

คุณสมบัติทางแสงของพลาสมาเคลือบเงินบนผิวทองคำใน
OPTICAL PROPERTIES OF PALLADIUM-COATED GOLD NANORODS

นายรัตนพงศ์ มุสิก
นางสาวศรวิทย์ ชวนถม

โครงการพัฒนาระบบสารสนเทศของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

คุณสมบัติทางแสงของพลาตตินั่มเคลือบบนผิวของแท่งทองคำนาโน

OPTICAL PROPERTIES OF PALLADIUM-COATED GOLD NANORODS

นายรัตนพงศ์ มุลตะ

นางสาวดาววัลย์ ช้วนลิม

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

OPTICAL PROPERTIES OF PALLADIUM-COATED GOLD NANORODS

MR RATTANAPONG MOONTA

MISS LADAWAN SUANLIM

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ

คุณสมบัติทางแสงของพลาติเนียมเคลือบบนผิวของแท่งทอง
นาโน

OPTICAL PROPERTIES OF PALLADIUM-COATED GOLD
NANORODS

ชื่อนักศึกษา

นาย รัตนพงษ์ มุสิก๊ะ

นางสาว ลดาวัลย์ ช้วนลิ้ม

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์


ปี การศึกษา

2556

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. กฤษกร ไถ้เจริญรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการ
พิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ. ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์	อ.ธนภรณ์
ดร. พิษขานันท์ ชีเศรษฐ์โสภณ	พิษขานันท์ ชี.
ผศ. ดร.ภัทริยา กิตติเดชาชาญ	ภัทริยา กิตติเดชาชาญ
ดร. กฤษกร ไถ้เจริญรัตน์	ก. กฤษกร 

อธิการบดีของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงงานพิเศษ	คุณสมบัติทางแสงของพลาสมาเคลือบบนผิวของแท่งทองคำนาโน
ชื่อนักศึกษา	นาย รัตนพงศ์ มุลดี๊ะ นางสาว ลดาวัลย์ ช้วนลิ้ม
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. กฤษกร โล้เจริญรัตน์

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของพลาสมาเคลือบทองคำซึ่งมีขนาดในระดับนาโนเมตร ในโครงงานพิเศษนี้แบ่งเป็น 2 ตอน โดยในการทดลองตอนที่ 1 จะเป็นขั้นตอนการศึกษาผลการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นที่ต่างๆกันของกรดวิตามินซี (ascorbic acid) (AA) เพื่อใช้ในการเคลือบพลาสมาให้บางลง สำหรับ อนุภาคนาโน $0.001\text{Au}@Pd\text{nanorods}$ เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ จากค่าการดูดกลืนแสงของพลาสมาเคลือบทองคำขนาดนาโนผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง (Spectroscopy) พบว่า เมื่อเคลือบพลาสมาให้บางลงจากการเติมกรด AA ที่มีอัตราส่วนให้มากขึ้น จะทำให้สารตัวอย่างมีความเป็นทองมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความยาวคลื่นในการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์มีค่าความยาวคลื่นสูงหรือเคลื่อนที่ไปทางแสงสีแดง

ในส่วนของการทดลองตอนที่ 2 เป็นการศึกษาการทดลองวัดสเปกตรัมของอนุภาคนาโน $0.001\text{Au}@Pd\text{nanorods}$ ภายใต้ตัวกลาง Ethanol :Toluene ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆ เพื่อศึกษาว่าค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการเลื่อนของค่า maximum wavelength (λ_{max}) อย่างไร พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของ Toluene จะทำให้ค่าดัชนีหักเหมากขึ้น ส่งผลต่อการเลื่อนของค่า maximum wavelength (λ_{max}) ให้มากขึ้นหรือเคลื่อนที่ไปทางแสงสีแดง

คำสำคัญ : พลาสมอนเรโซแนนซ์

Title	Optical properties of palladium-coated gold nanorods
Students	Mr. Rattanapong Moonta Miss. LadawanSuanlim
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Dr. KitsakornLocharoenrat

Abstract

The goal of this special project is to study the optical properties of palladium-coated gold nanorods. This research is divided into two parts. On one hand, for the first experiment we investigate the effect of concentration of ascorbic acid on Pd-shell layer from Au@Pd nanorods served as one representative example for studying Surface Plasmon Resonance (SPR). From absorption spectra of our samples measured by UV-Vis spectroscopy, it is found that increasing a ratio of ascorbic acid into our samples results in the thickness of Pd-shell. That is, increasing a ratio of ascorbic acid will decrease the thickness of Pd-shell meaning that gold becomes dominant. This origin therefore leads the Surface Plasmon Resonance (SPR) to be shifted to the longer wavelength or redshift. On the other hand, for the second experiment we observe the influence of surrounding media by varying ratio of toluene and ethanol on the absorption spectra of our samples measured by UV-Vis spectroscopy. Refractive index is able to change when the ratio of toluene and ethanol is altered. This affects a shift of maximum wavelength (λ_{\max}) of Surface Plasmon Resonance (SPR). That is, when amount of toluene increases, it results in refractive index to be increased. Hence, this contribution can shift the maximum wavelength to be longer.

Keywords : Plasmon Resonance

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุนาโนกับนาโนเทคโนโลยี	4
2.2 โครงสร้างของวัสดุนาโน	5

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3 การเตรียมวัสดุนาโน	6
2.4 ประโยชน์จากวัสดุนาโน	8
2.5 เทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี	9
2.6 สมบัติทางแสงของวัสดุนาโน	10
2.7 สมบัติทางเคมีของโลหะนาโน	14
บทที่ 3วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 วัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods ในสารละลาย ascorbic acid (AA)	17
3.2 วัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods ที่ค่าดัชนีหักเหของแสงต่างๆกัน	19
บทที่ 4ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods ในสารละลาย Ascorbic acid (AA) ที่ความเข้มข้นต่างๆ	21
4.2 การทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001Au@Pdnanorods ที่อยู่ในตัวกลาง Ethanol :Toluene ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆ	29
บทที่ 5สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	31

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	32
อ้างอิง	33
ภาคผนวก	
วิธีใช้โปรแกรม Avasoft 7.5.0 Basic	35
ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆ	42
ตารางแสดงข้อมูลดิบ	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	3
3.1.1 แสดงอัตราส่วน 0.001mMAu@Pdnanorods+ 10 mM กรด AA	15
3.1.2 แสดงอัตราส่วน 0.001mMAu@Pdnanorods+ 5 mM กรด AA	15
3.1.3 แสดงอัตราส่วน 0.001mMAu@Pdnanorods+ 1 mM กรด AA	16
3.1.4 แสดงอัตราส่วน 0.001mMAu@Pdnanorods+ 0.1mM กรด AA	16
3.1.5 แสดงอัตราส่วน 0.001mMAu@Pdnanorods+ 0.01mM กรด AA	16
3.1.6 แสดงอัตราส่วน 0.001mMAu@Pdnanorods+ 0.001mM กรด AA	16
3.2.1 แสดงความเข้มข้น 0.001 mMAu@Pdnanorods กับ Ethanol : Toluene ที่อัตราส่วนต่างๆ	17
4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum wavelength (λ_{max}) และ ค่าดัชนีหักเหต่างๆ (n) ของEthanol:Toluene	27

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการผลิตวัสดุนาโนแบบ top-down และ bottom-up	5
2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกโลหะในระดับนาโนของกลุ่มก้อนอะตอม	6
2.3 แสดงรังสีตกกระทบด้วยความเข้ม I_0 และรังสีที่ทะลุผ่านมีความเข้ม I เมื่อแสงเดินทางทะลุผ่านสารละลายที่มีระยะทาง b	9
2.4 กระบวนการสั่นของพลาสมอน (plasmon oscillation) สำหรับอนุภาคทรงกลม	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงกับ extinction efficiency ของอนุภาคนาโนทองคำและเงิน	13
3.3.1 การต่ออุปกรณ์ทางแสง	17
4.1.1 แสดงการจัดตั้งระบบการทดลอง โดยอ่านค่าการดูดกลืนจากคอมพิวเตอร์	18
4.1.2 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mMAu@Pdnanorods + 0.001mMกรด AA	19
4.1.3 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mMAu@Pdnanorods + 0.01mMกรด AA	19
4.1.4 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mMAu@Pdnanorods + 0.1 mMกรด AA	20
4.1.5 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mMAu@Pdnanorods + 1 mMกรด AA	20
4.1.6 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mMAu@Pdnanorods + 5 mMกรด AA	21
4.1.7 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mMAu@Pdnanorods + 10 mMกรด AA	21
4.1.8 กราฟแสดงตัวอย่างอัตราส่วนของแกน a และ b ที่มีผลต่อ การดูดกลืนของ nanorods โดยที่ a คือ ความยาวแนวรัศมี และ b คือ ความยาวแนวแกน	22

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1.9 กราฟไดอิเล็กทริกฟังก์ชันเชิงซ้อนแสดงแบบจำลองของค่าจำนวนจริง, จำนวนจินตภาพ จากอิเล็กตรอนอิสระของโลหะที่พลังงานโฟตอนต่างๆกัน โดยที่ $E = \hbar\omega$	24
4.1.10 แบบจำลองของMaxell-Garnet แสดงอนุภาคนาโนในตัวกลางไดอิเล็กทริก	24
4.1.11 กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันเชิงซ้อน($\epsilon_1 + i\epsilon_2$) ที่ความถี่แสงต่างๆกัน	26
4.1.12 แสดงค่าส่วนจริงของไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะมีตระกูล	26
4.2.1 กราฟแสดงแถบการดูดกลืนแสงของ0.001 mMAu@Pdnanorods + (E:T) อัตราส่วนโดยปริมาตร (E:T) = 1:0, 1:0.5, 1:1, 1:2, 0:1, 0:0 (E และ T หมายถึง Ethanolและ Toluene ตามลำดับ	28
4.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum wavelength (λ_{max}) และ ค่าดัชนีหักเหต่างๆ (n) ของEthanol:Toluene	28
4.2.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหกับค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันที่ พลังงานโฟตอนต่างๆกัน ซึ่งเกิดขึ้นในเฉพาะโลหะเท่านั้น	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

อนุภาคนาโนของทองคำและเงินได้แสดงให้เห็นถึงการที่บ่งแสงอย่างเด่นชัดในแถบแสงขาวเนื่องจากเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ โดยเริ่มที่ทีมงานของแซนร็อกซ์[1] ที่ได้เปิดเผยเอาไว้ว่าการดูดกลืนแสงภายในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับโครงสร้างนาโนของทองคำที่ไม่มีสมมาตรของศูนย์กลางเกิดขึ้นมาจากไดโพลาร์พลาสมอนเรโซแนนซ์ในแนวแกนตามยาวของอนุภาคนาโน ต่อมาทีมงานของเควิน[2] ก็ได้เปิดเผยให้เห็นถึงเซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ซึ่งปรากฏให้เห็นในแถบการดูดกลืนแสงบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนของเงิน แม้ว่าคุณสมบัติทางแสงของทองคำและเงินจะเป็นประเด็นที่ได้ทำการศึกษากันมาอย่างกว้างขวางดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นก็ตาม แต่ก็ยังไม่มีการศึกษาอย่างกว้างขวางมากนักเกี่ยวกับแท่งทองคำนาโนที่ถูกเคลือบด้วยโลหะอีกชั้นหนึ่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจะทำการศึกษาสมบัติทางแสงของแท่งโลหะทองคำนาโนที่ถูกเคลือบด้วยพลาเดียม ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำวัสดุประเภทนี้ไปประยุกต์ใช้งานในด้าน photocatalysis และ chemical- และ bio-sensor เป็นต้น

งานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะทำการศึกษาสมบัติทางแสงของแท่งโลหะทองคำนาโนที่เคลือบด้วยพลาเดียมที่ความหนาต่างๆกัน และส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาเงื่อนไขของตัวกลาง (medium) ต่อแท่งโลหะนาโน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของความหนาของพลาเดียมต่ออนุภาคนาโนที่มีผลต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จาก Au@Pd nanorods
2. เพื่อศึกษาผลของตัวกลางในอนุภาคนาโนที่มีต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จาก Au@Pd nanorods

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยจะเริ่มจากการเตรียมระบบการทดลองและวัสดุในการทดลอง จากนั้นทำการตรวจสอบระบบที่ใช้ในการทดลอง แล้วจะทำการตรวจสอบสมบัติทางแสงที่ได้ในแท่งโลหะนาโน

โดยอาศัยหลักการที่แสงจากแหล่งกำเนิดเดินทางไปตกกระทบกับผิวแท่งโลหะนาโน บางส่วนจะถูกสะท้อนและบางส่วนจะถูกดูดกลืน สำหรับการหาค่าการดูดกลืนเราจะวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนตัวอย่างโดยใช้แสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นในแถบแสงขาว ปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจะขึ้นอยู่กับระยะทางเดินแสง, ความหนาและประเภทของตัวกลางและรวมทั้งขนาดและรูปร่างของอนุภาค

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

กิจกรรม	สิงหาคม 2556	กันยายน 2556	ตุลาคม 2556	พฤศจิกายน 2556	ธันวาคม 2556	มกราคม 2557
1. set up อุปกรณ์ทางแสง	↔					
2. ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางแสง		↔				
3. วัดคุณสมบัติทางแสงจากแท่งทองคำนาโนเคลือบด้วยพลาเดียม			↔			
4. สรุปรงานวิจัยพร้อมเขียนรายงาน				↔		

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เรียนรู้และเข้าใจถึงสมบัติทางแสงของแท่งโลหะนาโน
2. ได้เรียนรู้ระบบในการทดลองวัดสเปกตรัมแสงของแท่งโลหะนาโน
3. เข้าใจถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของแท่งโลหะนาโน และดัชนีหักเหของตัวกลางที่มีผลต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์
4. นำแท่งโลหะนาโนไปประยุกต์ในด้าน photocatalysis และ biosensor เป็นต้น
5. นำไปเขียนบทความทางวิชาการ

บทที่ 2

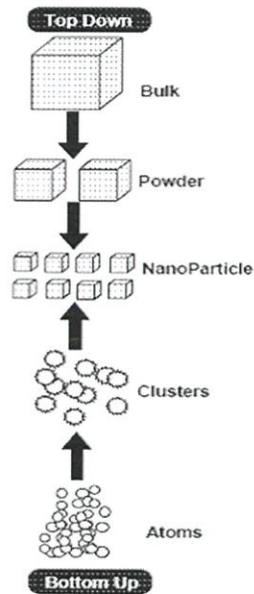
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุนาโนกับนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี ถือกำเนิดมาจากแนวคิดของริชาร์ดไฟน์แมน (Richard Feynman) ซึ่งเป็นผู้เปิดความคิดเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของนาโนเทคโนโลยีโดยเขาได้กล่าวไว้ตั้งแต่ปี 1965 ว่า “ในอนาคตข้างหน้ามนุษย์จะสามารถสร้างสิ่งต่างๆด้วยการจัดเรียงอะตอมได้ในระดับที่แม่นยำ ซึ่งวันนี้ยังไม่มีกฎฟิสิกส์ใดๆหรือรวมทั้งกฎแห่งความไม่แน่นอนใดๆมาขัดขวางความเป็นไปได้” จากนั้นจนถึงปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีจึงมีการพัฒนาอย่างสืบเนื่องมาเป็นลำดับ

นาโนเทคโนโลยีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคของอะตอมหรือ โมเลกุลที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (ความยาว 1 นาโนเมตรเท่ากับ 1 ในพันล้านเมตรหรือ 10^{-9} เมตร) เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กในระดับนาโนแล้วจะทำให้สมบัติต่างๆของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปโดยบทบาทของนาโนเทคโนโลยีมีความสำคัญต่อศาสตร์ 3 แขนงใหญ่คือวัสดุนาโนนาโนอิเล็กทรอนิกส์และนาโนชีวภาพซึ่งต้องอาศัยวิทยาการหลากหลายสาขาวิชาทั้งเคมีฟิสิกส์ชีววิทยาอิเล็กทรอนิกส์และอื่นๆ

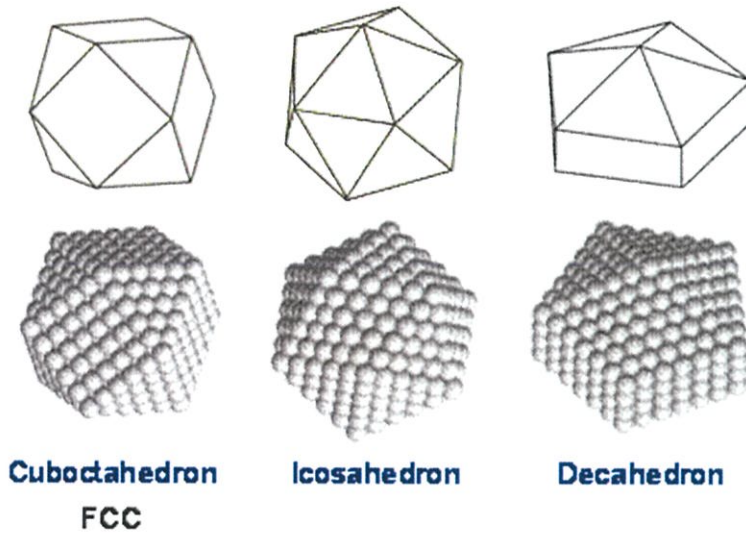
นาโนเทคโนโลยีถูกนิยามว่าเป็นเทคโนโลยีแห่งการประกอบและผลิตสิ่งต่างๆขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมหรือ โมเลกุลเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำและถูกต้องในระดับนาโนเมตรอาจนิยามเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นเป็น 2 แบบคือ เทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk technology) เป็นการผลิตสิ่งของต่างๆโดยวิธีกลเช่นการตัดการกลึงการอัดการต่อการงอเป็นต้นหรือโดยวิธีเคมีที่เกิดจากการผสมสารให้ทำปฏิกิริยากัน โดยพยายามควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างๆให้เหมาะสมแล้วปล่อยให้ทำปฏิกิริยากันเองเทคโนโลยีแบบนี้สามารถสร้างสิ่งเล็กๆได้ในระดับหนึ่งแต่ยังขาดความแม่นยำมีความบกพร่องสูงการนำเทคโนโลยีอย่างหยาบไปสร้างสิ่งของเล็กๆเช่นไมโครชิพเราเรียกว่าเป็นการใช้เทคโนโลยีแบบบนลงล่างดังรูปที่ 2.1 (Top-down technology) ซึ่งมีข้อจำกัดสูงจึงเรียกเทคโนโลยีประเภทนี้ว่าเทคโนโลยีอย่างหยาบ เทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology) เป็นการผลิตสิ่งของต่างๆโดยวิธีการนำเอาอะตอมหรือ โมเลกุลมาจัดเรียงณตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำสิ่งที่ผลิตได้อาจเป็นสิ่งเล็กๆหรือเป็นสิ่งขนาดใหญ่ก็ได้การนำเอาเทคโนโลยีระดับโมเลกุลไปสร้างสิ่งใหญ่ๆเราเรียกเทคโนโลยีแบบนี้ว่า เป็น เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน(bottom-up technology)ซึ่งเทคโนโลยีระดับโมเลกุลนี้เองที่พัฒนามาเป็นนาโนเทคโนโลยีดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตวัสดุนาโนแบบ top-down และ bottom-up

2.2 โครงสร้างของวัสดุนาโน

ผลึกแบบก้อนใหญ่ (bulk crystals) ของโลหะจะมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยซ้ำๆกันที่เรียกว่าแลตทิซ (lattice) และมีการเรียงตัวอย่างเป็นระบบแต่สำหรับผลึกโลหะขนาดนาโนเมตร (metal nanocrystals) จะมีองค์ประกอบเป็นกลุ่มก้อนของอะตอมไม่กี่ร้อยอะตอมทำให้อะตอมส่วนมากเป็นอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้า โดยที่รูปทรงของกลุ่มก้อนอะตอมจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวและพลังงานอิสระที่อยู่ในบริเวณผิวสัมผัสของโครงสร้างกลุ่มก้อน โดยทั่วไปแล้วรูปทรงของผลึกที่สถานะสมดุลเกิดขึ้นจากการพยายามจัดรูปทรงของผลึกให้มีพลังงานอิสระบริเวณผิวหน้าต่อหน่วยปริมาตรน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้สำหรับผลึกขนาดใหญ่การจัดรูปทรงของผลึกจะเป็นไปตามกฎเกณฑ์แบบ “Wulff construction” แต่ผลึกที่มีขนาดในระดับนาโนอาจมีรูปทรงที่แตกต่างไปจากกฎเกณฑ์ดังกล่าวทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ผลึกนาโนมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงจึงทำให้ผลึกนาโนหรือกลุ่มก้อนอะตอมทั้งกลุ่มก้อนมีการจัดเรียงตัวกันใหม่กลายเป็นผลึกที่มีรูปทรงใหม่ๆที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในผลึกขนาดใหญ่เช่น จากการศึกษาค้นพบว่าอนุภาคนาโนของทองคำโดยส่วนใหญ่จะมีรูปร่างผลึกเป็นแบบทรงเคทิวบอคตาฮีดรอน (truncated cuboctahedron) อย่างไรก็ตามมีการค้นพบว่าผลึกนาโนของทองคำมีรูปทรงเรขาคณิตแบบอื่นๆด้วยเช่น ดีคาฮีดรอน (decahedron) โดเดคาฮีดรอน (dodecahedron) และไอโคซาฮีดรอน (icosahedron) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกโลหะในระดับนาโนของกลุ่มก้อนอะตอม

ในเทอมของจุดหลอมเหลวสาเหตุที่ทำให้อนุภาคโลหะนาโนมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าปกติเกิดจากอนุภาคนาโนมีปริมาณอะตอมที่ผิวหน้ามากโดยที่อะตอมผิวหน้าจะมีระดับพลังงานที่ใช้ในการยึดติดกันและกันน้อยกว่าที่พบในของแข็งปกติและจากอิทธิพลเคลวิน (Kelvin effect) จะพบว่าอนุภาคนาโนจะมีความดันไอสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ระเหยได้ง่ายขึ้นโลหะที่มีขนาดผลึกในระดับนาโนเมตร จึงมักจะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะแบบก้อนใหญ่โดยเมื่อขนาดอนุภาคยิ่งเล็กลงก็ยิ่งทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะต่ำลงไปด้วย

2.3 การเตรียมวัสดุนาโน

วิธีการเตรียมอนุภาคนาโนโลหะสามารถเตรียมได้หลายวิธีได้แก่

การบด (grinding) เป็นกระบวนการเตรียมผงละเอียดด้วยการลดขนาดทางกลของอนุภาคขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเช่นการบดย่อยด้วยลูกบดการบดย่อยแบบลูกกลิ้งแรงอัดสูงการบดย่อยแบบเจ็ตหรือแม้กระทั่งการบดมือที่ต้องอาศัยเวลาในการบดค่อนข้างนาน

อาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงตกร่มระหว่างแท่งโลหะสองแท่งจะทำให้เกิดประกายไฟหรือเกิดสถานะพลาสมาขึ้นระหว่างแท่งโลหะนี้ภายใต้บรรยากาศปกติหรือกระทำในตัวกลางที่เป็นของเหลวผลลัพท์คือได้อนุภาคนาโนของโลหะตรงบริเวณกลางๆ ขั้วของแท่งโลหะส่วนการควบคุมขนาดอาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของพลาสมาในขณะที่การควบคุมไอของโลหะสามารถเกิดในของเหลวที่เป็นฉนวน (dielectric liquid) ได้ดีกว่าก๊าซและอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ในตัวกลางที่เป็นน้ำมีการแยกตัวได้ดี

ลิโทกราฟี (Lithography) เปรียบเหมือนกับการแกะสลักหรือการวาดแบบพื้นผิวของแข็ง (ก็คือเป็นการจัดการกับของแข็งชิ้นใหญ่นำมาแกะสลักให้เป็นของชิ้นเล็ก) ซึ่งเทคโนโลยีลิโทกราฟีเป็นวิธีการหลักที่ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์แต่สำหรับการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโนนั้นจำเป็นที่จะต้องพัฒนาวิธีการของเทคโนโลยีลิโทกราฟีนี้ให้สามารถก่อสร้างโครงสร้างในระดับนาโนเมตรได้เพราะลิโทกราฟีในระดับนาโนไม่สามารถใช้แสงที่มองเห็นได้ในการจัดการ(แสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 – 900 นาโนเมตรซึ่งใหญ่เกินกว่าโครงสร้างระดับนาโน) ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาหลากหลายวิธีการเพื่อให้วิธีการลิโทกราฟีสามารถที่จะใช้ผลิตโครงสร้างนาโนได้

พัลส์เลเซอร์อะเบลชัน (pulsed laser ablation) เป็นวิธีการที่ให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือแสงเลเซอร์กับโลหะที่ต้องการเตรียมเป็นอนุภาคนาโนจากนั้นบริเวณผิวของโลหะจะมีการดูดกลืนพลังงานที่ตกกระทบและเกิดความร้อนสูงแล้วมีการเปลี่ยนสถานะเป็นไอของโลหะจากนั้นเกิดการควบแน่นเป็นอนุภาคนาโนของโลหะการควบแน่นไอของโลหะสามารถเกิดในตัวกลางที่เป็นของเหลวได้ดี ส่วนการควบคุมขนาดสามารถทำได้โดยการควบคุมด้วยพลังงานของแสงเลเซอร์ชนิดของตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือแม้กระทั่งความเข้มข้นของไอของโลหะก็เป็นตัวกำหนดขนาดของอนุภาคนาโนของโลหะ

รีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นวิธีการทางเคมีที่เตรียมจากไอออนของโลหะซึ่งมีเลขออกซิเดชันเป็นบวกหรือเป็นสารประกอบโลหะที่สามารถละลายในตัวกลางที่เป็นของเหลวและไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคเมื่อไอออนของโลหะได้รับอิเล็กตรอนจากตัวรีดิวซ์จะเปลี่ยนเป็นอะตอมของโลหะที่มีเลขออกซิเดชันเป็นศูนย์จากนั้นเกิดการควบแน่นเป็นอนุภาคของโลหะส่วนการควบคุมขนาดสามารถทำได้โดยการควบคุมด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างตัวรีดิวซ์กับสารประกอบโลหะชนิดของตัวรีดิวซ์และชนิดของสตาบิไลเซอร์ (stabilizer)

โฟโตเคมีสตรี้ (photochemistry) เป็นการให้แสงที่มีพลังงานพอดีกับพลังงานพันธะเพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสงของสารเคมีตั้งต้นจากนั้นสารตั้งต้นที่มีพลังงานสูงขึ้นก็จะพยายามจัดการกับพลังงานส่วนเกินนี้ในหลายวิธีซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือการเกิดปฏิกิริยาเคมีนั่นเองเรียกว่าปฏิกิริยาโฟโตเคมี (photochemical reaction) สำหรับการเตรียมอนุภาคนาโนของโลหะโดยปฏิกิริยาโฟโตเคมีจะใช้สารที่ให้อิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเช่น โลหะออกไซด์เมื่อไอออนของโลหะซึ่งมีเลขออกซิเดชันเป็นบวกหรือเป็นสารประกอบโลหะได้รับอิเล็กตรอนจากสารที่มีสมบัติตอบสนองต่อแสงหรือผู้ให้อิเล็กตรอน (electron donors) จะเปลี่ยนเป็นอะตอมของโลหะที่มีเลขออกซิเดชันเป็นศูนย์จากนั้นเกิดการควบแน่นเป็นอนุภาคของโลหะ

2.4 ประโยชน์จากวัสดุนาโน

ศักยภาพของวัสดุนาโนมีคุณสมบัติครอบคลุมศาสตร์ต่างๆหลากหลายแขนงและมีการนำไปประยุกต์ใช้หลากหลายด้าน ได้แก่

1. ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ (integrated electronics and optoelectronics) เช่น เซลล์ในหน่วยความจำ (memory cell), วัสดุพลาสติกอิเล็กทรอนิกส์ (plastic electronics), อุปกรณ์ตรวจวัดทางชีวภาพ (biosensors), อุปกรณ์ตรวจวัดทางเคมี (chemical sensors) หรือ อุปกรณ์แสดงผลการตรวจสุขภาพ (structural health monitoring) เป็นต้น

2. ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพนาโนและการแพทย์ (bionanotechnology and nanomedicine) เช่น การป้อนยาไปยังเป้าหมายเฉพาะที่ (targeted drug delivery), การแสดงรูปภาพระดับโมเลกุล (molecular imaging), สารต่อต้านจุลชีพ (antimicrobial agents), เนื้อเยื่อและโครงนาโน (tissues and scaffolds) หรือ เครื่องแสดงผลสุขภาพแบบอัจฉริยะ (smart health monitoring) เป็นต้น

Surface plasmon resonance biosensor เป็นเทคนิคเชิงแสงที่ใช้ศึกษาการจับกันของโมเลกุลของสารสองชนิดโดยตรง โดยไม่ต้องติดฉลากสารที่ต้องการตรวจวัด และสามารถตรวจวัดได้แบบ real time โดยสารที่ใช้ตรวจจับ (ligand) จะถูกตรึงอยู่บนผิวของ sensor ซึ่งเป็นโลหะที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว เมื่อสารที่ต้องการตรวจวัด (analyte) จับกับ ligand ที่ตรึงอยู่บนผิวของ sensor จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) เมื่อแสงตกกระทบผิวของ sensor ทำให้มุมสะท้อนของแสงเปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารสองชนิดได้

3. ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ (engineering) เช่น วัสดุเชิงกลนาโน (nanomechanics materials), ระบบไฟฟ้าเชิงกลนาโน (nanoelectro-mechanical systems), วัสดุโครงสร้างอัจฉริยะ (smart materials structures) และ โครงสร้างป้องกันไฟ (fire retardant materials and structures) วัสดุผสม (composites) หรือ พลาสติกแบบยิ่งยวด (superplastic) เป็นต้น

4. ทางด้านพลังงาน เช่น เป็นวัสดุกักเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (hydrogen storage) ไฟฟ้าเคมี (electrochemistry) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หรือ ท่อคาร์บอนนาโนประเภทความหนาแน่นของกระแสสูง (highest current density carbon nanotubes) เป็นต้น

5. ทางด้านการวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐาน งานวิจัยทางด้านนาโนยังมีความจำเป็นที่ต้องอาศัยหลักการทฤษฎีและองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น เช่น คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปทางฟิสิกส์หรือเคมีของวัสดุนาโนที่แตกต่างไปจากวัสดุเดิมในระดับไมโคร เป็นต้น

กล่าวโดยสรุปแล้ว ศักยภาพของวัสดุนาโนแต่ละชนิดบางชนิดมีประโยชน์มากมายบางชนิดอยู่ในระหว่างการศึกษาวิจัยซึ่งแต่ละชนิดอาจมีความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับศาสตร์หลายๆ

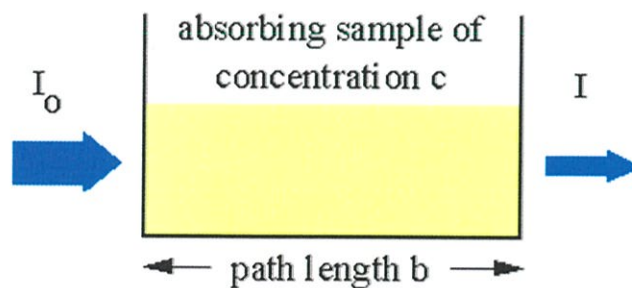
แขนงด้วยกันในปัจจุบันนี้วัสดุนาโนหลายๆชนิดสามารถนำไปให้เกิดประโยชน์และมีคุณค่าอย่างยิ่ง เช่นการพัฒนาหัวอ่านนาโนของเครื่อง Scanning electron microscope (SEM), Tunneling electron microscope (TEM) หรือ Atomic force microscope (AFM) ซึ่งบางชนิดพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงการค้าได้แล้วอย่างไรก็ตามงานวิจัยทางด้านนาโนศาสตร์ในขณะนี้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ซึ่งอาจต้องใช้เวลาอีกระยะหนึ่งจึงจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริงในอนาคตข้างหน้าต่อไป

2.5 เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล สเปกโทรสโกปี

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณในการหาปริมาณสารที่ต้องการจะวิเคราะห์ในตัวอย่างต่างๆซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปสารละลาย นอกจากนั้นยังเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและได้กลายมาเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่สำคัญที่ใช้ปัจจุบันเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่ายประยุกต์ใช้ได้กว้างมีความรวดเร็วและความแม่นยำสูงอีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูง เทคนิคนี้เลือกใช้แสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและช่วงวิสิเบิลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสงโดยเมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่างตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะสามารถผ่านตัวอย่างออกไปได้ข้อมูลที่ได้จากช่วงอัลตราไวโอเลตและช่วงวิสิเบิลนั้นอาจใช้ในการช่วยยืนยันข้อมูลที่ได้จากช่วงอินฟราเรดหรือข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่นๆแต่จะไม่สามารถใช้ระบุชนิดของสารตัวอย่างได้อย่างถูกต้องนัก

2.5.1 กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law)

แสดงการเดินทางของแสงผ่านสารละลายจะได้ค่าการทะลุผ่านและค่าการดูดกลืนดังสมการ 2.1-2.3



รูปที่ 2.3 แสดงรังสีตกกระทบด้วยความเข้ม I_0 และรังสีที่ทะลุผ่านมีความเข้ม I เมื่อเดินทางทะลุผ่านสารละลายที่มีระยะทาง b

$$\text{ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance)} \quad T = I / I_0 \quad (2.1)$$

$$\text{ค่าการดูดกลืน (Absorbance)} \quad A = -\log I/I_0 \quad (2.2)$$

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเทคนิคเทคนิคอัตรารวไอเลต วิสิเบิล สเปกโตรสโคปีนี้อาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของBeer Lambert's Law ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่างในสารละลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการดูดกลืน (Absorbance) ของสารละลายนั้นดังสมการ 2.3

$$A = \alpha bc \quad (2.3)$$

เมื่อ A คือค่าการดูดกลืน(absorbance)

α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient หรือ absorptivity)

b คือระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ในสารละลาย (path length)

c คือความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง

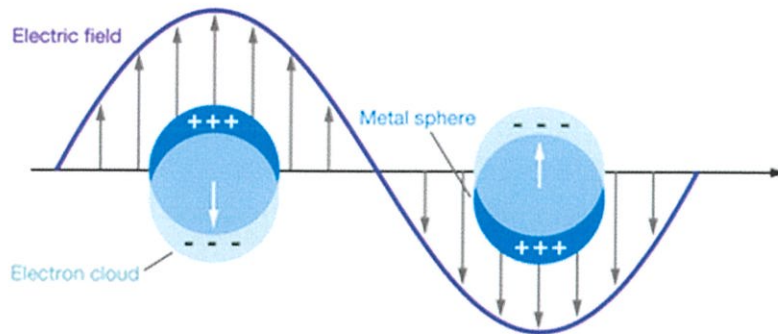
ในทางปฏิบัติการนิยมใช้ค่าการดูดกลืนเนื่องจากมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นซึ่งหาได้ง่ายกว่าเปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการทะลุผ่านซึ่งกฎนี้จะเป็นจริงกับแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic radiation)ซึ่งก็คือแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งๆเท่านั้น โดยแสงเมื่อผ่านสารละลายตัวอย่างที่อยู่ใน cell ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจะขึ้นกับความหนาของ cell (path length) และความเข้มข้นของสารละลายนั้นแต่จะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากกฎนี้ที่ความเข้มข้นสูงมาก ๆ

2.6 สมบัติทางแสงวัสดุนาโน

สมบัติทางแสงซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะจะแสดงสมบัติทางแสงอย่างเด่นชัดซึ่งอธิบายด้วยปรากฏการณ์เซอร์เฟอพลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance, SPR) ซึ่งเป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพรียงกันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริกเช่นระหว่างทองคำหรือกับอากาศหรือสารละลาย โดยที่ขนาดยอคคลื่นและความกว้างของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆจะขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างประเภทของวัสดุและสภาพแวดล้อมรอบๆวัสดุนั้น

อนุภาคนาโนของทองคำจะมีสีแดงแทนที่จะเป็นสีเหลืองวาวอย่างที่พบได้ทั่วไปโลหะชนิดอื่นที่นอกเหนือไปจากทองคำก็สามารถแสดงปรากฏการณ์เชิงแสงในลักษณะเดียวกันนี้ได้เช่นกัน เช่นอนุภาคนาโนของเงินจะมีสีเหลืองเข้มแทนที่จะเป็นสีเงินวาวที่เราคุ้นเคยอย่างไรก็ตามโลหะส่วนใหญ่จะมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรดซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่มองเห็น นอกจากนี้อนุภาคนาโนของโลหะเกือบทุกชนิดไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมตามปกติ ทำให้เราไม่ค่อยพบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่นๆ

เซอร์เฟจพลาสมอนเรโซแนนซ์หรือสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะสามารถเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาของแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตัวอย่างเช่นแสงกับอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคนาโนของโลหะดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการสั่นของพลาสมอน (plasmon oscillation) สำหรับอนุภาคทรงกลม

แสดงกระบวนการสั่นของพลาสมอนแสดงให้เห็นการกระจัดของกลุ่มประจุอิเล็กตรอน (conduction electron charge cloud) สัมพันธ์กับนิวเคลียสเมื่อได้รับแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นพ้องโดยความถี่ของการสั่นนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron density) มวลสัมพัทธ์อิเล็กตรอน (effective electron mass) ขนาดรูปร่างของการกระจายของประจุ (charge distribution) สำหรับการสั่นของอิเล็กตรอนสำหรับอนุภาคนาโนขนาดเล็กเรียกว่าไดโพลพลาสมอนเรโซแนนซ์ (dipole plasmon resonance) ซึ่งจะแตกต่างจากพลาสมอนเอกซ์ไซเตชัน (plasmon excitation) ของโลหะแบบก้อน (bulk metal)

สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการประมาณทางไฟฟ้าสถิต (electrostatics approximation) แสดงดังสมการ 2.4-2.5 [1,2]

$$\text{Particle dipole moment } p = \epsilon_0 \epsilon_d P E_0 \quad (2.4)$$

$$\text{Particle polarization } P = 4\pi R^3 \left[\frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m - 2\epsilon_d} \right] \quad (2.5)$$

โดยที่ p คือ ไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำ

R คือ รัศมีของอนุภาค

ϵ_m คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะ

ϵ_d คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของตัวกลาง

E_0 คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก

การเกิดอันตรกิริยาของแสงกับอนุภาคนาโนทรงกลมของโลหะจะทำให้แสงที่ตกกระทบเกิดการสูญเสียบ (extinction) ในแต่ละความถี่ที่ไม่เท่ากันซึ่งขึ้นกับขนาดรูปร่างชนิดของโลหะและชนิดของตัวกลางซึ่งจัดว่าเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่ใช้จำแนกชนิดของอนุภาคนาโนของโลหะการสูญเสียบที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงที่ตกกระทบกับอนุภาคนาโนทรงกลมของโลหะเกิดจากการกระเจิง (scattering) และดูดกลืน (absorption) ของอนุภาค

ตามหลักการประมาณทางไฟฟ้าสถิตสามารถเขียน extinction efficiency ดังสมการ 2.6-2.8

$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{scat}} \quad (2.6)$$

$$Q_{\text{scat}} = \frac{k^4 P^2 / 6 \pi}{\pi R^2} = (8/3) k^4 R^4 \left(\frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d} \right)^2 \quad (2.7)$$

$$Q_{\text{abs}} = \frac{k \text{Im} [P]}{\pi R^2} = 4k \text{Rim} \left(\frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d} \right) \quad (2.8)$$

Q คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียบ (extinction efficiency)

Q_{scat} คือสัมประสิทธิ์การกระเจิง (scattering efficiency)

Q_{abs} คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption efficiency)

ในทฤษฎีของมี (Mie's theory) ได้เสนอว่าสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเกิดจากอันตรกิริยาของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนที่ผิวอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับอนุภาคที่ศึกษามีขนาดเล็ก scattering efficiency จะมีค่าน้อยกว่า extinction efficiency มากๆจะได้ว่า $Q_{\text{sca}} \ll Q_{\text{ext}}$ ดังนั้นสมการ 2.6 จะลดรูปดังสมการ 2.9

$$Q_{\text{Ext}} = Q_{\text{abs}} \quad (2.9)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูป extinction cross-section และ absorption cross-section ได้ว่า

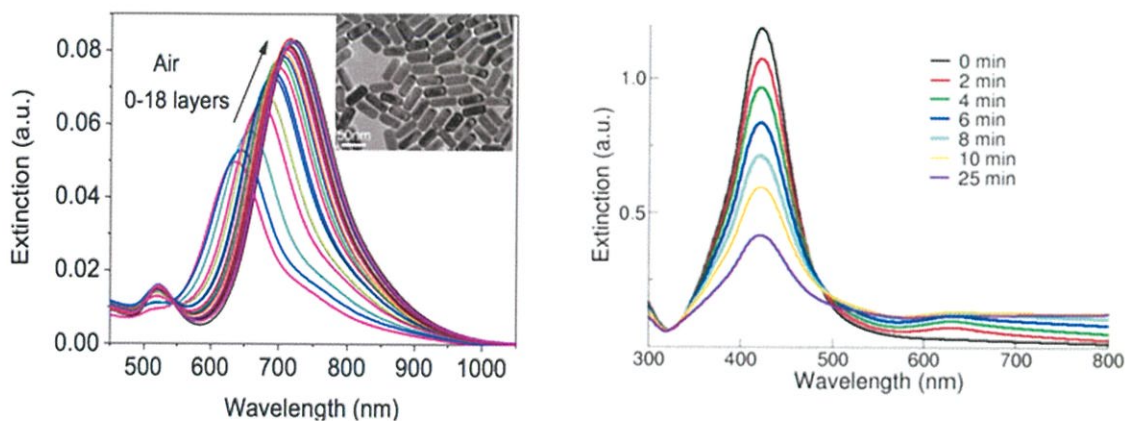
$$C_{\text{Ext}} = C_{\text{abs}} \quad (2.10)$$

$$\text{เมื่อ } Q = C / \pi R^2 \quad \text{และ Absorption} = \alpha = NC = NQ(\pi R^2)$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นของตัวกลาง

จากสมการ 2.6 – 2.10 สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะเป็นผลลัพธ์จากอันตรกิริยาของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนที่ผิวอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัว (characteristic peak) ของแต่ละธาตุรวมทั้งขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของอนุภาค

นาโนของโลหะเหล่านี้สำหรับสมบัติทางแสงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยตำแหน่ง extinction efficiency หรือยอดการดูดกลืน (absorption peak) จะสัมพันธ์กับการมองเห็นสีของอนุภาคนาโนของโลหะเช่นอนุภาคนาโนทองคำและเงินจะปรากฏสีแดงและเหลืองตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงกับ extinction efficiency ของอนุภาคนาโนทองคำ (รูปซ้าย) และเงิน (รูปขวา)[3]

2.6.1 การดูดกลืนแสงโดยอนุภาคนาโนของโลหะ

สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะที่ว่าด้วยการเกิดจากอันตรกิริยาของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนที่ผิวอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากหัวข้อข้างต้นเช่นเดียวกัน สำหรับอนุภาคโลหะที่มีขนาดเล็ก การกระเจิงแสงจะเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่โดยจะเห็นการสูญเสียดังกล่าว (extinction) มีค่าใกล้เคียงกับการดูดกลืน (absorption) ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์สมบัติทางแสงได้จากสมบัติการดูดกลืนแสงโดยอนุภาคนาโนของโลหะที่มีขนาดเล็กได้

การดูดกลืนแสงโดยอนุภาคนาโนของโลหะสามารถที่จะวิเคราะห์ด้วย absorption crosssection (C_{abs}) ผ่านสมการ 2.8 สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะมีค่าการดูดกลืนในความยาวคลื่นที่สูงขึ้นหรือมากกว่าในแบบจำลองของมิได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและ extinction cross-section ไว้ว่าอนุภาคทรงกลมของโลหะมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนสูงสุดหรือยอดการดูดกลืน (λ_{max}) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นตำแหน่งความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนสูงสุดจึงสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคและสามารถอธิบายแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของขนาดอนุภาคได้ นอกจากนี้ในสารละลายที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีการกระจายของขนาด (particles sizedistribution) มากพบว่าความกว้างของการดูดกลืน (absorption width) จะมีค่าสูงด้วย

2.7 สมบัติทางเคมีของโลหะนาโน

โลหะที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface-to-volume) สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่าเช่นอนุภาคทองคำที่มีขนาด 2 นาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวสูงถึง 150 ตารางเมตรต่อกรัมเมื่ออนุภาคเล็กลงจะทำให้พื้นที่ผิวสูงขึ้นดังนั้นการมีอะตอมจำนวนมากอยู่ที่บริเวณผิวหน้าจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่ายและยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆอันเนื่องมาจากอิทธิพลของเคมีผิวหน้า

ประโยชน์ที่ได้จากการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือการนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมีและการใช้เป็นตัวกรองแบบพิเศษการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุเมื่อวัสดุมีปริมาณอะตอมผิวหน้ามากขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากอิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์ (electronic and steric effects) โดยที่อิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์จะเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) เช่นการเกิดประจุบวกหรือประจุลบขึ้น ส่วนอิทธิพลสเตอริกจะเกี่ยวข้องกับลักษณะรูปร่างและความไม่เป็นระเบียบภายในโครงสร้าง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorodsในสารละลาย ascorbic acid

โดยการเตรียม Au@Pdnanorodsความเข้มข้น 0.001 mMผสมกับ ascorbic acid (AA) ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อศึกษาผลของความหนาของพลาเดียมต่ออนุภาคนาโนที่มีผลต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จากAu@Pdnanorods

- 3.1.1 เตรียม Au@Pdnanorodsที่ปริมาตร 0.123mlโดยผสมกับน้ำ DI ที่ปริมาตร 14.877mlจะได้ Au@Pdnanorodsที่ผ่านการเตรียมซึ่งมีความเข้มข้น 0.001mMปริมาตร 15 ml
- 3.1.2 เตรียมกรด AA โดยชั่งสารให้มือน้ำหนัก 0.0176 g แล้วนำไปผสมกับน้ำ DI ที่มีปริมาตร 10 mlจะได้กรด AA ที่ผ่านการเตรียมซึ่งมีความเข้มข้น 10 mMในปริมาตร 10 ml
- 3.1.3 นำ 0.001mMAu@Pdnanorodsจาก 1) ผสมกับ AA จาก 2) ที่ความเข้มข้น 10, 5, 1, 0.1, 0.01, 0.001mMในอัตราส่วน 1:0, 1:1, 1:2, 2:1 ในคิวเวทปริมาตร 3ml ดังตารางที่3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5และ3.1.6ตามลำดับเพื่อวัดค่าการดูดกลืนทางแสง จาก เครื่อง UV-Vis- spectroscopyตามรูปที่ 3.1.1

ตารางที่3.1.1 0.001mMAu@Pdnanorods+ 10 mMกรด AA

Au@Pd : AA	0.001 mMAu/Pd	10 mMAA
1:0	3 ml	0 ml
1:1	1.5 ml	1.5 ml
1:2	1 ml	2 ml
2:1	2 ml	1 ml

ตารางที่ 3.1.2 0.001mMAu@Pdnanorods+ 5 mM กรด AA

Au@Pd : AA	0.001 mM Au/Pd	5mM AA
1:0	3 ml	0 ml
1:1	1.5 ml	1.5 ml
1:2	1 ml	2 ml
2:1	2 ml	1 ml

ตารางที่ 3.1.3 0.001mMAu@Pdnanorods+ 1mM กรด AA

Au@Pd : AA	0.001 mM Au/Pd	1 mM AA
1:0	3 ml	0 ml
1:1	1.5 ml	1.5 ml
1:2	1 ml	2 ml
2:1	2 ml	1 ml

ตารางที่ 3.1.4 0.001mMAu@Pdnanorods+ 0.1mM กรด AA

Au@Pd : AA	0.001 mM Au/Pd	0.1mM AA
1:0	3 ml	0 ml
1:1	1.5 ml	1.5 ml
1:2	1 ml	2 ml
2:1	2 ml	1 ml

ตารางที่ 3.1.5 0.001mMAu@Pdnanorods+ 0.01mM กรด AA

Au@Pd : AA	0.001 mM Au/Pd	0.01 mM AA
1:0	3 ml	0 ml
1:1	1.5 ml	1.5 ml
1:2	1 ml	2 ml
2:1	2 ml	1 ml

ตารางที่ 3.1.6 0.001mMAu@Pdnanorods+ 0.001mM กรด AA

Au@Pd : AA	0.001 mM Au/Pd	0.001mM AA
1:0	3 ml	0 ml
1:1	1.5 ml	1.5 ml
1:2	1 ml	2 ml
2:1	2 ml	1 ml

3.2 วัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods ที่ค่าดัชนีหักเหของแสงต่างๆกัน

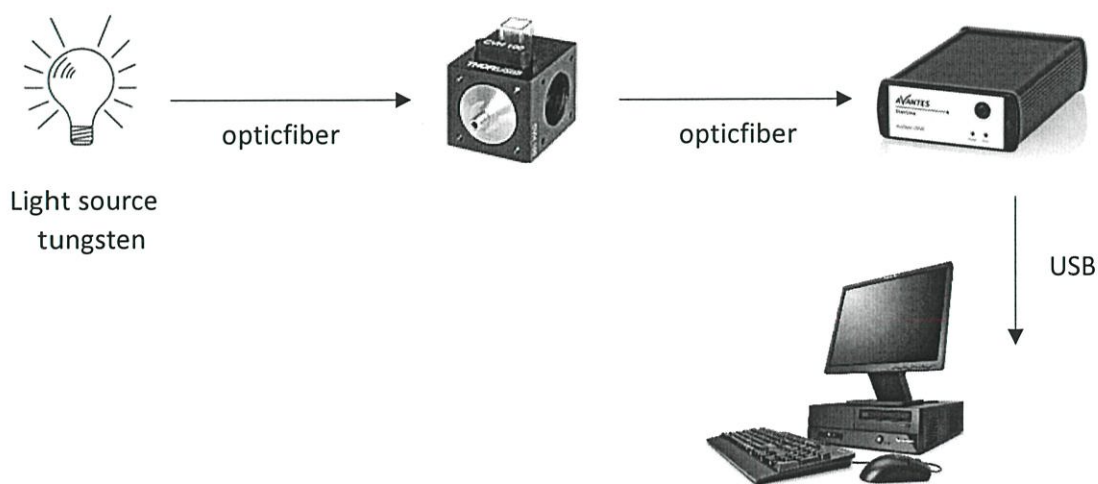
โดยการเตรียม Au@Pdnanorods ความเข้มข้น 0.001 mM ผสมในสารละลายผสมระหว่าง Ethanol กับ Toluene ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อศึกษาผลของตัวกลางในอนุภาคนาโนที่มีต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จาก Au@Pdnanorods

3.2.1 เตรียม Au@Pdnanorods ที่ปริมาตร 0.123 mL โดยผสมกับน้ำ DI ที่ปริมาตร 14.877 mL จะได้ Au/Pd ซึ่งมีความเข้มข้น 0.001 mM ปริมาตร 15 ml

3.2.1 ผสม 0.001 mM Au@Pdnanorods ที่เตรียมจาก 1) มาผสม Ethanol/Toluene ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 2:1, 1:0, 0:1 และ 0:0 ดังตารางที่ 3.2.1 ในคิวเวทปริมาตร 3 ml เพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนจากเครื่อง UV-Vis- spectroscopy ตามรูปที่ 3.1.1

ตารางที่ 3.2.1 Au@Pdnanorods ความเข้มข้น 0.001 mM กับ Ethanol : Toluene ที่อัตราส่วนต่างๆกัน

Ethanol : Toluene	0.001 mMAu@Pdnanorods	Ethanol:Toluene
1:1	1.5 ml	1.5 ml
1:2	1 ml	2 ml
2:1	2 ml	1 ml
1:0	3 ml	0 ml
0:1	0 ml	3 ml
0:0	0 ml	0 ml



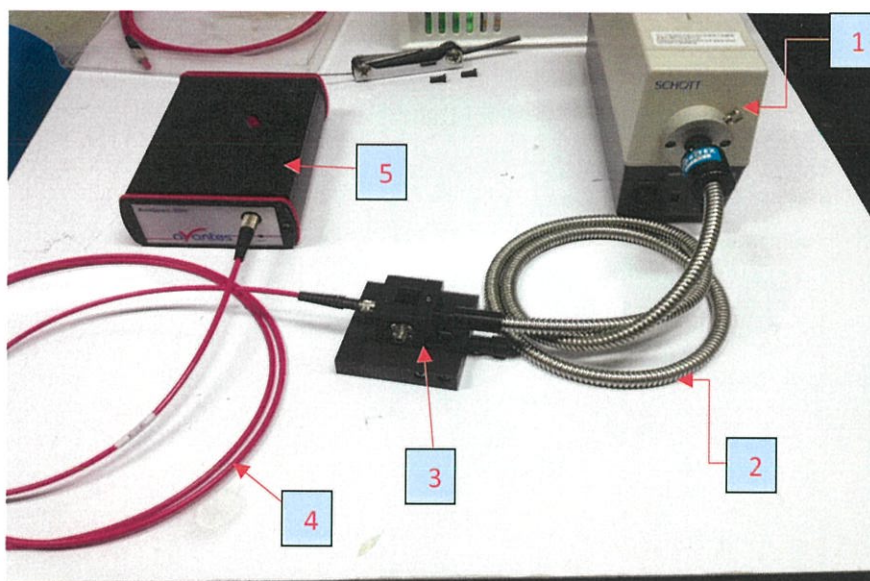
รูปที่ 3.1.1 ไดอะแกรมการจับอุปกรณ์วัดการดูดกลืนแสง

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

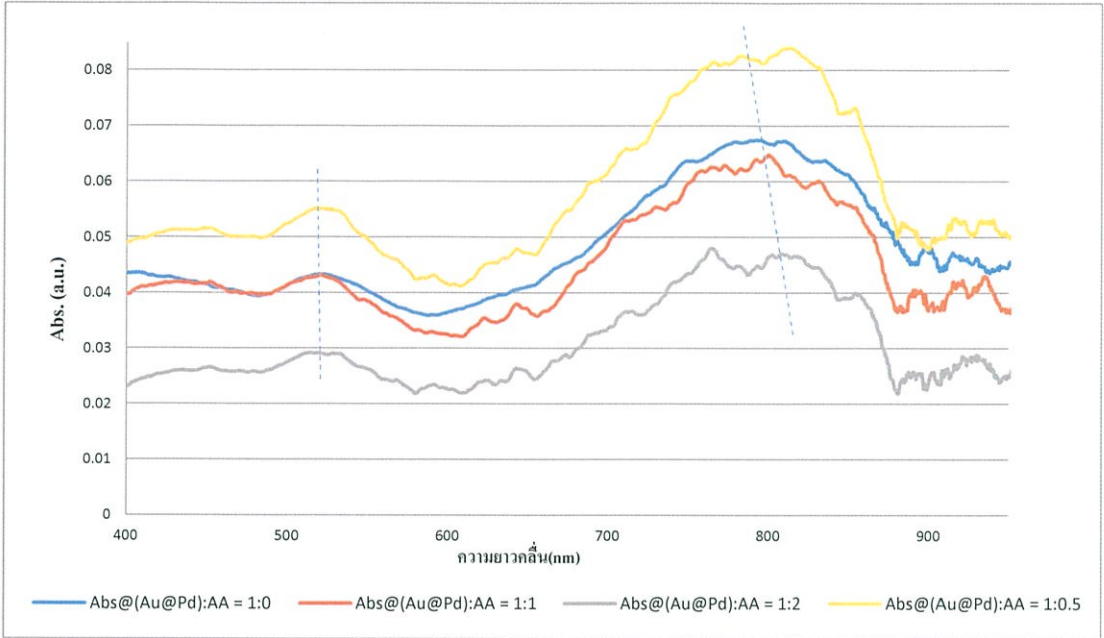
4.1 การทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods ในสารละลาย ascorbic acid

สำหรับโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางแสงของแท่งทองคำโนที่ถูกล้อมด้วยพลาเดียมโดยขั้นแรกเราได้ทำการศึกษาผลของความหนาของพลาเดียมที่เคลือบแท่งทองคำโนที่มีผลต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จากAu@Pdnanorods โดยใช้ความเข้มข้นของกรดวิตามินซี (ascorbic acid) ในการกััดชั้นของพลาเดียม

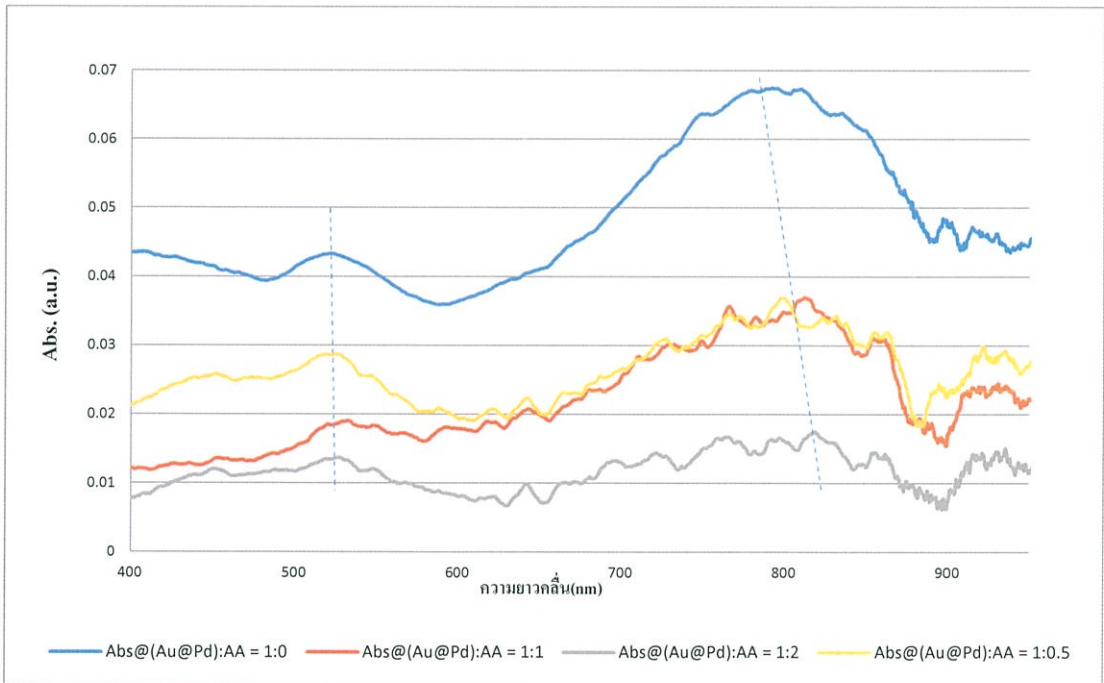


รูปที่ 4.1.1 แสดงการจัดตั้งระบบการทดลอง โดยอ่านค่าจากคอมพิวเตอร์

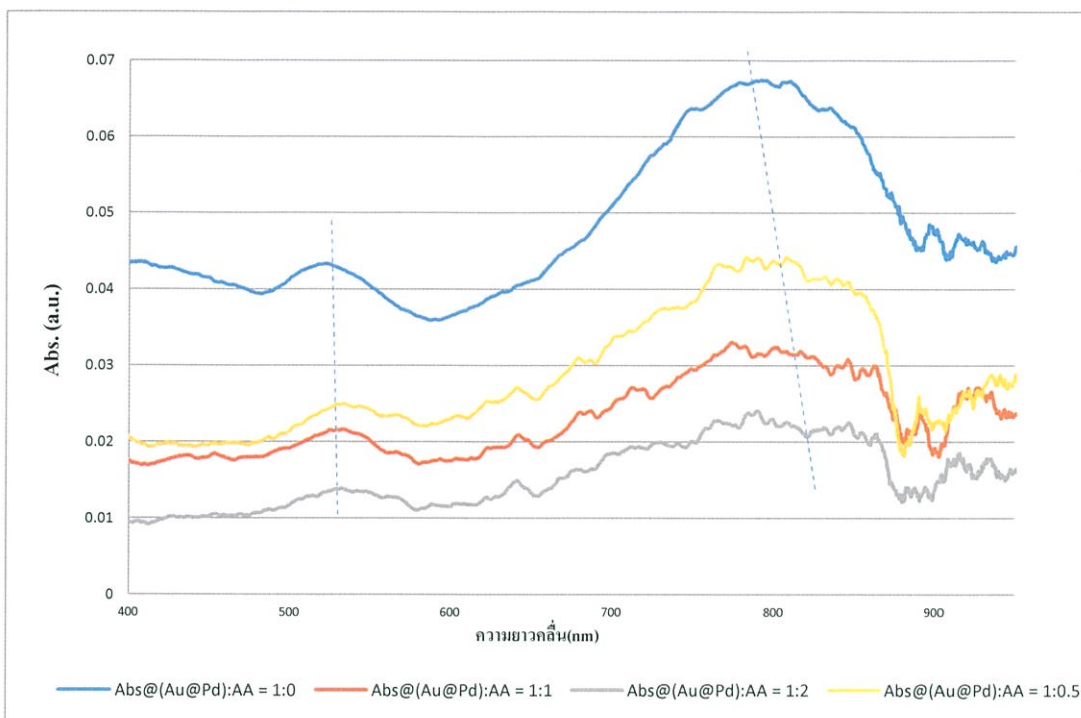
1. แหล่งกำเนิดแสง
2. สาย Optic fiber
3. แท่นวางตัวอย่าง
4. สาย Optic fiber model#FC-UV200-2
5. เครื่อง Spectroscopy (Avantes)



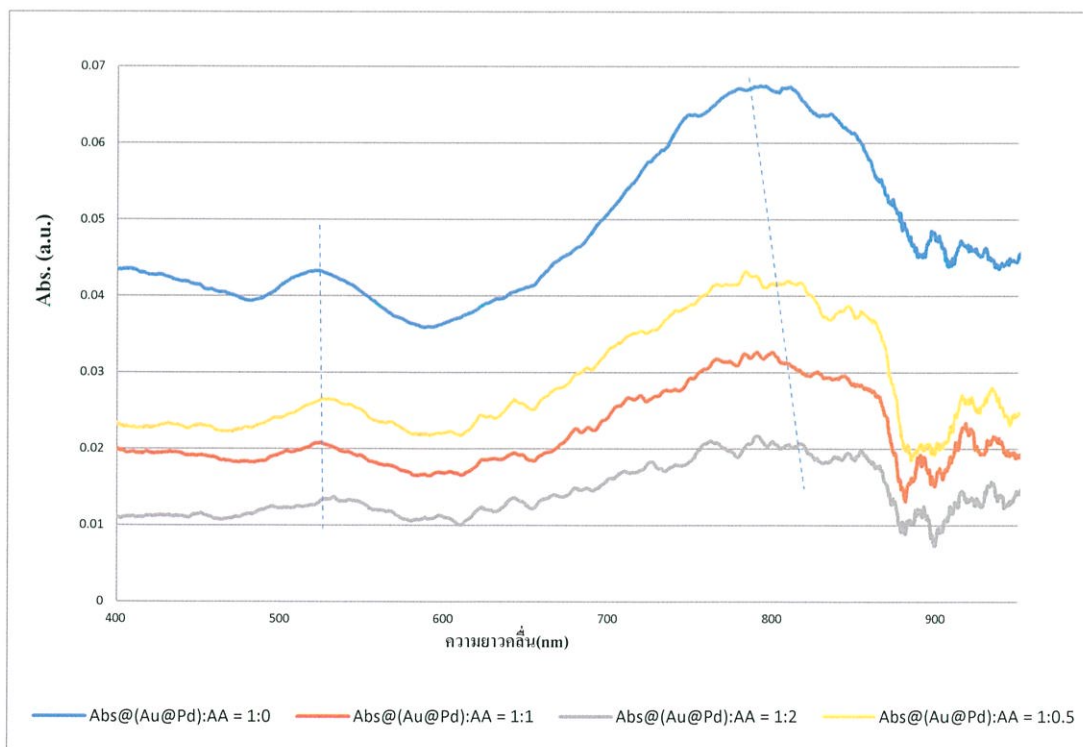
รูปที่ 4.1.2 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.001 mM กรด AA



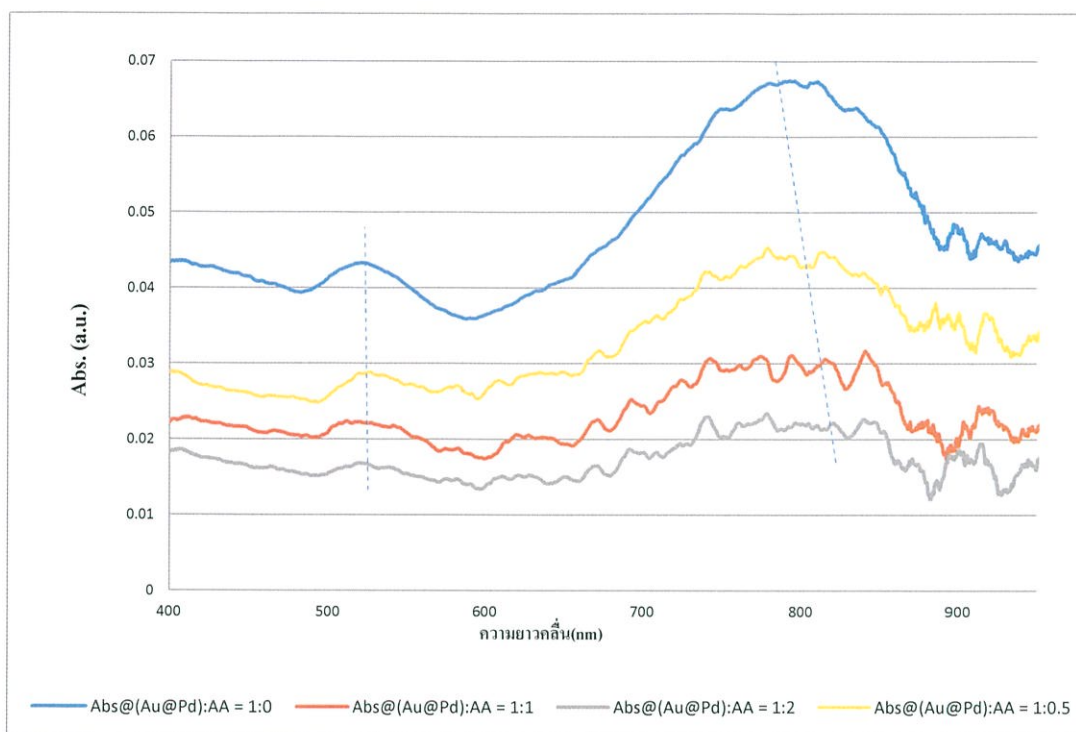
รูปที่ 4.1.3 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.01 mM กรด AA



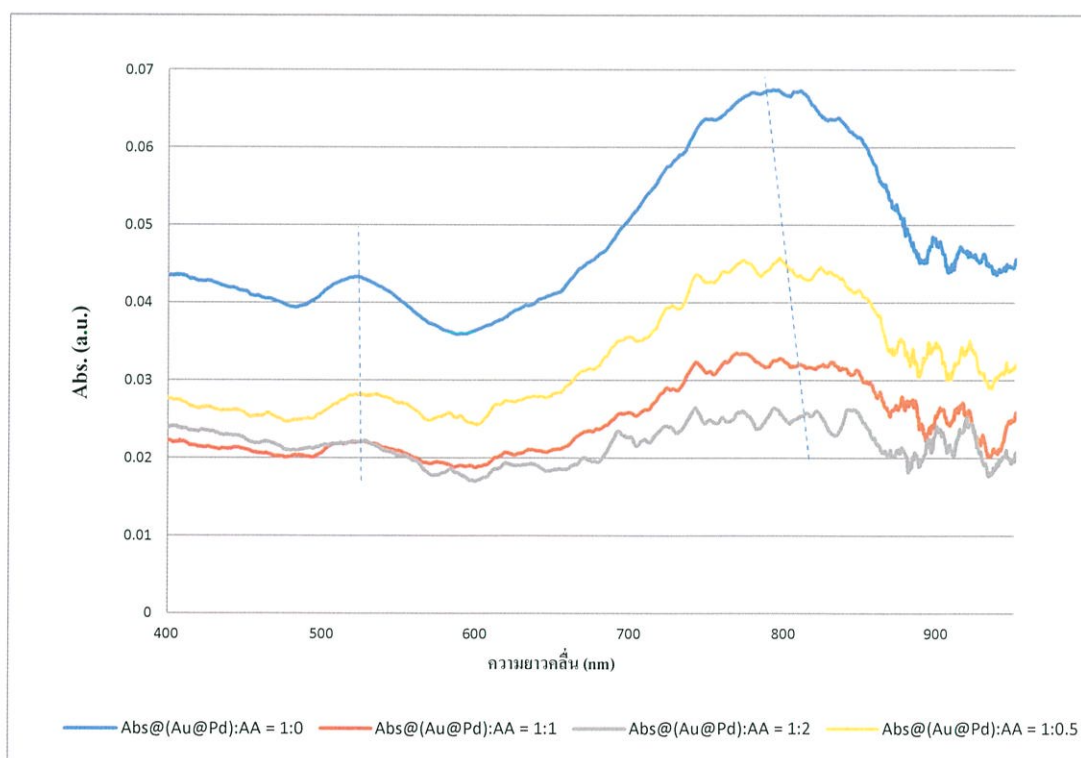
รูปที่ 4.1.4 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.1 mM กรด AA



รูปที่ 4.1.5 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 1 mM กรด AA



รูปที่ 4.1.6 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 5 mM กรด AA

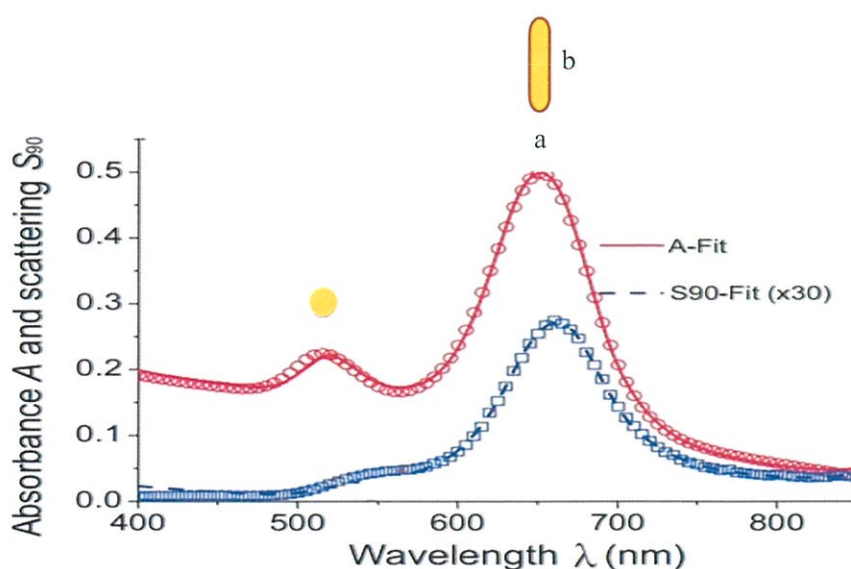


รูปที่ 4.1.7 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 10 mM กรด AA

การศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods ในสารละลาย Ascorbic acid (AA) เพื่อใช้ ascorbic acid ในการเลาะพลาเดียมให้บางลงจากชุดการทดลองในรูปที่ 4.1.1 ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1.2 - 4.1.7

ซึ่งมีข้อสังเกตเล็กน้อยว่าที่อัตราส่วนระหว่าง Au@Pdnanorods กับ AA ที่แตกต่างกัน (1:0, 0:1, 1:1, 1:2) ภายใต้ความเข้มข้นของกรด AA ที่คงที่ (0.001, 0.01, 0.1, 1, 5, 10 mM) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods อย่างเป็นนัยสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ค่าการดูดกลืนสำหรับ Au@Pd : AA = 1:0 ที่ 0.001 mM AA ให้พลาสมอนพีกที่แตกต่างกันอย่างไม่เป็นนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ Au@Pd : AA = 1:0 ที่ 0.01 mM AA เป็นต้น แต่ผู้ทำการทดลองคาดว่าถ้าความเข้มข้นของ AA มากขึ้นกว่า 10 mM อาจจะทำให้เห็นค่าการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods ที่ชัดเจนมากขึ้นและน่าจะเห็นค่าการดูดกลืนดังกล่าวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ด้วยสารตัวอย่างของเรามีราคาค่อนข้างสูงและมีปริมาณที่จำกัด เราจึงใช้สารในอัตราส่วนที่น้อยแต่ก็เพียงพอต่อการเรียนรู้ในเรื่องพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโน จากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorods ในสารละลาย Ascorbic acid (AA) นี้ได้เช่นกัน

เมื่อให้ค่าความเข้มข้นของโลหะนาโนและกรด AA คงที่แล้วเราควบคุมอัตราส่วนในการผสมสารดังกล่าวพบว่า เมื่อกรด AA มีอัตราส่วนมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความยาวคลื่นในการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์มีค่าความยาวคลื่นสูงหรือเอียงไปทางแถบสีแดงนอกจากนั้นจากผลการทดลองจะสังเกตเห็นพีก (peak) ของกราฟมีสองช่วง (λ_1 กับ λ_2) เนื่องจากเราทำการศึกษาวัสดุนาโนที่ไม่มี ความสมมาตรของแกน หรือเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ของรูปทรงวัสดุ (geometric effects) นั้นเอง จึงทำให้เกิดเป็นสองพีกของพลาสมอนภายใต้การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 4.1.8



รูปที่ 4.1.8 กราฟแสดงตัวอย่างอัตราส่วนของแกน a และ b ที่มีผลต่อการดูดกลืนของ nanorods [4] โดยที่ a คือ ความยาวแนวรัศมี และ b คือ ความยาวแนวแกน

ซึ่งการเคลื่อนของพืคสามารถเริ่มอธิบายได้จากการสั้นของอิเล็กตรอนอิสระของโลหะ ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยเกิดความเร่งเนื่องจากสนามไฟฟ้าและแรงจากการลดทอนซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$m \left(\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} \right) = qE = -eE \quad (4.1)$$

เมื่อ ความเร่งมีค่า $m \frac{d^2x}{dt^2}$ และแรงจากการลดทอนมีค่า $m\gamma \frac{dx}{dt}$

m คือมวลอิเล็กตรอน x คือ การกระจัด

E คือค่าสนามไฟฟ้า γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลุดกลืน

เมื่อ การกระจัดมีค่าเท่ากับ $x = x_0 e^{-i\omega t}$ (4.2)

จะได้ $m(-\omega^2 x - \gamma i\omega x) = -eE$

ซึ่งสามารถเขียนการกระจัดสูงสุดในรูปแบบ

$$x(t) = \frac{eE}{m(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (4.3)$$

เมื่อค่าโพลารไรซ์ P คือ $P = -Nex$ (4.4)

เมื่อ N คือ จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดและ x คือ การกระจัดสูงสุด

แทนสมการ 4.3 ลงใน 4.4 สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$P = \frac{-Ne^2 E}{m(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (4.5)$$

เมื่อเราทราบค่าโพลารไรซ์ P จะทำให้เรารู้ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (ความสว่างของแสง) จาก

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 E \epsilon_r \quad (4.6)$$

เมื่อ D คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า

E คือ ค่าสนามไฟฟ้า

ϵ_0 คือ ค่าไดอิเล็กทริกในสุญญากาศ

แทน สมการ 4.5 ลงในสมการ 4.6 จะได้

$$D = \epsilon_0 E \left\{ 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\omega^2 + i\gamma\omega)} \right\} \quad (4.7)$$

จากสมการ 4.6 และ 4.7 จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลางใด ϵ_r กับ ความเข้มของสนามไฟฟ้า D

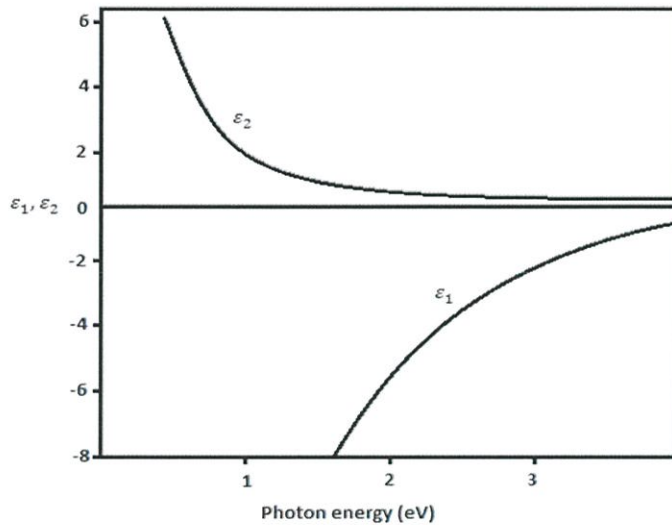
จาก
$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\omega^2 + i\gamma\omega)} \quad (4.8)$$

กำหนดให้ $\omega^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}$, ω^2 คือ ความถี่ของพลาสมา

จัดรูปสมการ 4.8 ใหม่ได้เป็น
$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega^2}{(\omega^2 + i\gamma\omega)} \tag{4.9}$$

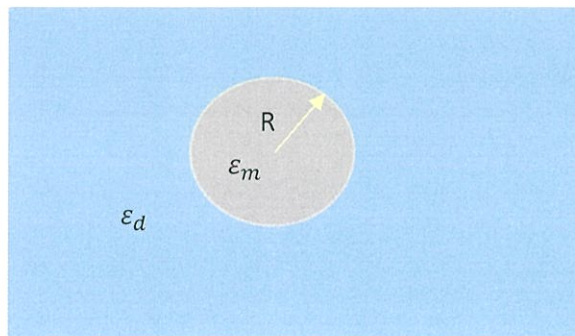
เมื่อ
$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \gamma^2)} + i \frac{\gamma\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \tag{4.10}$$

ซึ่งสุดท้าย จะได้ค่า ไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน ออกมาเป็น จำนวนจริง ϵ_1 กับจำนวนจินตภาพ $i\epsilon_2$ และพล็อตเป็นกราฟได้ ดังรูปที่ 4.2.8



รูปที่ 4.1.9.กราฟไดอิเล็กทริกฟังก์ชันเชิงซ้อนแสดงแบบจำลองของค่าจำนวนจริง,จำนวนจินตภาพ จากอิเล็กตรอนอิสระของโลหะที่พลังงาน โฟตอนต่างๆกัน โดยที่สนามไฟฟ้า $E = E_0 e^{-i\omega t}$

สำหรับอนุภาคนาโนที่ทำการศึกษาี้ Maxell-Garnet [5]ได้อธิบายเอาไว้ว่าเมื่ออนุภาคนาโนมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่ ดังรูปที่ 4.2.10 ค่าโพลาไรซ์เซชันของอนุภาคนาโน สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้



รูปที่ 4.2.10 แบบจำลองของMaxell-Garnet แสดงอนุภาคนาโนในตัวกลางไดอิเล็กทริก

$$P = 4\pi R^3 \frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d} \quad (4.11)$$

P คือ โพลาริซเซชัน

ϵ_d คือค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของตัวกลาง

ϵ_m คือ ค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะ

R คือรัศมีของอนุภาค

ซึ่งค่าโพลาริซเซชันของโลหะมีความสัมพันธ์กับการดูดกลืน (Absorption Cross – section) ดังสมการ 4.12

$$C_{Abs} = k \operatorname{Im}[P] = 4k R^3 \operatorname{Im} \left[\frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d} \right] \quad (4.12)$$

และจะเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตัวอย่างตาม สมการ

$$\alpha_{ext} = NC_{Abs} + NC_{scat} = NC_{ext} \quad (4.13)$$

เมื่อ C_{ext} คือ Extinction Cross – section

C_{Abs} คือ Absorption Cross – section

C_{scat} คือ Scattering Cross – section

α_{ext} คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

N คือ ความเข้มข้นของตัวอย่าง

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงเข้า-ออกและระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง คือ

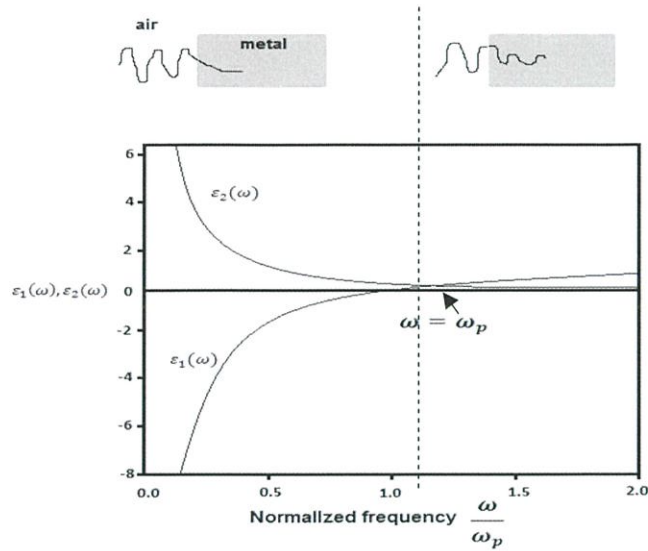
$$I = I_{inc} \exp(-\alpha_{ext} L) \quad (4.14)$$

เมื่อ I_{inc} คือ ความเข้มแสงตกกระทบ

I คือ ความเข้มแสงที่ส่งผ่าน

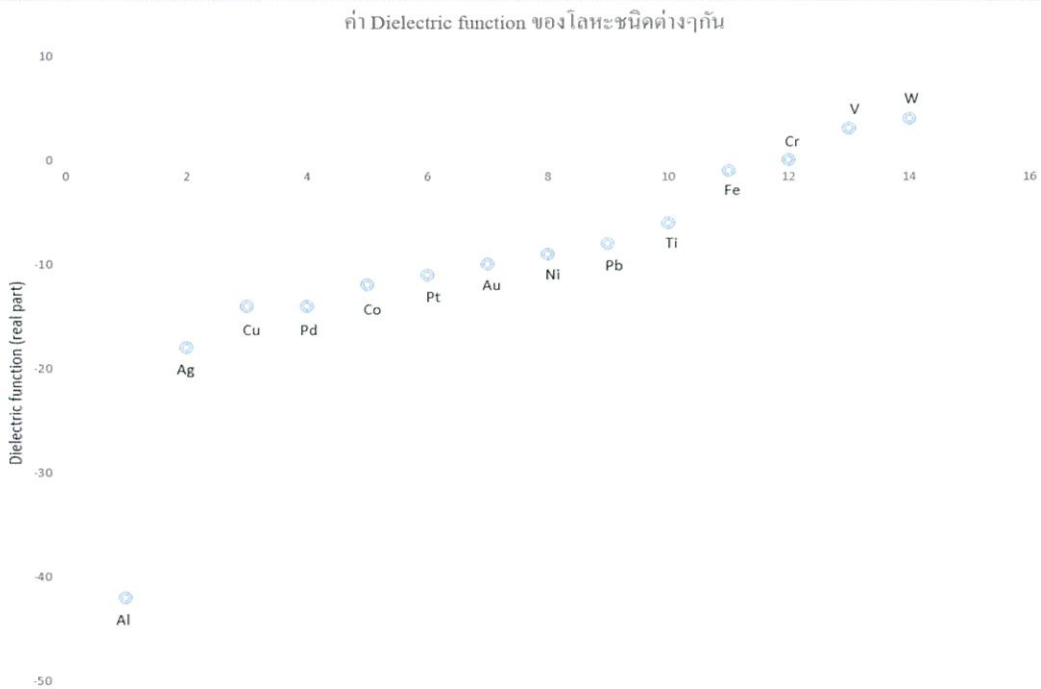
L คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง

จากสมการ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันมาพล็อตกับความถี่โฟตอนที่แตกต่างกัน จะได้ ϵ_1 ซึ่งมีค่าติดลบ ซึ่งสามารถพบในโลหะซึ่งจะเกิดการสททอนภายใต้การเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่จะพบอยู่ในช่วงแสงสีขาวย (visible light) ดังรูปที่ 4.2.10



รูปที่ 4.2.11 กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันเชิงซ้อน ($\epsilon_1 + i\epsilon_2$) ที่ความถี่แสงต่างๆกัน

จากการค้นคว้าเพิ่มเติมจากรูป 4.2.11 จะพบว่าที่ความถี่โฟตอนค่าค่าหนึ่งพลาสมาเดียว และทองต่างมีค่า ϵ_1 ติดลบทั้งคู่ ซึ่งพบว่าพลาสมาเดียวมีค่า ϵ_1 ต่ำกว่าทอง



รูปที่ 4.2.12 แสดงค่าส่วนจริงของไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะมีตระกูล[5]

สุดท้ายจากความสัมพันธ์ระหว่าง $E = \hbar\omega$ ค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ 4.1 – 4.14 จะทำให้ได้ว่า ค่า ϵ_1 ของพลาสมาเดียวควรจะอยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงิน ในขณะที่ค่า ϵ_1 ของทองควรจะอยู่ในช่วงของแสงสีแดง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเหลาพลาสมาเดียวด้วย AA เป็นการทำให้สัดส่วนของทองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ-

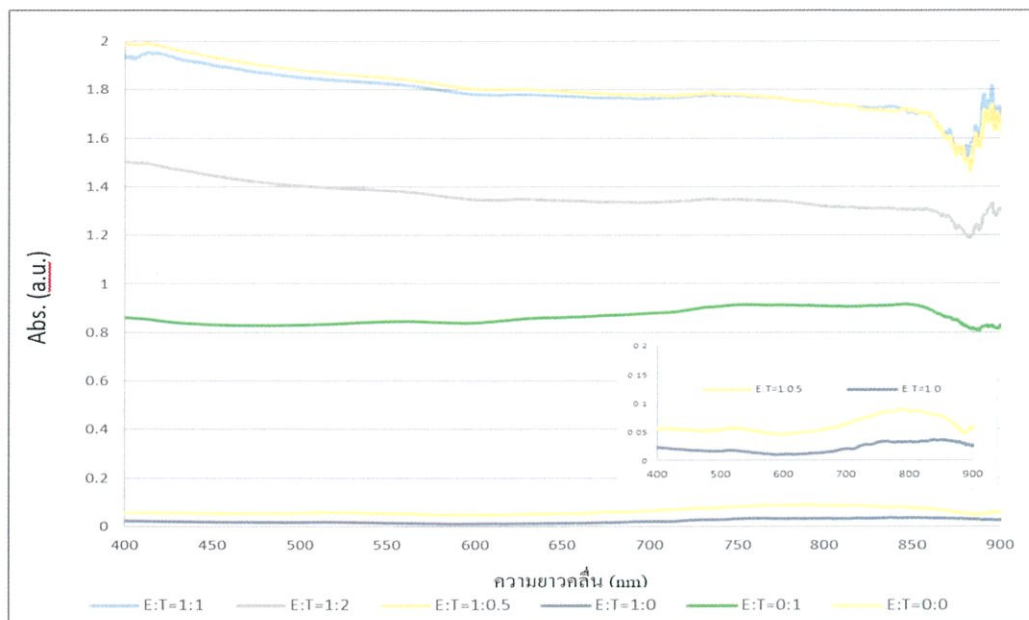
พลาเดียม ดังนั้นภายใต้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้แสงสีขาวจึงทำให้ค่าการดูดกลืนของพลาสมอนชิฟไปทางแสงสีแดง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ถ้าพลาเดียมไม่ได้ผ่านการเลาหรือยังมีความเป็นพลาเดียมมาก ทำให้สัดส่วนของทองน้อยเมื่อเทียบกับพลาเดียม ดังนั้นภายใต้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้แสงสีขาวจึงทำให้ค่าการดูดกลืนของพลาสมอนชิฟไปทางสีน้ำเงิน

4.2 การทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pdnanorodsที่อยู่ในตัวกลางEthanol:Tolueneที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆ

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางจากการเปลี่ยนอัตราส่วนของ Ethanol:Tolueneตามตารางที่ 4.2.1 ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโน 0.001Au@Pdnanorods ดังแสดงในรูปที่ 4.3.1

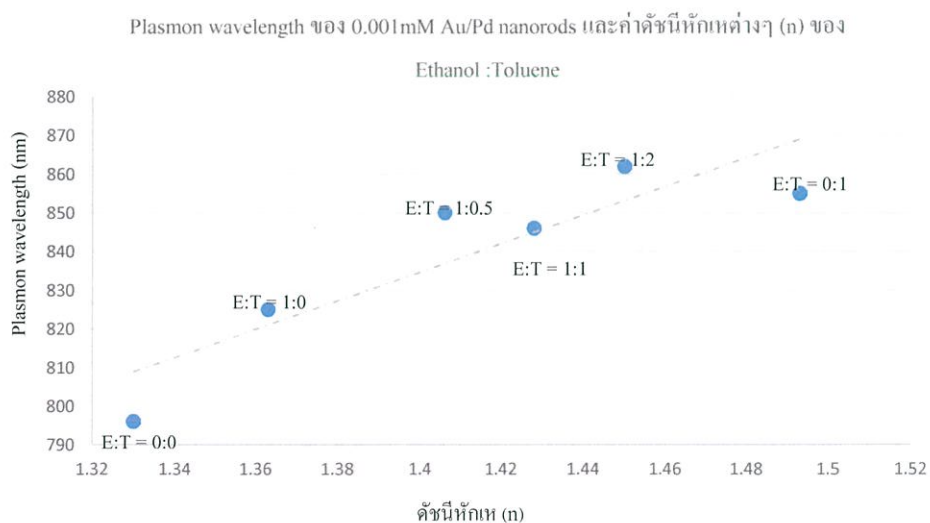
Ethanol:Toluene	n	λ_{max}
0:0	1.33	796
1:0	1.363	825
1:0.5	1.406	850
1:1	1.428	846
1:2	1.45	862
0:1	1.493	855

ตารางที่ 4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum wavelength (λ_{max}) และ ค่าดัชนีหักเหต่างๆ (n) ของ Ethanol:Toluene [6]



รูปที่ 4.2.1 กราฟแสดงแถบการดูดกลืนแสงของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + (E:T) อัตราส่วนโดยปริมาตร (E:T) = 1:0, 1:0.5, 1:1, 1:2, 0:1, 0:0 (E และ T หมายถึง Ethanol และ Toluene ตามลำดับ

จะเห็นว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนของ Ethanol:Toluene นั้นจะทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลง และสามารถทำให้เกิดการเลื่อนของค่า maximum wavelength (λ_{\max}) เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของ Ethanol:Toluene มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน Ethanol:Toluene เปลี่ยนแปลงด้วยตามรูปที่ 4.2.3 (หรือเทียบเคียงกับ λ_{\max} ในตารางที่ 4.2.1)



รูปที่ 4.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum wavelength (λ_{\max}) และ ค่าดัชนีหักเหต่างๆ (n) ของ Ethanol:Toluene

ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหต่อ λ_{\max} สามารถเริ่มต้นอธิบายได้จาก ค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (4.15)$$

ดังนั้นเมื่อเราทราบค่าไดอิเล็กทริก ε_1 และ ε_2

$$\text{เมื่อค่า } n = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}{2} + \frac{\varepsilon_1}{2}} \dots (4.15) \text{ และค่า } \kappa = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}{2} - \frac{\varepsilon_1}{2}} \quad (4.16)$$

เราสามารถหาค่าดัชนีหักเหได้จาก สมการ $N(\omega) = n - i\kappa$ (4.17)

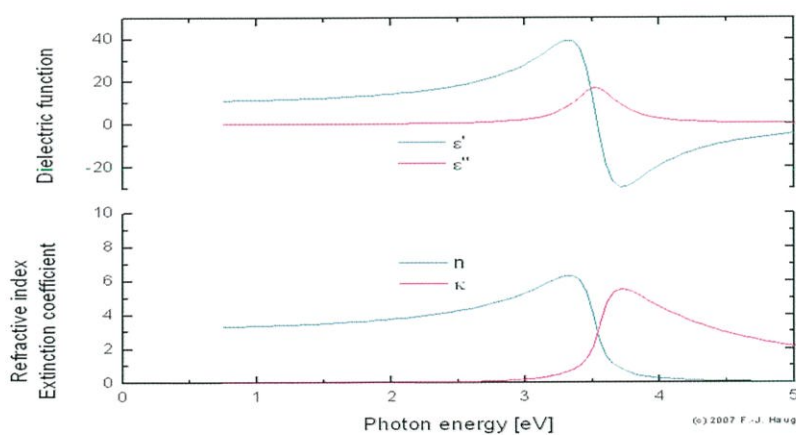
ในทำนองเดียวกัน เมื่อเราทราบค่าดัชนีหักเห $n - i\kappa$

$$\text{เมื่อ } \varepsilon_1 \text{ คือส่วนจริงของค่าไดอิเล็กทริก } \varepsilon_1 = n^2 - \kappa^2$$

$$\text{และ } \varepsilon_2 \text{ คือส่วนจินตภาพของค่าไดอิเล็กทริก } \varepsilon_2 = 2n\kappa$$

ก็สามารถหาค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ ได้เช่นกัน

จากความสัมพันธ์ของค่า $N(\omega)$ จากสมการที่ (4.15) และ $\varepsilon(\omega)$ จากสมการที่ (4.17) ทำให้สามารถถอดความสัมพันธ์ระหว่าง $N(\omega)$ กับ $\varepsilon(\omega)$ เทียบกับพลังงานโฟตอนดังแสดงในรูปที่ 4.2.4 ซึ่งเป็นทัศนศาสตร์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นในโลหะเท่านั้น



รูปที่ 4.2.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหกับค่าค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันที่พลังงานโฟตอนต่างๆกัน ซึ่งเกิดขึ้นในเฉพาะโลหะเท่านั้น[7]

และจากความสัมพันธ์

$$E = E_0 e^{-i\omega t} = E_0 e^{-i\kappa L} \quad (4.18)$$

ทำให้เราทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห สนามไฟฟ้า และ ค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น โดยที่ค่าดัชนีหักเหส่วนจินตภาพ k จะเป็นตัวกำหนดค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น k

$$\text{โดยที่} \quad k = \frac{\omega}{v} = \omega \frac{\kappa}{c} \quad (4.19)$$

ซึ่งค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น k มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสง I โดยเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าสนามไฟฟ้า E^2

$$(E/E_0)^2 = \exp(-2kL) \quad (4.20)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าภายนอก

L คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่านตัวกลาง

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น k มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน $\alpha = 2k$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงเข้า/ออก

$$I/I_0 = \exp(-\alpha L) \quad (4.21)$$

เมื่อ L คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่านตัวกลาง

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

I คือ ความเข้มของแสงตกกระทบ

ดังนั้นผลของค่าดัชนีหักเหในตัวกลางที่มากขึ้นมีผลต่อค่า maximum wavelength (λ_{\max}) ที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.2.3 ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการ 4.15 - 4.21 กล่าวคือ เมื่อค่าดัชนีหักเห $N(\omega)$ มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าดัชนีหักเหส่วนจินตภาพ κ เพิ่มขึ้นตามสมการที่ 4.17 ดังนั้นจึงส่งผลต่อค่าการแพร่กระจายตัวของคลื่น (k) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 4.19 ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ $\alpha = 2k$ ดังนั้น เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มของแสง (I) น้อยลงตามสมการที่ 4.21 รวมทั้งค่าสนามไฟฟ้าที่ลดลงเช่นกัน ตามความสัมพันธ์ของ I ที่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าสนามไฟฟ้ากำลังสอง และจากค่าสนามไฟฟ้า $E = E_0 e^{-i\omega t}$ เมื่อ ω คือ ค่าความถี่ของแสงโดยมีค่าเท่ากับ $2\pi f$ ซึ่ง $f = \frac{c}{\lambda}$ จะทำให้ทราบว่า E จะเป็นปฏิภาคผกผันกับ λ นั่นหมายความว่าค่าการเลื่อนของ maximum wavelength (λ_{\max}) เป็นปฏิภาคผกผันกับสนามไฟฟ้านั้นเมื่อ λ_{\max} เพิ่มขึ้น จะทำให้สนามไฟฟ้า E มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าดัชนีหักเหมีค่าเพิ่มมากขึ้นนั่นเองดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหของ Ethanol : Toluene มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า λ_{\max} เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ ผู้ทดลองได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของพลาสมาเดียมเคลือบบนผิวของแท่งทองคำนาโน โดยในการทดลองตอนที่ 1 เราเปลี่ยนค่าความเข้มข้นที่ต่างกัน ของกรดวิตามินซี (ascorbic acid) (AA) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ(AA)ตั้งแต่ 0.001 mM ถึง 10 mMเพื่อใช้ในการเลาะพลาสมาเดียมให้บางลงผลการทดลองจะสังเกตเห็นพีค (peak) ของกราฟการดูดกลืนมีสองช่วงในช่วงแสงสีขาวย เนื่องจากเราทำการศึกษาวัสดุนาโนที่ไม่มีความสมมาตรของแกน หรือเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ของรูปทรงวัสดุ (geometric effects) จึงทำให้เกิดเป็นสองพีคของพลาสมอนภายใต้การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าซึ่งจะสามารถนำสารตัวอย่างชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัว Photocatalyst ได้ภายใต้ช่วงแสงสีขาวย

นอกจากนั้น จากการให้ค่าความเข้มข้นของAu@Pd nanorodsและกรด AA คงที่ แล้วเราควบคุมอัตราส่วนในการผสมระหว่าง Au@Pd nanorodsกับ กรด AA เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงความหนา – บางของตัวอย่างพบว่าเมื่อเลาะพลาสมาเดียมให้บางลงจากการเติมกรด AA ที่มีอัตราส่วนให้มากขึ้น จะทำให้สารตัวอย่างของเรามีความเป็นทองมากขึ้น จึงทำให้ค่าความยาวคลื่นในการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์มีค่าความยาวคลื่นสูงหรือเคลื่อนที่ไปทางแถบสีแดง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การเลาะพลาสมาเดียมในปริมาณน้อยๆจากการเติมกรด AA ให้มีอัตราส่วนที่ลดลง ทำให้สารตัวอย่างมีความเป็นพลาสมาเดียมมากขึ้น จึงทำให้ค่าความยาวคลื่นในการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์มีค่าความยาวคลื่นต่ำหรือเคลื่อนที่ไปทางแถบสีน้ำเงินนั่นเอง

ส่วนในการทดลองตอนที่2เป็นการศึกษาการทดลองวัดสเปกตรัมของอนุภาคนาโน 0.001Au@Pd nanorods ที่อยู่ในตัวกลาง Ethanol :Toluene ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ Tolueneจะทำให้ค่าดัชนีหักเหมากขึ้น นั้นสามารถทำให้เกิดการเลื่อนของค่า maximum wavelength(λ_{max}) ให้มากขึ้นหรือเคลื่อนที่ไปในทางสีแดงในทำนองเดียวกันเมื่อค่าดัชนีหักเหมีค่าน้อยลงจากการลดอัตราส่วนของ Tolueneจะส่งผลต่อค่า maximum wavelength (λ_{max})ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงไปด้วยนั่นเอง

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองอุปกรณ์เครื่องแก้วในการบรรจุสารในการทดลองยังมีขนาดที่ไม่เหมาะสมต่อสารตัวอย่าง
2. อุปกรณ์ในการวัดปริมาตรสารยังมีขนาดสเกลไม่ละเอียดพอ
3. ในการจับcuvetteควรรีไ่สูงมือในการจับ มิฉะนั้นจะมีรอยนิ้วมือติดอาจทำให้การทดลองคลาดเคลื่อนได้
4. ต้องมีความระมัดระวังในการทำการทดลองอยู่เสมอเพราะสารที่ความเข้มข้นต่างกันอาจจะมองด้วยตาเปล่าเพื่อสังเกตความแตกต่างของสารที่ความเข้มข้นต่างๆกันไม่ได้ซึ่งอาจหลงและทำการทดลองผิดได้
5. ในการทดลองต้องรักษาความสะอาดเป็นอันดับหนึ่งเสมอ เนื่องจากงานวิจัยนี้มีความละเอียดมากถึงระดับนาโน

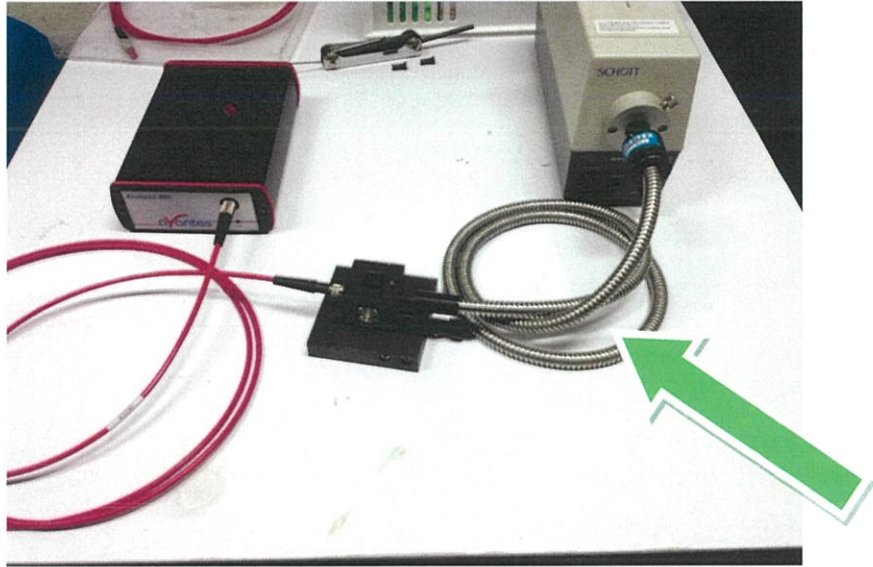
เอกสารอ้างอิง

- [1] S.V. Gaponenko, Introduction to Nanophotonics, Cambridge, New York, 2010.
- [2] J. Jahns and S. Helfert, Introduction to Micro- and Nanooptics, Wiley VCH, Germany, 2012.
- [3] K. Locharoenrat, Nonlinear Optical Investigation of Copper Nanowires, JAIST, PhD thesis, 2007.
- [4] N. Xu, B. Bai, Q. Tan, and G. Jin, *Accurate geometric characterization of gold nanorods ensemble by an inverse extinction/scattering spectroscopic method*, Tsinghua University, Beijing 100084, China
- [5] European patent specification, SADOWSKI, Janusz, W. SF-33560 Tampere (FI), *method for carrying out surface plasmon resonance measurement and sensor for use in the method*, European Patent Office EP 0 537 252 B1.10.01.1996.
- [6] X. Lang, L. Qian, P. Guan, J. Zi, and M. Chen, *Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University, sendai 980-8577, Japan Department of physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China*
- [7] <http://www.superstrate.net/pv/optical/absorption.html>

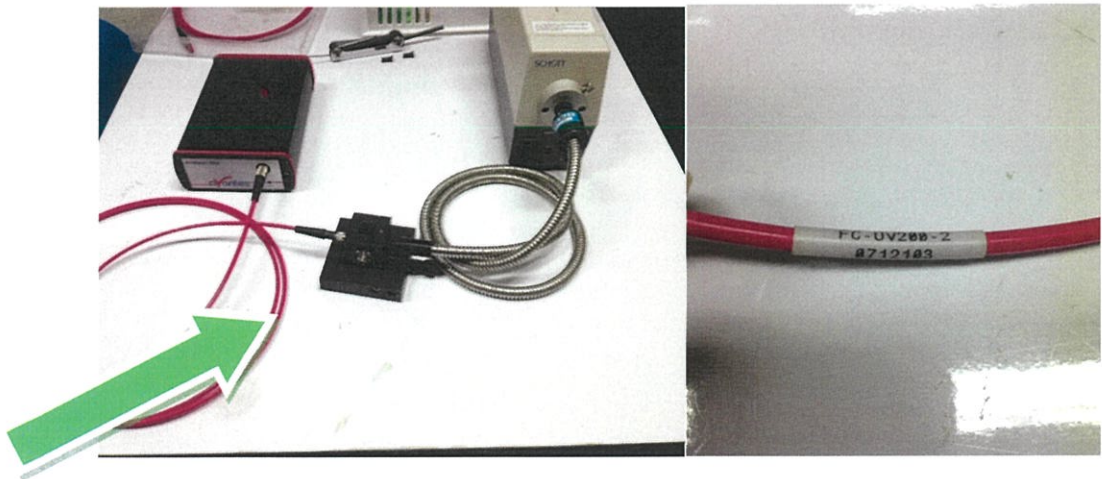
ภาคผนวก

วิธีใช้โปรแกรม Avasoft 7.4.0 Basic

1. ต่อสายไฟจากหลอดtungsten(SCHOTT) เข้ากับแท่นวางตัวอย่าง



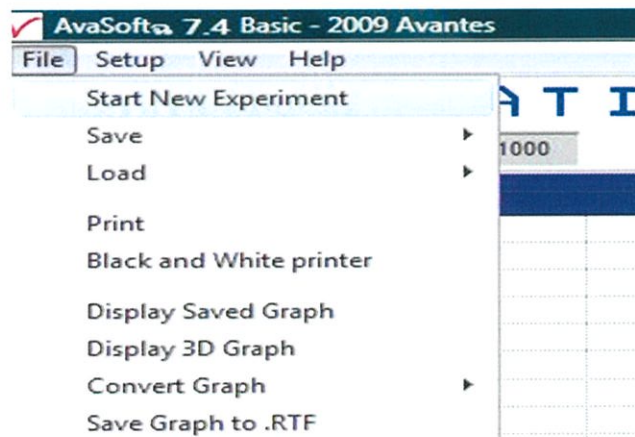
2. ต่อสาย optic fiber model# FC-UV200-2เข้าระหว่างแท่นวางตัวอย่างกับเครื่อง spectroscopy (Avantes)แล้วต่อสาย USB จากตัววัดแสง (Avantes) เข้ากับ Computer



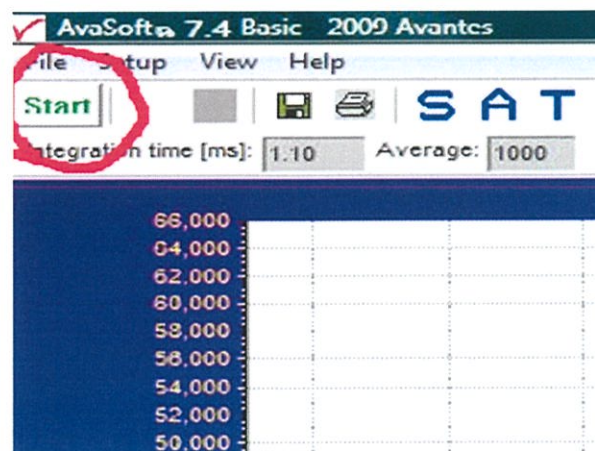
- เปิดสวิตซ์แหล่งกำเนิดแสง tungsten (SCHOTT) แล้วรอ 15-30 นาทีเพื่อทำการ warm up



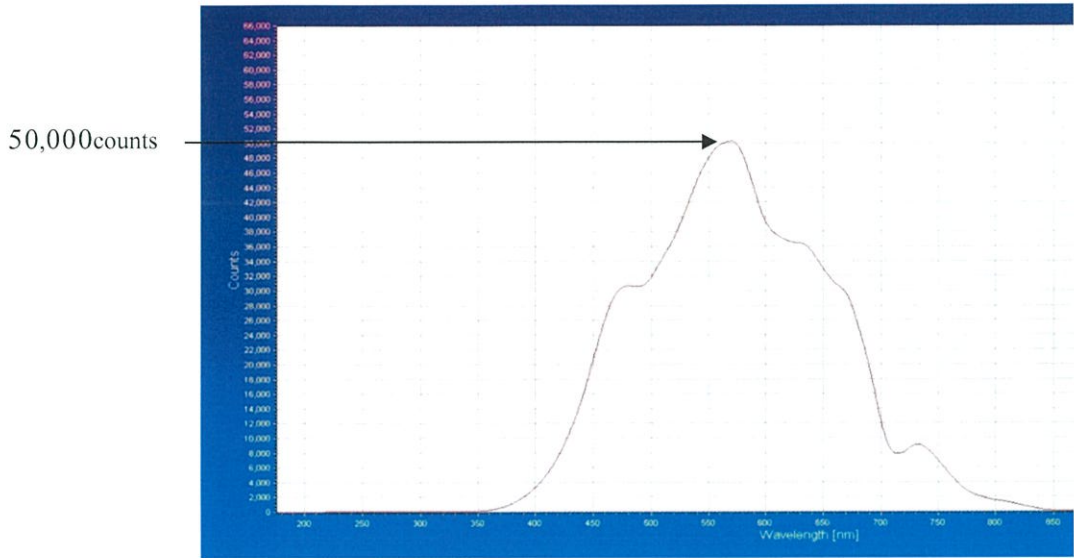
- เปิดโปรแกรม Avasoft 7.4.0 Basic
- ไปที่ File แล้วกด Start NewExperiment แล้วเลือกFolderที่ต้องการบันทึกงาน



- ที่โปรแกรม Avasoft 7.4.0 Basic กดปุ่ม Start



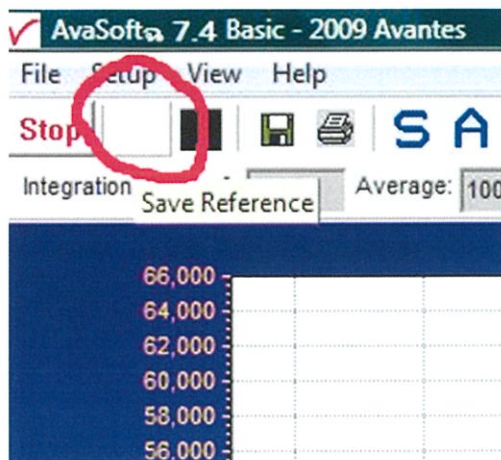
7. ปรับความเข้มแสงของหลอด tungsten จนได้ความเข้มแสงเข้า ~50,000 counts



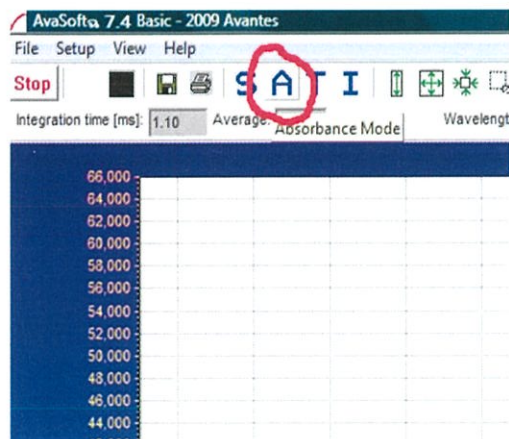
8. ปิดทางเดินแสงเข้าเครื่อง Spectrometer (ฝาจากแดง)แล้ววัดSpectrum(กดปุ่มสัญญาณลักษณะตัวเอสใหญ่ S)เพื่อดูว่าไม่มีความยาวคลื่นอื่นมาแทรก จากนั้นวัดค่า Dark mode (กดปุ่มรูปสี่เหลี่ยมสีดำ)แล้วต่อสาย optic fiber เข้าที่เดิม



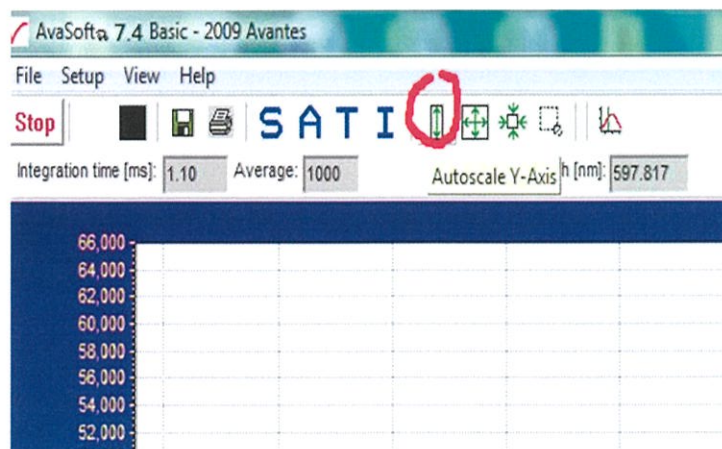
9. นำสารละลายที่ต้องการวัดที่ไม่มีสารตัวอย่าง (blank) ใส่ cuvette จากนั้นนำใส่บนแท่งวาง cuvette เพื่อวัด white mode (กดปุ่มรูปสี่เหลี่ยมสีขาว)



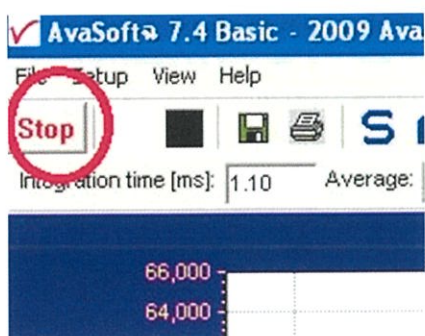
10. นำสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวัด (sample) ใส่ cuvette จากนั้นนำใส่บนแท่งวาง cuvette เพื่อวัดเพื่อวัด Absorbance (กดปุ่มตัวเอใหญ่ A) ณ แถบการดูดกลืนแสง 400-1100 nm



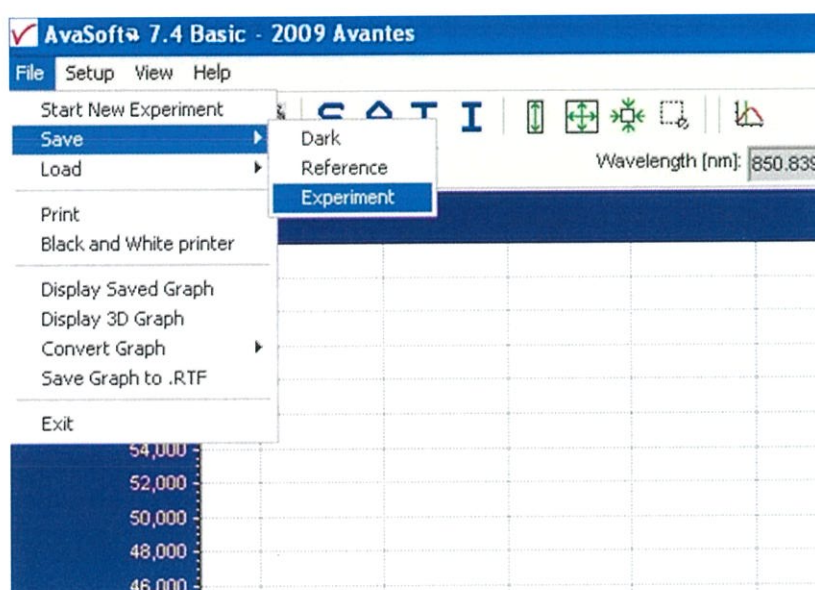
11. กดปุ่ม Auto scale



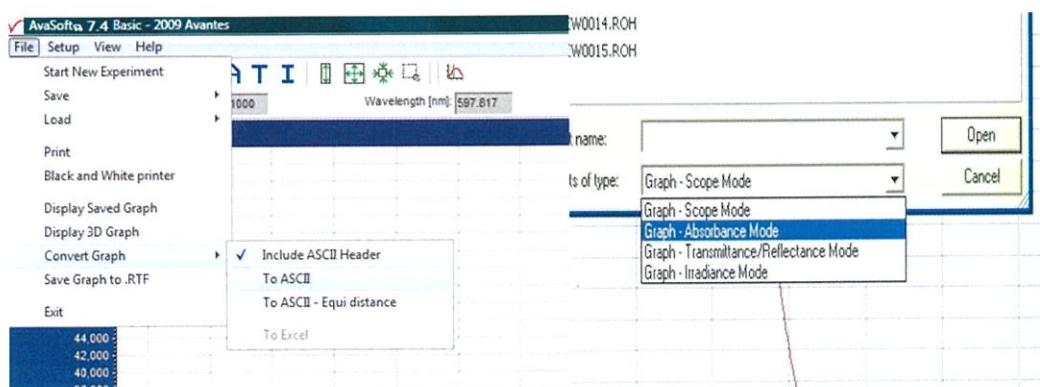
12. เมื่อได้ขนาดกราฟที่เหมาะสมให้กดปุ่ม stop



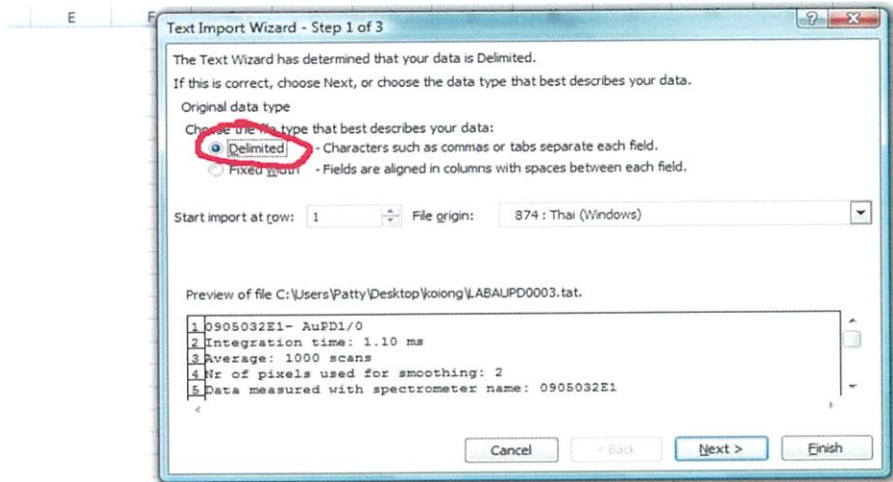
13. Save file.ABSตั้งชื่อตามต้องการ โดยกด File แล้วไปที่ Saveเลือก Experiment



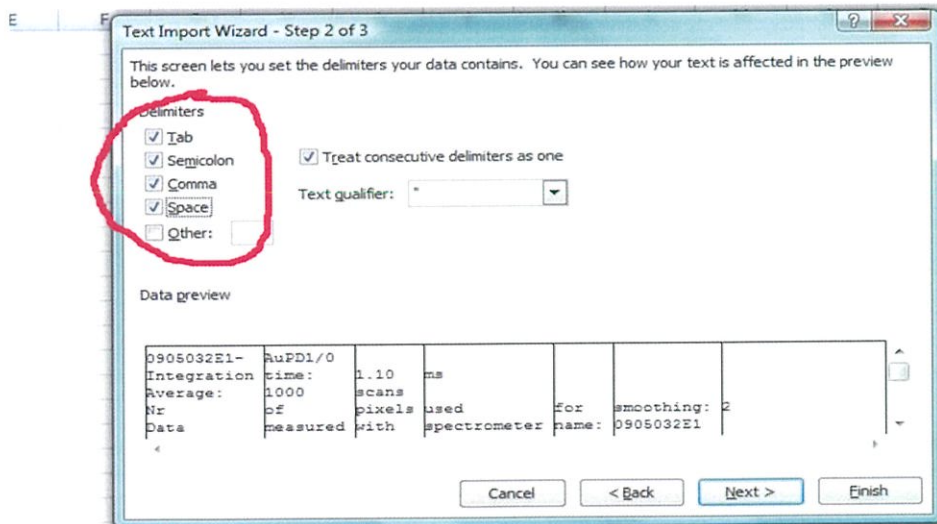
14. แปลงไฟล์จาก.ABSเป็น .tat โดยคลิกที่ file ไปที่ convert Graph To ASCII จากนั้นเลือก Object of type เป็น Graph -Absorbance Mode เลือกไฟล์ .ABS ที่ต้องการแล้วกด Openจะได้ไฟล์ .tat เพื่อนำไฟล์ที่ได้ไปเปิดในโปรแกรม Excel



15. เมื่อบันทึกข้อมูลเสร็จให้เก็บอุปกรณ์โดย ปิดตัวกำเนิดแสงก่อน แล้ว disconnect USB จาก computer จากนั้น เก็บสายoptic fiber
16. เปิดโปรแกรม Excel แล้วไปที่ open file เลือกไฟล์ .tat ที่ save ไว้ แล้วเลือก Delimited แล้ว กด next



17. กดเลือก Tab, Semicolon, Comma , Space แล้วกด next ตามด้วยกด finish



18. นำข้อมูลที่ได้อไปพล็อตกราฟ ระหว่าง Absorbance กับแถบความยาวคลื่น

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	B	C	D	E	F	G	H	I
1	[nm]	[counts]	[counts]	[counts]	abs			
2	175.74	-1.302	50.115	0.377	1.4861			
3	176.34	3.001	51.435	1.905	4			
4	176.94	1.7	53.569	5.335	1.1544			
5	177.54	2.192	51.02	4.914	1.2538			
6	178.14	1.081	51.755	3.297	1.3592			
7	178.73	2.264	53.61	2.818	1.967			
8	179.33	3.2	54.579	0.838	4			
9	179.93	-0.543	52.567	2.115	1.3006			
10	180.53	1.377	51.148	0.747	4			
11	181.13	0.376	49.661	1.541	1.6264			
12	181.73	1.0445	49.63	1.7586	1.8327			
13	182.33	1.2014	49.647	1.8479	1.8747			
14	182.92	1.0497	49.353	1.8208	1.7968			
15	183.52	0.995	48.906	1.6015	1.8976			
16	184.12	0.8542	48.178	1.3378	1.9906			

ตารางแสดงค่าตัวแปรต่างๆ

สัญลักษณ์	ชื่อตัวแปร	ความหมาย
T	Transmittance	ค่าการทะลุผ่าน
I	Output Intensity	ความเข้มแสงขาออก
I_0	Input Intensity	ความเข้มแสงตกกระทบ
A,Abs	Absorbance	ค่าการดูดกลืน
α,γ	Absorption coefficient	สัมประสิทธิ์การดูดกลืน
E	Electric field	สนามไฟฟ้า
ϵ_0	Dielectric constant (vacuum)	ไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน (สุญญากาศ)
ϵ_d	Dielectric of surrounding	ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของตัวกลาง
ϵ_m	Dielectric of metal	ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะ
ϵ_r	Relative dielectric	ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์เทียบกับสุญญากาศ
Q_{ext}	Extinction efficiency	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย
Q_{abs}	Absorption efficiency	สัมประสิทธิ์การดูดกลืน
Q_{scat}	Scattering efficiency	สัมประสิทธิ์การกระเจิง
R	Radius of particle	รัศมีของอนุภาค
P	Particle polarization	โพลาไรซ์ของอนุภาค
π	Pi	เป็นค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์มีค่า 3.1415
C	cross-section of particle	หน้าตัดของอนุภาค
X	displacement	การกระจัด
ω_p	Plasma frequency	ความถี่ของพลาสมา
ω	frequency	ความถี่ของแถบแม่เหล็กไฟฟ้า
K	Propagation constants	ค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น
$N(\omega)$	refractive index	ดัชนีหักเห

ตารางแสดงข้อมูลดิบ

ชื่อไฟล์	ตารางและรูป
AA0.001mM.xlsx	รูปที่ 4.2.1 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pdnanorods + 0.001 mM กรด AA
AA0.01mM.xlsx	รูปที่ 4.2.2 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pdnanorods + 0.01 mM กรด AA
AA0.1mM.xlsx	รูปที่ 4.2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pdnanorods + 0.1 mM กรด AA
AA1mM.xlsx	รูปที่ 4.2.4 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pdnanorods + 1 mM กรด AA
AA5mM.xlsx	รูปที่ 4.2.5 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pdnanorods + 5 mM กรด AA
AA10mM.xlsx	รูปที่ 4.2.6 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pdnanorods + 10 mM กรด AA
partent dielectric fn.pdf	รูปที่ 4.2.11 แสดงค่าส่วนจริงของไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะมีตระกูล
โปรเจคตอนที่2.xlsx	รูปที่ 4.3.1 กราฟแสดงแถบการดูดกลืนแสงของ 0.001 mM Au@Pdnanorods + (E:T) อัตราส่วน โดย ปริมาตร (E:T) = 1:0, 1:0.5, 1:1, 1:2, 0:1, 0:0 (E และ T หมายถึง Ethanol และ Toluene ตามลำดับ
ตอน 2maxwavwlength.xlsx	ตารางที่ 4.3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum wavelength (λ_{max}) และค่าดัชนีหักเหต่างๆ (n) ของ Ethanol :Toluene