



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาอนุภาคนาโนแม่เหล็กสำหรับการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์
Development of magnetic nanoparticles for sensor applications

นางสาวดารินี พรหมโยธิน

นายสุธี ชูดีไพจิตร

นาย อติศร รักมิตร

ว่าที่ ร.ต. หญิง ภูสุภา เพ็ชรแบน

นายอนุชิต จารุณาววัฒน์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบวิจัยเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การพัฒนาอนุภาคนาโนแม่เหล็กสำหรับการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์
แหล่งเงิน เงินวิจัยเงินรายได้ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
ประจำปีงบประมาณ 2562 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 491,500 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2561 ถึง 30 กันยายน 2562

ชื่อ-สกุล นางสาวดารินี พรหมโยธิน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
นาย สุธี ชูดีไพจิตร วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
นาย อติศร รักมิตร. วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
ว่าที่ ร.ต. หญิง ภูสุภา เพ็ชรแบน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
นาย อนุชิต จารุณาวัดน์ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกเพื่อพัฒนาสำหรับการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยปฏิกิริยาเคมี พิสูจน์ลักษณะและคุณสมบัติแม่เหล็กโดยทำการตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์เป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็ก มีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร และมีคุณสมบัติความเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก หลังจากนั้นนำอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกมาประยุกต์ใช้งานตรวจวัดได้แก่การนำอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกมาขยายสัญญาณการตรวจวัดทางแสงและทางไฟฟ้า

คำสำคัญ : อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก, เซนเซอร์, การดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้า

Research Title: Development of magnetic nanoparticles for sensor applications

Researcher: Darinee Phromyothin College of Nanotechnology

Sutee Chutipaijit College of Nanotechnology

Adisorn Rakmit College of Nanotechnology

Poosuda Phatban College of Nanotechnology

Anuchit Jaruvanawat. College of Nanotechnology

ABSTRACT

Superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs), was studied and developed surface electrode for sensor applications. Magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles were synthesized by chemical reaction and then magnetic properties were characterized by X-ray diffractometer (XRD), transmission electron microscopy (TEM), and vibrating sample magnetometer (VSM), respectively. The average size of as-synthesized Fe_3O_4 nanoparticles as low as 10 nm. The iron oxide nanoparticles property was confirmed that exhibit superparamagnetism and can be magnetized by an external magnetic field. Fe_3O_4 magnetic nanoparticles have used in combination with the fluorescent and electrochemical measurement as well to improve the sensitivity of detection.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งเงินวิจัยเงินรายได้ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความร่วมมือของผู้ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว ที่ให้ข้อเสนอแนะและแก้ปัญหาเกี่ยวกับงานวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำหรับการสนับสนุนการทำงานวิจัยในทุกๆด้าน โดยเฉพาะการอนุเคราะห์ให้เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ และโปรแกรมทางเคมีสำหรับการคำนวณ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีทุกคน สำหรับความสำเร็จของงานวิจัยนี้

นางสาวดารินี พรหมโยธิน

นาย สุทธิ ชูดีไพจิตร

นาย อติสร รักมิตร

ว่าที่ ร.ต. หลิง ภูสุภา เพ็ชรแบน

นายอนุชิต จารุณาวัดณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แมกนีไทต์ (Magnetite; Fe ₃ O ₄).....	3
2.2 การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแมกนีไทต์.....	12
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	14
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	14
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์.....	15
3.2.1 สารเคมี.....	15
3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์.....	16
3.3 วิธีการทดลอง.....	17
3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็ก.....	17
3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กโมเลกุลาร์อิมพรินท์ พอลิเมอร์.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.3 การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบอนุภาคนาโนแม่เหล็กโม่เลกุลาร์อิมพรินท์ พอลิเมอร์.....	18
3.3.4 กระบวนการในการตรวจวัดวิเคราะห์สารตัวอย่าง	18
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	19
4.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วย กระบวนการตกตะกอนร่วม.....	19
4.2 การทดสอบคุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนี ไทต์.....	20
4.3 การเตรียมพื้นผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอนสำหรับใช้งานเซนเซอร์.....	22
4.4. การประยุกต์ใช้อุณหภูมิแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ในงานเซนเซอร์.....	23
4.4.1 การตรวจวัดไอออนแคดเมียมด้วยสารฟลูออเรสเซนซ์ที่เคลือบบน อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน.....	23
4.4.2 พอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ใน การตรวจวัดกลูเตน.....	26
4.4.3 พอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ใน การตรวจวัดเคซีน.....	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	33
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	34
เอกสารอ้างอิง.....	36
ภาคผนวก.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของแมกนีไทต์ และแมกนีไมต์.....	4
ภาพที่ 2.2 ทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนในโมเลกุลแมกนีไทต์.....	6
ภาพที่ 2.3 รูปแบบเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ.....	10
ภาพที่ 2.4 อิทธิพลของขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ซูเปอร์พาราแมกเนติก.	11
ภาพที่ 2.5 ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแมกนีไทต์ (MMIP) เพื่อตรวจวัด กานามัยซิน.....	12
ภาพที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของงานวิจัย.....	14
ภาพที่ 4.1 กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยกระบวนการ ตกตะกอนร่วม.....	19
ภาพที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้.....	20
ภาพที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน.....	21
ภาพที่ 4.4 เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิส (Hysteresis loop) ของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์.....	21
ภาพที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจากการถูกดัดแปลงพื้นผิว.....	23
ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของการตรวจวัดไอออนแคดเมียมด้วยสารฟลูออเรสเซนซ์ เซนเซอร์ที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน เมื่อมีการสนามแม่เหล็กภายนอก มาเหนี่ยวนำ.....	24
ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของการตรวจวัดไอออนแคดเมียมด้วยสารฟลูออเรสเซนซ์ เซนเซอร์ที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน และ (ข) กราฟระหว่างความแตกต่าง ของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์กับปริมาณความเข้มข้นของไอออนแคดเมียม.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ 4.8	ลักษณะของสารละลายก่อนการเรืองแสง.....	26
ภาพที่ 4.9	การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงแบบ ต่างๆ.....	27
ภาพที่ 4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (concentration) และกระแสไฟฟ้า (current) เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายกลูเตน.....	28
ภาพที่ 4.11	ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดเคซีนด้วยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบ ร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกที่ความเข้มข้น 0 เปอร์เซ็นต์ถึง 0.35 เปอร์เซ็นต์.....	29
ภาพที่ 4.12	การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงแบบ ต่าง ๆ.....	31
ภาพที่ 4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (concentration) และกระแสไฟฟ้า (current) เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายเคซีนโปรตีน.....	32
ภาพที่ 6.1	กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบ.....	34
ภาพที่ 6.2	ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจากการดัดแปลงพื้นผิว (a) ขั้วไฟฟ้าทำงานไม่ผ่าน การดัดแปลง (b) การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็ก แมกนีไทต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กแมกนีไทต์ ฮีมาไทต์ และแมกนีไมต์.....	4
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็ก ซุปเปอร์พาราแมกเนติก.....	8
ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	15
ตารางที่ 3.2	เครื่องมือวิเคราะห์ในงานวิจัย.....	16



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันอนุภาคนาโนแม่เหล็กถูกให้ความสนใจอย่างมากในการทำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ทั้งในด้านการแพทย์ในการนำไปใช้ด้านการนำส่งยา ในทางด้านชีวภาพใช้ในการแยกและทำโปรตีนหรือดีเอ็นเอให้มีความบริสุทธิ์ หรือทางด้านสิ่งแวดล้อมใช้ในการทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดหรือเซนเซอร์ เป็นต้น ซึ่งอนุภาคนาโนแม่เหล็กของเหล็กออกไซด์ (Magnetic nanoparticle, MNPs) สังเคราะห์ได้จากวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) ระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ในสารละลายที่มีสถานะเป็นเบส โดยอนุภาคที่ได้จะต้องอยู่ระหว่าง 6-30 นาโนเมตร จึงจะถือว่าเป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็ก จุดเด่นของอนุภาคนาโนแม่เหล็กคือ เภรมีอนุภาคขนาดระดับนาโนเมตรทำให้มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูง ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากอนุภาคแม่เหล็กนาโนมีความเสถียรภาพที่ต่ำ ทำให้เกิดการรวมตัวกันได้ง่าย ทำให้ต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความเสถียรภาพมากขึ้นด้วยสารลดแรงตึงผิว หรือประยุกต์ใช้งานร่วมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุเหล่านั้น หนึ่งใน การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กที่น่าสนใจคือการนำมาทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดหรือเซนเซอร์สารตัวอย่างในอาหาร และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในปัจจุบัน ผู้คนใส่ใจในด้านสุขภาพ และให้ความสำคัญกับปัญหาด้านสุขภาพมากขึ้น หลายคนมีอาการแพ้อาหารหลากหลายชนิด เช่น แพ้เคซีนในนมวัว แพ้กลูเตนในแป้ง เป็นต้น ซึ่งสารที่ก่อให้เกิดการแพ้หรือสารอันตรายที่ปนเปื้อนในอาหารและน้ำดื่ม โมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจในการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด หรือเซนเซอร์ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ทำการตรวจวัดสูง จากการจำลองแม่แบบของสารที่ต้องการตรวจวัดลงบนเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ อีกทั้งข้อดีของการใช้พอลิเมอร์ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดคือ สามารถออกแบบโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่สามารถเกิดพันธะเคมีที่เสถียรภาพกับสารเป้าหมายได้ แต่ในบางครั้งการทำงานของเทคนิคนี้เพียงอย่างเดียวอาจให้ค่าสัญญาณการตอบสนองที่ต่ำ ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กทำงานร่วมกับโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์ มาสังเคราะห์เป็นฟิล์มบนขั้วไฟฟ้าทำงานของเซนเซอร์ที่อ่านค่าสัญญาณด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี จุดเด่นของการทำงานร่วมกันนี้คืออุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้จะมีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดต่อโมเลกุลเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัด อีกทั้งยังมีค่าสัญญาณการตอบสนองที่สูงขึ้นซึ่งเป็นผลจากการใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็ก และมีความแม่นยำ และว่องไวในการตรวจวัดสารเป้าหมายอีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างและพัฒนาขั้วไฟฟ้าแบบอนุภาคแม่เหล็กโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์ (Magnetic nanoparticle Molecularly Imprinted Polymer electrode, MMIPs electrode) เพื่อทำการตรวจวัดสารเป้าหมาย ข้อดีของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้คือ มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารเป้าหมายที่ต้องการตรวจวัดสูง มีค่าสัญญาณการตอบสนองที่สูง มีความถูกต้องแม่นยำ และระยะเวลาในการทำงานรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถวัดสารที่มีความเข้มข้นต่ำได้ พร้อมทั้งนำขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปลงขึ้นไปประยุกต์ใช้งานในการวัดสารเป้าหมายในอาหาร และเครื่องดื่ม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมอนุภาคแม่เหล็กนาโนแมกนีไทต์ และศึกษาสมบัติเฉพาะทางแม่เหล็กของอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้น เช่นสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ขนาด และโครงสร้างของอนุภาค
2. ศึกษาการนำอนุภาคที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านเซนเซอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง กระบวนการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กในระดับนาโน ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของอนุภาคแม่เหล็ก เช่น ลักษณะและขนาดของอนุภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ลักษณะโครงสร้างของอนุภาค โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffractometer) การวิเคราะห์สมบัติอิสเทอร์ซิซิสเชิงแม่เหล็กโดยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น (VSM) และ พัฒนาศักยภาพของอนุภาคแม่เหล็กระดับนาโนโดยนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเซนเซอร์ โดยอนุภาคแม่เหล็กระดับนาโนจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณการตรวจวัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญที่ทำให้เข้าใจกลไกในการเพิ่มสัญญาณการตรวจวัดโดยใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กและนำไปสู่การศึกษาและวิจัยต่อยอดได้ในด้านต่างๆได้เช่นการประดิษฐ์โพรบชนิดใหม่ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานด้านนาโนเทคโนโลยีในการต่อยอดพัฒนาเซนเซอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

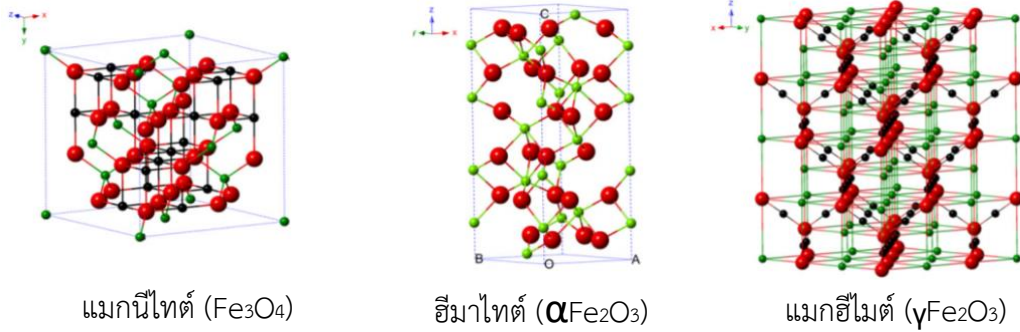
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนุภาคนาโนแม่เหล็กโดยเฉพาะอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์ (Magnetic Nanoparticle, MNPs) ได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นอนุภาคที่แสดงสมบัติทางแม่เหล็ก และสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้อย่างรวดเร็ว แต่การใช้งานอนุภาคนาโนแม่เหล็กโดยตรงยังมีข้อด้อย เนื่องจากมีความเสถียรภาพที่ต่ำ และอนุภาคสามารถรวมตัวกันได้ง่าย ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานจึงมีการใช้งานอนุภาคแม่เหล็กนาโนร่วมกับสารประกอบอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุ หรืออุปกรณ์นั้นๆ ให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำอนุภาคแม่เหล็กนาโนมาทำงานร่วมกับการพัฒนาเมมเบรนเซนเซอร์ ทำให้เซนเซอร์มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารต่างๆ ได้ดีขึ้น

2.1 แมกนีไทต์ (Magnetite; Fe₃O₄)

อนุภาคนาโนแม่เหล็ก (Iron Oxide Nanoparticles, IONs) ถูกนำมาใช้งานมากมายหลายด้านทั้งทางด้านการแพทย์ในการขนส่งทางยา ทางด้านสิ่งแวดล้อมในการตรวจวัดหรือดูดซับมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ทางด้านเคมีใช้งานเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า และอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง เป็นต้น เนื่องจากข้อดีของอนุภาคนาโนแม่เหล็กคือไม่มีความเป็นพิษกับร่างกาย สามารถเข้ากับวัสดุทางชีวภาพได้ดี และอีกทั้งยังเป็นอนุภาคที่มีความเสถียรมากเมื่อนำมาใช้ งาน และเนื่องด้วยคุณสมบัติการเป็นวัสดุนาโนส่งผลเป็นผลให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กมีคุณสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุทั่วไป เช่น ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางแสง ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้า หรือความเป็นแม่เหล็กพาราแมกเนติกที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุนี้เองเป็นผลให้อนุภาคแม่เหล็กนาโนได้รับความนิยมนำมาใช้ งานมากมายหลายด้วย โดยทั่วไปแล้วอนุภาคแม่เหล็กนาโนเป็นอนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 6-30 นาโนเมตร [1] โดยมีรูปผลึกอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ แบ่งตามลักษณะทางโครงสร้างผลึก คือ แมกนีไทต์ (Magnetite, Fe₃O₄) ฮีมาไทต์ (Hematite, α -Fe₂O₃) และแมกฮีไมต์ (Maghemite, γ -Fe₂O₃) ขึ้นอยู่กับวิธีการสังเคราะห์ [2] แสดงดังภาพที่ 2.1 ความแตกต่างกันของรูปร่างผลึกนี้ส่งผลให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติและความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็ก [3]



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของแมกนีไทต์ และแมกฮีไมต์

ที่มา: W. Wu et al., Science and technology of advanced materials, 16 (2015)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กแมกนีไทต์ ฮีมาไทต์ และแมกฮีไมต์

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
~230		โครงสร้างผลึก	-	77.75	1.043×10^{-3}
19		แท่ง	-	31	1.6×10^{-3}
46		ลูกบาศก์	-	10	6.1×10^{-4}
36		ลูกบาศก์	8.6	106	1.9
แมกฮีไมต์	4.6	ทรงกลมขรุขระ	55	510	-
	2.7	ทรงกลมขรุขระ	48	680	-
	~200	ทรงกระบอก	42.7	342.2	13.56

เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันที่แสดงข้างต้นทำให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กทั้ง 3 ชนิด มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก และลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน เป็นผลให้ทำให้มีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

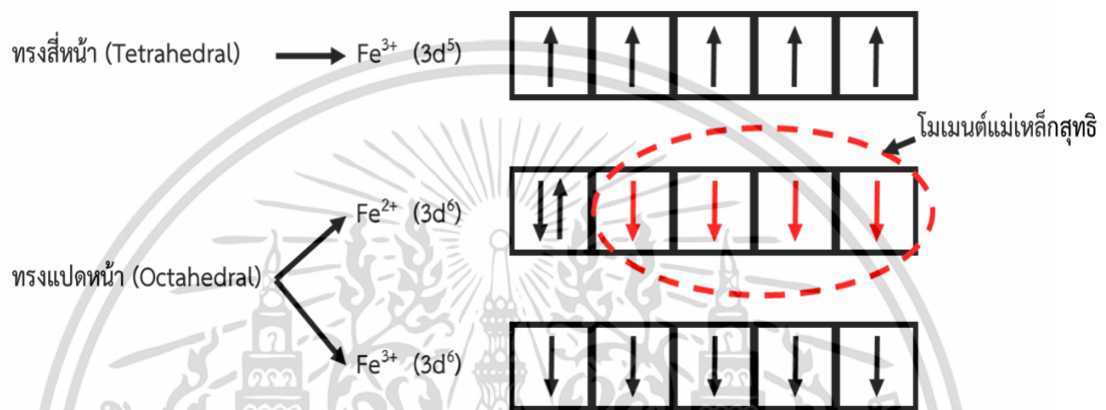
ประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน โดยแมกนีไทต์ และฮีมาไทต์ จะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุประเภทเซมิคอนดักเตอร์ชนิดเอ็นไอพีเหมือนกัน แต่มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน แมกนีไทต์รูปทรงส่วนใหญ่จะมีลักษณะทรงกลมขรุขระ ฮีมาไทต์จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกหรือลูกบาศก์ อนุภาคแม่เหล็กนาโนทั้งสองชนิดนี้นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และแก๊สเซนเซอร์ อีกทั้งยังมีข้อดีคือราคาถูก และมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง ส่วนแมกนีไทต์ อนุภาคส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลม และมีคุณสมบัติเด่นคือมีความเป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็กพาราแมกเนติก (Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles, SPIONs) ซึ่งทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้สภาวะมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากกระตุ้นได้ดีกว่าอนุภาคนาโนแม่เหล็กสองชนิดก่อนหน้านี้ นอกจากนี้อนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ยังมีคุณสมบัติเป็นทั้งเซมิคอนดักเตอร์ชนิดเอ็นไอพี และพีไอพี จึงทำให้อนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ได้รับความนิยมในการสังเคราะห์ และนำมาประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่นการทำเป็นเซนเซอร์ และตัวขนส่งทางยาทางการแพทย์ เป็นต้น

แมกนีไทต์เป็นสารประกอบออกไซด์ชนิดหนึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น Fe_3O_4 มีโครงสร้างผลึก 2 แบบคือแบบสปิเนล (Spinel) และแบบอินเวอร์สสปิเนล (Inverse spinel) โครงสร้างผลึก Spinel มีสูตรโมเลกุลทั่วไปทางเคมีแบบ AB_2O_4 ประกอบด้วย A มี 1 อะตอม ไอออนของโลหะมีค่าเวเลนซ์เท่ากับ +2 หรือเรียกว่า Divalent cation เป็นอะตอมของโลหะมีการจัดเรียงตัวแบบทรงสี่หน้า (Tetrahedral) และ B มี 2 อะตอม ไอออนของโลหะมีค่าเวเลนซ์เท่ากับ +3 หรือเรียกว่า Trivalent cation เป็นอะตอมของโลหะมีการจัดเรียงตัวแบบทรงแปดหน้า (Octahedral) โครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบ Inverse spinel มีการจัดเรียงในลักษณะของอะตอม A และ B อย่างละ 1 อะตอม จัดเรียงตัวแบบทรงแปดหน้า ซึ่งจะทำให้เหลืออะตอม B อีก 1 อะตอม โดยอะตอม B ที่เหลืออยู่ 1 อะตอมจะมีการจัดเรียงตัวแบบทรงสี่หน้า ดังภาพที่ 2.1 เนื่องจากแมกนีไทต์เกิดการรวมตัวกันของเหล็กเฟอร์รัส (ferrous iron, Fe^{2+}) จำนวน 1 อะตอม และ เหล็กเฟอร์ริก (Ferric iron, Fe^{3+}) จำนวน 2 อะตอม ส่งผลให้มีการจัดเรียงอะตอมของเหล็กเฟอร์รัสมีการจัดเรียงแบบอะตอม A ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวเฉพาะแบบทรงแปดหน้าเท่านั้น ขณะที่เหล็กเฟอร์ริกมีการจัดเรียงเป็นอะตอม B ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวแบบทรงแปดหน้า 1 อะตอมและ จัดเรียงตัวแบบทรงสี่หน้าอีก 1 อะตอม การจัดเรียงตัวของอะตอมแมกนีไทต์ในลักษณะนี้ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนทำให้แมกนีไทต์เกิดสมบัติความเป็นแม่เหล็ก

จากการจัดเรียงโครงสร้างระหว่างอะตอม และลักษณะการจัดเรียงตัวของธาตุของสารประกอบ ส่งผลให้เกิดสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยหลักกลศาสตร์ควอนตัม เนื่องจากภายในนิวเคลียสของอะตอมประกอบด้วยนิวคลีออนได้แก่โปรตอนและนิวตรอนเคลื่อนที่ทั้งในแนววงกลมและหมุนรอบตัวเอง หรือที่เรียกว่า สปิน โดยสปินภายนอก (โมเมนต์เชิงมุม ที่เกิดจากการเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอน) และสปินภายในที่เกิดจากการหมุนรอบ

ตัวเองของอิเล็กตรอน ส่งผลให้นิวเคลียสมีโมเมนต์แม่เหล็กเกิดขึ้น ทำให้สารมีสภาพความเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็ก โดยทั่วไปค่าของ magnetic moment อาจจะใช้ชื่อหนึ่งว่า Bohr magneton, μ_B ซึ่งมีค่าเท่ากับ $9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$ โดยการสปินของอิเล็กตรอนจะมีเพียงขึ้นและลงเท่านั้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนที่มีสมบัติเป็นแม่เหล็กขั้วคู่ (Magnetic dipole moment) สนามแม่เหล็กรวมของนิวเคลียสจะมีค่าเท่ากับศูนย์คือไม่แสดงสมบัติแม่เหล็ก ขณะที่สารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กนั้นเกิดจากการที่อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนมีการสปินขึ้นและลงไม่เท่ากัน เกิดขึ้นได้เฉพาะในกรณีที่อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่มีคู่ หรือ unpaired electron ในชั้นพลังงานย่อย ส่งผลทำให้ค่าโมเมนต์เชิงมุมหรือโมเมนต์แม่เหล็กมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ [4-5]



ภาพที่ 2.2 ทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนในโมเลกุลแมกนีไทต์

แมกนีไทต์เป็นวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กแบบกลุ่มเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) จากภาพที่ 2.2 แสดงทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนในโมเลกุลแมกนีไทต์ โดยทิศการสปินของอิเล็กตรอนในโครงสร้างอะตอมแมกนีไทต์มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนวงนอกในชั้นระดับพลังงาน d-orbital ทั้งในโครงสร้างแบบทรงแปดหน้าและทรงสี่หน้า โดยทิศการสปินของอิเล็กตรอนมีทิศตรงข้ามกัน ทั้งนี้เนื่องจากแมกนีไทต์เกิดการรวมตัวกันของเหล็กเฟอร์ไรต์ และเหล็กเฟอร์ริก ลักษณะการจัดเรียงสปินของอิเล็กตรอนของเหล็กเฟอร์ริกจะมีสปินของอิเล็กตรอนทั้งโครงสร้างทรงแปดหน้าและทรงสี่หน้าอย่างละครึ่ง ขณะที่ลักษณะการจัดเรียงสปินของอิเล็กตรอนเหล็กเฟอร์ไรต์จะมีสปินของอิเล็กตรอนเฉพาะการจัดเรียงโครงสร้างแบบทรงแปดหน้า โดยอะตอมที่มีจำนวนอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ (Unpaired electron) ในชั้นพลังงานย่อย เป็นผลให้ค่าโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิไม่เท่ากับศูนย์ ทำให้แมกนีไทต์มีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งบริเวณที่มีทิศของการสปินของอิเล็กตรอนหรือโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมหันไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่า โดเมนแม่เหล็ก (Magnetic domain) การรวมกันของโดเมนแม่เหล็กหลายๆโดเมนจะถูกกันด้วยกำแพงโดเมน (Domain wall) ซึ่งจะเป็นการคั่นระหว่างแต่ละโดเมน เนื่องจากอนุภาคแมกนีไทต์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีคุณสมบัติแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก คือ มีการจัดเรียงของโดเมนแม่เหล็กอย่างเป็นระเบียบและมีทิศทางขนานกันในบริเวณเล็กๆ ของโดเมน

แม่เหล็ก เมื่อใส่สนามแม่เหล็กภายนอกแมกนีไทต์จะแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็ก และจะคงแสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะแม่เหล็กอยู่แม้จะเอาสนามแม่เหล็กภายนอกออกก็ตาม หรือที่เรียกว่าเกิดสภาวะแม่เหล็กคงค้าง (Remanent magnetic) แต่เมื่อมีอนุภาคแมกนีไทต์มีขนาดเล็กมากพอก็จะทำให้กำแพงโดเมนมีค่าพลังงานไม่มั่นคงส่งผลให้ทั้งอนุภาคมีโดเมนแม่เหล็กเสมือนเป็นโดเมนแม่เหล็กเดี่ยว (Single magnetic domain) และเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงจนถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะทำให้โดเมนแม่เหล็กเดี่ยวมีความไม่เสถียรคือเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากระทำโดเมนแม่เหล็กภายในของอนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มทำให้วัสดุไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กตกค้าง และเมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากระทำโมเมนต์แม่เหล็กภายในแต่ละอนุภาคจะมีการหมุน และจัดเรียงตัวใหม่ตามทิศของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ทำให้เกิดสมบัติแม่เหล็กแบบใหม่ที่เรียกว่า พฤติกรรมแม่เหล็กพาราแมกเนติก (Superparamagnetic behavior) [5] ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกสามารถทำได้หลากหลายวิธีซึ่งให้ขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน ตารางที่ 2.2 แสดงกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก [3, 6]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก

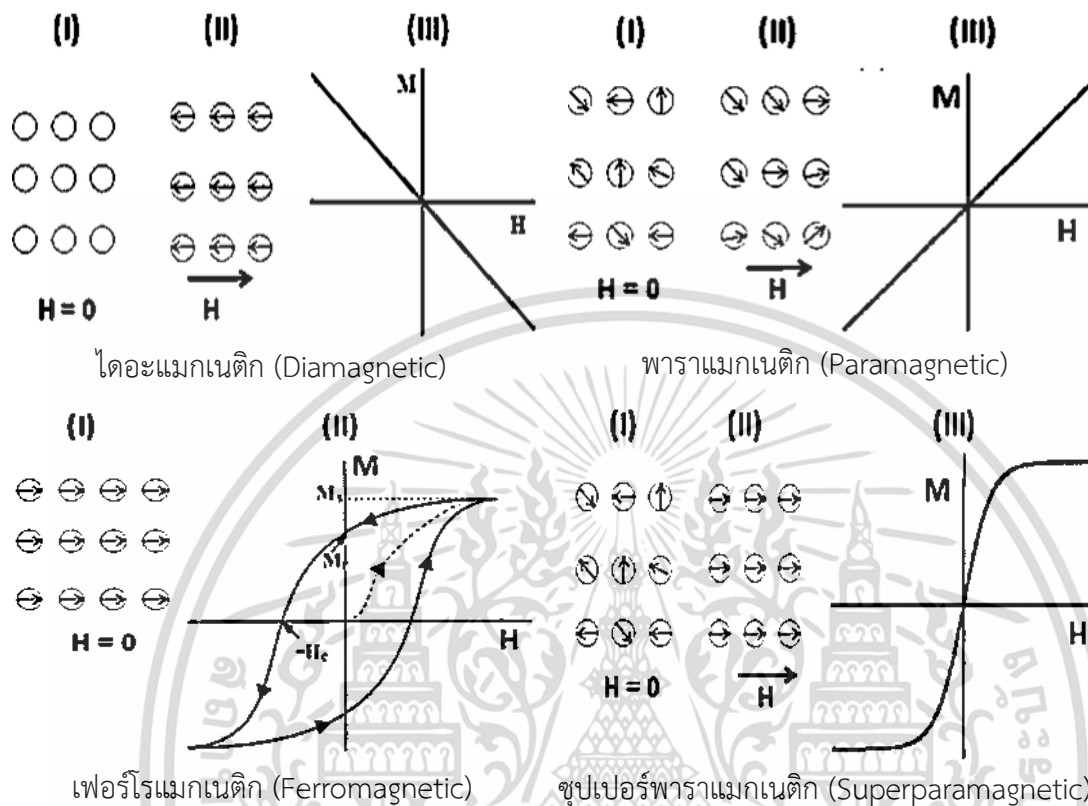
วิธีสังเคราะห์	กระบวนการและตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิในการสังเคราะห์ (°C)	ช่วงระยะเวลาในการสังเคราะห์	ความกระจายตัวของขนาดอนุภาค	การควบคุมรูปร่าง	ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้
การตกตะกอนร่วม	สังเคราะห์ง่าย ในรูปสารละลาย	20-150	หลายนาที	ค่อนข้างเล็ก	ไม่ดี	มาก
การแตกตัวด้วยความร้อน	กระบวนการซับซ้อน ภายใต้ความดันบรรยากาศ	100-350	หลายชั่วโมงถึงหลายวัน	ขนาดเล็กมาก	ดีมาก	มาก
ไฮโดรเทอร์มอลและเซอร์โวเทอร์มอล	สังเคราะห์ง่าย ภายใต้ความดันสูง	150-220	หลายชั่วโมงถึงหลายวัน	ขนาดเล็กมาก	ดีมาก	มาก
กระบวนการโซลเจล	กระบวนการซับซ้อนในรูปสารละลาย	25-200	หลายชั่วโมง	ขนาดเล็ก	ดี	ปานกลาง
ไมโครอิมัลชัน	กระบวนการซับซ้อน ในรูปสารละลาย	20-80	หลายชั่วโมง	ขนาดเล็ก	ดี	น้อย
วิธีโซโนไลซิส และโซโนเคมีคอล	สังเคราะห์ง่าย ในรูปสารละลาย	20-50	หลายนาที	ขนาดเล็ก	ไม่สามารถควบคุมรูปร่างได้	ปานกลาง
กระบวนการสังเคราะห์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	สังเคราะห์ง่าย ในรูปสารละลาย	100-200	หลายนาที	ขนาดกลาง	ดี	ปานกลาง
กระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ	กระบวนการซับซ้อน ในรูปสารละลาย	อุณหภูมิห้อง	หลายชั่วโมงถึงหลายวัน	ขนาดใหญ่	ไม่สามารถควบคุมรูปร่างได้	น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ตัวอย่างกระบวนการในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก

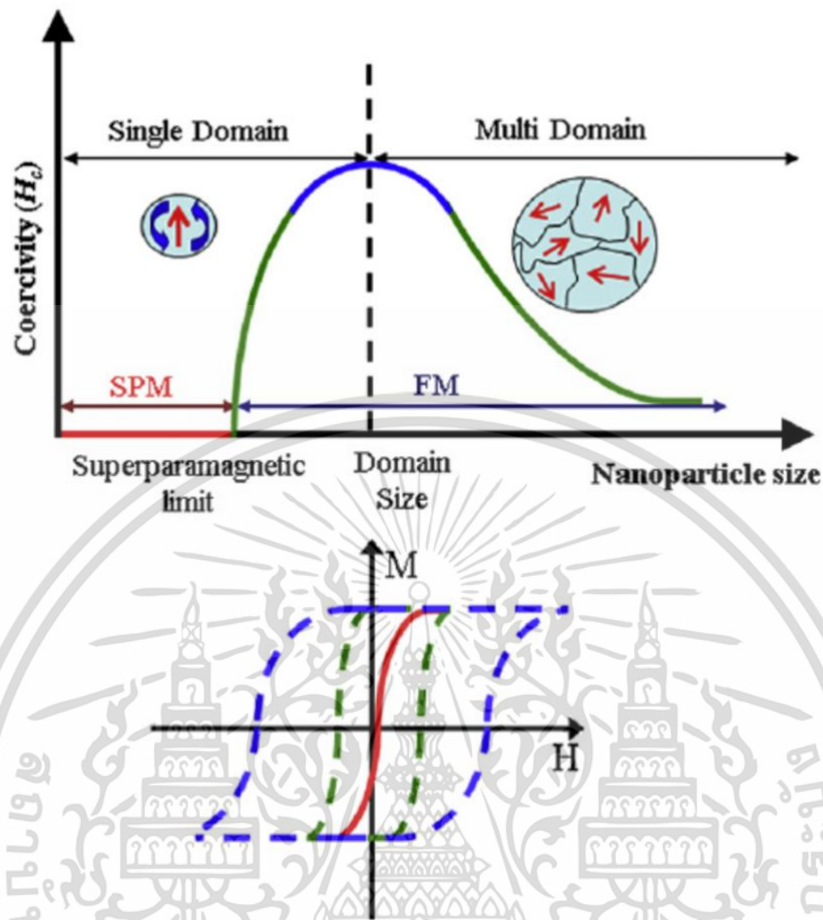
วิธีสังเคราะห์	กระบวนการ และตัวแปร ควบคุม	อุณหภูมิในการ สังเคราะห์ (°C)	ช่วงระยะเวลาใน การสังเคราะห์	ความกระจายตัว ของขนาด อนุภาค	การควบคุม รูปร่าง	ปริมาณ ผลิตภัณฑ์ที่ได้
กระบวนการ สังเคราะห์ทาง เคมีไฟฟ้า	กระบวนการ ซับซ้อนในรูป สารละลาย	อุณหภูมิห้อง	หลายชั่วโมง ถึงหลายวัน	ขนาดกลาง	ควบคุม ได้ปาน กลาง	ปานกลาง
วิธีแอร์โซลเวเปอร์	กระบวนการ ซับซ้อน ภายใต้ความ ดันบรรยากาศ	>100	หลายนาที ถึงหลาย ชั่วโมง	ค่อนข้างเล็ก	ควบคุม ได้ปาน กลาง	มาก

จากตารางที่ 2.2 เห็นได้ว่า การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกสามารถทำได้หลายหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic) นิยมวิเคราะห์จากรูปแบบของเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก (Magnetic Hysteresis curve) แสดงดังภาพที่ 2.3 อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกจะมีลักษณะรูปแบบเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็กที่แตกต่างจากแม่เหล็กชนิดอื่นๆ เป็นผลมาจากการที่มีโดเมนแม่เหล็กเป็นโดเมนเดี่ยว (Single domain) ของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีขนาดไม่เกิน 30 นาโนเมตร เมื่ออยู่ในสภาวะปกติปราศจากสนามแม่เหล็กภายนอก วัสดุหรืออนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดนี้จะประพฤติตัวเหมือนพาราแมกเนติก เมื่อมีการให้หรือกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่วัสดุ ทิศทางของแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันซึ่งประพฤติตัวเหมือนเฟอร์โรแมกเนติก และมีค่าแม่เหล็กคงค้างน้อยมาก หรือเทียบเท่าศูนย์จึงส่งผลให้ลักษณะของเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสแสดงดังภาพที่ 2.3 [7] นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติความเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 รูปแบบเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ
 (ที่มา: B. Sodipo, et al., Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2016.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.4 อิทธิพลของขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่มีผลต่อคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก

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

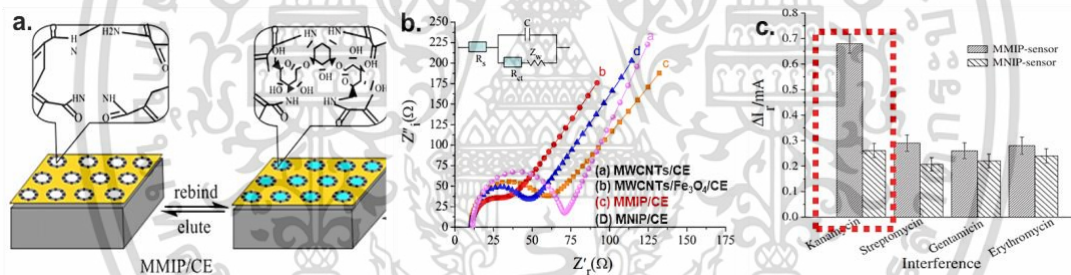
จากภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นคุณสมบัติความเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกของอนุภาคนาโนแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยขนาดของอนุภาคนาโนแม่เหล็กเนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญที่ทำให้วัสดุ หรืออนุภาคแสดงสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกได้นั้นต้องมีความเป็นโดเมนเดี่ยว (Single domain) ในโครงสร้างผลึก แต่เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นผลให้ในโครงสร้างของอนุภาคมีหลายโดเมน (Multi domain) ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็กเสียสภาพความเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติกไป แสดงให้เห็นความเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสมีแม่เหล็กกว้างขึ้น หรืออาจบอกได้ว่าถ้าอนุภาคนาโนแม่เหล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นเกินขีดจำกัดของความเป็นโดเมนเดี่ยวในโครงสร้างหรือมีขนาดมากกว่า 30 นาโนเมตร จะส่งผลให้คุณสมบัติของอนุภาคนาโนแม่เหล็กนั้นเปลี่ยนไป คือจะประพฤติตัวเหมือนเฟอร์โรแมกเนติก ดังนั้นในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กให้ได้คุณสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติกนั้น สำคัญตั้งแต่การเลือกกระบวนการในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ เนื่องจากแต่ละกระบวนการจะให้ขนาด หรือการกระจายตัวของอนุภาค รวมถึงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน [8]

2.2 การดัดแปลงชีวไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแมกนีไทต์

จากงานวิจัยพบว่าการดัดแปลงชีวไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแมกนีไทต์เพื่อตรวจวัดอย่างจำเพาะเจาะจงและค่าการตอบสนองที่สูง Amal H.A และคณะ (2018) ได้ทำการดัดแปลงชีวไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแมกนีไทต์ (MMIP) เพื่อตรวจวัดกานามัยซิน(kanamycin) ซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะกลุ่มอะมิโนไกลโคไซด์ จากการทดลองพบว่า อนุภาคแมกนีไทต์ ช่วยเพิ่มการตอบสนองจากการเปรียบเทียบโดยการดัดแปลงชีวแบบอื่น ๆ สามารถยืนยันผลจากการตรวจวัดด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์ (electrochemical impedance spectroscopy : EIS) เนื่องจากมีค่าความต้านทานของระบบลดลงและต่ำที่สุด เป็นผลมาจากมีการไหลของอิเล็กตรอน (electron transfers) ในระบบเมื่อเทียบกับการดัดแปลงชีวแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ด้วยคุณสมบัติของพอลิเมอร์ลอกแบบ ส่งผลให้การตรวจวัดมีความจะเพาะเจาะจงต่อกานามัยซิน [9] ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ชีวไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแมกนีไทต์ (MMIP) เพื่อตรวจวัดกานามัยซิน
 a. แบบจำลองการตรวจจับด้วยดัดแปลงชีวไฟฟ้า b. ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์ (electrochemical impedance spectroscopy : EIS) c. การวิเคราะห์การตรวจวัดกานามัยซินอย่างจำเพาะเจาะจง

โดยในปี 2016 Eylem Turan และ Ferat Sahin [10] ได้มีการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนแม่เหล็กทำงานร่วมกับโมเลกุลาริมพรีนทีพอลิเมอร์ ในการตรวจวัดโอคราที่อกซิน เอ ซึ่งเป็นสารพิษที่เกิดจากเชื้อราในอาหาร ผลการวิจัยพบว่า เซนเซอร์มีความจำเพาะเจาะจงต่อโอคราที่อกซิน เอ อีกทั้งยังมีสัญญาณการตอบสนองที่มีความรวดเร็วในการตรวจวัด นอกจากอนุภาคแม่เหล็กนาโนสามารถช่วยเพิ่มค่าสัญญาณการตอบสนองในการตรวจวัดของเซนเซอร์ได้แล้ว คุณสมบัติเด่นของอนุภาคแม่เหล็กนาโนอีกอย่างหนึ่งคือสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกได้อย่างรวดเร็วจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกนี้ ส่งผลให้อนุภาคที่ทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัดแปลงมีความสามารถในการดูดซับสาร และปลดปล่อยสารที่ดีด้วยในปีเดียวกัน Sunil Kumar และคณะ [11] ทำการประยุกต์ใช้แม่เหล็กนาโนทำงานร่วมกับโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์ในการทำเซนเซอร์ตรวจวัดแมนโคแซ็บ ซึ่งเป็นสารกำจัดเชื้อราในพืช พบว่าเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการดูดซับแมนโคแซ็บได้ดี และสามารถใช้งานซ้ำได้ เนื่องจากสามารถล้างแมนโคแซ็บออกบริเวณที่ตรวจวัดได้ อีกทั้งเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมีค่าสัญญาณการตอบสนองที่ และความจำเพาะเจาะจงที่สูง สามารถวัดสารที่ความเข้มข้นต่ำๆ ได้ดี ในปี 2011 Wenlu Guo และคณะ [12] ได้ใช้คุณสมบัติในการดูดซับที่ดีภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกของอนุภาคแม่เหล็กนาโนในการแยก Bisphenol A (BPA) ออกจากสารละลาย จากงานวิจัยนี้พบว่าอนุภาคแม่เหล็กนาโนโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ที่ทำการดัดแปลงขึ้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับ และปลดปล่อย BPA ได้สูง อีกทั้งยังมีความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับ จากงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมาจะเห็นว่า การประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนแม่เหล็กร่วมกับโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์ในการทำเซนเซอร์ อนุภาคนาโนแม่เหล็กจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซนเซอร์ได้ ส่งผลให้ค่าสัญญาณการตอบสนองของเซนเซอร์สูงขึ้น และสามารถวัดสารที่ความเข้มข้นต่ำๆ ได้ดี มีความไวในการตอบสนอง และอีกทั้งยังมีสามารถดูดซับสารที่ต้องการตรวจวัดสูงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

แผนดำเนินงานโครงการวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
สังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็ก และทดสอบสมบัติทางกายภาพ	←————→											
หาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ อนุภาคนาโนแม่เหล็กกับเมม เบรนเซนเซอร์	←————→											
ทดสอบสมบัติทางกายภาพและ เคมีของขั้วเมมเบรน				←————→								
ทดสอบ range, accuracy, resolution, repeatability, stability, response time				←————→								
เขียนรายงานการวิจัยและ เผยแพร่ผลงานในงานประชุม วิชาการ									←————→			
สรุปเนื้อหาและทำรายงานฉบับ สมบูรณ์											←————→	

ภาพที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

3.2.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	ผู้ผลิต/ผู้จำหน่าย
Iron(III) chloride (FeCl_3)	SIGMA ALDRICH
Iron(III) chloride (FeCl_2)	SIGMA ALDRICH
Sodium hydroxide (NaOH)	MERCK
Polyvinyl alcohol (PVA)	SIGMA ALDRICH
Methyl methacrylate (MMA)	SIGMA ALDRICH
Ethylene glycol dimethacrylate (EDGMA)	MERCK
Azobisisobutyronitrile (AIBN)	SIGMA ALDRICH
Phosphate buffered saline (PBS)	SIGMA ALDRICH
3,3'-dibromo 2,2'-dithiophene ($\text{C}_8\text{H}_4\text{Br}_2\text{S}_2$)	SIGMA ALDRICH
2-methylbutylamine ($\text{C}_5\text{H}_{13}\text{N}$)	SIGMA ALDRICH
Sodium tertbutoxide (NaO-tBu)	SIGMA ALDRICH
Tris(dibenzylideneacetone)dipalladium(0) (Pd_2dba)	SIGMA ALDRICH
2,2'-bis(diphenylphosphino)-1,1'-binaphthyl ((s)-BINAP)	SIGMA ALDRICH
N-bromosuccenamide (NBR)	MERCK
4-formylphenylboronic acid ($\text{C}_7\text{H}_7\text{BO}_3$)	SIGMA ALDRICH
Tetrabutylammonium bromide (TBAB)	SIGMA ALDRICH
Potassium carbonate (K_2CO_3)	CARLO ERBA REAGENT
Tetrakis(triphenylphosphine)palladium ($\text{Pd}(\text{PPH}_3)_4$)	SIGMA ALDRICH
Sodium chloride (NaCl)	SIGMA ALDRICH
Silica gel (0.063-0.200 mm) (1.07734.1000)	MERCK
Thin layer chromatography (TLC, aluminium sheet)	MERCK
Cyanoacetic acid (A.R. grade)	CARLO ERBA REAGENT
Piperidene ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{N}$)	MERCK
Toluene (A.R. grade)	CARLO ERBA REAGENT
Tetrahydrofuran (THF, A.R. grade)	CARLO ERBA REAGENT
Dimethylformamide (DMF, A.R. grade)	CARLO ERBA REAGENT
Acetonitrile (A.R. grade)	CARLO ERBA REAGENT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	ผู้ผลิต/ผู้จำหน่าย
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mn}$	SIGMA ALDRICH
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Fe}$	SIGMA ALDRICH
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Co}$	SIGMA ALDRICH
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ni}$	SIGMA ALDRICH
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}$	SIGMA ALDRICH
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}$	SIGMA ALDRICH
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Hg}$	SIGMA ALDRICH
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cd}$	SIGMA ALDRICH
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$	SIGMA ALDRICH

3.2.1 เครื่องมือวิเคราะห์

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ในงานวิจัย

เครื่องมือวิเคราะห์	รุ่น/บริษัทของเครื่องมือวิเคราะห์
X-ray Diffractometer	XRD- smartlab, rigaku
Transmission Electron microscope	TEM, JEOL-JEM-2100
Field emission scanning electron microscope	FE-SEM, JEOL-JSM-7600F
Vibrating Sample Magnetometer	VSM, Lakeshore-model 7404
Potentiostat	Dropsens, Spain
FTIR spectroscopy	Perkin Elmer Model System-2000
UV-Visible spectroscopy	PG Instrument T90 ⁺
Fluorescence spectroscopy	PerkinElmer LS 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็ก (magnetic nanoparticle, MNPs)

อนุภาคนาโนแม่เหล็กสังเคราะห์ได้โดยวิธีการตกตะกอนร่วม (co-precipitation method) ระหว่าง Fe^{2+} และ Fe^{3+} ในอัตราส่วน 1:2 โดยโมล ในสารละลาย NaOH ที่มีค่าความเป็นด่างที่ (pH) 13.4 และทำการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน วิเคราะห์เอกลักษณ์หมู่ฟังก์ชันด้วยอินฟราเรดเทคนิค และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแม่เหล็กและเส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสของแม่เหล็ก ด้วยเครื่องวัดสมบัติแม่เหล็กแบบตัวอย่างสั้น และเนื่องจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรภาพต่ำ ทำให้สามารถเกิดการรวมตัวกันได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคโดยการเติมสารลดแรงตึง และลดการรวมตัวกันของอนุภาคแม่เหล็กนาโน

3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์

ในกระบวนการสังเคราะห์ MMIPs นี้ เริ่มจากการเตรียมโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์จากพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบขั้น (step polymerization) โดยในการสังเคราะห์ใช้เมทิลเมทาคริเลตเป็นมอนอเมอร์ เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต และ อะซิโอบิสไอโซบิวไทโรไนไตรท์ เป็นตัวเชื่อมโยงพอลิเมอร์ และ สารริเริ่ม ตามลำดับ และแม่แบบ (template) คือสารที่เราต้องการตรวจวัด โดยให้อัตราส่วน MMA : EDGMA : AIBN : template เป็น 1 : 0.5 : 5 : 2.5 โดยโมล ในกระบวนการสังเคราะห์ เริ่มจากการผสมสารละลาย MMA ที่ละลายอยู่ในคลอโรฟอร์มกับ template ลงในขวดก้นกลมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารตลอดเวลา เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีหลังจากนั้นทำการเติม EDGMA และ AIBN ตามลำดับเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์ที่ยังมีแม่แบบอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ หลังจากนั้นทำการล้างแม่แบบออกแล้วนำไปอบให้แห้ง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์ (molecularly imprinted polymer, MIPs) ที่มีแม่แบบโครงสร้างของสารที่ต้องการวัดอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ สำหรับในส่วนของขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนแม่เหล็กโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์ (magnetic nanoparticle molecularly imprinted polymer, MMIPs) เริ่มจากผสมสารละลายเมทิลเมทาคริเลต ที่ละลายอยู่ในคลอโรฟอร์ม กับแม่แบบและอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์ขึ้น ลงในขวดก้นกลมที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารตลอดเวลา เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีทำการเติม เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต และอะซิโอบิสไอโซบิวไทโรไนไตรท์ ตามลำดับ หลังจากนั้นทำทุกกระบวนการเหมือนในขั้นตอนการเตรียมโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์นี้คืออนุภาคนาโนแม่เหล็กโมเลกุลาร์อิมพริ้นท์พอลิเมอร์ที่มีแม่แบบของโครงสร้างของสารที่ต้องการวัดอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบอนุภาคนาโนแม่เหล็กโพลิเมอร์

ในการสร้างขั้วไฟฟ้านี้ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบสกรีนพริ้นท์ (screen printed electrode) โดยเริ่มจากการทำความสะอาดพื้นผิวขั้วไฟฟ้าด้วยน้ำปอลอดประจุ และเอทานอล หลังจากนั้นทำการตรอบสารละลายของอนุภาคนาโนแม่เหล็กโพลิเมอร์ที่อยู่ในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ในข้อ 3.3.2 ลงบนบริเวณขั้วไฟฟ้าทำงานของขั้วไฟฟ้า หลังจากนั้นทำการให้เกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างสมบูรณ์ ทำการล้างแม่แบบออกด้วยและทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากแห้งแล้วจะได้ขั้วไฟฟ้าอนุภาคแม่เหล็กโพลิเมอร์ (MMIPs electrode) บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานมีเมริกซ์พอลิเมอร์ที่มีแม่แบบโครงสร้างของสารที่ต้องการตรวจวัด หลังจากนั้นทำการตรวจสอบสัณฐานของพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปลงขึ้น

3.3.4 กระบวนการในการตรวจวัดวิเคราะห์สารตัวอย่าง

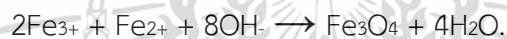
ในกระบวนการตรวจวัดวิเคราะห์สารตัวอย่างจะใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry, CV), แอมเปอร์โรเมทรี (Amperometry, AMP) โดยขั้นตอนการตรวจวัดทำการหดยสารละลายที่ต้องการตรวจวัดลงบนขั้วไฟฟ้าทั้งสามขั้วของขั้วสกรีนพริ้นท์ ซึ่งได้แก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน คือขั้วที่ทำการดัดแปลงคุณสมบัติให้มีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ด้วยอนุภาคแม่เหล็กโพลิเมอร์ ขั้วไฟฟ้าช่วย และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ในการตรวจวัดสารตัวอย่างทำการให้แม่เหล็กภายนอกแก่ขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปลงขึ้น หลังจากนั้นทำการบันทึกผล และวิเคราะห์ผลค่าสัญญาณที่ได้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

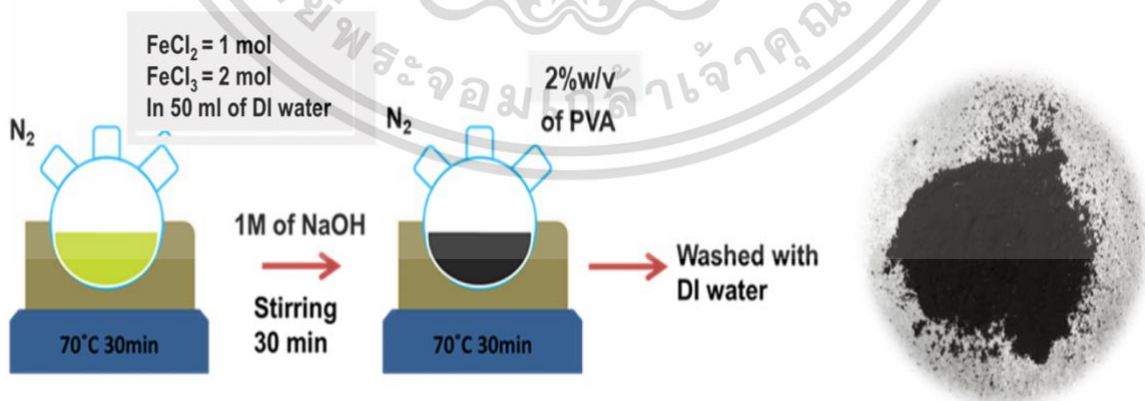
4.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกสังเคราะห์จากกระบวนการตกตะกอนร่วม โดยการเริ่มจากการผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) และเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) ในอัตราส่วน 2:1 โดยโมลในน้ำปอดประจุที่อุณหภูมิ 70 ± 5 องศาเซลเซียส ทำการกวนสารโดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสารที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กและควบคุมอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทท์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 1



สมการที่ 1

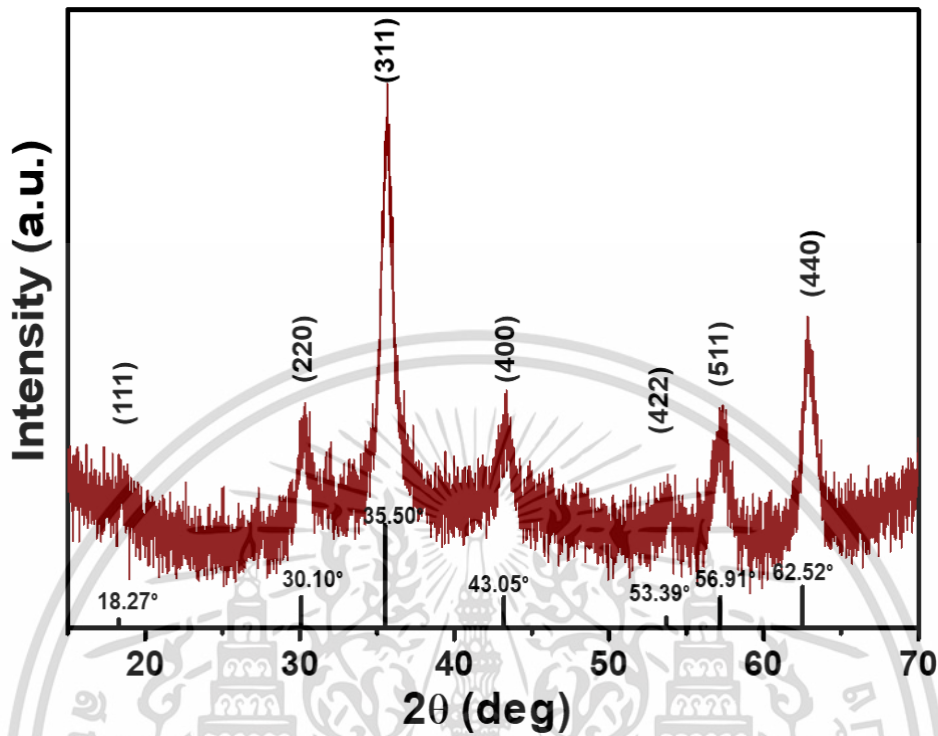
หลังจากนั้นทำการเติมสารลดแรงตึงผิวพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 2% โดยมวล เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่ได้ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ทำการลดอุณหภูมิของสารที่ได้ให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นทำการล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยน้ำปอดประจุ แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนได้ผงอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่แห้งสนิท เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้คืออนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทท์ หลังจากนั้นนำอนุภาคที่ได้ไปทำการตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และวัดคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 กระบวนการเตรียมอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วม

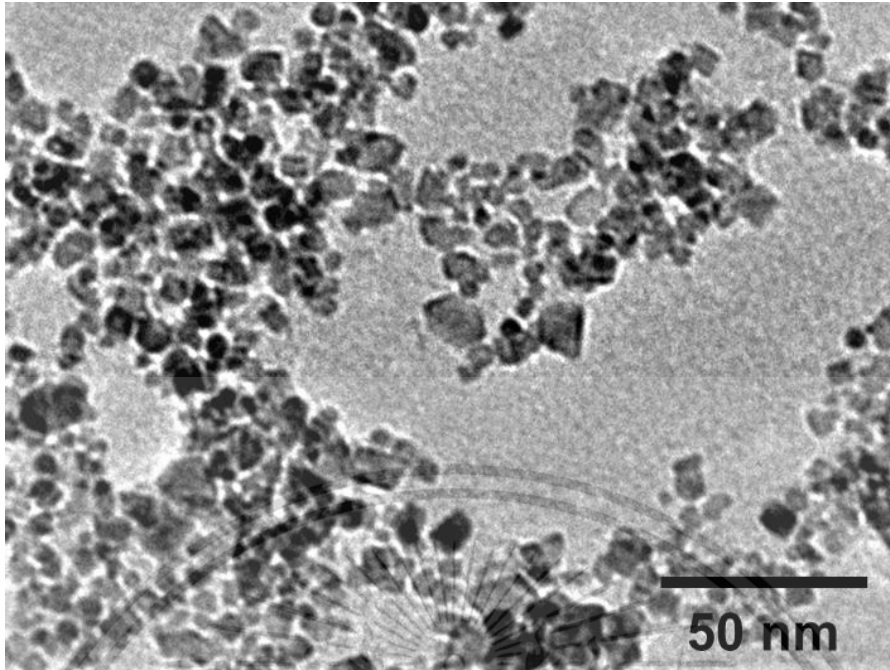
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบคุณลักษณะและคุณสมบัติของอนุภาคแม่เหล็กที่ยาวดแมกนีไทต์

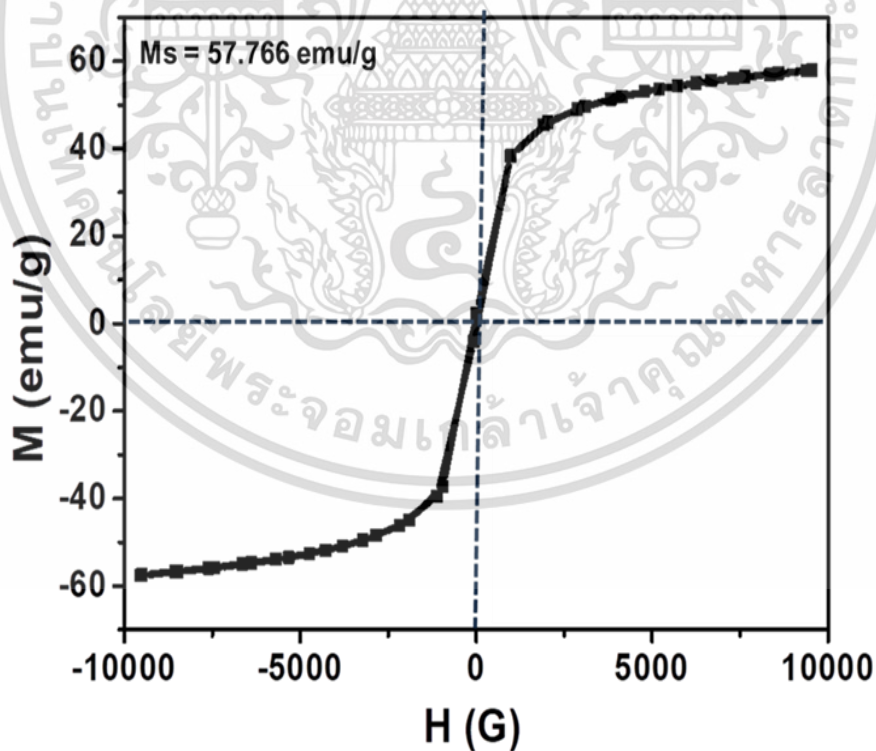


ภาพที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้

จากรูปแบบการวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง แสดงให้เห็นโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์ได้ซึ่งตรงกับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกอินเวอร์สสไปเนล ซึ่งตรงกับโครงสร้างผลึกของแมกนีไทต์ (Fe₂O₃) จากผลการวิเคราะห์นี้เป็นการยืนยันว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณขนาดของโครงสร้างผลึกจากสมการของเชอเรอร์ (Debye-Scherrer) ซึ่งคำนวณได้ขนาดของอนุภาคเท่ากับ 9.75 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านซึ่งมีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน



ภาพที่ 4.4 เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิส (Hysteresis loop) ของอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่สังเคราะห์

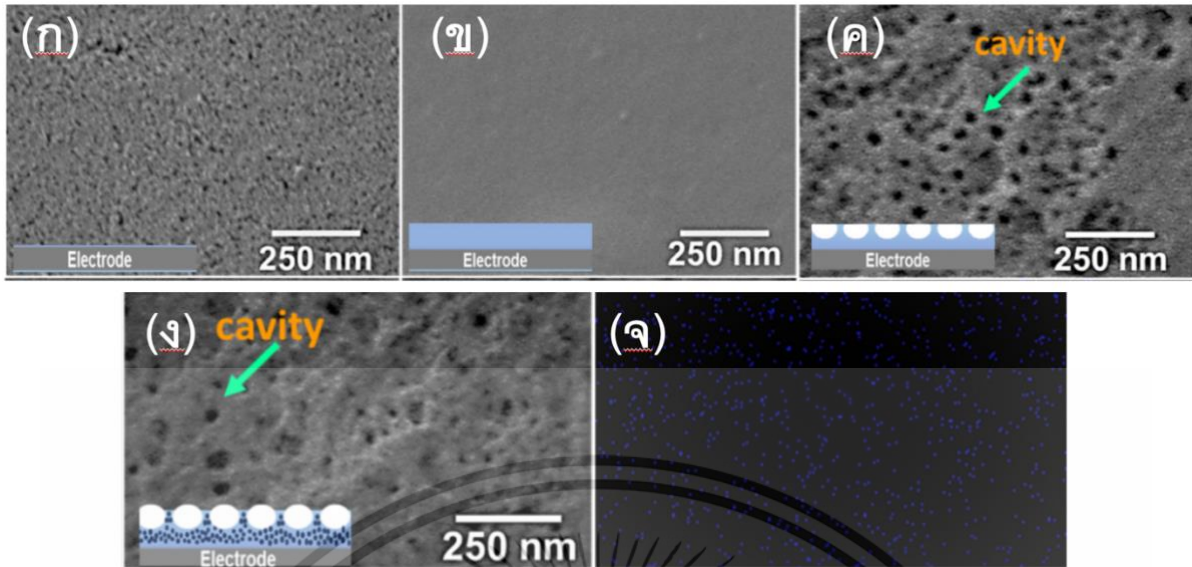
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคนาโนแม่เหล็กชนิดแมกนีไทต์ที่สังเคราะห์ได้พบว่า เส้นโค้งฮิสเตอร์เรซิสแสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.4 ซึ่งประพจน์ตัวเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก มีค่าแมกนีไทเซชัน เท่ากับ 57.766 emu/g

4.3 การเตรียมพื้นผิวขั้วไฟฟ้าคาร์บอนสำหรับใช้งานเซนเซอร์

การสังเคราะห์พอลิเมอร์การลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ บน ขั้วไฟฟ้าคาร์บอน การสังเคราะห์พอลิเมอร์การลอกแบบด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยมี อนุภาคนาโนแมกนีไทต์ เมทิลเมทาคริเลต เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลตและ เอโซบิสไอโซบิวทีโรไนไตรล์ ทำหน้าที่เป็นวัสดุ ช่วยเพิ่มสัญญาณ มอนอเมอร์ สารเชื่อมขวาง และ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตามลำดับ บนขั้วไฟฟ้าดัดแปลง แล้ว นำมาพิสูจน์พื้นผิวขั้วด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง และวิเคราะห์ผลด้วย เครื่องโพเทนชิโอสเตต ภาพที่ 4.5 เป็นการแสดงลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจากการถูกดัดแปลงพื้นผิว (ก) ขั้วไฟฟ้าทำงานไม่ผ่านการดัดแปลง (ข) การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ (ค) การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วย พอลิเมอร์การลอกแบบ (ง) การดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์การลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์ และ (จ) การกระจายตัวของธาตุไอรอนบนขั้วไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์การลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงซึ่งพบว่าลักษณะของขั้วที่ผ่านการลอกแบบ ของพอลิเมอร์ ภาพที่ 4.5 (ค) และ ภาพที่ 4.5 (ง) มีลักษณะขรุขระมีช่องว่างปรากฏทั้งนี้เกิดจากพอลิเมอร์ ผ่านการลอกแบบหรือการชะแม่แบบออกทำให้เกิดรอยพิมพ์ของแม่แบบหรือเกิดช่องว่างของแม่แบบบนพื้นผิว พอลิเมอร์ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.5 (ข) ขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ ทั้งนี้ จากผล การวิเคราะห์ธาตุไอรอนบนขั้วไฟฟ้าทำงานผ่านการดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์การลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็ก แมกนีไทต์พบว่ามี การกระจายตัวของอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์บนขั้วไฟฟ้าทำงานที่ดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์ดังภาพที่ 4.5 (จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



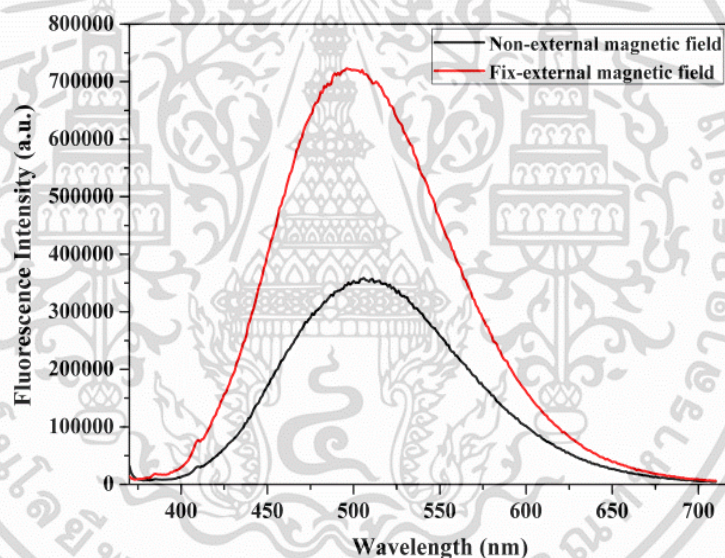
ภาพที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจากการถูกตัดแปลงพื้นผิว (ก) ขั้วไฟฟ้าทำงานไม่ผ่านการตัดแปลง (ข) การตัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ (ค) การตัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ (ง) การตัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์หลังชะแม่แบบ และ (จ) การกระจายตัวของธาตุเหล็กบนขั้วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง

4.4 การประยุกต์ใช้ออนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ในงานเซนเซอร์

4.4.1 การตรวจวัดไอออนแคดเมียมด้วยสารฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนที่เคลือบด้วยสารฟลูออเรสเซนต์เซนเซอร์ของสารในกลุ่มอนุพันธ์ของฟลูออรีนไดโอดีโนพีนอน

ในการตรวจวัดไอออนแคดเมียมแสดงสัญญาณที่แตกต่างกันเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกดังภาพที่ 4.6 สเปกตรัมฟลูออเรสเซนต์ของอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนที่เคลือบด้วยสารฟลูออเรสเซนต์ที่สังเคราะห์ขึ้น แสดงความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนต์เพิ่มขึ้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอก โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบสารฟลูออเรสเซนต์เซนเซอร์ของสารเรืองแสงบนพอลิเมอร์เมทิลเมทาคริลเลตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของฟลูออเรสเซนต์ที่เพิ่มขึ้นจากสมบัติแม่เหล็ก เมื่อมีแม่เหล็กภายนอกเข้ามาจะเหนี่ยวนำให้อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนเกิดการรวมตัวกันและเพิ่มสัญญาณฟลูออเรสเซนต์ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นในสารละลายฟลูออเรสเซนต์เซนเซอร์ของสารเรืองแสงที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนดังภาพที่ 4.6 จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณไอออนของแคดเมียม พร้อมทั้งเกิดการเลื่อนของความยาวคลื่นไปทางความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาเทียบกับสารละลายฟลูออเรสเซนต์เซนเซอร์ของสารในกลุ่มอนุพันธ์ของฟลูออรีนไดโอดีโนพีนอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

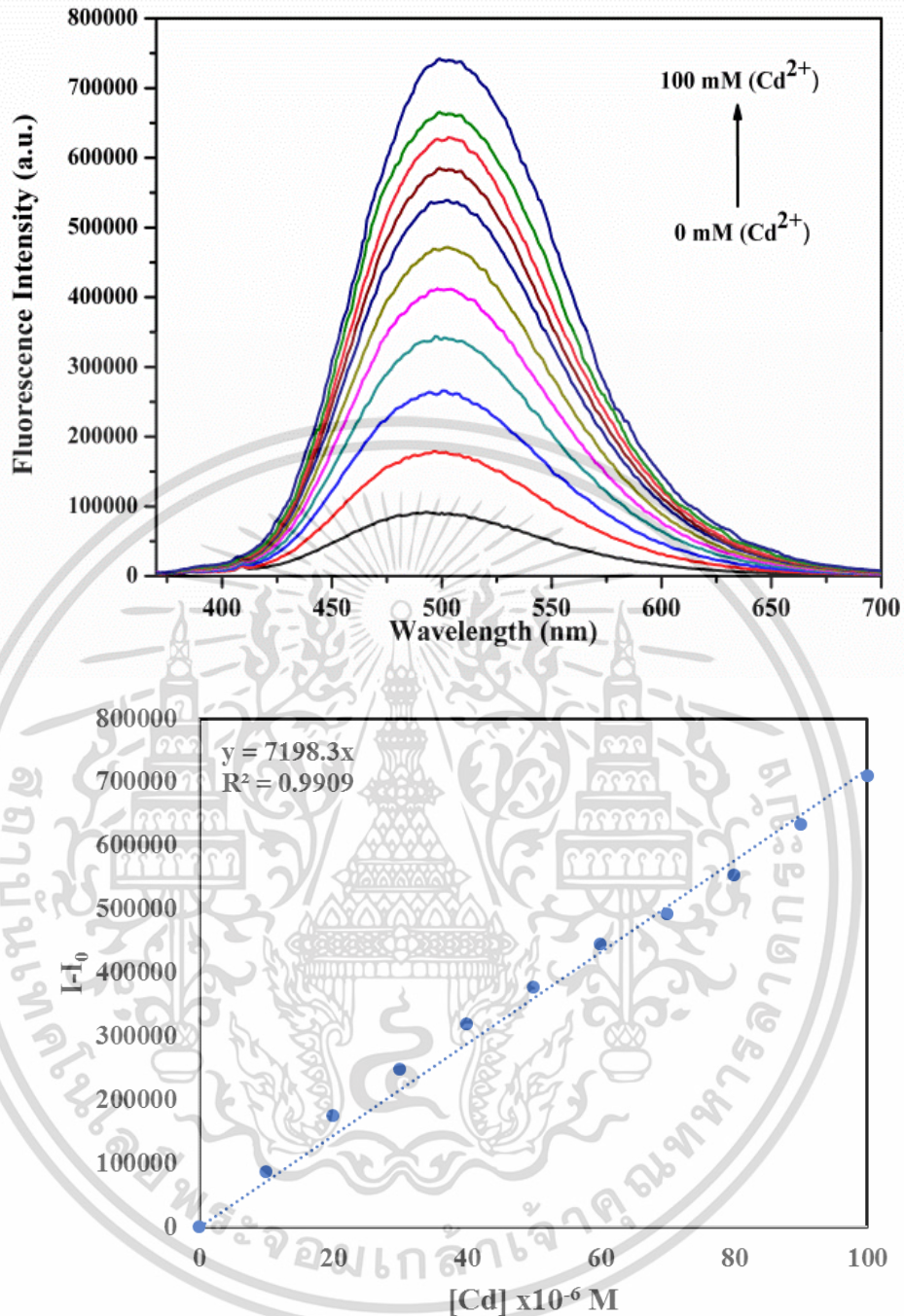
พบว่า การเคลือบสารฟลูออเรสเซนต์เซเชอร์ของสารเรืองแสง บนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสัญญาณที่มากกว่าสารละลาย ซึ่งเป็นผลมาจากการรวมตัวของอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพฟลูออเรสเซนต์ที่แสดงออกมา ในขณะที่การเคลื่อนของความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการตรวจวัดไอออนแคดเมียมในสารละลายฟลูออเรสเซนต์เซเชอร์ของสารเรืองแสง ซึ่งแสดงถึงผลการลดลงของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบบิตระหว่างโมเลกุลระหว่างเซเชอร์สารเรืองแสง และไอออนแคดเมียม เนื่องจากการเคลือบบนพอลิเมอร์เมทิลเมทาคริลเลตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโนแม่เหล็กนั้นทำให้โครงสร้างโมเลกุลเซเชอร์สารเรืองแสง เกิดการจำกัดการเคลื่อนไหวภายในโมเลกุล โดยค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดไอออนแคดเมียมพบว่ามีค่า 0.184 มิลลิกรัมต่อลิตรดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ข) ดังนั้น การเพิ่มความเข้มข้นของฟลูออเรสเซนต์ในการตรวจวัดไอออนแคดเมียม แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์เป็นฟลูออเรสเซนต์เซเชอร์ของสารเรืองแสงในการเคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนสามารถตรวจวัดปริมาณไอออนแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่ำลงเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมาเหนี่ยวนำได้



ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมฟลูออเรสเซนต์ของการตรวจวัดไอออนแคดเมียมด้วยสารฟลูออเรสเซนต์เซเชอร์ที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน เมื่อมีการสนามแม่เหล็กภายนอกมาเหนี่ยวนำ

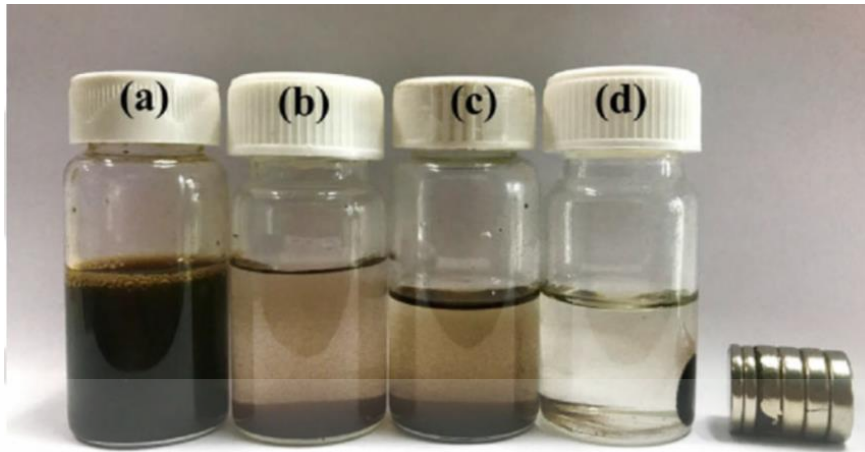
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)



ภาพที่ 4.7 (ก) สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ของการตรวจวัดไอออนแคดเมียมด้วยสารฟลูออเรสเซนซ์เซนเซอร์ที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน และ (ข) กราฟระหว่างความแตกต่างของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์กับปริมาณความเข้มข้นของไอออนแคดเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



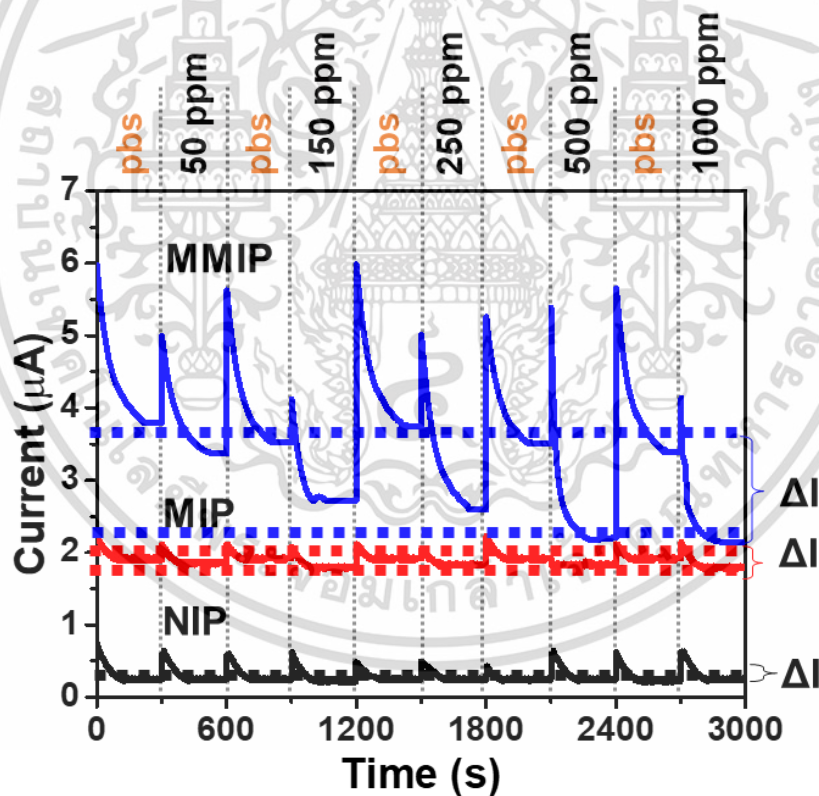
ภาพที่ 4.8 ลักษณะของสารละลายก่อนการเรืองแสง (a) สารละลาย SPIONs (b) PMMA/SPIONs nanoparticle (c) ฟลูออเรสเซนต์เซนเซอร์ที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน (d) ฟลูออเรสเซนต์เซนเซอร์ที่เคลือบบนอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอก

4.4.2 พอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ในการการตรวจวัดกลูเตน

งานวิจัยนี้ได้นำอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์มาใช้ตรวจวัดโปรตีนกลูเตนโดยดัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นการใช้เทคนิควิธีทางเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าประกอบด้วย แอมป์โรเมตรี และ โวลแทมเมตรี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าแล้วตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาเคมี จากผลการตรวจวัดสารละลายกลูเตนเชิงเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโวลแทมเมตรี เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าดัดแปลง โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ช่วง -1.4 โวลต์ ถึง -0.2 โวลต์ พบว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.87 โวลต์เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า โดยค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อตรวจวัดสารละลายกลูเตนที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (แกนนอน) และค่ากระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) การตรวจวัดจะทำการวัดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์สลับกับสารละลายกลูเตนซึ่งใช้เวลา 300 วินาทีต่อการตรวจวัด โดยเปรียบเทียบการดัดแปลงขั้วไฟฟ้าประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ ขั้วไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ และขั้วไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์ ที่ความเข้มข้นสารละลายกลูเตน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าขั้วดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ มีค่ากระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำมากหรือแทบจะไม่สามารถตรวจวัดได้ ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้าเป็นพอลิเมอร์ไม่นำไฟฟ้าเป็นผลให้การไหลของอิเล็กตรอนเป็นไปได้ยาก ขณะที่เมื่อดัดแปลงขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบ มีค่ากระแสที่เพิ่มสูงขึ้น เกิดจากพอลิเมอร์ลอกแบบเมื่อทำการลอกแบบกลูเตนจะทำให้เกิดช่องว่างและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ลดลง เป็นผลให้การไหลของอิเล็กตรอนเป็นไปได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความต่างของกระแสระหว่างสารละลายบัฟเฟอร์และสารละลายกลูเตนพบว่ามีความต่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

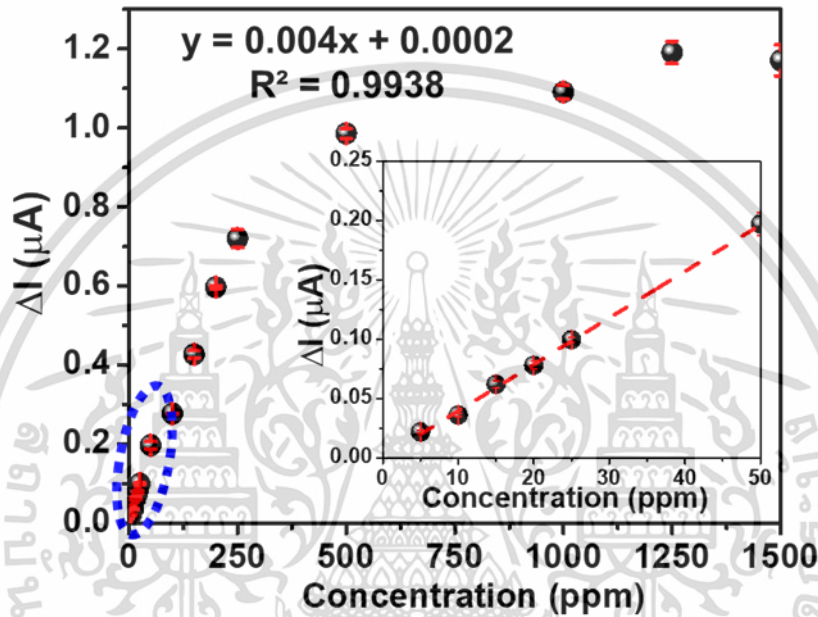
กระแสไฟฟ้าที่ค่อนข้างน้อย จึงได้นำอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์มาช่วยเพิ่มการไหลของอิเล็กตรอน จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์ มีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งมากกว่าขั้วไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ นอกจากนี้ค่าความต่างของค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างสารละลายบัฟเฟอร์และสารละลายกลูเตนยังมีค่าความต่างที่เห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลมาจากอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มค่าการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า สามารถดัดแปลงร่วมกับพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับทำพอลิเมอร์ลอกแบบได้ทำให้เกิดการไหลผ่านของอิเล็กตรอนได้ดีเป็นผลให้ค่าการตรวจวัดที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อตรวจวัดสารละลายกลูเตนเทียบกับสารละลายบัฟเฟอร์พบว่ามีค่าความต่างของกระแสที่เห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลมาจากการจับของอนุภาคกลูเตนและช่องว่างของพอลิเมอร์ลอกแบบทำให้ค่าสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปที่ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าสัญญาณในการตรวจวัดกลูเตนจะมีค่าลดลงทั้งนี้เป็นผลมาจากกลูเตนเป็นโปรตีนโมเลกุลใหญ่ไม่นำไฟฟ้าเมื่อทำการจับกับขั้วไฟฟ้าดัดแปลงทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของอิเล็กตรอนเป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าในการตรวจวัดกลูเตนที่ความเข้มข้นสูงมีค่าลดต่ำลง



ภาพที่ 4.9 การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงแบบต่างๆ ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ไม่ลอกแบบ (NIP) ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล (MIP) ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์การลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยี่งวดแมกนีไทต์ (MNIP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของสารละลายกลูเตนกับค่าสัญญาณ (calibration curve) ซึ่งสัญญาณที่ตรวจวัดได้จะอยู่ที่ช่วงความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าสัญญาณเริ่มคงที่ซึ่งเป็นค่าจำกัดของขั้วไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดได้ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ทั้งนี้ผลจากการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าพบว่าในช่วงความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตรได้สมการเส้นตรง $y = 0.004x + 0.0002$ โดยที่ $R^2 = 0.994$



ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (concentration) และกระแสไฟฟ้า (current) เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายกลูเตนที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 1500 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการเส้นตรงขั้วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กแมกนีไทต์จึงสามารถคำนวณค่าความไวในการตอบสนอง (sensitivity) เท่ากับ 4.192×10^3 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (limit of detection, LOD) เท่ากับ 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง LOD หาได้จาก $3.3(SD/m)$ เมื่อ SD= ค่า S.D. ของขั้วไฟฟ้า และ m คือ ความชันของสมการเส้นตรง ทั้งนี้ผลการตรวจวัดความเข้มข้นต่ำสุดของกลูเตนที่สามารถวัดได้มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดองค์การอนามัยโลกและองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (WHO/FAO) ว่าด้วยผู้ป่วยที่เป็นโรคแพ้กลูเตนไม่ควรบริโภคอาหารที่มีกลูเตนเกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

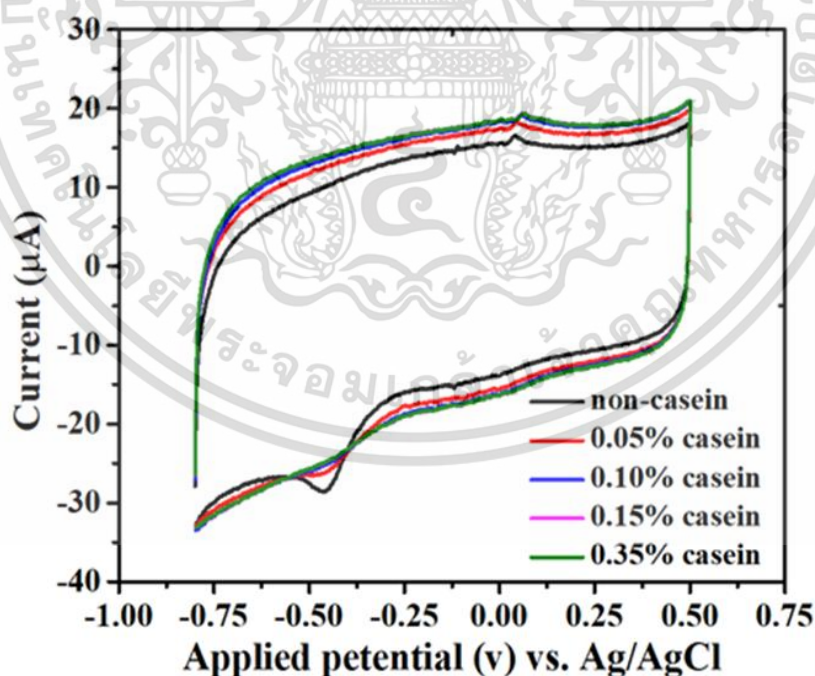
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 พอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ในการการตรวจวัดเคซีน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจวัดเคซีนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าโดยการดัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าโดยใช้วิธีสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูปเปอร์พาราแมกเนติกลงบนแผ่นขั้วคาร์บอน โดยเสนอผลการวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าในรูปแบบของไซคลิกโวลแทมเมตรีและแอมแปโรเมตรี นำมาซึ่งการวิเคราะห์เคซีนที่มีความจำเพาะเจาะจง ความแม่นยำและถูกต้อง น่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ที่ง่าย รวดเร็ว พกพาได้สะดวก และสามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดเคซีนในอาหารได้จริง

การตรวจวัดเคซีนโดยขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูปเปอร์พาราแมกเนติกด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าโดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นการใช้เทคนิควิธีทางเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าประกอบด้วย แอมแปโรเมตรี และโวลแทมเมตรี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าแล้วตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าของสารละลายอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางปฏิกิริยาเคมี

จากผลการตรวจวัดสารละลายเคซีนเชิงเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าดัดแปลง โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ช่วง -0.75 โวลต์ ถึง 0.50 โวลต์ จากกราฟจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (แกนนอน) และค่ากระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) พบว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า -0.45 โวลต์เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า โดยค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อตรวจวัดสารละลายเคซีนที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.11

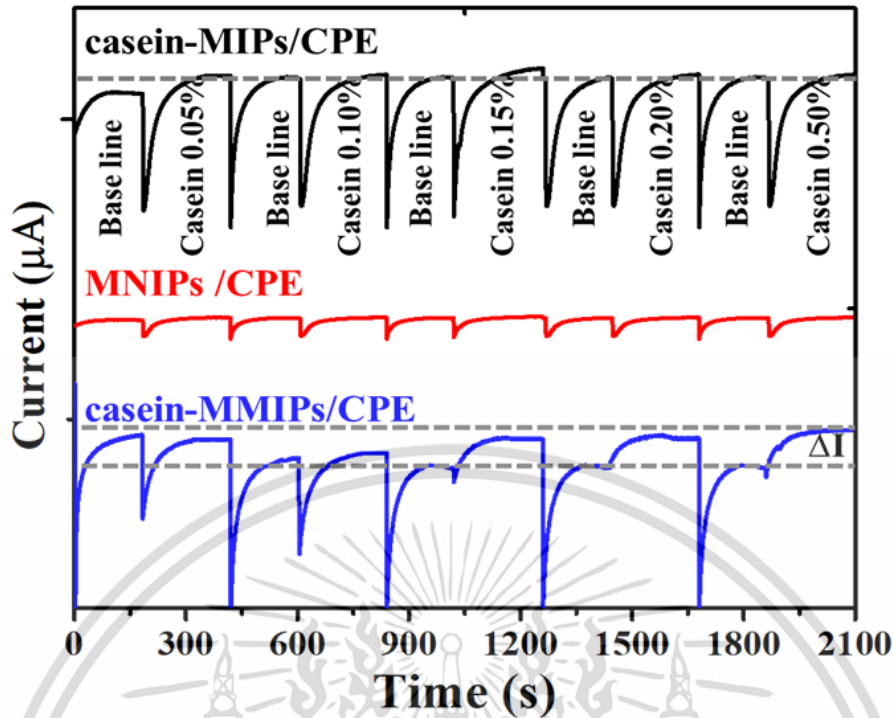


ภาพที่ 4.11 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดเคซีนด้วยขั้วไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูปเปอร์พาราแมกเนติกที่ความเข้มข้น 0 เปอร์เซ็นต์ถึง 0.35 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

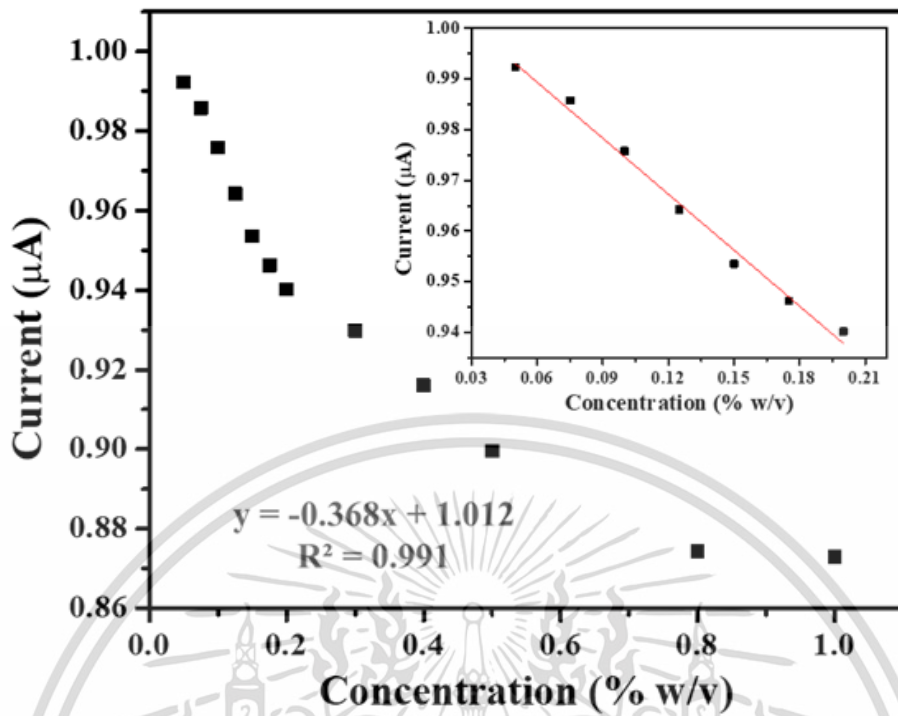
เทคนิคแอมแปโรเมตรีถูกใช้สำหรับศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเคซินเปลี่ยนแปลงไป โดยการตรวจวัดทำการควบคุมค่าความต่างศักย์คงที่ที่ -0.45 โวลต์ จากภาพที่ 4.12 จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (แกนนอน) และค่ากระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) การตรวจวัดจะทำการวัดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์สลับกับสารละลายเคซินโปรตีน โดยเปรียบเทียบการดัดแปลงชีวไฟฟ้าประกอบด้วย ชีวไฟฟ้าดัดแปลงด้วยด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ ชีวไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ไม่ผ่านการลอกแบบ โมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก และชีวไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก พบว่าชีวไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ มีค่ากระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำมากหรือแทบจะไม่สามารถตรวจวัดได้ ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับเตรียมชีวไฟฟ้าเป็นพอลิเมอร์ไม่นำไฟฟ้าเป็นผลให้การไหลของอิเล็กตรอนเป็นไปได้ยาก ขณะที่เมื่อดัดแปลงชีวไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบ มีค่ากระแสที่เพิ่มสูงขึ้น เกิดจากพอลิเมอร์ลอกแบบเมื่อทำการลอกแบบเคซินจะทำให้เกิดช่องว่างและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ลดลง เป็นผลให้การไหลของอิเล็กตรอนเป็นไปได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความต่างของกระแสระหว่างสารละลายบัฟเฟอร์และสารละลายเคซินพบมีความต่างของกระแสไฟฟ้าที่ค่อนข้างน้อย ในขณะที่ชีวไฟฟ้าดัดแปลงพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก มีค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งมากกว่าชีวไฟฟ้าดัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ นอกจากนี้ค่าความต่างของค่ากระแสไฟฟ้าระหว่างสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์และสารละลายเคซินยังมีค่าความต่างที่เห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลมาจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกเป็นวัสดุช่วยเพิ่มค่าการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า สามารถดัดแปลงร่วมกับพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับทำพอลิเมอร์ลอกแบบได้ทำให้เกิดการไหลผ่านของอิเล็กตรอนได้ดีเป็นผลให้มีค่าการตรวจวัดที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ค่าสัญญาณที่ได้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเคซินโปรตีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 การตรวจวัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคแอมแปโรเมตรี โดยชั่วไฟฟ้าตัดแปลงแบบต่าง ๆ ประกอบด้วย ชั่วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบ (MIPs) ชั่วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ไม่ผ่านการลอกแบบโมเลกุลร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก (MNIPs) และชั่วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก (MMIPs)

เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของสารละลายเคซีนกับค่าสัญญาณ (calibration curve) ซึ่งแสดงสมการเส้นตรง $y = -0.368X + 1.012$ โดยที่ $R_2 = 0.991$ จากสมการเส้นตรงชั่วไฟฟ้าตัดแปลงด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกสามารถคำนวณค่าความไวในการตอบสนอง (sensitivity) เท่ากับ 39.5 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (limit of detection, LOD) เท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (concentration) และกระแสไฟฟ้า (current) เมื่อทำการตรวจวัดสารละลายเคซีนโปรตีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ตัดแปลงพื้นผิวขั้วไฟฟ้าร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกเพื่อพัฒนาสำหรับการประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกด้วยปฏิกิริยาเคมี เมื่อทำพิสูจน์ลักษณะและคุณสมบัติแม่เหล็กโดยทำการตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั้น พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์เป็นอนุภาคนาโนแม่เหล็ก มีขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร และมีคุณสมบัติความเป็นซูเปอร์พาราแมกเนติก หลังจากนั้นเมื่อนำอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกมาประยุกต์ใช้งานตรวจวัดได้แก่การนำอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติก เคลือบกับสารเรืองแสงในกลุ่มอนุพันธ์ของฟลูออรีนไดไทอีโนฟิโนน เพื่อเพิ่มค่าความเข้มแสงในการตรวจวัดโลหะหนัก และสามารถเพิ่มค่าความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์ในการตรวจจับไอออนของโลหะเนื่องจาก อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกไปจำกัดการเคลื่อนไหวภายในโมเลกุลของสารเรืองแสง แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์เป็นฟลูออเรสเซนต์เซอร์ของสารเซนเซอร์สารเรืองแสงในการเคลือบอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนสามารถตรวจวัดปริมาณไอออนที่ความเข้มข้นต่ำลง เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมาเหนี่ยวนำได้

การประยุกต์ใช้งานการศึกษาพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ในการตรวจวัดสารโปรตีนโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าพบว่าขั้วที่ถูกตัดแปลงพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกมีลักษณะเกิดช่องว่างขนาดเล็กและมีการกระจายของอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกทั่วทุกบริเวณ ทำให้มีค่าความไวในการตอบสนอง และมีความสามารถในการตรวจวัดเข้มข้นสารที่ต้องการทดสอบต่ำลง เนื่องจากอนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกช่วยเพิ่มค่าการตรวจวัดกระแสไฟฟ้า อนุภาคนาโนแม่เหล็กซูเปอร์พาราแมกเนติกมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า และสามารถตัดแปลงร่วมกับพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับทำพอลิเมอร์ลอกแบบได้ทำให้เกิดการไหลผ่านของอิเล็กตรอนได้ดี จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคนาโนแม่เหล็กสามารถเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดสารตัวอย่าง และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานทางเซนเซอร์ได้ ไม่ว่าจะเป็นการวัดทางแสง หรือการวัดทางไฟฟ้า

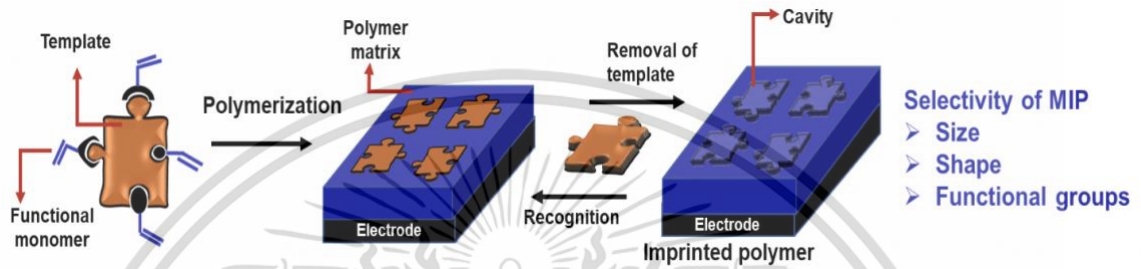
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

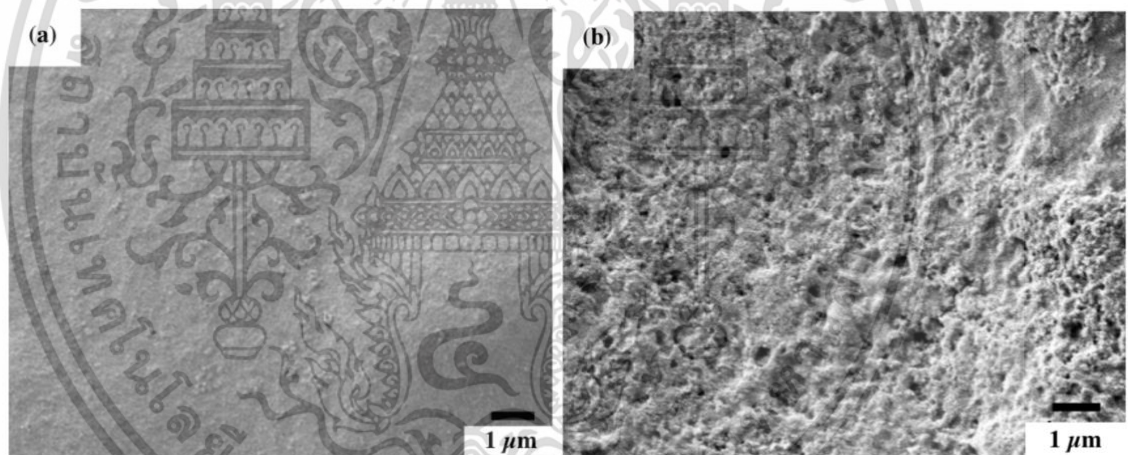
สรุปผลผลิตงานวิจัย

1. ต้นแบบในห้องปฏิบัติการ

ขั้วไฟฟ้าพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ในการประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์ เช่น โพรตีนกลูเตน และเคซีน



ภาพที่ 6.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลอกแบบ



ภาพที่ 6.2 ลักษณะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานจากการถูกตัดแปลงพื้นผิว (a) ขั้วไฟฟ้าทำงานไม่ผ่านการตัดแปลง (b) การตัดแปลงขั้วไฟฟ้าด้วยพอลิเมอร์ลอกแบบร่วมกับอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ถ่ายทอดองค์ความรู้/เทคโนโลยี การสังเคราะห์และพัฒนาอนุภาคแม่เหล็กยิ่งยวดแมกนีไทต์ในการพัฒนาใช้งานเป็นเซนเซอร์ให้แก่นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมวัสดุ นาโน ในวิชา 92596210 ปฏิบัติการวัสดุ นาโนขั้นสูง

3. บทความวิจัยเรื่อง Synthesis of kaolinite/magnetic molecularly imprinted polymers for solid phase extraction of chlorpyrifos Japanese Journal of Applied Physics, 2019 58, SDDG05 <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab0ff2> (IF=1.471, 2018)

4. บทความวิจัยเรื่อง Electrochemical analysis of cypermethrin using a gold printed circuit board electrode modified with poly(methyl methacrylate) Japanese Journal of Applied Physics, 2019 58, SDDG02 <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab0df2> (IF=1.471, 2018)

5. บทความวิจัยเรื่อง Functionalized magnetic nanoparticles as chemosensors based on fluorene derivative for Cd(II) ions detection *Ferroelectrics*, accepted. (ฐานข้อมูล ISI)

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Xu and S. Sun, “New forms of superparamagnetic nanoparticles for biomedical applications”, *Advanced drug delivery reviews*, 65 (2013) 732-743.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Wahajuddin and S. Arora, “Superparamagnetic iron oxide nanoparticles: magnetic nanoplatforms as drug carriers”, *International journal of nanomedicine*, 7 (2012) 3445-3471.
- [6] 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.
- [7] B. Sodipo and A. Abdul Aziz, “Recent Advances in Synthesis and Surface Modification of Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles with Silica”, 2016.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] T. Eylem, Ş. Ferat, “Molecularly Imprinted Biocompatible Magnetic Nanoparticles for Specific Recognition of Ochratoxin A” *Sensors and Actuators B: Chemical*, 277 (2016).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Q.Changchun, G. Wenlu, L.Yan, L.Zhanchao, Q.Jian, P.Jianbo

“A Novel Electrochemical Sensor Based on Graphene Oxide Decorated with Silver Nanoparticles–Molecular Imprinted Polymers for Determination of Sunset Yellow in Soft Drinks” 10 (2017).

[12] K. Sunil, K. Paramita, P. Santanu, M., Rashmi, S. Prashant K. “Molecularly imprinted star polymer-modified superparamagnetic iron oxide nanoparticle for trace level sensing and separation of mancozeb” RSC Advances 43 (2016) 36751-36760.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ประวัติคณะผู้วิจัย

- ผศ.ดร. ดารินี พรหมโยธิน
Darinee Phromyothin, Ph.D.
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
หมายเลขติดต่อ 02-329-8000 ต่อ 3133
โทรสาร 02-3298265
ประวัติการศึกษา: PhD.(Physical Chemistry), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ผศ.ดร. สุธี ชุติไพจิตร
Sutee Chutipaijit, Ph.D.
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
หมายเลขติดต่อ 02-329-8000 ต่อ 3140
โทรสาร 02-3298265
ประวัติการศึกษา: PhD. (Biotechnology), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ผศ. ดร. อนุชิต จารุวนาวัดน์
Mr. Anuchit Jaruvanawat, Ph.D.
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
หมายเลขติดต่อ 02-329-8000 ต่อ 3034
โทรสาร 02-3298265
ประวัติการศึกษา: PhD. (Nanoscience and Nanotechnology),
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้