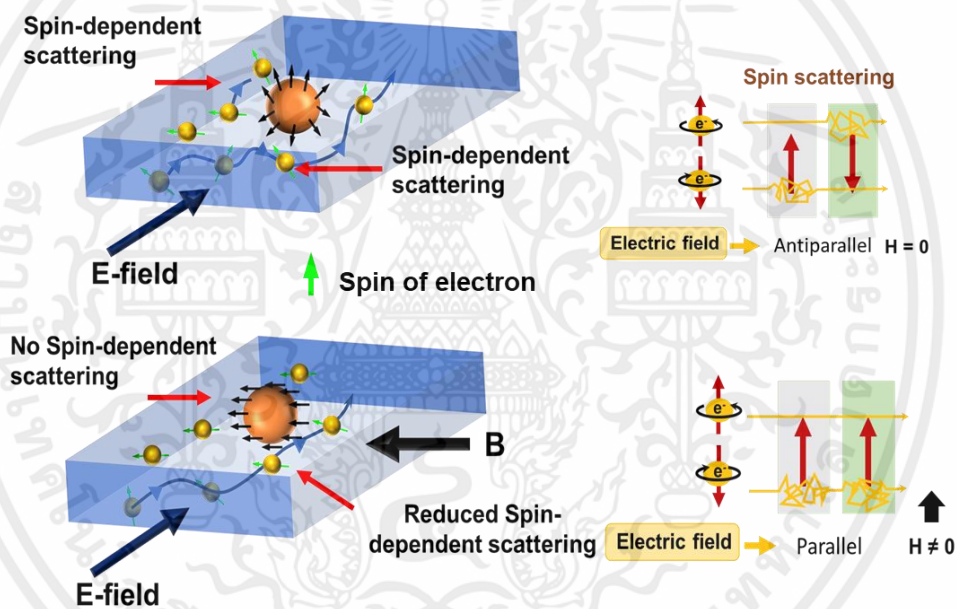
รูปที่ 2.23 อิทธิพลของขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กนาโนพาราแมกเนติกยิ่งยวด

(ที่มา: M. Mehrmohammadi et al., Nanotechnology 22 (2010))

จากรูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติความเป็นพาราแมกเนติกยิ่งยวดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่ได้ เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญที่ทำให้วัสดุ หรืออนุภาค แสดงสมบัติพาราแมกเนติกยิ่งยวดได้นั้น จะต้องมีความเป็นโดเมนเดี่ยว (Single domain) ในโครงสร้างผลึก แต่เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นผลให้โครงสร้างของอนุภาคมีหลายโดเมน (Multi domain) ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็กเสียสภาพความเป็นพาราแมกเนติกยิ่งยวดไป แสดงให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสมีแม่เหล็กคางกว้างขึ้น หรืออาจบอกได้ว่าถ้าอนุภาคนาโนแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นเกินขีดจำกัดของความเป็นโดเมนเดี่ยวในโครงสร้างหรือมีขนาดมากกว่า 30 นาโนเมตร จะส่งผลให้คุณสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็กนั้นเปลี่ยนไป คือจะประพฤติตัวเหมือน

เฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กให้ได้คุณสมบัติพารายิ่งยวดนั้น สำคัญ ตั้งแต่การเลือกกระบวนการในการสังเคราะห์ เนื่องจากแต่ละกระบวนการจะให้ขนาด หรือการกระจายตัวของอนุภาค รวมถึงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน [34]

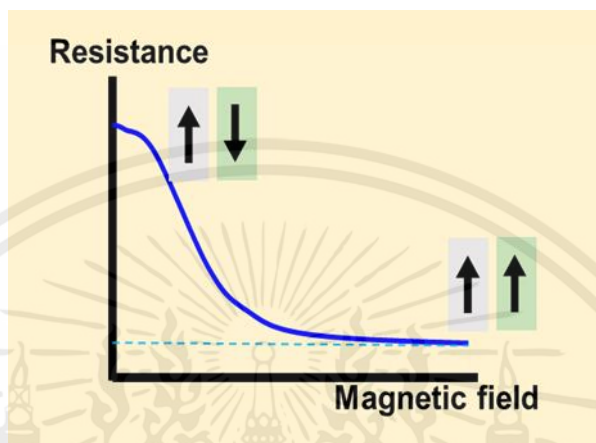
เนื่องจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดมีคุณสมบัติทั้งความเสถียร สังเคราะห์ง่าย ดัดแปลงร่วมกับพอลิเมอร์ได้ดี มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า และคุณสมบัติแม่เหล็ก จึงถูกนำมาดัดแปลงร่วมกับพอลิเมอร์ลอกแบบเพื่อเพิ่มการไหลของกระแส ทั้งนี้ด้วยคุณสมบัติแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก สปินของอนุภาคถูกเหนี่ยวนำให้หันไปทิศทางเดียวกันเป็นผลให้ลดการกระเจิงจากสปินของอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้เร็ว ช่วยลดความต้านทานไฟฟ้าของระบบซึ่งสามารถอธิบายด้วย ปรากฏการณ์ไจแอนท์แมกนีโตรซิสเทนซ์ (Giant Magnetoresistance) แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ปรากฏการณ์ไจแอนท์แมกนีโตรซิสเทนซ์

ปรากฏการณ์ไจแอนท์แมกนีโตรซิสเทนซ์ คือปรากฏการณ์การลดความต้านทานไฟฟ้าของระบบ เนื่องจากการลดการกระเจิงจากสปินของอิเล็กตรอน ซึ่งมีผลมาจากสปินของอนุภาคหันไปทิศทางเดียวกันจากการถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก กล่าวคือ เมื่ออนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดไม่ถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกสปินบริเวณพื้นผิวของอนุภาคหันทุกทิศทาง ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านเกิดการกระเจิงจากสปินของอิเล็กตรอน ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้ามีอิเล็กตรอนซึ่งสปินมีทิศทางขึ้นและลง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสปินของอนุภาคที่หันไปทิศทางเดียวกันจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ แต่หากเคลื่อนที่ผ่านสปินของอนุภาคที่หันทิศทางต่างกันจะเกิดการกระเจิง

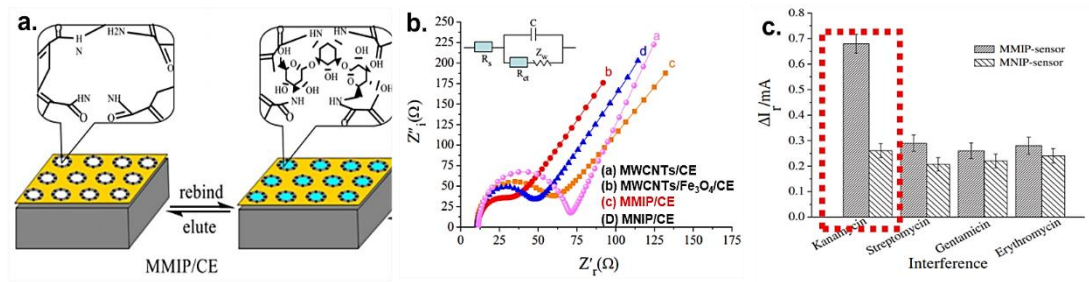
ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ช้า ในขณะที่เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกของอนุภาคหันไปทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุ อิเล็กตรอนที่มีสปินทิศทางเดียวกันกับสปินของอนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วจากการลดการกระเจิงจากสปินของอิเล็กตรอน ส่งผลให้ความต้านทานของระบบลดลงซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับทิศทางของสปินของอนุภาคซึ่งเป็นผลจากการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก

จากงานวิจัยพบว่าการดัดแปลงชีวไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมกติกเพื่อตรวจวัดอย่างจำเพาะเจาะจงและค่าการตอบสนองที่สูง ในปี ค.ศ. 2018 Amal H.A และคณะ ได้ทำการดัดแปลงชีวไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมกติก (magnetic molecularly imprinted polymer, MMIP) เพื่อตรวจวัดกานามัยซิน (kanamycin) ซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะกลุ่มอะมิโนไกลโคไซด์ จากการทดลองพบว่า อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมกติก ช่วยเพิ่มการตอบสนองจากการเปรียบเทียบโดยการดัดแปลงชีวแบบอื่น ๆ สามารถยืนยันผลจากการตรวจวัดด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์ เนื่องจากมีค่าความต้านทานไฟฟ้าของชีวไฟฟ้าลดลงและต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับชีวไฟฟ้าดัดแปลงแบบอื่น ๆ เป็นผลมาจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมกติกช่วยให้อิเล็กตรอนในระบบเคลื่อนที่เร็วขึ้น เป็นผลมาจากการลดการกระเจิงจากสปินของอิเล็กตรอนเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก นอกจากนี้ด้วยคุณสมบัติของพอลิเมอร์ลอกแบบ ส่งผลให้การตรวจวัดมีความจะเพาะเจาะจงต่อกานามัยซิน [35] ดังแสดงในรูปที่ 2.26 และพบว่าการประยุกต์ใช้การตรวจวัดด้วยกระบวนการดังกล่าวอีกมากมาย [26] แสดงดังตารางที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ดัดแปลงชีวไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด (MMIP) เพื่อตรวจวัดกานามัยซิน a. แบบจำลองการตรวจจับด้วยดัดแปลงชีวไฟฟ้า b. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์ และ c. การวิเคราะห์การตรวจวัดกานามัยซินอย่างเจาะจง

ตารางที่ 2.11 การตรวจวัดด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด [26]

กระบวนการ	สารตัวอย่าง	ช่วงสมการเส้นตรง	ปริมาณต่ำสุด (โมลาร์)	อ้างอิง
MIP-MWCNTs	Chloramphenicol	$5.0 \times 10^{-9} - 5.0 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-10}	(Yang et al., 2015a)
		$5.0 \times 10^{-7} - 4.0 \times 10^{-6}$		
	Cholesterol	$10 \times 10^{-9} - 300 \times 10^{-9}$	1×10^{-9}	(Shekarchizadeh et al., 2013)
	Metronidazole	-	3.0×10^{-10}	(Yuan et al., 2015)
	Amoxicillin	$1.0 \times 10^{-9} - 5 \times 10^{-6}$ $1.0 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6}$	8.9×10^{-10}	(Yang et al., 2015b)
	Parathion methyl	$2.0 \times 10^{-7} - 1.0 \times 10^{-5}$	6.7×10^{-8}	(Zhang et al., 2012)
MIP- Single-Walled Carbon Nanohorn	Kanamycin	$1.0 \times 10^{-7} - 5.0 \times 10^{-5}$	1.0×10^{-7}	(Han et al., 2017)
Au NPs	Melamine	-	1.39×10^{-12}	(Rao et al., 2017)
	Ractopamine	$2.5 \times 10^{-6} - 1.5 \times 10^{-4}$	1.17×10^{-6}	(Kong et al., 2014)
	Caffeine	$2.0 \times 10^{-9} - 5.0 \times 10^{-8}$	9.0×10^{-10}	(Rezaei et al., 2014c)
$5.0 \times 10^{-8} - 1.0 \times 10^{-6}$				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้ประโยชน์ในวงจำกัด ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ 2.11 (ต่อ) การตรวจวัดด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด [26]

กระบวนการ	สารตัวอย่าง	ช่วงสมการเส้นตรง	ปริมาณต่ำสุด (โมลาร์)	อ้างอิง
Au NPs	Dopamine	$5.0 \times 10^{-14} - 1.0 \times 10^{-12}$	1.7×10^{-14}	(Xu et al., 2009)
		$1.0 \times 10^{-12} - 5.0 \times 10^{-11}$		
SPE/rGO/Fe ₃ O ₄ /Ag-MIP	novel rutin	$1.0 \times 10^{-12} - 5.0 \times 10^{-11}$	0.0042	(Shiru Y et al., 2018)
Graphene-Au NPs@MIP	Levofloxacin	$1.0 \times 10^{-6} - 100 \times 10^{-6}$	0.53×10^{-6}	(Wang et al., 2014a)
MCGO@AuNPs-MIPs/GCE	dibutyl phthalate	$2.5 \times 10^{-9} - 5.0 \times 10^{-6}$	8.0×10^{-10}	(X.li et al., 2015)
Fe ₃ O ₄ -MIP	17-B Estradiol	$0.05 \times 10^{-6} - 10 \times 10^{-6}$	0.02×10^{-6}	(Li Y et al., 2015)
Au NPs@TiO ₂ nanotubes	Chlorpyrifos	$5 \times 10^{-8} - 10.0 \times 10^{-6}$	9.6×10^{-10}	(Wang et al., 2013)
Fe ₃ O ₄ -MIP	sulfonamides	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-2}$	1×10^{-12}	(A. Zamora-Gálvez et al., 2016)
Fe ₃ O ₄ /MAA	2,4,6-Trinitrotoluene (TNT)	$1 \times 10^{-9} - 130 \times 10^{-9}$	5×10^{-9}	(T. Alizadeh et al., 2014)
MMIP	estradiol	$0.05 \times 10^{-6} - 10 \times 10^{-6}$	0.819×10^{-9}	(Li Y et al., 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

1. เหล็ก(III) คลอไรด์ (Iron(III) chloride ; FeCl_3)
2. เหล็ก(II) คลอไรด์ (Iron(II) chloride ; FeCl_2)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)
4. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA)
5. เมทิลเมทาคริเลต (Methyl methacrylate; MMA)
6. เอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาคริเลต (Ethylene glycol dimethacrylate; EDGMA)
7. เอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile; AIBN)
8. ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffered saline; PBS)
9. โพแทสเซียม เฟอร์โรไซยาไนด์ (Potassium ferricyanide; $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$)
10. กลูเตน แป้งสาลี แป้งข้าวโพดปราศจากกลูเตน แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด

11. คลอโรฟอร์ม

12. แม่เหล็กถาวร

3.1.2 เครื่องมือวิเคราะห์

1. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron microscope; TEM)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง (Field emission scanning electron microscope; Fe-SEM)
5. เครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่น (Vibrating Sample Magnetometer; VSM)
6. เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

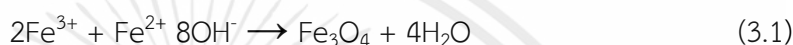
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการดัดแปลงข้อไฟฟ้าคาร์บอนเพื่อตรวจวัดกลูเตน ซึ่งขั้นตอนการ
เอกสารนี้เป็นดำเนินงานวิจัยถูกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติก (SPIONS) ที่
ไม่ว่ากรณีใดก็ตามสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติก และดัดแปลง

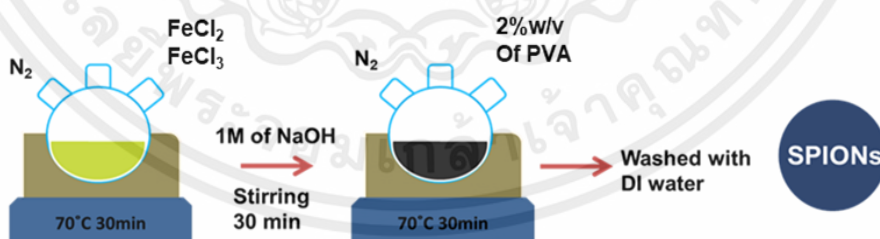
ขี้ไฟฟ้าคาร์บอน สุดท้ายตรวจวัดกลูเตนด้วยขี้ไฟฟ้าตัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าซึ่งกระบวนการเตรียมมีดังนี้

3.2.1 สังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ (SPIONs)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ด้วยกระบวนการปฏิกิริยาตกตะกอนร่วม (co-precipitation) เริ่มต้นจากการเตรียมเหล็ก (III) คลอไรด์ (FeCl_3) และ เหล็ก (II) คลอไรด์ (FeCl_2) ด้วยอัตราส่วน 2:1 โดยโมล ปั่นกวน (stirring) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน หลังจากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ (พีเอช 13.4) ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ซึ่งแสดงดังสมการ



เติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) 2 กรัมในน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร เพื่อช่วยการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ ปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกลายเป็นกลาง (พีเอช 7) และนำสารที่เตรียมได้ไปอบให้แห้ง จะได้ผงลักษณะสีดำ ดังรูปที่ 3.1 พิสูจน์ลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้ โดยทำการตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction spectroscopy, XRD) และทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) และวัดคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่น (vibrating sample magnetometer, VSM) ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์

3.2.2 สังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กยิ่งยวด (magnetic molecularly imprinted polymer; MMIP) พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์โดยไม่ใส่กลูเตน (magnetic non-molecularly imprinted polymer; MNIP)

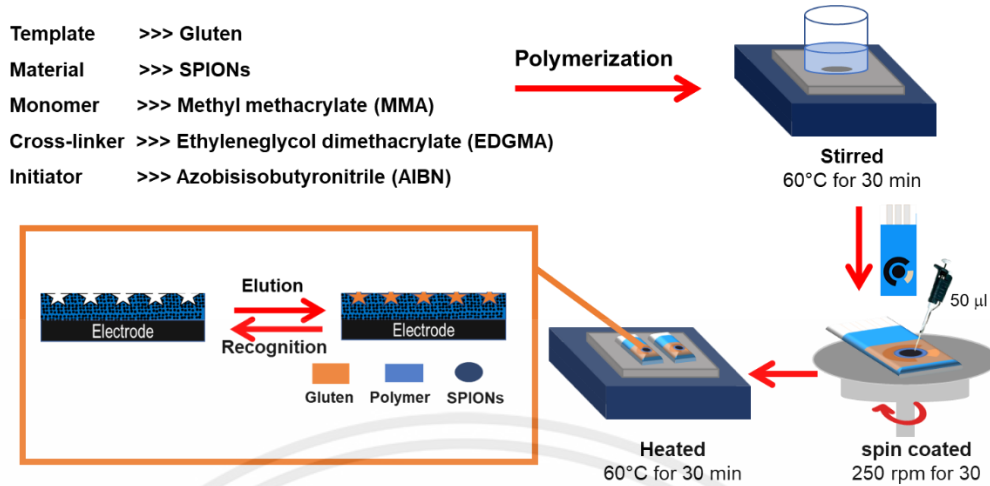
พอลิเมอร์ลอกแบบ (molecularly imprinted polymer; MIP) และพอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (non-molecularly imprinted polymer; NIP) และดัดแปลงขั้วคาร์บอนสำหรับตรวจวัดกลูเตน

สังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) โดยมีอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ กลูเตน เมทิลเมทาคริเลต เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตและ เอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ ทำหน้าที่เป็น วัสดุช่วยเพิ่มสัญญาณ สารแม่แบบ มอนอเมอร์ สารเชื่อมขวาง และ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตามลำดับ ปฏิกิริยาทั้งหมดใช้อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากละลายเมทิลเมทาคริเลตกับคลอโรฟอร์ม หลังจากนั้นเติมสารละลายกลูเตนที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เติมอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กปั่นกวน (magnetic bar) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตและเอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์

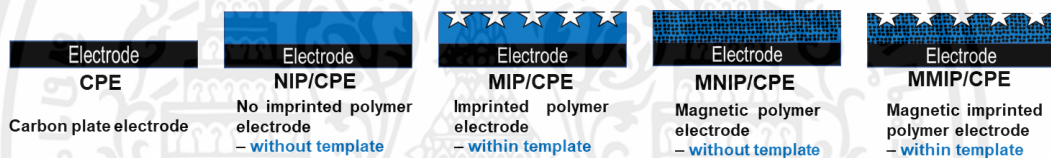
ทำการดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง (spin coated) โดยการนำสารละลายพอลิเมอร์ลอกแบบ 50 ไมโครลิตรหยดลงบนขั้วไฟฟ้าที่เตรียมไว้ และทำการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 35 วินาที หลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการบ่ม (curing) ของพอลิเมอร์โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อออกกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันเสร็จสมบูรณ์ ทำการชะแม่แบบออกด้วย น้ำปราศจากไอออนและเอทานอล ดังรูปที่ 3.2 นำขั้วที่ได้เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การเตรียมขั้วไฟฟ้าดัดแปลงแบบต่าง ๆ ทำภายใต้กระบวนการเดียวกับการเตรียมขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กอ็อกไซด์ (MMIP) โดยขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์โดยไม่ใส่กลูเตน (MNIP) ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (MIP) เป็นการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลกลูเตนปราศจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ และขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (NIP) เตรียมปราศจากสารละลายกลูเตนและอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ และดังรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นนำมาพิสูจน์พื้นผิวขั้วด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง (field emission scanning electron microscope , Fe-SEM) และทำการศึกษาเชิงเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด และกระบวนการสร้างขั้วไฟฟ้าดัดแปลงบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอน



รูปที่ 3.3 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ถูกดัดแปลงในรูปแบบต่าง ๆ

3.3.3 การตั้งระบบการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า

กระบวนการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดกลูเตนด้วยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพื้นผิวพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า

3.3.3.1 ไชคลิกโวลแทมเมตรี

ข้อมูลของไชคลิกโวลแทมเมตรี ทำโดยกำหนดช่วงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง -1.4 โวลต์ ถึง -0.2 โวลต์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพื้นผิวพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดในการตรวจวัด

1. เตรียมสารละลายกลูเตนมีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์

2. กระบวนการวัดผล ทำการหยดสารละลายปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงบนขั้วไฟฟ้าดัดแปลงที่สร้างขึ้น

3. ตรวจวัดสารละลายกลูเตนด้วยเทคนิคไชคลิกโวลแทมเมตรีโดยกำหนดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ช่วง -1.4 โวลต์ ถึง -0.2 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำตามข้อ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกลูเตน

5. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล

3.3.3.2 แอมแปโรเมตรี

ข้อมูลแอมแปโรเมตรี ทำการเปรียบเทียบผลจากการตัดแปลงพื้นผิวข้าวไฟฟ้าที่แตกต่างกันคือ พอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (NIP) พอลิเมอร์ลอกแบบ (MIP) พอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ (MMIP) ทำได้โดยกำหนดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ -0.8 โวลต์

1. เตรียมสารละลายกลูเตนมีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์

2. กระบวนการวัดผลทำการหยดสารละลายกลูเตนปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงบนข้าวไฟฟ้าตัดแปลงที่สร้างขึ้น ตรวจวัดสารละลายกลูเตนด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยกำหนดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ -0.8 โวลต์ แล้วทำการวัดผลเป็นเวลา 5 นาที

3. ทำการล้างข้าวไฟฟ้าตัดแปลงด้วยน้ำปราศจากไอออนและเอทานอล ทำการหยดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงบนข้าวไฟฟ้าตัดแปลงที่สร้างขึ้น แล้วทำการทดลองซ้ำเหมือนข้อ 2

4. ทำตามข้อ 2 ถึง 3 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกลูเตน

5. ทำซ้ำทั้งหมดโดยเปลี่ยนข้าวไฟฟ้าตัดแปลง

6. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล

3.3.3.3 อิมพีแดนซ์

ข้อมูลอิมพีแดนซ์ เป็นการเปรียบเทียบระบบและความต้านทานจากการตัดแปลงพื้นผิวข้าวไฟฟ้าที่แตกต่างกัน พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายกลูเตนและความจำเพาะเจาะจงของกลูเตนต่อข้าวไฟฟ้าตัดแปลง โดยกำหนดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ -0.8 โวลต์

1. เตรียมสารละลายกลูเตนมีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์

2. ติดตั้งระบบโดยใช้ข้าวไฟฟ้า 3 ข้าวประกอบด้วย ข้าวไฟฟ้าอ้างอิงข้าวไฟฟ้าช่วย และข้าวไฟฟ้าทำงาน ซึ่งเป็นข้าวไฟฟ้าที่ถูกตัดแปลง กระบวนการวัดผลใส่สารละลายกลูเตน ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และจุ่มข้าวไฟฟ้าในสารละลายกลูเตน

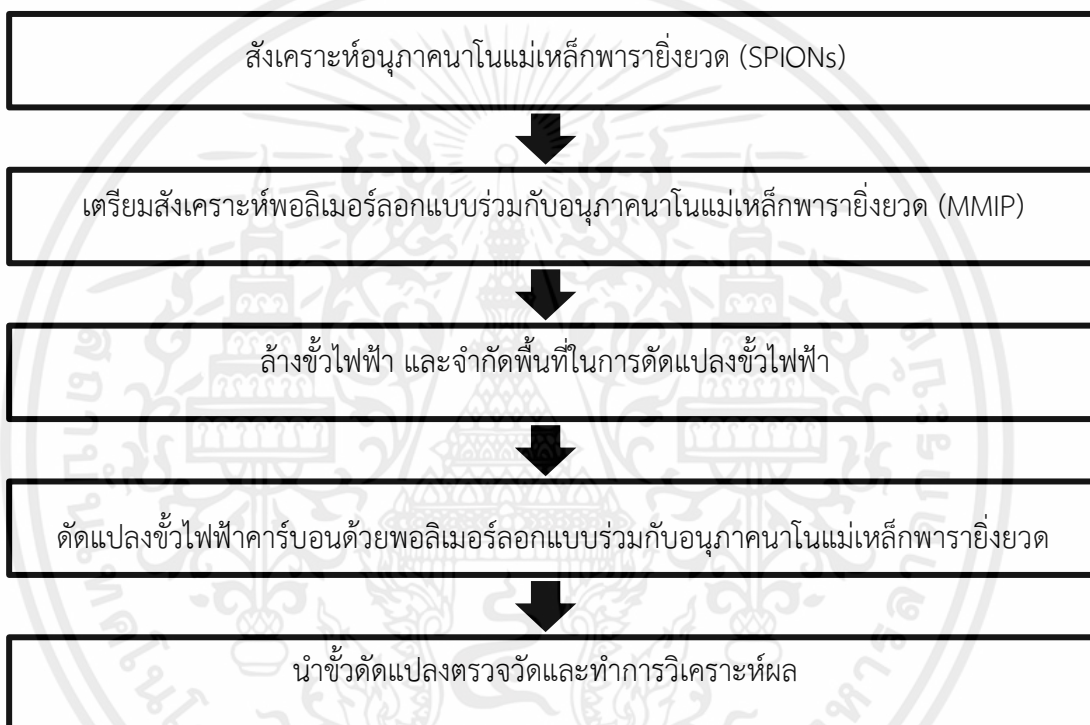
3. ตรวจวัดสารละลายกลูเตนด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์ โดยกำหนดให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ -0.8 โวลต์ ความถี่ในช่วง 10^{-3} - 10^5 เฮิร์ต

4. ทำตามข้อ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนข้าวไฟฟ้าทำงาน

5. ทำตามข้อ 2 และ 3 โดยใช้ขั้วไฟฟ้าตัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์แล้วเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกลูเตน

6. ทำตามข้อ 2 และ 3 โดยใช้ขั้วไฟฟ้าตัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์แล้วใช้สารละลายตัวอย่างของ สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ไกลซีน กลูตามิก แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดปราศจากกลูเตน แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และสารละลายกลูเตน

7. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมกระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าตัดแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

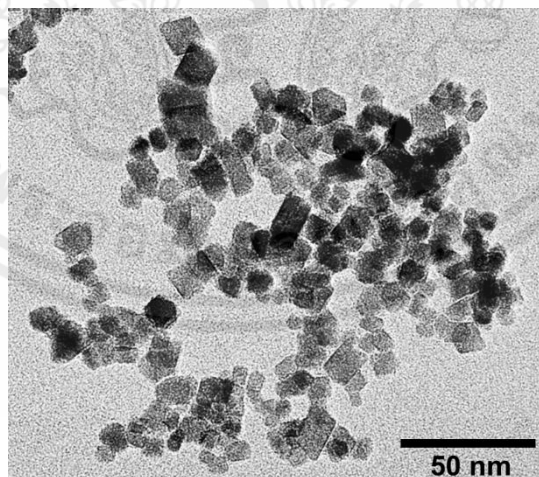
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและการอภิปรายของการสร้างขั้วไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดเพื่อตรวจวัดกลูเตนโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า ถูกแบ่งเป็น 3 ข้อ ประกอบด้วย

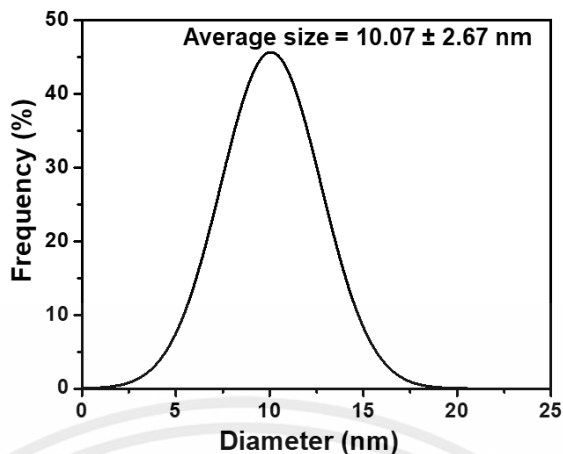
1. ผลของลักษณะและคุณสมบัติจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดด้วยปฏิกิริยาการตกตะกอนร่วม
2. ผลของการดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอน
3. การตรวจวัดกลูเตนโดยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า

4.1 คุณสมบัติและคุณสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดจากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเคมี

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดพบว่าเมื่อศึกษาลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน มีการกระจายตัวของอนุภาคดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ขนาดอนุภาคและร้อยละการกระจายตัวดังรูปที่ 4.2 ซึ่งมีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ 10.07 ± 2.67 นาโนเมตร

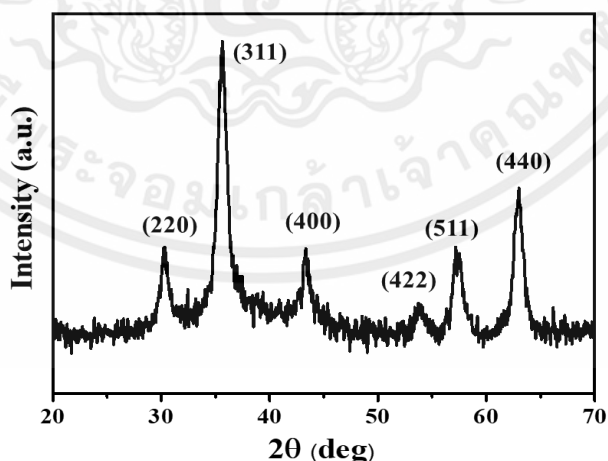


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.1 ที่ลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่ว่ากรณีใดในแบบส่องผ่านนี้ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



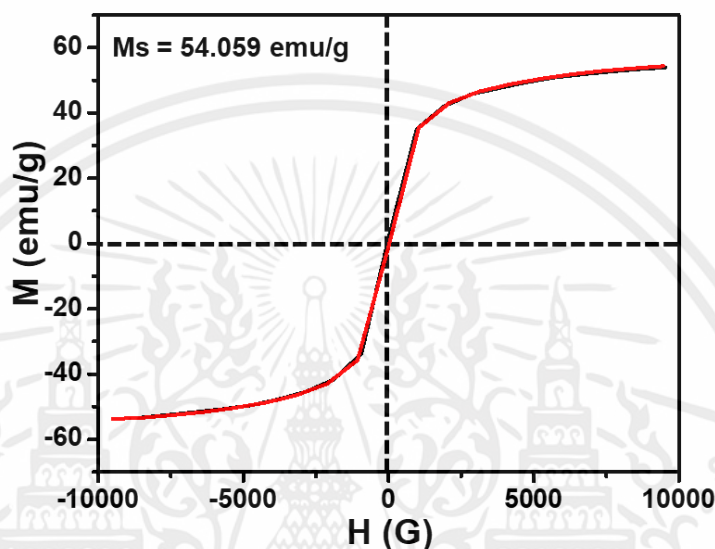
รูปที่ 4.2 กราฟการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน

การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นโครงสร้างผลึกของอนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้ซึ่งตรงกับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกอินเวอร์สสปินเนล (cubic inverse spinel) ซึ่งตรงกับโครงสร้างผลึกของแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) จากผลการวิเคราะห์นี้เป็นการยืนยันว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณขนาดของโครงสร้างผลึกที่ระนาบ 400 โดยสมการของเดอบาย-เชอร์เรอร์ (Debye-Scherrer) ซึ่งคำนวณขนาดของอนุภาคได้เท่ากับ 10.35 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น พบว่าเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสผ่านจุดศูนย์คือเป็นการแสดงสมบัติของแม่เหล็กต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามากระตุ้น และไม่แสดงสมบัติแม่เหล็กเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก หรือไม่มีสภาวะแม่เหล็กตกค้าง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4 ซึ่งประพุดิตัวเป็นพารายิ่งยวดแม่เหล็กยิ่งยวด มีค่าแมกนีไทเซชันเท่ากับ 54.059 emu/g



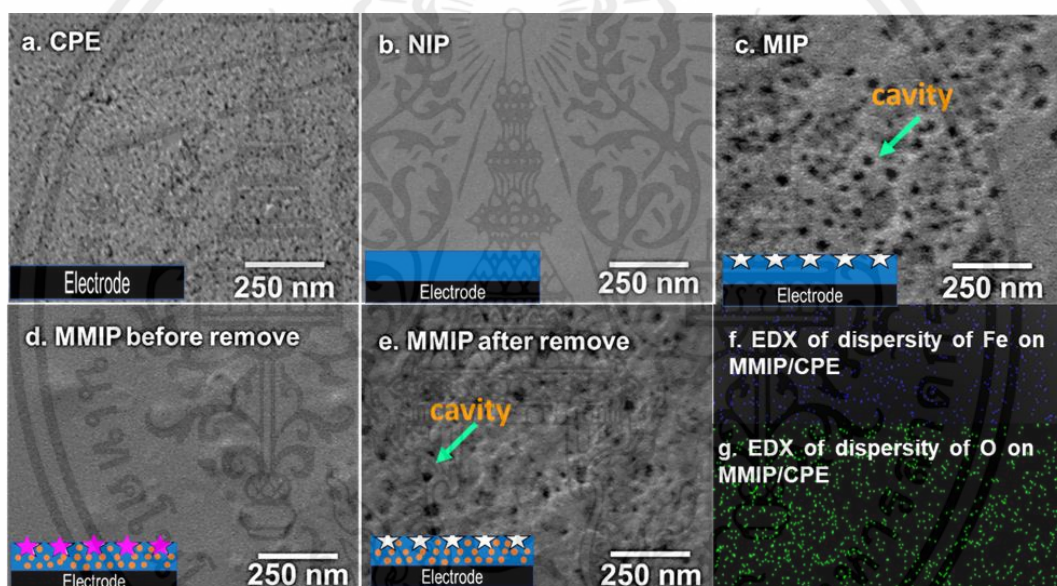
รูปที่ 4.4 ฮิสเตอร์เรซิสเชิงแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกแบบแมกนีไทต์ (Magnetite, Fe_3O_4) มีขนาดอนุภาคประมาณ 10 นาโนเมตร คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่ได้ประพุดิตัวเป็นแม่เหล็กพารายิ่งยวด

4.2 คุณสมบัติของพื้นผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอนดัดแปลง

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนดัดแปลงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง (field emission scanning electron microscope, FE-SEM) การดัดแปลงพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนทำการศึกษาลักษณะความแตกต่างหลังจากดัดแปลงขั้วไฟฟ้าทำงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง จากรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจากการถูกดัดแปลงพื้นผิว a. ขั้วไฟฟ้าทำงานไม่ผ่านการดัดแปลง b. การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ c. การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ d. การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดก่อนหุ้มแบบ และ e. หลังหุ้มแบบ และ f. และ g. การกระจายตัวของธาตุเหล็กและออกซิเจนบนขั้วไฟฟ้าดัดแปลง

ด้วย พอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงซึ่งพบว่าลักษณะของขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการลอกแบบของพอลิเมอร์ รูปที่ 4.5 c และ รูปที่ 4.5 e มีลักษณะขรุขระมีช่องว่างปรากฏทั้งนี้เกิดจากพอลิเมอร์ผ่านการลอกแบบทำให้เกิดช่องว่างของแม่แบบบนพื้นผิวพอลิเมอร์ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.5 b ขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์และรูปที่ 4.5 d การตัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดก่อนชะแม่แบบมีลักษณะค่อนข้างเรียบเนื่องจากไม่มีการชะแม่แบบทำให้ไม่เกิดช่องว่างบนพื้นผิวพอลิเมอร์ ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ธาตุเหล็กและออกซิเจนบนขั้วไฟฟ้ การตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดบนขั้วไฟฟ้าทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดประกอบด้วยธาตุเหล็กและออกซิเจน (Fe_3O_4) ดังรูปที่ 4.5 f และ g ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจากการถูกตัดแปลงพื้นผิว a. ขั้วไฟฟ้าทำงานไม่ผ่านการตัดแปลง b. การตัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ c. การตัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ d. การตัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดก่อนชะแม่แบบ และ e. หลังชะแม่แบบ f. การกระจายตัวของธาตุเหล็กและ g. การกระจายตัวของออกซิเจนบนขั้วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง

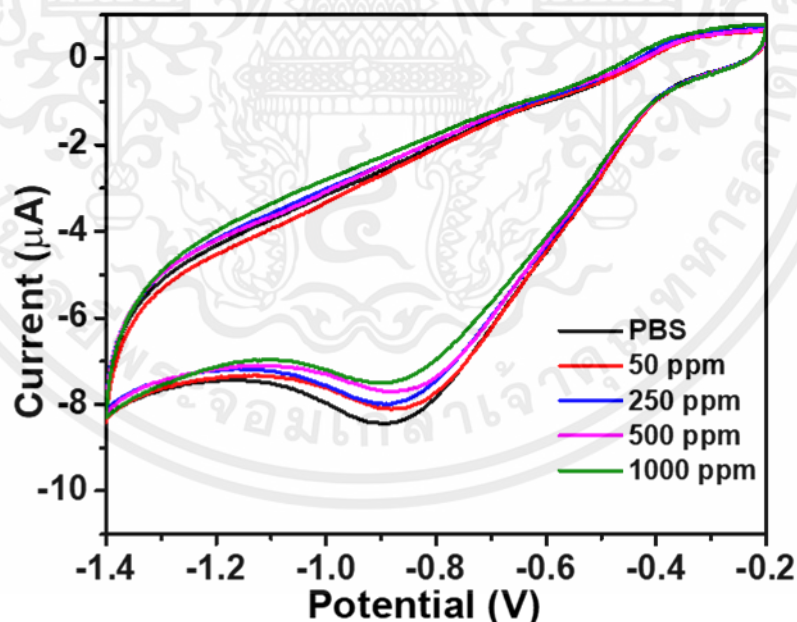
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจวัดกลูเตนโดยชีวไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า

การตรวจวัดกลูเตนโดยชีวไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าโดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นการใช้เทคนิควิธีทางเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าประกอบด้วย แอมป์โรเมตรี โวลแทมเมตรีและอิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าแล้วตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาเคมี

4.3.1 การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และแอมป์โรเมตรี ของชีวไฟฟ้าดัดแปลงในการตรวจวัดสารละลายกลูเตน

จากผลการตรวจวัดสารละลายกลูเตนเชิงเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกับชีวไฟฟ้าดัดแปลง โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ช่วง -1.4 โวลต์ ถึง -0.2 โวลต์ จากกราฟจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (แกนนอน) และค่ากระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) พบว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.87 โวลต์เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า โดยค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อตรวจวัดสารละลายกลูเตนที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดกลูเตนด้วยชีวไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดที่ความเข้มข้น 50 ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

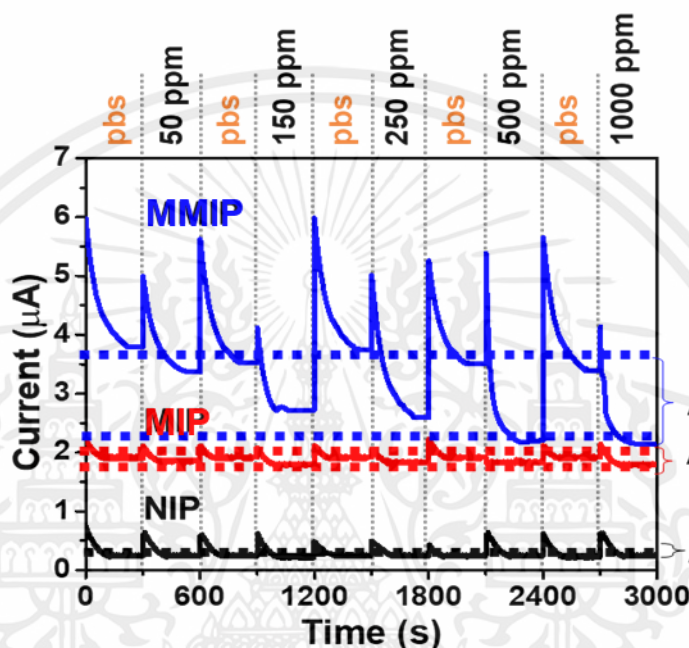
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้น ใบอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟไซคลิกโวลแทมโม่แกรมแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยารีดักชัน ทั้งนี้ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นเกิดจากสารละลายของฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซึ่งเป็นสารละลายที่ใช้สำหรับละลายกลูเตนและมีคุณสมบัติเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ตั้งสมการ เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ -0.87 โวลต์ นอกจากนี้เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นของกลูเตนเพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูเตนเปลี่ยนแปลงไปจะทำการศึกษาโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ -0.87 โวลต์เพื่อตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะถูกตรวจวัดด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรี



เทคนิคแอมแปโรเมตรีถูกใช้สำหรับศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูเตนเปลี่ยนแปลงไป โดยการตรวจวัดทำการควบคุมค่าความต่างศักย์คงที่ที่ -0.87 โวลต์ จากรูปที่ 4.7 กราฟจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (แกนนอน) และค่ากระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) การตรวจวัดจะทำการวัดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์สลับกับสารละลายกลูเตนซึ่งใช้เวลา 300 วินาทีต่อการตรวจวัด โดยเปรียบเทียบการตัดแปลงขั้วไฟฟ้าประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ (NIP) ขั้วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ (MIP) และขั้วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด (MMIP) พบว่าขั้วตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ มีค่ากระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำมากหรือแทบจะไม่สามารถตรวจวัดได้ ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าเป็นพอลิเมอร์ไม่นำไฟฟ้าเป็นผลให้การไหลของอิเล็กตรอนเป็นไปได้ยาก ขณะที่เมื่อตัดแปลงขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบ มีค่ากระแสที่เพิ่มสูงขึ้น เกิดจากพอลิเมอร์ลอกแบบเมื่อทำการลอกแบบกลูเตนจะทำให้เกิดช่องว่างและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ลดลง เป็นผลให้การไหลของอิเล็กตรอนเป็นไปได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความต่างของกระแสระหว่างสารละลายของฟอสเฟตบัฟเฟอร์และสารละลายกลูเตนพบว่ามีความต่างของกระแสไฟฟ้าที่ค่อนข้างน้อย ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าตัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด มีค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งมากกว่าขั้วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบนอกจากนี้ค่าความต่างของค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์และสารละลายกลูเตนยังมีค่าความต่างที่เห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลมาจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดเป็นวัสดุช่วยเพิ่มค่าการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า สามารถตัดแปลงร่วมกับพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับทำพอลิเมอร์ลอกแบบได้ทำให้เกิดการไหลผ่านของอิเล็กตรอนได้ดีเป็นผลให้มีค่าการตรวจวัดที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อตรวจวัดสารละลายกลูเตนเทียบกับสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พบว่ามีความต่าง

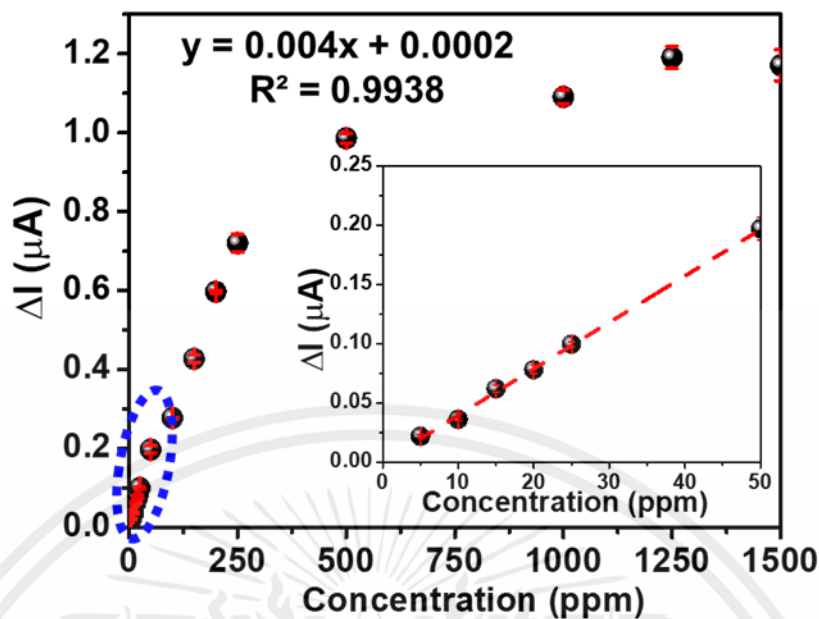
ของกระแสที่เห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลมาจากการจับของอนุภาคกลูเตนและช่องว่างของพอลิเมอร์ลอกแบบทำให้ค่าสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปที่ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าสัญญาณในการตรวจวัดกลูเตนจะมีค่าลดลงทั้งนี้เป็นผลมาจากกลูเตนเป็นโปรตีนโมเลกุลใหญ่ไม่นำไฟฟ้าเมื่อทำการจับกับขั้วไฟฟ้าตัดแปลงทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของอิเล็กตรอนเป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการตรวจวัดกลูเตนที่ความเข้มข้นสูงมีค่าลดต่ำลง



รูปที่ 4.7 การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยขั้วไฟฟ้าตัดแปลงแบบต่าง ๆ ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (NIP) ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (MIP) ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมagnetic (MNIP) ที่ความเข้มข้นสารละลายกลูเตน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของสารละลายกลูเตนกับค่าสัญญาณ (calibration curve) ซึ่งสัญญาณที่ตรวจวัดได้จะอยู่ที่ช่วงความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าสัญญาณเริ่มคงที่ซึ่งเป็นค่าจำกัดของขั้วไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทั้งนี้ผลจากการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า พบว่าในช่วงความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตรได้

สมการเส้นตรง $y = 0.004X + 0.0002$ โดยที่ $R^2 = 0.994$ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



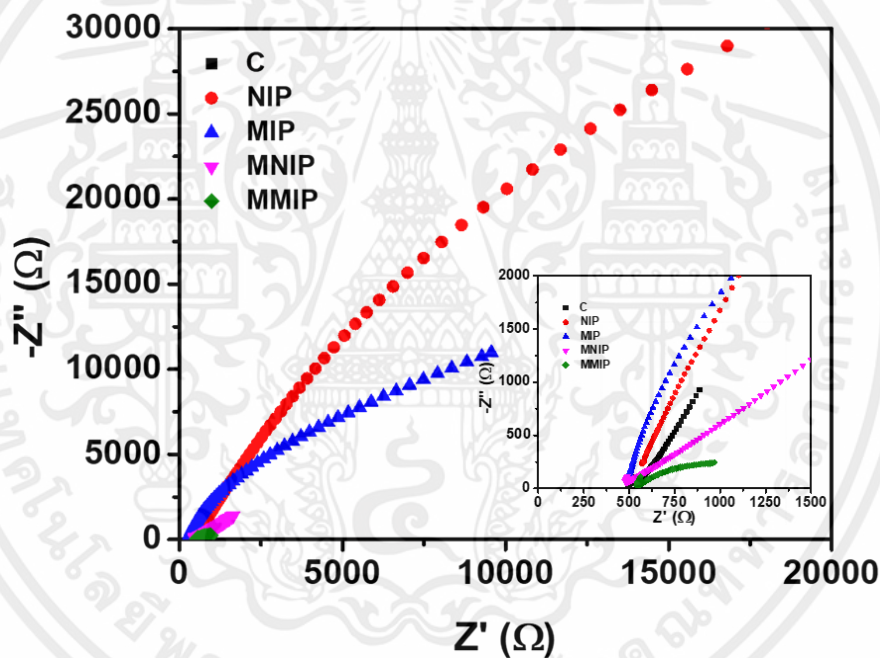
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (concentration) และกระแสไฟฟ้า (current) เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายกลูเตนที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการเส้นตรงชี้ไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็ก พาราอีนยวดยิ่งสามารถคำนวณค่าความไวในการตอบสนอง (sensitivity) เท่ากับ 4.192×10^3 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (limit of detection, LOD) เท่ากับ 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง LOD หาได้จาก $3.3(SD/m)$ [36] เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชี้ไฟฟ้า และ m คือ ความชันของสมการเส้นตรง ทั้งนี้ผลการตรวจวัดความเข้มข้นต่ำสุดของกลูเตนที่สามารถวัดได้มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดองค์การอนามัยโลกและองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (WHO/FAO) ว่าด้วยผู้ป่วยที่เป็นโรคแพ้กลูเตนไม่ควรบริโภคอาหารที่มีกลูเตนเกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.2 การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) ของชี้ไฟฟ้าดัดแปลงในการตรวจวัดสารละลายกลูเตน

จากการตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) แสดงกราฟไนควิสต์ (Nyquist plots) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ส่วนจริงแกนนอน (Z') และอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพแกนตั้ง (Z'') จากรูปที่ 4.9 เป็นการศึกษาผลความต้านทานของชี้ไฟฟ้าที่ถูกดัดแปลงในลักษณะต่าง ๆ ประกอบด้วย ชี้ไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง (CPE) ชี้ไฟฟ้าพอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (NIP) ชี้ไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (MIP) ชี้ไฟฟ้าพอลิเมอร์ร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอีนยวดยิ่ง (MNIP) และชี้ไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอีนยวดยิ่ง (MMIP) ตรวจจับได้สารละลายฟอสเฟต

บัพเฟอร์ พบว่าเมื่อขั้วไฟฟ้าถูกดัดแปลงพื้นผิวเป็นผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ทำให้ความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น โดย $NIP > MIP > MNIP > MMIP > CPE$ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาหน้าขั้วไฟฟ้าและการแพร่ของอิเล็กตรอนโดย เมื่อมีการดัดแปลงขั้วไฟฟ้าทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลดลงความต้านทานจึงสูงขึ้น ซึ่งจากกราฟขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปลงพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (NIP) และขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบ (MIP) มีลักษณะกราฟซันเมื่อเทียบกับกราฟอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากขั้วไฟฟ้าเป็นการดัดแปลงโดยพอลิเมอร์ไม่นำไฟฟ้าทำให้การไหลของอิเล็กตรอนเป็นไปได้ยากเป็นผลให้ขั้วไฟฟ้ามีความต้านทานที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่เมื่อขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ มีความชันกราฟที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนได้ดี เป็นผลให้ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปลงร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์มีความต้านทานต่ำ

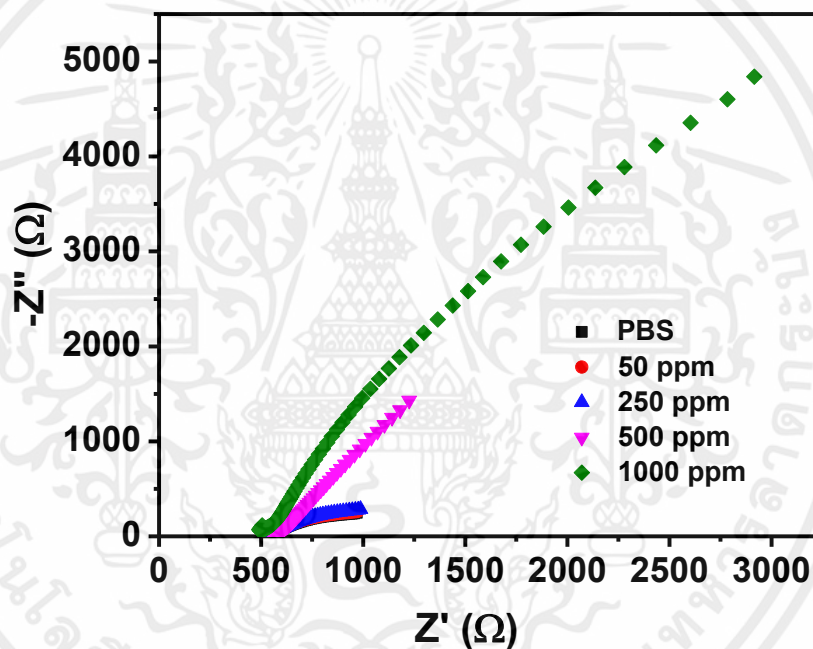


รูปที่ 4.9 โนควิสต์พล็อตจากการวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) ของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงในลักษณะต่าง ๆ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปลง (CPE) ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (NIP) ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (MIP) ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์โดยไม่ใส่กลูเตน (MNIP) และขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ (MMIP) ภายใต้สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์

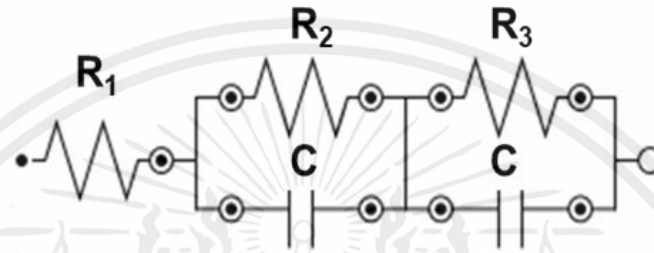
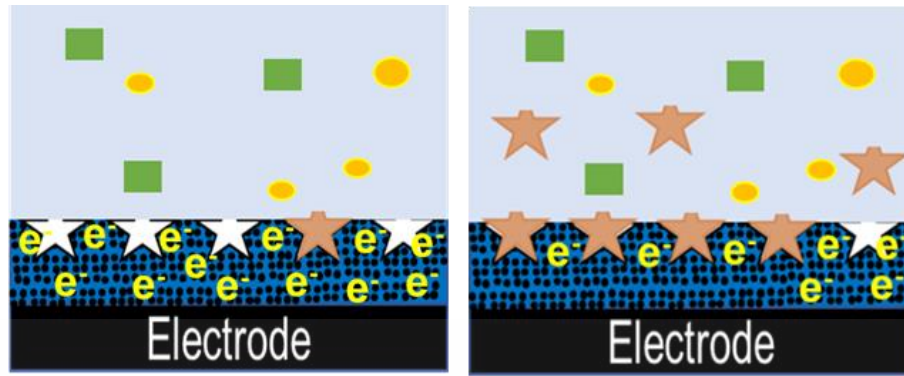
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
จากรูป 4.10 เป็นการศึกษาผลความต้านทานของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอ็อกไซด์ที่สารละลายกลูเตนความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยกราฟ

โนควิสต์จากเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี จากกราฟพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูเตนเพิ่มมากขึ้นกราฟมีลักษณะชันมากขึ้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกลูเตนเพิ่มมากขึ้น ความต้านทานของขั้วไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมากจากการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าตัดแปลงและสารละลายกลูเตนเมื่อทำการตรวจวัดสารละลายกลูเตนช่องว่างพื้นผิวพอลิเมอร์ที่เกิดจากการลอกแบบทำการจับกับโมเลกุลกลูเตน สามารถแสดงแผนภาพจำลองการตรวจวัดสารละลายกลูเตนได้ดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากกลูเตนเป็นโมเลกุลโปรตีนสายโซ่ขนาดใหญ่และไม่มีขั้ว เมื่อจับกับพื้นผิวขั้วไฟฟ้าตัดแปลงทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของอิเล็กตรอนเป็นผลให้มีความต้านทานสูง ทั้งนี้ผลการตรวจวัดสามารถแสดงแผนผังจำลองวงจรการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าตัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 โนควิสต์พล็อตขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด (MMIP) เมื่อทำการวัดสารละลายกลูเตนที่ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

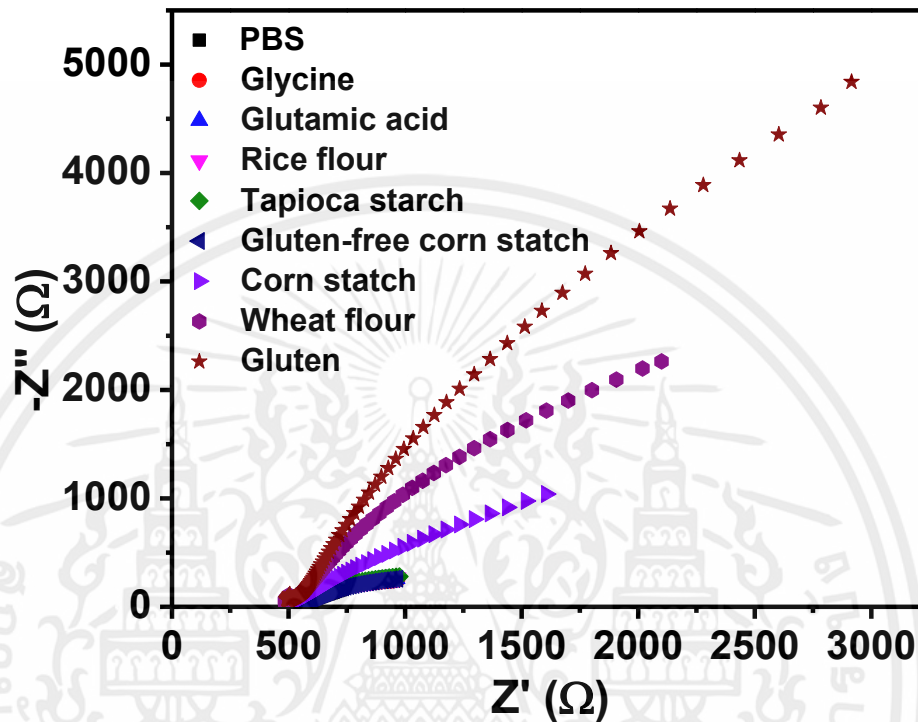


รูปที่ 4.11 แผนผังแสดงส่วนประกอบและกลไกการทำงานของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงที่ได้จากการวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (electrochemical impedance spectroscopy, EIS)

4.3.3 การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีทดสอบสารละลายกลูเตนในแป้งชนิดต่าง ๆ ต่อขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวต

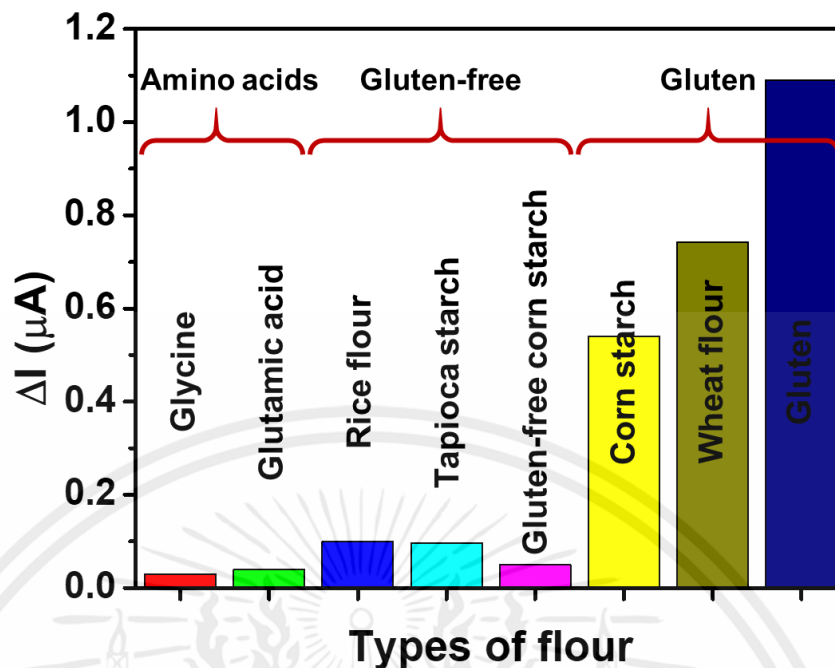
การทดสอบความจำเพาะเจาะจงของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวตต่อกลูเตนในสารละลายจากหมู่อะมิโนและแป้งแต่ละชนิดประกอบด้วย สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ไกลซีน กลูตามิก แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดปราศจากกลูเตน แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และสารละลายกลูเตน จากรูปที่ 4.12 เป็นการทดสอบระบบการตรวจวัดกลูเตนในสารละลายจากหมู่อะมิโนและแป้งชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี พบว่าสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ไกลซีน กลูตามิก แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดปราศจากกลูเตน มีความชันของกราฟน้อย ในขณะที่แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และสารละลายกลูเตน มีความชันของกราฟค่อนข้างมากกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งข้าวโพด แป้งสาลี มีกลูเตนเป็นองค์ประกอบเมื่อทำการตรวจวัดด้วยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวตโมเลกุลกลูเตนจับกับช่องว่างของพอลิเมอร์ลอกแบบทำให้การไหลของอิเล็กตรอนถูกขัดขวางเป็นผลให้ความต้านทานของระบบเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลให้กราฟในควิสต์มีความชันกราฟมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อทดสอบกับอนุพันธ์ของกลูเตน เช่นหมู่อะมิโนไกลซีน และกลูตามิก พบว่าความต้านทานต่ำใกล้เคียงกับสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ทั้งนี้เนื่องจากหมู่อะมิโน

ไกลซีน และกลูตามิกเป็นอนุพันธ์ของกลูเตนซึ่ง ขนาด รูปร่าง และหมู่ฟังก์ชันไม่เหมาะสมกับช่องว่างของพอลิเมอร์ลอกแบบซึ่งเป็นช่องว่างของโมเลกุลกลูเตนทำให้หมู่อะมิโนไกลซีน และกลูตามิกไม่ทำการจับกับช่องว่างของข้าวไฟฟ้าตัดแปลงความต้านทานจึงใกล้เคียงกับสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์



รูปที่ 4.12 ไนควิสต์พล็อตข้าวไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด (MMIP) เมื่อทำการวัดสารละลายจากหมู่อะมิโนและแป้งแต่ละชนิดประกอบด้วย สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ไกลซีน กลูตามิก แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดปราศจากกลูเตน แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และสารละลายกลูเตน

เมื่อทดสอบการตรวจวัดกลูเตนในสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ไกลซีน กลูตามิก แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดปราศจากกลูเตน แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และสารละลายกลูเตน ด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรีจากรูปที่ 4.13 พบว่า สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ ไกลซีน กลูตามิก แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดปราศจากกลูเตนมีค่าสัญญาณต่ำใน ขณะที่แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และสารละลายกลูเตนมีค่าสัญญาณสูง ลำดับไปด้วย แป้งข้าวโพด > แป้งสาลี > สารละลายกลูเตน ซึ่งผลการตรวจสอบสอดคล้องกับการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ดังนั้น ข้าวไฟฟ้าตัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายังยวดจึงมีความจำเพาะต่อการตรวจวัดกลูเตน



รูปที่ 4.13 การทดสอบความจำเพาะเจาะจงของข้าวไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด (MMIP) ต่อโมเลกุลกลูเตน โดยตรวจวัดสารละลายจากหม้ออะมิโนและแป้งแต่ละชนิดประกอบด้วย สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ โกลซีน กลูตามิก แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพดปราศจากกลูเตน แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และสารละลายกลูเตน

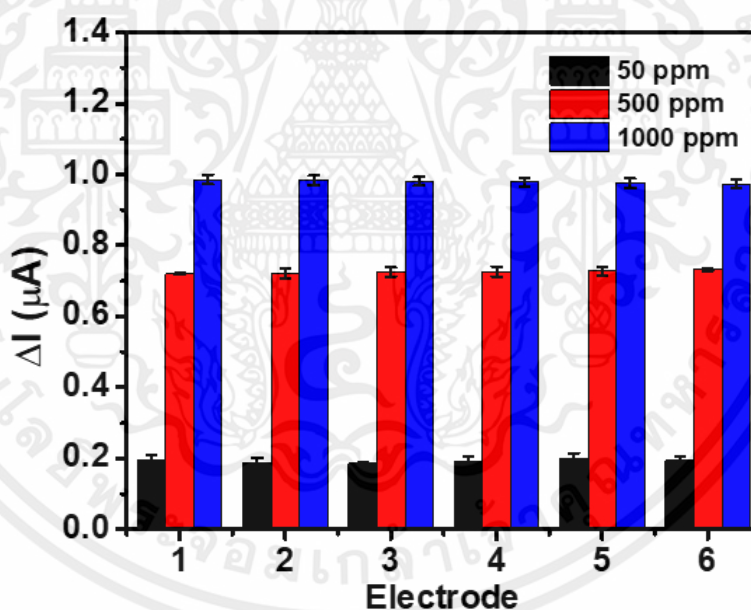
4.3.4 ความเสถียรภาพในการสร้าง (stability of fabrication) ของข้าวไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด (MMIP)

การทดสอบความเสถียรภาพในการสร้างข้าวไฟฟ้าดัดแปลงทั้ง 6 ข้าว พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูเตนเดียวกัน ข้าวไฟฟ้าดัดแปลงทั้ง 6 ให้ค่ากระแสที่ใกล้เคียงกัน และข้าวไฟฟ้าดัดแปลงที่สร้างขึ้นมีสมการเส้นตรง (linear equation) ความไวในการตอบสนอง (sensitivity) และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัด (limit of detection, LOD) มีค่าใกล้เคียงกันทั้งนี้เป็นผลมาจากการดัดแปลงข้าวไฟฟ้าเป็นการดัดแปลงโดยการใช้เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยงทำให้ข้าวไฟฟ้าทุกข้าวมีการดัดแปลงอย่างสม่ำเสมอ แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบความเสถียรภาพในการสร้างขั้วไฟฟ้าดัดแปลง

Electrode	Linear equation	R ²	Sensitivity ($\mu\text{A}/\text{ppm}$)	LOD (ppm)
1	$0.004x + 0.0006$	0.9925	4.19×10^3	1.50
2	$0.004x + 0.0001$	0.9941	4.21×10^3	1.49
3	$0.004x + 0.0008$	0.9943	4.22×10^3	1.53
4	$0.004x + 0.0002$	0.9932	4.17×10^3	1.51
5	$0.004x + 0.0005$	0.9918	4.19×10^3	1.50
6	$0.004x + 0.0003$	0.9934	4.21×10^3	1.52



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าสัญญาณของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

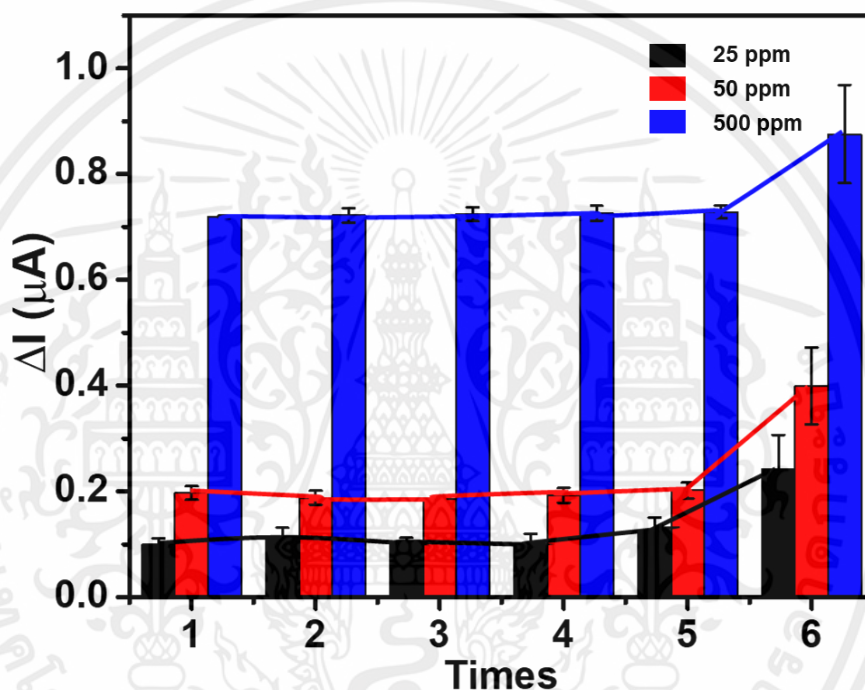
4.3.5 ความสามารถในการใช้งานซ้ำ (Repeatability) ของขั้วดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบ

โมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวด (MMIP)

จากการทดสอบการใช้ซ้ำของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงโดยใช้เทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยตรวจวัด

สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์และสารละลายกลูเตนที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร 50 มิลลิกรัม

ต่อลิตร และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการตรวจวัดสลับกันเป็นจำนวน 6 รอบ พบว่าขั้วไฟฟ้าดัดแปลงที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ซ้ำได้ 5 รอบ เมื่อตรวจวัดมากกว่า 5 รอบพบว่าค่าสัญญาณในการตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนทั้งนี้เป็ผลมาจากการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงซึ่งแยกเป็น 2 กรณีคือ พอลิเมอร์เสื่อมสภาพ และการหลุดออกของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด กล่าวคือเมื่อพอลิเมอร์เกิดการแตกหักเสียหายทำให้กระแสไฟฟ้าที่ได้เพิ่มสูงขึ้นนอกจากนี้หากอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดเกิดการหลุดออกส่งผลให้การนำไฟฟ้าลดลงเป็นผลให้การตรวจวัดความต่างกระแสไฟฟ้าในรอบที่ 6 เกิดการเปลี่ยนแปลงไป



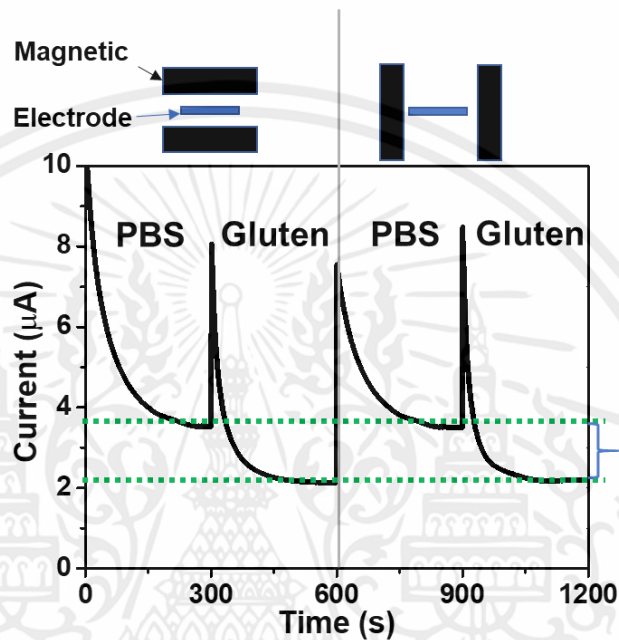
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าสัญญาณของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงในการใช้งานซ้ำ

4.3.6 อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่อการตรวจวัดกลูเตนด้วยขั้วดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด (MMIP)

4.3.6.1 อิทธิพลของทิศทางสนามแม่เหล็ก

จากการทดสอบการตรวจวัดกลูเตนโดยเทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยเปรียบเทียบทิศทางของสนามแม่เหล็ก ประกอบด้วย 2 ทิศทาง คือการตั้งสนามแม่เหล็กขนานกับขั้วไฟฟ้าดัดแปลง และตั้งในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้า โดยความแรงของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.18 เทสลาตรวจวัดค่าความแรงของสนามแม่เหล็กด้วย เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก(Hall sensor) พบว่าการตรวจวัดกลูเตนเมื่อสนามแม่เหล็กทั้งทิศขนานและตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าค่ากระแสไฟฟ้ามียค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นทิศของสนามแม่เหล็กจึงไม่มีผลต่อการตรวจวัดหรือการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณในการตรวจวัด แสดงดังรูปที่

4.15 ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทุกทิศทางซึ่งเคลื่อนไปหาขั้วไฟฟ้า เมื่ออนุภาคนาโนแม่เหล็กพารายิ่งยวดอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กสปินจะหันไปทิศทางเดียวไม่ว่าจะในทิศทางนานหรือตั้งฉาก ส่งผลให้ลดการกระเจิงจากสปินของอิเล็กตรอน (spin dependent scattering) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ดี (enhance carrier mobility) ความต้านทานจึงลดลง ดังนั้นทิศทางจึงไม่มีผลอย่างเห็นได้ชัดในการตรวจวัด

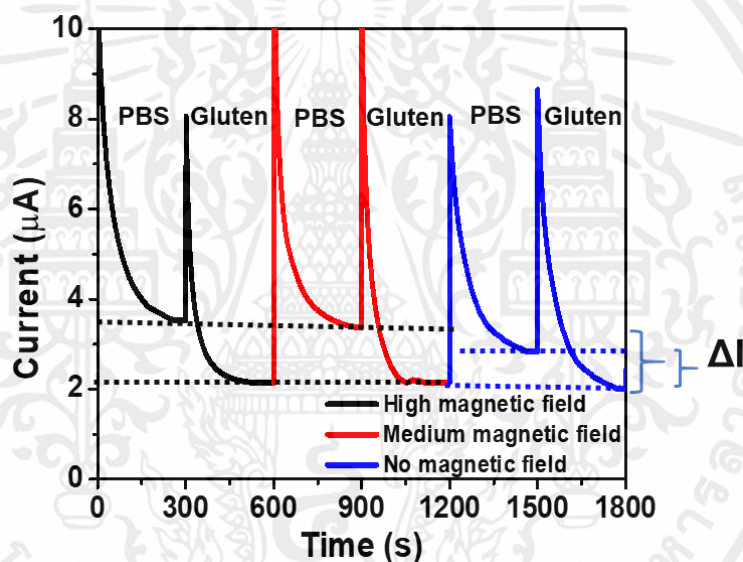


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบทิศทางของสนามแม่เหล็กในการตรวจวัดสารละลายกลูเตน

4.3.6.2 อิทธิพลของความแรงสนามแม่เหล็ก

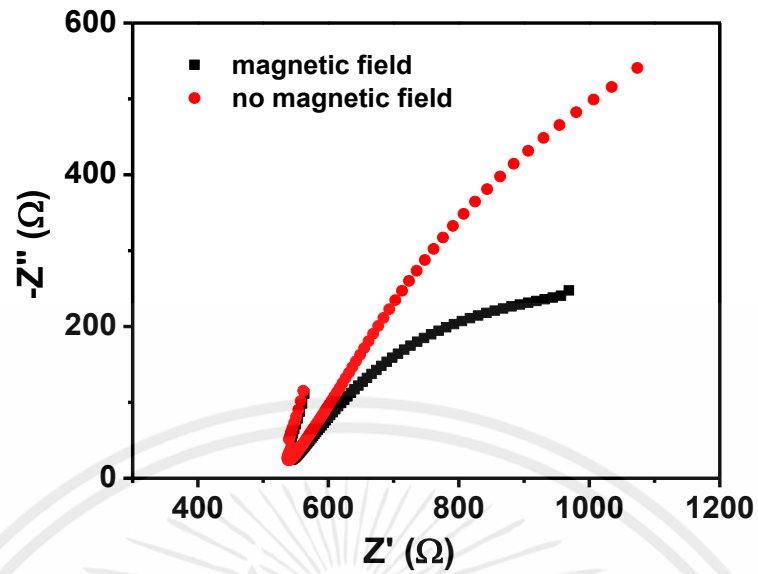
การทดสอบการตรวจวัดกลูเตนโดยเปรียบเทียบความแรงของสนามแม่เหล็กที่ 0.18 เทสลา 0.08 เทสลา และแบบไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก จากรูปที่ 4.16 พบว่าการตรวจวัดกลูเตนเมื่อมีสนามแม่เหล็กที่ 0.18 เทสลา และ 0.08 เทสลามีค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างของกระแสไฟฟ้าระหว่างสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์และสารละลายกลูเตนที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ในกรณีการตรวจวัดแบบไม่มีสนามแม่เหล็กสามารถตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้เช่นกัน แต่พบว่าค่าความต่างของกระแสไฟฟ้าระหว่างสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์และสารละลายกลูเตนมีค่าน้อยกว่าการตรวจวัดแบบมีสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของแมกนีไทต์ถูกดักแปลงขั้วไฟฟ้าร่วมกับพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล อนุภาคของแมกนีไทต์มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีและมีคุณสมบัติแม่เหล็กยิ่งยวด ซึ่งแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กเมื่อมีสนามแม่เหล็ก จะเกิดจากการบังคับการหมุนของสปินในชั้นดี-ออร์บิทัล (d-orbital) ของแมกนีไทต์ซึ่งมีความเสถียรและไม่รับอิเล็กตรอนเมื่อมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ จะเกิดการผลักออกหรือส่งผ่านอิเล็กตรอน เป็นผลให้เมื่อขั้วไฟฟ้าเกิดการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า

เกิดปฏิกิริยาของสารละลายอิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าซึ่งถูกตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับแมกนีไทต์ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่โดยการกระโดดข้ามผ่านอนุภาคของแมกนีไทต์อันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ ใจแอนท์แมกนีโตริซิสแทนท์ คือเมื่อสปินจะหันไปทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้ลดการกระจายของอิเล็กตรอน (spin dependent scattering) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ดี (enhance carrier mobility) ความต้านทานจึงลดลง ค่ากระแสจึงเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้การวิเคราะห์สอดคล้องกับผลของเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีจากรูปที่ 4.17 ในควิสต์พล็อตเปรียบเทียบการตรวจวัดแบบมีสนามสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก พบว่าการตรวจวัดที่มีสนามแม่เหล็กกราฟมีความชันน้อยกว่า สามารถอธิบายได้ว่าขณะมีสนามแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนภายใต้สนามแม่เหล็กได้ดีส่งผลให้ความต้านทานน้อยกว่าการตรวจวัดแบบไม่มีสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความแรงของสนามแม่เหล็กที่ 0.18 เทสลา 0.08 เทสลา และแบบไม่มีสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 โนควิสต์พล็อตเปรียบเทียบการตรวจวัดแบบมีสนามสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาสอดคล้องกับจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ในการทำงานวิจัย ซึ่งกระบวนการในการดำเนินงาน การดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้า การตรวจวิเคราะห์ลักษณะและสัญญาณวิทยาด้วยเทคนิคต่าง ๆ การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้สำหรับตรวจวัดกลูเตน โดยงานวิจัยนี้ทำการดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดเพื่อตรวจวัดกลูเตนด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการดำเนินการดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดเพื่อตรวจวัดกลูเตนด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยเริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดด้วยปฏิกิริยาเคมี เมื่อทำพิสูจน์ลักษณะและคุณสมบัติแม่เหล็กโดยทำการตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องมือทีมีเตอร์แบบตัวอย่างสั้น พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์เป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็ก มีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร และมีคุณสมบัติความเป็นพาราอิมยวดแม่เหล็กยิ่งยวดอนุภาคที่สังเคราะห์จึงสรุปได้ว่าเป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวด หลังจากนั้นเมื่อนำอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดมาดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าร่วมกับพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลของกลูเตนได้ทำการวัดวิเคราะห์สัญญาณวิทยาของพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าดัดแปลงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งพบว่าขั้วที่ถูกดัดแปลงพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดมีลักษณะเกิดช่องว่างขนาดเล็กและมีการกระจายของอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราอิมยวดทั่วทุกบริเวณ หลังจากนั้นจึงทำการตรวจวัดสารละลายกลูเตนด้วยกระบวนการเชิงเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี แอมแปร์เมตรี และอิเล็กโทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์สเปกโทรเมตรี จากผลการทำการวิจัยพบว่าขั้วไฟฟ้าดัดแปลงมีความจำเพาะเจาะจงต่อการตรวจวัดโมเลกุลกลูเตน สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของกลูเตนระหว่าง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความไวในการตอบสนองเท่ากับ 4.192×10^3 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นกลูเตนต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าการตรวจวัดที่มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนด (20 มิลลิกรัมต่อลิตร) นอกจากนี้เมื่อทดสอบความเสถียรภาพในสร้างขั้วไฟฟ้า เนื่องจากขั้วไฟฟ้าดัดแปลงถูกเตรียมด้วย

เคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยงทุกชั่วโมงทำให้ชีวไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการทำงานที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งชีวไฟฟ้าดัดแปลงสามารถใช้ตรวจวัดโมเลกุลกลูเตนซ้ำได้ 5 ครั้ง

5.1 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการศึกษาต่อ

1. การจัดเก็บชีวไฟฟ้าดัดแปลงควรหลีกเลี่ยงความชื้นและแสงแดดเพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งาน
2. เพื่อเป็นประโยชน์ในการตรวจวัดสารโมเลกุลขนาดใหญ่โมเดลการตรวจวัดสารละลายกลูเตนด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดโมเลกุลสารชนิดอื่น ๆ ด้วยคุณสมบัติทั้งความไวในการตอบสนอง ความจำเพาะเจาะจง สามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์พกพาสะดวกต่อการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] N. Fortin, “The Food Allergen Labeling and Consumer Protection Act: The Requirements Enacted”. Challenges Presented, and Strategies Fathomed, 2006.
- [2] J.B. Roses, “Food allergen law and the Food Allergen Labeling and Consumer Protection Act of 2004: falling short of true protection for food allergy sufferers”, Food and drug law journal, 66 (2011) 225-242, ii.
- [3] P. Jnawali, V. Kumar and B. Tanwar, “Celiac disease: Overview and considerations for development of gluten-free foods”, Food Science and Human Wellness, 5 (2016) 169-176.
- [4] C. Don and P. Koehler, “Enzyme-Linked Immunosorbent Assays for the Detection and Quantitation of Gluten in Cereal-Based Foods” Cereal Foods World, vol. 59, 2014, pp.171-178.
- [5] Y. Qian, K. Preston, O. Krokhin, J. Mellish and W. Ens, “Characterization of wheat gluten proteins by HPLC and MALDI TOF mass spectrometry” Journal of the American Society for Mass Spectrometry, vol.19(10), 2008, pp.1542-50.
- [6] K. Anne Scherf, “Impact of the preparation procedure on gliadin, glutenin and gluten contents of wheat starches determined by RP-HPLC and ELISA” European Food Research and Technology, vol.242(11), 2016 pp.1837-1848.
- [7] เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ, 2542.
- [8] X. Zhu and L. Shi, “Chapter 9 - Electrochemistry, in: G. Li (Ed.) Nano-Inspired Biosensors for Protein Assay with Clinical Applications”, Elsevier, 2019, pp. 209-236.
- [9] เบญจพล ตันฐ์, “เอกสารคำสอน วิชานาโนเซนเซอร์”, pp. 138-217.
- [10] D.L. Langhus, “Analytical Electrochemistry, 2nd Edition (Wang, Joseph)”, Journal of Chemical Education, 78 (2001) 457.
- [11] M. McKinnon and J. Rochford, “Chapter 3.20 - Principles of Electrocatalysis, in: B. Török, T. Dransfield (Eds.) Green Chemistry”, Elsevier, 2018, pp. 695-727.

[12] O. Abollino, A. Giacomino and M. Malandrino, “Voltammetry | Stripping Voltammetry”, in: P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, M. Miró (Eds.) *Encyclopedia of Analytical Science* (Third Edition), Academic Press, Oxford, 2019, pp. 238-257.

[13] D. Pletcher, R. Greff, R. Peat, L.M. Peter and J. Robinson, “6 - Potential sweep techniques and cyclic voltammetry”, in: D. Pletcher, R. Greff, R. Peat, L.M. Peter, J. Robinson (Eds.) *Instrumental Methods in Electrochemistry*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 178-228.

[14] E.P. Achterberg, M. Gledhill and K. Zhu, “Voltammetry—Cathodic Stripping”, in: *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, Elsevier, 2018.

[15] R.J. Forster and L.R. Cumba, “Voltammetry | Cyclic Voltammetry of Organic Compounds”, in: P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, M. Miró (Eds.) *Encyclopedia of Analytical Science* (Third Edition), Academic Press, Oxford, 2019, pp. 197-208.

[16] A.K. Sarma, P. Vatsyayan, P. Goswami and S.D. Minter, “Recent advances in material science for developing enzyme electrodes”, *Biosensors and Bioelectronics*, 24 (2009) 2313-2322.

[17] E.-M. Laux, F.F. Bier and R. Hölzel, “Electrode-based AC electrokinetics of proteins: A mini-review”, *Bioelectrochemistry*, 120 (2018) 76-82.

[18] A.F.T. Waffo, C. Yesildag, G. Caserta, S. Katz, I. Zebger, M.C. Lensen, U. Wollenberger, F.W. Scheller and Z. Altintas, “Fully electrochemical MIP sensor for artemisinin”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 275 (2018) 163-173.

[19] A. Motaharian, M.R.M. Hosseini and K. Naseri, “Determination of psychotropic drug chlorpromazine using screen printed carbon electrodes modified with novel MIP-MWCNTs nano-composite prepared by suspension polymerization method”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 288 (2019) 356-362.

[20] P. Prabhu, V. Dhawan, C. Fernandes and D. Soares, “Chapter 13 - Recent progress on nanofabrication of molecularly imprinted polymers”, in: A. Barhoum, A.S.H. Makhoulf

(Eds.) *Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures*, Elsevier, 2018, pp. 385-409.

[21] F.W. Scheller, X. Zhang, A. Yarman, U. Wollenberger and R.E. Gyurcsányi, “Molecularly imprinted polymer-based electrochemical sensors for biopolymers, *Current Opinion in Electrochemistry*”, 14 (2019) 53-59.

[22] P.S. Sharma, A. Wojnarowicz, W. Kutner and F. D'Souza, “9 - Molecularly Imprinted Polymers as Synthetic Catalysts”, in: S. Li, S. Cao, S.A. Piletsky, A.P.F. Turner (Eds.) *Molecularly Imprinted Catalysts*, Elsevier, Amsterdam, 2016, pp. 183-210.

[23] J.-J. Du, R.-X. Gao, H. Yu, X.-J. Li and H. Mu, “Selective extraction of dimethoate from cucumber samples by use of molecularly imprinted microspheres”, 2014.

[24] Y. Fuchs, O. Soppera and K. Haupt, “Photopolymerization and photostructuring of molecularly imprinted polymers for sensor applications—A review”, *Analytica Chimica Acta*, 717 (2012) 7-20.

[25] S. Ansari and S. Masoum, “Molecularly imprinted polymers for capturing and sensing proteins: Current progress and future implications”, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 114 (2019) 29-47.

[26] S. Ansari, “Application of magnetic molecularly imprinted polymer as a versatile and highly selective tool in food and environmental analysis: Recent developments and trends”, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 90 (2017) 89-106.

[27] C. Xu and S. Sun, “New forms of superparamagnetic nanoparticles for biomedical applications”, *Advanced drug delivery reviews*, 65 (2013) 732-743.

[28] W. Wu, Z. Wu, T. Yu, C. Jiang and W.S. Kim, “Recent progress on magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, surface functional strategies and biomedical applications”, *Science and technology of advanced materials*, 16 (2015) 023501.

[29] C. Su, “Environmental implications and applications of engineered nanoscale magnetite and its hybrid nanocomposites: A review of recent literature”, *Journal of Hazardous Materials*, 322 (2017) 48-84.

- [30] G. Cotin, F. Perton, C. Blanco-Andujar, B. Pichon, D. Mertz and S. Bégin-Colin, “Chapter 2 - Design of Anisotropic Iron-Oxide-Based Nanoparticles for Magnetic Hyperthermia”, in: R.M. Fratila, J.M. De La Fuente (Eds.) *Nanomaterials for Magnetic and Optical Hyperthermia Applications*, Elsevier, 2019, pp. 41-60.
- [31] Wahajuddin and S. Arora, “Superparamagnetic iron oxide nanoparticles: magnetic nanoplatforms as drug carriers”, *International journal of nanomedicine*, 7 (2012) 3445-3471.
- [32] N. Saxena and M. Singh, “Efficient synthesis of superparamagnetic magnetite nanoparticles under air for biomedical applications”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 429 (2017) 166-176.
- [33] B. Sodipo and A. Abdul Aziz, “Recent Advances in Synthesis and Surface Modification of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles with Silica”, 2016.
- [34] M. Mehrmohammadi, K.Y. Yoon, M. Qu, K.P. Johnston and S.Y. Emelianov, “Enhanced pulsed magneto-motive ultrasound imaging using superparamagnetic nanoclusters”, *Nanotechnology*, 22 (2010) 045502.
- [35] F. Long, Z. Zhang, Z. Yang, J. Zeng and Y. Jiang, “Imprinted electrochemical sensor based on magnetic multi-walled carbon nanotube for sensitive determination of kanamycin”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 755 (2015) 7-14.
- [36] Limthin, D., K. Chattrairat, P. Leepheng, S. Wisutthipat, P. Gansa, Annop Klamchuen, and D. Phromyothin. “Methyl Methacrylate Magnetic Molecularly Imprinted Polymer for Gluten Determination”, 29, 2019.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ดรรารวรรณ ลิมถิน
วันเดือนปีเกิด	23 มีนาคม 2537
ที่อยู่	21 หมู่ 3 ตำบลเหมาะ อำเภอกะปง จังหวัด พังงา
ประวัติการศึกษา	- ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนตะกั่วป่า “เสนาอนุกุล” จังหวัดพังงา - ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา เคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] D Limthin and D Phromyothin “Application of nanotechnology in Eichhornia crassipes extracts” Journal of Applied Science 16 (2017) 118-114
- [2] D Limthin, K Chattrairat, P Leepheng, S Wisutthipat, P Gansa, A Klamchuen, D Phromyothin “Methyl methacrylate magnetic molecularly imprinted polymer for gluten determination” Journal of Metals, Materials and Minerals 29 (2019) 1

การเข้าร่วมงานประชุมวิชาการ

- [1] Pure and Applied Chemistry International Conference February 2-3, 2017 Centra Government Complex Hotel & Convention Centre
- [2] Materials Research Society of Thailand International Conference 2017 31 October 2017 -3 November 2017, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand
- [3] International Conference on Science and Technology of Emerging Materials (STEMa2018), 18-20 July 2018 at Holliday Inn, Pattaya, Chonburi, Thailand
- [4] Southeast Asia Conference on Thermoelectrics ,14-17 December 2018 Empress Angkor Resort & Spa, Siem Reap, Cambodia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้