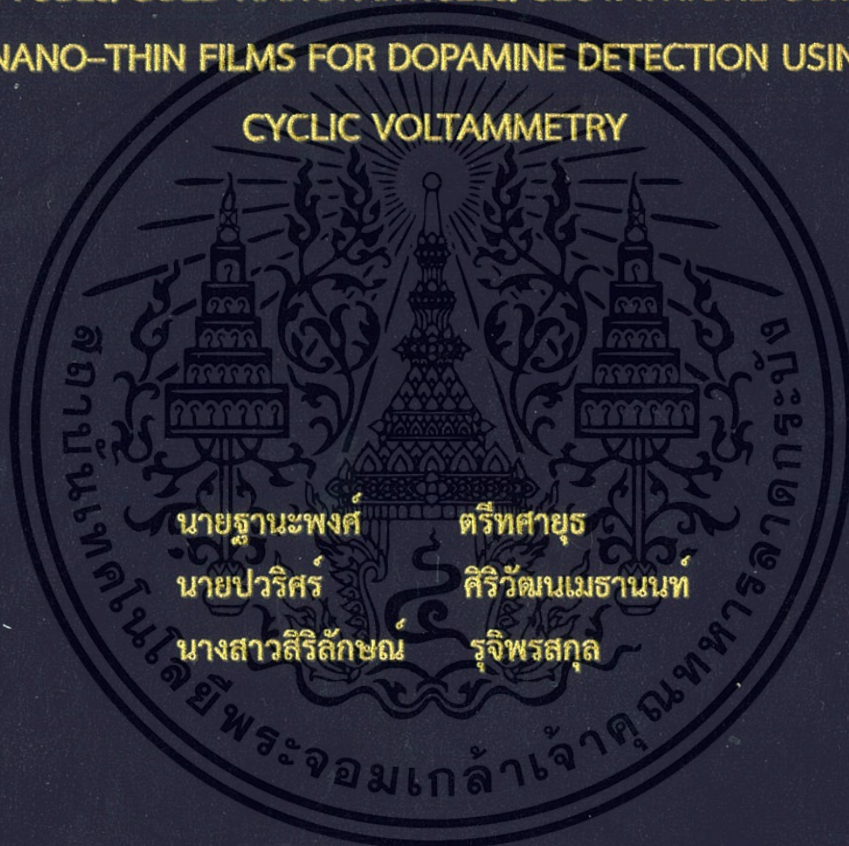


การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูตาไธโอนโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโดพามีนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

LAYER-BY-LAYER SELF ASSEMBLY OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES/GOLD NANOPARTICLES/GLUTATHIONE COMPOSITE NANO-THIN FILMS FOR DOPAMINE DETECTION USING CYCLIC VOLTAMMETRY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูตาไธโอนโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโดพามีนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

LAYER-BY-LAYER SELF ASSEMBLY OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES/GOLD NANOPARTICLES/GLUTATHIONE COMPOSITE NANO-THIN FILMS FOR DOPAMINE DETECTION USING CYCLIC VOLTAMMETRY



นายฐานะพงศ์

ตรีทศายุธ

นายปวีร์ศรี

ศิริวัฒน์เมธานนท์

นางสาวสิริลักษณ์

รุจิพรสกุล

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LAYER-BY-LAYER SELF ASSEMBLY OF MULTI-WALLED CARBON
NANOTUBES/GOLD NANOPARTICLES/GLUTATHIONE COMPOSITE
NANO-THIN FILMS FOR DOPAMINE DETECTION USING
CYCLIC VOLTAMMETRY



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูต้าไธโอนโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโดพามีนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

Layer-by-Layer Self Assembly of Multil-Walled Carbon Nanotubes/Gold Nanoparticles/Glutathione Composite Nano-Thin Films for Dopamine Detection Using Cyclic Voltammetry

ชื่อนักศึกษา

นายฐานะพงศ์ ตริทศายุ รหัสนักศึกษา 54050165
นายปวีร์ ศิริวัฒนเมธานนท์ รหัสนักศึกษา 54050214
นางสาวสิริลักษณ์ รุจิพรสกุล รหัสนักศึกษา 54050297

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)




ภาควิชา

เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. เอกรัฐ เดชศรี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. ณัฐฉา เชิงชั้น ประธานกรรมการ	
ดร. เสาวภาคย์ ธีราทรง กรรมการ	
ดร.เอกรัฐ เดชศรี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูต้าไธโอนโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโดพามีนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี		
ชื่อนักศึกษา	นายฐานะพงศ์	ตรีทศายุธ	รหัสนักศึกษา 54050165
	นายปวีร์	ศิริวัฒน์เมธานนท์	รหัสนักศึกษา 54050214
	นางสาวสิริลักษณ์	รุจิพรสกุล	รหัสนักศึกษา 54050297
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. เอกรัฐ เดชศรี		

บทคัดย่อ

ในการศึกษาได้ทำการเตรียมตัวตรวจวัดสารทางชีวภาพ โดยใช้ประจุบวกของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ประจุลบของอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูต้าไธโอน เพื่อใช้ในการตรวจวัดสารโดพามีนที่เป็นเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วและมีความจำเพาะเจาะจงสูงได้สำเร็จ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น อนุภาคทองในระดับนาโนและกลูต้าไธโอนถูกนำมาใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตโดยใช้เทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ แผ่นฟิล์มบางหลายชั้นนั้นถูกสร้างขึ้นโดยการสะสมของประจุลบและประจุบวกของสารละลายโพลีเอเล็กโทรไลต์สลับชั้นกันไป เทคนิคที่ถูกค้นพบนี้กำลังเป็นที่สนใจอย่างมากสำหรับการสร้างแผ่นฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนและอนุภาคทองในระดับนาโน โดยทำการควบคุมองค์ประกอบในขั้นตอนการสร้าง ซึ่งลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าและการนำไปประยุกต์ใช้ทางศัลยกรรมไฟฟ้าสำหรับการตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคทางเคมีเชิงไฟฟ้า ถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิค UV-visible spectroscopy, FTIR, TEM, FESEM, XRD, AFM และ Electrochemical spectroscopy ขั้วไฟฟ้าที่สร้างด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูต้าไธโอนแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมของตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่ทำงานอยู่ นำไปสู่การเกิดออกซิเดชันทางไฟฟ้าของการตอบสนองต่อโดพามีนได้อย่างรวดเร็ว มีช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ระหว่าง 1–100 ไมโครโมลาร์ สมการถดถอยเชิงเส้น คือ $y = 0.7791x + 9.013$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) มีค่าเท่ากับ 0.9983 ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและปริมาณต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดเชิงปริมาณได้ มีค่าเท่ากับ 0.316 ± 0.081 และ 1.054 ± 0.081 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ

คำสำคัญ : ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น อนุภาคทองในระดับนาโน กลูต้าไธโอน
เทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ โดพามีน

Title	Layer-by-Layer Self Assembly of Multil-Walled Carbon Nanotubes/Gold Nanoparticles/Glutathione Composite Nano-Thin Films for Dopamine Detection Using Cyclic Voltammetry	
Students	Mr. Tanapong Treetasayoot	student ID 54050165
	Mr. Pawarit Siriwattanamethanon	student ID 54050214
	Miss Sirilak Rujipornsakul	student ID 54050297
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Academic Year	2014	
Advisor	Dr. Ekarat Detsri	

Abstract

In the present study, biosensor was prepared using cationic multi-walled carbon nanotube, anionic gold nanoparticles and glutathione with the aim of achieving the selective and sensitivity determination of dopamine. Multi-walled carbon nanotube, gold nanoparticles and glutathione were used to construct the nano-composite electrode using Layer-by-Layer assembly technique. The multilayer composite thin films were constructed by alternate deposition of each anionic and cationic polyelectrolytes. This technique was found to be very interesting for the fabrication of thin carbon nanotubes and gold nanoparticles films of controlled composition and architecture. The characteristics of the electrode and its potential application for electrochemical determination of dopamine were investigated using UV-visible spectroscopy, FTIR, TEM, FESEM, XRD, AFM and electrochemical spectroscopy. The constructed multi-walled carbon nanotube, gold nanoparticles and glutathione nano-composite electrode exhibited excellent electrocatalytic active toward the electrooxidation of dopamine with a quick response time, a wide linear range between 1-100 μM with a regression equation of $y = 0.7791x + 9.013$ and a correlation coefficient (r^2) of 0.9983. The LOD and LOQ were 0.316 ± 0.081 and $1.054 \pm 0.081 \mu\text{M}$, respectively.

Keywords : Multi-wall carbon nanotube, Gold nanoparticle, Glutathione, Layer-by-Layer technique, Dopamine

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.เอกรัฐ เดชศรี อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา ความรู้ ความเข้าใจ ตลอดจนคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆอันเป็นประโยชน์มาโดยตลอด อีกทั้งยังให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข โครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นจนสำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆและอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมืออำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณกลุ่มโครงการพิเศษซึ่งประกอบไปด้วยนางสาวกรชนก ธราวัฒน์ชานนท์ นายณพลพัทธ์ จารุศรีกิตติวุฒิ และนายณัฐพล กุศลจริยากุล ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำตลอดงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจและให้ความสนับสนุนในด้านทุนการศึกษามาโดยตลอด

หากงานวิจัยเล่มนี้ก่อให้เกิดประโยชน์แก่ท่านผู้ใด ผู้วิจัยขอขอบความดีทั้งปวงให้แก่บิดามารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ช่วยส่งเสริมให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถจนสำเร็จการศึกษา

ฐานะพงศ์	ตรีทศายุธ
ปวีร์ศรี	ศิริวัฒน์เมธานนท์
สิริลักษณ์	รุจิพรสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ^ข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยี.....	5
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน.....	7
2.2.1 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน.....	7
2.2.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน.....	9
2.2.3 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน.....	10
2.2.3.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ.....	10
2.2.3.2 วิธีระเหยด้วยเลเซอร์.....	11
2.2.3.3 ตกสะสมไอเคมี.....	11
2.2.4 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน.....	12
2.2.4.1 การปรับปรุงพื้นผิวแบบนอนโควาเลนต์.....	12
2.2.4.2 การปรับปรุงพื้นผิวแบบโควาเลนต์.....	13
2.3 อนุภาคทองในระดับนาโน.....	14
2.3.1 สมบัติของทองคำแบบก้อนและอนุภาคทองในระดับนาโน.....	14
2.3.1.1 สมบัติทางแสง.....	15
2.3.1.2 พื้นผิวต่อปริมาตรและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี.....	16
2.3.1.3 จุดหลอมเหลว.....	18
2.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน.....	18
2.4 เทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ (Layer-by-Layer Technique).....	20
2.5 โดพามีน.....	23
2.6 กลูต้าไรโอน.....	24
2.7 การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1 หลักการทางเคมีไฟฟ้า	26
2.7.2 โวลแทมเมทรี.....	27
2.7.3 ไชคลิกโวลแทมเมทรี.....	29
2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	31
2.8.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง	31
2.8.2 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer	33
2.8.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	34
2.8.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม	35
2.8.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	37
2.8.6 เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า	38
2.8.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด.....	39
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
2.9.1 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นของท่อนาโนคาร์บอนที่มีประจุบวกและประจุลบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	42
2.9.2 การตรวจวัดโดพามีนในร่ายกายมนุษย์ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมทริกโดยใช้ขั้วเคมีไฟฟ้าที่สร้างจากอนุภาคทองในระดับนาโนเจอร์โมเลกุลของพอลิเมอร์.....	42
2.9.3 การสร้างแผ่นฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น โดยใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และอนุภาคทองในระดับนาโน สำหรับการตรวจวัดโดพามีนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	43
2.9.4 การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีไฟฟ้า สำหรับการตรวจวัดโดพามีนที่มีอยู่ในกรดแอสคอร์บิก โดยใช้รีดิวซ์แกรฟีนที่มีหมู่ฟังก์ชันกรดเพอรูลิก	43
2.9.5 การปรับปรุงแผ่นกระจกไอโอดีนเจือทินออกไซด์ เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรดด้วยอนุภาคทองในระดับนาโน สำหรับหาปริมาณโดพามีนที่มีอยู่ในกรดยูริกและกรดแอสคอร์บิกด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า	44
2.9.6 การตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ซิลโฟเนตกราฟีนที่ละลายน้ำ.....	44
2.9.7 การสังเคราะห์โดยรวมทำในขั้นตอนเดียวของ Magnetite nanorods และ graphene composites เพื่อเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของโดพามีน	45
2.9.8 การตรวจวัดโดพามีนและกรดแอสคอร์บิกพร้อมกันโดยใช้ Silicate network ร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	46
2.9.9 การวิเคราะห์โดพามีนเชิงเคมีไฟฟ้าโดยใช้อิเล็กโทรดอินเดียมดีบุกออกไซด์และการควบคุมอัตราการสแกน	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.9.10 ไบโอเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าชนิดเซนวิซสำหรับการตรวจสอบไกลโคโปรตีนบนพื้นฐานการขยายสัญญาณของโบโรนิกแอซิด-อนุภาคทองนาโนและโดพามีนอนุภาคทองนาโน	47
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	48
3.1 ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	48
3.1.1 สารเคมี.....	48
3.1.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น.....	48
3.1.3 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิกแอซิดโคมาเลอิกแอซิดสำหรับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	50
3.2 การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนด้วยวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน.....	51
3.2.1 สารเคมี.....	51
3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน	52
3.3 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น.....	52
3.3.1 สารเคมี.....	52
3.3.2 การเตรียมแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ.....	53
3.3.3 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิล-แอมโมเนียมคลอไรด์ที่ใช้ในการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง	53
3.3.4 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิกแอซิด-โคมาเลอิกแอซิดที่ใช้ในการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง	54
3.3.5 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC	54
3.3.6 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน.....	55
3.3.7 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน	56
3.3.7.1 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิกแอซิด	56
3.3.7.2 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS สารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3.7.3 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS	58
3.3.7.4 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโน.....	58
3.4 การสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น.....	59
3.4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้า ITO/AuNPs.....	59
3.4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC-MWCNTs.COPSS.....	60
3.4.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC-MWCNTs.COPSS/ AuNPs/L-Glutathione	60
3.5 การวิเคราะห์โดพามีนโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	60
3.5.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โดพามีนด้วยเทคนิค ไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	60
3.5.1.1 ศึกษาชนิดของอิเล็กโทรดที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โดพามีน.....	60
3.5.1.2 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	61
3.5.1.3 ศึกษาจำนวนชั้นของอิเล็กโทรด (Electrode) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดพามีน.....	61
3.5.1.4 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	62
3.5.1.5 ศึกษาอัตราการสแกนที่เหมาะสม.....	63
3.5.2 การตรวจวัดโดพามีน (Dopamine) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	64
3.5.2.1 สร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโดพามีน.....	64
3.5.2.2 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด.....	64
3.5.2.3 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์.....	64
3.5.2.4 ศึกษาคร่าวยะของการคืนกลับ.....	64
3.5.2.5 ศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์.....	65
3.5.2.6 ศึกษาค่าความเที่ยงของขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิต.....	65
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	66
4.1 การศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น.....	66
4.1.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดแอลิลิโดเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบ ผนังหลายชั้น.....	67
4.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิค -แอซิดโคมาเลอิกแอซิด สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบ ผนังหลายชั้น.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด	70
4.1.3.1 ผลของการศึกษารูปร่าง ขนาด และลักษณะการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิดโดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	70
4.1.3.2 ผลจากการศึกษาสภาพความเป็นประจุของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพลีไดแอลลิล-ไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิค-แอซิดโคมาเลอิกแอซิด โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า.....	71
4.1.3.3 ผลจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียม-คลอไรด์ และสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิดด้วยเทคนิค FTIR	72
4.2 การศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคท่อนาโน.....	73
4.2.1 ผลของการศึกษารูปร่างและขนาดของอนุภาคท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	74
4.2.2 ผลของการศึกษาสภาพความเป็นประจุของอนุภาคท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า.....	75
4.2.3 ผลของการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เทคนิค FTIR.....	75
4.3 การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น	76
4.3.1 ผลของการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน	77
4.3.2 ผลของการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายไซเตียมคลอไรด์ สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC.....	78
4.3.3 ผลของการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน	80
4.3.4 ผลจากการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบ ชั้นต่อชั้น	82
4.4.1 ผลการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ สารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด	83
4.4.2 ผลของการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับ สารละลายโพลีไดแอลลิไลโดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์.....	84
4.4.3 ผลของการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS	86
4.4.4 ผลของการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายอนุภาคทองคำนาโน	87
4.5 การศึกษาลักษณะเฉพาะของจำนวนชั้นแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆที่สร้างโดยใช้ เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น	89
4.5.1 ผลของการศึกษาลักษณะของพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบางด้วย เครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	89
4.5.2 ผลของการศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆด้วย เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	94
4.5.3 ผลของการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆด้วย เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด.....	96
4.6 การศึกษาการวิเคราะห์หาโดพามีน โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี.....	97
4.6.1 ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โดพามีน ด้วยเทคนิค ไซคลิกโวลแทมเมทรี	97
4.6.1.1 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ โดพามีน.....	97
4.6.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์	99
4.6.1.3 ผลการศึกษาจำนวนชั้นของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์โดพามีน	101
4.6.1.4 ผลการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายอิเล็กโทรไลต์	102
4.6.1.5 ผลการศึกษาอัตราการสแกนที่เหมาะสม	104
4.6.2 ผลจากการตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี.....	105
4.6.2.1 ผลจากการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโดพามีน.....	105
4.6.2.2 ผลของการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและขีดจำกัดต่ำสุด ของการวิเคราะห์	107
4.6.2.3 ผลการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ.....	107
4.6.2.4 อิทธิพลของการศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์.....	108
4.6.2.5 เปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์กับวิธีอื่นๆ.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	111
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	111
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	112
เอกสารอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก.....	120
ภาคผนวก ก.....	121
ภาคผนวก ข.....	124
ประวัติผู้วิจัย.....	127



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 ริชาร์ด ฟายน์แมน (ค.ศ. 1918-1988) บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี.....	5
2.2 วัสดุนาโนชนิดต่างๆ	7
2.3 ลักษณะการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์เป็นท่อนาโนคาร์บอน (A) และการเชื่อมต่อกันของ อะตอมคาร์บอนด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 (B)	8
2.4 การจัดเรียงตัวรูปแบบต่างๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยมของคาร์บอน	8
2.5 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว	9
2.6 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	9
2.7 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ	11
2.8 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีระเหยด้วยเลเซอร์.....	11
2.9 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีตกสะสมไอเคมี	12
2.10 การกระจายตัวของ SWCNTs เนื่องมาจากแรงผลักระหว่างประจุของ ZnO_2	13
2.11 การเกิดปฏิกิริยา Anionic polymerization กับสไตรีนมอนอเมอร์ของท่อนาโนคาร์บอน ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชัน	14
2.12 ตัวอย่างคอลลอยด์อนุภาคทองในระดับนาโน ขนาด 40 นาโนเมตร	14
2.13 กระบวนการสั่นของพลาสมอน (plasmon oscillation) สำหรับอนุภาคทรงกลม	16
2.14 การประมาณจำนวนอะตอมและพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนทองคำที่มีขนาดแตกต่างกัน	17
2.15 เปรียบเทียบจำนวนอะตอมผิวหน้าของวัสดุแบบก้อนใหญ่กับอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโน..	17
2.16 อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวของทองคำที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน	18
2.17 แสดงการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอนุภาคทองคำนาโนโดยใช้ sodium citrate เป็น Reducing agent และ Stabilizing agent	19
2.18 การผสมสารละลายที่มีประจุบวกและประจุลบเข้าด้วยกันทำให้เกิดการตกตะกอน	20
2.19 โพลีเอ็กซีเมอร์หลายชั้น	23
2.20 การประดิษฐ์ฟิล์มบางด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ (Layer-by-Layer Technique)	23
2.21 โครงสร้างโดพามีน	24
2.22 โครงสร้างของกลูตาไรโอโน	25
2.23 แบบของศักย์ไฟฟ้าที่ให้ในไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	30
2.24 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม	30
2.25 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer	32
2.26 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของ Bragg's Law	34
2.27 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM)	36
2.28 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM).....	36
2.29 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM).....	37
2.30 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)	38
2.31 ไอออนและความต่างศักย์ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบนผิวของอนุภาคสารแขวนลอย.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นว่าเนื้อหาไม่เกี่ยวข้องกับการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

2.32 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด (FE-SEM) รุ่น JSM-7001F.....	40
2.33 สัญญาณภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคป แบบส่องกราด (FE-SEM) จากหัววัด SEI, BEI และ TEI.....	41
3.1 แผนผังการปรับปรุงพื้นผิวท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ด้วยสารละลายโพลีไค -แอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	49
3.2 ท่อานาโนคาร์บอนที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	49
3.3 แผนผังการปรับปรุงพื้นผิวท่อานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ด้วยสารละลายโพลีสไตรีน -ซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิดที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	51
3.4 การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน.....	52
3.5 การปรับสภาพพื้นผิวของแผ่นกระจกด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ (Layer-by-Layer).....	53
3.6 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไคแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียม -คลอไรด์ในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง.....	54
3.7 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิก -แอซิดในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน.....	54
3.8 แผนผังการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ สำหรับการ ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC.....	55
3.9 แผนผังการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลายอนุภาคทอง ในระดับนาโน.....	56
3.10 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิด.....	56
3.11 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับ สารละลาย โพลีไคแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์.....	57
3.12 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS.....	58
3.13 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย อนุภาคทองในระดับนาโน.....	59
3.14 แผนผังการศึกษาอิเล็กโทรดที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โดพามีน.....	61
3.15 แผนผังการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	61
3.16 แผนผังการศึกษาจำนวนชั้นของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการวิเคราะห์โดพามีน.....	62
3.17 แผนผังการศึกษาค่าพีเอช(pH) ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	63
3.18 แผนผังการศึกษาอัตราการสแกนที่เหมาะสม.....	63
4.1 รูปแบบการกระจายตัวของท่อานาโนคาร์บอน.....	66
4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย MWCNTs-PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาดำเนินไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ญูญูต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของสารละลาย MWCNTs–PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	67
4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย MWCNTs–COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ	68
4.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของสารละลาย MWCNTs–COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	69
4.6 ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ถูกระบายด้วยสารละลายโพลีไดแอลลิลได-เมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิกแอซิดโคมาเลอิกแอซิด.....	69
4.7 การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดย (a) MWCNTs ที่ยังไม่ปรับปรุงพื้นผิว (b) MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพลีไดแอลลิลได-เมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ และ (c) MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิกแอซิดโคมาเลอิกแอซิด	71
4.8 สเปกตรัม FTIR ของ (a) pristine MWCNTs (b) COPSS (c) MWCNTs–COPSS (d) PDADMAC และ (e) MWCNTs–PDADMAC	72
4.9 อนุภาคทองในระดับนาโน จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	74
4.10 ขนาดของอนุภาคทองในระดับนาโน	75
4.11 สเปกตรัม FTIR ของ (a) Citrate (b) AuNPs–Citrate	76
4.12 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางที่เคลือบด้วย MWCNTs–PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ	77
4.13 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบางที่เคลือบด้วย MWCNTs–PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	77
4.14 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–PDADMAC ที่เติมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นต่างๆ.....	78
4.15 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–PDADMAC ที่เติมโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นต่างๆ.....	79
4.16 แสดงการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลาย MWCNTs–PDADMAC	79
4.17 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ	80
4.18 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	80
4.19 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AuNPs โดยการจุ่มในเวลาที่แตกต่างกัน.....	81
4.20 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง AuNPs โดยการจุ่มในเวลาที่แตกต่างกัน.....	82
4.21 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–PDADMAC ร่วมกับสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิกแอซิด.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลดู ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.22 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs- PDADMAC ร่วมกับสารละลายโพลีไสตริโนซิลโฟนิคแอซิด.....	83
4.23 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับสารละลาย โพลีไดเอทิลิลโดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์	84
4.24 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs- COPSS ร่วมกับสารละลายโพลีไดเอทิลิลโดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์	85
4.25 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย MWCNTs-COPSS.....	86
4.26 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs- PDADMACร่วมกับสารละลาย MWCNTs-COPSS.....	86
4.27 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMACร่วมกับสารละลาย.....	87
4.28 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs- PDADMAC ร่วมกับสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน.....	88
4.29 ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	95
4.30 ภาพ FE-SEM (a) MWCNTs-PDADMAC (b) AuNPs (c) MWCNTs-PDADMAC/AuNPs.....	97
4.31 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione, ITO/MWCNTs.PDADMAC/MWCNTs.COPSS, ITO/AuNPs และ ITO	98
4.32 แสดงการเกิดปฏิกิริยาที่หน้าขั้วไฟฟ้า.....	99
4.33 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต(Na_2HPO_4) ความเข้มข้นต่างๆ.....	100
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกซิเดชันกับความเข้มข้นของสารละลาย บัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และได -โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์	100
4.35 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ที่จำนวนชั้นของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน	101
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนชั้นขั้วไฟฟ้าของการตรวจวัด สารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์	102
4.37 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่พีเอชต่างๆ	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกซิเดชันกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่พีเอชต่างๆ ของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์.....	103
4.39 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ที่อัตราการสแกนต่างๆ	104
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกซิเดชันกับอัตราการสแกนต่างๆ ของ การตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์.....	105
4.41 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	106
4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	106
4.43 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ โดยการเติมสารต่างๆลงไป.....	109



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

CNTs	Carbon nanotubes
MWCNTs	Multi-walled carbon nanotubes
AuNPs	Gold nanoparticles
PDADMAC	Poly (diallyl dimethyl ammonium chloride)
COPSS	Poly (4-styrene sulfonic acid-co-maleic acid)
PSS	Poly (4-styrene sulfonic acid) sodium salt
NaCl	Sodium chloride
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sodium dihydrogen phosphate
Na_2HPO_4	Disodium hydrogen phosphate
ITO	Iodine doped tin oxide
UV-vis spectrophotometry	Ultraviolet-visible spectrophotometry
XRD	X-ray diffractometer
FT-IR	Fourier transform infrared spectrophotometer
TEM	Transmission electron microscope
AFM	Atomic force microscope
FESEM	Field emission scanning electron microscope
ml	Milliliter (มิลลิลิตร)
mM	Millimolar (มิลลิโมลาร์)
μM	Micromolar (ไมโครโมลาร์)
nM	Nanomolar (นาโนโมลาร์)
nm	Nanometer (นาโนเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μm	Micrometer (ไมโครเมตร)
pH	Power of Hydrogen ion
pKa	ค่าคงที่การแตกตัวของกรด
R^2	correlation coefficient (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์)
SD	standard deviation (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
LOD	Limit of detection (ขีดจำกัดต่ำสุดที่ตรวจพบ)
LOQ	Limit of quantitative (ขีดจำกัดต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

โรคพาร์กินสัน [1] เป็นโรคที่เกิดจากอาการผิดปกติทางระบบประสาทส่วนกลาง ส่งผลให้เกิดอาการมือไม้สั่น เกร็ง เคลื่อนไหวช้า ซึ่งสาเหตุเกิดจากในร่างกายมีการหลั่งสารโดพามีนออกมาน้อยเกินไป โดยที่สารโดพามีน (Dopamine) [2] เป็นสารที่ทำให้รู้สึกตื่นตัว กระฉับกระเฉง มีสมาธิ และไวต่อสิ่งกระตุ้นต่าง ๆ รอบตัวมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงสร้างวิธีการทดลองในการวิเคราะห์สารโดพามีน โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry) โดยการสร้างขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) ที่เกิดจากการสร้างวัสดุแต่งประกอบของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-wall Carbon nanotube, MWCNTs), อนุภาคทองในระดับนาโน (Gold nanoparticle, AuNPs) และกลูตาไธโอน (Glutathione) โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปร่างแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer self-assembly technique)

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNTs) [3] เป็นอนุภาคที่มีรูปร่างคล้ายท่อกลวงของโครงร่างตาข่ายรูปหกเหลี่ยมขนาดเล็ก สร้างมาจากวัสดุที่เป็นธาตุพื้นฐานสำคัญที่สุดของมนุษย์นั่นก็คือ คาร์บอน (Carbon) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 15 นาโนเมตร) และมีความยาวประมาณ 10-100 ไมโครเมตร เป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลายพันเท่า มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีคุณสมบัติที่แข็งแกร่งกว่าเหล็กกล้า แต่ในขณะเดียวกันก็มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา สมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญอย่างมากของท่อนาโนคาร์บอน คือ ความสามารถในการเป็นตัวนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถนำความร้อนได้ดีอีกด้วย จึงมีความคิดในการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ในงานหลายประเภท เช่น การทำชิพในเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำสายเคเบิล อุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์วัดระดับสารเคมี เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้ในรูปของสารละลาย แต่เนื่องด้วยท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวในน้ำหรือของเหลวได้ไม่ดี ยากแก่การนำไปใช้งานในตัวกลางที่เป็นของเหลว จึงต้องมีการดัดแปลงหรือปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนขึ้น เพื่อให้สามารถกระจายตัวในตัวกลางต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น โดยการใช้การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบนอนโควาเลนต์ (Non-Covalent surface modification) [4] โดยการนำสารละลายโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) [5] ที่มีประจุบวกและประจุลบ คือ PDADMAC และ COPSS ตามลำดับ มาทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัว เนื่องจากสารละลาย PDADMAC และ COPSS เป็นพอลิเมอร์มีประจุจึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนถูกพันล้อมรอบ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวขึ้น ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวเป็นการเพิ่มการมีขั้วให้แก่ท่อนาโนคาร์บอน ทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำและตัวทำละลาย

อนุภาคทองในระดับนาโน (Gold nanoparticle, AuNPs) [6] ได้รับความสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น นำไปใช้เป็นตัวเร่ง, ใช้ทำตัวตรวจจับ, อุปกรณ์ทางไฟฟ้า และยา เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องด้วยคุณสมบัติของอนุภาคทองในระดับนาโนเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ในงานวิจัยนี้จึงได้นำอนุภาคทองในระดับนาโนมาประยุกต์ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิต โดยจะต้องทำการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนขึ้นก่อน ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ให้ได้อนุภาคทองในระดับนาโนนั้น ส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้วิธีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี คือการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) โดยมีการใช้สารรักษาเสถียรภาพ เพื่อป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคทองในระดับนาโนที่อาจจะเกิดจากแรงดึงดูดหรือแรงผลัทางไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลต่อขนาดของอนุภาคได้ สารรักษาเสถียรภาพที่ถูกนำมาใช้มีอยู่มากมายหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมาก คือ โซเดียมซิเตรท (sodium citrate) เนื่องจากเป็นวิธีที่เรียบง่ายที่สุดในการเตรียมอนุภาคทองในระดับนาโน

กลูต้าไธโอน (Glutathione) [7] เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่เซลล์ในร่างกายมนุษย์สามารถสังเคราะห์ได้เอง ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่ในการปกป้องเนื้อเยื่อไม่ให้ถูกทำลายโดยสารอนุมูลอิสระที่สะสมอยู่ตามส่วนต่างๆ ของร่างกาย, กระตุ้นภูมิคุ้มกันของร่างกาย และที่สำคัญยังช่วยยับยั้งการทำลายและขจัดสารพิษออกจากร่างกายด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำกลูต้าไธโอนมาใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิต เนื่องจากเป็นสารที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อโดพามีนสูง ทำให้สามารถวิเคราะห์หาโดพามีนได้ดียิ่งขึ้น

เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) ได้ถูกนำมาใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถทำได้ง่าย นำไปใช้ประยุกต์ได้หลากหลาย ต้นทุนต่ำ และสามารถนำมาทำซ้ำใหม่ได้ โดยการขึ้นรูปของแผ่นฟิล์มบางนั้น เกิดจากการเรียงตัวกันของสารที่มีประจุต่างชนิดกัน โดยคุณสมบัติที่สำคัญของเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น คือ สามารถควบคุมความหนาของแผ่นฟิล์มได้

ไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry) [8] เป็นเทคนิคที่มีการกระตุ้นเซลล์ไฟฟ้าเคมีด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้า แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา โดยขั้วไฟฟ้าทำงาน ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดโพลารอกราฟีได้มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า ไปตามความต่างศักย์ภายนอกที่ให้เข้าไป ซึ่งจะทำให้สารเคมีในสารละลายของเซลล์สามารถรับ (หรือให้) อิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้า นั่นคือเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron transfer reaction) อิเล็กตรอนข้างต้นจะไหลผ่านวงจรไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถวัดออกมาเป็นกระแสไฟฟ้าได้ ทำการบันทึกศักย์ไฟฟ้าของขั้วทำงาน และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่ศักย์ไฟฟ้านั้น ๆ โดยให้กระแสเป็นแกน y เรียกกราฟนี้ว่า โวลแทมโมแกรม (Voltammogram) หรือ โพลารอแกรม (Polarogram)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อกระจายทองคำนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น โดยใช้วิธีการปรับปรุงพื้นผิวแบบนอนโควาเลนต์ (Non-Covalent surface modification)

2. เพื่อสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน (Gold nanoparticle) ด้วยวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) โดยใช้โซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) เป็นตัวรีดิวซ์และรักษาเสถียรภาพ

3. เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและกลูต้าไรโอน โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) บนขั้วไฟฟ้าไอโอดีนเจือทินออกไซด์ (Iodine doped tin oxide, ITO)

4. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยนำไปวิเคราะห์หาโดพามีน (Dopamine) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนแบบนอนโควาเลนต์ โดยใช้สารละลายโพลีเอเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกและประจุลบ คือ PDADMAC และ COPSS ตามลำดับ

2. สังเคราะห์อนุภาคทองนาโน (Gold nanoparticle) สำหรับใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิต

3. ศึกษากระบวนการและสภาวะต่างๆในการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นร่วมกับอนุภาคทองนาโนและกลูต้าไรโอน โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) บนขั้วไฟฟ้าไอโอดีนเจือทินออกไซด์ (Iodine doped tin oxide, ITO)

4. ประเมินประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตด้วยการวิเคราะห์หาโดพามีน (Dopamine) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ที่มีความสามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำและตัวทำละลาย โดยใช้สารละลายโพลีเอเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกและประจุลบ คือ PDADMAC และ COPSS ตามลำดับ ไปช่วยในการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

2. สังเคราะห์สารละลายอนุภาคทองนาโนด้วยวิธีทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้โซเดียมซิเตรทเป็นตัวรีดิวซ์และรักษาเสถียรภาพ (ขนาดอนุภาคทองในระดับนาโนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตร) แล้วนำสารละลายที่ได้จากการสังเคราะห์ไปใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิต โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

3. สร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตด้วยสารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวแล้วร่วมกับสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโนและสารละลายกลูต้าไรโอน โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) บนขั้วไฟฟ้าไอโอดีนเจือทินออกไซด์ (Iodine doped tin oxide, ITO) ได้สำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ชั้นไฟฟ้านาโนคอมโพสิตที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique) สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาโดพามีน (Dopamine) ได้เป็นผลสำเร็จ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิทยาศาสตร์นาโนและนาโนเทคโนโลยี

แนวคิดอันเป็นจุดเริ่มต้นให้โลกได้ก้าวเข้าสู่ยุคของ นาโนเทคโนโลยีนั้นมาจาก ศาสตราจารย์ ริชาร์ด ฟิลลิปส์ ฟายน์แมน (Richard Phillips Feynman) นักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน ที่ได้กล่าวถึงความเป็นไปได้ในการจัดการกับสิ่งของในระดับอะตอม ระหว่างการปาฐกถาเรื่อง “There’s plenty of room at the bottom” ที่สถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย เมื่อปี ค.ศ. 1959 ซึ่งจากคำบรรยายของ ฟายน์แมนในครั้งนั้น ได้จุดประกายให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มหันมาสนใจและสร้างอุปกรณ์ในการจัดการในระดับอะตอม ทั้งนี้ฟายน์แมนได้รับรางวัลโนเบลในสาขาฟิสิกส์ในปี 1965 และนับเป็นหนึ่งในนักฟิสิกส์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดของคริสต์ศตวรรษที่ 20

ต่อมาในปี ค.ศ. 1981 เกร็ด บินนิง (Gerd Binnig) และ ไฮน์ริช โรห์เซอร์ (Heinrich Rohrer) จากบริษัทไอบีเอ็ม ซูริก ได้ประดิษฐ์เครื่องมือที่สามารถมองเห็นการจัดเรียงอะตอมของธาตุต่างๆ สำเร็จเป็นครั้งแรก นั่นคือกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning tunneling microscope; STM) ซึ่งผลงานชิ้นนี้ทำให้นักฟิสิกส์ทั้งสองท่านได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1986

จากนั้น 9 ปี ต่อมา ดร. ดอน ไอเกลอร์ (Don Eigler) นักฟิสิกส์จากบริษัท ไอบีเอ็ม จำกัด สามารถนำอะตอม 35 อะตอม ของก๊าซซีนอน (Xenon) มาจัดเรียงเป็นตัวอักษรว่า IBM บนผิวของโลหะนิกเกิล (Nickel) ได้สำเร็จ ซึ่งนับเป็นจุดเริ่มต้นการก้าวเข้าสู่โลกใบจิ๋วของนาโนเทคโนโลยีอย่างแท้จริง [9]



รูปที่ 2.1 ริชาร์ด ฟายน์แมน (ค.ศ. 1918-1988) บิดาแห่งนาโนเทคโนโลยี [10]

และด้วยการพัฒนาและความก้าวหน้าทางด้านนาโนเทคโนโลยี ทำให้เราทราบมากขึ้นว่าเมื่อวัตถุต่างๆ มีโครงสร้างเล็กในระดับนาโนเมตรแล้ว จะส่งผลให้วัตถุนั้นมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปจากเดิม ทำให้เกิดเป็นคุณสมบัติพิเศษที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคนาโนของธาตุเงินหรือนาโนซิลเวอร์ อนุภาคนาโนของออกไซด์สังกะสี ท่อนาโนคาร์บอน บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์หรือบัคกี้บอล เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ มีความพิเศษต่อการใช้งานมากขึ้น จึงทำให้ในปัจจุบันเหล่านักวิทยาศาสตร์ต่างก็หันมาให้ความสำคัญกับการใช้ประสิทธิภาพและคุณสมบัติที่พิเศษของโครงสร้างนาโนในการที่จะผลิตนวัตกรรมต่างๆ ออกมาให้ผู้คนทั่วไปได้ใช้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้ และตอบสนองต่อความต้องการได้เป็นอย่างดี ทำให้ตลาดของนวัตกรรมนาโนในปัจจุบันนี้มีอัตราการเจริญเติบโตสูง และกำลังอยู่ในความสนใจของทุกคนอย่างมาก [11]

วิทยาศาสตร์นาโน (Nanoscience) คือ วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวัสดุอินทรีย์ อนินทรีย์ และรวมไปถึงสารชีวโมเลกุล ที่มีโครงสร้างสามมิติ ยาว กว้าง สูงด้านใดด้านหนึ่งอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ดังนั้นถ้าพูดถึงนาโนศาสตร์ก็จะเป็นการสร้างหรือศึกษาวัสดุที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร คุณสมบัติของวัสดุนาโนจะแตกต่างจากวัสดุขนาดใหญ่ (Bulk materials) ไม่ว่าจะเป็คุณสมบัติ ทางฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยผลลัพธ์ที่ได้ก็คือจะได้วัสดุชนิดใหม่หรือรู้คุณสมบัติที่แตกต่างและน่าสนใจ [12]

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) คือ เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างการสังเคราะห์ วัสดุอุปกรณ์เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรเทียบเท่ากับระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุที่อยู่ในระดับที่เล็กมากหรือการเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง ทำให้โครงสร้างของวัสดุมีคุณสมบัติพิเศษ ทั้งทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ ซึ่งจะก่อให้เกิดผลประโยชน์สูงสุดต่อผู้ใช้สอย [12]

วัสดุนาโน (Nanomaterial) เป็นวัสดุที่สามารถเป็นได้ทั้ง โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์และคอมโพสิต ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นมาโดยการดัดแปลงการจัดเรียงตัวของ อะตอมหรือโมเลกุลให้มีช่วงขนาด 0.1-100 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นผม ประมาณ 1 แสนเท่า สมบัติและพฤติกรรมต่างๆ ของวัสดุนาโนเหล่านี้ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล และสมบัติทางแม่เหล็ก มีความแตกต่างจากวัสดุนาโนเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในระดับที่เราคุ้นเคย ซึ่งวัสดุนาโนสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นหลายกลุ่มตามการประยุกต์ใช้สอยที่สำคัญ ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes), อนุภาคนาโน (Nanoparticles) และ ฟิล์มบางนาโน (Nanofilms) [13]



รูปที่ 2.2 วัสดุนาโนชนิดต่างๆ [14]

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube)

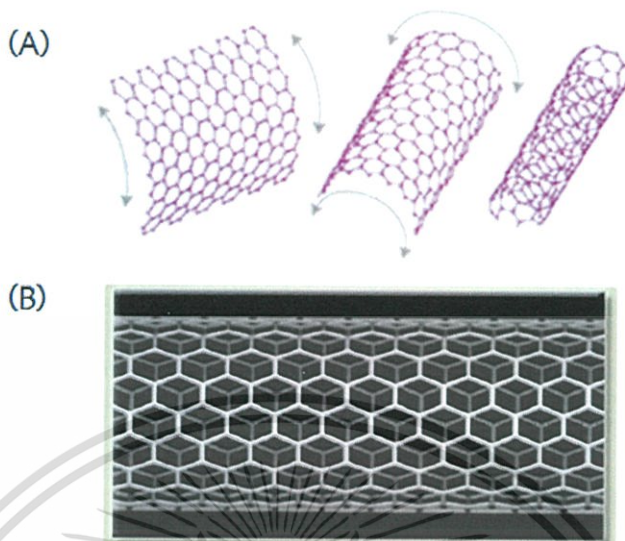
2.2.1 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน

“ท่อนาโนคาร์บอน” ได้รับการรายงานครั้งแรกในวารสาร Nature เมื่อปี 1991 โดยสุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ประเทศญี่ปุ่น [15] ขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมาก ตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟูลเลอรีนจากวิธีอาร์คดีสชาร์จ (Arc discharge) แล้วสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายกับรากไม้ เป็นเส้นยาว บาง จับกันเป็นกลุ่ม โดยมีโครงสร้างของอะตอมเป็นระเบียบและสมมาตร โดยให้ชื่อว่า ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้น คือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube, MWCNTs) จากนั้นปี 1993 อิจิมาและทีมวิจัยสามารถสร้างท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotube, SWCNTs) ขึ้นมาได้ จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนได้รับความสนใจในการศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดและคุณสมบัติตามที่ต้องการ รวมทั้งการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น การนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต การนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือใช้ในระบบการขนส่งยาแบบใหม่ เป็นต้น

ท่อนาโนคาร์บอนเกิดจากอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวกันเป็นแบบวงอะโรมาติกหกเหลี่ยมต่อกันคล้ายแผ่นแกรไฟต์ (Graphite) ที่มีวนเป็นท่อตั้งแสดงในรูปที่ 2.3 (A) โดยที่อะตอมคาร์บอนเหล่านี้เชื่อมต่อกันเป็นตาข่ายด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (Cylindrical shape)

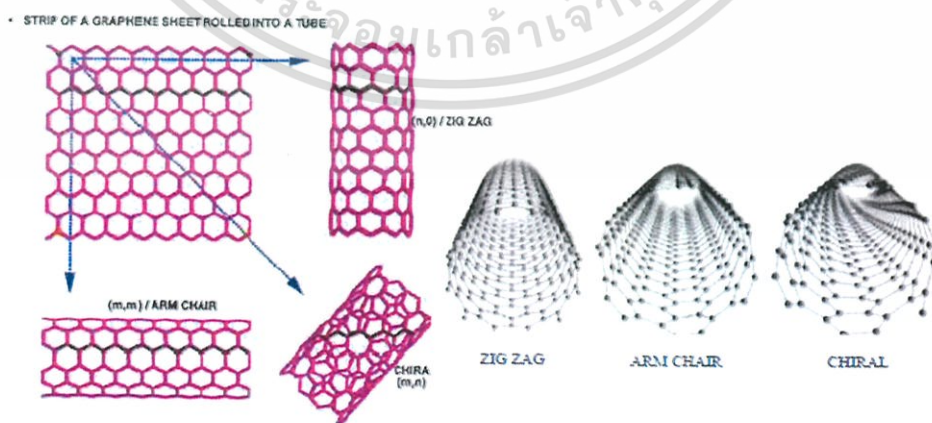
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (B) เส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ในขณะที่ความยาวของท่ออาจยาวได้ถึงระดับไมโครเมตร หรือมากกว่านั้น



รูปที่ 2.3 ลักษณะการม้วนตัวของแผ่นแกรไฟต์เป็นท่อนาโนคาร์บอน (A) [16] และการเชื่อมต่อกันของอะตอมคาร์บอนด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 (B) [17]

ลักษณะการจัดเรียงตัวของวงอะโรมาติกหกเหลี่ยมเป็นท่อนาโนคาร์บอนมี 3 ลักษณะ คือ Amchair, Zig-Zag และ Chiral โดยที่โครงสร้างท่อแบบ Amchair เกิดจากวงอะโรมาติกต่อกันตามแนวสมมาตรแกนตั้ง ขณะที่โครงสร้างท่อแบบ Zig-Zag เกิดจากวงอะโรมาติกต่อกันตามแนวสมมาตรแกนนอน และโครงสร้างท่อแบบ Chiral เกิดจากการต่อกันของวงอะโรมาติกด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรก ซึ่งโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 3 แบบ มีลักษณะแตกต่างกัน [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.4

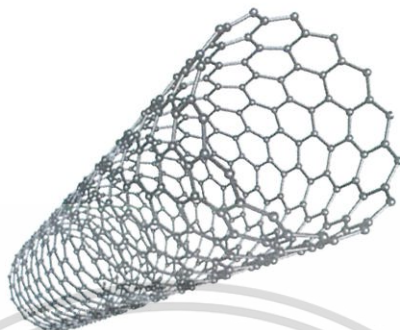


รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวรูปแบบต่างๆ ของวงแหวนหกเหลี่ยมของคาร์บอน [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

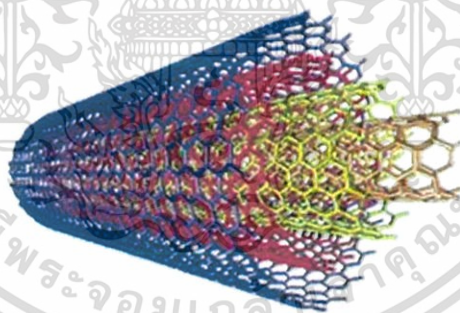
ท่อนาโนคาร์บอนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามจำนวนชั้นของผนังท่อ คือ

1. ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotube, SWCNTs) มีลักษณะเป็นท่อกลวง ซึ่งคล้ายกับการม้วนแผ่นแกรไฟต์หนึ่งแผ่นให้เป็นท่อทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.4–2 นาโนเมตร มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว [19]

2. ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube, MWCNTs) มีลักษณะเหมือนแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนเป็นท่อกลวงซ้อนกันตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34–0.36 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น มีขนาดประมาณ 1.5–15 นาโนเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีขนาดประมาณ 2.5–30 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น [20]

2.2.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

2.2.2.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นโมเลกุลที่มีรูปร่างคล้ายท่อตาข่ายขนาดเล็ก เกิดจากการเรียงตัวกันของอะตอมคาร์บอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในระดับนาโนเมตร ประมาณ 1–15 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร จึงมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันเท่า อีกทั้งยังมีความหนาแน่นเพียง 1.80 g/cm^3 และมีพื้นที่ผิวมากถึง $1,250 \text{ cm}^2/\text{g}$ ซึ่งเป็นสมบัติที่พิเศษของท่อนาโนคาร์บอน [21, 22]

2.2.2.2 สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

ปัจจุบันมีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก ถึงระดับนาโนเมตร เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถด้านการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง โดยท่อนาโนคาร์บอนหนึ่งท่อสามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm^2 ขณะที่ทองแดงนำไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm^2 [23]

2.2.2.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ท่อนาโนคาร์บอนมีค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) สูงมากถึง 1.2 TPa (Tera pascal, 10^{12} N/m^2) ซึ่งมากกว่าเหล็ก 5 เท่า และมีความแรงต่อการดึง (Tensile strength) เท่ากับ 200 GPa (Giga pascal, 10^9 N/m^2) มากกว่าเหล็ก 120 เท่า แต่มีน้ำหนักเบากว่าประมาณ 6 เท่า และมีสมบัติในการนำความร้อนถึง 2000 W/m/K มากกว่าเหล็ก 10 เท่า [21]

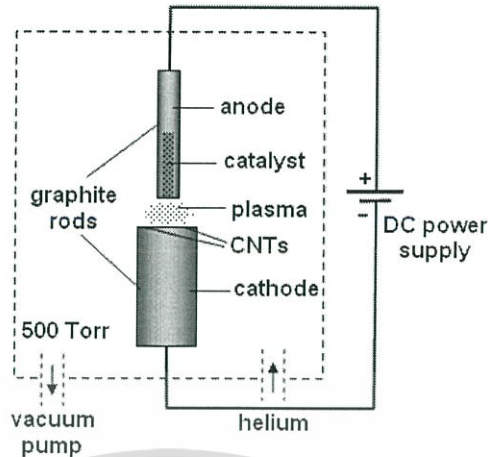
2.2.3 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันในเรื่องของความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณที่ผลิต และความบริสุทธิ์หรือตำหนิของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ วิธีการสังเคราะห์อาจแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ [24] ดังนี้

2.2.3.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge)

เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ $20\text{--}200 \text{ A}$ และความต่างศักย์ประมาณ $20\text{--}40 \text{ V}$ ตกคร่อมแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางห่างกันประมาณ $1\text{--}3$ มิลลิเมตร ภายใต้ความดันต่ำระหว่าง $100\text{--}500 \text{ Torr}$ ในบรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรือ อาร์กอน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จึงเกิดความร้อนสูงทำให้เกิดการแตกตัวเป็นสถานะพลาสมา และเกิดการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอนบริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ (Cathode) ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอน สามารถทำได้โดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมลงโลหะคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ อย่งใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode) วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมากจากโลหะคะตะลิสต์ที่ผสมอยู่ในแท่งแกรไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์

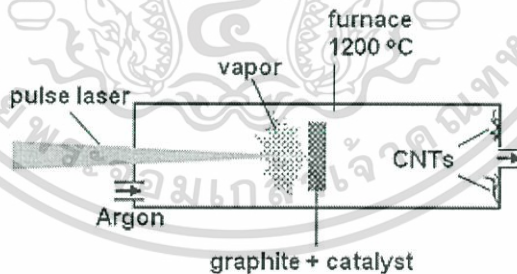
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc-discharge)

2.2.3.2 วิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)

วิธีนี้จะใช้พัลส์แสงเลเซอร์ (Laser pulse) ที่มีความเข้มข้นสูงยิงกระทบแกรไฟต์ ผสมกับผงโลหะคะตะลิสต์ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1200–1500 °C และความดันต่ำประมาณ 500 Torr ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยวิธีนี้จะดีกว่าวิธีอาร์คดิสชาร์จ เนื่องจากท่อคาร์บอนที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง แต่ใช้ง่ายในการสังเคราะห์ค่อนข้างแพง และผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นท่อคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว

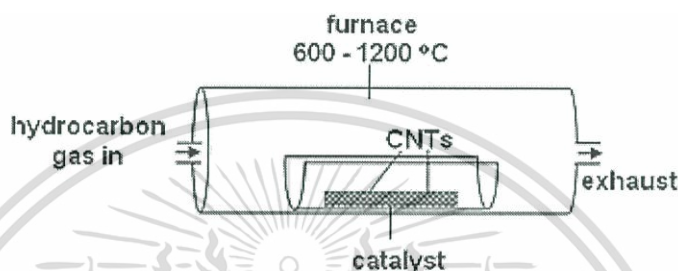


รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยวิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)

2.2.3.3 ตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)

เป็นกระบวนการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ด้วยหลักการของการทำให้ไอของสารตั้งต้น เกิดการแตกตัวด้วยความร้อนและตกสะสมบนฐานรองรับดังแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อผ่านไอหรือแก๊สของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C_2H_2) และเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เข้าไปในเตาเผาที่อุณหภูมิสูง 600 – 1200 °C ซึ่งมีโลหะคะตะลิสต์อยู่ด้วย เช่น ไททาเนียม เหล็ก นิกเกิล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือโคบอลต์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียมและอาร์กอน จะทำให้โมเลกุลของแก๊สเกิดการแตกตัว (Decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอนและตกสะสมบนฐานรองรับที่มีโลหะคตะลิสต์ฉาบอยู่ วิธีนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ โดยการควบคุมขนาดของโลหะคตะลิสต์ ระยะเวลาในการสังเคราะห์ และอัตราการไหลของแก๊ส ตามลำดับวิธีนี้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมาก และมีความบริสุทธิ์สูง อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่ต้องการบนวัตถุที่สนใจได้ แต่อาจมีข้อเสียที่ปริมาณในการเกิดตำหนิหรือความไร้ระเบียบของโครงสร้างสูง (Defect) ทำให้ท่อที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้มักเป็นท่อโค้งงอ



รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)

2.2.4 การปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน [25-26]

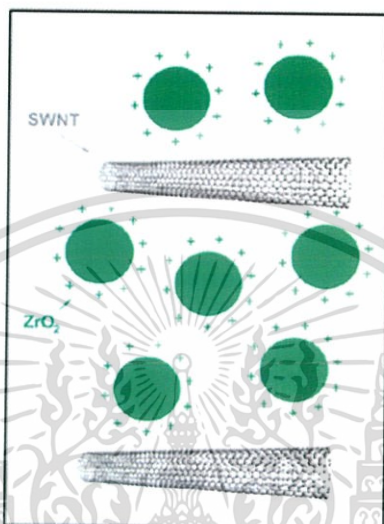
ในการใช้งานท่อนาโนคาร์บอนยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเล็กและมีปัญหาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนด้วยกันเอง จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้เกิดการกระจายตัวในน้ำหรือของเหลวได้ไม่ดี จึงต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งวิธีการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนมี 2 วิธี ดังนี้

2.2.4.1 การปรับปรุงพื้นผิวแบบนอนโควาเลนต์ (Non-covalent surface modification)

ในปัจจุบันวิธีการปรับปรุงพื้นผิวชนิดนี้เป็นที่นิยมอย่างมากในการพัฒนาวัสดุนาโนคอมโพสิต เพราะเป็นวิธีที่ไม่ทำลายโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน ทำให้สมบัติต่างๆของท่อนาโนคาร์บอนไม่เปลี่ยนแปลงไป แต่การปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีนี้ก็ยังมีข้อเสียในเรื่องของประสิทธิภาพในการรับและส่งผ่านแรง เนื่องจากการเชื่อมต่อกันระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ไม่ได้เกิดการสร้างพันธะซึ่งกันและกัน เช่น พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding), แรงกระทำระหว่างไพเอเล็กตรอน (π - π interaction), การยึดเหนี่ยวกันด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic interaction), แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vaderwaals force) และแรงกระทำระหว่างขั้ว (Hydrophobic & Hydrophilic interaction) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยของ Jin Zhu และคณะ [27] ได้ใช้วิธี Non-covalent surface modification เพื่อช่วยในการกระจาย SWCNTs โดยอาศัยแรงผลักระหว่างประจุของอนุภาค ZnO_2 ในระดับนาโน โดยการนำ SWCNTs มาใส่ในน้ำที่มีอนุภาคนาโน ZnO_2 กระจายตัวอยู่ จากนั้นนำไปทำให้กระจายตัวด้วยเครื่อง Ultrasonic และตั้งสารละลายทิ้งไว้ พบว่าในสารละลายแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ตกตะกอน ซึ่ง SWCNTs ไม่ถูกเคลือบด้วย ZnO_2 และส่วนที่แขวนลอยอยู่ในสารละลาย ZnO_2 ซึ่งถูกเคลือบด้วย ZnO_2 ทำให้ SWCNTs กระจายตัวอยู่ในสารละลาย ZnO_2 ได้ แสดงดังรูปที่ 2.10



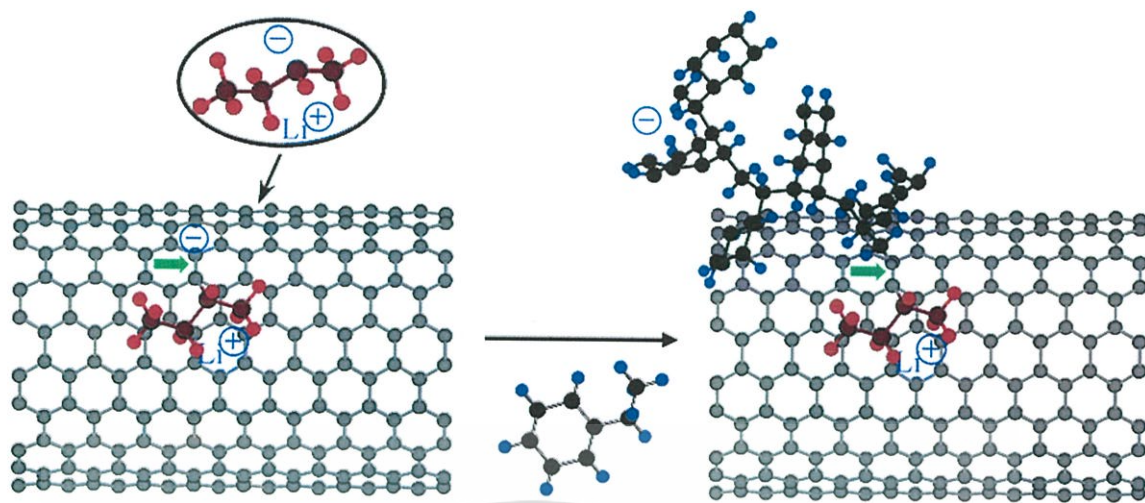
รูปที่ 2.10 การกระจายตัวของ SWCNTs เนื่องจากแรงผลักระหว่างประจุของ ZnO_2 [27]

2.2.4.2 การปรับปรุงพื้นผิวแบบโควาเลนต์ (Covalent surface modification)

การปรับปรุงพื้นผิววิธีนี้ เป็นการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันที่บริเวณพื้นผิว ทำให้โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนเกิดจุดบกพร่องขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน โดยหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจะช่วยทำให้การยึดติดระหว่างท่อนาโนคาร์บอนและ Matrix ดีขึ้น ส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน, การเกิดปฏิกิริยาการเติม (Addition reaction) ที่พื้นผิวท่อนาโนคาร์บอน และการเกิดปฏิกิริยาแทนที่ของ Fluorinate CNTs เป็นต้น ซึ่งเมื่อผ่านการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันแล้ว จะทำให้โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนบางส่วนถูกทำลาย ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิววิธีนี้ควรคำนึงถึงวัสดุประสงค์ในการใช้งานด้วย

G. Viswanathan และคณะ [28] ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยา In-situ polymerization ของสายโซ่พอลิสไตรีนลงบนพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยา Anionic polymerization โดยการนำท่อนาโนคาร์บอนมากระจายตัวใน Cyclohexane จากนั้นเติม Butyl lithium ในปริมาณมากเกินไป ทำให้เกิด Carban ion ที่บริเวณพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11 ส่งผลให้การจับตัวกันของท่อนาโนคาร์บอนลดลง เนื่องจากเกิดการผลักรักระหว่างประจุลบที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การเกิดปฏิกิริยา Anionic polymerization กับสไตรีนมอนอเมอร์ของท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการตัดแปรหมู่ฟังก์ชัน [28]

2.3 อนุภาคทองในระดับนาโน (Gold nanoparticles) [29]

อนุภาคทองในระดับนาโน ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1857 โดย มิเชล ฟาราเดย์ ได้ทำการศึกษาโดยการเตรียม Colloidal gold sol (Nanoparticles) โดยปฏิกิริยารีดักชันของ Gold chloride โดยใช้ Phosphorus เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งในการเตรียมอนุภาคทองในระดับนาโนโดยปฏิกิริยารีดักชันที่ มิเชล ฟาราเดย์ รายงานไว้ประกอบไปด้วย 1) สารประกอบของทอง 2) ตัวทำละลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะสารประกอบของทอง ได้แก่ น้ำ ตัวทำละลายมีขั้ว หรือตัวทำละลายไม่มีขั้ว และ 3) ตัวรีดิวซ์ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างคอลลอยด์อนุภาคทองในระดับนาโน ขนาด 40 นาโนเมตร [30]

2.3.1 สมบัติของทองคำแบบก้อนและอนุภาคทองในระดับนาโน

ทองคำเป็นโลหะไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ดังนั้น เมื่อสัมผัสกับอากาศ สีของทองคำจะไม่หมองและไม่เกิดสนิม ทองคำเป็นโลหะที่มีความอ่อนตัวมากที่สุดและมีความสามารถในการขึ้นรูป คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะยืดขยาย เมื่อถูกตีหรือรีดในทุกทิศทาง โดยไม่เกิดการปริแตกได้สูงสุด ทองคำบริสุทธิ์จะไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ง่าย จึงทนต่อการผุกร่อนและไม่เกิดสนิมกับอากาศ แต่มีปฏิกิริยากับคลอรีน ฟลูออรีน และน้ำประสานทอง ทองคำเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี สะท้อนความร้อนได้ดี จึงได้มีการนำทองคำไปฉาบไว้ที่หน้ากากหมวกของนักบินอวกาศ เพื่อป้องกันรังสีอินฟราเรด นอกจากนี้ทองคำแบบก้อนจะมีจุดหลอมเหลวที่ 1064 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่ 2970 องศาเซลเซียส สมบัติทองคำแบบก้อนแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของทองคำแบบก้อน

คุณสมบัติ	
มวลอะตอม	196.97
เลขอะตอม	79
เลขไอโซโทปที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ	1
จุดหลอมเหลว (°C)	1064
โครงสร้างผลึก	FCC
ความหนาแน่น (gcm^{-3})	19.3
ค่าการนำความร้อน ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	310
ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20 °C ($\mu\Omega$)	0.022
ค่า Young's Modulus (E GPa)	79
ค่าความแข็ง (Hv)	25
แรงต้านทานการดึง (MPa)	124
ความเค้นพิสูจน์ที่ 0.2% (MPa)	30
อัตราส่วนปัวซอง	0.42

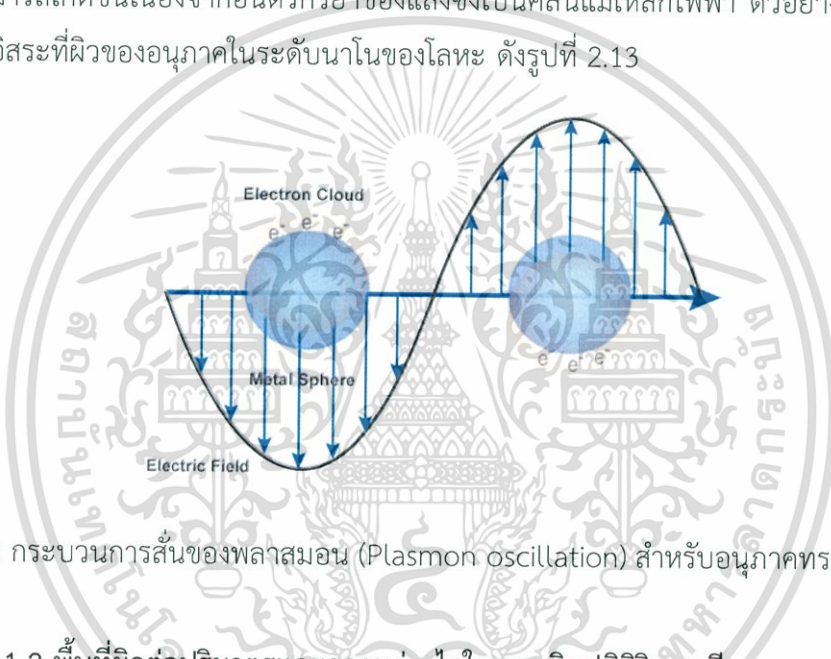
การที่ขนาดของวัสดุมีขนาดเล็กลงในระดับนาโน จะส่งผลโดยตรงกับสัดส่วนของจำนวนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้า และผิวสัมผัสของวัสดุเพิ่มมากขึ้น โดยที่การเพิ่มขึ้นของจำนวนอะตอมที่บริเวณผิวสัมผัสของวัสดุนั้น จะส่งผลให้วัสดุที่มีขนาดระดับนาโนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแม่เหล็ก และสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่อย่างสิ้นเชิง ทำให้ได้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างๆ แตกต่างไปจากเดิม

2.3.1.1 สมบัติทางแสง

สมบัติทางแสงซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะและโลหะออกไซด์ เช่น ทองคำจะแสดงสมบัติทางแสงอย่างเด่นชัด อธิบายด้วยปรากฏการณ์เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance, SPR) ซึ่งเป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ ที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวดอของโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่น กระจก ทองคำกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาดยอคลื่นและความกว้างของเอกสารถือเป็นเอกสารถงวงไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำทองคำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆ จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมรอบๆ วัสดุนั้น อนุภาคทองในระดับนาโนจะมีสีแดงแทนที่จะเป็นสีเหลืองวาวอย่างที่พบได้ทั่วไป ซึ่งโลหะชนิดอื่นที่นอกเหนือไปจากทองคำก็สามารถแสดงปรากฏการณ์เชิงแสงในลักษณะเดียวกันนี้ได้เช่นกัน เช่น อนุภาคเงินในระดับนาโน จะมีสีเหลืองเข้ม แทนที่จะเป็นสีเงินวาวที่เราคุ้นเคย อย่างไรก็ตามโลหะส่วนใหญ่จะมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงใกล้รังสียูวีซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่มองเห็น นอกจากนี้อนุภาคในระดับนาโนของโลหะเกือบทุกชนิดไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคในระดับนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมตามปกติทำให้เราไม่ค่อยพบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่นๆ

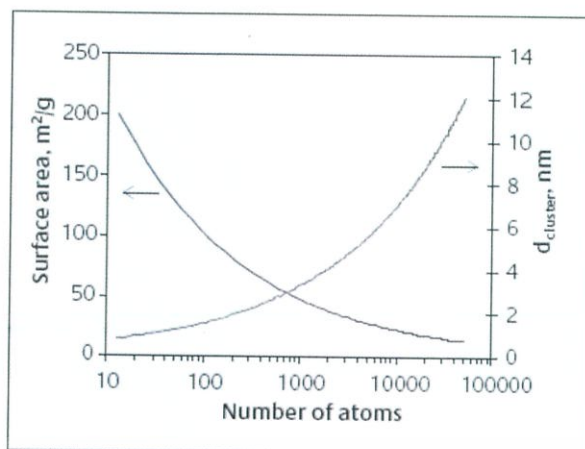
เซอร์เฟซ พลาสมอน เรโซแนนซ์ หรือสมบัติทางแสงของอนุภาคในระดับนาโนของโลหะ เช่น ทองคำ สามารถเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาของแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น แสงกับอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคในระดับนาโนของโลหะ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กระบวนการสั่นของพลาสมอน (Plasmon oscillation) สำหรับอนุภาคทรงกลม [31]

2.3.1.2 พื้นที่ผิวต่อปริมาตรและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ทองคำที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร จะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface to volume) สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับทองคำชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น อนุภาคทองที่มีขนาด 2 นาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวสูงถึง 150 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่ออนุภาคเล็กลงจะทำให้พื้นที่ผิวสูงขึ้น ดังนั้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่าย และยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของเคมีผิวหน้า ในรูปที่ 2.14 และ 2.15 จะเห็นว่าเมื่อขนาดของอนุภาคทองเล็กลงจนทำให้จำนวนอะตอมของทองลดลงแบบเอกโปเนนเชียล (Exponential decay) และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นแบบเอกโปเนนเชียล (Exponential growth)



รูปที่ 2.14 การประมาณจำนวนอะตอมและพื้นที่ผิวของอนุภาคทองในระดับนาโนที่มีขนาดแตกต่างกัน



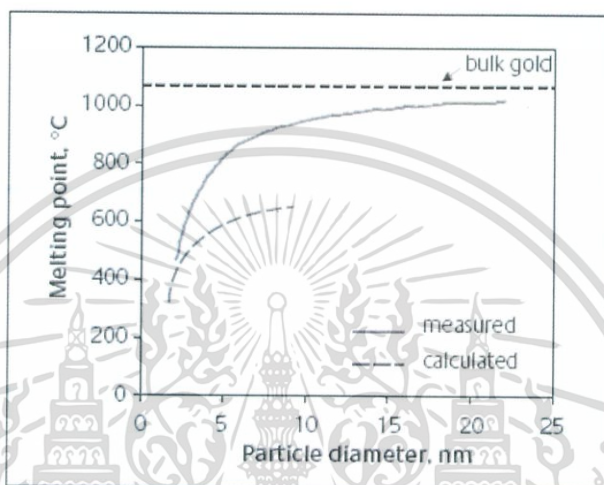
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบจำนวนอะตอมผิวหน้าของวัสดุแบบก้อนใหญ่กับอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโน

การมีอะตอมจำนวนมากอยู่ที่บริเวณผิวหน้า จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่าย และยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆอันเนื่องมาจากอิทธิพลของเคมีผิวหน้า ประโยชน์ที่ได้จากการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวของอนุภาคในระดับนาโนที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมี และการใช้เป็นตัวกรองแบบพิเศษ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ เมื่อวัสดุมีปริมาณอะตอมผิวหน้ามากขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากอิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์และอิทธิพลสเตอริก (Electronic and steric effects) โดยที่อิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์ จะเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณศูนย์กลางปฏิกิริยา (Reaction center) เช่น การเกิดประจุบวกหรือประจุลบขึ้น ส่วนอิทธิพลสเตอริก จะเกี่ยวข้องกับลักษณะ รูปร่าง และความเกะกะภายในโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.3 จุดหลอมเหลว

สาเหตุที่ทำให้อนุภาคทองในระดับนาโนมีจุดหลอมเหลวน้อยกว่าปกติ เกิดจากอนุภาคในระดับนาโนมีปริมาณอะตอมผิวหน้ามาก โดยที่อะตอมผิวหน้าจะมีระดับพลังงานที่ใช้ในการยึดติดกันและกันน้อยกว่าที่พบในของแข็งปกติ และจากอิทธิพลเคลวิน (Kelvin effect) จะพบว่าอนุภาคทองในระดับนาโนจะมีความดันไอสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ระเหยได้ง่ายขึ้น ทองคำที่มีขนาดผลึกในระดับนาโนเมตรจะมีจุดหลอมเหลวน้อยกว่าทองคำแบบก้อนใหญ่ โดยเมื่อขนาดอนุภาคยิ่งเล็กลงก็ยิ่งทำให้จุดหลอมเหลวของทองคำต่ำลงไปด้วย ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 อุณหภูมิ ณ จุดหลอมเหลวของทองคำที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน

2.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน

อนุภาคทองในระดับนาโนสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

1. อาร์กดิสชาร์จ (Arc discharge) เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงตกร่วมระหว่างแท่งโลหะสองแท่ง จะทำให้เกิดประกายไฟหรือเกิดสถานะพลาสมาขึ้นระหว่างแท่งโลหะนี้ ภายใต้บรรยากาศปกติ หรือกระทำในตัวกลางที่เป็นของเหลว ผลลัพธ์ คือ ได้อนุภาคทองในระดับนาโนตรงบริเวณกลางๆ ขั้วของแท่งโลหะ ส่วนการควบคุมขนาด อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิ และความสม่ำเสมอของพลาสมา

2. พัลส์เลเซอร์อะเบลชัน (Pulsed laser ablation) เป็นวิธีการที่ให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ แสงเลเซอร์กับทองคำที่ต้องการเตรียมเป็นอนุภาคในระดับนาโน จากนั้นบริเวณผิวของทองคำจะมีการดูดกลืนพลังงานที่ตกกระทบและเกิดความร้อนสูง แล้วมีการเปลี่ยนสถานะเป็นไอของทองคำ จากนั้นเกิดการควบแน่นเป็นอนุภาคทองในระดับนาโน โดยการควบแน่นไอของทองคำสามารถเกิดในตัวกลางที่เป็นของเหลวได้ดี ส่วนการควบคุมขนาดสามารถทำได้โดยการควบคุมพลังงานของแสงเลเซอร์ และชนิดของตัวกลางที่เป็นของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปฏิกิริยารีดักชันทางเคมี (Chemical reduction) เป็นวิธีการทางเคมีที่เตรียมจากไอออนของทองคำซึ่งมีเลขออกซิเดชันเป็นบวก หรือเป็นสารประกอบของทองคำที่สามารถละลายในตัวกลางที่เป็นของเหลวและไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาค เมื่อไอออนของทองคำได้รับอิเล็กตรอนจากตัวรีดิวซ์จะเปลี่ยนเป็นอะตอมของทองคำที่มีเลขออกซิเดชันเป็นศูนย์ จากนั้นเกิดการควบแน่นเป็นอนุภาคทองในระดับนาโน ในการควบคุมขนาดสามารถทำได้โดยการควบคุมด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างตัวรีดิวซ์กับสารประกอบของทองคำ ชนิดของตัวรีดิวซ์ และชนิดของสเตบิไลเซอร์ (Stabilizer)

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนโดยวิธีรีดักชันทางเคมี โดยใช้ตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพ คือ โซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) เนื่องจากเป็นวิธีที่เรียบง่ายที่สุดในการเตรียมอนุภาคทองในระดับนาโน แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอนุภาคทองในระดับนาโนโดยใช้ Sodium citrate เป็น Reducing agent และ Stabilizing agent

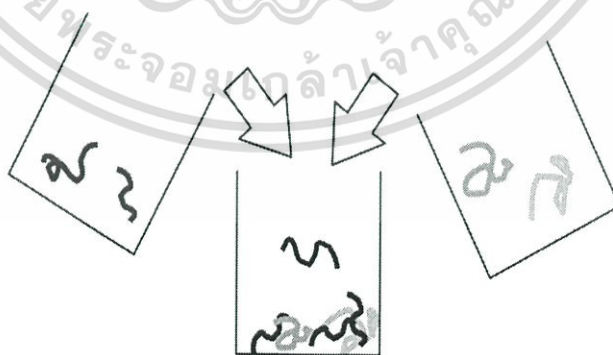
กลไกการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน มีดังนี้

1. เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วของนิวคลีไอของอนุภาคทองในระดับนาโน
2. นิวคลีไอของอนุภาคทองในระดับนาโนจะก่อตัวรวมกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น
3. การรวมตัวกันของนิวคลีไอและการก่อตัวเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นนั้นยังคงเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ อย่างช้าๆ เนื่องจากยังคงเกิดปฏิกิริยารีดักชันอยู่
4. อนุภาคทองในระดับนาโนจะโตขึ้นอย่างรวดเร็วจนได้ขนาดสุดท้าย โดยที่ขนาดสุดท้ายนี้จะถูกกำหนดด้วยอนุภาคทองเริ่มต้นที่อยู่ในสารละลาย

2.4 เทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ (Layer-by-Layer technique)

เลเยอร์บายเลเยอร์เป็นเทคนิคการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง [32] โดยแผ่นฟิล์มบางนั้นเกิดจากการเรียงตัวกันของสารที่มีประจุต่างชนิดกัน เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย R. K. Iler ในปี ค.ศ. 1966 [33] ซึ่งเทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้ใหม่อีกครั้งในภายหลัง เมื่อมีการค้นพบการประยุกต์ใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ที่หลากหลายมากขึ้นโดย Prof. Gero Decher ที่ Johannes Gutenberg-Universität Mainz [34]

โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) เป็นการนำพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกันมาทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ได้สารชนิดใหม่ที่มีสมบัติเหมือนหรือต่างไปจากพอลิเมอร์ชนิดเดิม โดยโพลีอิเล็กโทรไลต์ คือกลุ่มของสารโมเลกุลใหญ่ (Macromolecules) ที่สามารถแตกตัวได้เมื่ออยู่ในของเหลวเกิดเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโพลีอิเล็กโทรไลต์เริ่มต้นโดย Fuoss [35] ที่นำสารที่มีประจุบวกและประจุลบมารวมกัน ทำให้เกิดการตกตะกอน ได้ตะกอนที่ไม่ละลายน้ำดังแสดงในรูปที่ 2.18 พบว่าพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเกิดจาก Coulomb interaction ที่แข็งแรง แต่ในบางกรณีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโพลีอิเล็กโทรไลต์สามารถเกิดได้จากพันธะไอออนิกที่ไม่แข็งแรง (Weak ionic interaction) ได้เช่นกัน สารประกอบเชิงซ้อนโพลีอิเล็กโทรไลต์สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้สองกลุ่ม [36] ดังนี้ คือ สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกกับประจุลบ (PE-PE) และ สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ หรือในทิศทางตรงกันข้าม (PE-Surfs) โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PE-PE เท่านั้น



รูปที่ 2.18 การผสมสารละลายที่มีประจุบวกและประจุลบเข้าด้วยกันทำให้เกิดการตกตะกอน [37]

การเกิด PE-PE เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่ทำได้โดยการผสมพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงกันข้าม และละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำเข้าด้วยกัน การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะเกิดขึ้นด้วยตนเอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Spontaneous formation) ขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงไมโครเมตรจนถึงนาโนเมตร โดยทฤษฎีที่ใช้อธิบายถึงการเกิด PE-PE ที่ได้รับความนิยมมี 2 ทฤษฎี คือ

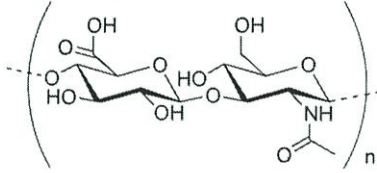
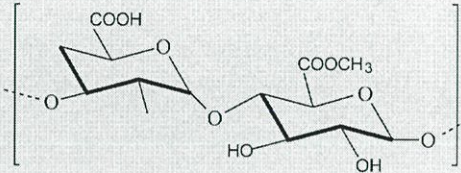
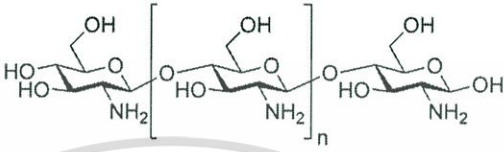
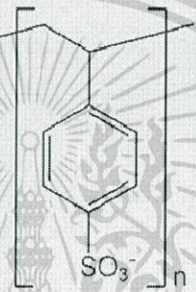
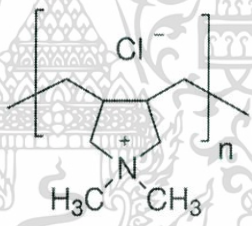
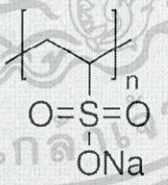
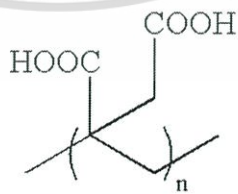
1) Debye-Hückel theory ซึ่งเป็นทฤษฎีที่อธิบายเกี่ยวกับการแตกตัวสมบูรณ์ของอิเล็กโทรไลต์แก่ในสารละลายเจือจาง และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เกิดขึ้นเป็นผลจากไฟฟ้าสถิต (Electrostatic effects) ของไอออนตรงกันข้าม โดยมีความสัมพันธ์กับความแรงของไอออน (Ionic strength) และ Activity coefficient ซึ่งการเกิด PE-PE สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการนี้ เช่นเดียวกัน กล่าวคือเมื่อนำพอลิเมอร์ที่สามารถแตกตัวได้และมีประจุต่างกันมาทำปฏิกิริยากันแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น ทำให้ความเป็นประจุของพอลิเมอร์แต่ละชนิดลดลงไป [37]

2) Flory-Huggins theory เป็นทฤษฎีว่าด้วยอุณหพลศาสตร์ของสารละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายซึ่งค่าที่ได้ออกมาคือค่าพลังงานอิสระ (Gibbs free energy) โดยการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์จะมีการจัดรูปแบบอยู่ 2 ชนิด คือ แบบไม่เป็นระเบียบ (Random coil) และแบบที่เป็นผลึก แต่ทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีลักษณะผสม คือมีทั้งส่วนที่มีการจัดตัวเป็นแบบผลึก และแบบที่ไม่เป็นระเบียบ หากผสมพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงกันข้ามทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน ในกรณีที่บนสายหลักของพอลิเมอร์มีชิ้นส่วนของชิ้นส่วนประจุ (Fragment of charge) น้อย การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะน้อยไปด้วย แต่ถ้าชิ้นส่วนของประจุเพิ่มมากขึ้น ไฟฟ้าสถิตระหว่างพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นแล้วทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน รวมไปถึงจนถึงสามารถตกตะกอนออกมาได้ [37]

ตารางที่ 2.2 พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียม PE-PE [38]

ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียม PE-PE	โครงสร้าง	ชนิดของประจุ
Poly(L-lysine)		Polyanion
Carageenan		Polyanion
Alginate		Polyanion

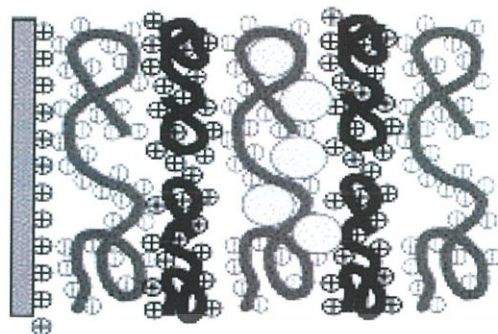
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hyaluronic acid		Polyanion
Pectin		Polyanion
Chitosan		Polycation
Poly(styrenesulfonic acid)		Polyanion
Poly(diallyldimethylammonium)		Polycation
Poly(vinylsulfonic acid)		Polyanion
Poly(itaconic acid)		Polyanion

โพลีอิเล็กโทรไลต์หลายชั้น (Polyelectrolyte multilayers) คือ การนำโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงกันข้าม (Polyanion และ Polycation) มาเคลือบไว้บนพื้นผิวของซับสเตรต (Substrate) โดยจำนวนชั้นของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เคลือบขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการและการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การนำไปเตรียมเป็นฟิล์มผสมชนิดบาง (Thin-film) จากพอลิไดอะเซทิลีน เวสเซล

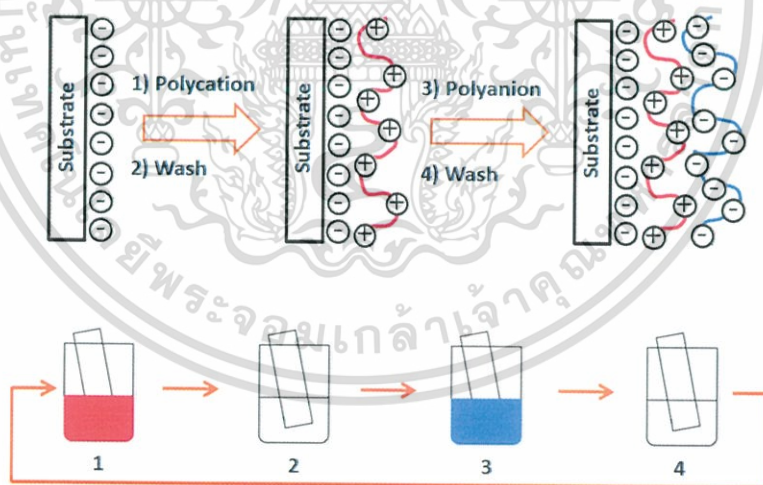
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อตรวจหาสารประกอบอะโรมาติก โดยความหนาของแต่ละชั้นฟิล์มอยู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงใน รูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โพลีอิเล็กโทรไลต์หลายชั้น (Polyelectrolyte multilayers) [39]

เทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ [40] มีข้อได้เปรียบเหนือวิธีการผลิตฟิล์มบางวิธีอื่นๆ โดยเป็นเทคนิคที่สามารถทำได้ง่ายและมีราคาไม่แพง ซึ่งวัสดุที่สามารถนำมาใช้กับเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์มีหลากหลาย ได้แก่ พอลิเมอร์ที่มีประจุ โลหะ เซรามิก อนุภาคนาโน และ โมเลกุลทางชีววิทยา อีกหนึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ คือ สามารถควบคุมความหนาของแผ่นฟิล์มได้ เทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับ การควบคุมการกักต่อน การประยุกต์ทางชีวการแพทย์ [41] วัสดุแข็งแรงเป็นพิเศษ [42] และ อื่นๆอีกมากมาย [43]



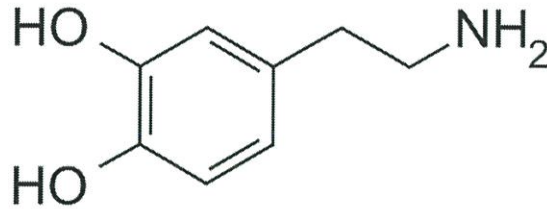
รูปที่ 2.20 การประดิษฐ์ฟิล์มบางด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ (Layer-by-Layer)

2.5 โดพามีน (Dopamine) [44]

โดพามีน (Dopamine) เป็นสารเคมีในสมองที่จัดอยู่ในกลุ่มแคทีโคลามีน สร้างมาจากกรดอะมิโนชนิดไทโรซีน โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ไทโรซีนไฮดรอกซิเลส เป็นทั้งสารสื่อประสาทที่คอยกระตุ้นโดพามีนรีเซพเตอร์ (Dopamine receptor) และเป็นฮอร์โมนที่หลั่งมาจากไฮโปทาลามัส

เอกลีวนเป็นเอกลีวนที่ส่งเสริมนิสัยที่ดีทั้งทางร่างกายและจิตใจ โดยเน้นให้ผู้เรียนได้เรียนรู้และเข้าใจเนื้อหาที่เรียนอย่างลึกซึ้งและมีความหมาย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Hypothalamus) โดยเมื่อโดพามีนถูกหลั่งออกมาแล้วจะส่งผลกระทบต่ออารมณ์ให้มีความตื่นตัว กระฉับกระเฉง มีสมาธิมากขึ้น และไวต่อสิ่งกระตุ้นต่างๆ รอบตัว



รูปที่ 2.21 โครงสร้างโดพามีน (Dopamine) [44]

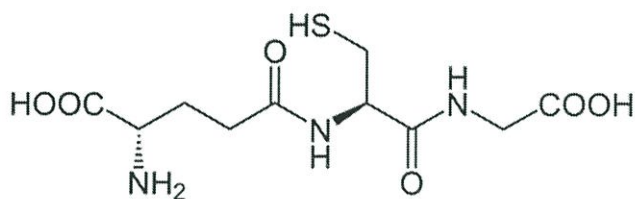
โดพามีน มีส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อร่างกาย หากร่างกายมีปริมาณโดพามีนน้อยเกินไป จะทำให้เกิดเป็นโรคพาร์กินสัน โดยโรคพาร์กินสันเป็นโรคทางประสาทที่พบบ่อยในผู้สูงอายุ โดยจะมีอาการสั่น เกร็ง และเคลื่อนไหวช้า โรคพาร์กินสันนั้นเกิดจากการเสื่อม และตายไปของเซลล์สมองที่สร้างสารโดพามีน จนไม่สามารถสร้างสารโดพามีนได้เพียงพอ ซึ่งสารโดพามีนนั้นมีความสำคัญต่อการควบคุมการเคลื่อนไหวของร่างกาย ในการตายของเซลล์กลุ่มนี้เกิดขึ้นได้เป็นปกติในผู้สูงอายุ แต่ในผู้ป่วยโรคพาร์กินสัน พบว่ามีเซลล์ตายมากกว่าครึ่งหนึ่งของทั้งหมด และในทางกลับกัน หากร่างกายมีสารโดพามีนในสมองมากเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสมองส่วนพรีออนทัล ซึ่งสมองส่วนนี้ทำหน้าที่เกี่ยวกับอารมณ์ ความรู้สึกนึกคิด การเรียนรู้ ความจำ ก็จะทำให้เกิดอาการป่วยทางจิต ซึ่งผู้ป่วยโรคจิตเภทจะมีระดับโดพามีนในสมองมากกว่าคนปกติ ดังนั้นเมื่อโดพามีน ส่งผลกระทบต่อควบคุมอารมณ์ของเราเช่นนี้ เราจึงควรรับประทานอาหารที่อุดมด้วยโปรตีน เนื่องจากโดพามีนผลิตได้จากกรดอะมิโนชนิดไทโรซีน เช่น รับประทานพวกเนื้อสัตว์ต่าง ๆ นม ไข่ ถั่วเหลือง เพื่อส่งเสริมให้ร่างกายได้รับสารโดพามีนอย่างเหมาะสม ไม่มาก หรือน้อยจนเกินไป

2.6 กลูต้าไธโอน (Glutathione) [45]

กลูต้าไธโอน คือ สารต้านอนุมูลอิสระ ที่ถูกสร้างและใช้มากที่สุดในร่างกาย นับเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยปกป้องสายตาของคนเรา ช่วยเปลี่ยนแป้งที่สะสมในร่างกายให้เป็นพลังงาน และป้องกันการสะสมของไขมันซึ่งอาจนำไปสู่การเป็นโรคหัวใจ กลูต้าไธโอนทำหน้าที่ปกป้องทุกเซลล์ของร่างกาย แต่เมื่ออายุมากขึ้น ปริมาณกลูต้าไธโอน ในร่างกายจะลดน้อยลง หรือถูกผลิตขึ้นช้าลงและมีปริมาณน้อยลง

คนเราเมื่อเข้าอายุ 20 ปี ปริมาณกลูต้าไธโอน ในร่างกายจะลดลงเฉลี่ย 8-12% ต่อ 10 ปี แต่หากร่างกายมีการบริโภคยาหรือเคมีมากเกินไป ปริมาณการลดลงของกลูต้าไธโอนในร่างกายจะรวดเร็วกว่าที่คาดไว้ ทำให้ร่างกายเสื่อมโทรมเร็วก่อนวัย และโรคต่างๆ เข้าแทรกแซงได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของกลูตาไธโอน (Glutathione) [46]

กลูตาไธโอนประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สำคัญ 3 ชนิดรวมตัวกันอยู่ คือ ซิสเตอิน (Cystein), ไกลซีน (Glycine) และ กลูตาเมท (Glutamate) ซึ่งเซลล์ทุกเซลล์ในร่างกายสามารถผลิตกลูตาไธโอนได้เอง และถูกผลิตมากที่สุดที่ตับ ปอด ไต ม้าม ตับอ่อน และเลนส์แก้วตา สารมหัศจรรย์นี้เป็นกุญแจสำคัญในการช่วยให้ร่างกายแข็งแรง หน้าที่สำคัญ 4 ประการ คือ

- 1) สร้างภูมิคุ้มกันให้ร่างกาย โดยกระตุ้นการสร้างเม็ดเลือดขาวเพื่อต่อสู้กับเชื้อโรค ทั้งไวรัส แบคทีเรีย และสิ่งแปลกปลอมอื่นๆที่เข้าสู่ร่างกาย รวมทั้งเซลล์มะเร็ง
- 2) ทำหน้าที่กำจัดสารพิษที่ผ่านเข้าในร่างกาย โดยจะจับสารพิษที่ไม่ละลายน้ำให้เปลี่ยนเป็นสารที่ละลายน้ำ และกำจัดออกทางไตหรือทางลำไส้ ดังนั้นตับและไตซึ่งเป็นอวัยวะที่มีของเสียและสารพิษสะสมมากที่สุด จึงพบกลูตาไธโอนถูกผลิตออกมามากที่สุด เพื่อทำหน้าที่กำจัดของเสียนั้นเอง ในทำนองเดียวกัน ปอดก็พบกลูตาไธโอนในปริมาณสูง เพื่อกำจัดของเสียจากที่คนเราหายใจเอาฝุ่นละอองและควันพิษเข้าไปที่ปอดนั่นเอง
- 3) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีฤทธิ์แรงที่สุด ผลิตขึ้นเองโดยทุกเซลล์ในร่างกายโดยธรรมชาติ มีฤทธิ์ต้านการอักเสบ ปกป้องเซลล์ให้แข็งแรง ช่วยการไหลเวียนของระบบเลือด รักษาการทำงานของหัวใจและปอด ช่วยชะลออายุของเซลล์ทุกเซลล์ และชะลอความเสื่อมโทรมของร่างกายและของอวัยวะทุกส่วน
- 4) ช่วยกระตุ้นการสร้างและซ่อมแซม ‘เซลล์และดีเอ็นเอที่สึกหรอ’ นับเป็นกุญแจสำคัญในการสังเคราะห์โปรตีนและไขมัน กระตุ้นการทำงานของเอ็นไซม์ชนิดต่างๆ

2.7 การวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

เคมีไฟฟ้าวิเคราะห์ (Electroanalytical chemistry) เป็นการนำหลักการทางเคมีไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ ทั้งทางด้านคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ โดยอาศัยการตอบสนองทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสาร เทคนิคนี้มีข้อดีกว่าวิธีวิเคราะห์ธรรมดา คือ สามารถใช้วิธีการทางไฟฟ้าควบคุมขอบข่ายและทิศทางของการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้

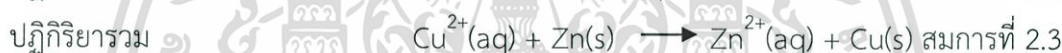
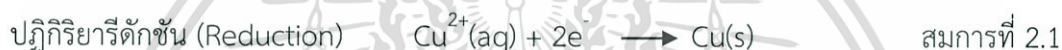
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 หลักการทางเคมีไฟฟ้า [47-48]

เคมีไฟฟ้าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งปริมาณทางไฟฟ้ามีการส่งผ่านจากปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าทำงานเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ส่วนที่สอง คือ อุปกรณ์ทางเคมีไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ตรวจวัดหรือให้สัญญาณปริมาณทางไฟฟ้า และส่วนที่สาม คือ สารละลายที่มีเกลืออิเล็กโทรไลต์ละลายอยู่ เพื่อนำไฟฟ้าในสารละลาย

หัวใจเคมีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าดังนี้

1. ปฏิกิริยารีดอกซ์ [49] คือ ปฏิกิริยาเคมี ที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้น ทำให้เลขออกซิเดชันมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้มีอะตอมของธาตุบางตัวสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอน จะเรียกปฏิกิริยาที่เกิดการเสียอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และเรียกปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ดังตัวอย่างต่อไปนี้



2. ปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียส (Heterogeneous) คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าขั้วไฟฟ้ากับสารละลายด้วยกระบวนการถ่ายเทมวลและอิเล็กตรอน

3. กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยา หรือกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาจะมีการส่งผ่านสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า

4. ปริมาณกระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการถ่ายเทมวล ซึ่งมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ ไมเกรชัน (Migration), การแพร่ (Diffusion) และการพา (Convection) รวมถึงจลศาสตร์ของปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอน

1. การนำพาไอออนในสารละลาย (Mass transfer)

การเคลื่อนที่ของไอออนต่างๆที่อยู่ในสารละลายแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ดังต่อไปนี้

1.1 ไมเกรชัน (Migration) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนที่มีประจุเข้าหาขั้วไฟฟ้าตามแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต หรือภายใต้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้กับขั้วไฟฟ้า คือ พวกที่มีประจุไฟฟ้าบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าลบ และพวกที่มีประจุไฟฟ้าลบเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าบวก

1.2 การแพร่ (Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนที่มีประจุเข้าหาขั้วไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เอง เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น โดยเคลื่อนที่จากบริเวณที่สารละลายมีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่สารละลายมีความเข้มข้นต่ำกว่า เพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้น

1.3 การพา (Convection) เป็นการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงทางกายภาพทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลาย เช่น การคน การกวนสารละลาย การหมุนหรือการสั่นของอิเล็กโทรด หรือเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของสารทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบการพา

2. กระบวนการที่ผิวหน้าขั้ว

กระบวนการที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ โดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ผิวหน้าอิเล็กโทรด กระบวนการแบบนี้เรียกว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic current process) และกระแสที่เกิดขึ้น เรียกว่า กระแสฟาราเดอิก (Faradaic current, I_{far}) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ ที่กล่าวว่า ปริมาณของอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส และเมื่อวัดกระแสฟาราเดอิกที่เกิดขึ้นจากสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งถูกรีดิวซ์หรือถูกออกซิไดซ์ที่อิเล็กโทรด ทำให้ทราบจำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาและสามารถนำมาหาปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้

2.2 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (Adsorption) ของไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับอิเล็กโทรดที่บริเวณผิวหน้าอิเล็กโทรด แต่ไม่ข้ามรอยต่อระหว่างอิเล็กโทรดและสารละลาย และไม่มีปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดขึ้น กระบวนการนี้ทำให้บริเวณรอยต่อเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุ (Electric capacitor) จึงเรียกระบวนการนี้ว่า กระบวนการอัดประจุ (Charging process) หรือ กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic process) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ

2.7.2 โวลแทมเมทรี (Voltammetry) [48]

โวลแทมเมทรี (Voltammetry) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางเคมี ที่ต้องให้ศักย์ที่คงที่เข้าไปในวงจร และวัดกระแสที่เกิดขึ้น เซลล์เคมีไฟฟ้าของเทคนิคโวลแทมเมทรีจัดเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลต์ สำหรับขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเทคนิคนี้จะต่างจากเทคนิคโพเทนชิอเมทรี [50] คือ มีการใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) ส่วนมากมักเป็นขั้วไฟฟ้าช่วยแพลตตินัม (Platinum wire counter electrode) นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) สำหรับเทคนิคนี้มักเป็นขั้วไฟฟ้าจุลภาค (Microelectrode) ทั้งนี้เพื่อให้เกิดโพลาไรเซชันที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน

อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำโวลแทมเมทรี (Voltammetry)

การวิเคราะห์ด้วยหลักการโวลแทมเมทรี (Voltammetry) ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบใดย่อมประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนของเซลล์เคมีไฟฟ้าและส่วนของเครื่องมือในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า เซลล์เคมีไฟฟ้าในการทำโวลแทมเมทรี มักเรียกเป็นเซลล์โวลแทมเมทรี เพราะมีความแตกต่างจากเซลล์สำหรับเครื่องมือในการควบคุมสัญญาณไฟฟ้า มักประกอบด้วยอุปกรณ์ในการควบคุมศักย์ไฟฟ้า เรียกว่า โพอเทนชิออสเตท (Potentiostat) และอุปกรณ์ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้า อาจเรียกส่วนควบคุมสัญญาณไฟฟ้านี้ว่าโวลแทมเมทริก อะนาไลเซอร์ (Voltammetric analyzer) ในเครื่องมือของการทำโวลแทมเมทรีที่ใช้ในงานวิเคราะห์ต่างๆ ยังมักประกอบด้วยอุปกรณ์บันทึก แปลผลข้อมูล และอาจสร้างสัณจรภาพได้ด้วย

1. ขั้วไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

1.1 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) เป็นขั้วที่จำเป็นต้องมีเพื่อใช้ในการเทียบศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากวงจรเป็นค่าของความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว จึงเรียกได้ว่าเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative potential) ในการใช้งานจะต้องมีค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าคงที่ตลอดการทดลองและต้องควบคุมค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าใช้งานด้วย โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าอ้างอิงจะมีใช้กันหลากหลายชนิด เช่น ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ เป็นต้น

1.2 ขั้วไฟฟ้าช่วยหรือขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ส่งต่อผ่านสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่างระหว่างการวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าร่วมนี้มักมีพื้นที่ผิวมากๆ เพื่อให้การนำไฟฟ้าเป็นไปได้ดีและลดการเกิดศักย์จากโอห์มของวงจร

1.3 ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ในกลุ่มการวิเคราะห์โวลแทมเมทรี (Voltammetry) จะแตกต่างจากการวิเคราะห์อื่น คือ ขนาดของขั้วไฟฟ้าต้องเล็ก เพื่อให้พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าในการสัมผัสกับสารตัวอย่างน้อย เกิดสภาวะของโพลาไรเซชันตลอดเวลาการวิเคราะห์ โดยส่วนใหญ่จะนิยมทำมาจากแพลทินัม คาร์บอน หรือปรอท เป็นต้น ซึ่งขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ดีควรจะให้ค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง รวมทั้งมีการตอบสนองที่คงที่ เชื่อถือได้ตลอดอายุการใช้งานและสิ่ง ที่ควรพิจารณาในการเลือกวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าใช้งาน คือ ลักษณะของปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ และกระแสพื้นในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งาน

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย (Supporting electrolyte)

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วย (Supporting electrolyte) เป็นสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ใช้เติมลงในสารละลายตัวอย่างในการวิเคราะห์ทางโวลแทมเมทรี (Voltammetry)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ปริมาณมากกว่าสารตัวอย่างประมาณ 50 – 100 เท่า ทั้งนี้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยนี้ต้องไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง โดยหน้าที่ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยมีดังนี้

1. ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการทำให้ไอออนของตัวอย่างมีการเคลื่อนที่ในสารละลายแบบแพร่
 2. ช่วยป้องกันการเกิดไมเกรชัน คือ อัตราส่วนของกระแสไมเกรชัน (I_m) ต่อกระแสของการแพร่ (I_d) มีค่าน้อยมากๆ
 3. ช่วยลดความต้านทานของสารละลาย
 4. ช่วยจัดโลหะแทรกซ้อนที่ปนมาในตัวอย่าง
 5. ช่วยทำหน้าที่เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ คือ ช่วยปรับหรือรักษาพีเอชในสารละลายให้คงที่
- การเลือกใช้สารอิเล็กโทรไลต์ช่วยมักจะต้องคำนึงถึงการทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์นั้นๆ ด้วย เพราะการทำหน้าที่ของสารอิเล็กโทรไลต์ช่วยอยู่ที่การใช้สารอิเล็กโทรไลต์นั้นในปริมาณที่หลายๆ ขณะเดียวกันคุณสมบัติของสารอิเล็กโทรไลต์ในปริมาณที่มากน้อยมีผลต่อสภาวะการทำการวิเคราะห์ด้วย

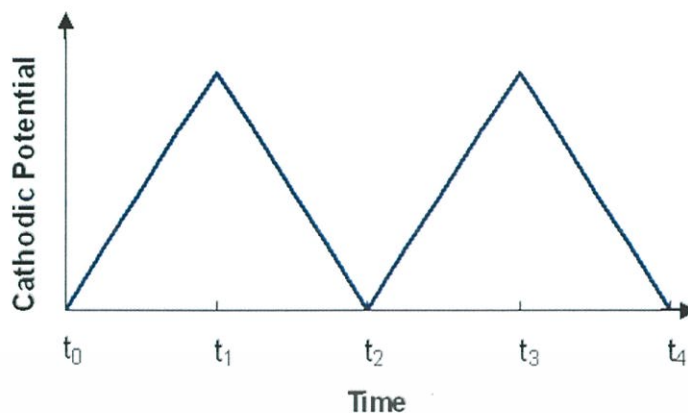
2.7.3 ไชคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) [51]

ไชคลิกโวลแทมเมตรีเป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้าในลักษณะสามเหลี่ยมหน้าจั่วแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เพื่อใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสารบริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าทำงาน ตลอดจนใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าอื่นๆ ต่อไป

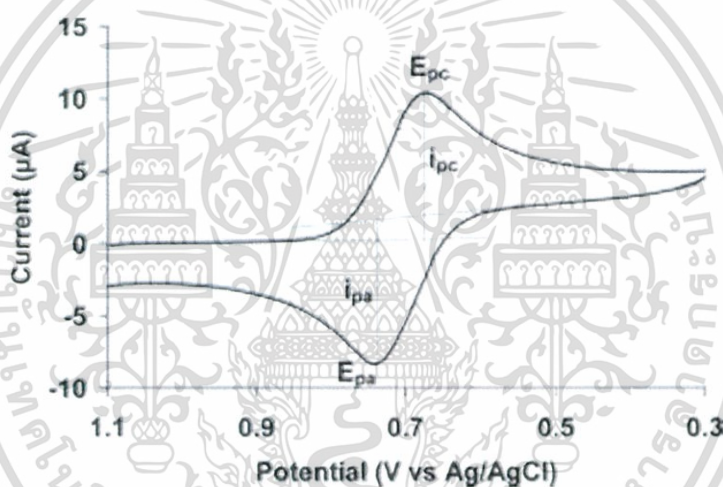
รูปแบบศักย์ (Waveform)

ไชคลิกโวลแทมเมตรีมีการให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นไซเคิลที่มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมไปยังขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่อยู่นิ่งแล้ววัดกระแสที่เกิดขึ้น ศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าทำงานจะถูกควบคุมเมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ คลอไรด์ (Silver/silver chloride) เมื่อพล็อตกราฟระหว่างแกนตั้งเป็นศักย์ไฟฟ้า และแกนนอนเป็นเวลาเมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์ เมื่อเวลาผ่านไปศักย์ที่ให้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เรียกศักย์ไฟฟ้านี้ว่า การสแกนไปข้างหน้า (Forward scan) เมื่อสแกนไปถึงจุดหนึ่งที่กำหนดไว้ แล้วศักย์ไฟฟ้าก็จะเริ่มลดลงด้วยอัตราการสแกนเท่าเดิมเรียกว่า การสแกนย้อนกลับ (Reverse scan) จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นจะได้เป็นหนึ่งไซเคิล ดังแสดงในรูปที่ 2.23

Cyclic Voltammetry Potential Waveform



รูปที่ 2.23 แบบของศักย์ไฟฟ้าที่ให้ในไซคลิกโวลแทมเมตรี [52]



รูปที่ 2.24 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) [52]

ไซคลิกโวลแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram) [48]

ไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้สำหรับปฏิกิริยาที่ผันกลับมีลักษณะดังรูปที่ 2.24 สามารถอธิบาย กระแสที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ เมื่อเริ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นจากเวลาที่ t_0 ไปถึง t_1 สารที่ต้องการวิเคราะห์หรือตัวออกซิไดซ์ (Oxidize) จะถูกรีดิวซ์ (Reduce) ที่ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) ดังปฏิกิริยา



กระแสที่เกิดขึ้นเป็นกระแสแคโทดิก (Cathodic current) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ณ จุดนี้ตัวออกซิไดซ์จะถูกรีดิวซ์จนหมด ทำให้ปริมาณตัวออกซิไดซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานลดน้อยลง กระแสจะลดลงถึงค่าต่ำสุดเมื่อเวลา t_1 โวลแทมโมแกรมจึงมีลักษณะเป็นพีค เรียกว่า แคโท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเข้าไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิกพีค (Cathodic peak) กระแสแคโทดิกที่วัดจากเส้นฐานพีคของจุดเริ่มต้นไปจนถึงจุดสูงสุดของพีค เรียกว่า กระแสแคโทดิกพีค (Peak cathodic current, I_{pc}) และศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่กระแสแคโทดิกมีค่าเท่ากับ I_{pc} คือ E_{pc} (Peak cathodic potential) หลังจากเวลา t_1 จะลดศักย์ไฟฟ้าที่ให้ไปในทิศทางที่เป็นบวก (หรือเป็นศักย์ไฟฟ้าที่ผกผันกับศักย์ไฟฟ้าในตอนแรก) ดังแสดงในไซคลิกโวลแทมโมแกรมรูปที่ 2.23 แต่ก็ยังคงมีกระแสแคโทดิกเกิดขึ้นอยู่ เพราะศักย์ไฟฟ้ายังเป็นค่าลบเพียงพอที่จะเกิดรีดักชัน จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าเริ่มเข้าสู่ค่าที่เป็นบวก ตัวรีดิวซ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยารีดักชันที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานเริ่มถูกออกซิไดซ์ ดังปฏิกิริยา



กระแสที่เกิดขึ้นเรียกว่า กระแสแอนอดิก (Anodic current) กระแสนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นรอบๆขั้วไฟฟ้าของตัวรีดิวซ์ลดลงเป็นศูนย์ ขณะนี้กระแสแอนอดิกจะมีค่าสูงสุดและจะลดลงไปเรื่อยๆจนถึงเวลา t_2 โวลแทมโมแกรมมีลักษณะเป็นพีค เรียกว่า แอนอดิกพีค (Anodic peak) กระแสแอนอดิกที่วัดได้จากเส้นฐานพีควัดได้จาก t_1 ไปจนถึงจุดสูงสุดของพีค เรียกว่า กระแสแอนอดิกพีค (Peak anodic current, I_{pa}) และศักย์ไฟฟ้า ณ จุดที่กระแสแอนอดิกมีค่าเท่ากับ I_{pa} คือ E_{pa} (Peak anodic potential)

ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) ที่ใช้ได้กับวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี คือ อิเล็กโทรดจุลภาค (Micro electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร อาจทำจากแพลตทินัม ทอง หรือ คาร์บอนไฟเบอร์ ที่เคลือบด้วยเมมเบรนที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ ตัวอย่างเช่น คาร์บอนไฟเบอร์อิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยเมมเบรนที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ที่มีชื่อว่า เนฟิออน (Nafion) เป็นต้น

2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.8.1 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-visible spectrophotometer) [53]

UV-visible spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างโดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ และชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์, สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสง แล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันกับจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

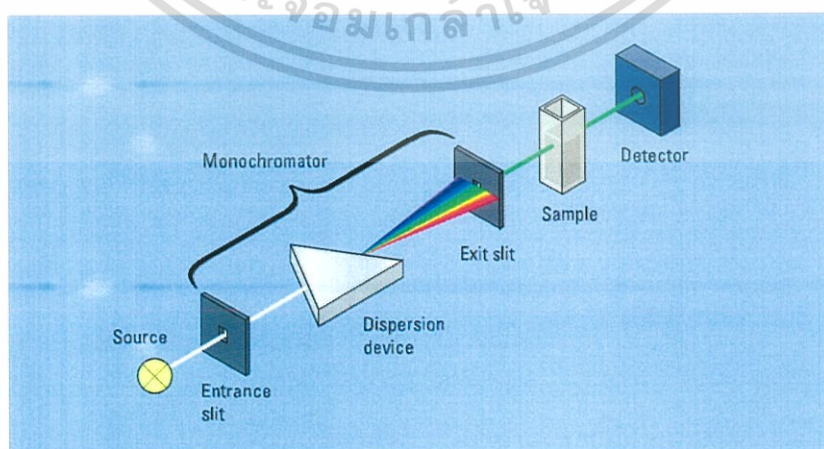
โดยส่วนประกอบของเครื่อง UV-visible spectrophotometer ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งสามารถให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย หลอดกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา จึงต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดแสง ช่วง UV ใช้หลอด H₂ and D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm ชนิดของสเปกโทรสโกปี UV molecular absorption และช่วง Visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 นาโนเมตร ชนิดของสเปกโทรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular absorption

2. Monochromator ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว ใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี), ปริซึม (Prism) หรือ เกรตติง (Grating)

3. เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่างเซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (Cell sample) บางครั้งอาจเรียกว่า คิวเวทท์ (Cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอร์ตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4. ตัวตรวจวัด (Detector) ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีความไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon diode detector)



รูปที่ 2.25 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-visible spectrophotometer [54]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำแนกประเภทของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. Single-beam spectrophotometer เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัด ดังนั้นลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

2. Double-beam spectrophotometer ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้ว ลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะเดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ Phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไป [55]

2.8.2 Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) [56]

FTIR spectrometer (Fourier transform infrared spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12,800-10\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง, ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งเป็น 3 ช่วงได้แก่ Near infrared ($12,800 - 4,000\text{ cm}^{-1}$), Middle infrared ($4,000 - 200\text{ cm}^{-1}$) และ Far infrared ($200 - 10\text{ cm}^{-1}$) ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum

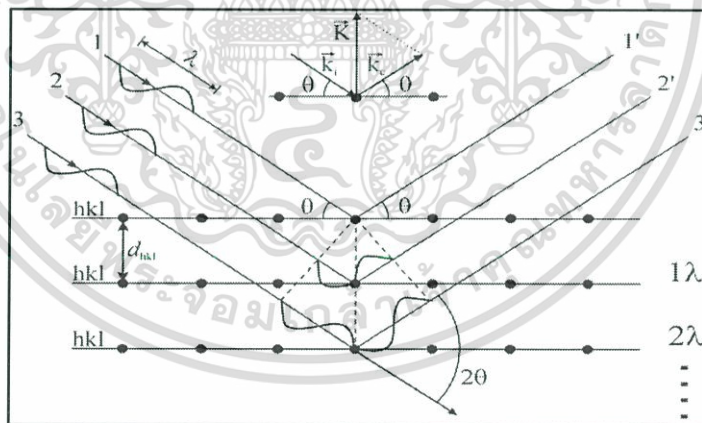
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) [57]

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และยังสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit cell ที่ไม่เท่ากัน รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จึงออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการของ Bragg's law ตามสมการดังนี้

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

- เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
- d คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
- θ คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
- n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1,2,3... n
- 2θ คือ มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน



รูปที่ 2.26 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของ Bragg's law [58]

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วยแต่ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือหาองค์ประกอบตัวอย่างที่เป็น

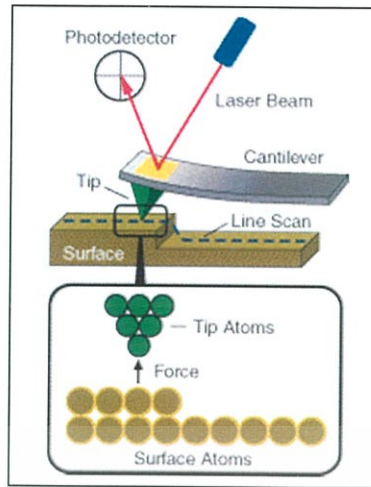
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แต่เราอาจสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็น Amorphous ในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการส่งวิเคราะห์เครื่อง XRD นั้นสามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็นผงได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40ไมครอน (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อนต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 เซนติเมตร ทั้งนี้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบจะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 มิลลิเมตรเท่านั้น กรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณน้อยมากก็อาจทำการทดสอบได้ โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero background ในการวางตัวอย่าง เพื่อทำการทดสอบ

2.8.4 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM) [59]

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมเป็นเทคนิคประเภทหนึ่งในกลุ่มของกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (Scanning probe microscopy ; SPM) AFM เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการถ่ายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร หรือสามารถใช้ในการดูสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่างๆได้ โดยมีหลักการพื้นฐาน คือ การใช้คันตรวจวัดที่มีปลายแหลมขนาดเล็ก (Probe tip) ที่ทำจากวัสดุซิลิกอนไนไตรด์ (Silicon nitride; Si_3N_4) เคลื่อนที่สแกนไปทั่วบริเวณของผิววัสดุโดยจะส่งแสงเลเซอร์ไปยังส่วนปลายแหลมของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระตักในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคานให้โก่งงอทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิกิริยาระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกัน เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังขยายสูงไปแสดง บนจอภาพที่เป็นมอนิเตอร์เช่นเดียวกันกับเครื่อง STM (ด้วยหลักการเดียวกันนี้สามารถใช้ปลายแหลมของคานในการสร้างแรงผลัก เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้อีกด้วย) จึงทำให้ได้ภาพที่ออกมาสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณ



รูปที่ 2.27 การทำงานของเครื่อง Atomic force microscope (AFM) [60]

ดังรูปที่ 2.27 แสดงตัวอย่างเครื่อง AFM ซึ่งจากภาพบริเวณตรงกลางคือบริเวณที่ใช้วางชิ้นงานและเป็นบริเวณที่เข็มวัด (Probe tip) วางอยู่ด้วยส่วนที่บริเวณด้านบนของเครื่องจะมีกล้อง Video microscope ติดตั้งไว้เพื่อดูตำแหน่งของเข็มที่จะถูกวางลงบนบริเวณต่างๆของพื้นผิว ภาพที่เกิดขึ้นจากกล้องจะแสดงออกมาทางจอทีวี นอกจากนี้ทางด้านบนยังมีแหล่งให้กำเนิดแสงเลเซอร์ ที่ใช้สำหรับเป็นตัวบอกตำแหน่งของเข็มที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.28 เครื่อง Atomic force microscope (AFM) [61]

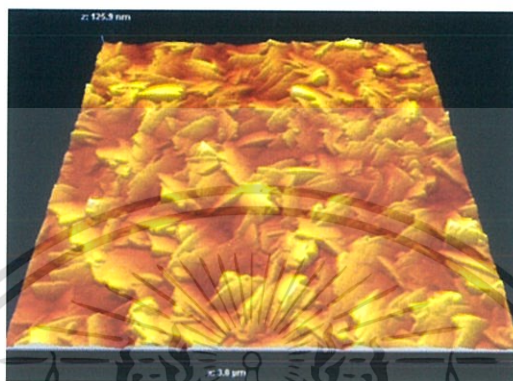
วิธีการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี [62] ได้แก่

1. การสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆตลอดเวลาข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานของโพรบที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มิได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

2. คือการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้นแต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นไม่คงที่หรือไม่แม่นยำ



รูปที่ 2.29 พื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM [62]

2.8.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope ; TEM) [63]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) คิดค้นโดย เอิร์นส์ทอรุสกา ในปี พ.ศ. 2475 เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างภายในของ TEM เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุต่างๆ ทั้งวัสดุกายภาพและวัสดุชีวภาพ ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาต้องเป็นตัวอย่างที่แบนและบางมากที่มีความหนาประมาณ 10-6 เมตรเมื่อนำตัวอย่างวางบนอุปกรณ์ (Specimen grid) แล้วจึงนำตัวอย่างเข้า TEM อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยจาก Electron gun ที่ส่วนบนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงระหว่าง 80-200 kV จนมีความเร็วและถูกโฟกัสด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจนมีลำเล็กเรียวยาว ขนาดความโตของลำเล็กกว่า 1 ในพันส่วนของ 1 มิลลิเมตร ลำอิเล็กตรอนนี้จะตกกระทบบนตัวอย่างบางและทะลุผ่านตัวอย่าง แล้วแสดงเป็นภาพบนจอภาพโดยภาพของตัวอย่างที่เกิดขึ้นได้ถูกขยายด้วยกำลังขยายสูงจนสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งระบบการทำงานของ TEM มี 4 ระบบ ได้แก่

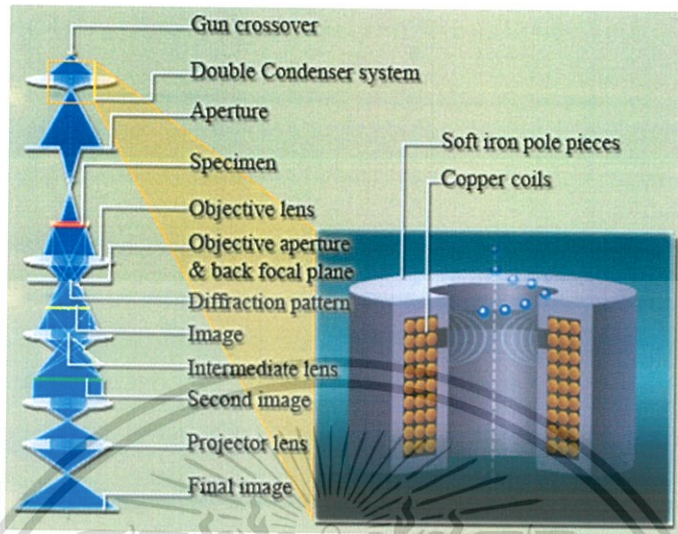
1. ระบบแสง (Illuminating system) ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun), เลนส์ ควบคุมลำอิเล็กตรอน (Condenser lens)

2. ระบบภาพ (Imaging system) ประกอบด้วย เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens), ฉากรับภาพ (Fluorescent screen)

3. ระบบบันทึกภาพ (Photographic system) ประกอบด้วย กล้องฟิล์ม (Dispensing magazine), กล้องรับฟิล์ม (Receiving magazine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ระบบสุญญากาศ (Vacuum system) ประกอบด้วย ตัวดูดอากาศชนิดไอน้ำแบบหยาบ (Oil rotary pump), ตัวดูดอากาศชนิดไอน้ำมันแบบละเอียด (Oil diffusion pump)



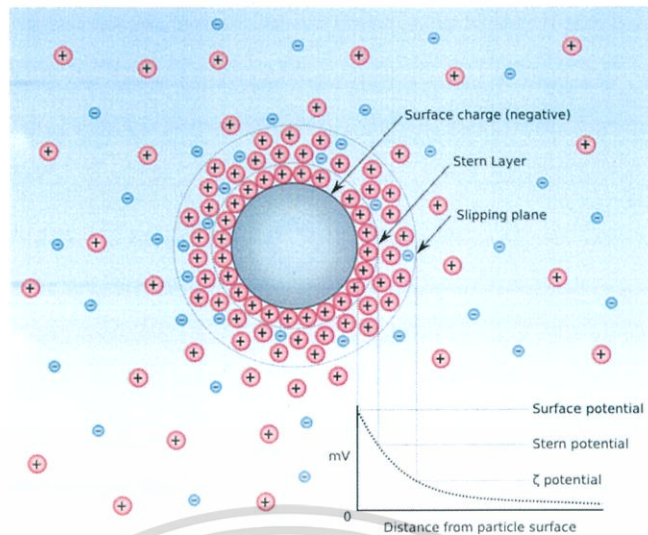
รูปที่ 2.30 ส่วนประกอบของเครื่อง Transmission electron microscope (TEM) [63]

2.8.6 เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential analysis) [64]

ศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential) คือ ความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่น ของไอออนที่อยู่รอบอนุภาคและประจุในของเหลวที่อยู่ล้อมรอบ อนุภาคเกิดขึ้นในกระบวนการโคแอกกูเลชันฟล็อกคูเลชัน (มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์) เป็นค่าที่ใช้เพื่อบอกแนวโน้มว่าอนุภาคจะมีการเกาะตัวกันเป็นก้อนหรือไม่ เช่น เมื่อมีการปรับค่า pH อนุภาคแขวนลอยจะเสถียรเมื่อศักย์ซีต้ามีค่ามากกว่า +30 mV หรือ น้อยกว่า -30 mV

สำหรับค่า Zeta potential จะสัมพันธ์กับประจุบนผิวของอนุภาค ซึ่งมีผลต่อการตกตะกอนและการเกาะตัวกัน เทคนิคนี้จะทำการวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคในของเหลวภายใต้สภาวะที่มีสนามไฟฟ้า ซึ่งก็คือการวัดความเร็วของอนุภาคนั้นเอง โดยเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในเซลล์ อนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วตรงข้ามกับชนิดของประจุ โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าที่ให้นี้จะสัมพันธ์กับค่า Zeta potential ของคอลลอยด์ โดยเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ขนาดอนุภาคในช่วง 0.3 - 5,000 นาโนเมตรและอนุภาคควรอยู่ในตัวกลางที่สามารถนำไฟฟ้าได้หรือมีค่าไดอิเล็กทริกค่อนข้างสูง เช่น น้ำ เป็นต้น [65]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 ไอออนและความต่างศักย์ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นบนผิวของอนุภาคสารแขวนลอย [66]

2.8.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไมโครสโคปแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope; FESEM) [67]

Field emission scanning electron microscope (FESEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัยและการผลิตภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโคร หรือนาโนได้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectrometer; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ อีกทั้ง FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่นๆ เพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron backscatter diffraction; EBSD) นอกจากนี้ FESEM ยังสามารถประยุกต์โดยเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลายขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron beam lithography) จะเห็นได้ว่า FESEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

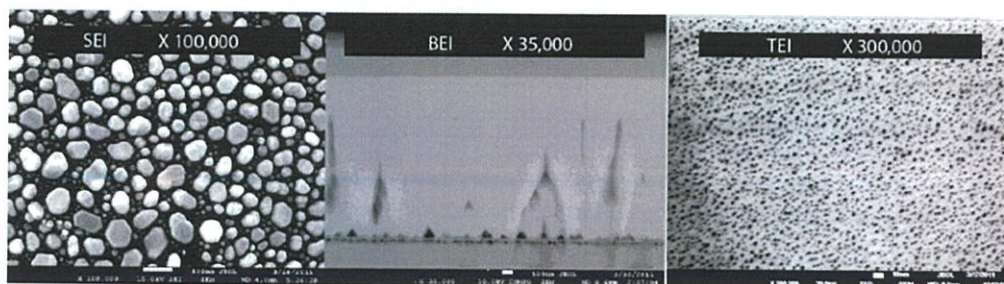


รูปที่ 2.32 เครื่อง Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) รุ่น JSM-7001F [67]

Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) รุ่น JSM-7001F เป็น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) มี Resolution สูงถึง 1.2 nm ที่ 30 kV เหมาะสำหรับงานทางวิทยาศาสตร์ ภายภาพ ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 kV ง่ายต่อการใช้งานเพราะควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบสุญญากาศในระบบลำอิเล็กตรอนใช้ Sputter-ion pump ส่วนห้องชิ้นงาน (Sample chamber) ใช้ Diffusion pump หัววัดหลักสำหรับการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของระบบประกอบด้วย 3 หัววัด คือ 1. Secondary electron detector 2. Backscattered electron detector และ 3. Scanning transmission electron detector

สัญญาณภาพที่ได้จาก FESEM รุ่น JSM-7001F แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของภาพที่ได้จากหัววัดที่ต่างกัน ได้แก่ 1. Secondary electron image (SEI) 2. Backscattered electron image (BEI) และ 3. Transmission electron image (TEI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 สัญญาณภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) จากหัววัด SEI, BEI และ TEI [67]

1. Secondary electron image (SEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Secondary electron detector (SED) ที่รับเอาพลังงานจาก Secondary electron ที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อถูกลำอิเล็กตรอนชนมาประมวลผล ภาพที่ได้แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน (Morphology) ศักย์เร่งอิเล็กตรอนปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 0.5-30 kV ตามประเภทของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้สูงถึงประมาณ 1,000,000 เท่า ภายใต้สภาวะการใช้งานที่เหมาะสม โดยทั่วไปการใช้งานปกติมักจะได้กำลังขยายถึงประมาณ 300,000 เท่า และยังสามารถเลือกโหมดป้องกันการสะสมของประจุบนชิ้นงานโดยใส่ความต่างศักย์ไปยังชิ้นงานเพื่อไล่ประจุสะสม

2. Backscattered electron image (BEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Backscattered electron detector (BED) ที่รับเอาพลังงานจาก Backscattered electron ที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานมาประมวลผล โดยสัญญาณที่ได้ในแต่ละบริเวณจะแปรตามเลขอะตอม (Atomic number, Z) ในเนื้อสารบริเวณนั้นๆ ภาพที่ได้จึงมีความสว่าง เข้มหรืออ่อนตามเลขอะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อสาร (Atomic contrast) BEI จึงสามารถแสดงภาพที่แยกแยะความแตกต่างของแต่ละบริเวณที่มีธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันได้ หัววัด BED เป็นแบบ Retractable สั่งการให้เลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งเหนือชิ้นงานในระหว่างใช้งานและเลื่อนออกเมื่อไม่ได้ใช้งานได้เพื่อความปลอดภัยของหัววัด

3. Transmission electron image (TEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Transmission electron detector (TED) อาศัยหลักการของ Transmission electron microscope (TEM) ประยุกต์มาติดตั้งในระบบของ FESEM โดย TED จะอยู่ในตำแหน่งใต้ชิ้นงานเพื่อรับพลังงานจาก Transmission electron ที่ทะลุผ่านชิ้นงาน ศักย์เร่งอิเล็กตรอนที่ตั้งไว้สำหรับระบบนี้เป็นค่าสูงสุดคือ 30 kV และชิ้นงานจะต้องเตรียมด้วยเครื่องมือเฉพาะเพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดบางเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านไปยัง TED ได้ ภาพที่ได้จะแสดงถึงรูปร่างโครงสร้างภายในของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้ถึงประมาณ 300,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นของท่อนาโนคาร์บอนที่มีประจุบวกและประจุลบเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Layer-by-layer deposition of cationic and anionic carbon nanotubes into thin films with improved electrical properties) [68]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอน ด้วยสารโพลีอะนิลีนที่ละลายในน้ำ ผสมกับสารโพลีซเตียมสไตรีนซัลโฟเนต (PANI-PSS) ในรูปประจุลบของ CNT^- และสารโพลีไดแอลิลดีเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) ในรูปประจุบวกของ CNT^+ ซึ่งทำการสังเคราะห์ PANI-PSS ด้วยวิธี interfacial polymerization ของอะนิลีนและโพลีซเตียมสไตรีนซัลโฟเนต ทำการศึกษาแผ่นฟิล์มบางที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น โดยการเตรียมแผ่นฟิล์มบาง 3 ชนิด ชนิดแรกนั้นใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นระหว่าง CNT^- และ CNT^+ ส่วนอีก 2 ชนิดใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้นระหว่างพอลิเมอร์ที่มีประจุ ในรูปของ PDADMAC/ CNT^- และ PANI-PSS/ CNT^+

ความหนาและความขรุขระของพื้นผิวแผ่นฟิล์มบางทั้ง 3 ชนิดที่แตกต่างกันถูกอธิบายลักษณะด้วย AFM และสมบัติทางไฟฟ้าถูกวัดโดยใช้ Four points probe และ UV-vis spectrophotometer ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า $\text{CNT}^-/\text{CNT}^+$ มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 10^{-3} S/cm ส่วน PDADMAC/ CNT^- และ PANI-PSS/ CNT^+ มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 10^{-4} S/cm

2.9.2 การตรวจวัดโดพามีนในร่ายกายมนุษย์ด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมตริกโดยใช้ขั้วเคมีไฟฟ้าที่สร้างจากอนุภาคทองในระดับนาโนเจือโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Amperometric detection of dopamine in human serum by electrochemical sensor based on gold nanoparticles doped molecularly imprinted polymers) [69]

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างตัวตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคแอมเพอโรเมตริกในการตรวจวัดสารโดพามีนในมนุษย์ โดยใช้อนุภาคทองในระดับนาโนที่ถูกโด๊ปด้วยโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำการเตรียมอนุภาคทองในระดับนาโนให้มีหมู่ฟังก์ชันโดยการเกิดปฏิกิริยาของอะนิลีนกับพื้นผิวของอนุภาคทองในระดับนาโน จากนั้นนำแผ่นทองเปลือยมาขัดให้มีคุณสมบัติคล้ายกระจกและทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยจุ่มลงใน H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.5 M แล้วให้ศักย์ไฟฟ้าที่ -0.2 V– 1.5 V ที่อัตราการสแกน 100 mV/s จากนั้นจุ่มลงในสารละลาย p-ATP ความเข้มข้น 10 mM เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้างออกด้วย ethanol และ น้ำ แล้วจุ่มลงในสารละลาย colloidal ของอนุภาคทองในระดับนาโน ที่ pH 5.0 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง มีการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย SEM และ UV-vis Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพในการลดการรบกวนที่เกิดจากกรดแอสคอร์บิก และ กรดยูริก โดยทำการตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคแอมเพโรเมทริกได้กราฟมาตรฐานของโดพามีนอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.02 μM –0.54 μM ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบโดพามีน (LOD) เท่ากับ 7.8 nM อิเล็กโทรดชนิดนี้ประสบความสำเร็จในการตรวจวัดโดพามีนความเข้มข้นต่างๆในร่างกายมนุษย์

2.9.3 การสร้างแผ่นฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปร่างแบบชั้นต่อชั้นโดยใช้รีดิวส์แกรฟีนออกไซด์และอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) สำหรับการตรวจวัดโดพามีน (Dopamine) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Layer-by-layer assembled multilayer films of reduced graphene oxide/gold nanoparticles for the electrochemical detection of dopamine) [70]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแผ่นฟิล์ม Graphene/Gold nanoparticle ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปร่างแบบชั้นต่อชั้นโดยใช้รีดิวส์แกรฟีนออกไซด์ (RGO) ที่มีหมู่ฟังก์ชันของสารโพลีโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต (PSS) ร่วมกับสารโพลีอะมิโดเอมีน (PAMAM) ที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของอนุภาคทองในระดับนาโน โดยถูกเตรียมขึ้นบน Glassy carbon electrode และมีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดย UV-vis spectrophotometer และ FTIR โดยแผ่นฟิล์มที่สร้างขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโดพามีนได้โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี, เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี และเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแควร์โวลแทมเมทรี

จากการเปรียบเทียบ AuNPs/RGO กับ bare GCE ใน PBS ความเข้มข้น 0.1 M ค่า pH เท่ากับ 7.4 ที่มีโดพามีนความเข้มข้น 60 μM พบศักย์แคโทดิกและแอนอดิกของ bare GCE ที่ 0.053 V และ 0.239 V ตามลำดับ ส่วน AuNPs/RGO พบศักย์แคโทดิกและแอนอดิกที่ 0.121 V และ 0.171 V ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า AuNPs/RGO มีประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมสำหรับการตรวจวัดโดพามีนซึ่งได้กราฟมาตรฐานของโดพามีนอยู่ในช่วงความเข้มข้น 1–60 μM และความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบโดพามีน (LOD) เท่ากับ 0.02 μM

2.9.4 การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ทางเคมีไฟฟ้า สำหรับการตรวจวัดโดพามีน (Dopamine) ที่มีอยู่ในกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) โดยใช้รีดิวส์แกรฟีนที่มีหมู่ฟังก์ชันกรดเฟอร์ริก (Electrochemical oxidation and determination of dopamine in the presence of AA using ferulic acid functionalized electrochemically reduced graphene) [71]

ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ของแกรฟีนเพื่อประยุกต์ใช้ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับการตรวจวัดโดพามีน แกรฟีนออกไซด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกรดเฟอร์ริกนั้นถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยาควบแน่นของแกรฟีนออกไซด์และกรดเฟอร์ริก และมีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดย UV-vis spectrophotometer,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEM และ FTIR จากการใช้ปฏิกิริยารีดักชันทางเคมีไฟฟ้าของแกรฟีนออกไซด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันกรดเพอริกสามารถใช้ในการตรวจวัดโดพามีนได้ โดยการเตรียมขึ้นบน Glassy carbon electrode ซึ่งตรวจวัดด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี, เทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแควร์โวลแทมเมทรีในกรดแอสคอร์บิก และ เทคนิคแอมเพอโรเมทริกในสารละลายบัฟเฟอร์ซิเตรท ที่ความเข้มข้น 0.1 M ที่มีค่า pH เท่ากับ 6 ซึ่งในช่วง pH เท่ากับ 3.99-9.02 มีผลต่อการตรวจวัดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโดพามีนด้วย ERGO-FA/GCE จากการเปรียบเทียบ bare GCE, GO-FA/GCE และ ERGO-FA/GCE พบว่า ERGO-FA/GCE แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองทางเคมีไฟฟ้าที่ดีกว่าอิเล็กโทรดอื่นๆ ในการทดลองมีการใช้ตัวรบกวน ได้แก่ เซโรโทนิน, กลูโคส, กรดแอสคอร์บิก, ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และ กรดยูริก ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถหาความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบโดพามีน (LOD) เท่ากับ 0.19 μM และ ได้กราฟมาตรฐานของโดพามีนอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.6-1000 μM

2.9.5 การปรับปรุงแผ่นกระจกไอโอดีนเจือทินออกไซด์ (ITO) เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรดด้วยอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) สำหรับหาปริมาณโดพามีน (Dopamine) ที่มีอยู่ในกรดยูริกและกรดแอสคอร์บิก ด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า (Gold nanoparticles modified-ITO electrode for the selective electrochemical quantification of dopamine in the presence of uric and ascorbic acids) [72]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงแผ่นกระจกไอโอดีนเจือทินออกไซด์ (ITO) ด้วยอนุภาคทองในระดับนาโน (ITO-AuNPs) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.3 ± 1.2 nm และมีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดย UV-Vis spectra, TEM, AFM และ XRD โดย ITO-AuNPs นั้นถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อตรวจวัดหาปริมาณโดพามีนด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแควร์โวลแทมเมทรี ในตัวรบกวนคือ กรดแอสคอร์บิก และ กรดยูริก ซึ่งตัวรบกวนทั้งสองนี้บั่นทอนประสิทธิภาพการตรวจวัดสารสื่อประสาทด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า เนื่องจากเกิดการทับซ้อนของศักย์ออกซิเดชัน ซึ่งถือเป็นอุปสรรคในการชัดเจนความสำเร็จ

จากการวิเคราะห์กระแสของพีคออกซิเดชันและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของ ITO-AuNPs อิเล็กโทรดต่อปริมาณของโดพามีน พบว่าการไม่มีกรดแอสคอร์บิก และ กรดยูริก ได้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบโดพามีนเท่ากับ 34.97 ± 0.08 μM ด้วยการตอบสนองที่ (10.10 ± 0.08) $\mu\text{A/mM}$ และหากมีกรดแอสคอร์บิก และ กรดยูริก ได้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบโดพามีนเท่ากับ 34.50 ± 0.07 μM ด้วยการตอบสนองที่ (17.62 ± 0.15) $\mu\text{A/mM}$ ได้กราฟมาตรฐานของโดพามีนอยู่ในช่วงความเข้มข้น 10-900 μM

2.9.6 การตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ซัลโฟเนตกราฟีนที่ละลายน้ำ (Electrochemical detection of dopamine using water-soluble sulfonated graphene) [73]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดที่ถูกเตรียมขึ้นมาโดยใช้ซัลโฟเนตกราฟีนที่ละลายน้ำ (Sulfonated-G aqueous) เพื่อให้มีความจำเพาะและความไวในการตรวจวัดโดพามีนที่มีอยู่ในกรดแอสคอร์บิก (AA) และ กรดยูริก (UA) โดยจะเกิดพันธะและแรงทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุบวกของโดพามีนกับประจุลบของซัลโฟเนตกราฟีน ซึ่งสามารถเร่งความเร็วในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในกรดแอสคอร์บิก และกรดยูริกได้บนซัลโฟเนตกราฟีนอิเล็กโทรด (Sulfonated-G/GCE) ซึ่งเตรียมอิเล็กโทรดโดยหยดซัลโฟเนตกราฟีนลงบน Glassy carbon electrode และมีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้ FTIR, EDX และ AFM ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดโดพามีน คือ เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โวลแทมเมตรี (DPV) จากการตรวจวัดโดพามีนจะเกิดการแยกของพีคศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสำหรับ AA-DA, DA-UA และ UA-AA ที่ 227 mV, 125 mV และ 352 mV ตามลำดับ ได้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบ (LOD) เท่ากับ 20 nM, การตรวจวัดโดพามีนในกรดแอสคอร์บิกได้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบ (LOD) เท่ากับ 20 nM และ การตรวจวัดโดพามีนในกรดแอสคอร์บิกและกรดยูริกได้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบ (LOD) เท่ากับ 40 nM การเตรียม Sulfonated-G/GCE นั้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของฟิล์ม ได้แก่ ความหนาของฟิล์ม, โครงสร้างเฉพาะทางนาโน, การป้องกันตัวรบกวน, ความว่องไว และ ความจำเพาะสูง

2.9.7 การสังเคราะห์โดยรวบทำในขั้นตอนเดียวของ Magnetite nanorods และ graphene composites เพื่อเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของโดพามีน (One-pot synthesis of magnetite nanorods/graphene composites and its catalytic activity toward electrochemical detection of dopamine) [74]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ Magnetite nanorods ที่ยึดติดบนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RGO) โดยใช้การรวบทำในขั้นตอนเดียว (One-pot synthesis method) โดยการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของกราฟีนออกไซด์ และการสังเคราะห์แบบ In-situ ของ Magnetite nanorods นั้นจะเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยที่ลักษณะทางสัณฐานวิทยา, โครงสร้าง และ เส้นผ่านศูนย์กลาง ของ Magnetite nanorods จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการก่อตัวร่วมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยจะถูกเตรียมขึ้น Glassy carbon electrode และมีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้ FTIR, XRD และ TEM ซึ่งตัวตรวจวัดนี้แสดงให้เห็นถึงการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันในการตรวจวัดโดพามีนที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วภายใน 6 วินาที จากการใช้เทคนิคแอมเพอโรเมตรีในการเปรียบเทียบระหว่าง $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ และ $\text{rGO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ ในสารละลาย PBS ความเข้มข้น 0.1 M ที่โดพามีนความเข้มข้นต่างๆ พบว่า $\text{rGO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเร็วกว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ ที่ 6 และ 10 วินาที ตามลำดับ $\text{rGO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ มีการตอบสนองที่ดีกว่า $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ ที่ $3.15 \mu\text{A } \mu\text{M}^{-1} \text{cm}^{-2}$ และ $1.61 \mu\text{A } \mu\text{M}^{-1} \text{cm}^{-2}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ $\text{rGO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ ได้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบ (LOD) ที่ 7 nM ส่วน $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ ได้ความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบ (LOD) ที่ 19 nM จากการใช้ $\text{rGO}/$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCE}$ ได้กราฟมาตรฐานของโดพามีนอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.01–100.55 μM ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) เท่ากับ 0.997

2.9.8 การตรวจวัดโดพามีน และกรดแอสคอร์บิกพร้อมกันโดยใช้ Silicate network ร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโนและท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Simultaneous detection of dopamine and ascorbic acid using silicatenetwork interlinked gold nanoparticles and multi-walled carbonnanotubes) [75]

ในงานวิจัยนี้ได้รายงานกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน (ขนาดประมาณ 3-8 nm.) และ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเชื่อมโยงกันผ่านซิลิเกตที่มีหมู่ฟังก์ชันไตรเมทท็อกซิลไซริลโพรพิลเอทิลีนเอไมด์ (EDAS) สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ได้มีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้ UV-vis spectrophotometry, TEM, AFM และ FTIR ซึ่งถูกนำมาใช้ในการเตรียม Gassy carbon electrode เพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดโดพามีนและกรดแอสคอร์บิกพร้อมกันโดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

MWCNT-EDAS-AuNPs ที่ถูกนำมาปรับปรุงเป็นอิเล็กโทรดนั้น แสดงกราฟมาตรฐานของกรดแอสคอร์บิก และ โดพามีนอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0.1–9 μM และ 0.1–8 μM ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจพบกรดแอสคอร์บิก และโดพามีน เท่ากับ 0.07 μM และ 0.08 μM ตามลำดับ จากผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า MWCNT-EDAS-AuNPs ถือเป็นตัวเลือกที่มีแนวโน้มในการพัฒนาสำหรับการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าของกรดแอสคอร์บิกและโดพามีนพร้อมกันในตัวอย่างทางเภสัชกรรม

2.9.9 การวิเคราะห์โดพามีนเชิงเคมีไฟฟ้า โดยใช้อิเล็กโทรดอินเดียมดีบุกออกไซด์และการควบคุมอัตราการสแกน (Electrochemical detection of dopamine using a bare indium-tin oxide electrode and scan rate control) [76]

งานวิจัยนี้ได้รายงานความไวและความจำเพาะเจาะจงของการวิเคราะห์โดพามีนเชิงเคมีไฟฟ้า ซึ่งเป็นสารสื่อประสาทที่มีบทบาทสำคัญในชีวิต การวิเคราะห์โดพามีนนั้นบ่อยครั้งที่มีโมเลกุลของตัวรบกวนปรากฏขึ้น ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้มีความจำเพาะเจาะจงและความไวในการวิเคราะห์โดพามีนจึงมีความจำเป็นอย่างมาก วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการวิเคราะห์โดพามีนด้วยการควบคุมอัตราการสแกน ในกรณีที่มีอัตราการสแกนต่ำ (50 mV/s) พีคของกระแสแอนอดิกของโดพามีน และ Ascorbic acid ปรากฏขึ้นที่ค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกัน (ca. 0.1 V) และสารทั้งสองชนิดนี้ปรากฏที่ยอดพีคของกระแสแอนอดิก ในทางกลับกันเมื่อค่าอัตราการสแกนสูง (5 V/s) พีคของกระแสแอนอดิกของ Ascorbic acid เกือบหายไป แต่พีคของโดพามีนยังคงสูงอยู่ เนื่องจากเกิดการดูดซับโดพามีนบนขั้วไฟฟ้า ซึ่งขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ของวิธีนี้มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดพามีนมีค่าเท่ากับ 1 nM, Ascorbic acid มีค่าเท่ากับ 0.1 mM และ 100 nM สำหรับโดพามีนในเลือดของมนุษย์

2.9.10 *ไบโอเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าชนิดแซนวิชสำหรับการตรวจสอบไกลโคโปรตีน บนพื้นฐานแบบการขยายของโบโรนิกแอซิด-อนุภาคทองคำนาโน และโดพามีน-อนุภาคทองคำนาโน (Sandwich type electrochemical biosensor for glycoproteins detection based on dual amplification of boronic acid-gold nanoparticles and dopamine-gold nanoparticles)* [77]

ไกลโคโปรตีนมีบทบาทสำคัญที่หลากหลายของกระบวนการทางชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มข้นนั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคมะเร็ง ดังนั้นการกำหนดความไวและความจำเพาะเจาะจงต่อไกลโคโปรตีนอย่างรวดเร็วนั้นเป็นที่ต้องการอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ได้รายงานไบโอเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าชนิดแซนวิชสำหรับการตรวจสอบไกลโคโปรตีน บนพื้นฐานแบบการขยายของ 4-mercaptophenylboronic acid (MBA) ที่ถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคทองคำนาโน (MBA-AuNPs) และโดพามีนที่ถูกล้อมรอบด้วยอนุภาคทองคำนาโน (DA-AuNPs) องค์ประกอบของการรับรู้ทางชีวภาพอย่างเช่น การสังเคราะห์ตัวรับ และการตรึง Aptamer บนขั้วไฟฟ้าทองซึ่งถูกนำมาใช้ในการจับกับไกลโคโปรตีน เป็นต้น ไกลโคโปรตีนที่ถูกจับไว้นั้นจะถูกทำให้เป็นสารอนุพันธ์กับ MBA-AuNPs โดยการก่อตัวนั้นจะเกิดการยึดจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์ระหว่างหมู่กรดโบโรนิก (Boronic acid) ของ MBA-AuNPs และ หมู่ไดออล (Diol) ของไกลโคโปรตีน การเกิดแรงทางไฟฟ้าของ DA-AuNPs ที่ยึดจับกับ MBA-AuNPs ได้นั้น เกิดผ่านจากการเกิดอันตรกิริยาของกรดโบโรนิก (Boronic acid) ที่มีโดพามีน (Dopamine) อยู่ ซึ่งวิธีโวลแทมเมตรีเป็นวิธีที่สะดวกในการวิเคราะห์ไกลโคโปรตีนที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย รูปแบบของการวิเคราะห์นั้นจะชี้เฉพาะเจาะจงไปที่ส่วนของต่อมลูกหมากที่มีสารแอนติเจน (PSA) และส่วนของอะวิดิน (Avidin) ซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง ที่จะแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้และความไวของวิธีที่นำเสนอ ผลการวิจัยพบว่าความเข้มข้นในระดับต่ำถึงพิโคโมลาร์ของอะวิดิน/สารแอนติเจน (PSA) สามารถวิเคราะห์ได้อย่างง่ายดาย จากงานวิจัยนี้เชื่อว่าวิธีนี้จะ เป็นประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าของไกลโคโปรตีนอื่นๆ

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ การปรับปรุงพื้นผิวของท่อนาโนคาร์บอนแบบนอนโนวาเลนต์โดยใช้สารละลายโพลีไดเอทิลีนไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) และ โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด (COPSS) ส่วนที่สอง คือ การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนด้วยวิธีทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยใช้โซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) เป็นตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพ ส่วนที่สามคือ การศึกษาสภาวะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer) ได้แก่ การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ PDADMAC และ COPSS ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน, การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโนและการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน และในที่สุดท้ายเป็นการนำขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตมาใช้ในการวิเคราะห์โอดีพามีน โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

3.1 ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube, MWCNTs)

3.1.1 สารเคมี

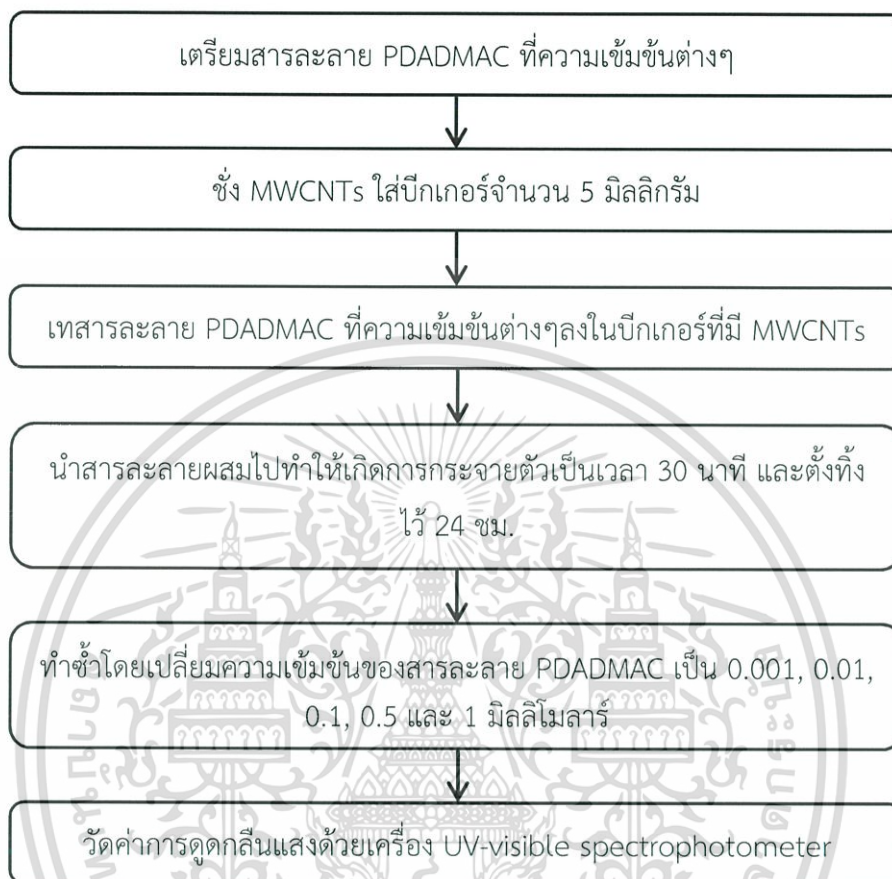
สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น, Multi-walled carbon nanotubes	MWCNTs	Bayer, Thailand
โพลีไดเอทิลีนไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์, Poly(diallyldimethylammoniumchloride)	PDADMAC	Sigma-Aldrich, USA
โพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด, Poly(4-styrenesulfonic acid-co-maleic acid)	COPSS	Sigma-Aldrich, USA
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK Group, Thailand

3.1.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดเอทิลีนไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs)

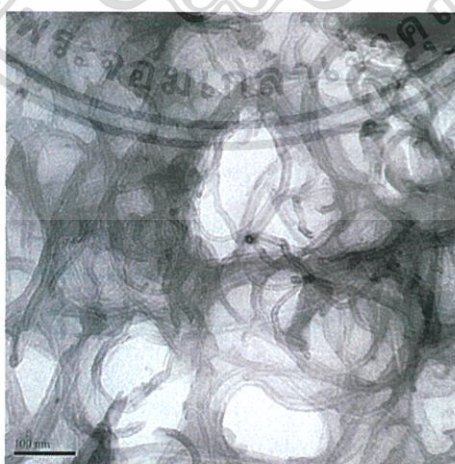
เตรียมสารละลายโพลีไดเอทิลีนไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) ที่ความเข้มข้น 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์ แล้วซั่ง MWCNTs ใส่บีกเกอร์ๆละ 5 มิลลิกรัม หลังจากนั้นเทสารละลายโพลีไดเอทิลีนไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) ที่ความเข้มข้นต่างๆปริมาตร

60 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่มี MWCNTs อยู่ นำสารละลายผสมที่ได้ไปทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่อง Sonicated probe เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ด้วยสารละลาย PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 3.2 ท่อนาโนคาร์บอนที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

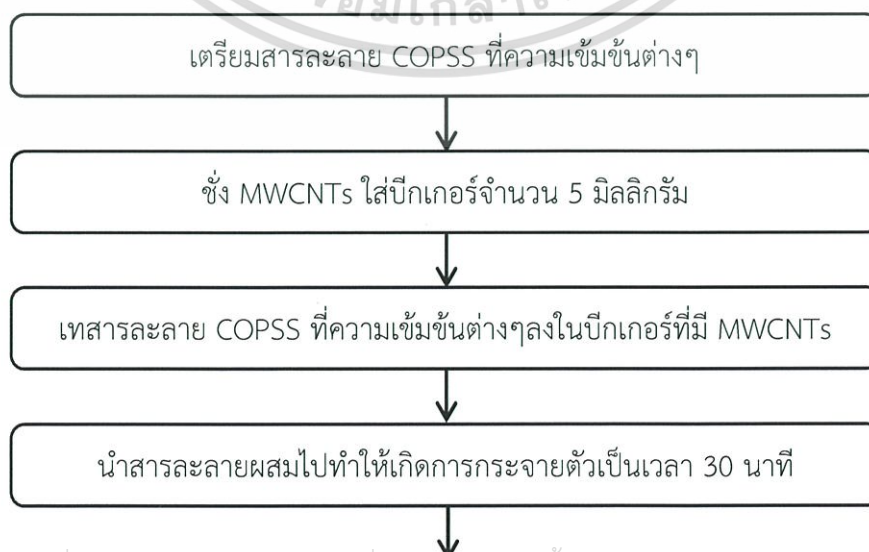
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC

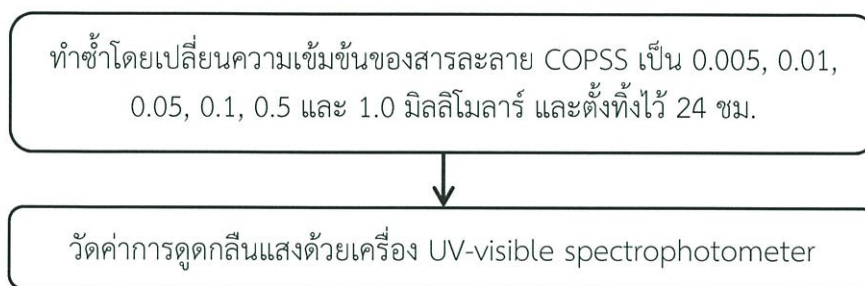
ตัวแปรที่ศึกษา	เทคนิควิเคราะห์
ศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC	TEM
ศึกษาสภาพความเป็นประจุของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC	Zeta potential
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC	FTIR

3.1.3 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด (COPSS) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs)

เริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด (COPSS) ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ ตามด้วยซัง MWCNTs ใส่บีกเกอร์ๆ ละ 5 มิลลิกรัม ทำการเทสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด (COPSS) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่มี MWCNTs อยู่ นำสารละลายผสมที่ได้ไปทำให้เกิดการกระจายตัว ด้วยเครื่อง Sonicated probe เป็นเวลา 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แผนผังการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ด้วยสารละลาย COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ

การศึกษาลักษณะเฉพาะของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย COPSS

ตัวแปรที่ศึกษา	เทคนิควิเคราะห์
ศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย COPSS	TEM
ศึกษาสภาพความเป็นประจุของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย COPSS	Zeta potential
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย COPSS	FTIR

3.2 การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน (Gold Nanoparticle, AuNPs) ด้วยวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

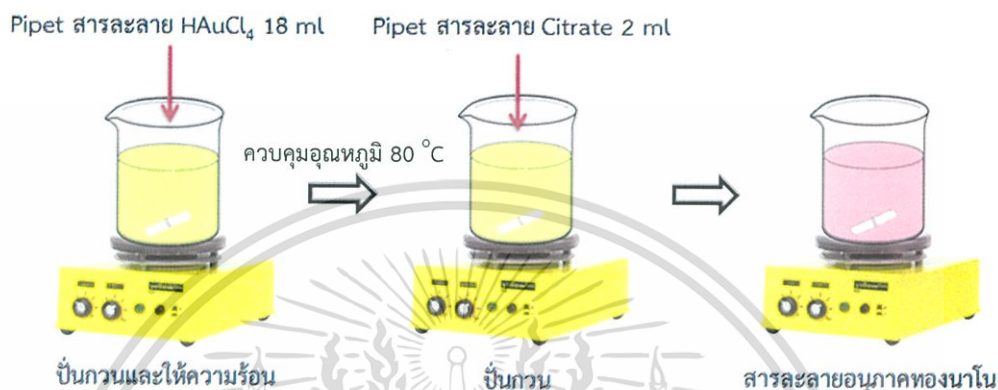
3.2.1 สารเคมี

สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
เตตระคลอโรออริกแอซิด, Gold (III) chloride trihydrate	HAuCl ₄ .3H ₂ O	Sigma-Aldrich, USA
โซเดียมซิเตรทไตรเบสิกไดไฮเดรต, Sodium citrate tribasic dihydrate	C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇	Sigma-Aldrich, USA
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK Group, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน

ปิเปตสารละลายเตตระคลอโรอริกแอซิด (HAuCl_4) ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ 18 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมซิเตรท-ไตรเบสิกไดไฮเดรต (Sodium citrate tribasic dihydrate) ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ลงไป 2 มิลลิลิตร และปั่นกวนจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีแดงอมม่วงซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs)

การศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs)

ตัวแปรที่ศึกษา	เทคนิควิเคราะห์
ศึกษารูปร่างและขนาดของอนุภาคทองในระดับนาโน	TEM
ศึกษาสภาพความเป็นประจุของอนุภาคทองในระดับนาโน	Zeta potential
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคทองในระดับนาโน	FTIR

3.3 การศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer)

3.3.1 สารเคมี

สารเคมี	ชื่อย่อ	บริษัทที่ผลิต
สารละลายอนุภาคทองในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ (จากตอน 3.2.2)	AuNPs	–
สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC (จากตอน 3.1.2)	MWCNTs–PDADMAC	–

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับปรุง พื้นผิวด้วยสารละลาย COPSS (จากตอน 3.1.3)	MWCNTs-COPSS	-
โพลีโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต, Poly(sodium 4-styrenesulfonate)	PSS	Sigma-Aldrich, USA
โพลีไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอ ไรด์, PDADMAC	PDADMAC	Sigma-Aldrich, USA
น้ำปราศจากไอออน, Deionized water	DI water	RHK Group, Thailand

3.3.2 การเตรียมแผ่นกระจกให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ

เตรียมสารละลายไดแอลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ และสารละลายโพลีโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต (PSS) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ลงในแต่ ละบีกเกอร์แล้วนำแผ่นกระจกจุ่มลงไปในสารละลาย PDADMAC เป็นขั้นแรก จับเวลาประมาณ 5 นาที แล้วจึงยกขึ้นนำไปฉีดล้างด้วยน้ำกลั่น สลับไปจุ่มในสารละลาย PSS ประมาณ 5 นาที แล้วยกขึ้น นำไปฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นเช่นกัน ทำสลับไปมาจนได้จำนวนชั้นที่ต้องการ และในขั้นตอนสุดท้ายล้าง แผ่นกระจกด้วยน้ำกลั่นและทิ้งไว้ให้แห้ง ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.5



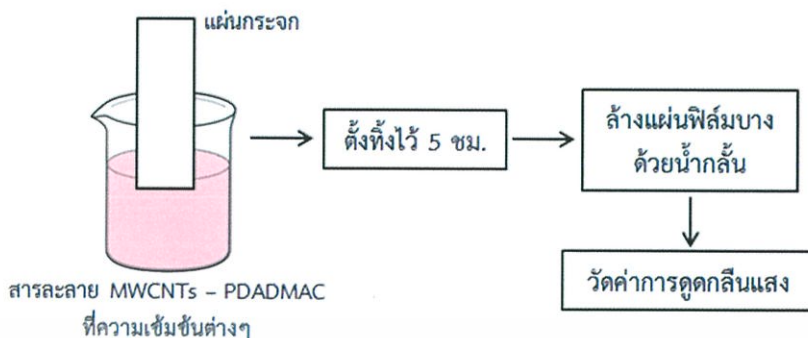
รูปที่ 3.5 การปรับสภาพพื้นผิวของแผ่นกระจกด้วยเทคนิคเลเยอร์บายเลเยอร์ (Layer-by-Layer)

3.3.3 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย PDADMAC ที่ใช้ในการกระจายตัว ของท่อนาโนคาร์บอนในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง

นำสารละลาย MWCNTs-PDADMAC (จากตอน 3.1.2) ที่ความเข้มข้น 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์ เทใส่บีกเกอร์แต่ละใบ หลังจากนั้นนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้ว ที่มี ประจุเป็นลบ (จากตอน 3.3.2) มาจุ่มลงในแต่ละบีกเกอร์ แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อครบ เวลาที่กำหนดให้ล้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ด้วยน้ำกลั่นและเป่าให้แห้ง นำไปวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

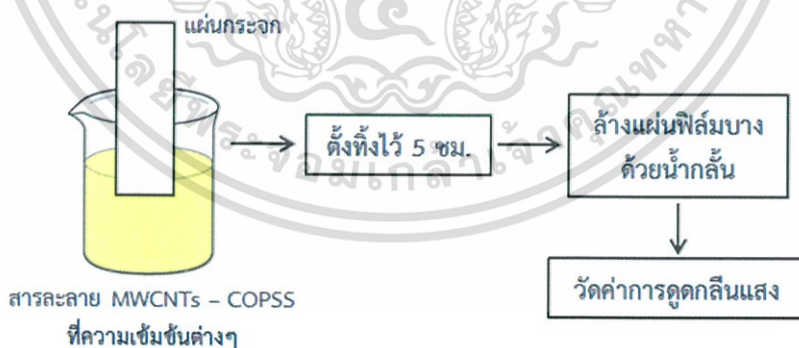
การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย PDADMAC ในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง

3.3.4 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ที่ใช้ในการกระจายตัวของอนุภาคนาโนคาร์บอนในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง

นำสารละลาย MWCNTs-COPSS (จากตอน 3.1.3) ที่ความเข้มข้น 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์ เทใส่บีกเกอร์แต่ละใบ แล้วนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้ว ที่มีประจุเป็นบวก (จากตอน 3.3.2) มาจุ่มลงในบีกเกอร์แต่ละใบ แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้ล้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ด้วยน้ำกลั่นแล้วทำการเป่าให้แห้ง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.7

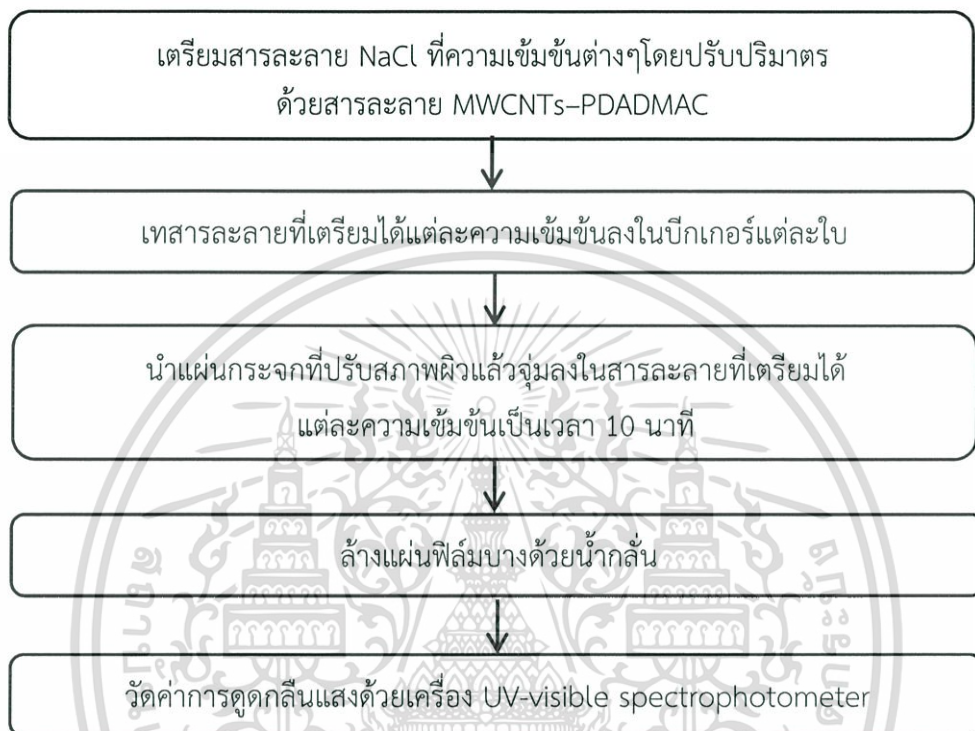


รูปที่ 3.7 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน

3.3.5 การศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 50, 60, 65, 70, 75, 80, 100 และ 150 มิลลิโมลาร์ โดยปรับปริมาตรด้วยสารละลาย MWCNTs-PDADMAC (จากตอน 3.3.3) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นเทสารละลายที่เตรียมได้แต่ละความเข้มข้นลงในบีกเกอร์แต่ละใบ นำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้ว ที่มีประจุลบ (จากตอน 3.3.2) จุ่มลงในสารละลายที่เตรียมได้แต่ละความเข้มข้นเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.8



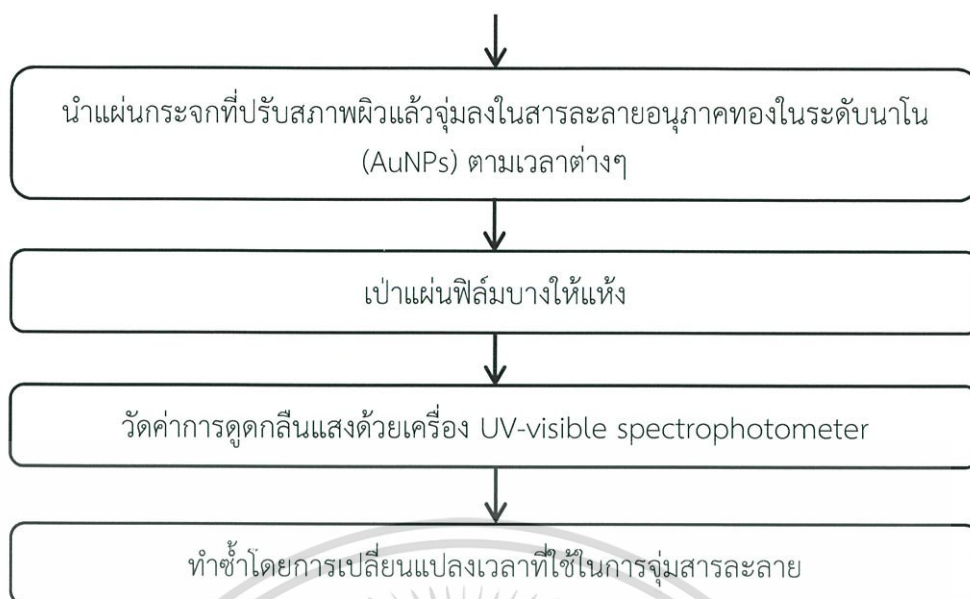
รูปที่ 3.8 แผนผังการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย NaCl สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC

3.3.6 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs)

นำสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) (จากตอน 3.2.2) เทลงในบีกเกอร์และปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา นำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้ว ที่มีประจุบวก (จากตอน 3.3.2) จุ่มลงในสารละลายอนุภาคทองนาโน (AuNPs) ตามเวลาต่างๆแล้วเป่าให้แห้ง และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร (ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการจุ่มสารละลาย ดังนี้ 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที) ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.9

นำสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) เทลงในบีกเกอร์และปั่นกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

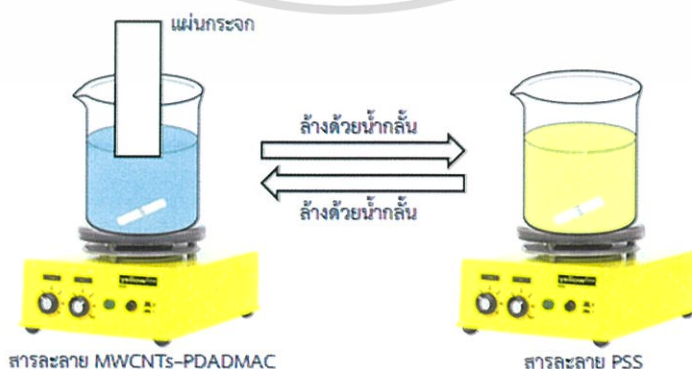


รูปที่ 3.9 แผนผังการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางในการจุ่มสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs)

3.3.7 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโน

3.3.7.1 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย PSS

นำสารละลาย MWCNTs-PDADMAC (จากตอน 3.3.5) เทลงบีกเกอร์พร้อมปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา หลังจากนั้นนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้ว ที่มีประจุลบ (จากตอน 3.3.2) จุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-PDADMAC เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำออกมาเป่าให้แห้ง สลับไปจุ่มลงในสารละลาย PSS ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำออกมาเป่าให้แห้ง ทำการจุ่มสลับไปมาให้ได้จำนวนชั้น 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น ตามลำดับ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย PSS

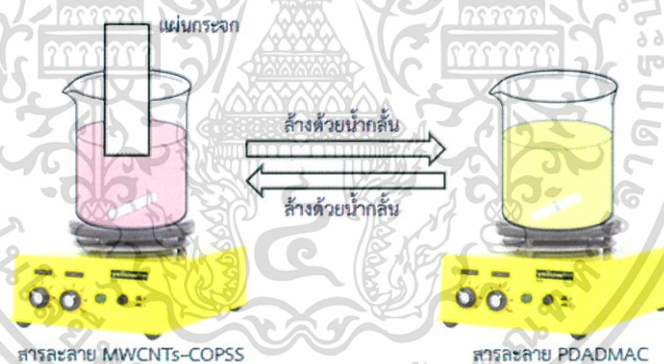
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC

ตัวแปรที่ศึกษา	วิเคราะห์โดย
ศึกษาลักษณะของพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC บนแผ่นฟิล์มบางที่จำนวนชั้นต่างๆ	AFM
ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ MWCNTs-PDADMAC บนแผ่นฟิล์มบาง	FE-SEM
ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบาง	XRD

3.3.7.2 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

นำสารละลาย MWCNTs-COPSS (จากตอน 3.3.4) เทลงบีกเกอร์พร้อมปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา หลังจากนั้นนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว ที่มีประจุบวก (จากตอน 3.3.2) จุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-COPSS เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำออกมาเป่าให้แห้ง สลับไปจุ่มลงในสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลลาร์ เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำออกมาเป่าให้แห้ง ทำการจุ่มสลับไปมา ให้ได้จำนวนชั้น 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น ตามลำดับ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับ สารละลาย PDADMAC

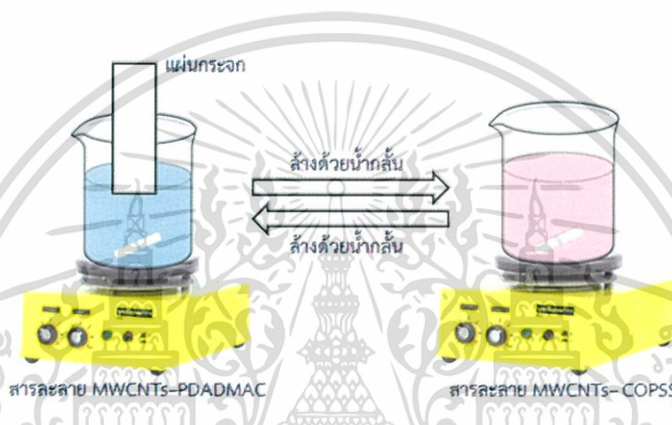
การศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS

ตัวแปรที่ศึกษา	วิเคราะห์โดย
ศึกษาลักษณะของพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS บนแผ่นฟิล์มบางที่จำนวนชั้นต่างๆ	AFM
ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบาง	XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7.3 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS

นำสารละลาย MWCNTs-PDADMAC (จากตอน 3.3.5) เทลงปิกเกอร์พร้อมปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา หลังจากนั้นนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว ที่มีประจุลบ (จากตอน 3.3.2) จุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-PDADMAC เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำออกมาเป่าให้แห้ง สลับไปจุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-COPSS (จากตอน 3.3.4) เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำออกมาเป่าให้แห้ง ทำการจุ่มสลับไปมาให้ได้จำนวนชั้น 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น ตามลำดับ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS

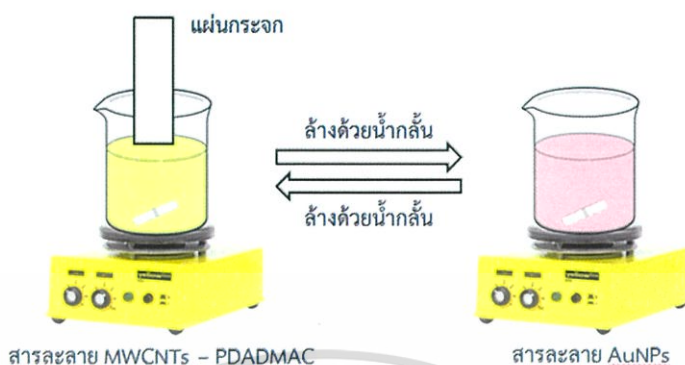
การศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS

ตัวแปรที่ศึกษา	วิเคราะห์โดย
ศึกษาลักษณะของพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS บนแผ่นฟิล์มบางที่จำนวนชั้นต่างๆ	AFM
ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบาง	XRD

3.3.7.4 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs)

นำสารละลาย MWCNTs-PDADMAC (จากตอน 3.3.5) เทลงปิกเกอร์พร้อมปั่นกวนสารละลายตลอดเวลา หลังจากนั้นนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว ที่มีประจุลบ (จากตอน 3.3.2) จุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-PDADMAC เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำออกมาเป่าให้แห้ง สลับไปจุ่มลงในสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) (จากตอน 3.2.2) เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาเป่าให้แห้ง ทำการจุ่มสลับไปมาให้ได้จำนวนชั้น 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น ตามลำดับ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยทำการสแกนสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-200 นาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงรูปการทดลองได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs)

การศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs)

ตัวแปรที่ศึกษา	วิเคราะห์โดย
ศึกษาลักษณะของพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) บนแผ่นฟิล์มบางที่จำนวนชั้นต่างๆ	AFM
ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของ MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) บนแผ่นฟิล์มบาง	FE-SEM
ศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบาง	XRD

3.4 การสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer technique)

3.4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้า ITO/AuNPs

นำขั้วไฟฟ้าไอโอดีนเจือทินออกไซด์ (ITO) ไปทำการปรับสภาพพื้นผิวให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ แล้วนำมาจุ่มลงในสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นและจุ่มลงในสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 10 mM เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น ทำสลับกันไปมาจนได้ 15 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC–MWCNTs.COPSS

นำขั้วไฟฟ้าไอโอดีนเจือทินออกไซด์ (ITO) ไปทำการปรับสภาพพื้นผิวให้มีคุณสมบัติชอบน้ำ แล้วนำมาจุ่มลงในสารละลาย MWCNTs–PDADMAC เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น และจุ่มลงในสารละลาย MWCNTs–COPSS เป็นเวลา 10 นาที นำมาล้างด้วยน้ำกลั่น ทำสลับกันไปมาจนได้ 15 ชั้น

3.4.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/L-Glutathione

นำขั้วไฟฟ้าไอโอดีนเจือทินออกไซด์ (ITO) ไปทำการปรับสภาพพื้นผิวให้มีคุณสมบัติชอบน้ำแล้วนำมาจุ่มลงในสารละลาย MWCNTs–PDADMAC เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นและจุ่มลงในสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น ทำสลับกันไปมาจนได้จำนวนชั้นที่ต้องการ คือ 5, 11 และ 15 ชั้น ในขั้นสุดท้ายให้นำมาจุ่มลงในสารละลาย L-Glutathione ความเข้มข้น 10 mM เป็นเวลา 10 นาที

3.5 การวิเคราะห์โดพามีน(Dopamine) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)

3.5.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โดพามีน (Dopamine) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)

3.5.1.1 ศึกษาชนิดของอิเล็กโทรด (Electrode) ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โดพามีน (Dopamine)

เตรียมสารละลายโดพามีนความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่พีเอช 6.5 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นตัวทำละลายและนำอิเล็กโทรดต่างๆ ดังนี้ ITO, ITO/MWCNTs.PDADMAC–MWCNTs.COPSS, ITO/AuNPs และ ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/L-Glutathione มาตรวจวัดโดพามีนด้วยเครื่องโพเทนทิโอสแตต/กัลวานอสแตตรุ่น Anova 1.8 (Potentiostat/Galvanostat รุ่น Anova 1.8) โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.14

เตรียมสารละลายโดพามีนความเข้มข้น 200 μM โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) pH 6.5 ความเข้มข้น 0.1 M เป็นตัวทำละลาย



นำอิเล็กโทรดต่างๆไปวิเคราะห์โดพามีนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

↓

โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 20 mV/s

รูปที่ 3.14 แผนผังการศึกษาอิเล็กโทรดที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โดพามีน (Dopamine)

3.5.1.2 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

เตรียมสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) พีเอช 6.5 ความเข้มข้นดังนี้ 0.1, 0.5 และ 1.0 โมลาร์ เป็นตัวทำละลายตามลำดับ และนำอิเล็กโทรด ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/L-Glutathione ไปตรวจวัดโดพามีนด้วยเครื่องโพเทนทีโอสเตท/กัลวานอสเตท รุ่น Anova 1.8 (Potentiostat/Galvanostat รุ่น Anova 1.8) โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.15

เตรียมสารละลายโดพามีนความเข้มข้น 200 μM โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) pH 6.5 ความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1.0 M เป็นตัวทำละลายตามลำดับ

↓

นำอิเล็กโทรด ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/L-Glutathione ไปวิเคราะห์โดพามีนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry

↓

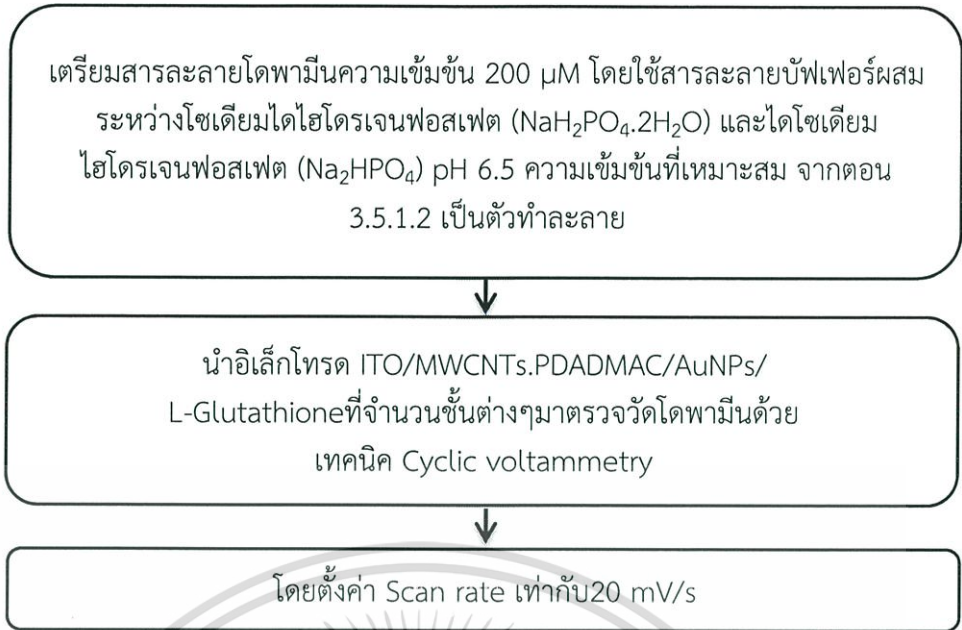
โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 20 mV/s

รูปที่ 3.15 แผนผังการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

3.5.1.3 ศึกษาจำนวนชั้นของอิเล็กโทรด (Electrode) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดพามีน (Dopamine)

เตรียมสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่พีเอช 6.5 ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากตอน 3.5.1.2 เป็นตัวทำละลายและนำอิเล็กโทรด ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/L-Glutathione ที่จำนวนชั้นเท่ากับ 5, 10 และ 15 ชั้นตามลำดับมาตรวจวัดโดพามีนด้วยเครื่องโพเทนทีโอสเตท /กัลวานอสเตท รุ่น Anova 1.8 (Potentiostat/Galvanostat รุ่น Anova 1.8) โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.16

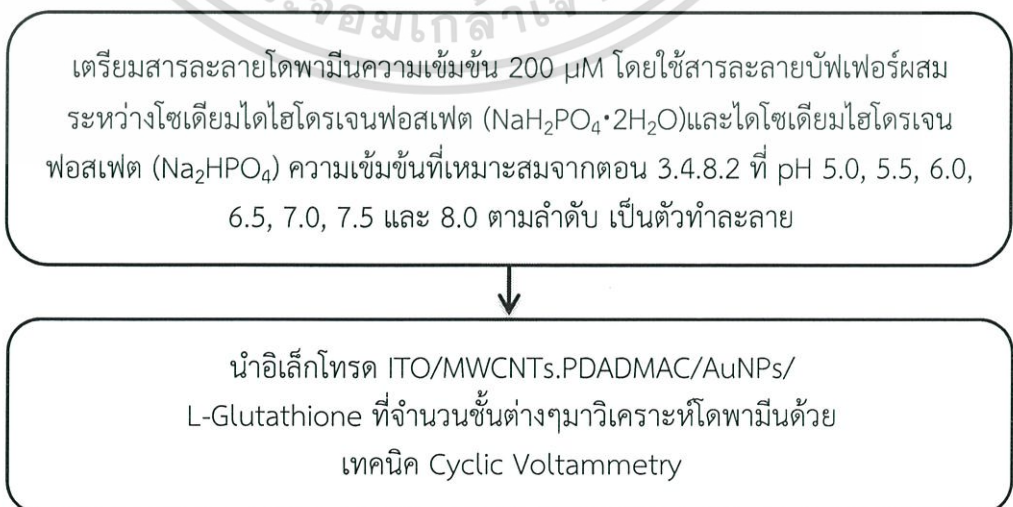
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แผนผังการศึกษาจำนวนชั้นของอิเล็กโทรด(Electrode) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดพามีน (Dopamine)

3.5.1.4 ศึกษาค่าพีเอช (pH) ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

เตรียมสารละลายโดพามีน 200 ไมโครโมลาร์ โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากตอน 3.5.1.2 ที่พีเอช 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 และ 8.0 ตามลำดับ เป็นตัวทำละลาย และนำอิเล็กโทรด ITO/MWCNTs/PDADMAC/AuNPs/L-Glutathione มาตรวจวัดโดพามีนด้วยเครื่องโพเทนทีโอสเตท/กัลวานอสเตทรุ่นอนอวา 1.8 (Potentiostat/Galvanostat รุ่น Anova 1.8) โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 20 mV/s

รูปที่ 3.17 แผนผังการศึกษาค่าพีเอช (pH) ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

3.5.1.5 ศึกษาอัตราการสแกน (Scan rate) ที่เหมาะสม

เตรียมสารละลายมาตรฐานโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่พีเอชที่เหมาะสมจากตอน 3.5.1.4 และความเข้มข้นที่เหมาะสมจากตอน 3.5.1.2 เป็นตัวทำละลาย และนำอิเล็กโทรด ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/L-Glutathione มาตรวจวัดโดพามีนด้วยเครื่องโพเทนทิโอสแตท/กัลวานอสแตท รุ่น Anova 1.8 (Potentiostat/Galvanostat รุ่น Anova 1.8) โดยเปลี่ยนค่า Scan rate เท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทดลองได้ดังรูปที่ 3.18

เตรียมสารละลายโดพามีนความเข้มข้น 200 μM โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) pH ที่เหมาะสมจากตอน 3.4.8.4 และความเข้มข้นที่เหมาะสมจากตอน 3.4.8.2 เป็นตัวทำละลาย



นำอิเล็กโทรด ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/L-Glutathione ที่จำนวนชั้นต่างๆ มาตรวจวัดโดพามีนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry



โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250 และ 300 mV/s ตามลำดับ

รูปที่ 3.18 แผนผังการศึกษาอัตราการสแกน (Scan rate) ที่เหมาะสม

3.5.2 การตรวจวัดโดพามีน (Dopamine) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)

3.5.2.1 สร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโดพามีน (Dopamine)

เตรียมสารละลายมาตรฐานโดพามีนที่ความเข้มข้น 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100 ไมโครโมลาร์ โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้นจากตอน 3.5.1.2 พี่เอชจากตอน 3.5.1.4 เป็นตัวทำละลาย ทำการวิเคราะห์โดพามีนที่ความเข้มข้นโดยเครื่องโพเทนทิโอสแตท/กัลวานอสแตท รุ่นอโนวา 1.8 (Potentiostat/Galvanostat รุ่น Anova 1.8) โดยตั้งค่า Scan rate เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

3.5.2.2 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) จะเป็นการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดของโดพามีนที่ตรวจวัดได้ โดยใช้กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐาน (ไมโครโมลาร์) และกระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์) สามารถหาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) ได้โดยการวัด Blank จำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank แล้วนำมาทำการคำนวณโดยใช้สูตร
$$\text{LOD} = \frac{3 \text{ SD of Blank}}{\text{Slope}}$$

3.5.2.3 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)

การศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์โดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) จะเป็นการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดของโดพามีนที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยใช้กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐาน (ไมโครโมลาร์) และกระแสไฟฟ้า (ไมโครแอมแปร์) สามารถหาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) ได้โดยการนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank ที่หาได้จากตอนคำนวณหา LOD (จากตอนที่ 3.5.2.2) แล้วนำมาทำการคำนวณโดยใช้สูตร

$$\text{LOD} = \frac{10 \text{ SD of Blank}}{\text{Slope}}$$

3.5.2.4 ศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)

การศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของโดพามีนในตัวอย่างเลือดและปัสสาวะ โดยเริ่มจากการนำตัวอย่างเลือดและตัวอย่างปัสสาวะ มาทำการเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้นจากตอน 3.5.1.2 พี่เอชจากตอน 3.5.1.4 ตามด้วยการเติมสารละลายมาตรฐานโดพามีน

ความเข้มข้น 1, 5, 10, 30 และ 50 มิลลิโมลาร์ ลงในตัวอย่างตามลำดับ แล้วทำการตรวจวัดโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

3.5.2.5 ศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

เป็นการศึกษาว่าในการวิเคราะห์ที่มีตัวรบกวนตัวใดที่รบกวนการวิเคราะห์หรือไม่ โดยการเติมตัวรบกวนต่างๆ ดังนี้ Citric acid, Calcium carbonate, Potassium chloride, Ascorbic acid, Uric acid และ Glucose ลงไปในสารละลายมาตรฐานโดพามีน แล้วทำการตรวจวัดโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

3.5.2.6 ศึกษาค่าความเที่ยง (Precision) ของขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิต

การศึกษาค่าความความเที่ยง (Precision) ของการวิเคราะห์โดพามีน ด้วยวิธีการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ จำนวน 10 ครั้ง แล้วคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ซึ่งถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยและเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตมีความเที่ยงในการวิเคราะห์สูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

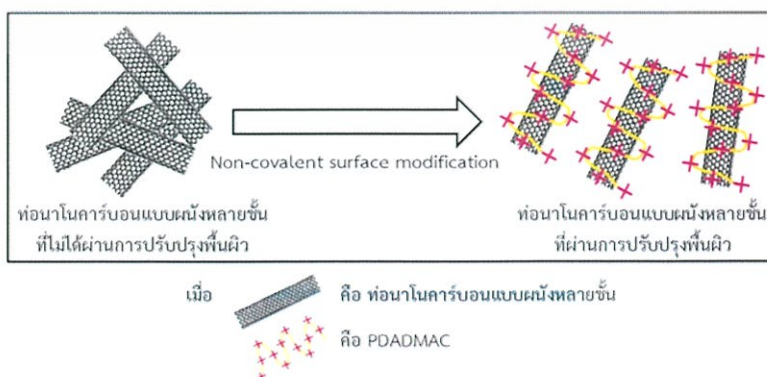
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดลองและการอภิปรายผลในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ 6 ส่วน ดังต่อไปนี้ ส่วนที่หนึ่งเป็นผลการทดลองและการอภิปรายผลเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ส่วนที่สองเป็นการอภิปรายผลเกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน (Gold nanoparticle) ส่วนที่สามเป็นการอภิปรายผลเกี่ยวกับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer) ส่วนที่สี่เป็นผลการทดลองและการอภิปรายผลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆ ส่วนที่ห้าเป็นผลของการศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆ ที่สร้างขึ้น และส่วนสุดท้ายเป็นผลการทดลองและการวิจารณ์ผลเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาโดพามีน (Dopamine) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)

4.1 การศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotube, MWCNTs)

ในงานวิจัยนี้มีความต้องการที่จะนำท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) มากระจายตัวในตัวทำละลายที่เป็นของเหลว แต่เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวในน้ำหรือของเหลวได้ไม่ดี ในงานวิจัยจึงได้มีการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนขึ้น โดยใช้การปรับปรุงพื้นผิวแบบนอนโควาเลนต์ โดยใช้สารละลายโพลีอิลิกโทรไลต์ คือ โพลีไดเอสลิตโดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) และสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด (COPSS) เป็นตัวกระจาย (Dispersant) ท่อนาโนคาร์บอนออกจากกัน โดยผ่านกระบวนการสั่นด้วยการใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูง (Sonication) โดยสารละลายอิลิกโทรไลต์จะไปห่อหุ้มท่อนาโนคาร์บอนแต่ละท่อ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวในน้ำหรือของเหลวได้ ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบการกระจายตัวดังแสดงในรูปที่ 4.1

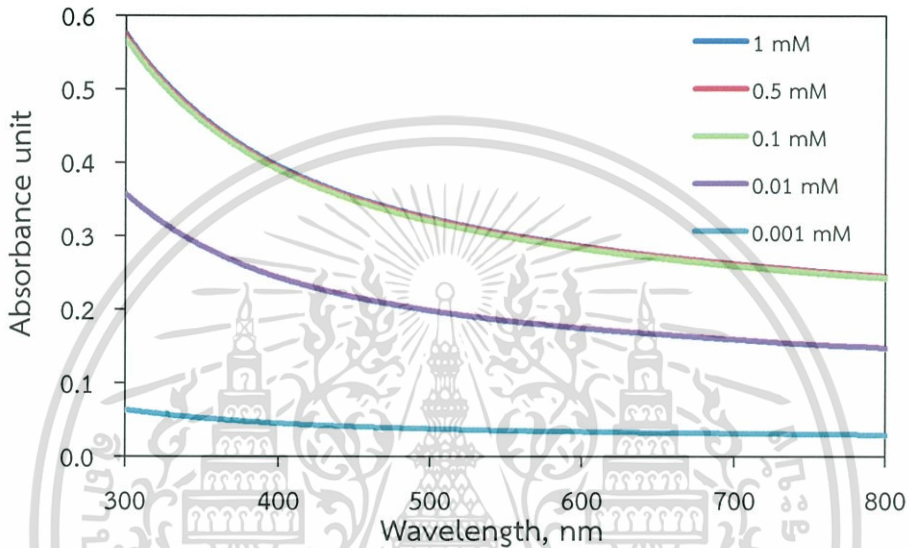


รูปที่ 4.1 รูปแบบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน

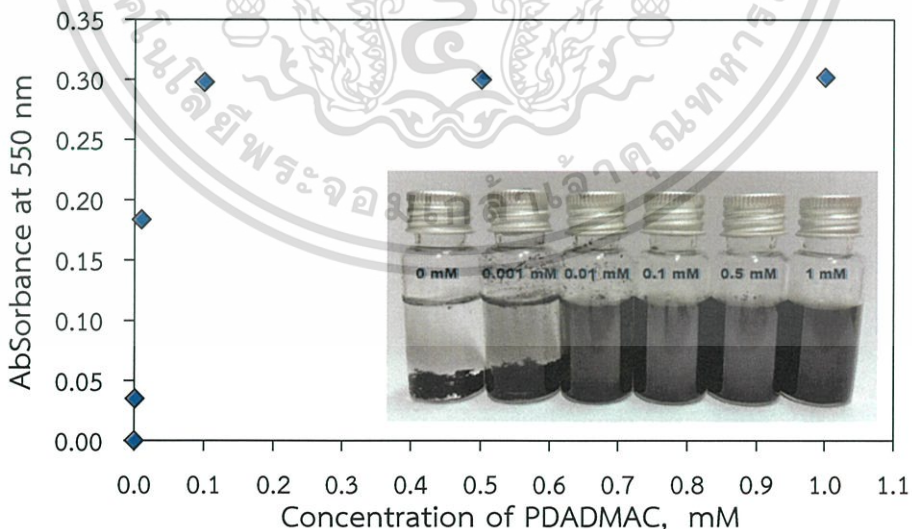
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีไดแอลลิลดีเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs)

ในการทดลองนี้ ทำการทดลองโดยการชั่ง MWCNTs 5 มิลลิกรัม แล้วนำไปผสมกับสารละลาย PDADMAC ที่ความเข้มข้น 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ หลังจากนั้นนำสารผสมไปทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยเครื่อง Sonicated probe เป็นเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย MWCNTs-PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ



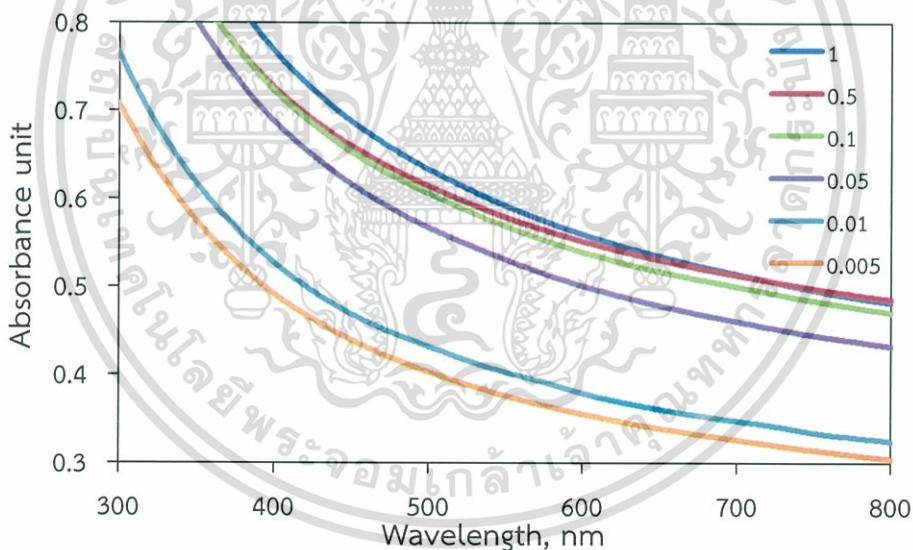
รูปที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของสารละลาย MWCNTs-PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

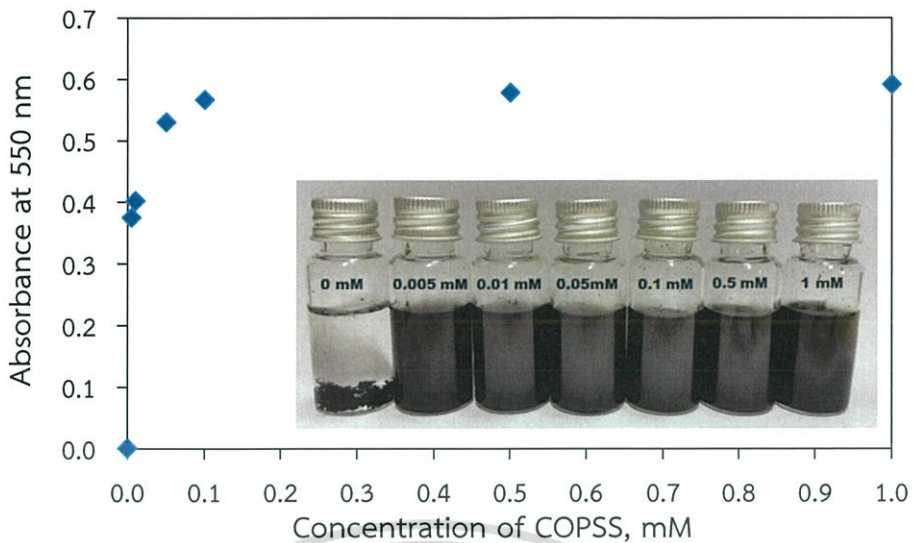
จากรูปที่ 4.3 อธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย PDADMAC เพิ่มขึ้น จะทำให้ MWCNTs เกิดการกระจายตัวในสารละลาย PDADMAC ได้มากขึ้น แต่จากรูปสารละลาย PDADMAC ที่ ความเข้มข้น 0.1–1 มิลลิโมลาร์ จะสังเกตเห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงเริ่มคงที่เป็น เพราะสาร PDADMAC ได้ไปห่อหุ้มบริเวณพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 5 มิลลิกรัม จนหมดแล้ว ดังนั้นความเข้มข้นของ PDADMAC ที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิว MWCNTs ปริมาณ 5 มิลลิกรัม คือ 0.1 มิลลิโมลาร์

4.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโพลีสไตรีนซัลโฟนิคแอซิดโคมาเลอิกแอซิด (COPSS) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs)

ในการทดลองนี้ วิเคราะห์ได้โดยการเตรียมสารละลาย COPSS ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1 มิลลิโมลาร์ แล้วนำมาผสมกับ MWCNTs 5 มิลลิกรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นนำสารผสมไปทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยเครื่อง Sonicated probe เป็นเวลา 30 นาที ตั้งสารละลาย MWCNTs–COPSS ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ได้ผลดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



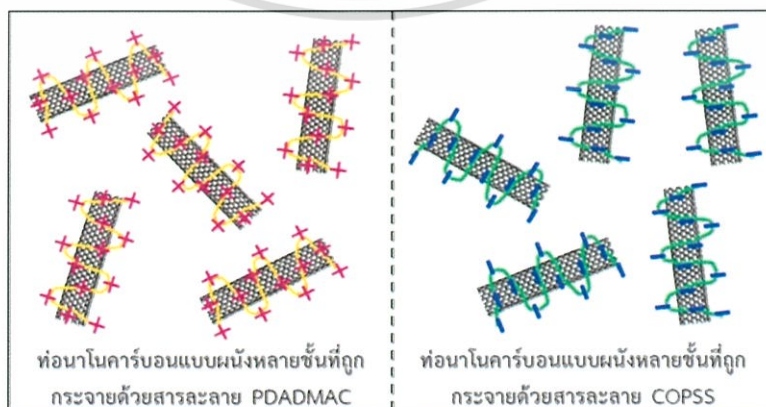
รูปที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย MWCNTs–COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของสารละลาย MWCNTs-COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 อธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย PDADMAC คือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย COPSS เพิ่มขึ้น จะทำให้ MWCNTs เกิดการกระจายตัวในสารละลาย COPSS ได้มากขึ้น แต่จากรูปสังเกตเห็นว่าสารละลาย COPSS ที่ความเข้มข้น 0.1-1 มิลลิโมลาร์ ค่าการดูดกลืนแสงจะเริ่มคงที่ เป็นเพราะสาร COPSS ได้ไปห่อหุ้มบริเวณพื้นผิวท่อคาร์บอนปริมาณ 5 มิลลิกรัม จนหมดแล้ว ดังนั้นความเข้มข้นของ COPSS ที่เหมาะสมในการปรับปรุงพื้นผิว MWCNTs ปริมาณ 5 มิลลิกรัม คือ 0.1 มิลลิโมลาร์

ซึ่งจากการนำสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลาย PDADMAC และ COPSS ไปทำการกระจายท่อคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) โดยใช้วิธีการปรับปรุงพื้นผิวแบบนอนโควาเลนต์ สามารถที่จะแสดงรูปแบบการกระจายของท่อคาร์บอนในสารละลายทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 4.6



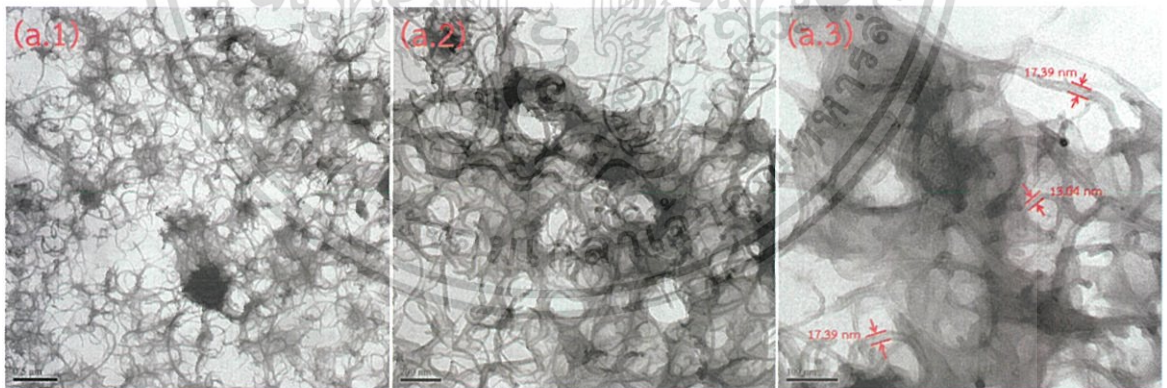
รูปที่ 4.6 ท่อคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่ถูกกระจายด้วยสารละลาย PDADMAC และ COPSS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และ COPSS

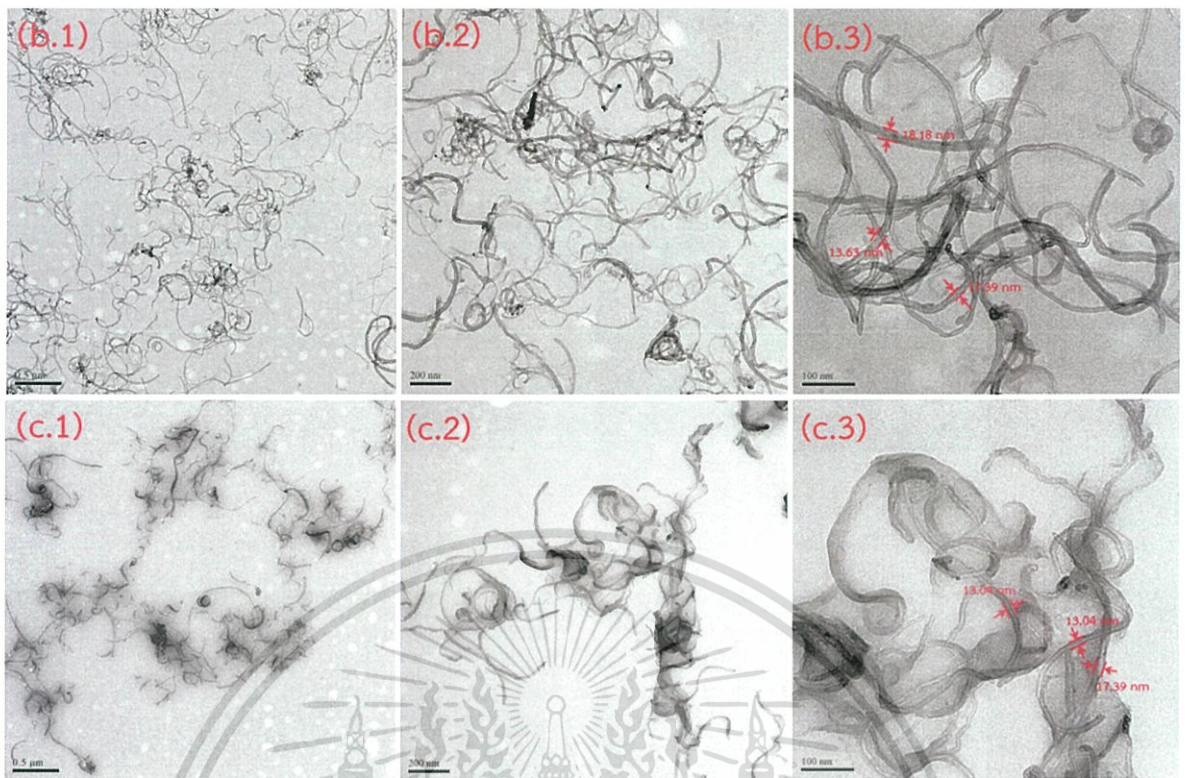
เพื่อเป็นการยืนยันว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) เกิดการกระจายตัวในสารละลาย PDADMAC และ COPSS ได้ จึงได้มีการศึกษาลักษณะเฉพาะของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยๆ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่งเป็นผลจากการศึกษารูปร่าง ขนาด และลักษณะการกระจายตัวของ MWCNTs ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ส่วนที่สอง คือ ผลของการศึกษาสภาพความเป็นประจุของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS โดยการวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) และส่วนที่สาม คือ ผลของการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS โดยเทคนิค FTIR

4.1.3.1 ผลของการศึกษารูปร่าง ขนาด และลักษณะการกระจายตัวของ MWCNTs ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

ในการทดลองนี้ วิเคราะห์ที่ได้โดยนำ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ และ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย COPSS ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ หยดลงบนกริด แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดย (a) MWCNTs ที่ยังไม่ปรับปรุงพื้นผิว (b) MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และ (c) MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย COPSS

ผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) รูปที่ 4.7a แสดงให้เห็นว่า MWCNTs รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ในสารละลาย เนื่องจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) ระหว่างท่อคาร์บอนด้วยกันเอง แต่เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิว MWCNTs ด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS แล้ว จะเห็นได้ว่า MWCNTs เกิดการกระจายตัวอยู่ในสารละลายได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7b และ 4.7c ตามลำดับ โดย MWCNTs จะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกยาวขดม้วนไปมา และมีขนาดประมาณ 13–18 นาโนเมตร

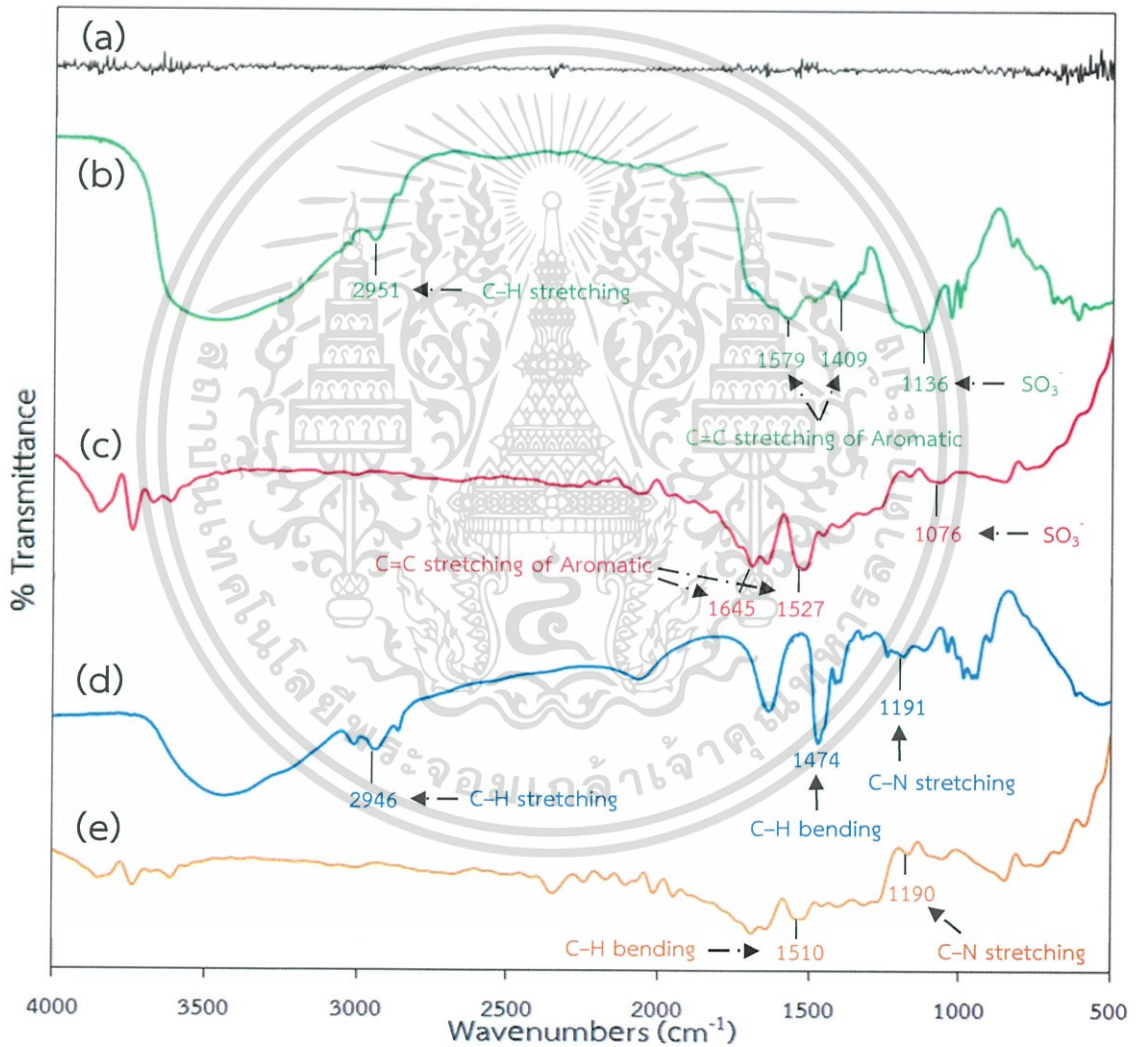
4.1.3.2 ผลจากการศึกษาสภาพความเป็นประจุของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS โดยการวัดค่าศักย์ซีตา (Zeta potential)

จากการปรับปรุงพื้นผิวของ MWCNTs เพื่อให้ MWCNTs กระจายตัวอยู่ในน้ำหรือของเหลวได้ ด้วยการใช้สารละลาย PDADMAC ซึ่งเป็นสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก (Polycation) เมื่อนำไปตรวจสอบสภาพความเป็นประจุด้วยเทคนิค Zeta potential จะได้ค่าเป็นบวกเท่ากับ +53.96 mV และจากการปรับปรุงพื้นผิวของ MWCNTs ด้วยสารละลาย COPSS ซึ่งเป็นสารโพลีอิเล็กโทรไลต์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีประจุลบ (Polyanion) เมื่อนำไปตรวจสอบสภาพความเป็นประจุก็จะแสดงค่าเป็นลบเท่ากับ -25.50 mV ที่เป็นเช่นนี้เพราะ MWCNTs ได้ถูกห่อหุ้มด้วยสารละลาย PDADMAC และ COPSS ทำให้ค่าที่วัดออกมาได้มีประจุบวกและลบเกิดขึ้นตามลำดับ

4.1.3.3 ผลจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS ด้วยเทคนิค FTIR

วิเคราะห์โดยการนำ MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ และสารละลาย COPSS 0.1 มิลลิโมลาร์ มาอบให้แห้ง แล้วตรวจวัดด้วยเทคนิค FTIR เพื่อตรวจดูหมู่ฟังก์ชันต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สเปกตรัม FTIR ของ (a) pristine MWCNTs (b) COPSS (c) MWCNTs-COPSS (d) PDADMAC และ (e) MWCNTs-PDADMAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 สามารถอธิบายได้ตามตารางต่อไปนี้

Pristine MWCNTs		COPSS		MWCNTs-COPSS		PDADMAC		MWCNTs-PDADMAC	
Bond	Wave number	Bond	Wave number	Bond	Wave number	Bond	Wave number	Bond	Wave number
-	-	C=C stretch	1409 1579	C=C stretch	1524 1645	C-H stretch	2946	-	-
-	-	C-H stretch	2951	-	-	C-H bend	1474	C-H bend	1510
-	-	SO ₃ ⁻	1136	SO ₃ ⁻	1076	C-N stretch	1191	C-N stretch	1190

จากการตรวจวัดสเปกตรัม FTIR เพื่อหาโครงสร้างของ MWCNTs-PDADMAC สเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 1,191 cm⁻¹ แสดงให้เห็นถึงการสั่นในรูปแบบการยืดหดของพันธะ C-N ในหมู่ Quaternary ammonium และที่ความยาวคลื่น 1,510 cm⁻¹ คือการสั่นแบบงอของพันธะ C-H และจากการตรวจวัดสเปกตรัม FTIR เพื่อหาโครงสร้างของ MWCNTs-COPSS สเปกตรัมที่ปรากฏในช่วงความยาวคลื่นที่ 1,645 และ 1,527 cm⁻¹ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสั่นในรูปแบบการยืดหดของพันธะ C=C ในวงเบนซีน และที่ความยาวคลื่น 1,076 cm⁻¹ คือการสั่นแบบยืดหดในหมู่ ซัลโฟเนต (SO₃⁻)

จากรูปที่ 4.8 เมื่อนำสเปกตรัมของ MWCNTs-PDADMAC (e) มาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ PDADMAC (d) จะเห็นได้ว่ามีสเปกตรัมของโครงสร้างที่ตรงกันคือ สเปกตรัมของพันธะ C-N ในหมู่ Quaternary ammonium และ พันธะ C-H ของ PDADMAC จึงสามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์เป็น MWCNTs-PDADMAC และ เมื่อนำสเปกตรัมของ MWCNTs-COPSS (c) มาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ COPSS (b) จะเห็นได้ว่ามีสเปกตรัมของโครงสร้างที่ตรงกันคือ สเปกตรัมของพันธะ C=C ในวงเบนซีน และ หมู่ซัลโฟเนต (SO₃⁻) ของ COPSS จึงยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์เป็น MWCNTs-COPSS

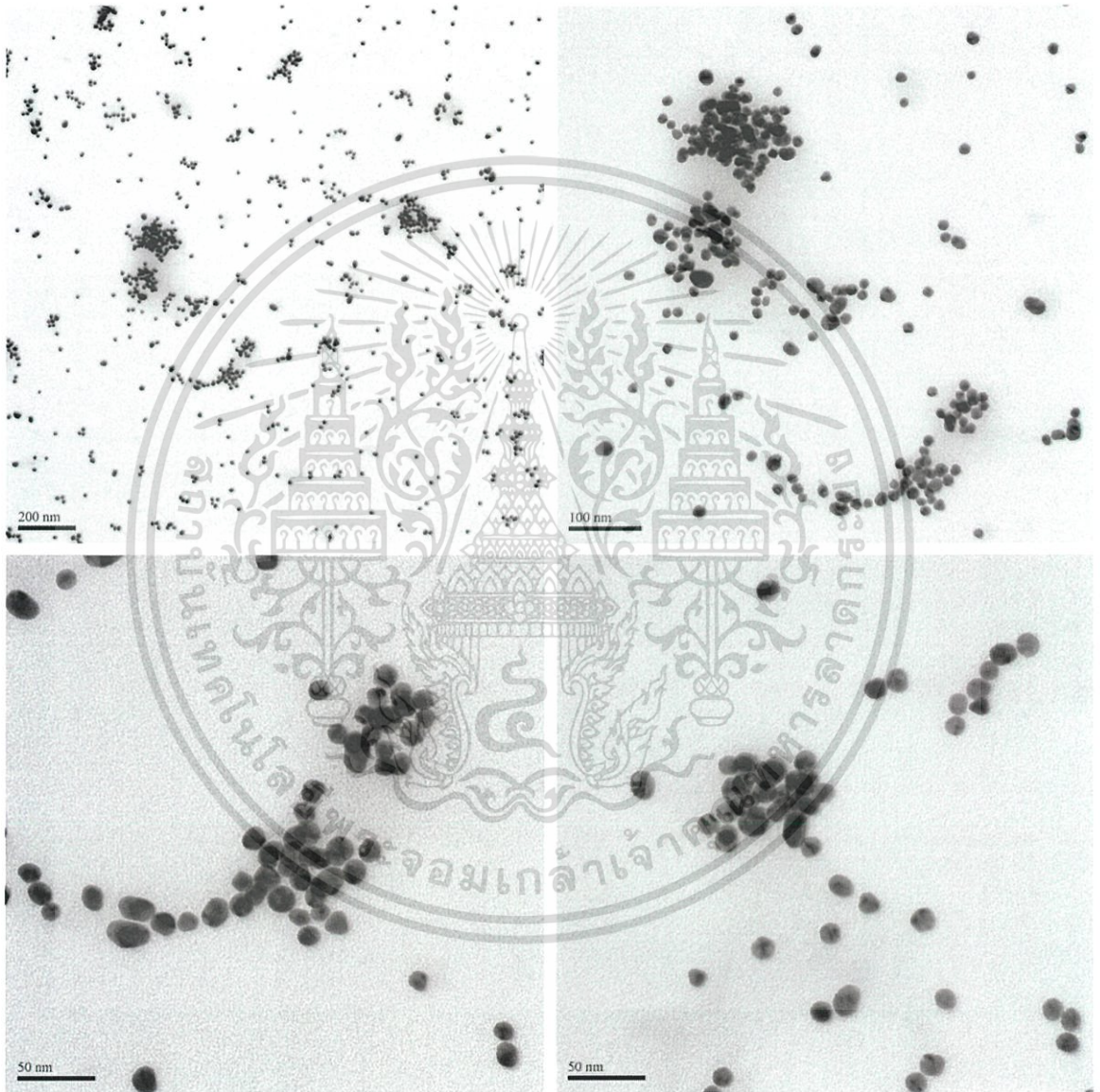
4.2 การศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโน (Gold nanoparticle, AuNPs)

ในงานวิจัยได้มีการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) ด้วยวิธีรีดักชัน โดยใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) เป็นตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพ เพื่อเป็นการยืนยันว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนได้จริง (AuNPs) จึงได้มีการศึกษารูปร่างและขนาดของอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) โดยการนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM), ศึกษาสภาพความเป็นประจุโดยการวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) และศึกษาหมู่ฟังก์ชันของ AuNPs โดยใช้เทคนิค FTIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ผลของการศึกษารูปร่างและขนาดของอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) ที่สังเคราะห์ได้โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

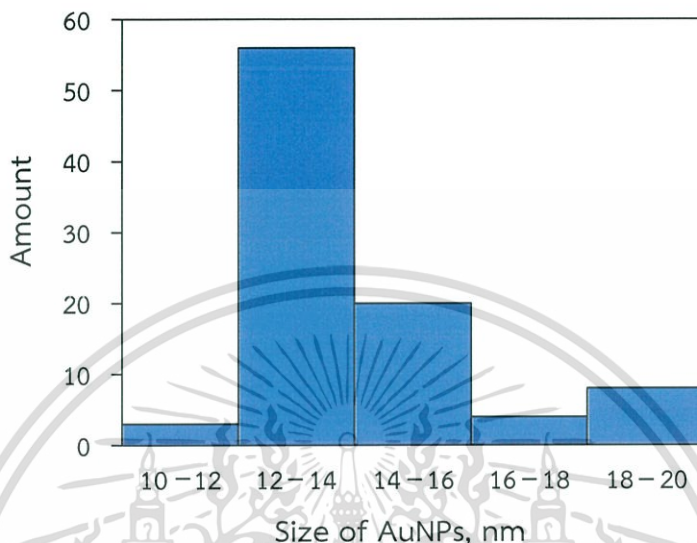
ศึกษาโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) สามารถแสดงให้เห็นถึงรูปร่างและขนาดของอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) ที่ได้สังเคราะห์ขึ้น โดยการนำสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) มาหยดลงบนกริด (Grid) แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 อนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 ภาพที่ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) สามารถบอกได้ถึงขนาด และรูปร่างของอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยรูปร่างที่เห็นนั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมกระจายตัวกันบ้าง รวมกลุ่มกันบ้าง โดยมีขนาดประมาณ 12-14 นาโนเมตร ตามรูปที่ 4.10



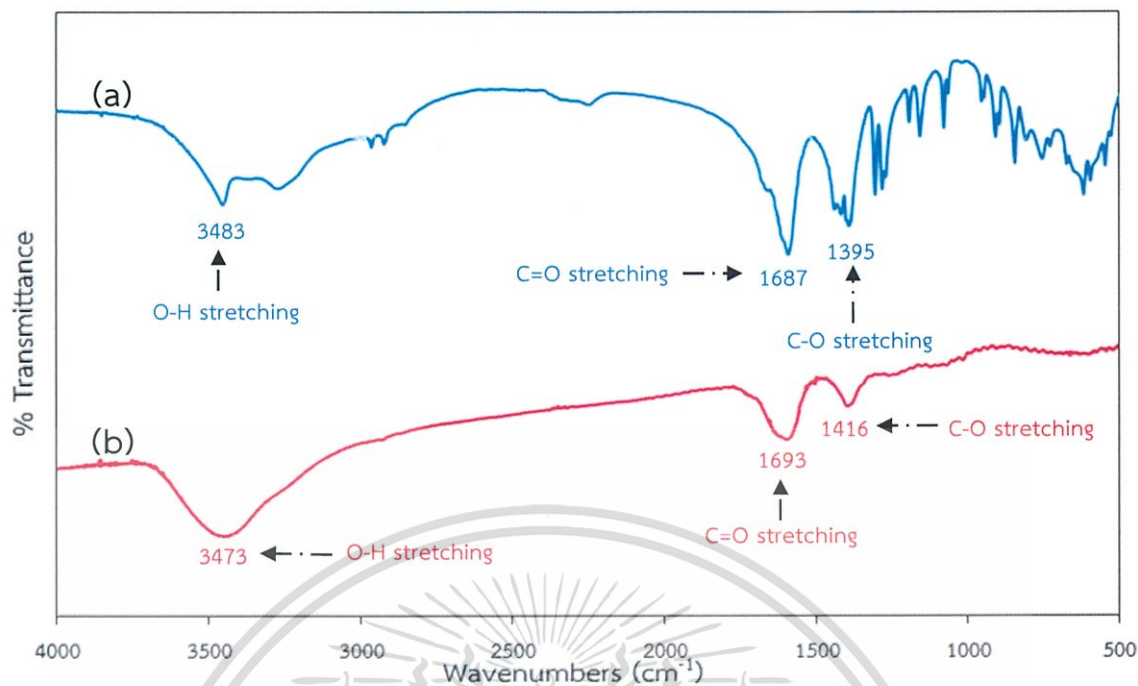
รูปที่ 4.10 ขนาดของอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs)

4.2.2 ผลของการศึกษาสภาพความเป็นประจุของ AuNPs ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)

จากการสังเคราะห์อนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) ด้วยวิธีรีดักชัน โดยการใช้โซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) เป็นตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพ ซึ่งโซเดียมซิเตรท (Sodium citrate) ที่แสดงค่าประจุเป็นลบ เมื่อนำสารละลายอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) ไปตรวจสอบสภาพความเป็นประจุด้วยเทคนิค Zeta potential จะได้ค่าเป็นลบ เท่ากับ -32.36 mV ที่เป็นเช่นนี้เพราะ อนุภาคทองคำนั้นถูกล้อมรอบด้วยสารรักษาเสถียรภาพนั่นก็คือ โซเดียมซิเตรท (Sodium citrate)

4.2.3 ผลของการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เทคนิค FTIR

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทำได้โดยการนำสารละลายอนุภาคทองคำนาโน (AUNPs) ที่ได้จากการสังเคราะห์ ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำผงที่ได้จากการอบไปตรวจวัดด้วยเทคนิค FTIR ได้ผลดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สเปกตรัม FTIR ของ (a) Citrate (b) AuNPs-Citrate

จากการตรวจวัดสเปกตรัม จะเห็นว่าโครงสร้างของไซเตียมซีเตรทมีสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 1395 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงการสั่นในรูปแบบการยืดหดของพันธะ C-O สเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 1687 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นในรูปแบบการยืดหดของพันธะ C=O และสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 3483 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นในรูปแบบการยืดหดของพันธะ O-H ซึ่งเห็นได้ว่าสเปกตรัมของ AuNPs มีหมู่ C-O, C=O และ O-H ที่เหมือนกับสเปกตรัมของไซเตียมซีเตรท จึงสามารถยืนยันได้ว่าสารที่สังเคราะห์เป็น AuNPs ที่ล้อมรอบด้วยไซเตียมซีเตรท

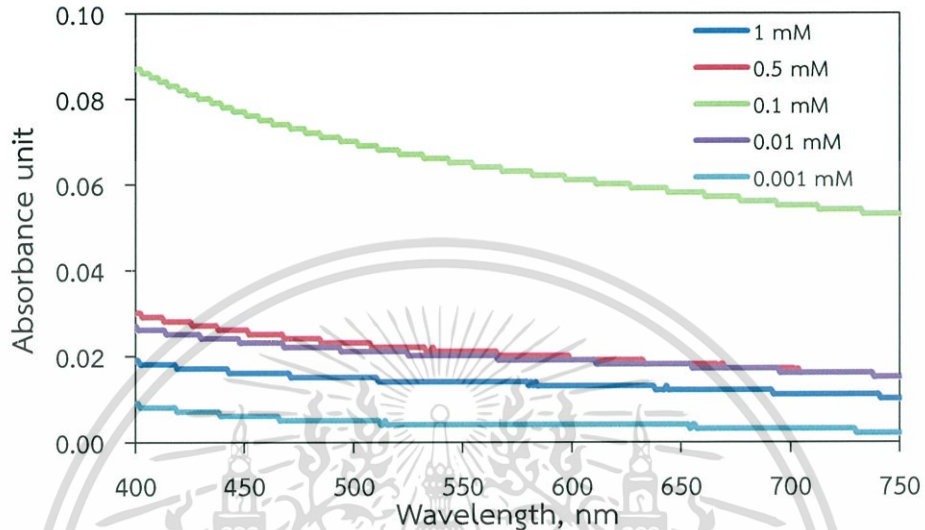
4.3 การศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางขนาดนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสถานะต่างๆในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโนด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าพานาโนคอมโพสิต ซึ่งแบ่งผลของการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนย่อยๆ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ ผลจากการศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย PDADMAC ที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน ส่วนที่สอง คือ ผลของการศึกษาความเข้มข้นของไซเตียมคลอไรด์ (NaCl) ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน MWCNTs-PDADMAC ส่วนที่สาม คือ ผลของการศึกษาความเข้มข้นของสารละลาย COPSS ที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน และส่วนสุดท้ายเป็นผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน โดยการจุ่มด้วยสารละลายอนุภาคทองนาโน (AuNPs)

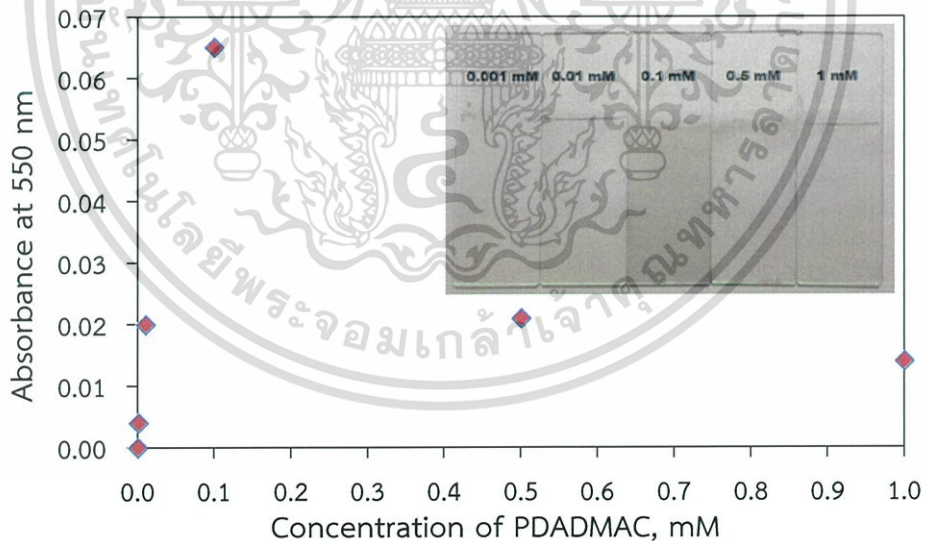
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลของการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย PDADMAC ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน

ในการทดลองนี้ สามารถวิเคราะห์ได้โดยการนำกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Primer) จุ่มลงในสารละลาย MWCNTs-PDADMAC ที่ความเข้มข้น 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูป 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางที่เคลือบด้วย MWCNTs-PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.13 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบางที่เคลือบด้วย MWCNTs-PDADMAC ที่ความเข้มข้นต่างๆ

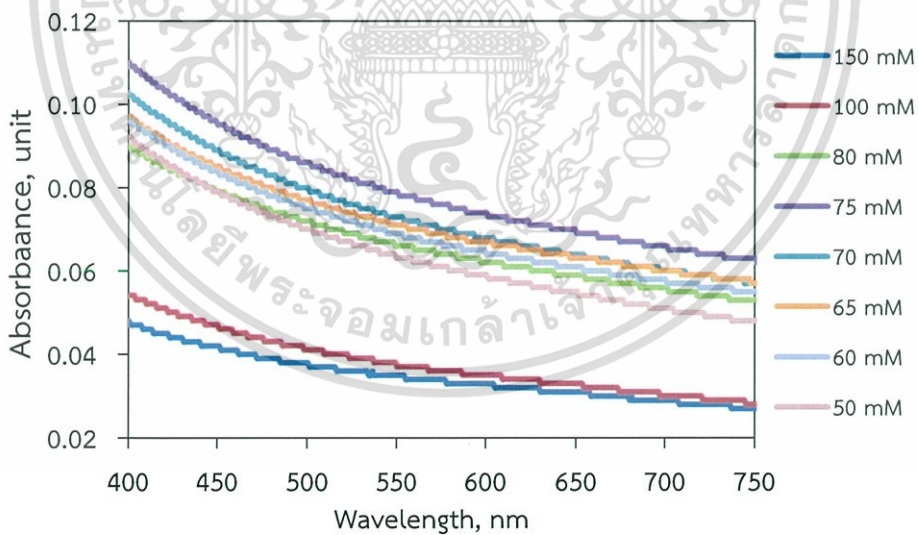
จากรูปที่ 4.13 อธิบายได้ว่าความเข้มข้นของ PDADMAC ที่น้อยกว่า 0.1 มิลลิโมลาร์ เมื่อนำมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC จะได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำ เนื่องจากสารละลาย PDADMAC มีความเข้มข้นที่น้อยเกินไป ไม่สามารถทำการกระจาย MWCNTs ได้หมด ทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ MWCNTs ไปเกาะติดบนแผ่นกระจกได้น้อย ส่วนความเข้มข้นของ PDADMAC ที่มากกว่า 0.1 มิลลิโมลาร์ เมื่อนำมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC จะได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำเช่นกัน เนื่องจากสารละลาย PDADMAC มีความเข้มข้นที่มากเกินไป เมื่อทำการกระจาย MWCNTs จนหมดแล้ว แต่ยังคงมีส่วนของสารละลาย PDADMAC ที่เหลืออยู่มากเกินไป ทำให้สารละลาย PDADMAC ในส่วนที่เหลืออยู่ไปเกาะติดบนแผ่นกระจกแทนที่ MWCNTs-PDADMAC ส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย PDADMAC ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน MWCNTs-PDADMAC คือ 0.1 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากสามารถกระจาย MWCNTs ได้หมดพอดี เมื่อนำมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ทำให้เกาะติดบนแผ่นฟิล์มบางได้เยอะ และได้ค่าการดูดกลืนแสงที่สูงสุด

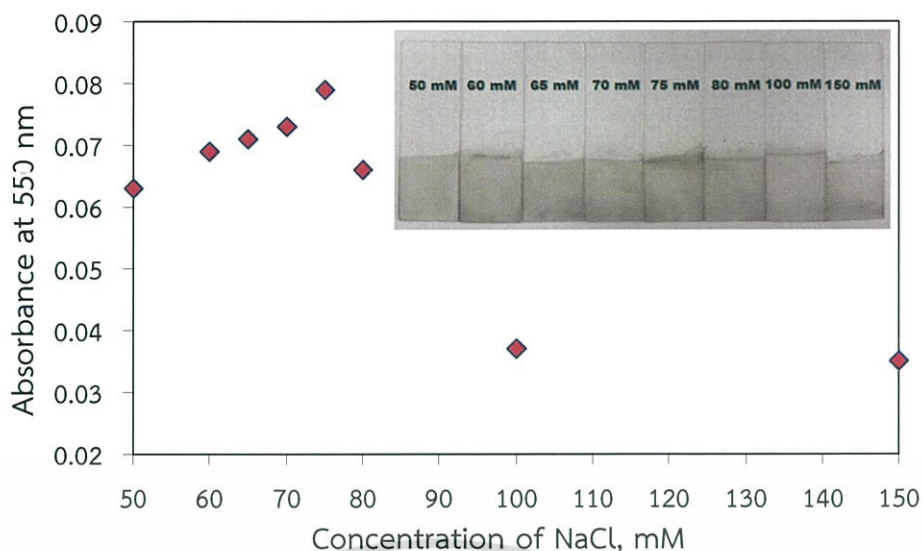
4.3.2 ผลของการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

สำหรับการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC

เนื่องจากสารละลาย MWCNTs-PDADMAC เกาะติดบนแผ่นฟิล์มบางได้น้อย จึงได้มีการนำโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มาใช้ผสมเข้ากับ MWCNTs-PDADMAC เพื่อเพิ่มความสามารถในการเกาะติดบนแผ่นฟิล์มบางให้ดียิ่งขึ้น โดยในการทดลองนี้ได้ทำการหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 50, 60, 65, 70, 75, 80, 100 และ 150 มิลลิโมลาร์ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูป 4.14 และ 4.15

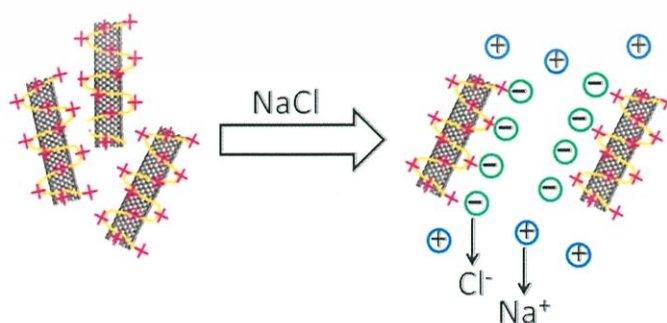


รูปที่ 4.14 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ที่เติม NaCl ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.15 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ที่เติม NaCl ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูป 4.15 สารละลายโซเดียมคลอไรด์จะแสดงผลต่อโครงสร้างของสารละลาย PDADMAC ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน ดังต่อไปนี้ ในส่วนแรกจะส่งผลต่อโครงสร้างของสารละลาย PDADMAC ที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic force) โดยการเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นสูงๆ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสายโซ่พอลิเมอร์ที่ขดอยู่ เกิดการขยายตัวแยกออกจากกัน ในส่วนที่สอง คือ จะส่งผลให้เกิดอัตราการแพร่สูงขึ้นและเกิดการเหนี่ยวนำที่ดี โดยเกิดแรงผลักกันระหว่างประจุทางไฟฟ้า (Electrostatic repulsion) ของประจุในสารละลาย ทำให้สารละลาย PDADMAC ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของแผ่นกระจกได้มากยิ่งขึ้น และส่วนสุดท้าย คือ ความแรงของพันธะไฮโดรเจนจะทำให้เกิดการขยายตัวและเกิดการกระจายออกจากกันของสายโซ่ PDADMAC ก่อนที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวของแผ่นกระจก ทำให้สารละลาย PDADMAC เกาะติดบนแผ่นกระจกได้มากขึ้น ซึ่งแสดงการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลาย MWCNTs-PDADMAC ดังรูปที่ 4.16

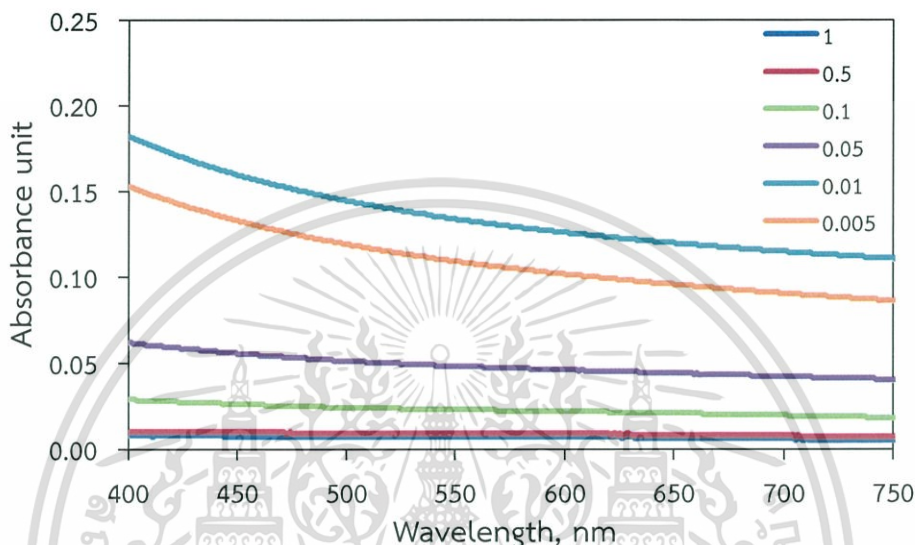


รูปที่ 4.16 แสดงการเติมโซเดียมคลอไรด์ลงในสารละลาย MWCNTs-PDADMAC

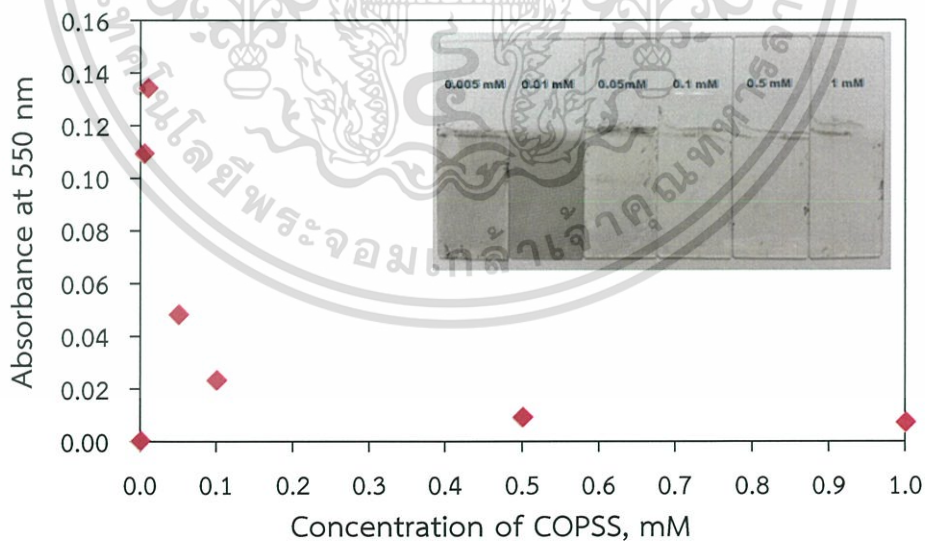
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลของการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน

ในการทดลองนี้ วิเคราะห์ที่ได้ในลักษณะเดียวกันกับการหาความเข้มข้นของ PDADMAC โดยการนำกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Primer) จุ่มลงในสารละลาย MWCNTs–COPSS ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูป 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ



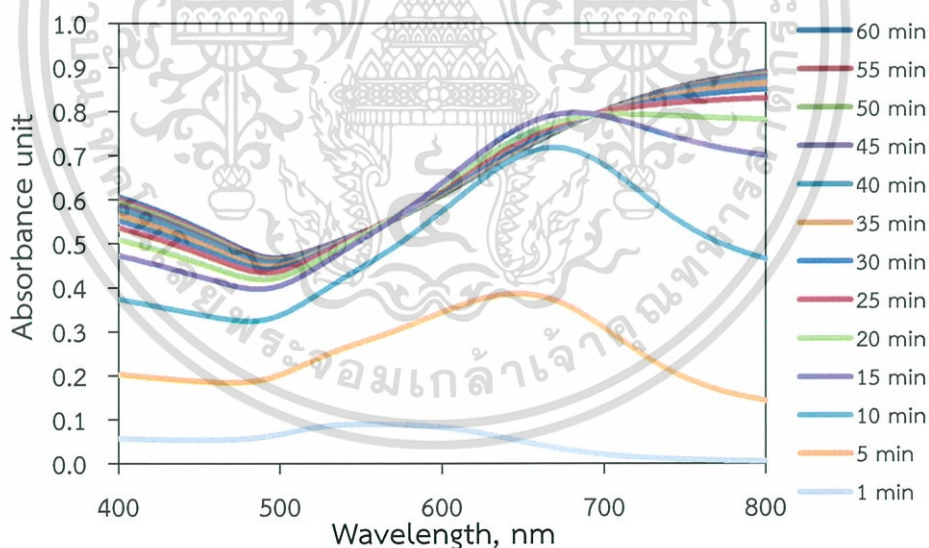
รูปที่ 4.18 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–COPSS ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.18 อธิบายได้ว่าความเข้มข้นของ COPSS ที่น้อยกว่า 0.01 มิลลิโมลาร์ เมื่อนำมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–COPSS จะได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำ เนื่องจากสารละลาย COPSS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

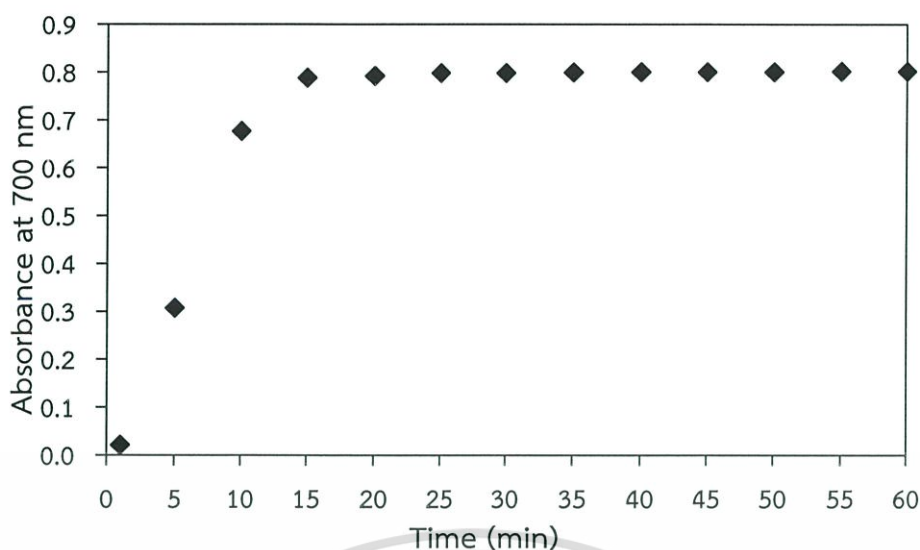
มีความเข้มข้นที่น้อยเกินไป ไม่สามารถทำการกระจาย MWCNTs ได้หมด ทำให้ MWCNTs ไปเกาะติดบนแผ่นกระจก (Primer) ได้น้อย ส่วนความเข้มข้นของ COPSS ที่มากกว่า 0.01 มิลลิโมลาร์ เมื่อนำมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–COPSS จะได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำเช่นกัน เนื่องจากสารละลาย COPSS มีความเข้มข้นที่มากเกินไป เมื่อนำไปสร้างแผ่นฟิล์มบาง สารละลาย COPSS จะไปเกาะติดบนแผ่นกระจกแทนที่ MWCNTs–COPSS จึงทำให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำนั่นเอง ส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย COPSS ในการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน MWCNTs–COPSS คือ 0.01 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากมีความเหมาะสมในการกระจาย MWCNTs เมื่อนำมาสร้างแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs–COPSS ทำให้ MWCNTs–COPSS เกาะติดบนแผ่นฟิล์มบางได้เยอะ และได้ค่าการดูดกลืนแสงที่สูงที่สุด

4.3.4 ผลจากการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มบางนาโนในการจุ่มสารละลายอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs)

ในการทดลองนี้ วิเคราะห์ที่ได้โดยการนำกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว (Primer) จุ่มลงในสารละลายอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) โดยปรับเปลี่ยนเวลาในการจุ่มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนี้ 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, และ 60 นาที แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงสลับกับการจุ่มไปเรื่อยๆ ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง AuNPs โดยการจุ่มในเวลาที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.20 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง AuNPs โดยการจุ่มในเวลาที่แตกต่างกัน

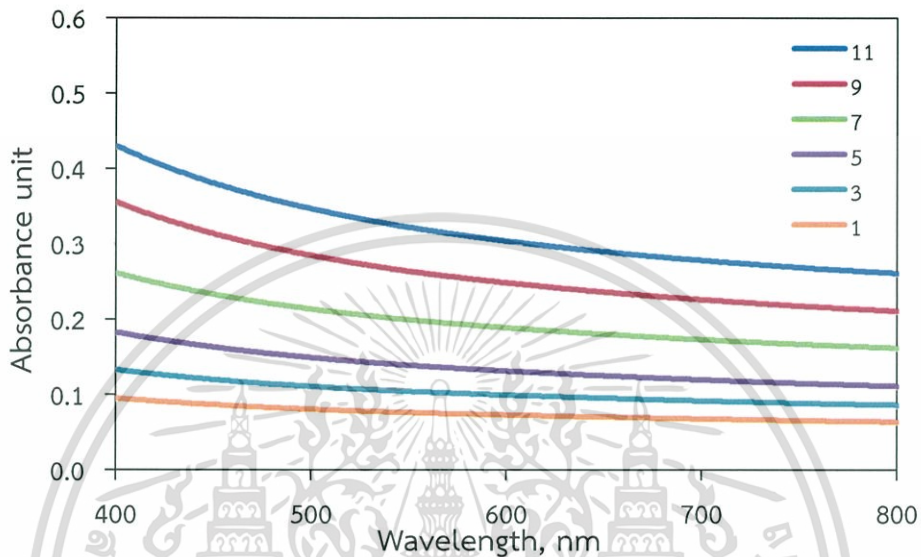
จากรูปที่ 4.20 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบางอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ระยะเวลาในการจุ่มแผ่นฟิล์มบางแตกต่างกัน พบว่าระยะเวลาในช่วง 15 นาทีแรกของการจุ่ม แผ่นฟิล์มบางที่ได้จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อจุ่มแผ่นฟิล์มบางโดยใช้ระยะเวลาเกินไปจาก 15 นาที แผ่นฟิล์มบางจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่เริ่มคงที่ ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมกับการเคลือบแผ่นฟิล์มบางด้วยสารละลายอนุภาคทองนาโนที่สังเคราะห์ได้ คือ 15 นาที

4.4 การศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer)

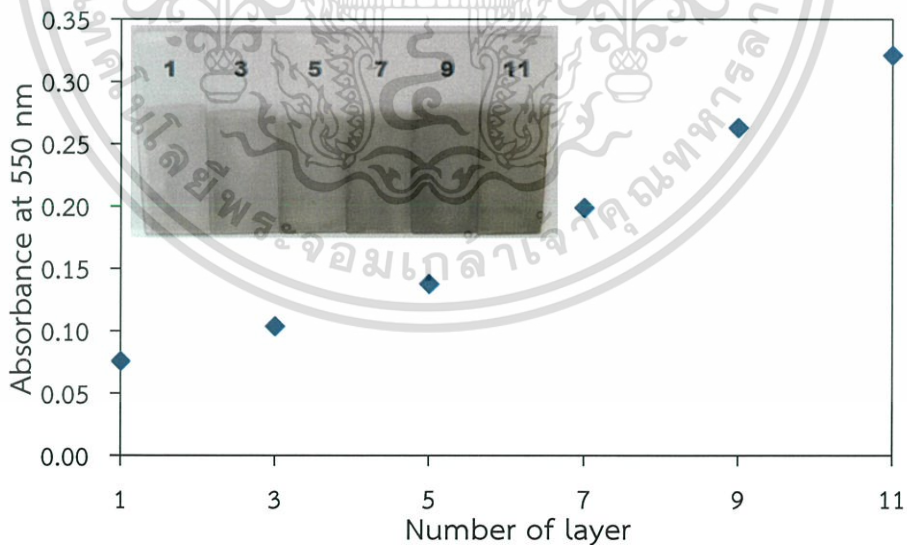
เป็นการศึกษาความแตกต่างของจำนวนชั้นที่มีผลต่อการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิต โดยทำการวิเคราะห์ผลด้วย UV-vis spectrophotometer ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วนย่อยๆ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่งเป็นผลจากการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย PSS ส่วนที่สอง คือ ผลของการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับสารละลาย PDADMAC ส่วนที่สาม คือ ผลจากการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS และส่วนสุดท้ายเป็นผลการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs)

4.4.1 ผลการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย PSS

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว มาจุ่มสลับระหว่างสารละลาย MWCNTs-PDADMAC กับสารละลาย PSS ให้ได้จำนวนชั้นที่ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 แล้วนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.21 และ 4.22



รูปที่ 4.21 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย PSS



รูปที่ 4.22 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย PSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

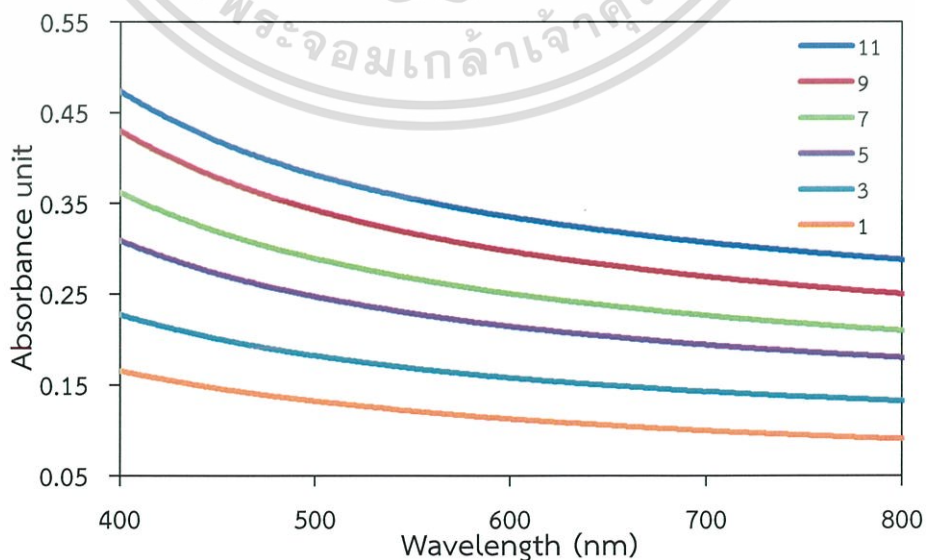
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ที่จำนวนชั้นต่างๆ

จำนวนชั้น	ค่าความต้านทานไฟฟ้า, $k\Omega$ ($n = 4$)
1	-
3	3.08 ± 0.21
5	2.46 ± 0.25
7	1.47 ± 0.28
9	0.90 ± 0.07
11	0.24 ± 0.06

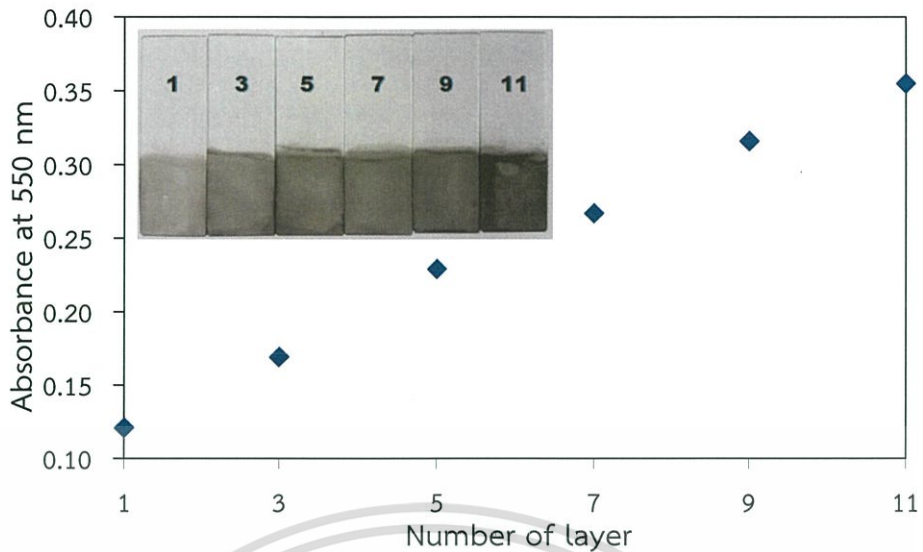
จากรูปที่ 4.22 วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทำให้ทราบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์ม ค่าการดูดกลืนแสงก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางลดลง ดังตารางที่ 4.1 นั้นหมายความว่าค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนชั้นของการสร้างฟิล์มบางเพิ่มขึ้น

4.4.2 ผลของการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว มาจุ่มสลับระหว่างสารละลาย MWCNTs-COPSS กับสารละลาย PDADMAC ให้ได้จำนวนชั้นที่ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 แล้วนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.23 และ 4.24



รูปที่ 4.23 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับสารละลาย PDADMAC



รูปที่ 4.24 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ร่วมกับสารละลาย PDADMAC

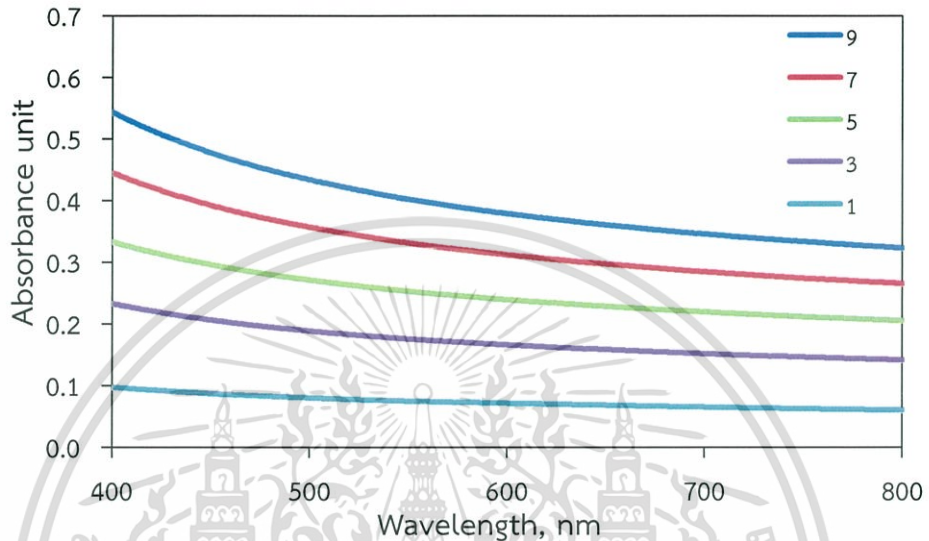
ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ที่จำนวนชั้นต่างๆ

จำนวนชั้น	ค่าความต้านทานไฟฟ้า, k Ω (n = 4)
1	277.75 \pm 29.47
3	170.25 \pm 17.02
5	105.75 \pm 3.77
7	89.25 \pm 7.22
9	70.50 \pm 2.06
11	48.50 \pm 7.09

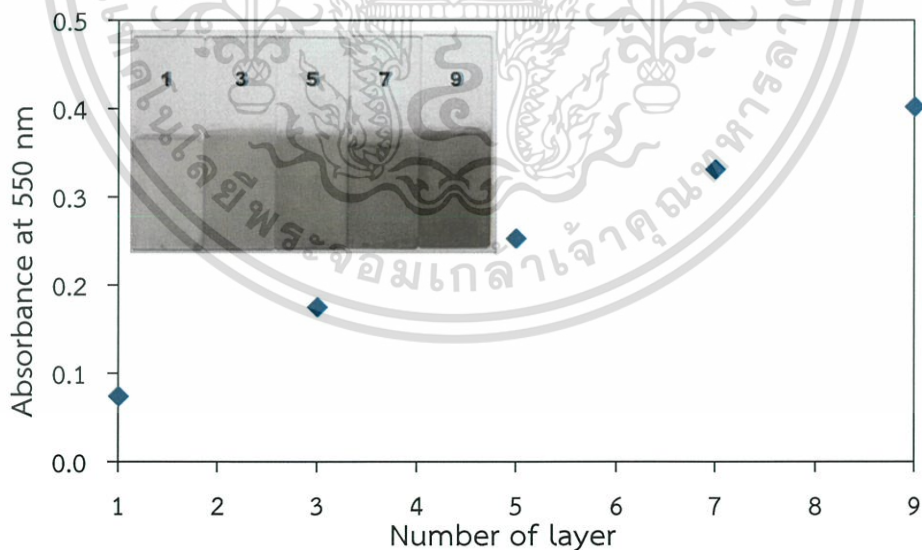
จากรูปที่ 4.24 วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1, 3, 5, 7, 9 และ 11 ชั้น ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ต่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทำให้ทราบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์ม ค่าการดูดกลืนแสงก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางลดลง ดังตารางที่ 4.2 นั้นหมายความว่าค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนชั้นของการสร้างฟิล์มบางเพิ่มขึ้น

4.4.3 ผลของการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นกระจกที่รับสภาพผิวแล้ว มาจุ่มสลับระหว่างสารละลาย MWCNTs-PDADMAC กับสารละลาย MWCNTs-COPSS ให้ได้จำนวนชั้นที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 แล้วนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.25 และ 4.26



รูปที่ 4.25 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย MWCNTs-COPSS



รูปที่ 4.26 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย MWCNTs-COPSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

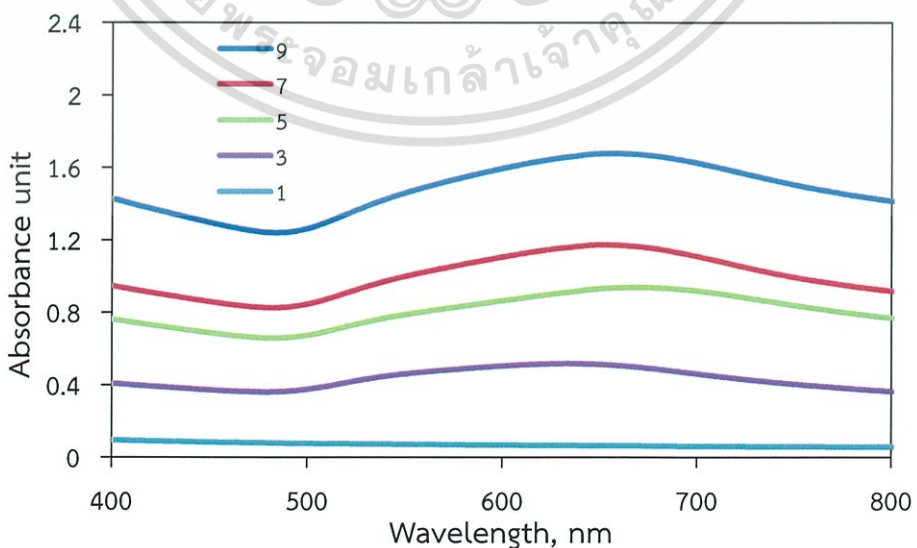
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS ที่จำนวนชั้นต่างๆ

จำนวนชั้น	ค่าความต้านทานไฟฟ้า, $k\Omega$ ($n = 4$)
1	-
3	312.75 ± 5.54
5	99.75 ± 8.17
7	54.50 ± 2.96
9	31.75 ± 2.05

จากรูปที่ 4.26 วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1, 3, 5, 7 และ 9 ชั้น ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทำให้ทราบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์ม ค่าการดูดกลืนแสงก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางลดลง ดังตารางที่ 4.3 นั้นหมายความว่าค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนชั้นของการสร้างฟิล์มบางเพิ่มขึ้น

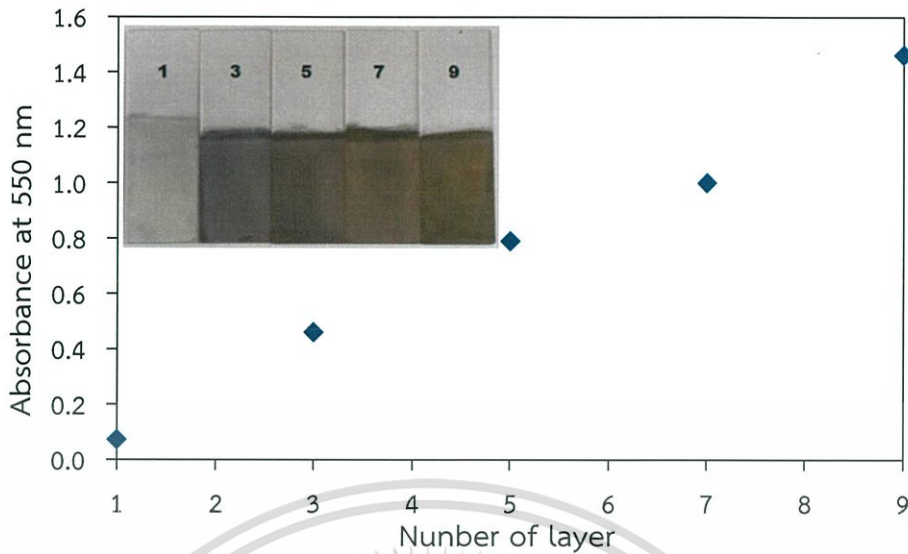
4.4.4 ผลของการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลายอนุภาคทองคำ (AuNPs)

วิเคราะห์โดยการนำแผ่นกระจกที่ปรับสภาพผิวแล้ว มาจุ่มสลับระหว่างสารละลาย MWCNTs-PDADMAC กับสารละลายอนุภาคทองคำในระดับนาโน (AuNPs) ให้ได้จำนวนชั้นที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 แล้วนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.27 และ 4.28



รูปที่ 4.27 ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย AuNPs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับสารละลาย AuNPs

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ สารละลาย AuNPs ที่จำนวนชั้นต่างๆ

จำนวนชั้น	ค่าความต้านทานไฟฟ้า, $k\Omega$ ($n = 4$)
1	-
3	1.365 ± 0.100
5	0.035 ± 0.002
7	0.023 ± 0.002
9	0.013 ± 0.002

จากรูปที่ 4.28 วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ สารละลาย AuNPs ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 1, 3, 5, 7 และ 9 ชั้น ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทำให้ทราบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของฟิล์ม ค่าการดูดกลืนแสงก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางลดลง ดังตารางที่ 4.4 นั้นหมายความว่าค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนชั้นของการสร้างฟิล์มบางเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาลักษณะเฉพาะของจำนวนชั้นแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆ ที่สร้างโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer)

ผลจากการศึกษาลักษณะเฉพาะของแผ่นฟิล์มบางแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยๆ ดังนี้ ส่วนแรกเป็นผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆด้วยเครื่อง AFM ส่วนที่สองเป็นผลการศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆด้วยเครื่อง XRD และส่วนที่สามเป็นผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆด้วยเครื่อง FE-SEM

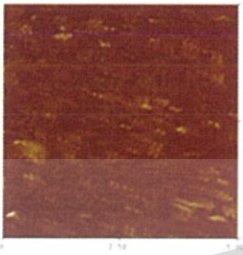
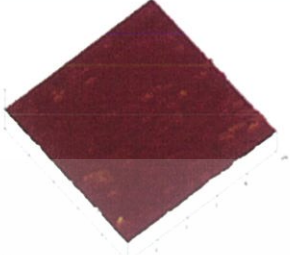




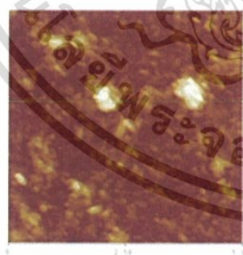
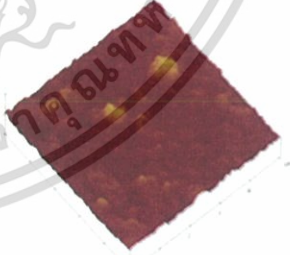
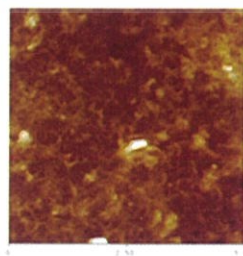
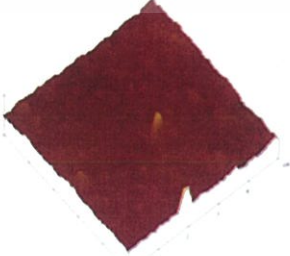
4.5.1 ผลของการศึกษาลักษณะของพื้นผิวและความหนาของแผ่นฟิล์มบางด้วยกล้อง

จุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM)

การศึกษาผลความแตกต่างของจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางต่างๆด้วยการตรวจวัดลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่อง AFM นั้น สามารถตรวจวัดสภาพความขรุขระของพื้นผิวได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไป และสามารถทราบความแตกต่างของจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางต่างๆได้

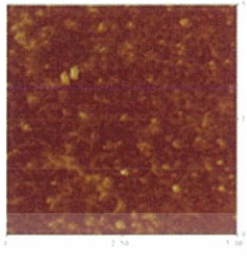
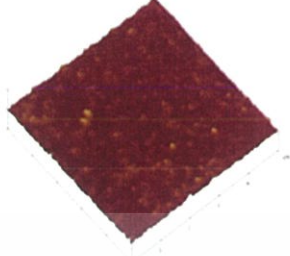
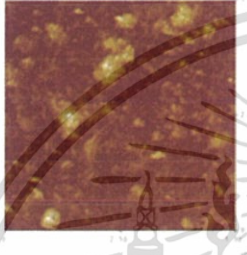
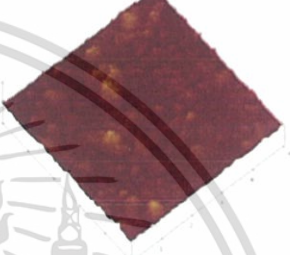


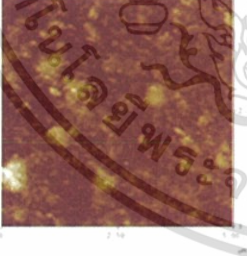
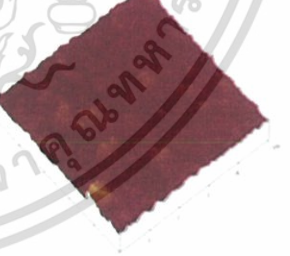
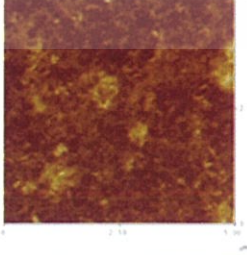
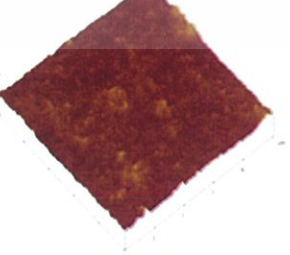
การวิเคราะห์ทำได้โดยนำสารละลายชนิดต่างๆ มาทำการเคลือบเป็นฟิล์มลงบนแผ่นกระจกให้มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน แล้วนำแผ่นฟิล์มบางที่ได้ไปส่องด้วยเครื่อง AFM เพื่อศึกษาค่าความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวและความหนา ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.5 ภาพ AFM และ ค่าความหนาของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ที่จำนวนชั้น
ต่างๆ

Number of layer	Morphological Evolution		Thickness , nm
	Two - dimensional (scanned at 5 μm)	Tree - dimensional (scanned at 5 μm)	
3			17.10
5			25.00
7			33.82
9			55.05
11			77.89

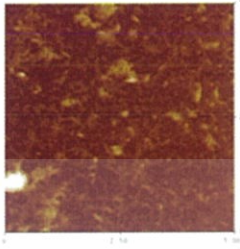
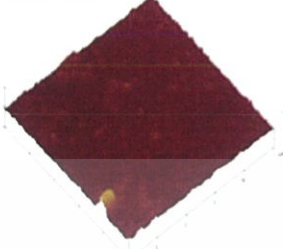
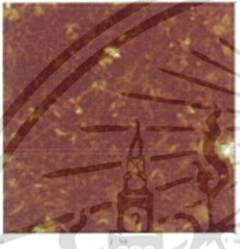



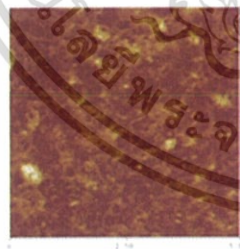

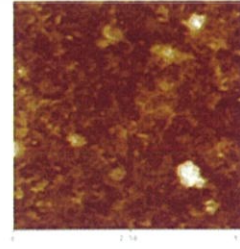
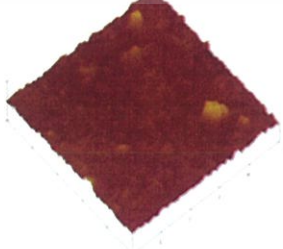
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ภาพ AFM และ ค่าความหนาของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-COPSS ที่จำนวนชั้นต่างๆ

Number of layer	Morphological Evolution		Thickness , nm
	Two - dimensional (scanned at 5 μm)	Tree - dimensional (scanned at 5 μm)	
3			19.84
5			29.24
7			44.16
9			90.47
11			96.05

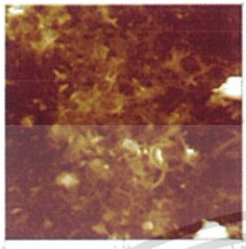
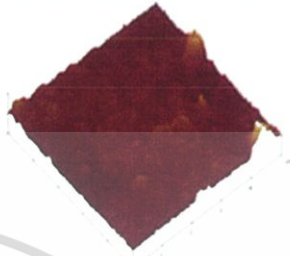
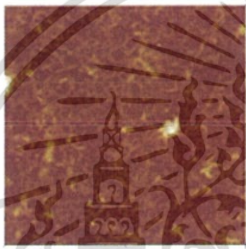



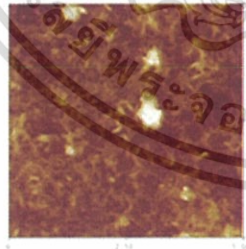
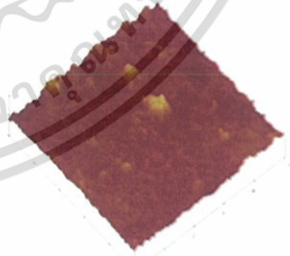
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ภาพ AFM และ ค่าความหนาของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ MWCNTs-COPSS ที่จำนวนชั้นต่างๆ

Number of layer	Morphological Evolution		Thickness , nm
	Two - dimensional (scanned at 5 μm)	Tree - dimensional (scanned at 5 μm)	
3			16.12
5			29.20
7			34.91
9			42.90
10			50.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

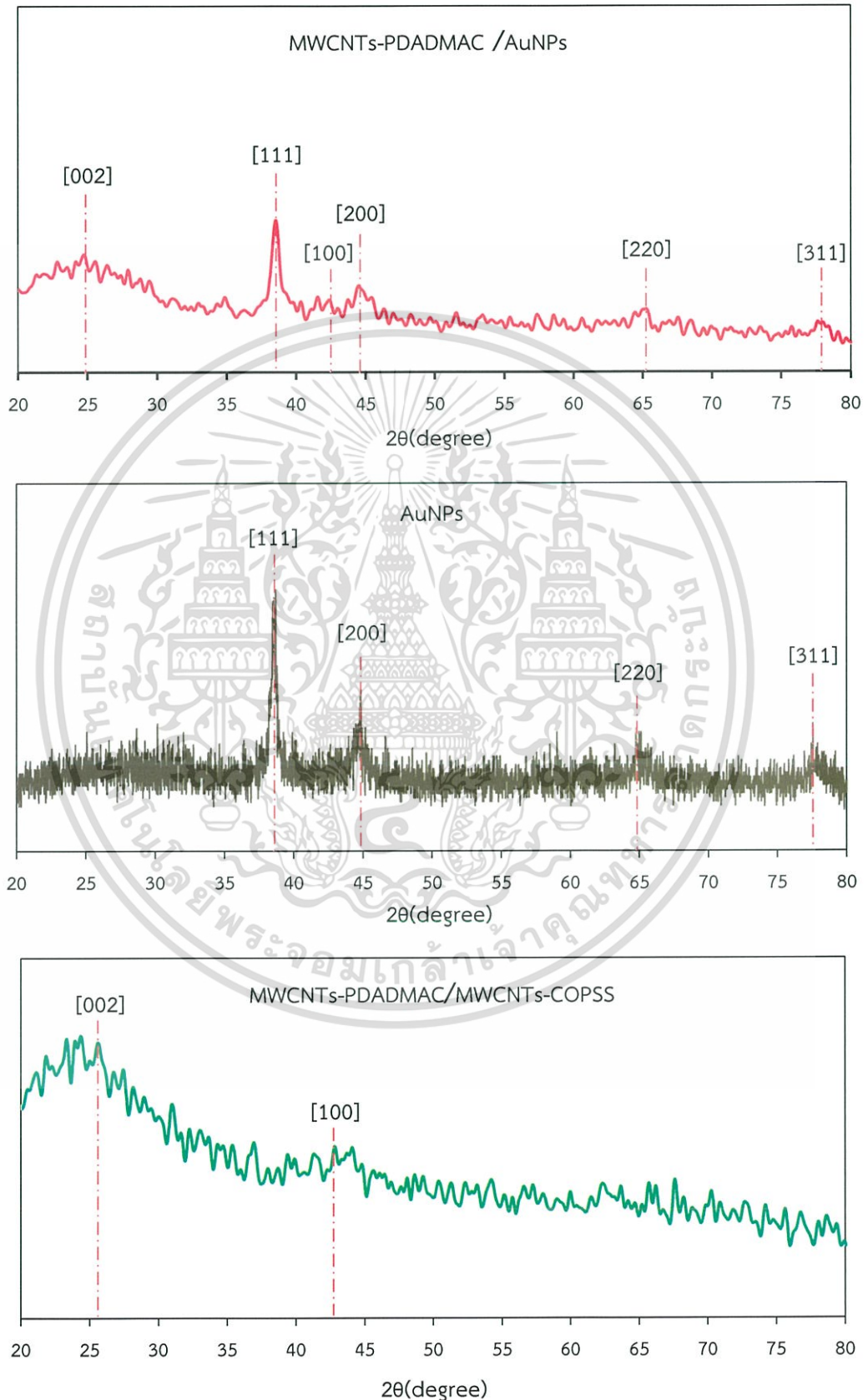
ตารางที่ 4.8 ภาพ AFM และ ค่าความหนาของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ สารละลายอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) ที่จำนวนชั้นต่างๆ

Number of layer	Morphological Evolution		Thickness , nm
	Two - dimensional (scanned at 5 μ m)	Tree - dimensional (scanned at 5 μ m)	
3			47.33
5			52.62
7			152.36
9			268.40

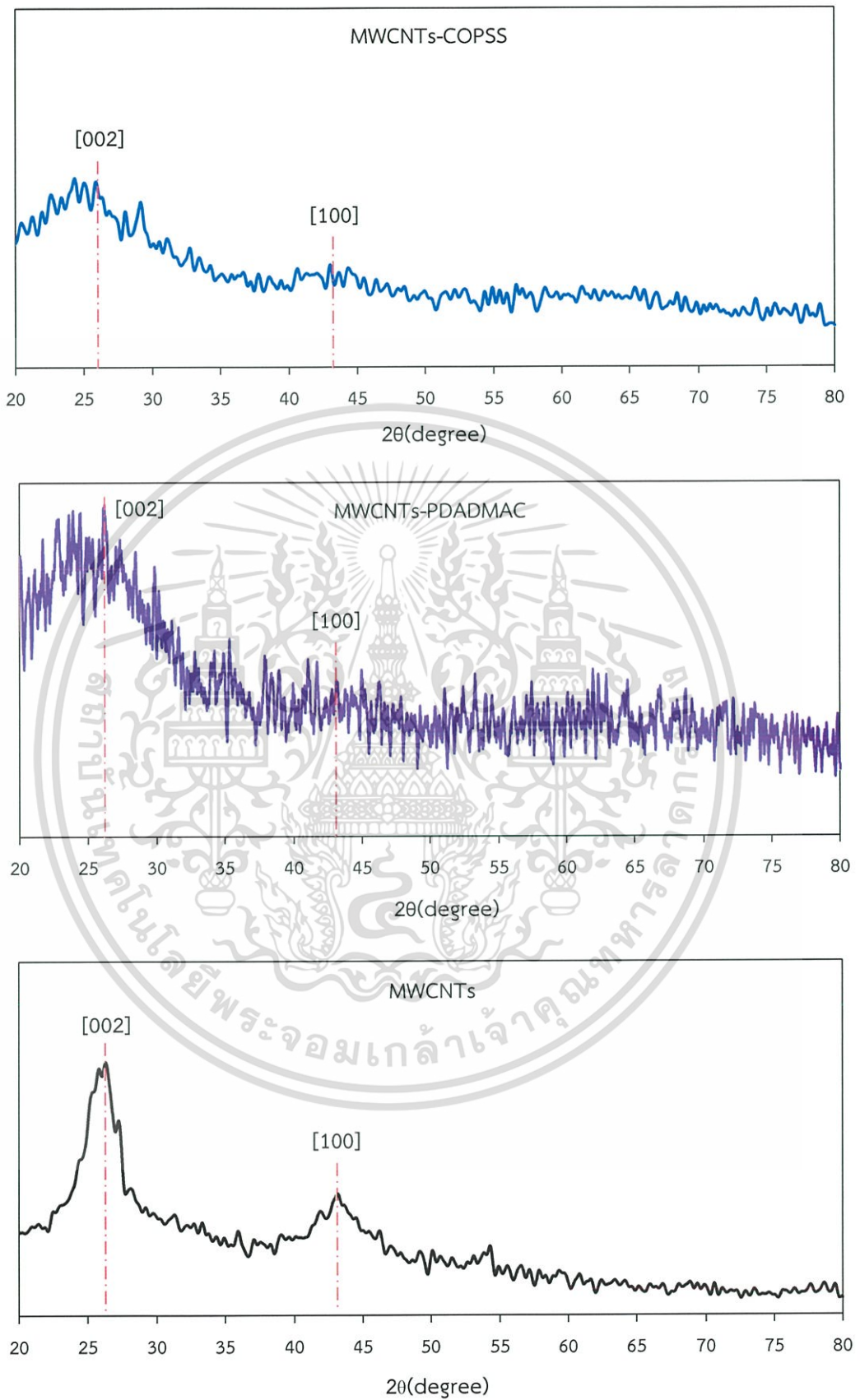
จากตารางที่ 4.5–4.8 จะเห็นว่ารูปร่างของอนุภาคบนแผ่นฟิล์มบางนาโนชนิดต่างๆที่เคลือบให้มีจำนวนชั้นที่แตกต่างกัน จะปรากฏรูปร่างเป็นท่อทรงกระบอกของ MWCNTs ขดไปมา และเมื่อจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางเพิ่มขึ้น ค่าความหนาจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สังเกตได้จากภาพ AFM ที่มีจำนวนท่อของ MWCNTs ปรากฏมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลของการศึกษาการจัดเรียงตัวของผลึกบนแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆด้วยเครื่อง XRD
เป็นการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึกต่างๆบนแผ่นฟิล์มบาง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



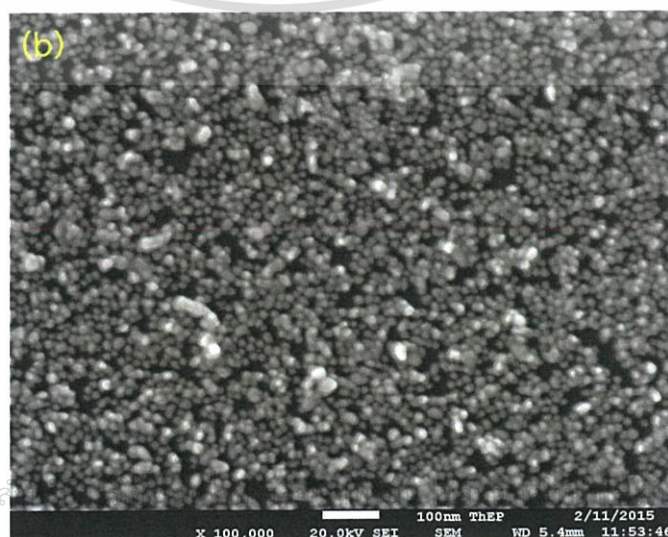
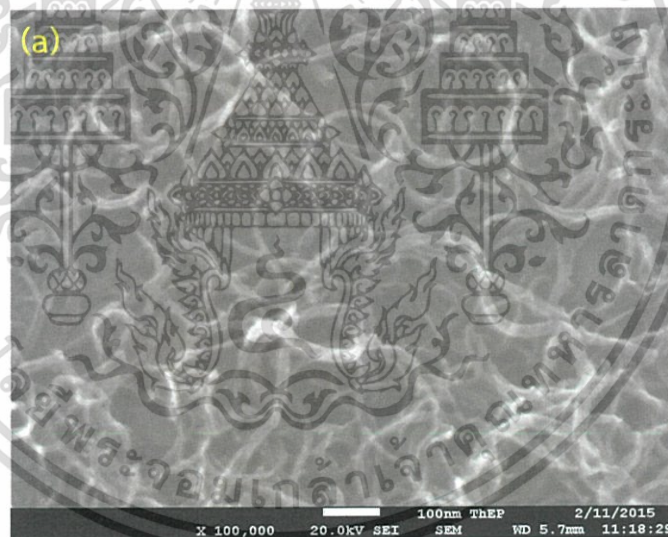
รูปที่ 4.29 ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.29 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD จะเห็นว่าแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC, MWCNTs-COPSS, และ MWCNTs-PDADMAC/MWCNTs-COPSS แสดงสเปกตรัมมีค่า 2θ ประมาณ 25.9° และ 42.7° ซึ่งแสดงการหักเหแสงของโครงสร้างผลึกของ MWCNTs ที่ [002] และ [100] ตามลำดับ ส่วนแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC/MWCNTs-COPSS/AuNPs จะแสดงสเปกตรัมมีค่า 2θ ประมาณ 25.9° และ 42.7° ซึ่งแสดงการหักเหแสงของโครงสร้างผลึกของ MWCNTs ที่ [002] และ [100] และค่า 2θ ที่ 38.35° , 44.36° , 64.73° และ 77.63° ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การหักเหแสงของโครงสร้างผลึกของอนุภาคทองในระดับนาโนที่ [111], [200], [220] และ [311] ตามลำดับ ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าฟิล์มที่เคลือบบนกระจกนั้นเป็นโครงสร้างของ MWCNTs และอนุภาคทองในระดับนาโนจริง ซึ่งยืนยันได้จากการเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน

4.5.3 ผลของการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆด้วยเครื่อง FESEM

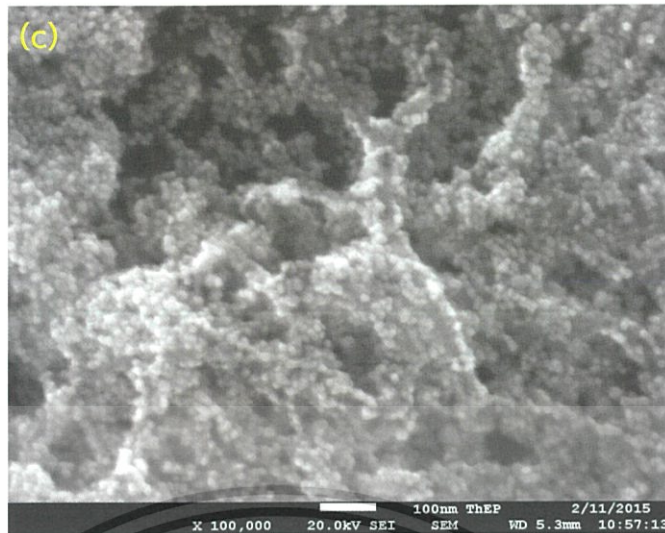
เนื่องจากเครื่อง FESEM เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มบาง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำแผ่นฟิล์มบางของ MWCNTs-PDADMAC, AuNPs และ MWCNTs-PDADMAC/AuNPs มาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ส

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบสงวนสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และโยชน์ด้านการค้า



รูปที่ 4.30 ภาพ FE-SEM (a) MWCNTs-PDADMAC (b) AuNPs (c) MWCNTs-PDADMAC/AuNPs

จากรูปที่ 4.30a แสดงภาพแผ่นฟิล์มบางของ MWCNTs-PDADMAC จากภาพจะสังเกตเห็นลักษณะการกระจายตัวของท่อทรงกระบอกของ MWCNTs เป็นจำนวนมาก ส่วนรูปที่ 4.30b แสดงภาพแผ่นฟิล์มบางของ AuNPs จากภาพจะสังเกตเห็นลักษณะทรงกลมของอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) เป็นจำนวนมาก และรูปที่ 4.30c แสดงภาพแผ่นฟิล์มบางของ MWCNTs-PDADMAC/AuNPs จากภาพจะสังเกตเห็นลักษณะทรงกลมของอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) จำนวนมากที่เกาะติดอยู่บนท่อทรงกระบอกของ MWCNTs แสดงให้เห็นว่าการสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโนของ MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับ AuNPs ประสบผลสำเร็จ

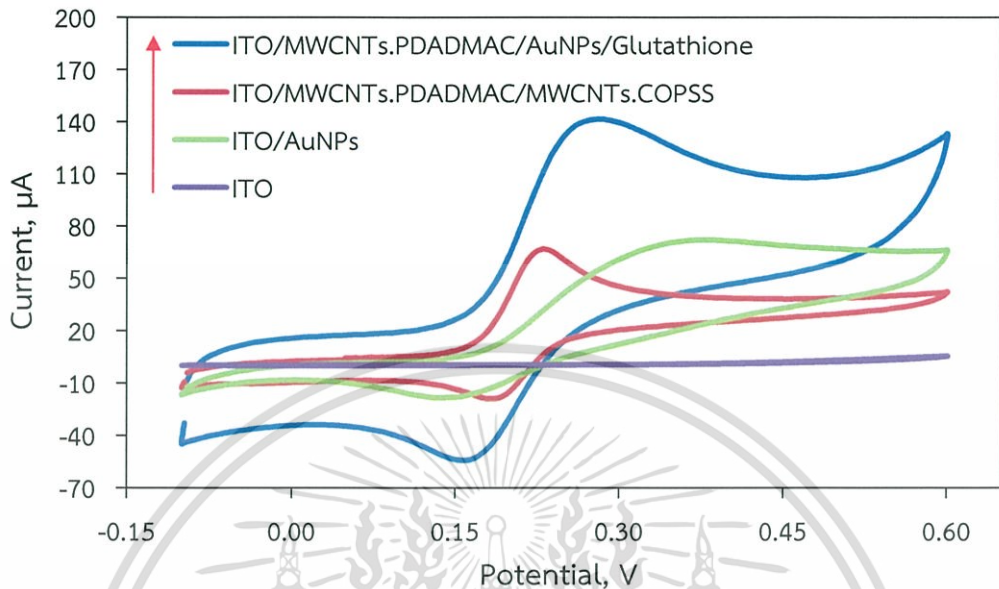
4.6 การศึกษาการวิเคราะห์หาโดพามีน (Dopamine) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

4.6.1 ผลของการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์โดพามีน (Dopamine) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

4.6.1.1 ผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์โดพามีน (Dopamine)

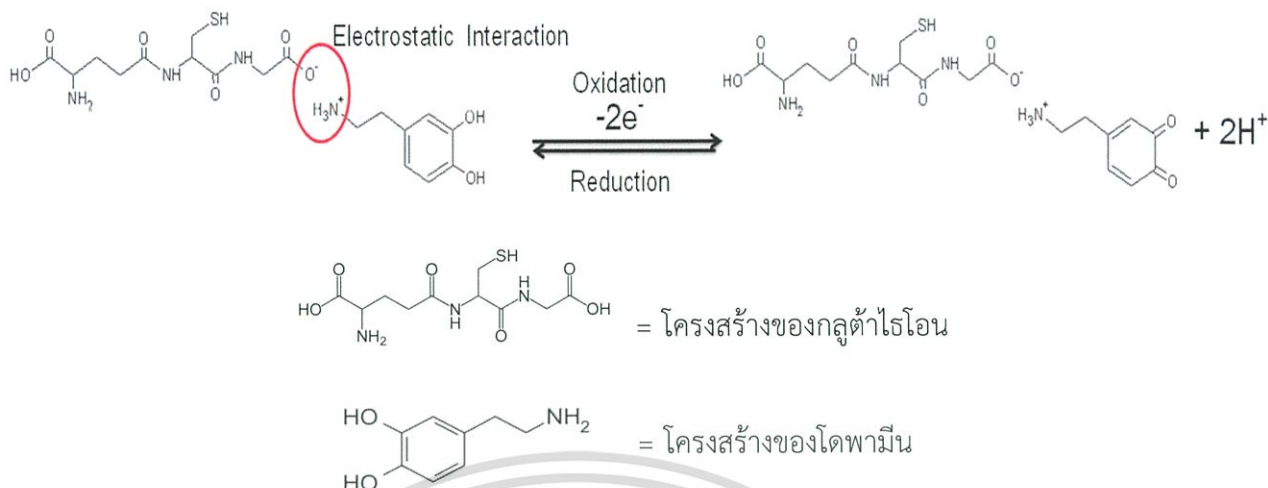
จากผลการศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าสำหรับการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่มีความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ITO, ITO/AuNPs, ITO/MWCNTs, PDADMAC/MWCNTs, COPSS และ ITO/MWCNTs, PDADMAC/AuNPs/Glutathione เป็นขั้วใช้งาน (Working electrode) ขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วแพลตินัมเป็นขั้วช่วย (Counter electrode) โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.1 ถึง 0.6 โวลต์ ด้วยอัตราสแกน (Scan rate) 20 มิลลิโวลต์ ต่อวินาที ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ไซคลิกโวลแทมเมทรีโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione, ITO/MWCNTs.PDADMAC/MWCNTs.COPSS, ITO/AuNPs และ ITO

จากรูปที่ 4.31 แสดงการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ด้วยขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ได้อย่างสมบูรณ์และให้ค่ากระแสที่สูงกว่าขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/MWCNTs.COPSS, ITO/AuNPs และ ITO โดยพบว่าอนุภาคทองคำนาโน (AuNPs) มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง และท่อนาโนคาร์บอนมีพื้นที่ผิวที่มากทำให้ได้ค่ากระแสที่สูง จึงมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดที่ดี และการใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีนั้นเพราะ กลูต้าไธโอนมีความจำเพาะเจาะจงกับโดพามีนสูง โดยกลูต้าไธโอนจะเกิดแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic Interaction) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของกลูต้าไธโอนกับหมู่อะมิโนของโดพามีนก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (Reduction) ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.32

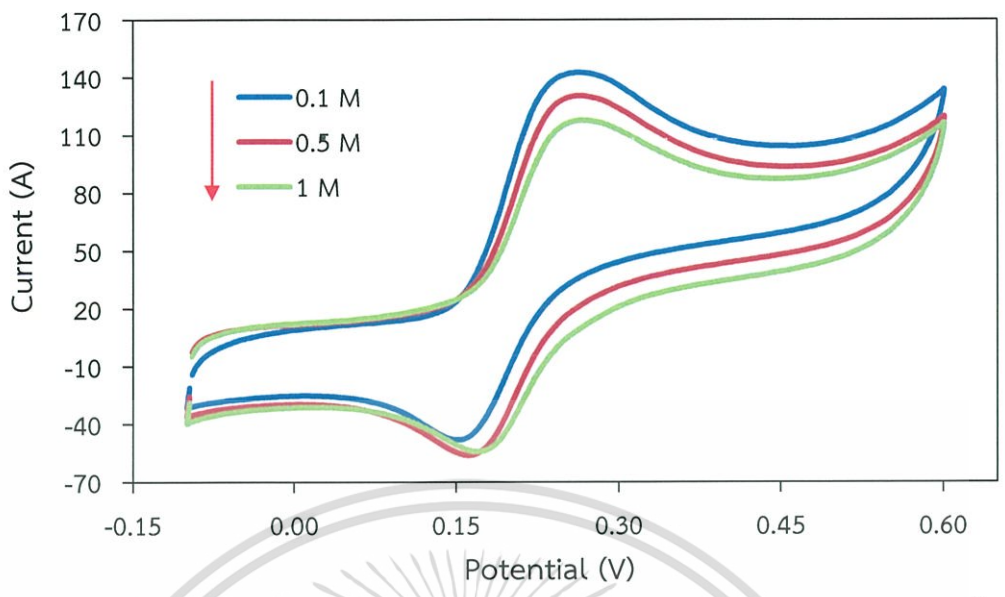


รูปที่ 4.32 แสดงการเกิดปฏิกิริยาที่หน้าขั้วไฟฟ้า

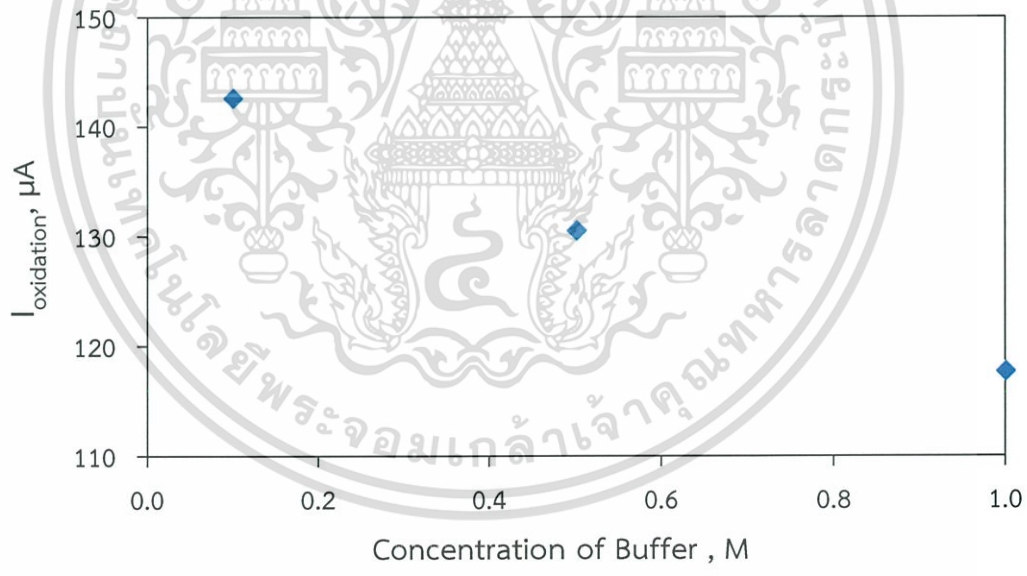
4.6.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

จากผลการศึกษาโดยการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 โมลาร์ ตามลำดับ โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione เป็นขั้วใช้งาน (Working electrode) ขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วแพลตินัมเป็นขั้วช่วย (Counter electrode) โดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.1 ถึง 0.6 โวลต์ ด้วยอัตราสแกน (Scan rate) 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.33 และ 4.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนพอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนพอสเฟต (Na_2HPO_4) ความเข้มข้นต่างๆ



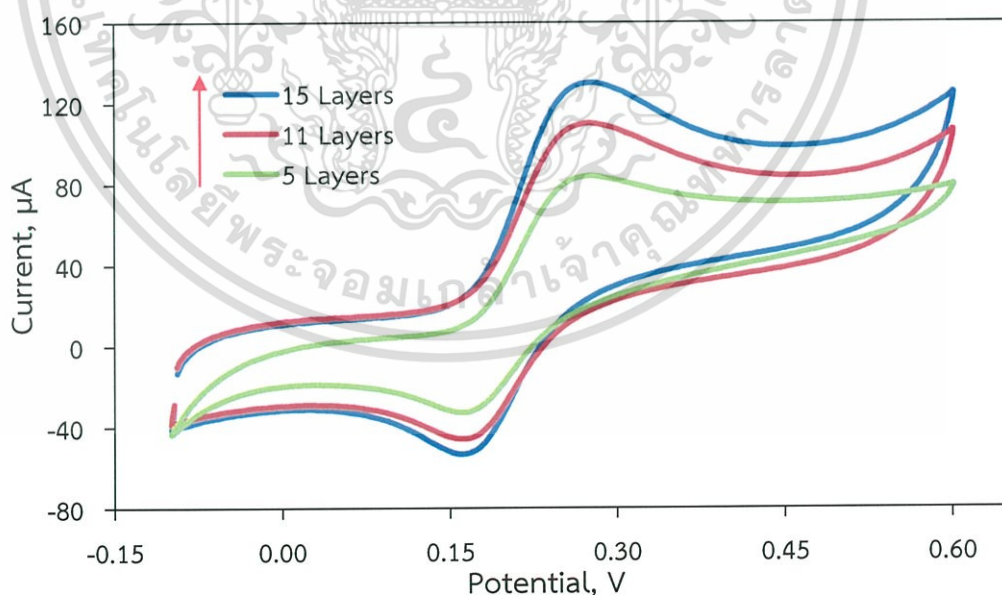
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกซิเดชัน (Oxidation) กับความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนพอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนพอสเฟต (Na_2HPO_4) ของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์

จากรูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นว่าสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนพอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนพอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้ตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine), เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเกิดฟิสิกออกซิเดชัน (Oxidation) ได้ชัดเจนที่สุด จึงให้ค่ากระแสที่สูงที่สุดดังรูปที่ 4.34 ดังนั้นในการตรวจวัดสารละลายโดพามีนโดยใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione จะใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้นสูงๆ จะเกิดไฮโดรเจนไอออนมาก ซึ่งมากเกินไปสำหรับการเกิด protonation ของหมู่อะมิโนของโดพามีน ทำให้ไฮโดรเจนไอออนในส่วนที่มากเกินไปเกิดแรงทางไฟฟ้ากับหมู่คาร์บอกซิลของกลูต้าไรโอนแทนที่หมู่แอมโมเนียไอออนของโดพามีน ทำให้การตรวจวัดที่ได้มีค่ากระแสต่ำกว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้นต่ำๆ

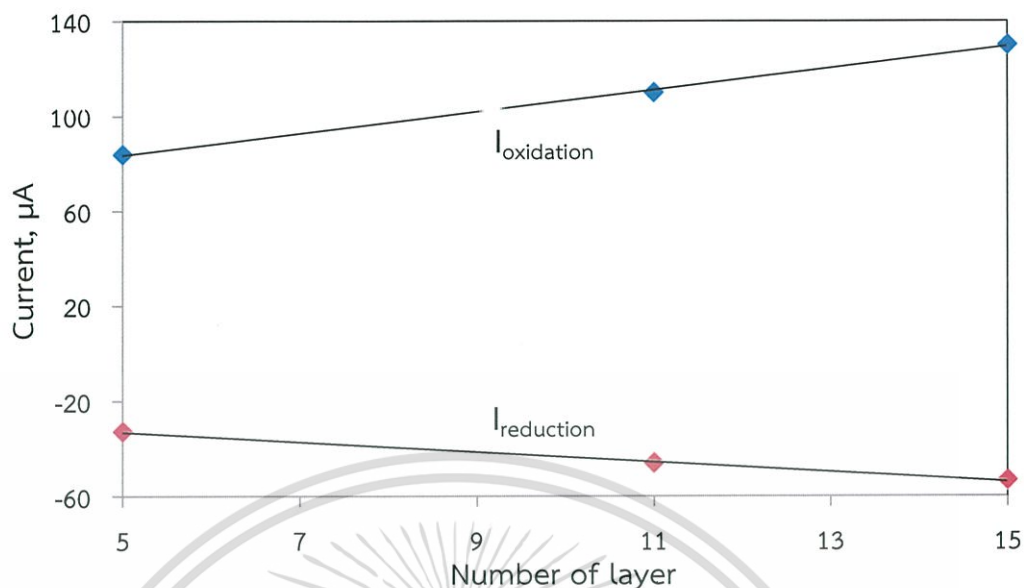
4.6.1.3 ผลการศึกษาจำนวนชั้นของขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดพามีน (Dopamine)

จากผลการศึกษาจำนวนชั้นของขั้วไฟฟ้าที่ 5, 11 และ 15 ชั้น สำหรับการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione เป็นขั้วใช้งาน (Working electrode) ขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วแพลตินัมเป็นขั้วช่วย (Counter electrode) โดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.1 ถึง 0.6 โวลต์ ด้วยอัตราสแกน (Scan rate) 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.35 และ 4.36



รูปที่ 4.35 แสดงไซคลิกโวลแทมเมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ที่จำนวนชั้นของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



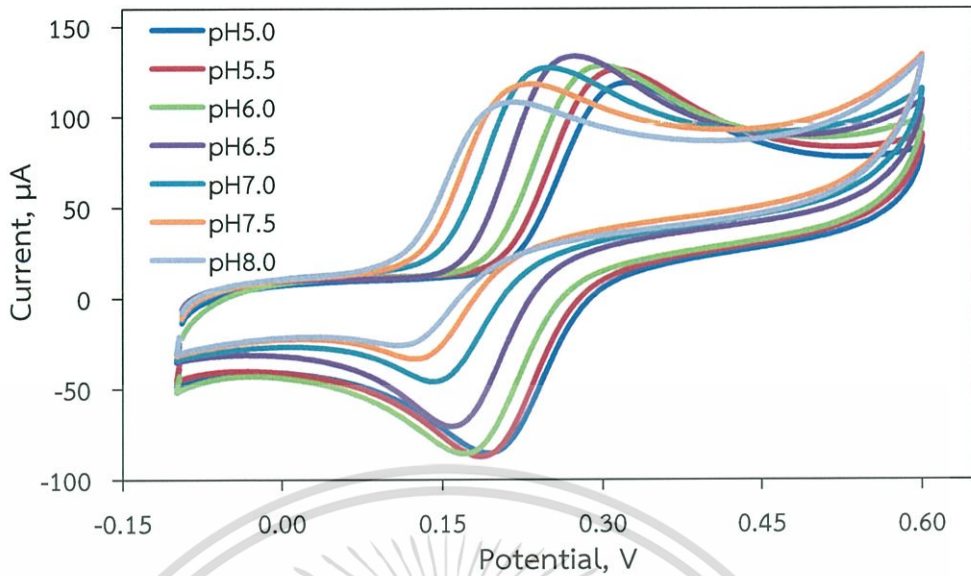
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับจำนวนชั้นขั้วไฟฟ้าของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์

จากรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione 15 ชั้น เหมาะสมในการนำไปใช้ตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) เนื่องจากให้ค่ากระแสที่สูงเป็นเพราะขั้วไฟฟ้ามีปริมาณอนุภาคทองนาโน และท่อนาโนคาร์บอนมากกว่าชั้นที่ 5 และ 11 จึงทำให้ได้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดี เมื่อนำไปตรวจวัดโดพามีนจึงได้ค่ากระแสที่สูงดังรูปที่ 4.36 ดังนั้นในการตรวจวัดสารละลายโดพามีนโดยใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione จะใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione ที่ชั้น 15 ในการตรวจวัด

4.6.1.4 ผลการศึกษาค่าพีเอช (pH) ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

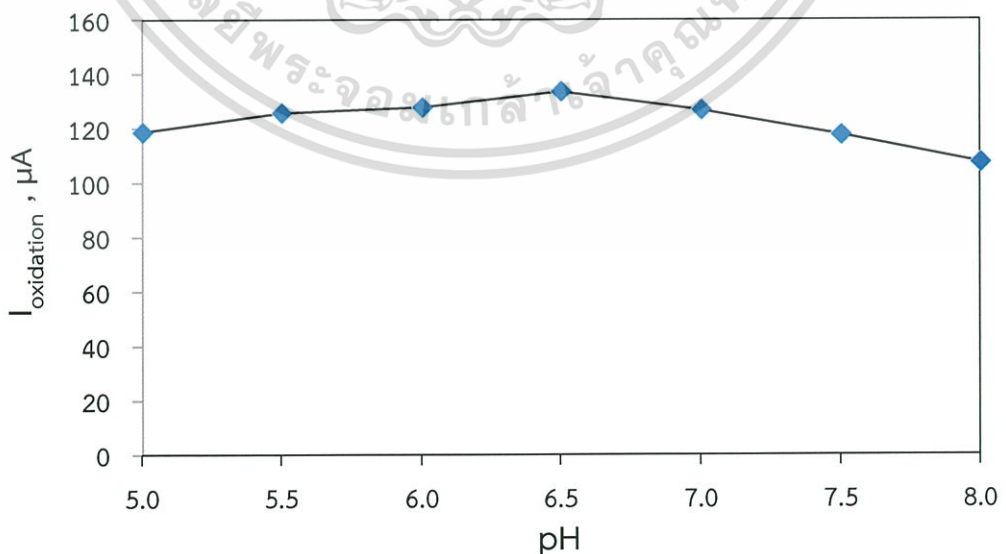
จากผลการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยการปรับค่าพีเอช ดังนี้ 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 และ 8.0 ตามลำดับ ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs.PDADMAC/AuNPs/Glutathione เป็นขั้วใช้งาน (Working electrode) ขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วแพลตินัมเป็นขั้วช่วย (Counter electrode) โดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.1 ถึง 0.6 โวลต์ ด้วยอัตราสแกน (Scan rate) 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.37 และ 4.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่พีเอชต่างๆ

จากรูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นว่าสารละลายโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6.5 ที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ พบว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ได้ดี ดังนั้นสำหรับการตรวจวัดสารละลายโดพามีนโดยใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs/PDADMAC/AuNPs/Glutathione จะใช้สารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6.5

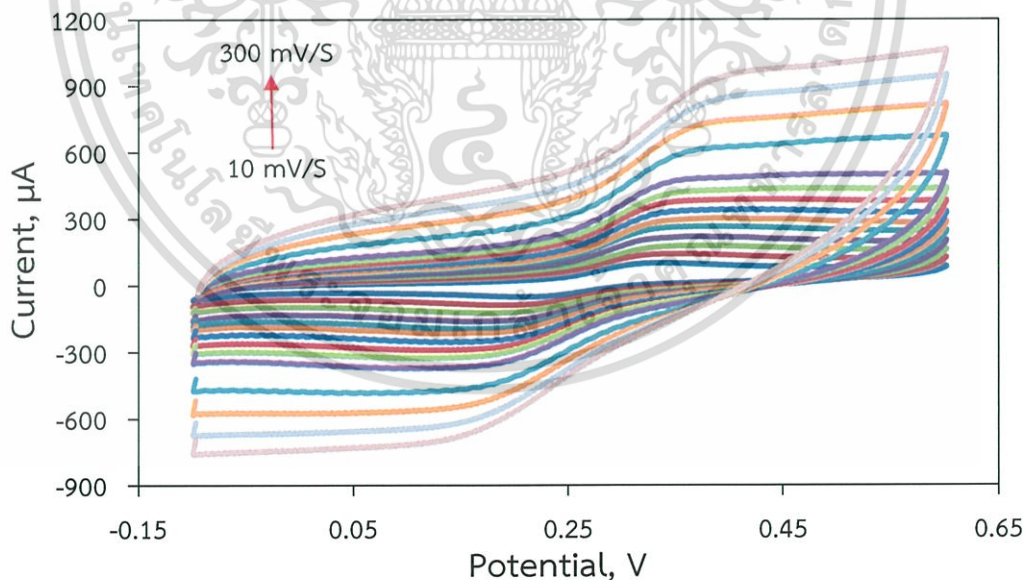


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกซิเดชัน (Oxidation) กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่พีเอชต่างๆ ของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

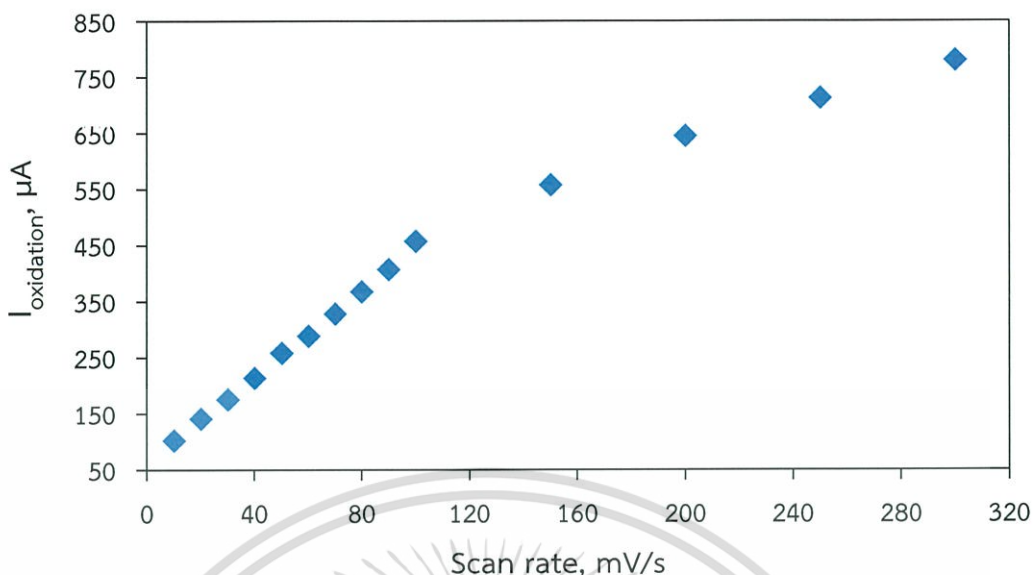
จากการศึกษาค่าพีเอชของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะเห็นว่าช่วงพีเอชที่ใช้อยู่ในช่วง 5.0–8.0 จะทำให้หมู่เอมีโน ($-NH_2$) ของสารละลาย dopamine ที่มีค่า pKa เท่ากับ 8.7 เกิดการรับไฮโดรเจนอะตอมเข้ามา (Protonation) อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) และหมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) ของกลูตาไรโอนที่มีค่า pKa เท่ากับ 3.6 เกิดการแตกตัวเป็นหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) และเกิดการดึงดูดกันด้วยแรงทางไฟฟ้า (Electrostatic force) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) ของกลูตาไรโอน กับแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ของโดพามีน ทำให้การตรวจวัดได้ค่ากระแสที่สูง ซึ่งที่พีเอช 6.5 ให้ค่ากระแสที่สูงสุด จึงเลือกค่าพีเอชที่จุดนี้

4.6.1.5 ผลการศึกษาอัตราการสแกน (Scan rate) ที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาอัตราการสแกน (Scan rate) ที่เหมาะสม สำหรับการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6.5 ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs/PDADMAC/AuNPs/Glutathione เป็นขั้วใช้งาน (Working electrode) ขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วแพลตินัมเป็นขั้วช่วย (Counter electrode) โดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.1 ถึง 0.6 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน (Scan rate) 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.39 และ 4.40



รูปที่ 4.39 แสดงไซคลิกโวลแทมโแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ ที่อัตราการสแกน (Scan rate) ต่างๆ



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออกซิเดชัน (Oxidation) กับอัตราการสแกน (Scan rate) ต่างๆ ของการตรวจวัดสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์

จากรูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการสแกน (Scan rate) การขนส่งมวลไปยังหน้าขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) จะมากขึ้น ทำให้กระแสเนื่องจากการแพร่ (Diffusion current) ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย จนถึงอัตราการสแกนค่าหนึ่งว่าการขนส่งมวลเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว ค่ากระแสที่วัดได้จะมีค่าสูงสุด ต่อให้เพิ่มอัตราการสแกนมากขึ้น ค่ากระแสที่วัดได้ก็จะคงที่ไม่เพิ่มไปจากเดิม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.40

แต่จากงานวิจัยได้เลือกใช้อัตราการสแกน (Scan rate) ที่ 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการสแกนมากกว่า 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที กระแสเนื่องจากการแพร่ (Diffusion current) ที่ตรวจวัดได้จะเกิดการสั้น ทำให้ได้พิกที่ไม่สวยงาม และการเพิ่มอัตราการสแกนจะทำให้เกิดการ shift ของค่าศักย์ของโดพามีน (Dopamine) ที่จุดสูงสุด ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อการวิเคราะห์ที่ได้

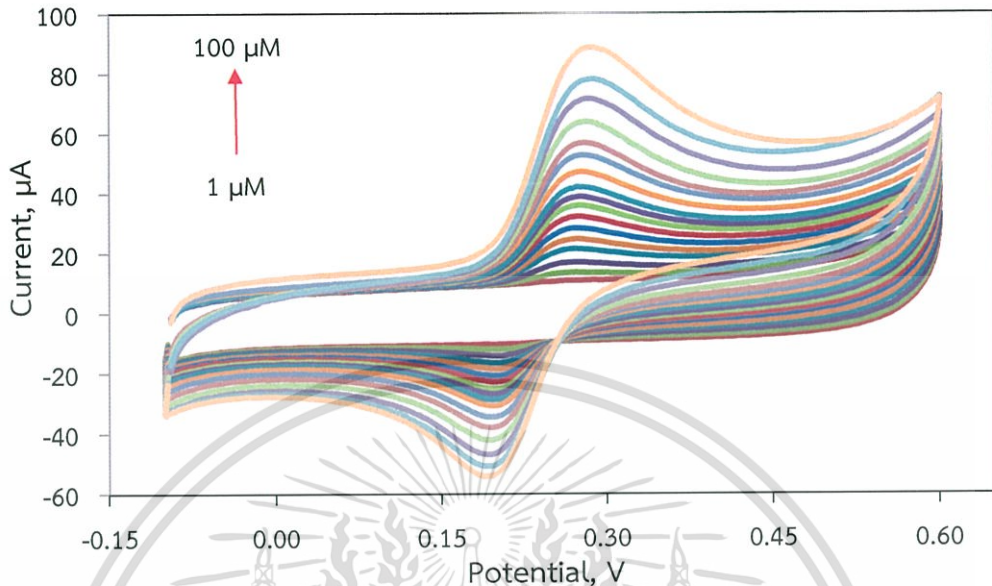
4.6.2 ผลจากการตรวจวัดโดพามีน (Dopamine) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry)

4.6.2.1 ผลจากการสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโดพามีน (Dopamine)

ผลของการตรวจวัดโดพามีนที่ความเข้มข้น 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90 และ 100 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอช 6.5 ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้า ITO/MWCNTs/PDADMAC/AuNPs/Glutathione เป็นขั้วใช้งาน (Working electrode) ขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วแพลตินัม

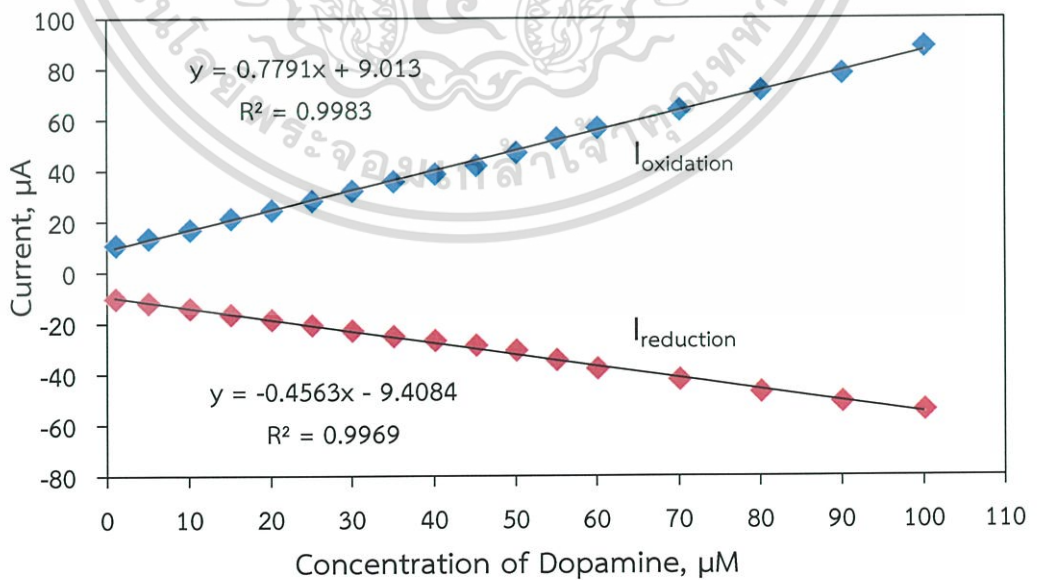
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นขั้วช่วย (Counter electrode) โดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.1 ถึง 0.6 โวลต์ ด้วย อัตราสแกน (Scan rate) 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ผลที่ได้แสดงดังรูป 4.41 และ 4.42



รูปที่ 4.41 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโดพามีนเพิ่มขึ้น ค่ากระแสที่ตรวจวัดก็จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น แสดงว่าความเข้มข้นของสารละลายโดพามีนแปรผันตรงกับค่ากระแสที่ตรวจวัดได้



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับสารละลายโดพามีนที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงให้เห็นถึงความเป็นเส้นตรง ($R^2 = 0.9969$) ของกราฟมาตรฐานโดพามีนในช่วงความเข้มข้น 1–100 ไมโครโมลาร์

4.6.2.2 ผลของการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)

ผลของการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) โดยการวัด Blank จำนวน 10 ครั้ง หลังจากนั้นคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank แล้วนำมาคำนวณโดยใช้สูตร $3SD$ of blank/Slope และผลของการศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) โดยการนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) ของ Blank ที่หาได้จากตอนคำนวณหา LOD มาคำนวณโดยใช้สูตร $10SD$ of blank/Slope ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า LOD และ LOQ

ตัวแปร	ค่าที่คำนวณได้, μM
ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)	0.316 ± 0.081
ขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ)	1.054 ± 0.081

จากตารางที่ 4.9 ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.316 ± 0.081 ไมโครโมลาร์ และค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 1.054 ± 0.081 ไมโครโมลาร์

4.6.2.3 ผลการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery)

ผลของการศึกษาค่าร้อยละของการคืนกลับของโดพามีนในตัวอย่างเลือดและปัสสาวะ โดยการนำเลือดและปัสสาวะมาทำการเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้นจาก 0.1 โมลาร์ พีเอช 6.5 แล้วเติมสารละลายมาตรฐานโดพามีนความเข้มข้น 1, 5, 10, 30 และ 50 มิลลิโมลาร์ ลงในตัวอย่างตามลำดับ แล้วตรวจวัดโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) ได้ผลดังตารางที่ 4.10

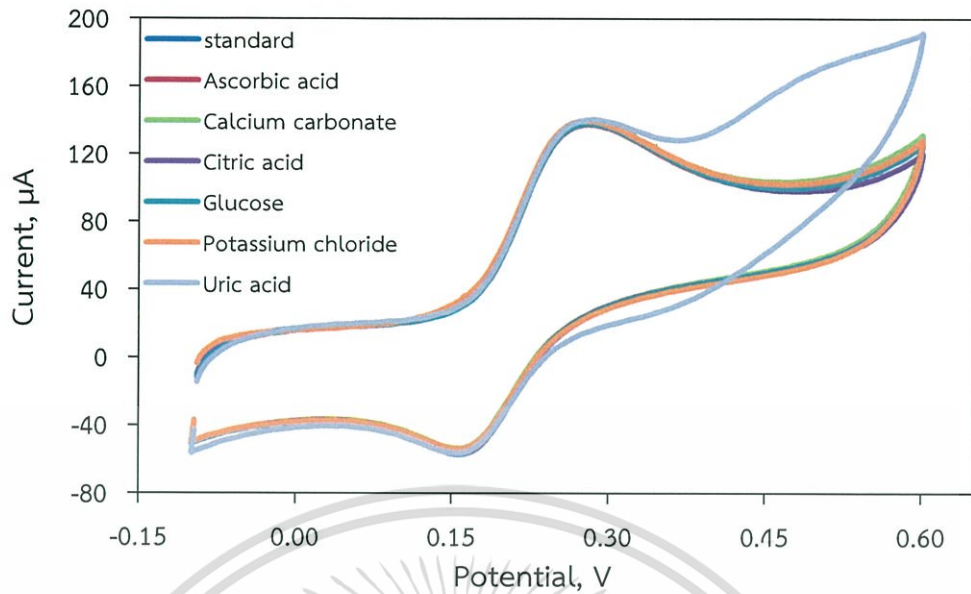
ตารางที่ 4.10 ค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ของการตรวจวัดเลือดและปัสสาวะ (n=3)

Sample	Added, μM	Detected, μM	Recovery, %	RSD, %
Plasma	-	Not detected	-	-
	1	1.10	110.0	1.48
	5	4.89	97.9	0.75
	10	10.04	100.4	1.87
	30	29.94	99.8	0.81
	50	50.40	100.8	0.98
Urine	-	Not detected	-	-
	1	1.05	105.0	3.04
	5	4.80	96.1	3.49
	10	10.16	101.6	0.85
	30	29.92	99.7	1.27
	50	50.51	101.0	1.09

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าเมื่อทำการเติมสารละลายมาตรฐานโดพามีนลงในตัวอย่างที่ความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) ที่ใกล้เคียง 100 % มากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการสรุปได้ว่า matrix ที่อยู่ในสารตัวอย่างเลือด และปัสสาวะไม่รบกวนการวิเคราะห์หาปริมาณโดพามีน และสามารถนำงานวิจัยนี้ไปวิเคราะห์ปริมาณโดพามีนได้จริง

4.6.2.4 อิทธิพลของการศึกษาตัวรบกวน (Interference) ในการวิเคราะห์

ผลของการศึกษาตัวรบกวน (Interference) โดยการเติมสารต่างๆ ดังนี้ Citric acid, Calcium carbonate, Potassium chloride, Ascorbic acid, Uric acid และ Glucose ลงไปในสารละลายมาตรฐานโดพามีนที่ความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ แล้วทำการตรวจวัดโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry) แสดงผลดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.43 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายโดพามีน (Dopamine) ที่ความเข้มข้นต่าง 200 ไมโครโมลาร์ โดยการเติมสารต่างๆลงไป

ตารางที่ 4.11 ค่ากระแสที่ตรวจวัดโดพามีน (Dopamine) จากการเติมสารต่างๆลงไป

Interference	Oxidation Current (μA)
Dopamine (200 μM)	137.482
Dopamine (200 μM) + Potassium chloride	139.496
Dopamine (200 μM) + Glucose	137.848
Dopamine (200 μM) + Calcium carbonate	139.526
Dopamine (200 μM) + Uric acid	140.167
Dopamine (200 μM) + Ascorbic acid	137.421
Dopamine (200 μM) + Citric acid	139.374

จากรูปที่ 4.43 และ ตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าสารที่นำมาวิเคราะห์หาตัวรบกวนในการวิเคราะห์สารละลายโดพามีน ไม่มีผลรบกวนการวิเคราะห์ เนื่องจากค่ากระแสที่วัดได้จากการเติมสารชนิดต่างๆลงไป มีค่ากระแสที่ใกล้เคียงกับสารมาตรฐาน (Standard) ที่ไม่ได้เติมสารลงไป

4.6.2.5 เปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์กับวิธีอื่นๆ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ปริมาณโดพามีนกับวิธีอื่นๆ ซึ่งสามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ต่างๆ

Electrode	pH	Scan rate (mV/s)	Dynamic range (μM)	LOD (μM)	Ref.
CPE/Rhodamine B	7	5	6-1000	3.99	[78]
CPE/SDS micelles	7	80	8-134	3.70	[79]
CPE/PBD-MWCNT	7	100	30-800	1.00	[80]
CPE/Horseradish peroxidase immobilized on PEGylated polyurethane nanoparticles	6.5	100	17-1900	2.00	[81]
GCE/MWCNT	8	50	3-200	0.80	[82]
CPE/L-arginine	5.6	50	50-100	0.50	[83]
ITO/MWCNT-AuNPs-Glutathione	6.5	20	1-100	0.30	This work

จากการเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์กับวิธีอื่นๆ จะเห็นได้ว่าขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตที่สร้างขึ้นมีผลการวิเคราะห์ที่ไม่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้พามั่นได้จริง โดยขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจพบ (LOD) เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆแล้ว ให้ผลที่ดีกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs), สังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) และทำการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น (Layer-by-Layer) เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาโดพามีน (Dopamine) โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

โดยเริ่มจากการปรับปรุงพื้นผิว MWCNTs ด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ และนำไปพิสูจน์ลักษณะเฉพาะด้วยการวิเคราะห์ TEM พบว่า MWCNTs นั้นสามารถกระจายตัวอยู่ในสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS ได้ โดย MWCNTs มีขนาด 13–18 นาโนเมตร การวิเคราะห์ด้วย Zeta potential พบว่า MWCNTs ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS นั้นได้ผลออกมาเป็น +53.96 และ -25.50 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสารละลายทั้งสองชนิดได้ไปห่อหุ้มบริเวณพื้นผิวของ MWCNTs

มีการสังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโนด้วยวิธีรีดักชัน โดยใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ เป็นตัวรีดิวซ์และสารรักษาเสถียรภาพ แล้วนำสารละลายอนุภาคทองในระดับนาโนไปพิสูจน์ลักษณะเฉพาะด้วยการวิเคราะห์ TEM พบว่าอนุภาคทองในระดับนาโนมีการกระจายตัวกันบ้าง รวมกลุ่มกันบ้าง และมีขนาดของอนุภาคเท่ากับ 12-14 นาโนเมตร และมีการวิเคราะห์ด้วย Zeta potential พบว่าอนุภาคทองในระดับนาโนถูกล้อมรอบด้วยโซเดียมซิเตรทที่มีประจุเป็นลบ จึงได้ผลออกมาเท่ากับ -32.36 มิลลิโวลต์

นำ MWCNTs ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลาย PDADMAC และสารละลาย COPSS มาสร้างแผ่นฟิล์มบางนาโน ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นฟิล์มบาง ทำให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลาย PDADAC และ COPSS ในการนำมาสร้างแผ่นฟิล์มบางเท่ากับ 0.1 และ 0.01 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และมีการศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการชุบสารละลายอนุภาคทองนาโน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่างๆ ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการชุบสารละลายอนุภาคทองนาโน เท่ากับ 15 นาที

มีการศึกษาจำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC/AuNPs ที่จำนวนชั้น 1, 3, 5, 7 และ 9 ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่าที่จำนวนชั้นของแผ่นฟิล์มบางเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในการเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางลดลง นั้นหมายความว่า ค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM จะเห็นว่าเมื่อจำนวนชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น ความหนาของเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นฟิล์มก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และได้นำเอาแผ่นฟิล์มบาง MWCNTs-PDADMAC/AuNPs ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FE-SEM พบว่า AuNPs ที่มีลักษณะทรงกลมจำนวนมากจะไปเกาะติดอยู่บน MWCNTs แสดงให้เห็นถึงการสร้างแผ่นฟิล์มบางได้สำเร็จ

ในขั้นตอนสุดท้ายได้มีการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตของ MWCNTs-PDADMAC ร่วมกับอนุภาคทองในระดับนาโน และกลูต้าไรโอนที่จำนวนชั้นเท่ากับ 15 ชั้น และนำไปวิเคราะห์โดพามีนในสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พีเอชเท่ากับ 6.5 โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.1 ถึง 0.6 โวลต์ ด้วยอัตราสแกน 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งได้กราฟมาตรฐาน ($R^2=0.9983$) ในช่วง 1-100 ไมโครโมลาร์ ซีตจำกัดต่ำสุดที่ตรวจพบ (LOD) เท่ากับ 0.316 ± 0.081 มิลลิโมลาร์, ซีตจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ 1.054 ± 0.081 มิลลิโมลาร์ และได้ร้อยละการคืนกลับ (% Recovery) ของการตรวจวัดตัวอย่างเลือดและปัสสาวะ ใกล้เคียง 100 % แสดงให้เห็นว่า matrix ที่อยู่ในสารตัวอย่างเลือด และปัสสาวะไม่รบกวนการวิเคราะห์โดพามีน ทำให้ทราบว่าขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตที่สร้างขึ้น สามารถนำมาวิเคราะห์หาโดพามีนได้จริง และมีความไวในการตอบสนองต่อความเข้มข้นของสารละลายโดพามีนในระดับต่างๆ ได้ค่อนข้างสูง

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการการปรับปรุงพื้นผิวท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs), สังเคราะห์อนุภาคทองในระดับนาโน (AuNPs) และทำการสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาโดพามีน โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบปัญหาและเทคนิคบางประการ ที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลอง เพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด โดยปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

1. ก่อนนำสารละลาย MWCNTs-PDADMAC และสารละลาย MWCNTs-COPSS มาใช้ในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง ควรนำไปทำให้กระจายตัวด้วยเครื่อง Sonicated probe ก่อน เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของ MWCNTs ทำให้เกาะติดบนแผ่นฟิล์มได้ดีขึ้น

2. การสร้างขั้วไฟฟ้านาโนคอมโพสิตด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบชั้นต่อชั้น ต้องล้างด้วยน้ำสะอาดทุกครั้งเพื่อกำจัดพอลิเมอร์ที่ติดซับบนพื้นผิว (Substrate) ที่มากเกินไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] โรคพาร์กินสัน. [Online]. Available : <http://www.si.mahidol.ac.th/sidoctor/e-pl/article/detail.asp?id=112>
- [2] สุขภาพอินเทอร์เน็ต. [Online]. Available : <http://health.kapook.com/view65437.html>
- [3] ท่อนาโนคาร์บอน. [Online]. Available : <http://www.technologymedia.co.th/article/detail.asp?arid=2484&pid=257>
- [4] Funtionalization of CNTs. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/cntcomposites/functionalization-of-cnts>
- [5] Polyelectrolyte Multilayer Films and Membrane Funtionalization. [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/polyelectrolyte-multilayer-films.html>
- [6] Gold Nanoparticles. [Online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/nanomaterials/gold-nanoparticles.html>
- [7] กลูต้าไธโอน. [Online]. Available : <http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/6/กลูต้าไธโอน-glutathione-ทำให้ขาวจริงหรือ/>
- [8] Electroanalytical Chemistry. [Online]. Available : <http://www.chem.science.cmu.ac.th/userfiles/chm009/file/203232%20p1%20to%20p3%20voltammetry.ppt>
- [9] นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/33.pdf>
- [10] นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/nano/nanotech1.htm>
- [11] Nanotechnology. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit5-1.html>
- [12] นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/นาโนเทคโนโลยี>
- [13] วัสดุนาโน. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/วัสดุนาโน>
- [14] ทิศทางการวิจัยวัสดุนาโน. [Online]. Available : <http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/Nano%20Tech49/Nano.html>
- [15] Yang, Kai et al. (2009) “*Effect of carbon nanotube functionalization on the mechanical and thermal properties of epoxy composite.*” Carbon. 47. 1723–1737.
- [16] กราฟีนวัสดุแห่งอนาคต. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/41610>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] ท่อนาโนคาร์บอน. [Online]. Available : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/unit3-8.html>
- [18] Carbon nanotube. [Online]. Available : <http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue4/covers/cover1.html>
- [19] Single-walled Carbon nanotube. [Online]. Available : <http://www.ensysce.com/carbon-nanotubes/>
- [20] Multi-walled Carbon nanotube. [Online]. Available : <http://www.velox.com/345.html>
- [21] Teng, Ao (2010). “*Physical Properties of Carbon Nanotubes.*” Solid State II. Physics, Tennessee University.
- [22] Peng-cheng Ma. et al. (2010). “*Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites : A review.*” Composites: Part A. 41. 1345-1367.
- [23] Fischer, John E, and Alan T Johnson. (1999). “*Electronic properties of carbon nanotubes.*” Solid State & Materials Science. 4. 28-33.
- [24] ท่อนาโนคาร์บอน. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/ท่อนาโนคาร์บอน>
- [25] P. Liu. 2005 “*Modification of carbon nanotube with polymer.*” European Polymer. 41: 2693 – 2703.
- [26] ภัณฑิลา ละออประเสริฐสุข, จิตภา ลากเจริญโกศล และ ณัฐพงศ์ มากมีทรัพย์. 2556. “การตัดแปรรูปคาร์บอนนาโนเพื่อเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิस्टไอสติน/ท่อคาร์บอนนาโนคอมโพสิต.” ปรียญานินพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] J. Zhu, M. Yudasaka, M. Zhang and S. Ijima. 2004: “*Dispersing carbon nanotubes in water: a noncovalent and nonorganic way.*” Journal of Physical Chemistry B. 108 : 11317–11320.
- [28] G. Viswanathan, N. Chakrapani, H. Yang, B. Wei, H. Chung, K. Cho, C.Y. Ryu and P.M. Ajayan. 2003. “*Single step in-situ synthesis of polymer-grafted single-wall nanotube composites.*” Journal of the American Chemistry Society. 125(31) : 9258–9259.
- [29] นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/aphys0852pp_ch2.pdf
- [30] Nanotechnology. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit5-1.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] Plasmonics and Nanophotonics. [Online]. Available : <http://nanocomposix.com/pages/plasmonics-and-nanophotonics>
- [32] Thin Film. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Thin_film
- [33] R. K. Iler (1966). "*Multilayers of colloidal particles.*" Journal of Colloid and Interface Science 21: 569.
- [34] Gero Decher, Jong-Dal Hong (2011). "*Buildup of ultrathin multilayer films by a self-assembly process, consecutive adsorption of anionic and cationic bipolar amphiphiles on charged surfaces.*" Macromolecular Symposia 46: 321.
- [35] Fuoss RM, Sadek H. Mutual "*Interaction of polyelectrolytes.*" Science 1949; 110 : 552-554.
- [36] Thünemann AF, Müller M, Dautzenberg H, Joanny JF, Löwen H. "*Polyelectrolyte complexes.*" Adv Polym Sci 2004; 166: 16-33.
- [37] การใช้สารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ในทางเภสัชกรรม. [Online]. Available : <http://pharm.kku.ac.th/isan-journal/journal/volume8-no2/01.pdf>
- [38] Lankalapalli S, Kolapali VRM. "*Polyelectrolyte complexes: A review of their applicability in drug delivery technology.*" Indian J Pharm Sci 2009; 71(5) : 481-487
- [39] Thoedtoon Champaiboon ,2007. "*Polyelectrolyte multilayer film containing polydiacetylene vesicles for naked eye detection of aromatic compounds.*", Chulalongkorn University.
- [40] Layer-by-layer. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Layer_by_layer#cite_note-2
- [41] Hua Ai, Steven A. Jones, Yuri M. Lvov (2003). "*Biomedical applications of electrostatic layer-by-layer nano-assembly of polymers, enzymes, and nanoparticles.*" Cell Biochemistry and Biophysics 39: 23.
- [42] Zhiyong Tang, Nicholas A. Kotov, Sergei Magonov, Birol Ozturk (2003). "*Nanostructured artificial nacre.*", Nature Materials 2: 413.
- [43] Decher, Gero (2012). "*Multilayer thin films - sequential assembly of nanocomposite materials.*" vol 2. Weinheim, Germany: Wiley-VCH
- [44] โดพามีน. [Online]. Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/44344>
- [45] The importance of glutathione in human disease. Biomed Pharmacother. 2003 May-Jun; 57(3-4):145-55.
- [46] กลูตาไธโอน. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/กลูตาไธโอน>
- [47] คณิตา ตั้งคณานันท์. เคมีวิเคราะห์ 1. กรุงเทพฯ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [48] เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [49] ปฏิกริยาเคมีไฟฟ้า. [Online]. Available : http://www.nakhamwit.ac.th/pingpong_web/Elec_Chem.htm
- [50] โพลีเมอร์. [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/Eanal/anal_potentiometry.htm
- [51] การประดิษฐ์ไมโครเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดตะกั่ว. [Online]. Available : http://librae.mju.ac.th/goverment/20111119104834_librae/File20130417120128_26927.pdf
- [52] Cyclic Voltammetry. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_voltammetry
- [53] หลักการ uv-vis spectrophotometer. [Online]. Available : http://glasswarechemical.com/scientific-instrument/หลักการ_uv_vis_spectrophotometer/
- [54] UV Visible Absorption Spectroscopy. [Online]. Available : http://faculty.sdmiramar.edu/fgarces/LabMatters/Instruments/UV_Vis/Cary50.htm
- [55] UV-Visible spectrophotometer. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/item/140-uv-visible-spectrophotometer.html>
- [56] FTIR-Raman Spectrophotometer. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/chemical-analysis-instrument-menu/item/139-ftir-raman-spectrometer.html>
- [57] X-ray Diffractometer XRD. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์-xrd.html>
- [58] X-ray Diffraction. [Online]. Available : <http://fys.kuleuven.be/iks/nvsf/experimental-facilities/x-ray-diffraction-2013-bruker-d8-discover>
- [59] Atomic Force Microscopy. [Online]. Available : <http://www.keysight.com/main/editorial.jsp?cc=TH&lc=eng&ckey=1774141&nid=-33986.0.02&id=1774141>
- [60] Atomic Force Microscopy. [Online]. Available : <http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=TH&lc=eng&ckey=1774141&nid=-33986.0.02&id=1774141Chapter%20%20AFM%20technique%20for%20Polymer%20Analysis.pdf>
- [61] AFM. [Online]. Available : <http://sjhsr.wikispaces.com/AFM>
- [62] Atomic Force Microscopy. [Online]. Available : <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/219-atomic-force-microscope-afm-.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

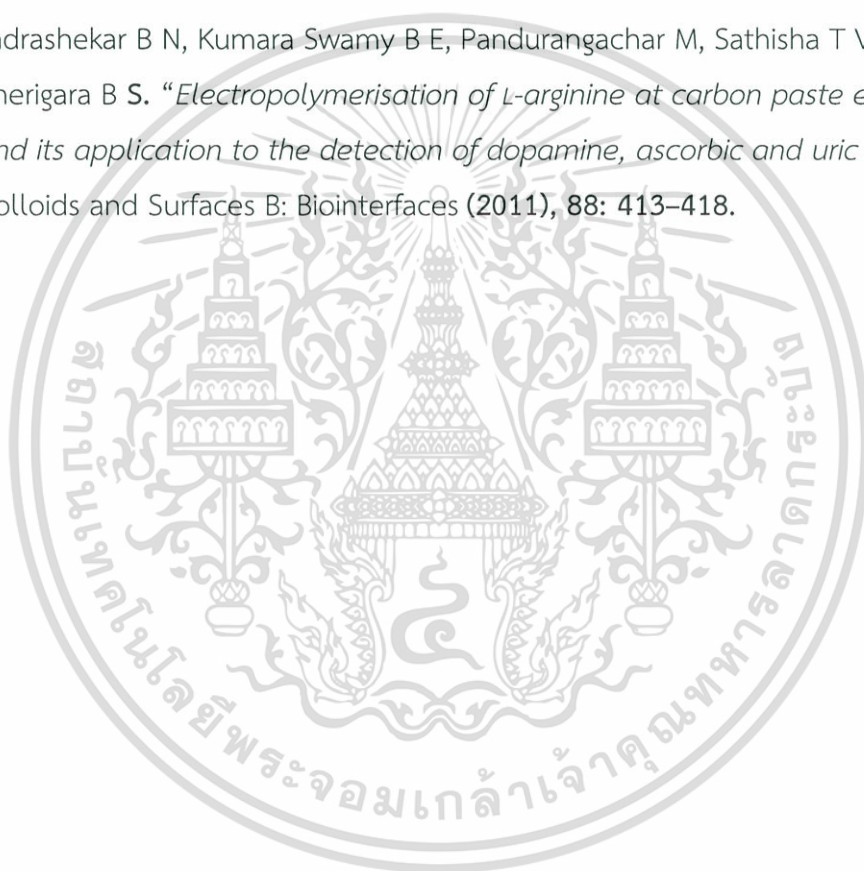
- [63] Electron microscope. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [64] Zeta potential. [Online]. Available : <http://share.psu.ac.th/blog/easysci/17648>
- [65] Zeta potential. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/178-zetasizer-nano-zs90.html>
- [66] Zeta potential. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Diagram_of_zeta_potential_and_slipping_planeV2.svg
- [67] Field Emission Scanning Electron Microscope. [Online]. Available : <http://thep-center.org/src2/files/eq/fesem.pdf>
- [68] Ekarat Detsri, Stephan Thierry Dubas, “*Layer-by-layer deposition of cationic and anionic carbon nanotubes into thin films with improved electrical properties.*” *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 444 (2014) 89– 94.
- [69] Cheng Xue ,Qing Han, Yang Wang, Jinhua Wu, Tingting Wen, Ruoyu Wang, Junli Hong, Xuemin Zhou, Huijun Jiang, “*Amperometric detection of dopamine in human serum By electrochemical sensor based on gold nanoparticles doped Molecularly imprinted polymers.*” *Biosensors and Bioelectronics* 49 (2013) 199–203.
- [70] Shi Liu, Jun Yan, Guangwu He, Dandan Zhong, Jiaying Chen, Liying Shi, Xuemin Zhou, Huijun Jiang, “*Layer-by-layer assembled multilayer films of reduced graphene oxide/gold nanoparticles for the electrochemical detection of dopamine.*” *Journal of Electroanalytical Chemistry* 672 (2012) 40–44.
- [71] Hyoung Soon Han, Heejin Seol, Dong Hyeon Kang, Mohammad Shamsuddin Ahmed, Jung-Min You, Seungwon Jeon, “*Electrochemical oxidation and determination of dopamine in the presence of AA using ferulic acid functionalized electrochemically reduced graphene.*” *Sensors and Actuators B* 204 (2014) 289–296.
- [72] J. Aldana-González, M. Palomar-Pardavé, S. Corona-Avenidaño, M.G. Montes de Oca, M.T. Ramírez-Silva, M. Romero-Romo, “*Gold nanoparticles modified-ITO electrode for the selective electrochemical quantification of dopamine in the presence of uric and ascorbic acids.*” *Journal of Electroanalytical Chemistry* 706 (2013) 69–75.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [73] Su-Juan Li, Jun-Zhi He, Meng-Jie Zhang, Rong-Xia Zhang, Xia-Lei Lv, Shao-Hua Li, Huan Pang, “*Electrochemical detection of dopamine using water-soluble sulfonated grapheme.*” *Electrochimica Acta* 102 (2013) 58– 65.
- [74] J. Salamon, Y. Sathishkumar, K. Ramachandran, Yang Soo Lee, Dong Jin Yoo, Ae Rhan Kim, G. Gnana kumar, “*One-pot synthesis of magnetite nanorods/grapheme composites and its catalytic activity toward electrochemical detection of dopamine.*” *Biosensors and Bioelectronics* 64 (2015) 269–276.
- [75] Victor Vinotha, Jerry J. Wub, Abdullah M. Asiric, Sambandam Anandana, “*Simultaneous detection of dopamine and ascorbic acid using silicatenetwork interlinked gold nanoparticles and multi-walled carbonnanotubes.*” *Sensors and Actuators B* 210 (2015) 731–741.
- [76] Byung-Kwon Kim, Ji Young Lee, Jun Hui Park, Juhyoun Kwak. “*Electrochemical detection of dopamine using a bare indium–tin oxide electrode and scan rate contro.l*” *Journal of Electroanalytical Chemistry* 708 (2013) 7–12.
- [77] Ning Xia, DehuaDeng, Liping Zhang, Baiqing Yuan, Min Jing, Jimin Dua, LinLiu. “*Sandwich-type electrochemical biosensor for glycoproteins detection based on dual-amplification of boronic acid-gold nanoparticles and dopamine-gold nanoparticles.*” *Biosensors and Bioelectronics* 43 (2013) 155–159.
- [78] Thomas T, Mascarenhas R, Kumara Swamy B E. “*Poly(Rhodamine B) modified carbon paste electrode for the selective detection of dopamine.*” *Journal of Molecular Liquids* (2012) 174: 70.
- [79] Colin–Orozco E, RamírezSilva M T, Corona–Avendaño S, Romero–Romo M, Palomar–Pardavé M. “*Electrochemical quantification of dopamine in the presence of ascorbic acid and uric acid using a simple carbon paste electrode modified with SDS micelles at pH 7.*” *Electrochim Acta* (2012), 85: 307–313.
- [80] Mazloun-Ardakani M, Abolhasani M, Mirjalili B, Sheikh-Mohseni M, Dehghani-Firouzabadi A, Khoshroo A. “*Electrocatalysis of dopamine in the presence of uric acid and folic acid on modified carbon nanotube paste electrode.*” *Chinese Journal of Catalysis* 35 (2014), 201–209.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [81] Fritzen–Garcia M B, Monteiro F F, Cristofolini T, Acuña J J S, Zanet–ti-Ramos B G, Oliveira I R W Z, Soldi V, Pasa A A, Creczynski–Pasa T B. “*Characterization of horseradish peroxidase immobilized on PEGylated polyurethane nanoparticles and its application for dopamine detection.*” *Sensors and Actuators B: Chemical* (2013), 182: 264–272.
- [82] Alothman Z A, Bukhari N, Wabaidur S M, Haider S. “*Simultaneous electrochemical determination of dopamine and acetaminophen using multiwall carbon nanotubes modified glassy carbon electrode.*” *Sensors and Actuators B: Chemical* (2010), 146: 314–320.
- [83] Chandrashekar B N, Kumara Swamy B E, Pandurangachar M, Sathisha T V, Sherigara B S. “*Electropolymerisation of L-arginine at carbon paste electrode and its application to the detection of dopamine, ascorbic and uric acid.*” *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* (2011), 88: 413–418.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารละลาย PDADMAC ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว MWCNTs

เตรียมสารละลาย Stock ของ PDADMAC ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ โดยปิเปตสารละลาย PDADMAC ความเข้มข้น 1.3375 โมลาร์ ปริมาณ 0.7476 มิลลิลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

เตรียมสารละลาย PDAD ที่ความเข้มข้น 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยใช้สารละลาย Stock ของ PDADMAC ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ โดยปิเปตมาดังตารางต่อไปนี้ และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ความเข้มข้นของสารละลาย PDADMAC, μM	ปริมาตรที่ปิเปต, ml
0.001	0.01
0.01	0.1
0.1	1
0.5	5
1.0	10

2. การเตรียมสารละลาย COPSS ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว MWCNTs

เตรียมสารละลาย Stock ของ COPSS ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ โดยชั่ง COPSS มา 0.34xx กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

เตรียมสารละลาย COPSS ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร โดยใช้สารละลาย Stock ของ COPSS ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ โดยปิเปตมาดังตารางต่อไปนี้ และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ความเข้มข้นของสารละลาย COPSS, μM	ปริมาตรที่ปิเปต, ml
0.005	0.05
0.01	0.1
0.05	0.5
0.1	1
0.5	5
1.0	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเตรียมสารละลาย Sodium Citrate ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์

ชั่ง Sodium Citrate จำนวน 0.58xx กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

4. การเตรียมสารละลายเตตระคลอโรอริกแอซิด (H_2AuCl_4) ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

ชั่งสาร H_2AuCl_4 จำนวน 0.09849 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

5. การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ผสมระหว่างโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) 1000 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

ชั่งสารโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจำนวน 15.6 กรัม ผสมกับสารไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 14.3 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

6. การเตรียมสารละลายกลูตาไธโอน (Glutathione) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์

ชั่งสาร Glutathione จำนวน 0.30xx กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

7. การเตรียมสารละลาย Stock Dopamine ความเข้มข้น 250 ไมโครโมลาร์

ชั่งสาร Dopamine จำนวน 0.0047 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

8. การเตรียมสารละลายที่ใช้วิเคราะห์ตัวรับกวน

8.1 การเตรียมสารละลาย Ascorbic acid ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์

เตรียมสารละลาย Stock Ascorbic acid ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร โดยการชั่งสาร Ascorbic acid จำนวน 0.0088 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

เตรียมสารละลาย Ascorbic acid ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ ได้โดยการปิเปตสารจากสารละลาย Stock Ascorbic acid ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ มาจำนวน 0.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

8.2 การเตรียมสารละลาย Citric acid ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์

เตรียมสารละลาย Stock Citric acid ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร โดยการชั่งสาร Citric acid จำนวน 0.0105 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

เตรียมสารละลาย Citric acid ความเข้มข้น 10 ไมโครโมลาร์ ได้โดยการปิเปตสารจากสารละลาย Stock Citric acid เข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

8.3 การเตรียมสารละลายกลูโคส ที่ความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์

ชั่งสารกลูโคสจำนวน 0.0360 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

8.4 การเตรียมสารละลาย Uric acid ที่ความเข้มข้น 0.136 มิลลิโมลาร์

ชั่งสาร Uric acid จำนวน 0.0012 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

8.5 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 3.5 มิลลิโมลาร์

ชั่งสารโพแทสเซียมคลอไรด์จำนวน 0.0132 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

8.6 การเตรียมสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้น 2.1 มิลลิโมลาร์

ชั่งสารแคลเซียมคาร์บอเนตจำนวน 0.0105 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ภาคผนวก ข.

การคำนวณผลการทดลอง

1.1 การคำนวณหา LOD และ LOQ ของการวิเคราะห์โดพามีน

คำนวณได้โดยการหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามตารางต่อไปนี้

No.	$I_{\text{oxidation}}, \mu\text{A}$
1	9.8755
2	9.8938
3	9.7931
4	9.7199
5	9.8084
6	9.7809
7	9.7015
8	9.6252
9	9.6863
10	9.8206
ค่าเฉลี่ย	9.7705
SD	0.0814

สมการเส้นตรง $y = 0.7791x + 9.013$

$$\text{LOD} = \frac{3 \text{ SD of blank}}{\text{Slope}}$$

$$= \frac{3 \times 0.0814}{0.7791}$$

$$= 0.3134 \mu\text{M}$$

$$\text{LOQ} = \frac{10 \text{ SD of blank}}{\text{Slope}}$$

$$= \frac{10 \times 0.0814}{0.7791}$$

$$= 1.0447 \mu\text{M}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การคำนวณหาร้อยละการคืนกลับ % Recovery

Sample	Added, μM	$I_{\text{oxidation}}$, μA	Mean	Detected, μM
Plasma	1	10.067	9.874	1.105
		9.710		
		9.844		
	5	12.700	12.825	4.893
		12.843		
		12.932		
	10	16.408	16.837	10.040
		16.948		
		17.155		
	30	32.462	32.337	29.937
		32.575		
		31.974		
	50	47.718	48.277	50.400
		48.237		
		48.877		
Urine	1	9.551	9.834	1.054
		9.704		
		10.247		
	5	12.615	12.755	4.803
		13.353		
		12.297		
	10	16.835	16.931	10.160
		17.134		
		16.823		
	30	32.086	32.322	29.918
		31.983		
		32.898		
	50	48.267	48.369	50.510
		47.779		
		49.061		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{สูตรคำนวณหา \% Recovery} = \frac{\text{Spiked sample} - \text{Sample}}{\text{Standard}} \times 100$$

Plasma ;	added 1 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{1.105}{1} \times 100 = 110.5$
	added 5 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{4.893}{5} \times 100 = 97.9$
	added 10 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{10.040}{10} \times 100 = 100.4$
	added 30 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{29.937}{30} \times 100 = 99.8$
	added 50 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{50.400}{50} \times 100 = 100.8$
Urine ;	added 1 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{1.054}{1} \times 100 = 105.5$
	added 5 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{4.803}{5} \times 100 = 96.1$
	added 10 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{10.160}{10} \times 100 = 101.6$
	added 30 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{29.918}{30} \times 100 = 99.7$
	added 50 μM	$\% \text{ Recovery} = \frac{50.510}{50} \times 100 = 101.0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ - สกุล นาย ฐานะพงศ์ ตรีทศายุธ
(Mr. Tanapong Treetasayut)

วัน เดือน ปีเกิด 24 ตุลาคม 2534

ประวัติการศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ปีการศึกษา 2552
จากโรงเรียนพนัสพิทยาคาร จังหวัดชลบุรี

ระดับมัธยมศึกษา วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

อีเมลล์ tanapong_tree@hotmail.com

โทร 087-545-4015



ชื่อ - สกุล นาย ปวริศร์ ศิริวัฒน์เมธานนท์
(Mr. Pawarit Siriwattanamethanon)

วัน เดือน ปีเกิด 1 มิถุนายน 2536

ประวัติการศึกษา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ปีการศึกษา 2553
จากโรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี

ระดับมัธยมศึกษา วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

อีเมลล์ tua.pawarit@hotmail.com

โทร 087-133-0110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชื่อ - สกุล

นางสาว สิริลักษณ์ รุจีพรสกุล
(Miss. Sirilak Rujipornsakul)

วัน เดือน ปีเกิด

24 กันยายน 2535

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา

จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ปีการศึกษา 2553
จากโรงเรียนพนัสพิทยาคาร จังหวัดชลบุรี

ระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

อีเมลล์

sirilakruji@gmail.com

โทร

087-546-9844



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้