

การสังเคราะห์โพลีไดเมทิลไซลอกเซน-อนุภาคนาโนทองคำ (PDMS-AuNP)
บนพื้นผิวอิเล็กโทรด



ปริญญาานิพนธ์
ของ
รชตวรรณ กมลเพชร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2558

การสังเคราะห์โพลีไดเมทิลไซลอกเซน-อนุภาคนาโนทองคำ (PDMS-AuNP)
บนพื้นผิวอิเล็กโทรด



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

ธันวาคม 2558

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การสังเคราะห์โพลีไดเมทิลไซลอกเซน-อนุภาคนาโนทองคำ (PDMS-AuNP)
บนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์



บทคัดย่อ
ของ
รชตวรรณ กมลเพชร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมาเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2558

รชตวรรณ กมลเพชร (2558). การสังเคราะห์โพลีไดเมทิลไซลอกเซน-อนุภาคนาโนทองคำ (PDMS-AuNP) บนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ ปริทยานิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ คณะกรรมการควบคุม: อาจารย์ ดร.โชคชัย พุทธิรักษา

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำร่วมกับโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS-AuNP) โดยการหยดสารละลายไฮโดรเจนเตตระคลอไรด์ (HAuCl₄) ที่ความเข้มข้น 20 mg/ml ลงบนฟิล์ม PDMS ที่เตรียมโดยการเคลือบ 20 % (w/v) PDMS ($\eta = 0.1$) บนกระจกสไลด์ และ AuSPE ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ไอออนของสารละลาย HAuCl₄ จะถูกรีดิวซ์ด้วยสาร Si-H ใน PDMS เกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำ และ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ได้ถูกวิเคราะห์ผลโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/vis spectrophotometer ดูโครงสร้างและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำด้วย FE-SEM วัดมุมสัมผัสพื้นผิวด้วยเครื่อง Contact Angle วัดกระแสไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (CV) และเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (EIS) จากการทดลองพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนทองคำคือ 42-56 nm ที่อัตราส่วนของเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ เป็น 10:1 (v/v) ($\eta = 0.1$) ซึ่งอัตราส่วนของเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ (η) มีผลต่อรูปร่างและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ เมื่อ η มีค่าสูงขนาดของอนุภาคนาโนจะใหญ่ และมีรูปร่างเปลี่ยนไป

คำสำคัญ: โพลีไดเมทิลไซลอกเซน-อนุภาคนาโนทองคำ (PDMS-AuNP) การปรับปรุงพื้นผิวเซนเซอร์ไบโอเซนเซอร์

SYNTHESIS OF POLYDIMETHYLSILOXANES-GOLD NANOPARTICLES (PDMS-AuNP)
ON ELECTRODE SURFACE



Presented in Partial Fulfillment of The Requirements for the
Master of Education in Physics
at Srinakharinwirot University
December 2015

Rachatawan Kamolpach (2015). *Synthesis of Polydimethylsiloxanes-Gold Nanoparticles*

(PDMS-AuNP) on Electrode Surface. Master Thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok:

Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:

Dr. Chokchai Puttharugsa

The aim of this research is to synthesis of polydimethylsiloxanes-gold nanoparticles (PDMS-AuNP). The PDMS-AuNP was prepared by dropping 20 mg/ml H₂AuCl₄ solution on the 20% (w/v) of PDMS film which is coated on the glass slide and AuSPE with 24 h of incubation time. The gold ion can be reduced to AuNP using the remaining of curing agent in PDMS. The PDMS-AuNP synthesis were characterized by using UV/vis spectrophotometer, field emission scanning electron microscope (FE-SEM), contact angle measurement, cyclic voltammetry (CV) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) technique. The diameter of the AuNP on the PDMS film was 42-56 nm, approximately at the ratio of curing agent and monomer was 10:1 (v/v) ($\eta = 0.1$) The ratio of curing agent and monomer (η) affects to the shape and size of AuNP. When η was higher the particle size is larger and the shape was changed.

Keyword: Polydimethylsiloxane - Gold Nanoparticle (PDMS-AuNP), Modification of sensor surface, Biosensor

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์โพลีไดเมทิลไซลอกเซน-อนุภาคนาโนทองคำ (PDMS-AuNP)

บนพื้นผิวอิเล็กโทรด

ของ

รชตวรรณ กมลเพชร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. ดุษฎี โยเหลา)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2558

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษา

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร.ไชคชัย พุทธรักษา)

(อาจารย์ ดร.ภูณิศรา ลีมนนทกุล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ไชคชัย พุทธรักษา)

ประกาศคุณูปการ

ในการจัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้ได้สำเร็จลงด้วยความกรุณาจาก อ.ดร.โชคชัย พุทธรักษา ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ปัญหาและข้อบกพร่องต่างๆ และช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่อย่างสูง ผู้วิจัยซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. ภูนิศรา ลีมนนทกุล และ อ.ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการในการสอบปากเปล่า (ปริญญาบัตร) รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดระยะเวลาของการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญาบัตรจนสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณธัญพ นิลกำจร ที่ได้คอยช่วยเหลือแนะนำอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และขอขอบคุณเพื่อนนิสิตปริญญาโท คุณสุภาวดี โภคย์ คุณภัทรา ภักดีเกียรติ คุณกীরติ วงศ์ณะดา คุณธนรัชต์ คัณฑ์กษั คุณสุमितตา เมชนิติ คุณปิยะดา วัจวรรณ และคุณปราณี พรหมบุตร ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานตลอดมา

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ส่งเสริมและสนับสนุนในทุกๆเรื่อง อีกทั้งยังให้ความรักและปรารถนาดีและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

รชตวรรณ กมลเพชร

สารบัญ

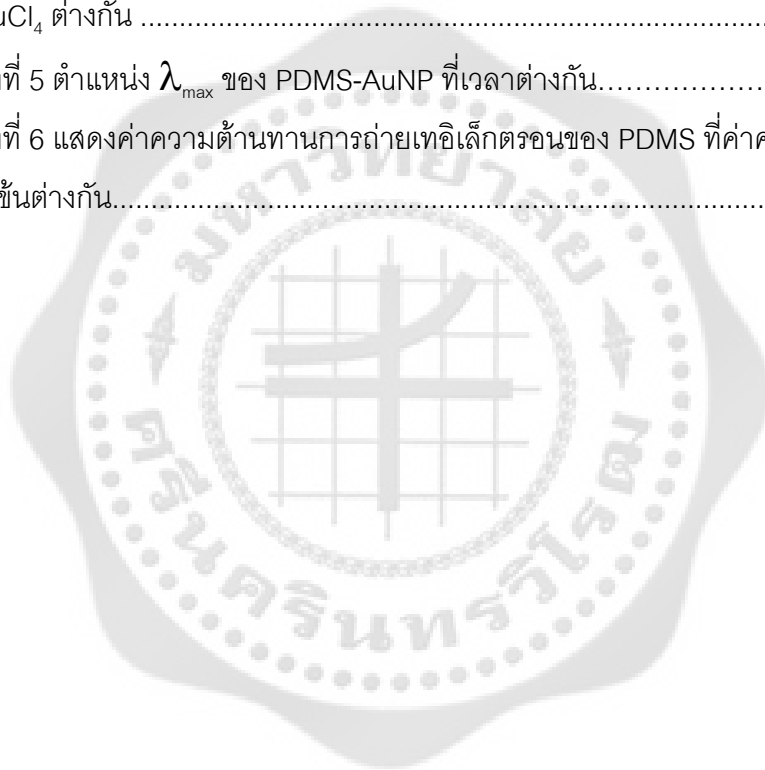
บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	1
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ไบโอเซนเซอร์ (Biosensors)	4
การปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ (Modification of Sensor Surface)	5
นาโนเทคโนโลยีและไบโอเซนเซอร์ (Nanotechnology and Biosensors)	6
โพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxanes; PDMS)	8
ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry; CV)	9
อิเล็กโทรเคมีคอลลิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS)	11
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิด Field Emission (FESEM)	
เครื่องยูวี วิส สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer).....	13
Spin Coating.....	15
มุมสัมผัส (Contact Angle)	17
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	20
แผนการดำเนินงาน.....	20
อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	21
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	23
ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล.....	24
สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	26
ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์ด้วย เครื่อง UV- Vis Spectrophotometer.....	26
ผลการวัดในเชิงเคมีไฟฟ้าของ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ลงบนบนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเทคนิค CV และเทคนิค EIS.....	38
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	42
สรุปผลการทดลอง.....	42
ข้อเสนอแนะ.....	43
บรรณานุกรม.....	44
ภาคผนวก.....	48
ประวัติย่อผู้วิจัย	56

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงอัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์.....	24
2 ตำแหน่ง λ_{max} ของ PDMS-AuNP ที่ค่าความเข้มข้น PDMS ต่างกัน.....	27
3 ตำแหน่ง λ_{max} ของ PDMS-AuNP ที่ค่าอัตราส่วนระหว่าง ระหว่างสารเคียวริงเอเจน และสารมอโนเมอร์ต่างกัน.....	29
4 ตารางที่ 4 ตำแหน่ง λ_{max} ของ PDMS-AuNP ที่ความเข้มข้นของสารละลาย H ₂ AuCl ₄ ต่างกัน	36
5 ตารางที่ 5 ตำแหน่ง λ_{max} ของ PDMS-AuNP ที่เวลาต่างกัน.....	37
6 ตารางที่ 6 แสดงค่าความต้านทานการถ่ายเทอิเล็กตรอนของ PDMS ที่ค่าความเข้มข้นต่างกัน.....	40



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 หลักการทำงานของไบโอเซนเซอร์.....	4
2 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวเซนเซอร์ด้วย 11 MUA.....	5
3 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคนาโนทองคำ.....	6
4 แสดงการสั่นของพลาสมอนเรโซแนนซ์.....	7
5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่ขนาดต่างๆ.....	7
6 แสดงสีของอนุภาคนาโนทองคำที่ขนาดต่างๆ.....	8
7 โครงสร้างของโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane structure)	9
8 แสดงองค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	10
9 แสดง cyclic voltammogram.....	11
10 แสดงศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟส (phase shift; ϕ) ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	12
11 Nyquist plot.....	13
12 หลักการทำงานของ FESEM.....	13
13 แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอน.....	14
14 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer.....	15
15 แสดงการหยดสารละลายลงบนฐานรองในการทำฟิล์มบางด้วยเทคนิค Spin Coating.....	16
16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับเวลาและความเร็วใน การหมุน.....	16
17 แสดงมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวที่ขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวที่บริเวณรอยต่อของน้ำ พื้นผิว วัสดุ และอากาศ.....	17
18 แผนภาพแสดง (ก) ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (ข) ขั้นตอนการ ตรวจสอบคุณลักษณะของ PDMS-AuNP.....	21
19 Gold Screen-Printed Electrodes ; AuSPE.....	22

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
20 ผลการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่ค่าความเข้มข้นของ PDMS ต่างกัน ...	27
21 แสดง PDMS-AuNP ที่ค่าความเข้มข้นของ PDMS 0.1 – 20% (W/V).....	28
22 แสดงแผนผังการสังเคราะห์ PDMS-AuNP.....	28
23 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่ค่า η ต่างกัน.....	29
24 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.06$	30
25 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.06$	31
26 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.1$	31
27 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.1$	32
28 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.15$	32
29 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.15$	33
30 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.18$	33
31 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.18$	34
32 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.20$	34
33 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.2$	35
34 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่ความเข้มข้นของสารละลาย HAuCl ₄ ต่างกัน.....	36
35 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่เวลาต่างกัน.....	37
36 แสดง Nyquist plot ของ PDMS ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเทคนิค EIS.....	39
37 Randles' equivalent circuit applied in EIS measurements.....	39
38 แสดง Nyquist plot ของ PDMS-AuNP ที่ค่าความเข้มข้น 20% (W/V) PDMS ด้วยเทคนิค EIS.....	39
39 แสดง Cyclic voltammogram ของ ที่ค่า PDMS ต่างกัน ด้วยเทคนิค CV.....	41
40 แสดง Cyclic voltammogram ของ PDMS-AuNP ด้วยเทคนิค CV.....	41

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ปัจจุบันวัสดุนาโน (Nanomaterial) เข้ามามีบทบาทอย่างกว้างขวางในการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่ โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างของวัสดุนาโน เมื่อวัสดุมีขนาดเล็กจะส่งผลให้สมบัติด้านต่างๆ เปลี่ยนไป เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติทางเคมี เป็นต้น วัสดุนาโนที่เตรียมจากโลหะ เช่น อนุภาคนาโนเงิน อนุภาคนาโนทองคำ จะมีสมบัติทางแสงและทางเคมีแตกต่างจากเงินและทองคำแบบก้อนคือ อนุภาคนาโนของเงินจะมีสีเหลือง อนุภาคนาโนทองคำจะมีสีแดง และเมื่อวัสดุมีขนาดเล็กอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงเมื่อเทียบกับวัสดุขนาดใหญ่ ทำให้มีความไวสูง (Sensitivity) ต่อปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น ช่วยในการเร่งปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น (Wang, J.; et al. 2001)

ด้วยเหตุนี้วัสดุนาโนหลายชนิด เช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticles) (Evrin, U. 2013), แท่งนาโน (Nanorod) (Dakrong, P.; et al. 2013), ลวดนาโน (Nanowire) (Chhiung, W. K.; et al. 2008), ท่อนาโน (Nanotube) (Bobak, R.; et al. 2001), และ เส้นใยนาโน (Nanofibers) (Quan, F.; et al. 2011) เป็นต้น ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านตัวตรวจจับทางชีวภาพ (Biosensor) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กโทรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารเคมีและสารชีวภาพให้มีความไวสูง เป็นต้น ทั้งนี้ในการปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กโทรดนิยมนำอนุภาคนาโนทองคำ (Gold Nanoparticles) มาใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวมากกว่าอนุภาคนาโนประเภทอื่น เนื่องจากอนุภาคนาโนทองคำมีข้อดีหลายประการเช่น เป็นโลหะเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ไม่เป็นพิษต่อสารชีวภาพและสารชีวภาพที่หุ้มฟังก์ชัน หมู่ $-NH_2$, $-SH$ และ $-CN$ จะสามารถเกาะบนอนุภาคนาโนทองคำได้ด้วยตัวเองด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) (ศิริวรรณ.2012) ยกตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ.2544 ฮอง ซี (Hong Cai) และคณะ ได้ทำการศึกษาปรับปรุงพื้นผิวของอิเล็กโทรดทองคำ (Gold Electrode) ด้วยอนุภาคนาโนทองคำขนาด 16 nm และเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดทองคำที่ไม่มีอนุภาคนาโนทองคำบนพื้นผิว พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กโทรดทองคำด้วยอนุภาคนาโนทองคำจะให้กระแสรีดักชันสูงกว่าค่ากระแสที่วัดได้จากอิเล็กโทรดที่ปราศจากอนุภาคนาโนทองคำ เนื่องจากอนุภาคนาโนทองคำเมื่อมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้สามารถตรึง ssDNA ได้ง่ายและ ssDNA ที่ถูกตรึงบนอิเล็กโทรดมีปริมาณมากขึ้น (Hong, C.; et al. 2011) ปี พ.ศ. 2546 เซาซิง ซู (Xiaoxing Xu) และคณะ ได้ปรับปรุงพื้นผิว Screen-Printed Carbon Electrodes (SPCE) ด้วยอนุภาคนาโนทองคำ สำหรับตรวจวัดปริมาณของ H_2O_2 กับเอนไซม์ Horseradish Peroxidase (HRP) เพื่อใช้ในการตรวจวัด H_2O_2 โดยทำการตรึงเอนไซม์ลงไปบนผิวหน้า

ของอิเล็กโทรดพบว่าอิเล็กโทรดที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคนาโนทองคำจะให้รีดอกซ์พีคสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว ทั้งนี้แสดงว่าอนุภาคนาโนทองคำบนอิเล็กโทรดทำหน้าที่ช่วยในการถ่ายเทอิเล็กตรอน จากบริเวณรีดอกซ์ของเอนไซม์ไปยังพื้นผิวอิเล็กโทรด (Xiaoxing, X.; et al. 2003)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอนุภาคนาโนทองคำถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กโทรด เนื่องจากอนุภาคนาโนทองคำสามารถเร่งปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว ช่วยให้อิเล็กตรอนถ่ายเทได้ดียิ่งขึ้น และอนุภาคนาโนทองคำเมื่อมีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้สามารถตรึงสารชีวภาพได้ปริมาณมากขึ้น สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำให้มีขนาดเล็กนั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การบด (grinding) เป็นการบดการเตรียมผงละเอียดด้วยการลดขนาดทางกลของอนุภาคขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง เช่น การบดย่อยด้วยลูกบอล การบดย่อยแบบลูกกลิ้งแรงอัดสูงหรือแม้กระทั่งการบดมือที่ต้องอาศัยเวลาในการบดค่อนข้างนาน หรือสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำด้วยวิธีการรีดักชันทางเคมี (Chemical Reduction) เป็นต้น

ในปี พ.ศ.2551 ชิง จาง (Qing Zhang) และคณะ นำเสนอวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำด้วยโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxanes; PDMS) โดยการหยดสารละลายกรดคลอโรอริกบน PDMS ไฮดรอกซิลในสารละลายกรดคลอโรอริก (Chlorauric Acid ;HAuCl₄) จะถูกรีดิวซ์โดยสารเคียวริงเอเจน (Curing Agent) ทำให้เกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำได้ง่าย ขนาดของอนุภาคนาโนทองคำสามารถควบคุมได้โดยการปรับอัตราส่วนระหว่างสารเคียวริงเอเจน และสารมอนอเมอร์ (Monomer) นอกจากนี้การทดลองยังแสดงให้เห็นว่าฟิล์มคอมโพสิตมีประโยชน์มากในกระบวนการตรึงโปรตีนและการวิเคราะห์ทางชีวเคมีอื่น ๆ ที่ใช้ PDMS-AuNP เป็นวัสดุรองรับสารชีวภาพ (Qing, Z.; et al. 2008)

ดังนั้นในงานวิจัยจึงมุ่งหมายเพื่อสังเคราะห์ PDMS-AuNP สำหรับเป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านไบโอเซนเซอร์ ในการปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กโทรดเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดสารเคมีและสารชีวภาพในลำดับต่อไป

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการสังเคราะห์ PDMS - AuNP บนพื้นผิวกระจกสไลด์และพื้นผิวอิเล็กโทรด
2. เพื่อหาเงื่อนไขในการสังเคราะห์ PDMS - AuNP บนพื้นผิวกระจกสไลด์และพื้นผิวอิเล็กโทรด
3. เพื่อศึกษาคุณลักษณะของ PDMS - AuNP ที่สังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่

3.1 การเปลี่ยนความเข้มข้นของ PDMS และ HAuCl_4 ที่ใช้ในการสังเคราะห์

3.2 การเปลี่ยนอัตราส่วนเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ใน PDMS

ขอบเขตของการวิจัย

1. สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำร่วมกับโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS – AuNP) บนพื้นผิวกระจกสไลด์และพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์

2. ทราบเงื่อนไขในการการสังเคราะห์ PDMS – AuNP บนพื้นผิวกระจกสไลด์และพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์

3. ทราบถึงคุณสมบัติของ PDMS – AuNP ที่สังเคราะห์โดยการตรวจวัดดังนี้

3.1 วัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS – AuNP ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง UV- Vis Spectrophotometer

3.2 วัดค่ากระแสไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย PDMS – AuNP โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry; CV) และ อิเล็กโทรเคมีคอลลิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS)

3.3 ดูโครงสร้างขนาดเล็กของ PDMS – AuNP ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

3.4 วัดมุมสัมผัสพื้นผิวด้วยเครื่อง Contact Angle

ความสำคัญของการวิจัย

ทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการสังเคราะห์ PDMS – AuNP และทราบถึงคุณลักษณะของ PDMS – AuNP ที่สังเคราะห์ได้ นอกจากนี้ PDMS – AuNP ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดทางไบโอเซนเซอร์ได้ในลำดับต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ PDMS – AuNP บนพื้นผิวกระจกสไลด์และพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์

2. ได้พื้นผิวกระจกสไลด์และพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการปรับปรุงด้วย PDMS – AuNP

3. ได้องค์ความรู้เพื่อสามารถนำมาใช้ต่อยอดในการทำวิจัยครั้งต่อไป

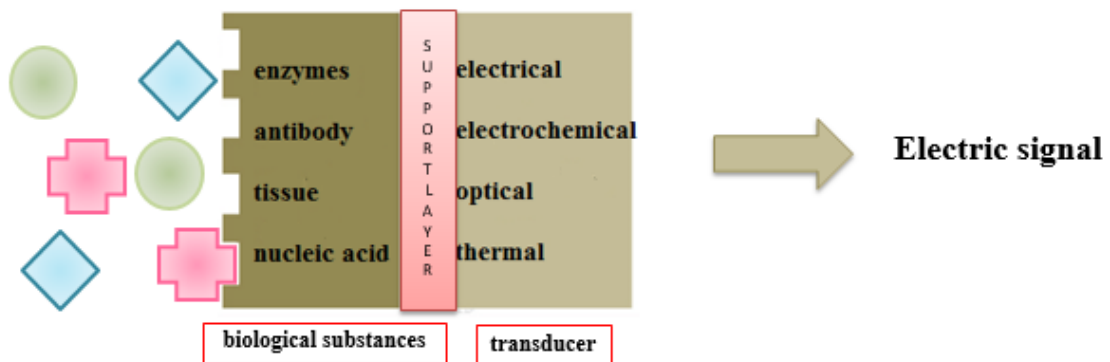
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอสเซนเซอร์ (Biosensors)

การตรวจวัดสารทางชีวภาพนั้นมีวิธีการวัดทั้งทางกายภาพ หรือทางเคมี วิธีดังกล่าวนี้อาจไม่สามารถใช้วัดสารบางอย่างได้อย่างจำเพาะเจาะจง หรืออาจต้องใช้เวลาในการวัดนาน ผู้ปฏิบัติต้องมีความรู้ความชำนาญพอสมควรทั้งในเรื่องของการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัดและวิเคราะห์ การตรวจวัดจึงไม่สามารถแสดงผลได้ในเวลาอันรวดเร็ว

ปัจจุบันจึงมีการพัฒนาการตรวจวัดสารทางชีวภาพให้มีวิธีการตรวจวัดที่ง่าย รวดเร็ว และมีความจำเพาะเจาะจงสูงในการตรวจวัด เครื่องตรวจวัดนี้เรียกว่าไบโอสเซนเซอร์ (Biosensors) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณสารตัวอย่างที่มีความจำเพาะเจาะจงและมีความรวดเร็วในการตรวจวัด ไบโอสเซนเซอร์ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนของสารชีวภาพและส่วนของตัวแปลงสัญญาณ สารชีวภาพหรือสารชีวโมเลกุลเป็นสารที่มีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการตรวจวัด ตัวอย่างของสารชีวภาพ เช่น แอนติเจน แอนติบอดี เอนไซม์ DNA (Miroslav, P.; & Petr, S. 2008) เป็นต้น เมื่อสารชีวภาพทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการวัด จะทำให้เกิดสัญญาณที่ถูกตรวจวัดด้วยตัวแปลงสัญญาณที่เหมาะสมกับชนิดและรูปของสัญญาณนั้น ตัวแปลงสัญญาณเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่รับและแปลงสัญญาณทางเคมี ฟิสิกส์ หรือชีวเคมี (สัญญาณที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารชีวภาพกับสารที่ต้องการตรวจวัด) ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1 ซึ่งสัญญาณทางไฟฟ้านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของสารที่ต้องการตรวจวัด



ภาพประกอบ 1 หลักการทำงานของไบโอสเซนเซอร์ (Luppa, P. B.; et al. 2001)

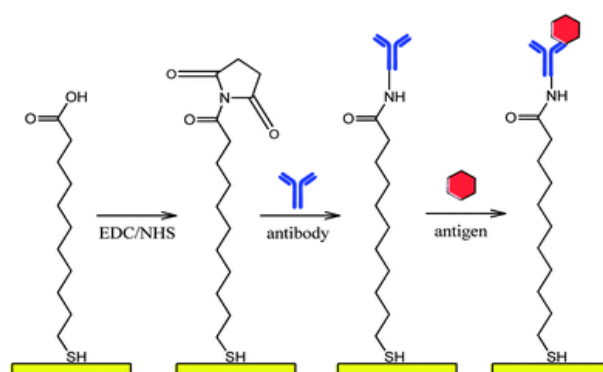
นอกจากนี้การปรับปรุงพื้นผิวเซนเซอร์ถือได้ว่าเป็นความสำคัญอีกอย่างหนึ่งต่องานทางไบโอเซนเซอร์ เพราะการปรับปรุงพื้นผิวก่อนการตรึงสารชีวภาพจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดให้ได้ดียิ่งขึ้น (Jin, S.; & D, M. P. 2011)

2.2 การปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ (Modification of Sensor Surface)

การปรับปรุงพื้นผิวเซนเซอร์สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุที่ผิวของเซนเซอร์ เช่นการนำวัสดุนาโนมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเซนเซอร์หรือการใช้สารเคมีในการช่วยเชื่อมพันธะระหว่างพื้นผิวเซนเซอร์กับสารชีวภาพเพื่อเพิ่มความเสถียรและช่วยให้สารชีวภาพยึดเกาะได้ดีบนพื้นผิวก่อนการนำไปตรวจวัดสารที่ต้องการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

2.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธี Self-Assembled Monolayer (SAM)

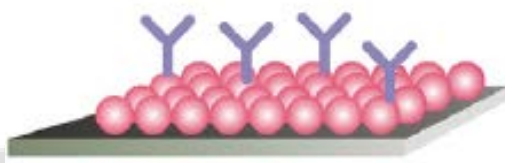
การปรับปรุงพื้นผิวเซนเซอร์ด้วยวิธีการเชื่อมพันธะทางเคมีระหว่างสารชีวภาพกับพื้นผิวเซนเซอร์ โดยการนำสารเคมีมาช่วยในการเชื่อมพันธะ เช่น นำสาร Mercaptoundecanoic Acid (11 MUA) (Ko, S. C.; et al. 2010) มาช่วยเชื่อมพันธะระหว่างผิวเซนเซอร์กับแอนติบอดี ซึ่ง 11 MUA เป็นสารในกลุ่มไธออล (Thiol) ซึ่งจะเกิดการสร้างพันธะโควาเลนต์กับแอนติบอดีระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) ของ 11 MUA กับหมู่เอมีน (Amine) ของแอนติบอดี ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2 ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ในการเชื่อมต่อแอนติบอดีกับ SAM นั้นนิยมใช้สาร 1-Ethyl-3-Dimethyl Aminopropyl Carbodiimide (EDC) และ N-Hydro Succinimide (NHS) เพื่อกระตุ้นการทำปฏิกิริยาในการเข้าจับกันระหว่างแอนติบอดีกับ 11 MUA โดย EDC เป็นสารที่มีหน้าที่เป็นตัวประสาน (Crosslinker) ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกกับพอลิเมอร์อื่นทำให้เกิดการสร้างพันธะขึ้น ส่วน NHS เป็นสารชีวเคมีทำหน้าที่กระตุ้น (Activate) สารในกลุ่มคาร์บอกซิลิกให้สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนได้ (วาริรัตน์ .2554) จึงทำให้แอนติบอดียึดเกาะบนพื้นผิวเซนเซอร์ได้และพร้อมสำหรับการนำไปตรวจวัดแอนติเจนลำดับต่อไป



ภาพประกอบ 2 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวเซนเซอร์ด้วย 11 MUA (Azrilawani, A.; et al. 2012)

2.2.2 ปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์

เป็นการปรับปรุงพื้นผิวโดยการช่วยการใช้อนุภาคนาโน เช่น การเคลือบอนุภาคนาโนโลหะบนพื้นผิวของอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดทางไบโอเซนเซอร์ (Evrin, U. 2013) เพราะอนุภาคโลหะจะยึดจับกับสารชีวภาพบนอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์เพื่อทำหน้าที่ในการตรวจจับและขยายสัญญาณที่เกิดจากปฏิกิริยาของสารชีวภาพกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ อนุภาคนาโนโลหะ เช่น อนุภาคนาโนทองคำ อนุภาคนาโนของเงิน เป็นต้น ภาพประกอบ 3 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคนาโนทองคำก่อนการตรึงสารชีวภาพ



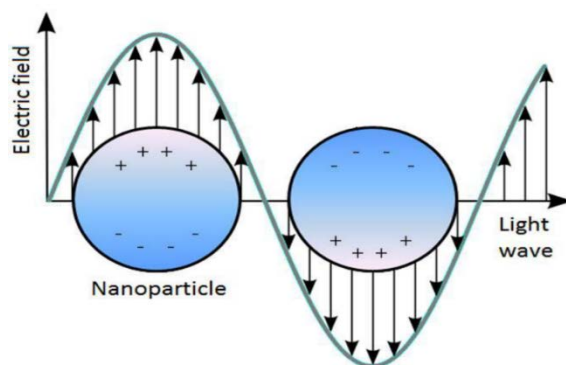
ภาพประกอบ 3 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคนาโนทองคำ (Evrin, U. 2013)

2.3 นาโนเทคโนโลยีและไบโอเซนเซอร์ (Nanotechnology and Biosensors)

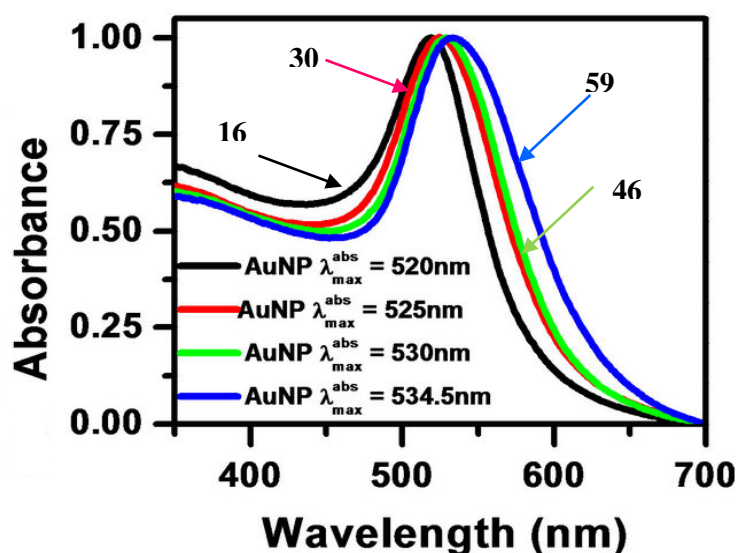
นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการจัดการ การสร้าง การประยุกต์ใช้วัสดุ อุปกรณ์และระบบที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm นาโนเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาไบโอเซนเซอร์ (Jianrong, C.; et al. 2004) วัสดุนาโน คือ วัสดุที่มีขนาดระหว่าง 1-100 nm เมื่อมีขนาดเล็กจึงทำให้วัสดุนาโนมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างจากวัสดุขนาดใหญ่ (Bulk Metal) เช่น สมบัติทางแสง พื้นผิวต่อปริมาตรและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

2.3.1 สมบัติทางแสง

สมบัติทางแสงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะเช่น ทองคำจะแสดงสมบัติทางแสงอย่างเด่นชัดสามารถอธิบายด้วยปรากฏการณ์ เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface Plasmon Resonance; SPR) ซึ่งเป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ ที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกัน (Skrabalak, S.; et al. 2008) ดังภาพประกอบที่ 4 เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่น กระจกทองคำหรือกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาดยออดคลื่น และความกว้างของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆ (ดังแสดงในภาพประกอบ 5) จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง ประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมรอบๆวัสดุนั้น อนุภาคนาโนของทองคำจะมีสีแดงแทนที่จะเป็นสีเหลืองวาวอย่างที่พบได้ทั่วไป เป็นต้น



ภาพประกอบ 4 แสดงการสั่นของพลาสมอนแบริชเนซ (Jules, L. H.; et al. 2014)



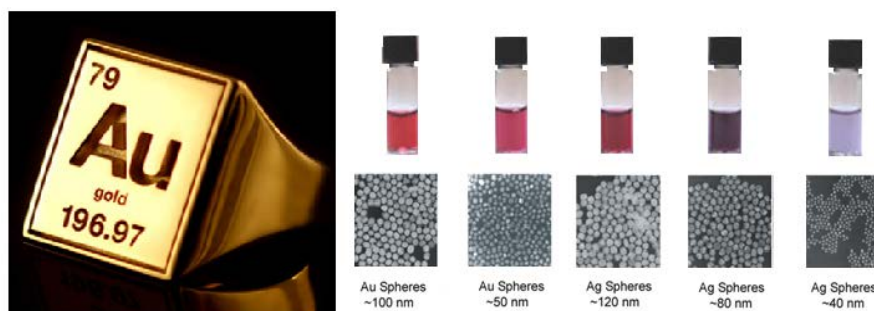
ภาพประกอบ 5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำที่ขนาดต่างๆ (Jules, L. H.; et al. 2014)

2.3.2 พื้นที่ผิวต่อปริมาตรและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ทองคำที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร จะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับทองคำชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่าย (Wang, J.; et al. 2001) และประโยชน์ที่ได้จากการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมี และข้อดีอีกประการของอนุภาคนาโนทองคำคือ ความสามารถในการรวมตัวได้เอง (Self-Assembly) กับสารชีวภาพที่มีหมู่ $-NH_2$, $-SH$ และ $-CN$ ซึ่งสามารถถูกดูดซับทางเคมีบนผิวของอนุภาคนาโนทองคำได้ด้วยตัวเอง อนุภาคนาโนทองคำจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพทางไบโอเซนเซอร์เพื่อให้สารชีวภาพยึดเกาะได้ดี และมีความไวในการตรวจวัด

2.3.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนมีด้วยกัน 2 แบบหลักคือ การสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top-Down) และการสังเคราะห์แบบล่างสู่บน (Bottom-Up) สำหรับการสังเคราะห์แบบบนลงล่างเป็นการสังเคราะห์จากวัตถุนาโนขนาดใหญ่ให้เป็นขนาดเล็กโดยการตัดหรือบดวัตถุให้เล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตรด้วยแรงภายนอกโดยใช้เทคนิคต่างๆเช่น LASER Ablation หรือ Ion Irradiation แต่พบว่าวิธีนี้มีข้อจำกัดคือควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคได้ยาก เป็นต้น การสังเคราะห์แบบล่างสู่บน เป็นการสังเคราะห์โดยเริ่มต้นจากการเรียงอะตอมแต่ละอะตอมประกอบขึ้นเป็นอนุภาคนาโนมีขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีต่างๆทางเคมี เช่นอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารละลายกรดคลอโรอิกโดยใช้ตัวรีดิวซ์ เช่น โซเดียมโบรไมด์หรือไตรโซเดียมไซเตรตเพื่อเปลี่ยนไอออนของทอง (Au^{3+}) เป็นอะตอมของทอง (Au^0) (ศิริวรรณ ตีภู. 2012) จากนั้นอะตอมทองรวมตัวกันหลายๆ อะตอมจนกลายเป็นอนุภาคนาโนทองที่มีขนาดระดับนาโนเมตร ดังภาพประกอบ 6 ที่แสดงขนาดของอนุภาคนาโนที่ขนาดต่างๆ

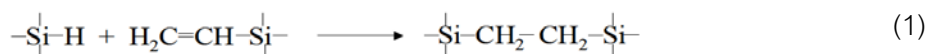


ภาพประกอบ 6 แสดงสีของอนุภาคนาโนทองคำที่ขนาดต่างๆ

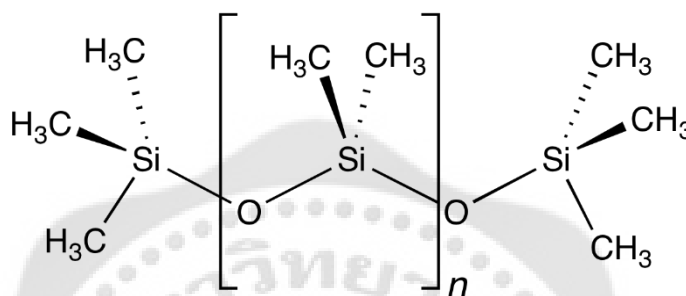
ที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/44237> สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม 2557 (ออนไลน์).

2.4 โพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxanes; PDMS)

เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีลักษณะคือ เป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างของสายโซ่หลักเป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วย ซิลิคอน กับออกซิเจน และมีหมู่ข้างเคียงเป็นสารพวกไฮโดรคาร์บอน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 7 การเชื่อมประสานกันของ PDMS เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของซิลิคอนไฮไดรด์ (Silicon Hydride; Si-H) ในสารเคียวริงเอเจน (Curing Agent) และหมู่ฟังก์ชันของไวนิล (Vinyl; Si-CH=CH₂) ในสารมอนอเมอร์ (Monomer) ซึ่งสารทั้ง 2 จะทำปฏิกิริยากันดังสมการที่ 1



จากลักษณะพิเศษเหล่านี้ทำให้ PDMS มีคุณสมบัติเป็นสารที่ละลายตัวยาก ทนทานต่อความร้อนสูง ยึดติดกับวัตถุได้ดี ยากต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี และไม่เกิดปฏิกิริยาต่อร่างกายของมนุษย์ จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย อาทิเช่น ใช้ในการผลิตกาวย สารเคลือบผิว สารหล่อลื่น รวมไปถึงการนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์เพื่อผลิตอุปกรณ์การแพทย์เป็นต้น (Ledig, B. 2012)



ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane structure)

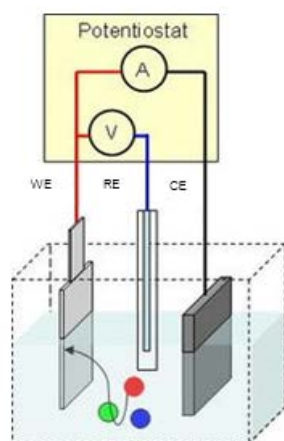
ที่มา: <http://www.allcocks.co.uk/blog/?p=48> สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม 2557

(ออนไลน์).

2.5 ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry; CV)

ไซคลิกโวลแทมเมตรี เป็นเทคนิคเคมีวิเคราะห์ทางไฟฟ้าที่อาศัยการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดเมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าแกขั้วและวัดกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปหลังเกิดปฏิกิริยาของสาร (ธานินทร์. 2555) ซึ่งขั้วอิเล็กโทรดนั้นประกอบไปด้วย 3 ขั้วคือขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode; WE) เป็นขั้วที่ให้สำหรับตรึงสารเคมี สารชีวโมเลกุลหรือสารชีวภาพต่างๆ เช่น แอนติบอดี เอ็มไซม์ กรดนิวคลีอิก เป็นต้น ขั้วไฟฟ้าใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กเพื่อให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับสารตัวอย่างน้อย ๆ ทำให้สามารถเกิดสภาวะโพลาริเซชันตลอดการวิเคราะห์ มักใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นโลหะเฉื่อย เช่น แพลทินัม หรือทองเป็นต้น ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode; RE) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้เทียบศักย์ไฟฟ้าที่ต้องให้กับขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงนี้จะมีค่าศักย์ที่แน่นอนไม่แปรหรือขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจรไม่ขึ้นกับส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ดีต้องมีส่วนประกอบคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อเก็บไว้และไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter Electrode; CE) ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเป็นขั้วที่รับพลังงานไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าใช้งานที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่แล้วส่งต่อพลังงานที่รับได้เข้าสู่

เครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า ภาพประกอบ 8 แสดงองค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 3 ขั้วจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)



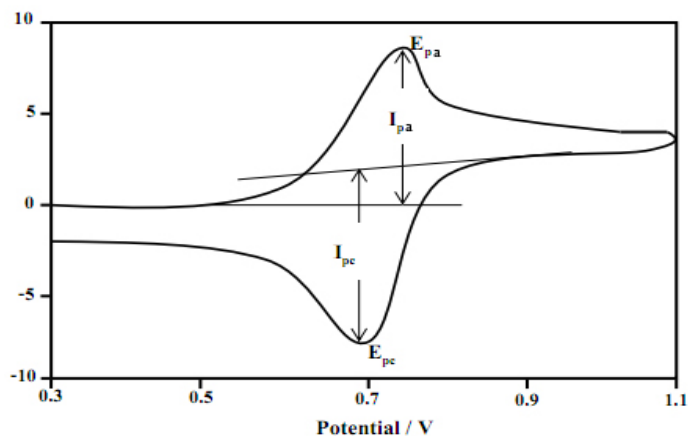
ภาพประกอบ 8 แสดงองค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ที่มา: <http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/11/cigarette-butt-inhibitor.html>

สืบค้นเมื่อวันที่ 18 กรกฎาคม 2557 (ออนไลน์).

การทำงานของ CV คือเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปที่ขั้วอิเล็กโทรดจะส่งผลทำให้ขั้วไฟฟ้าใช้งานมีค่าศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนบนผิวของขั้วไฟฟ้าใช้งานกับสารอิเล็กโทรไลต์ นั่นคือมีการให้หรือรับอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าใช้งานไปยังขั้วไฟฟ้าช่วย ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะถูกตรวจวัดโดยวงจรไฟฟ้าภายนอก ขนาดของกระแสมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยา ในระหว่างการสแกนศักย์ไฟฟ้า เมื่อนำมาพลอตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้า (Current) ในแนวแกนตั้งและศักย์ไฟฟ้า (Potential) ในแนวแกนนอน จะแสดงดังภาพประกอบ 9 ซึ่งเรียกกราฟนี้ว่า “ไซคลิกโวลแทมโมแกรม” (Cyclic Voltammogram) เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งอาจเกิดการรับหรือให้อิเล็กตรอน ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าทางด้านไหน เช่น เมื่อเพิ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทางด้านลบมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากขึ้น นั่นคือสารจะเกิดการให้อิเล็กตรอนเกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งพีก (Peak) ด้านบนเป็นตำแหน่งที่มีค่าศักย์สูงสุดเรียกตำแหน่งนี้ว่า Anodic Peak Potential (E_{pa}) ซึ่งมีค่าเป็นบวก ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการลดค่าความต่างศักย์ลงก็จะเกิดการรับอิเล็กตรอนเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชันพีกด้านล่างเป็นตำแหน่งที่มีค่าศักย์ต่ำสุดเรียกตำแหน่งนี้ว่า Cathodic Peak Potential (E_{pc}) ส่วนความสูงของพีกทางด้านบนคือกระแสไฟฟ้าเรียกว่า Anodic Peak Current (I_{pa}) และความสูงของพีก

ด้านล่างมีชื่อเรียกว่า Cathodic Peak Current (I_{pc}) ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารและตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าก็เป็นค่าเฉพาะของสารแต่ละตัวเหมือนกับเทคนิคอื่นๆ



ภาพประกอบ 9 แสดง cyclic voltammogram (ถา นินทรี. 2555)

2.6 อิเล็กโตรเคมีคอลลิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS)

อิเล็กโตรเคมีคอลลิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีหรือที่เรียกว่า AC Impedance เป็นเทคนิคที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า โดยการให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับขั้วไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้า จากกฎของโอห์มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

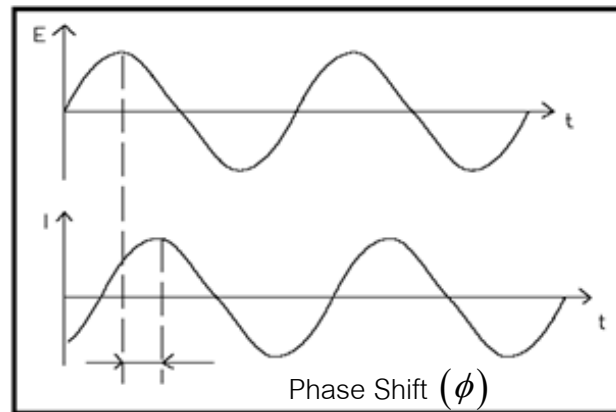
$$E = IZ \quad (2)$$

โดยที่ E คือ ค่าความต่างศักย์ มีหน่วยเป็น (N/C)

I คือค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (A)

Z คือค่าอิมพีแดนซ์ มีหน่วยเป็น (Ω)

โดยค่าอิมพีแดนซ์ (Z) จะเท่ากับความต้าน (R) ก็ต่อเมื่อค่าความต่างเฟสของศักย์ไฟฟ้าและกระแสมีค่าเท่ากับศูนย์ในไฟฟ้ากระแสสลับค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสจะแสดงในรูปของคลื่นไซน์ ดังแสดงในภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟส (phase shift; ϕ) ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (Burak, U. 2014)
ขนาดของอิมพีแดนซ์หาได้จากอัตราส่วนของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า สามารถเขียน ศักย์ไฟฟ้าได้ในรูปของฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลา

$$E_t = E_0 \sin(\omega t) \quad (3)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$

$$I_t = I_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

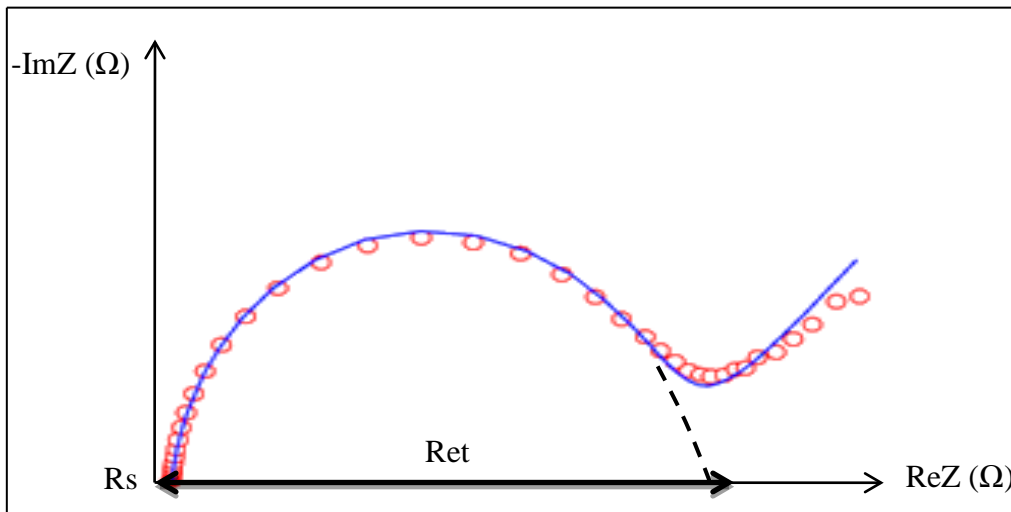
$$Z = \frac{E_t}{I_t} = \frac{E_0 \sin(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t + \phi)} = Z_0 \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \phi)} \quad (5)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler's relationship) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ดังแสดงใน สมการที่ 6

$$Z(\omega) = \frac{E}{I} = Z_0 \frac{e^{j\omega t}}{e^{j(\omega t - \phi)}} = Z_0 e^{j\phi} = Z_0 (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (6)$$

โดยที่ ω คือค่าความถี่เชิงมุม มีหน่วยเป็น (Radian : rad)
 ϕ คือค่าการเคลื่อนเฟส (Phase Shift)
 f คือค่าความถี่ มีหน่วยเป็น (Hz)

จากสมการที่ 6 สามารถพลอตกราฟได้ดังภาพประกอบ 11 ซึ่งในแนวแกนตั้งจะพลอตใน เทอมของค่าจริง (Real Part) และในแนวแกนนอนพลอตในเทอมของค่าจินตภาพ (Imaginary Part) ซึ่งกราฟนี้มีชื่อเรียกว่าไนควิสต์พลอต (Nyquist Plot)

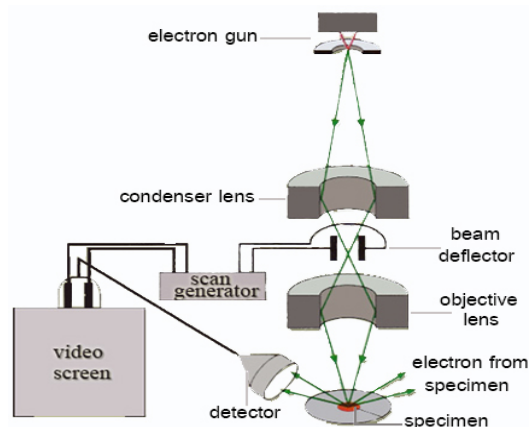


ภาพประกอบ 11 Nyquist plot (Burak, U. 2014)

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิด Field Emission (FESEM)

FE-SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีกำลังขยายสูงสุดถึง 1,000,000 เท่าจึงทำให้ FE-SEM สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโคร หรือ นาโนเมตรได้

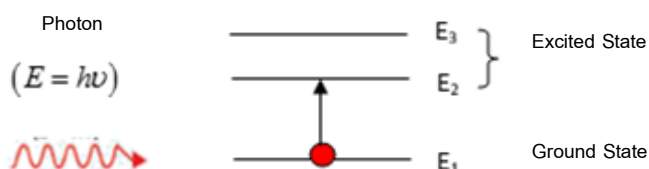
หลักการทำงานของ FE-SEM ดังแสดงในแผนภาพประกอบที่ 12 มีรายละเอียดดังนี้ เป็นอิเล็กตรอน (Electron Gun) จะทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้แก่ระบบ หลังจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้ผ่านมายังเลนส์รวมแสง (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสด้วยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการศึกษา เมื่อลำอิเล็กตรอนส่องกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) หลุดออกมาซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้จะถูกตรวจวัดและนำไปประมวลผลเป็นภาพแสดงต่อไป (J, M. H.; et al. 1997)



ภาพประกอบ 12 หลักการทำงานของ FESEM (J, M. H.; et al. 1997)

2.8 เครื่องมือ วิเคราะห์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)

เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านไปยังตัวอย่าง ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะสามารถผ่านตัวอย่างออกไปได้ โดยแสงที่ถูกดูดกลืนนั้นจะไปกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะถูกกระตุ้น (excited state) (อุสุมา. 2553)



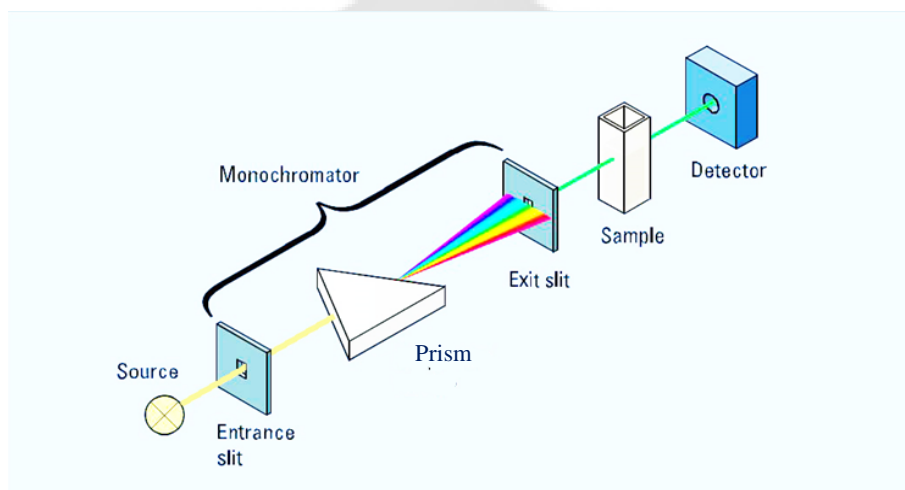
ภาพประกอบ 13 แสดงการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน (แม่น. 2534)

ในการวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนอาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) มีใจความว่า รังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (Parallel beam) และความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous solution) ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่าง (Concentration) และระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Pathlength) และเขียนเป็นรูปสมการดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon b C \quad (7)$$

โดยที่	A	คือ	ค่าการดูดกลืนแสง
	I_0	คือ	ค่าความเข้มของรังสีที่กระทบตัวกลาง
	I	คือ	ค่าความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางแล้ว
	b	คือ	ค่าความหนาของสารละลาย หรือระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง (cm)
	C	คือ	ค่าความเข้มข้นของตัวอย่าง (mol/L)
	ϵ	คือ	Molar absorptivity เป็นสมบัติอย่างหนึ่งของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง

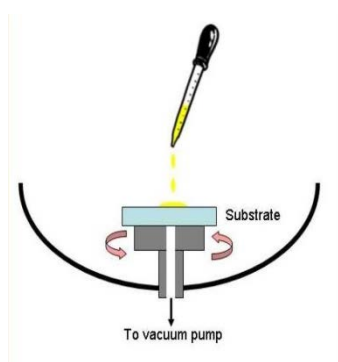
หลักการทำงานของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer คือเมื่อแหล่งกำเนิดแสงให้แสงในช่วง UV และช่วง Visible โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) ทำหน้าที่ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านมายังสลิตเข้า (Entrance Slit) แสงที่ผ่านมาเป็นแสงพหุโครเมติก จึงต้องทำให้เป็นแสงโมโนโครเมติกซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวโดยใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (Prism) หรือ เกรตติง (Grating) หลังจากนั้นแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งๆเท่านั้น จึงจะออกจากโมโนโครเมเตอร์โดยผ่านช่องสลิตออก (Exit Slit) มายังเซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง (Cell Sample) จากนั้นเครื่องตรวจวัด (Detector) จะทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืน และแสดงผลการวัดออกมา



ภาพประกอบ 14 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer (แม่นัน. 2534)

2.9 Spin Coating

เทคนิค Spin Coating ถูกใช้ในการทำแผ่นฟิล์มบาง โดยหลักการคือ การหยดสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มบางลงบริเวณจุดศูนย์กลางของฐานรอง (Substrate) ที่หมุนด้วยความถี่ค่าหนึ่ง (ที่ใช้กันทั่วไปประมาณ 1000 ถึง 3000 rpm) ซึ่งความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centripetal Acceleration) จากการที่ฐานรองหมุนนั้น ทำให้หยดของของเหลวเกิดการแผ่ออกตามทิศทางของแรงสู่ศูนย์กลางจนทั่วทั้งแผ่นของฐานรอง (จตุพล. 2548)

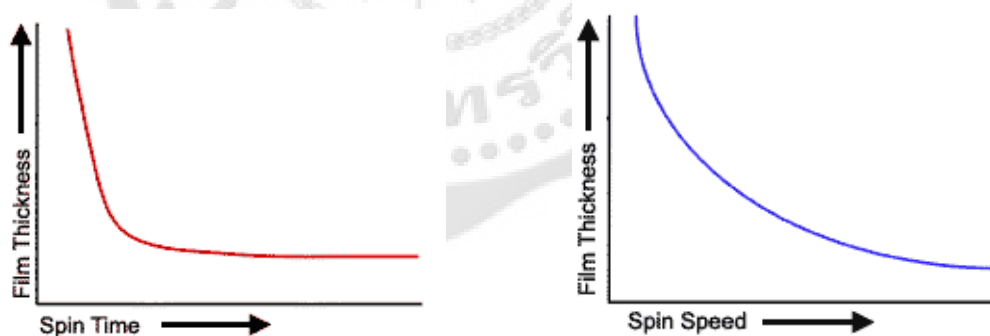


ภาพประกอบ 15 แสดงการหยดสารละลายลงบนฐานรองในการทำฟิล์มบางด้วยเทคนิค spin coating

ที่มา: <https://sites.google.com/site/arshadtu/spincoating>

สืบค้นเมื่อวันที่ 27 สิงหาคม 2557 (ออนไลน์).

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้มีปัจจัยที่ส่งผลต่อฟิล์ม เช่นสมบัติของสารละลายที่ใช้ทำฟิล์มบาง ได้แก่ ความหนืด (Viscosity) อัตราการแห้ง (Drying rate) ความหนาแน่น (Density) ความเข้มข้นสารละลาย (Concentration) ความตึงผิว (Surface Tension) เป็นต้น รวมถึงปัจจัยจากกระบวนการในการทำฟิล์มบาง เช่น ความเร็วรอบในการหมุน (Spin Speed) เวลาที่ใช้ในการหมุน (Spin Time) สิ่งเหล่านี้ล้วนมีผลต่อความหนาและคุณภาพ ของแผ่นฟิล์มบางที่ได้ทั้งสิ้น

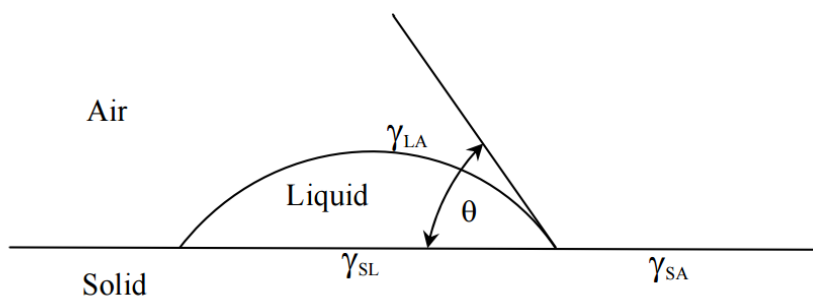


ภาพประกอบ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนา

ของฟิล์มกับเวลาและความเร็วในการหมุน (จตุพล. 2548)

2.10 มุมสัมผัส (Contact Angle)

Contact Angle คือการวัดมุมสัมผัสระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองเกาะติดกันโดยมุมสัมผัสของ ของเหลวนบนพื้นผิววัสดุขึ้นอยู่กับแรงดึงผิวที่ผิวรอยต่อของทั้ง 3 สถานะ คือ ที่ผิวรอยต่อของ ของเหลว/ ของแข็ง ของเหลว/อากาศ และ อากาศ/ของแข็ง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 17



ภาพประกอบ 17 แสดงมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิวที่ขึ้นอยู่กับแรงดึงผิวที่

บริเวณรอยต่อของน้ำ พื้นผิว วัสดุ และอากาศ (Danuta, S. 2012) มุมสัมผัสของหยดน้ำสามารถอธิบายได้โดยสมการของยัง (Young's Equation) ที่เกิดขึ้นที่ ผิวรอยต่อ ดังสมการที่ 9

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LA} \cos \theta \quad (8)$$

- โดยที่ γ_{SA} คือ แรงดึงผิวร่วม (Interfacial Tension) ที่รอยต่อระหว่างผิวของ พื้นผิววัสดุ/อากาศ
- γ_{SL} คือ แรงดึงผิวร่วม (interfacial tension) ที่รอยต่อระหว่างผิวของ พื้นผิววัสดุ/ของเหลว
- γ_{LA} คือ แรงดึงผิวร่วม (interfacial tension) ที่รอยต่อระหว่างผิวของ ของเหลว/อากาศ

ของเหลวที่ใช้ในการหยดบนพื้นผิววัสดุเพื่อวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิว นิยมใช้เป็นหยดน้ำซึ่งมีค่าความตึงผิวเป็น 72.8 mN/m ที่ 278 K ลักษณะของมุมสัมผัสของหยดน้ำจะบอกคุณสมบัติบนพื้นผิว 2 ลักษณะคือ พื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เนื่องจากมีแรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Cohesion Force) น้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลต่างชนิดกัน (Adhesion Force) เช่นโมเลกุลของน้ำกับพื้นผิวทำให้พื้นผิวมีแรงตึงผิวมาก คุณสมบัติการชอบน้ำของพื้นผิวยังขึ้นอยู่กับ แรงดึงดูด เนื่องจากความเป็นขั้วของน้ำ โมเลกุลน้ำของประกอบด้วยพันธะระหว่างไฮโดรเจน (ประจุบวก) และออกซิเจน (ประจุลบ) จะสร้างพันธะไอออนิก (Ionic Bond) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ดึงดูดกับโมเลกุลของพื้นผิวที่มีสมบัติความเป็นขั้วทำให้มุมสัมผัสของน้ำมีค่าน้อย (น้อยกว่า 90 องศา) และมุม

สัมผัสอีกลักษณะคือพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เนื่องจากพื้นผิวไม่มีสมบัติของความเป็นขั้ว (Non-polar) จะออกแรงผลักรวมกับความเป็นขั้วของน้ำออกไปทำให้มุมสัมผัสกับพื้นผิวมีค่ามาก (มากกว่า 90 องศา)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2546 (ค.ศ. 2003) Liu และคณะ ได้พัฒนาวัสดุโกลด์นาโนท่อนคาร์บอนไอโซเซโนเซอร์โดยการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสบนอิเล็กโทรดคาร์บอนเพสต์ (Carbon Paste Electrode) ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคนาโนทองคำ พบว่าอิเล็กโทรดนี้ให้ค่ารีดอกซ์พีค (Redox Peak) จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของเอนไซม์ โดยป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ -0.404 V และ -0.498 V ให้แก่อิเล็กโทรด จากนั้นวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านระหว่างอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับรีดอกซ์พีคของอิเล็กโทรดคาร์บอนเพสต์ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคนาโนทองคำ ทั้งนี้เป็นเพราะการปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กโทรดด้วยอนุภาคนาโนทองคำจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการตรึงเอนไซม์ ทำให้ค่ากระแสรีดักชันและออกซิเดชันที่วัดได้จากปฏิกิริยาของเอนไซม์มีค่าสูงขึ้น และจากค่ากระแสที่วัดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันของเอนไซม์เป็นการชี้ให้เห็นว่าการถ่ายเทอิเล็กตรอนสามารถเกิดขึ้นได้โดยตรงระหว่างเอนไซม์กับอิเล็กโทรดโดยปราศจากสารตัวกลาง เนื่องจากการตรึงเอนไซม์บนอนุภาคนาโนโลหะ นอกจากทำให้มีพื้นที่ผิวในการตรึงเอนไซม์เพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้อนุภาคโลหะมีความใกล้ชิดกับบริเวณเร่งของเอนไซม์ ส่งผลให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างบริเวณเร่งของเอนไซม์กับผิวหน้าอิเล็กโทรดลดลงอิเล็กตรอนจึงถูกส่งผ่านอนุภาคโลหะไปยังผิวหน้าอิเล็กโทรดอย่างรวดเร็ว (Liu, S.; et al. 2003)

ในปีเดียวกัน Khanna และคณะ ได้ศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนทองคำด้วยวิธีการรีดักชันทางเคมีของสารละลายกรดคลอโรอริกกับตัวรีดิวซ์ 2 ชนิด คือ Hydrazine Hydrate (HH) and Sodium Formaldehyde sulfoxylate (SFS) และใช้โพลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสเตบิลไลเซอร์ จากการทดลองพบว่า สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนทองคำ แสดงการดูดกลืนสูงสุดที่ 520-540 นาโนเมตร ซึ่งยืนยันได้ว่าเป็นแถบการดูดกลืนของอนุภาคนาโนทองคำ ขนาดของอนุภาคนาโนทองคำในรูปแบบฟิล์มถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าอนุภาคนาโนทองคำที่เตรียมได้มีขนาด 15 นาโนเมตร (Khanna, P.; et al. 2005)

ในปี พ.ศ. 2553 (ค.ศ. 2010) Pooja Devi และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์และการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวอิเล็กโทรดด้วยโพลิไดเมทิลซิลอกเซน - อนุภาคนาโนทองคำ (PDMS-AuNP) เพื่อใช้งานในไบโอเซนเซอร์ จากการศึกษพบว่าฟิล์ม PDMS ที่อยู่ในสารละลายกรดคลอโรอริก 18 ชั่วโมง ส่งผลให้ Au-PDMS คอมโพสิตมีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำสม่ำเสมอบนพื้นผิว และ

อนุภาคมีขนาดประมาณ 100-200 นาโนเมตร ในการประยุกต์ใช้งานในทางไบโอเซนเซอร์เพื่อศึกษาผล การจับกันระหว่าง Human Serum Albumin (HSA) และ Polyclonal Anti-HSA พบว่าสามารถ ตรวจวัดการตรวจสอบสารที่มีปริมาณเพียง 2.5 ไมโครกรัมของแอนติเจน ก็สามารถตรวจสอบได้ (Pooja, D.; et al. 2010)

และในปีเดียวกัน Wen-Ya Wu และคณะได้ทำการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพในการ ตรวจวัด Cardiac Troponin I ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ของโรคกล้ามเนื้อหัวใจตาย โดยใช้เทคนิคการตรวจจับสี (Colorimetric Detection) ร่วมกับการใช้ Silver Enhancement งานวิจัยนี้จะใช้ PDMS-AuNP เป็น วัสดุรองรับสารชีวภาพซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการตรวจวัด โดยขีดจำกัดของการตรวจวัดที่ได้ เป็น 0.01 ng/ml โดยในการทดสอบนั้น แอนติบอดีจะถูกตรึงบนพื้นผิว PDMS-AuNP และซีรัมอัลบูมิน (BSA) ถูกใช้เป็นตัวตัวปิดพื้นผิวเพื่อป้องกันการจับกันแบบไม่จำเพาะ และการตรวจวัดจะวัดจากความ เข้มของสีที่เกิดจากเทคนิค Silver Enhancement ซึ่งเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณของแอนติเจนที่ ตรวจวัดได้ (Wen, Y.; et al. 2010)



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

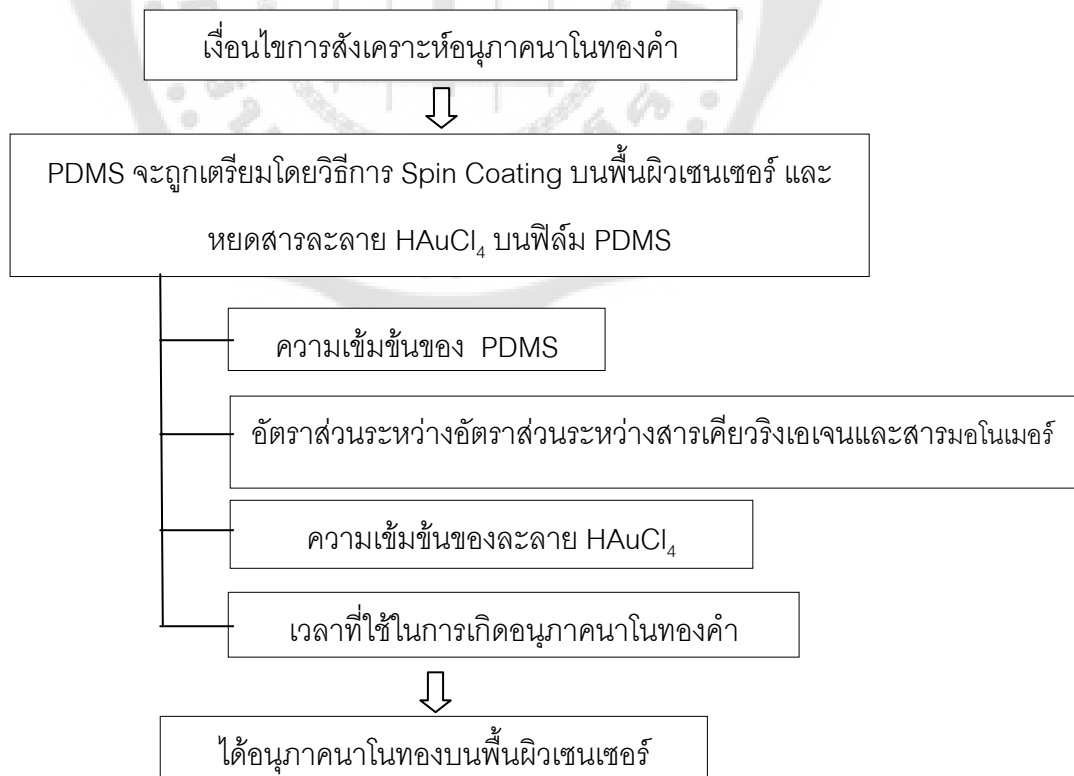
3.1 แผนการดำเนินงาน

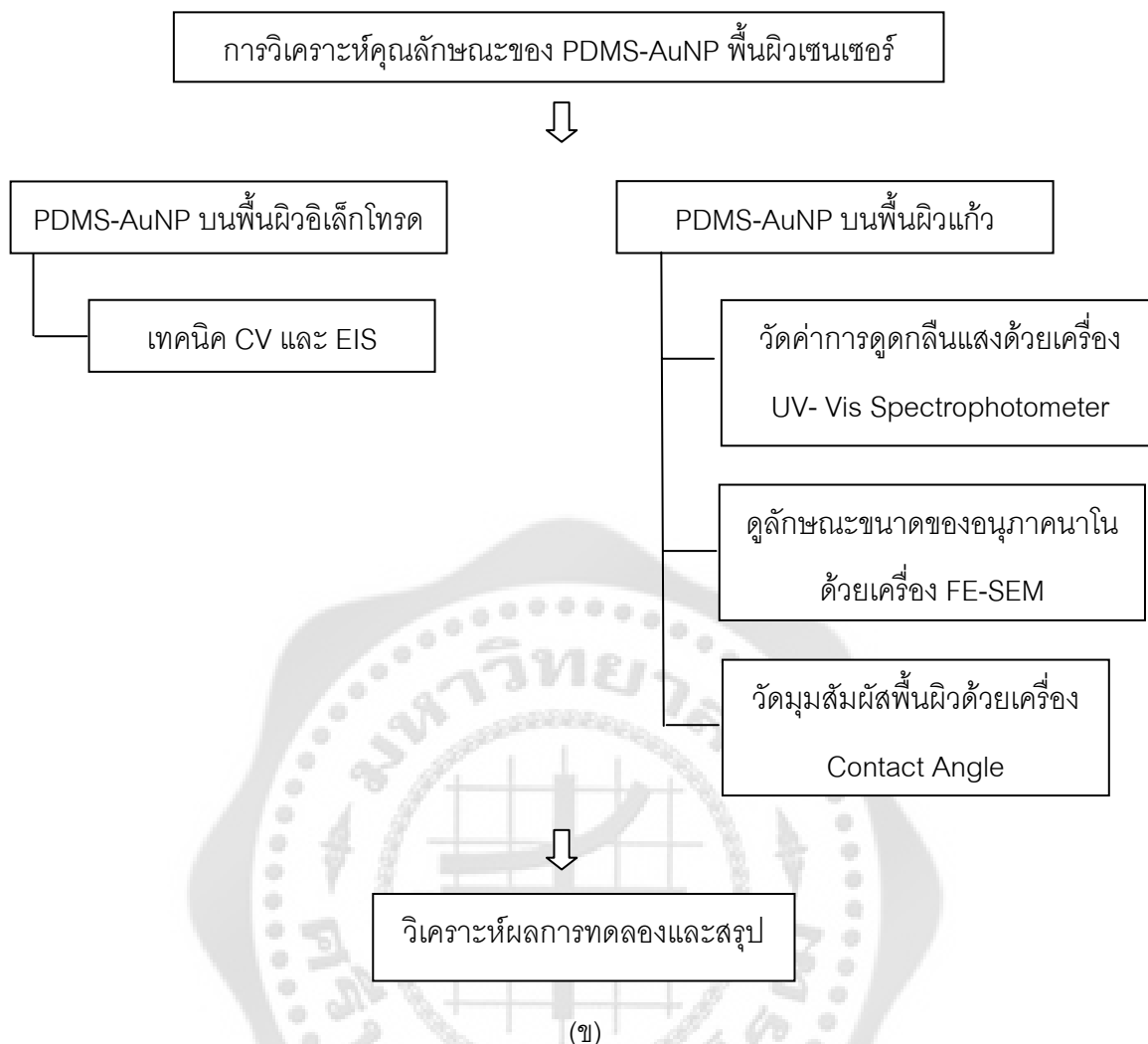
งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียม PDMS-AuNP และขั้นตอนการตรวจสอบขนาด PDMS-AuNP ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการเตรียม PDMS-AuNP เป็นขั้นตอนการหาเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ คือค่าความเข้มข้นของสาร PDMS ค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเตตระคลอไรด์ (HAuCl_4) และเวลาที่ใช้ในการเกิดอนุภาคนาโนทองคำ

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณลักษณะของ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้ ในเชิงเคมีไฟฟ้าจะใช้เทคนิค CV และเทคนิค EIS ในเชิงแสงจะวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV- Vis Spectrophotometer ตรวจสอบขนาดของอนุภาคโดยเครื่อง FE-SEM และวิเคราะห์สมบัติของพื้นผิวโดยการวัดมุมสัมผัสพื้นผิวด้วยเครื่อง Contact Angle

ขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์ PDMS-AuNP แสดงดังภาพประกอบที่ 18



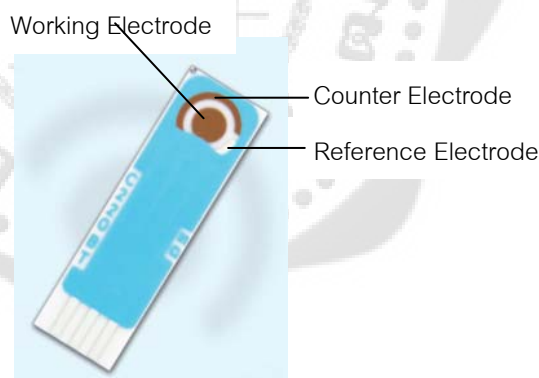


ภาพประกอบ 18 แผนภาพแสดง (ก) ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ (๗) ขั้นตอนการตรวจสอบคุณสมบัติของ PDMS-AuNP

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. น้ำปราศจากไอออน (Distilled Water, (DI)
2. Ethanol (C_2H_5OH) จากจากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
3. Potassium Dihydrogen Phosphate (KH_2PO_4) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
4. di-Sodium Acetate ($CH_3COONa \cdot 3H_2O$) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
5. Sodium Phosphate Monobasic ($NaH_2PO_4 \cdot H_2O$) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
6. Potassium Chloride (KCl) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
7. Propane (C_3H_8) จากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
8. Potassium Hexacyanoferrate(III) ($K_3Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$) จากบริษัท Sigma-Aldrich สิงคโปร์

9. Potassium Ferrocyanide(II) ($K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$) จากบริษัท Sigma-Aldrich สิงคโปร์
10. Silicone Elastomer Base จากบริษัท Dow Corning ประเทศไทย
11. Silicone Elastomer Curing agent จากบริษัท Dow Corning ประเทศไทย
12. Gold (III) Chloride Hydrate ($HAuCl_4$) จากบริษัท Sigma-Aldrich สิงคโปร์
13. ถู่มือยางแบบไม่มีแป้ง
14. เครื่องซั่งสารเคมี
15. ไมโครปิเปต
16. บีกเกอร์
17. แท่งแก้วคนสาร
18. เครื่องอัลตราโซนิก
19. เครื่องผสมสาร
20. กระจกสไลด์
21. Gold screen Printed Electrode (AuSPE) จากบริษัท DropSense สเปน
 - ขั้ว Working และ Reference พื้นผิวเป็นทอง (Au)
 - ขั้ว Counter พื้นผิวเป็นซิลเวอร์ ซิลเวอร์คลอไรด์ ($Ag/AgCl$)



ภาพประกอบ 19 Gold Screen-Printed Electrodes ; AuSPE

22. เครื่อง Potentiostat รุ่น μ -Autolab with FRA2 (ECO Chemie)
23. เครื่อง UV- Vis Spectrophotometer รุ่น UV WINLAB version 2.85
24. เครื่อง Contact Angle by Home-Made Contact Angle Analysis Via CCD Camera.
25. เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)
26. เครื่อง Spin Coating by Home-Made

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียม PDMS

1. เตรียม PDMS โดยการผสมสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ ในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 1 โดยที่ η เขียนแทนอัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ภาชนะที่ใช้เตรียมควรเป็นพลาสติกหรือภาชนะที่ใช้แล้วทิ้ง เพราะเมื่อสารทั้งสองชนิดผสมกันแล้วเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการแข็งตัวทำให้ติดภาชนะ

ตาราง 1 แสดงอัตราส่วนระหว่างอัตราส่วนระหว่างสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์

Silicone Elastomer Base (ml)	Silicone Elastomer Curing Agent (ml)	η
10	0.6	0.06
10	1.0	0.1
10	1.5	0.15
10	1.8	0.18
10	2.0	0.2

2. นำ PDMS ที่เตรียมได้ในแต่ละอัตราส่วนมาละลายในสารละลายโพเพน ให้มีความเข้มข้นที่ต่างกัน ดังนี้ 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 15, 20% (w/v) (Attila, G.; et al. 2013) เนื่องจากต้องการฟิล์มของ PDMS ที่มีความบางในการนำมาเคลือบลงบน AuSPE สำหรับสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำลงบนอิเล็กโทรด จากนั้นนำสารละลายไปกวนบนเครื่อง Hot Plate Stirrer เป็นเวลา 15 นาที เพื่อผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3. นำสาร PDMS ที่ละลายในสารละลายโพเพน ที่ความเข้มข้นต่างๆ มาเคลือบลงบน AuSPE และกระจกสไลด์ด้วยเครื่อง Spin Coating ที่ความเร็วรอบ 1,000 rpm เป็นเวลา 60 วินาที โดยปริมาตรของ PDMS ที่เคลือบบนกระจกสไลด์และ AuSPE คือ 100 และ 10 μ l ตามลำดับ เมื่อทำการเคลือบ PDMS ลงบน AuSPE และกระจกสไลด์แล้วจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเคียวริงเอเจนและมอโนเมอร์ใน PDMS

3.3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ

1. เตรียมสารละลาย HAuCl₄ ที่ความเข้มข้น 5, 10, 20 และ 40 mg/ml โดยการเจือจางในน้ำ DI
2. หยดสารละลาย HAuCl₄ ลงบนกระจกสไลด์ และ AuSPE ที่เคลือบด้วย PDMS โดยใช้ปริมาตร 200 และ 20 μ l ตามลำดับ จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง

3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

นำชิ้นงานที่เคลือบด้วย PDMS ตามเงื่อนไขที่ต้องการเรียบร้อยแล้วมาวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

3.4.1 วัดค่ากระแสไฟฟ้าด้วยเครื่อง Potentiostat

วัดกระแสไฟฟ้าด้วยเทคนิค EIS และ CV ถูกวัดโดยใช้เครื่อง Potentiostat รุ่น μ -Autolab with FRA2 (ECO Chemie) ทุกการทดลองได้ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 1 °C) การวัด EIS และ CV โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้วในสารละลาย [Fe(CN)₆³⁻] / [Fe(CN)₆⁴⁻] ที่ความเข้มข้น 5 mM สำหรับการวัด CV ทำได้โดยให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าในช่วง -0.25 ถึง 0.5 V ใช้อัตราการสแกน 100 mV/s จำนวน 5 รอบสำหรับการตรวจสอบ PDMS และ PDMS-AuNP ส่วนการวัด EIS ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นค่าคงที่ 10 mV และถูกบันทึกในช่วงความถี่ 0.1 - 10,000 Hz ผลการวัดความต้านทานได้ถูกนำเสนอในรูปแบบของ Nyquist plot ที่พล็อตระหว่างส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าความต้านทาน

3.4.2 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV- Vis Spectrophotometer

วัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์ด้วยเครื่อง UV- Vis Spectrophotometer เพื่อดูค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไขต่างๆ โดยความยาวคลื่นที่วัดอยู่ระหว่างช่วง 400-800 nm

3.4.3 วัดมุมสัมผัสพื้นผิวด้วยเครื่อง Contact Angle

ในการศึกษามุมสัมผัสของพื้นผิวนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อพิสูจน์ว่าพื้นผิวนั้นมี PDMS และ PDMS-AuNP เคลือบอยู่บนพื้นผิวจริงหรือไม่ การวัดมุมสัมผัสทำได้โดยปล่อยหยดน้ำปริมาตร 5 μ L ลงสู่กระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย PDMS และ PDMS-AuNP กล้องของเครื่องวัดมุมสัมผัส (contact angle measurement) ของหยดน้ำจะทำการถ่ายรูปของหยดน้ำที่ทำมุมกับพื้นผิว ใช้โปรแกรม Image J ทำการคำนวณค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำจากรูปที่ถ่ายและนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.3 คุณลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำด้วยเครื่อง FE-SEM

คุณลักษณะและขนาดของ PDMS-AuNP ที่เงื่อนไขต่างๆด้วยเครื่อง FE-SEM โดยนำ AuSPE และกระจกสไลด์ที่เคลือบ PDMS-AuNP มาดูลักษณะของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้

3.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณะวิทยาศาสตร์ (วิทยาเขตพญาไท) มหาวิทยาลัยมหิดล



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

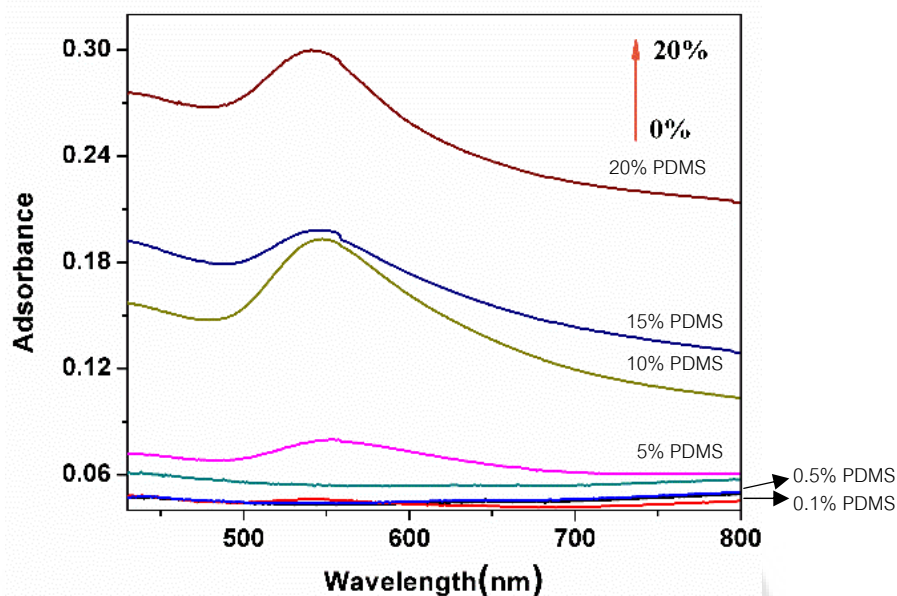
การทดลองสังเคราะห์ PDMS-AuNP ลงบนกระจกสไลด์และพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำ ออกแบบการทดลองโดยการหาความเข้มข้นของ PDMS, หาอัตราส่วนระหว่างสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์, หาค่าความเข้มข้นของสารละลาย สารละลายไฮโดรเจนเตตระคลอโรอโรเรต และเวลาที่ใช้ในการเกิดอนุภาคนาโนทองคำเมื่อได้ชิ้นงานในแต่ละเงื่อนไขแล้วนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้ ในเชิงเคมีไฟฟ้าจะใช้เทคนิค CV และเทคนิค EIS, ในเชิงแสงจะวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV- Vis Spectrophotometer และตรวจสอบขนาดของอนุภาคโดยเครื่อง FE-SEM ผลการทดลอง แสดงในหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์ ด้วยเครื่อง UV- Vis Spectrophotometer

4.1.1 ผลของความเข้มข้นของ PDMS ที่ใช้สังเคราะห์ PDMS-AuNP

ในการศึกษาความเข้มข้นของ PDMS ที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ PDMS-AuNP นั้น กระทำโดยการเคลือบ PDMS ที่ความเข้มข้นต่างๆ บนกระจกสไลด์ แล้ววัดมุมสัมผัสพื้นผิวด้วย Contact Angle เพื่อตรวจสอบว่าพื้นผิวกระจกสไลด์มีสาร PDMS เคลือบอยู่จริง จากนั้นนำสารละลาย ไฮโดรเจนเตตระคลอโรอโรเรต (HAuCl_4) ที่ความเข้มข้น 20 mg/ml หยดลงบนกระจกสไลด์ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง และนำชิ้นงานที่ได้มาตรวจวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง UV- Vis Spectrophotometer เพื่อดูค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ดังภาพประกอบที่ 20 และตารางที่ 2 แสดงตำแหน่งของ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 0.1 – 1% ของ PDMS ไม่ปรากฏ พีคใดๆขึ้น แสดงให้เห็นว่าสาร PDMS มีความเข้มข้นน้อยเกินไป หลังทำปฏิกิริยากับสารละลาย HAuCl_4 จึงส่งผลให้มองเห็นสีของอนุภาคนาโนทองคำที่ได้ไม่ชัดเจน แต่เมื่อความเข้มข้นของ PDMS มี ค่าสูงขึ้นตั้งแต่ 5 – 20% (w/v) จะให้ค่า λ_{max} เท่ากับ 555 547 545 และ 541 nm ตามลำดับ ซึ่งเป็น ความยาวคลื่นของแสงสีเขียว ส่งผลให้มองเห็นสีของอนุภาคนาโนทองคำเป็นสีม่วงแดง แสดงดัง ภาพประกอบที่ 21 ซึ่งแต่เดิมพบว่าทองคำก่อนโดยทั่วไปจะมองเห็นเป็นสีทอง เนื่องจากทองคำก่อนถูก ดูดกลืนแสงสีน้ำเงินในช่วงความยาวคลื่น 450 – 500 nm จึงทำให้มองเห็นทองคำก่อนเป็นสีทองและ เมื่อทองคำมีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตร จะเกิดปรากฏการณ์ เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์ ขึ้นเนื่องจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกัน (Skrabalak, S.; et al.

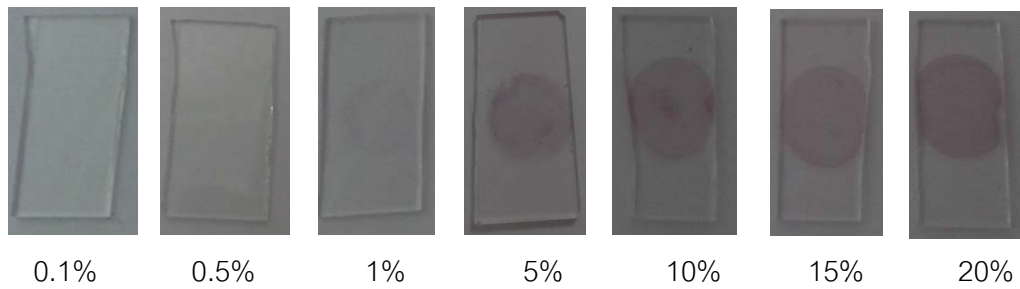
2008) ส่งผลให้การดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจึงทำให้มองเห็นเป็นสีม่วง และจากการทดลองยังสอดคล้องกับการรายงานผลของ Xiaohua Huang และคณะ ที่กล่าวว่าอนุภาคนาโนทองคำขนาดประมาณ 1 – 100 nm จะมีตำแหน่ง λ_{max} ที่ช่วงความยาวคลื่น 520 – 570 nm (Xiaohua.H.;2010)



ภาพประกอบ 20 ผลการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่ค่าความเข้มข้นของ PDMS ต่างกัน

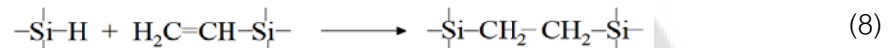
ตาราง 2 ตำแหน่ง λ_{max} ของ PDMS-AuNP ที่ค่าความเข้มข้น PDMS ต่างกัน

PDMS (%)	λ_{max} (nm)
0.1	-
0.5	-
1.0	-
5.0	555 ± 1.41
10	547 ± 0.71
15	545 ± 2.12
20	541 ± 0.71

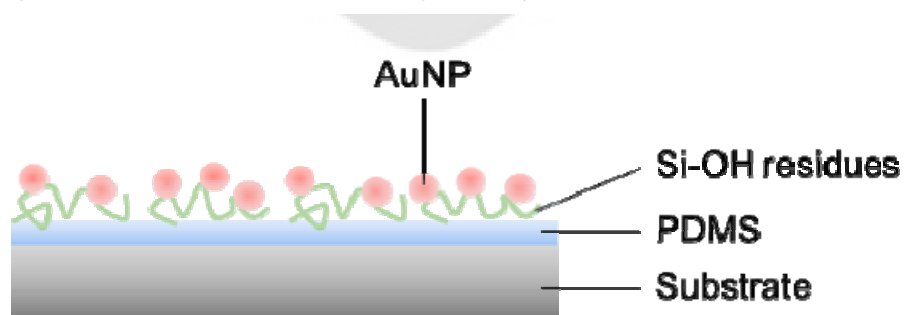
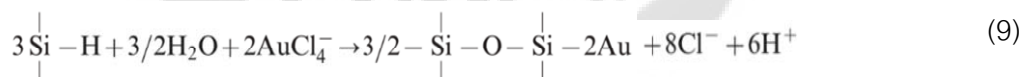


ภาพประกอบ 21 แสดง PDMS-AuNP ที่ค่าความเข้มข้นของ PDMS 0.1 – 20% (w/v)

สำหรับปฏิกิริยาการเกิด PDMS-AuNP นั้นเกิดจากการเชื่อมประสานกันของ PDMS จากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันของซิลิกอนไฮไดรด์ (Silicon Hydride; Si-H) ในสารเคียวริงเอเจน (Curing Agent) และหมู่ฟังก์ชันของไวนิล (Vinyl; Si-CH=CH₂) ในสารมอโนเมอร์ (Monomer) ซึ่งสารทั้ง 2 จะทำปฏิกิริยากันดังสมการ

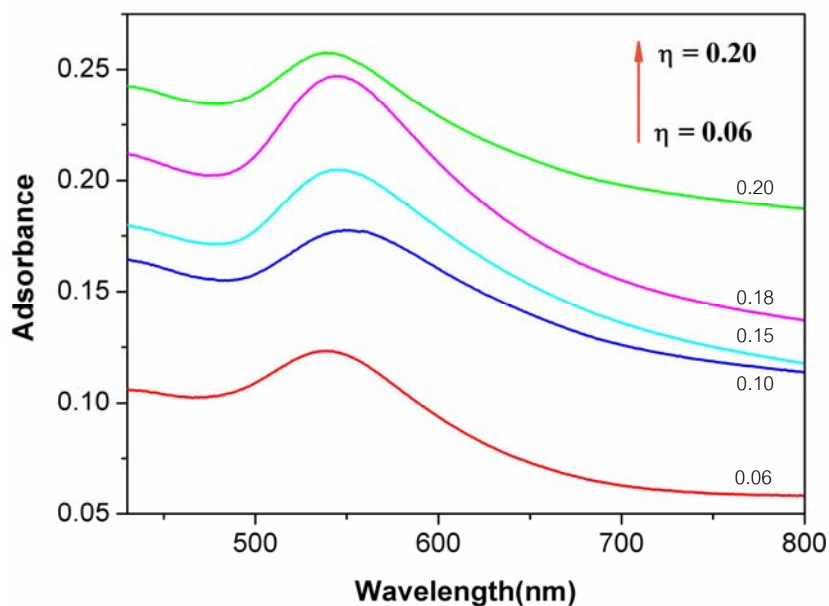


หลังจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของซิลิกอนไฮไดรด์ในสารเคียวริงเอเจนเหลืออยู่ เมื่อนำสารละลาย HAuCl₄ มาหยดลงบนพื้นผิว PDMS จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมประสานระหว่างไอออนทองและหมู่ฟังก์ชันของซิลิกอนไฮไดรด์เกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำ (Qing, Z.; et al. 2008) ดังแสดงในสมการ



ภาพประกอบ 22 แสดงแผนผังการสังเคราะห์ PDMS-AuNP

4.1.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ (η)



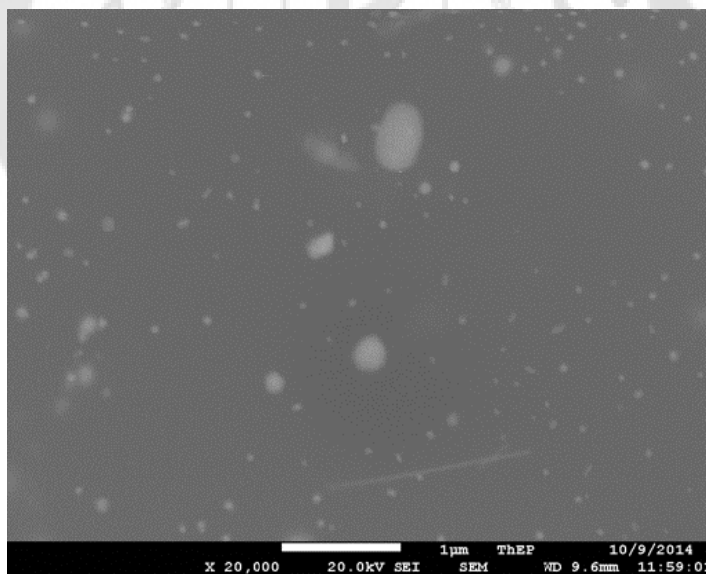
ภาพประกอบ 23 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่ค่า อัตราส่วนระหว่าง ระหว่างสาร เคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ต่างกัน

ตาราง 3 ตำแหน่ง λ_{max} ของ PDMS-AuNP ที่ค่าอัตราส่วนระหว่าง ระหว่างสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ต่างกัน

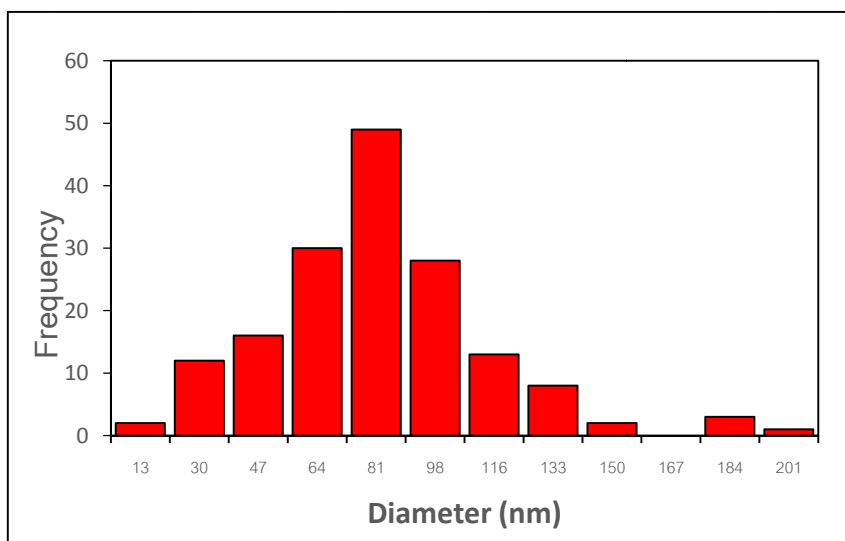
อัตราส่วนระหว่างระหว่างสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ (η)	λ_{max}
0.06	537 ± 1.41
0.10	538 ± 3.54
0.15	545 ± 0.71
0.18	549 ± 1.41
0.20	545 ± 2.83

ภาพประกอบที่ 23 แสดงผลของอัตราส่วนระหว่างสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์ใน PDMS ที่อัตราส่วนดังนี้ 10:0.6, 10:1, 10:1.5, 10:1.8 และ 10:2 (w/w) หรือเขียนแทนเป็น $\eta = 0.6, 1.0, 1.5, 1.8$ และ 2.0 โดยใช้ความเข้มข้นของ PDMS ที่ 20% (w/v) และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าการดูดกลืนแสง (Adsorbance) มีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า η มีค่าสูงขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าชั้นงานที่วัดมีปริมาณความเข้มข้นของสารสูงขึ้น และจากตารางที่ 3 แสดงค่า λ_{max} ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่า η สูงขึ้น มีผลมาจากเมื่อสารเคียวริงเอเจนทำปฏิกิริยากับสารมอโนเมอร์แล้วมีปริมาณของ Si-H หลังการทำปฏิกิริยาเหลือเป็นจำนวนมากเมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลาย HAuCl₄ จึงเกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อนำ PDMS-AuNP ที่ค่า η ต่างๆ ไปวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค FE-SEM เพื่อดูขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

ภาพประกอบที่ 24 แสดงลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.06$ พบว่าขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กบ้างใหญ่บ้าง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่เฉลี่ย 74.62 nm โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนทองคำที่ได้นั้นมีความถี่มากที่สุดที่ช่วง 64-81 nm ดังแสดงในภาพประกอบที่ 25

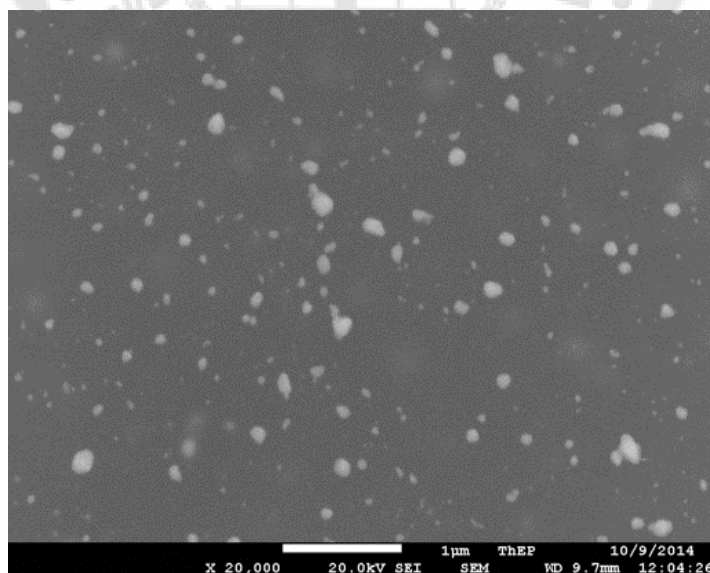


ภาพประกอบ 24 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.06$

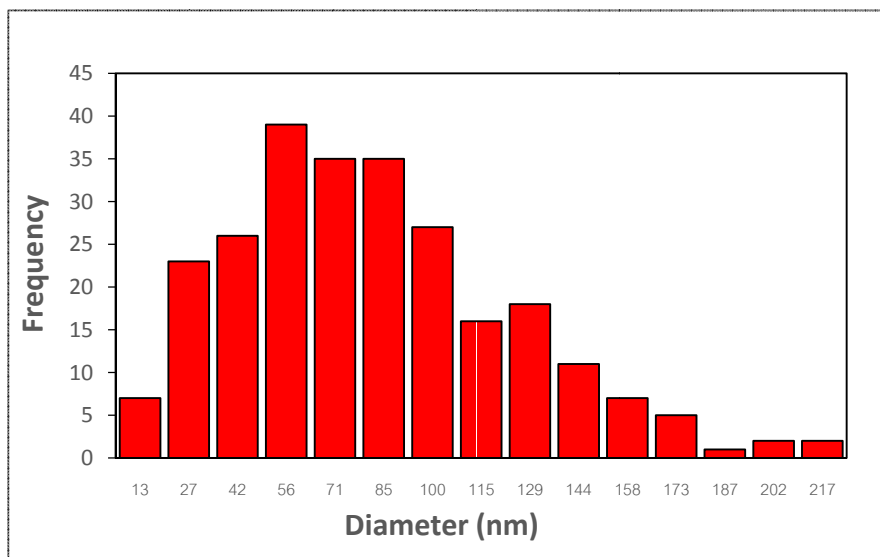


ภาพประกอบ 25 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนนาโนทองคำ ที่ $\eta = 0.06$

ภาพประกอบที่ 26 แสดงลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.1$ พบว่าอนุภาคนาโนทองคำมีลักษณะเป็นทรงกลมมีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 76.12 nm โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนทองคำที่ได้นั้นมีค่ามากที่สุดที่ช่วง 42-56 nm ดังแสดงในภาพประกอบที่ 27

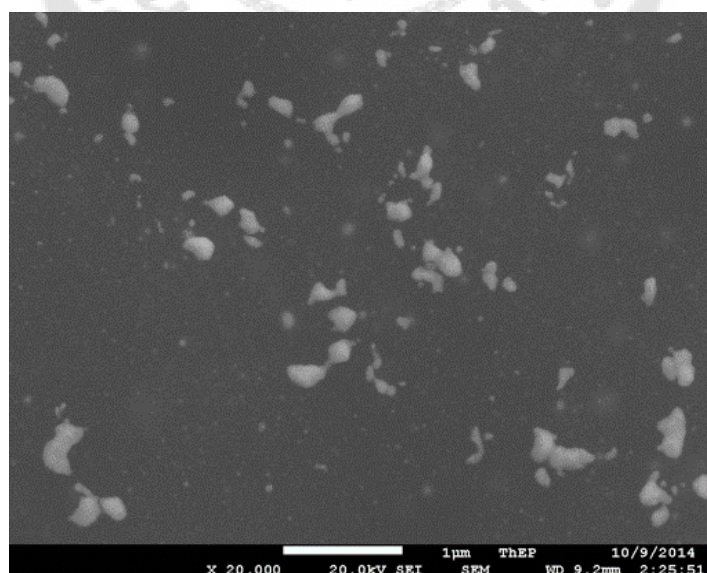


ภาพประกอบ 26 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.1$

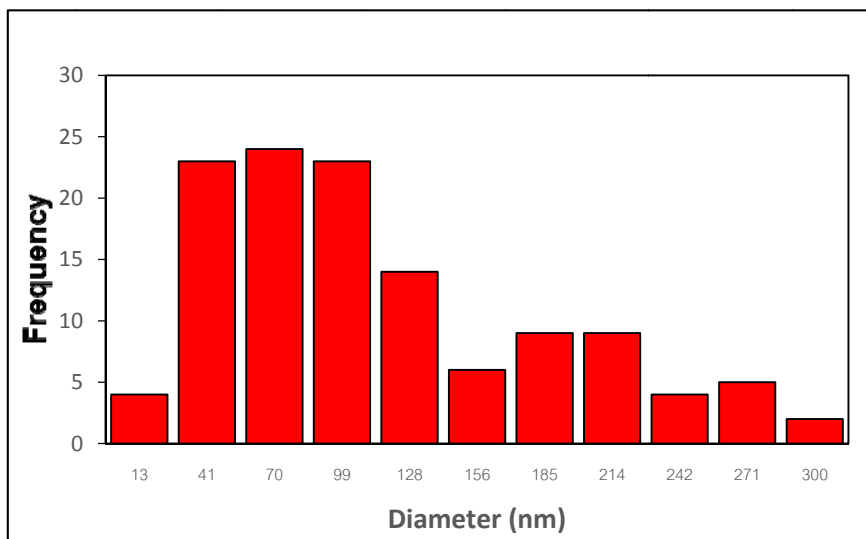


ภาพประกอบ 27 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.1$

ภาพประกอบที่ 28 แสดงลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.15$ อนุภาคนาโนทองคำมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.10$ และมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมวงรี ห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 100.14 nm โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนทองคำที่ได้นั้นมีความถี่มากที่สุดที่ช่วง 41-70 nm ดังแสดงในภาพประกอบที่ 29

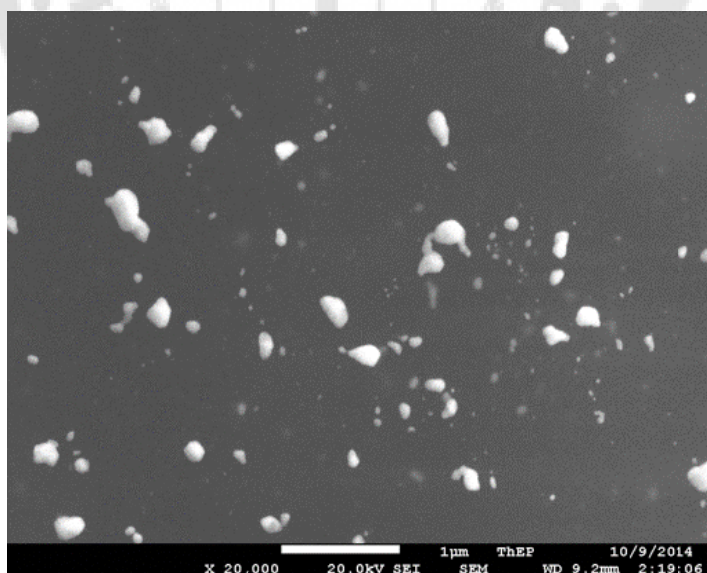


ภาพประกอบ 28 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.15$

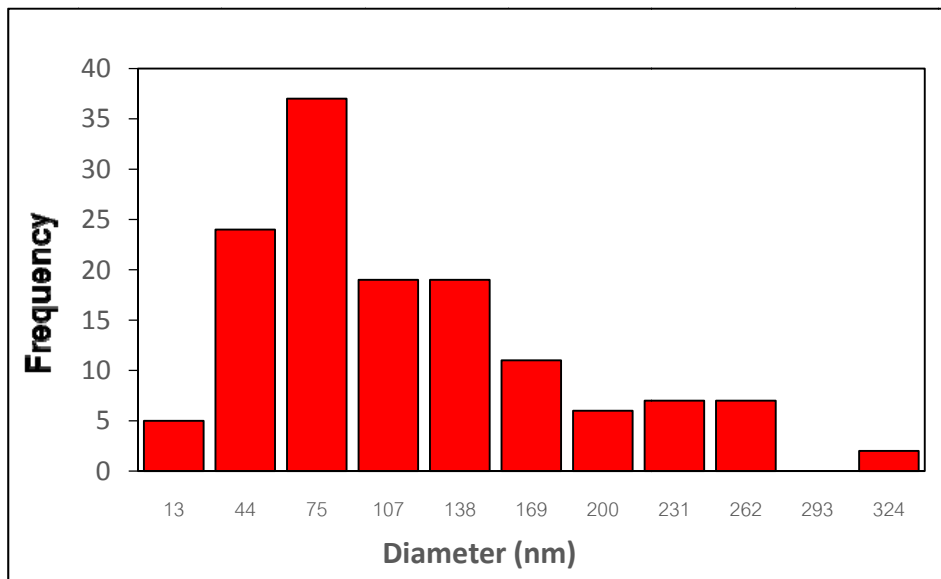


ภาพประกอบ 29 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.15$

ภาพประกอบที่ 30 แสดงลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.18$ อนุภาคนาโนทองคำที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะรูปร่างคล้ายกับอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.15$ แต่ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 103.78 nm โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนทองคำที่ได้ นั้นมีความถี่มากที่สุดที่ช่วง 44-75 nm ดังแสดงในภาพประกอบที่ 31

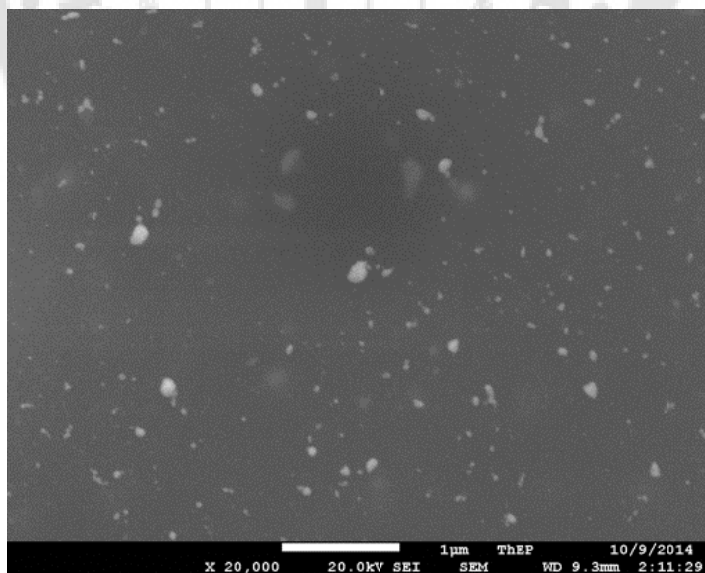


ภาพประกอบ 30 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.18$

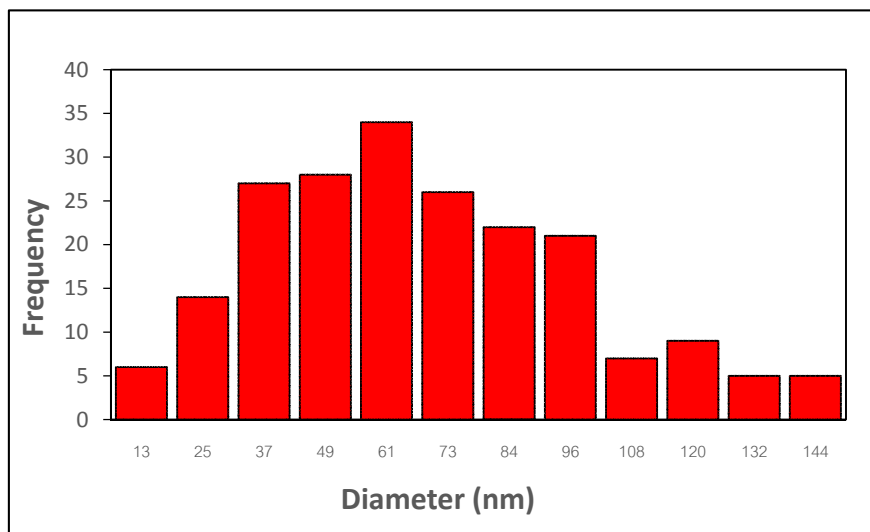


ภาพประกอบ 31 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.18$

ภาพประกอบที่ 32 แสดงลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.2$ อนุภาคมีลักษณะรูปร่างเป็นวงกลม วงรี สามเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 64.10 nm โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนทองคำที่ได้นั้นมีความถี่มากที่สุดที่ช่วง 49-61 nm ดังแสดงในภาพประกอบที่ 33



ภาพประกอบ 32 ลักษณะและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.20$



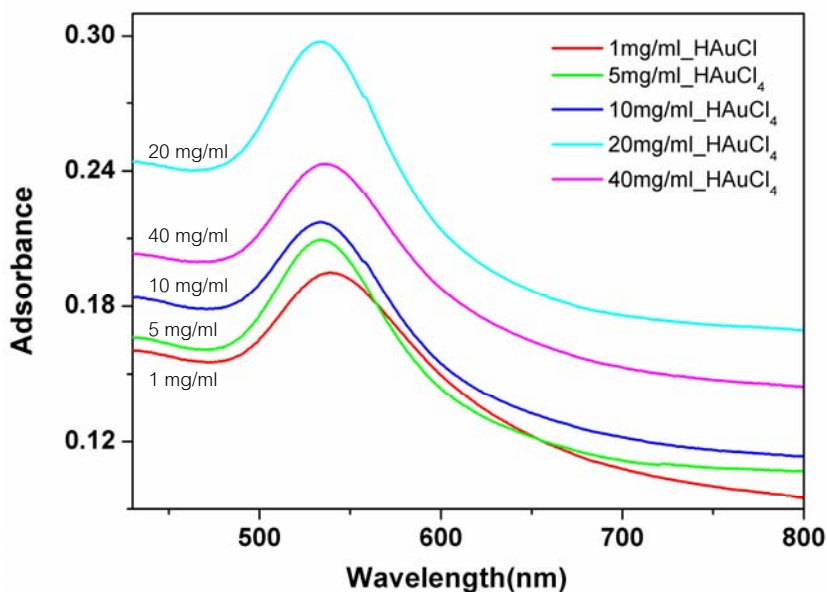
ภาพประกอบ 33 ฮิสโตแกรมแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนทองคำที่ $\eta = 0.2$

จากการวิเคราะห์การวัดการดูดกลืนแสงและคุณลักษณะขนาดของอนุภาคนาโนทองคำด้วย FE-SEM ที่ค่า η ต่างๆ นั้นให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน นั่นคือเมื่อสารเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์มีค่าอัตราส่วนสูงขึ้น ตำแหน่ง λ_{max} จะมีค่าความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น นั่นเป็นเพราะขนาดของอนุภาคนาโนทองคำมีขนาดใหญ่ขึ้น และผลการทดลองที่ได้ยังสอดคล้องกับการรายงานผลของ ชิง จาง และคณะ ที่กล่าวว่าอัตราส่วนของเคียวริงเอเจนและสารมอโนเมอร์มีผลต่อรูปร่างและขนาดของอนุภาคนาโนทองคำ โดยขนาดของอนุภาคจะใหญ่ขึ้นเมื่อค่า η สูงขึ้นและมีรูปร่างเปลี่ยนไป เช่น สามเหลี่ยม ห้าเหลี่ยม วงรี เป็นต้น (Qing, Z.; et al. 2008) จากผลการทดลองพบว่าที่ $\eta = 0.10$ ให้ขนาดของอนุภาคนาโนทองคำที่เล็กและมีการกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังนั้นอัตราส่วนที่ $\eta = 0.10$ จึงถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษาการสังเคราะห์ PDMS-AuNP ในขั้นตอนต่อไป แต่สำหรับที่อัตราส่วน $\eta = 0.2$ ค่า λ_{max} ให้ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับอัตราส่วนอื่นนั้นอาจมีผลมาจากความคลาดเคลื่อนระหว่างการเตรียมฟิล์ม PDMS

4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเตตระคลอไรด์ (HAuCl_4) ที่ใช้สังเคราะห์ PDMS-AuNP

ภาพประกอบที่ 34 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลาย HAuCl_4 ที่ความเข้มข้น 1, 5, 10, 15 และ 20 mg/ml หยดบน 20% (w/v) PDMS ที่อัตราส่วน $\eta = 0.1$ จากการทดลองพบว่าค่า Adsorbance มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย HAuCl_4 มีความเข้มข้นสูง และมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้น 20 mg/ml ทั้งนี้เนื่องจาก PDMS ที่ความเข้มข้น 20% (w/v) ให้ฟิล์มที่ค่อนข้างบาง คือประมาณ 4 μm (โดยใช้

อัตราการ Spin Coating ที่ 1000 rpm) (John, H.; et al. 2009) เมื่อฟิล์ม PDMS ทำปฏิกิริยากับ สารละลาย HAuCl₄ ที่ความเข้มข้นต่างๆ และเกิดสภาวะอิ่มตัว (Saturation) ที่ความเข้มข้น 20 mg/ml และเมื่อพิจารณาค่า λ_{max} จากตารางที่ 4 พบว่าที่ความเข้มข้น 20 mg/ml ปรากฏค่า λ_{max} เท่ากับ 532 nm ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นแสงน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้น 20 mg/ml ของสารละลาย HAuCl₄ เพียงพอแล้วสำหรับการทำปฏิกิริยากับสาร Si-H ในสารเคียวริงเอเจนแล้วเกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำ



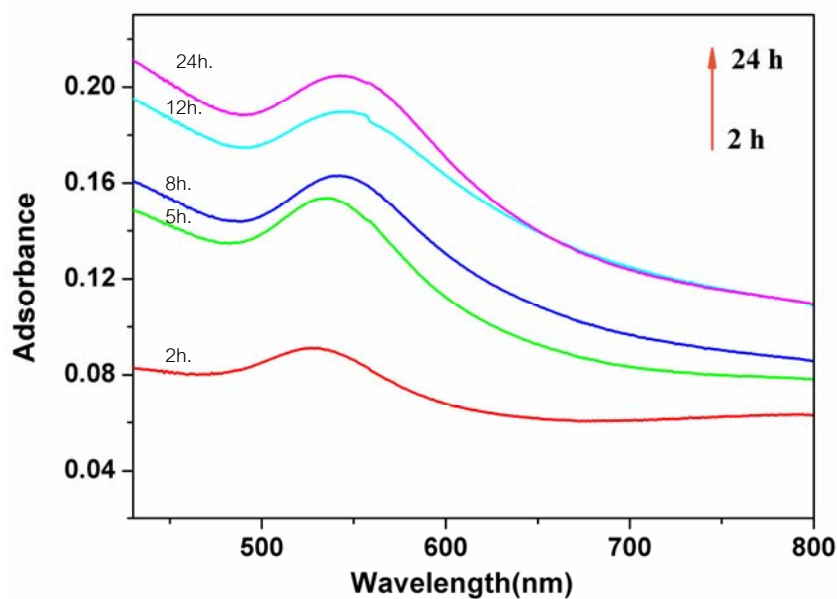
ภาพประกอบ 34 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่ความเข้มข้นของสารละลาย HAuCl₄ ต่างกัน

ตาราง 4 ตำแหน่ง λ_{max} ของ PDMS-AuNP ที่ความเข้มข้นของสารละลาย HAuCl₄ ต่างกัน

สารละลายสารละลายไฮโดรเจนเตตระคลอไรด์ (mg/ml)	λ_{max} (nm)
1	539 ± 1.41
5	533 ± 4.24
10	534 ± 0.71
20	532 ± 0.71
40	539 ± 2.12

4.1.4 ผลของเวลาสำหรับการสังเคราะห์ PDMS-AuNP

ภาพประกอบที่ 35 แสดงผลของเวลาสำหรับการสังเคราะห์ PDMS-AuNP ที่เวลาต่างกัน โดยใช้ความเข้มข้นของ PDMS ที่ 20% (w/v) อัตราส่วน $\eta = 0.1$ และความเข้มข้นของสารละลาย HAuCl₄ ความเข้มข้น 20 mg/ml ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลานานขึ้นค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าสูงขึ้นนั่นแสดงว่าความเข้มแสงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5 พบว่าค่า λ_{max} ที่ได้มีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลานานขึ้นปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างสาร Si-H และสารละลาย HAuCl₄ เกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pooja Devi และเพื่อนร่วมงานที่รายงานว่าเมื่อถึงระยะเวลาในการบ่ม (Incubation Time) สารถานขึ้นจะทำให้ไอออนของสารละลาย HAuCl₄ ถูกรีดิวซ์ด้วยสาร Si-H และเกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Pooja, D.;et al. 2010)



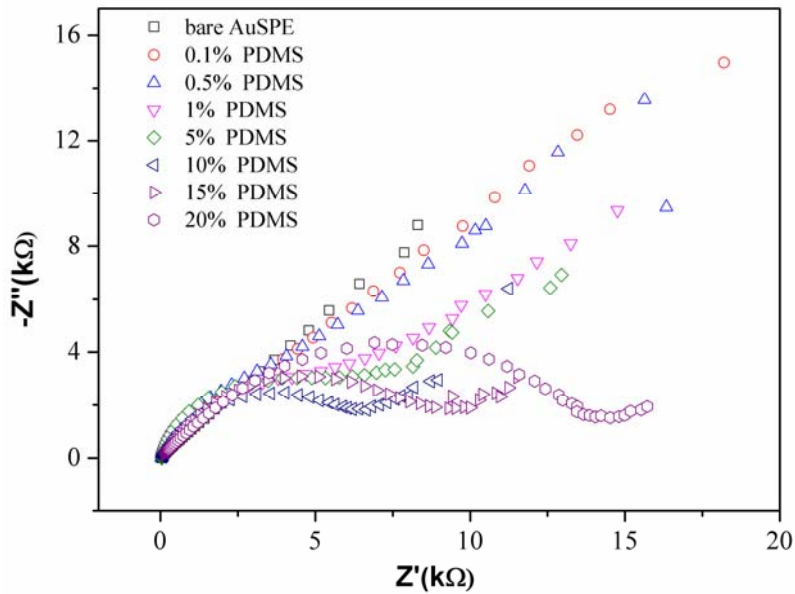
ภาพประกอบ 35 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ PDMS-AuNP ที่เวลาต่างกัน

ตาราง 5 ตำแหน่ง λ_{max} ของ PDMS-AuNP ที่เวลาต่างกัน

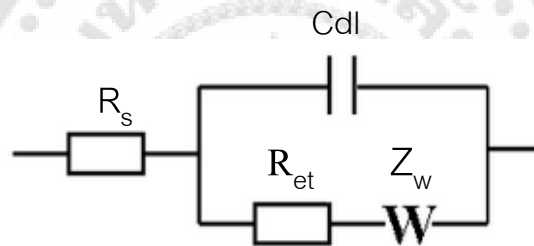
เวลา (hour)	λ_{max} (nm)
2	536 ± 2.83
5	537 ± 1.41
8	542 ± 1.42
12	543 ± 4.24
24	543 ± 4.95

4.2 ผลการวัดในเชิงเคมีไฟฟ้าของ PDMS-AuNP ที่สังเคราะห์ลงบนบนพื้นผิวอิเล็กโทรดด้วยเทคนิค CV และเทคนิค EIS

ภาพประกอบที่ 36 แสดงผลการวัดด้วยเทคนิค EIS ของ PDMS ที่เคลือบบนพื้นผิวเซนเซอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลการวัดความต้านทานที่ได้ถูกนำเสนอในรูปแบบของ Nyquist plot ที่พล็อตระหว่างส่วนจริง (Real Part) และส่วนจินตภาพ (Imagery Part) ของค่าความต้านทาน จากกราฟพบว่าพื้นผิวเซนเซอร์ที่ไม่ได้เคลือบด้วย PDMS (รูปสี่เหลี่ยมสีดำ) ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำแสดงว่ามีการนำไฟฟ้าได้ดี แต่เมื่อเคลือบสาร PDMS ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นตามค่าความเข้มข้นของ PDMS และมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าความเข้มข้นของ PDMS เป็น 20% (w/v) ซึ่งจากกราฟสามารถทราบค่าความต้านทานได้โดยการนำกราฟไปเปรียบเทียบกับ (Fit and Simulation) กับวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยในวงจรจะมีพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นองค์ประกอบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของกราฟ Nyquist plot ที่ได้จากการทดลอง สำหรับการทดลองนี้เลือกใช้วงจรไฟฟ้าที่มีชื่อว่า Randles' Equivalent Circuit แสดงดังภาพประกอบที่ 37 ในวงจรไฟฟ้านี้ประกอบด้วยตัวแปรคือ ความต้านทานของสารละลาย (Solution Resistance, R_s) ความต้านทานการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Electron Transfer Resistance, R_{et}) ตัวเก็บประจุ (Double Layer Capacitance, C_{dl}) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Warburg Impedance, Z_w) หลังจากทำการ Fit and Simulation แล้วก็จะทราบค่าความต้านทาน โดยที่ 20% PDMS ให้ค่าความต้านทาน 15,240 Ω แสดงดังตารางที่ 6 เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ PDMS เพิ่มมากขึ้นทำให้ PDMS ที่อยู่บนพื้นผิวเซนเซอร์มีความหนาเพิ่มมากขึ้น คือมีชั้นของฉนวนกันอยู่จึงทำให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังพื้นผิวอิเล็กโทรดได้น้อยลงจึงนำไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่เมื่อนำสารละลาย HAuCl_4 ที่ความเข้มข้น 20 mg/ml หยดลงบนพื้นผิวเซนเซอร์ที่เคลือบด้วย 20% (w/v) พบว่าค่าความต้านทานมีค่าต่ำลงคือ 680 Ω แสดงดังภาพประกอบที่ 38 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากไอออนของสารละลาย HAuCl_4 ถูกรีดิวซ์ด้วย Si-H เกิดเป็นอนุภาคนาโนทองคำบนพื้นผิวอิเล็กโทรดขึ้น ซึ่งอนุภาคนาโนทองคำจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังพื้นผิวอิเล็กโทรดได้ดี

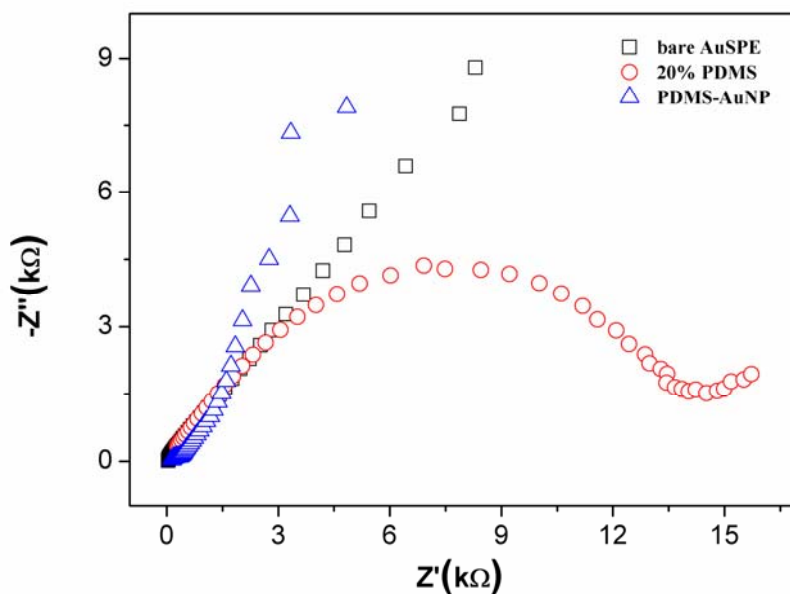


ภาพประกอบ 36 แสดง Nyquist plot ของ PDMS ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเทคนิค EIS



ภาพประกอบ 37 Randles' equivalent circuit applied in EIS measurements.

ที่มา: <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/12/16129/html> สืบค้นเมื่อวันที่ 29 กันยายน 2558 (ออนไลน์).



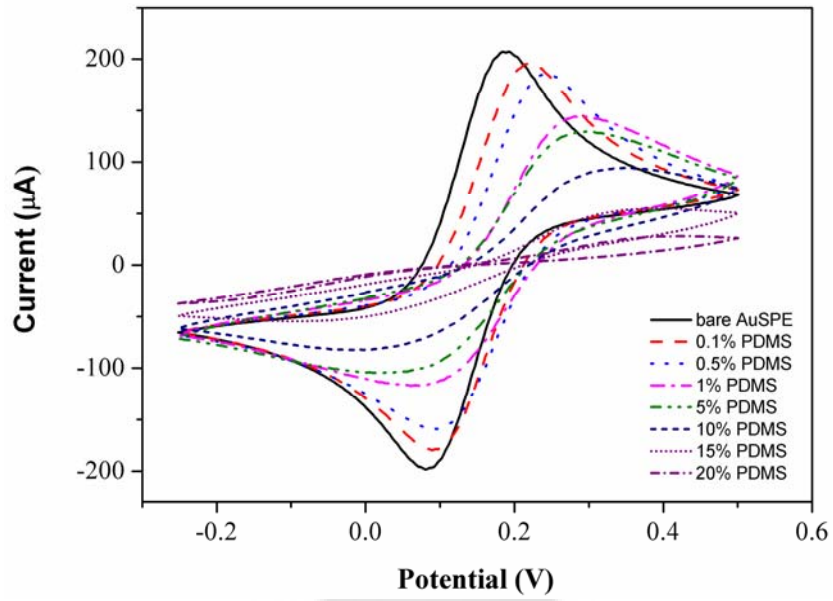
ภาพประกอบ 38 แสดง Nyquist plot ของ PDMS-AuNP ที่ค่าความเข้มข้น 20% (w/v) PDMS ด้วยเทคนิค EIS

ตาราง 6 แสดงค่าความต้านทานการถ่ายเทอิเล็กตรอนของ PDMS ที่ค่าความเข้มข้นต่างกัน

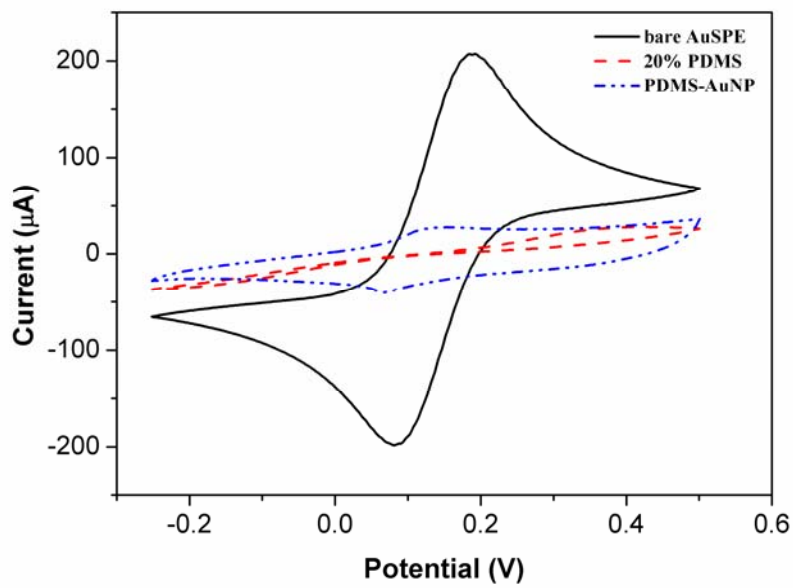
ความเข้มข้นของ PDMS (%w/v)	ความต้านทานการถ่ายเทอิเล็กตรอน (Ω)
Bare AuSPE	544
0.1	2,326
0.5	5,173
1	5,838
5	6,143
10	6,510
15	9,792
20	15,240

สำหรับการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค CV ในการหาค่าความเข้มข้นของ PDMS แสดงดังภาพประกอบที่ 39 ผลการทดลองสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EIS นั่นคือเมื่อค่าความเข้มข้นของ PDMS สูงขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อฟิล์ม PDMS มีความหนาเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วอิเล็กโทรดได้ยาก และเมื่อนำสารละลาย HAuCl₄ หยดลงบนพื้นผิวอิเล็กโทรดที่เคลือบด้วย 20% (w/v) พบว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น (กราฟเส้นสีน้ำเงินในภาพประกอบที่ 40) เมื่อเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากพื้นผิวอิเล็กโทรดที่เคลือบด้วย 20% (W/V) PDMS แสดงดังภาพประกอบที่ 40 นั่นแสดงว่ามีอนุภาคนาโนทองคำเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวอิเล็กโทรด ส่งผลให้การถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังพื้นผิวอิเล็กโทรดได้ดีค่ากระแสไฟฟ้าจึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ก็ยังมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากพื้นผิวอิเล็กโทรดเปล่า (กราฟเส้นสีดำ) นั่นเนื่องจากพื้นผิวอิเล็กโทรดเดิมมีพื้นผิวเป็นทองมีการนำไฟฟ้าดีอยู่แล้ว เมื่อเคลือบ PDMS ลงไปซึ่ง PDMS ที่อยู่บนพื้นผิวอิเล็กโทรดเปรียบเสมือนเป็นชั้นของฉนวน ดังนั้นเมื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำลงบนพื้นผิวอิเล็กโทรดที่เป็นพื้นผิวทองอยู่แล้วจะให้ผลทางเคมีไฟฟ้าไม่น่า

แต่สำหรับกรณีพื้นผิวอิเล็กโทรดที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดีและต้องการให้อิเล็กโทรดนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นสามารถนำเงื่อนไขและวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำร่วมกับโพลีไคเมทิลไซลอกเซนจากงานวิจัยนี้มาใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กโทรดได้



ภาพประกอบ 39 แสดง Cyclic voltammogram ของ ที่ค่า PDMS ต่างกัน ด้วยเทคนิค CV



ภาพประกอบ 40 แสดง Cyclic voltammogram ของ PDMS-AuNP ด้วยเทคนิค CV

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำร่วมกับโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS-AuNP) โดยหยดสารละลายไฮโดรเจนเตตระคลอไรด์ (HAuCl₄) บนพื้นผิวฐานรองที่เคลือบด้วยฟิล์ม PDMS อนุภาคนาโนทองคำที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม PDMS เกิดจากการรีดิวซ์ของสารละลายไฮดรอกไซด์ HAuCl₄ ด้วยสาร Si-H ที่หลงเหลือใน PDMS จากผลการทดลองวัดค่าการดูดกลืนแสงพบว่าปริมาณ PDMS ที่ 5% (w/v) จะเริ่มเกิดอนุภาคนาโนทองคำ และปริมาณอนุภาคนาโนทองคำเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PDMS โดยมีช่วงการดูดกลืนแสงที่ λ_{\max} 555-541 nm ใช้เวลาในการบ่ม (Incubation Time) ที่ 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ที่ความเข้มข้นของ 20 mg/ml ของสารละลาย HAuCl₄ นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคนาโนทองคำและรูปร่างจะแปรผันตามอัตราส่วนของ η (ที่ความเข้มข้น PDMS 20% (w/v)) โดยมีรูปร่างกลมขนาดสม่ำเสมอที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 42-56 nm ภายในพื้นผิว PDMS และที่บริเวณพื้นผิวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอัตราส่วนของ η และมีรูปร่างที่ต่างไป

สำหรับการสังเคราะห์ PDMS-AuNP บนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์ แล้วนำไปทดสอบเชิงเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และเทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี พบว่าเมื่อปริมาณของ PDMS ที่เคลือบบนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์มีความเข้มข้นสูงขึ้น ค่าความต้านทานการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ได้ก็มีค่าเพิ่มขึ้นและความต้านทานมีค่ามากที่สุดเมื่อความเข้มข้นของ PDMS เป็น 20% (w/v) ($R_{et} = 15,240 \Omega$) แต่หลังจากที่ PDMS ทำปฏิกิริยากับสารละลาย HAuCl₄ แล้วมีอนุภาคนาโนทองคำเกิดขึ้นบนพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์พบว่าค่าความต้านทานการถ่ายเทอิเล็กตรอนมีค่าลดลงและค่าสัญญาณทางไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ยังมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากขั้วอิเล็กทรอนิกส์เดิม นั่นเป็นเพราะชั้นของฟิล์ม PDMS มีความหนาจึงไปต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถถ่ายเทได้ดีระหว่างพื้นผิวอิเล็กทรอนิกส์กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ จึงให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่ต่ำ เมื่อเทียบกับขั้วอิเล็กทรอนิกส์เดิม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับงานวิจัยที่ใช้อิเล็กโทรดที่มีการนำไฟฟ้าได้ดีอยู่แล้วนั้น วิธีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำร่วมกับโพลีไคเมทิลไซลอกเซนลงบนพื้นผิวอิเล็กโทรดนั้นอาจให้ผล การวัดทางเคมีไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่สำหรับงานวิจัยใช้อิเล็กโทรดที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดีและต้องการให้อิเล็กโทรดนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นสามารถนำเงื่อนไขและวิธีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำร่วมกับโพลีไคเมทิลไซลอกเซนจากงานวิจัยมาได้ได้การปรับปรุงพื้นผิวอิเล็กโทรดได้

2. ภาชนะที่ใช้เตรียมสาร PDMS ควรเป็นพลาสติก

3. การวัดมุมสัมผัสด้วย Contact Angle ด้วยโปรแกรม Image J สามารถเกิด ความคลาดเคลื่อนได้ การวัดจึงจำเป็นต้องวัดหลายๆครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอน





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จตุพล จตุรภัทร. (2548). การพัฒนาหัววัดซินทิลเลชันชนิดพลาสติกฟิล์มบาง บีซี 400 โดยเทคนิค สปินโคตติง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิชาการสอนฟิสิกส์). เชียงใหม่: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- จันทร์วี นามมัม และ พรปวีณ์ ประสิทธิ์คุณภัทร. (2555). การปรับสภาพผิวสังกะสีให้มีความไม่ชอบน้ำด้วยเส้นใยนาโนพอลิเมอร์. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ธานินทร์ แดงกวารัมย์ และ จิราภรณ์ กิติกุล. (2555). การประดิษฐ์ไมโครเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดตะกั่วสำหรับงานภาคสนามในน้ำผิวน้ำในเขตอำเภอแมริม จังหวัดเชียงใหม่. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. สืบค้นเมื่อ 30 กรกฎาคม 2557, จาก http://librae.mju.ac.th/government/20111119104834_librae/File20130417120128_26927.pdf
- แมน อมรสิทธิ์. (2534). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- วาริรัตน์ สมประทุม. (2554). การพัฒนาเทคนิค Surface Plasmon Resonance (SPR) Biosensor สำหรับตรวจสอบเชื้อ Chilli veinal mottle virus (ChiVMV) . ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (โรคพืช) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศิริวรรณ ตี๋ภู. (2012). อนุภาคนาโนทอง: การสังเคราะห์และการประยุกต์สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมี. *บทความวิชาการ*. ฉบับที่ 32 หน้า 237-245.
- อุสุมา นาคนิคาม. (2553). การใช้งาน [อินทีเกรติงสเฟียร์] Integrating sphere ร่วมกับ [ยูวี-วิสสเปกโทรโฟโตมิเตอร์] UV-Vis Spectrophotometer. สืบค้นเมื่อ 1 มิถุนายน 2556, จาก <http://glass.dss.go.th/publication/country/ArtC-2.pdf>
- Attila, G.; & Frank. A. G. (2013). Application of surface plasmon resonance spectroscopy for adsorption studies of different types of components on poly (dimethylsioxane). *Analytica Chimica Acta*. 777:72-77.
- Azrilawani, A.; & Eric, M. (2012). Electrochemical immunosensor modified with self-assembled monolayer of 11-mercaptopundecanoic acid on gold electrodes for detection of benzo [a] pyrene in water. *Royal Society of Chemistry*. 137:5839-5844.
- Bobak, R.; et al. (2001). Bioelectrochemical Single-Walled Carbon Nanotubes. *J Am Chem Soc*. 124(43):12664-12665.

- Burak, U. (2014). Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy. สืบค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2557, จาก <http://www.gamry.com/application-notes/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy>.
- Chhiung, W. K.; et al. (2008). Surface modified gold nanowires for mammalian cell transfection. *IOP Publishing Ltd.* 19:1-7.
- Dakrong, P.; et al. (2013). Effect of Surface-Modified Gold Nanorods on the Inflammatory Cytokine Response in Macrophage Cell. *Issue.* 30:427-433.
- Evrin, U. (2013). Surface Modification of Nanoparticles Used in Biomedical Applications. DOI. 10:5772/55746.
- Hong C.; et al. (2001). Colloid Au-enhanced DNA immobilization for the electrochemical detection of sequence-specific DNA. *Electroanalytical Chemistry.* pp. 78-85.
- J, M. H.; & H, F. S. (1997) Field emission scanning electron microscopy a high-resolution technique for the study of clay minerals in sediments. *Clay Minerals.* 32:197-203.
- Jianrong, C.; et al. (2004). Nanotechnology and biosensors. *Biotechnol Adv.* 22(7):18-505.
- Jin, S.; & D, M. P. (2011). Surface Modification Approaches for Electrochemical biosensors. *Biomedical Engineerin.* 10:6-328.
- Jules, L. H.; et al. (2014). Localized Surface Plasmon Resonance as a Biosensing Platform for Developing Countries. *Biosensors.* 4(2):172-188.
- Khanna, P.; et al (2005). Synthesis and characterization of Ag/PVA nanocomposite by chemical reduction method. *Materials. Chemistry and Physics.* 1:117-121.
- Ko, S. C.; et al. (2010). Modification of self-assembled Monolayers on Gold Nanoparticles by Oxygen Plasma and UV-induced Graft Polymerization and Quantitative Analysis. *J Am Chem. Soc.* ID-4759.
- Ledig, B. (2012). Silicone rubber in medical applications. *Journal of Rubber World* 246 (5):28-31.
- Liu, S.; et al. (2003). Reagentless glucose biosensor based on direct electron transfer of glucose oxidase immobilized on colloidal gold modified carbon paste electrode. *Biosensors and Bioelectronics.* 19:177-183.
- Luppa, P. B.; et al. (2001). Immunosensors-principles and applications to clinical chemistry. *Clinica Chimica Acta.* 314:1-26.

- Miroslav, P.; & Petr, S. (2008). Electrochemical biosensors-principles and applications. *J.Appl.Biomed.* 6:57-64.
- Pooja, D.; et al. (2010). Synthesis and Surface Modification of Poly (dimethylsiloxane) – Gold Nanocomposite Films for Biosensing Applications. DOI 10.1109, *Bio Sciences World.* 28.
- Qing, Z.; et al. (2008). In-situ synthesis of poly (dimethylsiloxane)-gold nanoparticles composite films and its application in microfluidic systems. *Lab chip.* 8:352-357.
- Quan, F.; et al. (2011). Surface Modification of Electrospun PAN Nanofibers and Its Application for Adsorption of Lead Ions. *Fiber Bioengineering & Informatics.* 4:383-388.
- Skrabalak, S.; et al. (2008). Gold nanocages: synthesis, properties, and applications. *Acc Chem Res.* 41(12):95-1587.
- Song, Y.; et al. (2013). Self-assembled monolayers of DNA on cysteamine modified Au (111) surface: Atomic force microscopy study. *Microse Res Tech.* 73(1). : 7-51.
- Vanessa, E.; et al. (2009). Gold screen-printed-based impedimetric immunobiosensors for direct and sensitive *Escherichia coli* quantisation. *Biosensors and Bioelectronics.* 24:3365-3371.
- Wang, J.; et al. (2001). Silver-enhanced colloidal gold electrochemical strip-ping detection of DNA hybridization. *Lang muir.* 17:5739-5741.
- Wen, Y.; et al. (2010). PDMS gold nanoparticle composite film-based silver enhanced colorimetric detection of cardiac troponin I. *Sens. Actuators B.* 147:298-303.
- Xiaoxing, X.; et al. (2003). A Novel Hydrogen Peroxide Sensor via the Direct Electrochemistry of Horseradish Peroxidase Immobilized on Colloidal Gold Modified Screen-printed Electrode. *Sensors.* 3:350-360.
- Zhu, M.; et al. (2008). Kinetically controlled, high-yield synthesis of Au clusters. *J Am Chem Soc.* 130:1138-1139.



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวรัชตวรรณ กมลเพชร
วัน เดือน ปีเกิด	22 สิงหาคม 2531
สถานที่เกิด	เพชรบูรณ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	52 ม. 9 ต. บึงกระจับ อ. วิเชียรบุรี จ. เพชรบูรณ์ 67130
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2550	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนนิยมศิลป์อนุสรณ์ จ. เพชรบูรณ์
พ.ศ. 2555	จบการศึกษาระดับวิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ. นครราชสีมา
พ.ศ. 2558	จบการศึกษาระดับการศึกษามหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

