



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างเครื่องมือเครื่องมือวัดทางแสงเชิงเส้นตรงและการศึกษาลักษณะสมบัติทาง  
แสงบนพื้นผิวโลหะขนาดจิ๋ว

Construction of Linear Optical Spectrometer and Optical Characterization of  
Metallic Nanostructured Surface

นาย กฤษกร โล่เจริญรัตน์

นางสาว ภัทริยา กิตติเดชาชาญ

สาขาวิชาฟิสิกส์

๖๐๐๒๗๔๖๐๘

RC๐๐๒๐๐

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๖

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสร้างเครื่องมือเครื่องมือวัดทางแสงเชิงเส้นตรงและการศึกษาลักษณะสมบัติ  
ทางแสงบนพื้นผิวโลหะขนาดจิว

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นาย กฤษกร โส้เจริญรัตน์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

นางสาว ภัทริยา กิตติเดชาชาญ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

### บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของพลาสมาเคลือบทองซึ่งมีขนาดในระดับนาโนเมตร ในโครงการพิเศษนี้แบ่งเป็นสองตอน โดยในการทดลองตอนที่หนึ่งจะเป็นขั้นตอนการศึกษาผลการเปลี่ยนค่าความเข้มขึ้นที่ต่างๆกันของกรวดวิตามินซี เพื่อใช้ในการเคลือบพลาสมาเคลือบให้บางลง สำหรับอนุภาคนาโน เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ จากค่าการดูดกลืนแสงของพลาสมาเคลือบทองขนาดนาโนผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง พบว่า เมื่อเคลือบพลาสมาเคลือบให้บางลงจากการเติมกรวดวิตามินซี ที่มีอัตราส่วนให้มากขึ้น จะทำให้สารตัวอย่างมีความเป็นทองมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความยาวคลื่นในการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์มีค่าความยาวคลื่นสูงหรือเคลื่อนที่ไปทางแสงสีแดง

ในส่วนของการทดลองตอนที่สองเป็นการศึกษาการทดลองวัดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนภายใต้ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆ เพื่อศึกษาว่าค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการเลื่อนของค่าการดูดกลืนแสงอย่างไร ซึ่งพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของโกลูอินจะทำให้ค่าดัชนีหักเหมากขึ้น ส่งผลต่อการเลื่อนของค่าค่าการดูดกลืนให้มากขึ้นหรือเคลื่อนที่ไปทางแสงสีแดง

**คำสำคัญ:** พลาสมอนเรโซแนนซ์, การดูดกลืนแสง, โลหะมีตระกูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Construction of Linear Optical Spectrometer and Optical Characterization of Metallic Nanostructured Surface

**Researcher:** Mr. Kitsakorn Locharoenrat

Ms. Pattareeya Kittidachachan

**Faculty:** Science

**Department:** Physics

### ABSTRACT

The aim of 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. 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 to be shifted to the longer wavelength or red-shift.

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 of surface plasmon resonance. That is, when amount of toluene increases, it result in refractive index to be increased. Hence, this contribution can shift the maximum wavelength to be longer.

**Keywords :** Plasmon resonance, absorption, noble metal.

### กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

นาย กฤษกร โส้เจริญรัตน์

นางสาว ภัทรียา กิตติเดชาชาญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนงานวิจัยและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 วัสดุนาโนกับนาโนเทคโนโลยี.....	4
2.2 โครงสร้างของวัสดุนาโน.....	5
2.3 การเตรียมวัสดุนาโน.....	6
2.4 ประโยชน์จากวัสดุนาโน.....	9
2.5 เทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี.....	9
2.6 สมบัติทางแสงของวัสดุนาโน.....	10
2.7 สมบัติทางเคมีของโลหะนาโน.....	14
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b> .....	<b>15</b>
3.1 สเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ในสารละลาย ascorbic acid.....	15
3.2 สเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ที่ค่าดัชนีหักเหของแสงต่างๆกัน.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

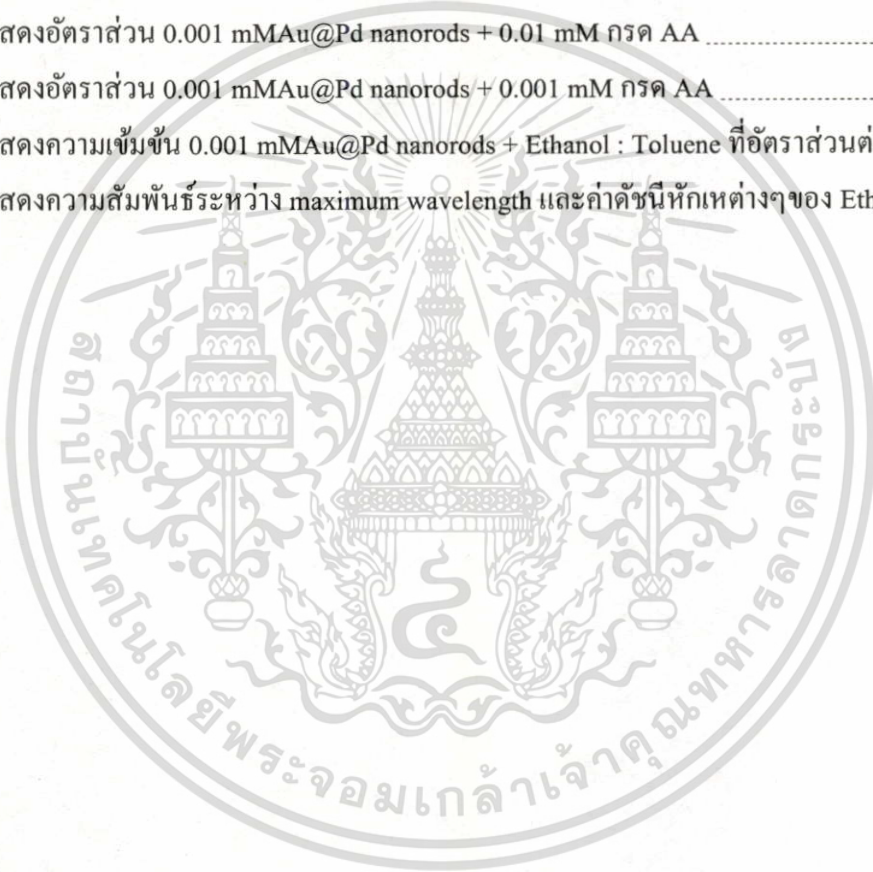
	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b> .....	20
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ในสารละลาย ascorbic acid ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	20
4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ที่อยู่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆกัน.....	29
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	34
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	34
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	34
<b>เอกสารอ้างอิง</b> .....	36
<b>ภาคผนวก</b> .....	37
<b>ประวัตินักวิจัย</b> .....	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1.1 แสดงอัตราส่วน 0.001 mMAu@Pd nanorods + 10 mM กรด AA.....	15
3.1.2 แสดงอัตราส่วน 0.001 mMAu@Pd nanorods + 5 mM กรด AA .....	16
3.1.3 แสดงอัตราส่วน 0.001 mMAu@Pd nanorods + 1 mM กรด AA .....	16
3.1.4 แสดงอัตราส่วน 0.001 mMAu@Pd nanorods + 0.1 mM กรด AA .....	17
3.1.5 แสดงอัตราส่วน 0.001 mMAu@Pd nanorods + 0.01 mM กรด AA .....	17
3.1.6 แสดงอัตราส่วน 0.001 mMAu@Pd nanorods + 0.001 mM กรด AA .....	18
3.2.1 แสดงความเข้มข้น 0.001 mMAu@Pd nanorods + Ethanol : Toluene ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	19
4.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum wavelength และค่าดัชนีหักเหต่างๆของ Ethanol:Toluene	30



## VII

## สารบัญ

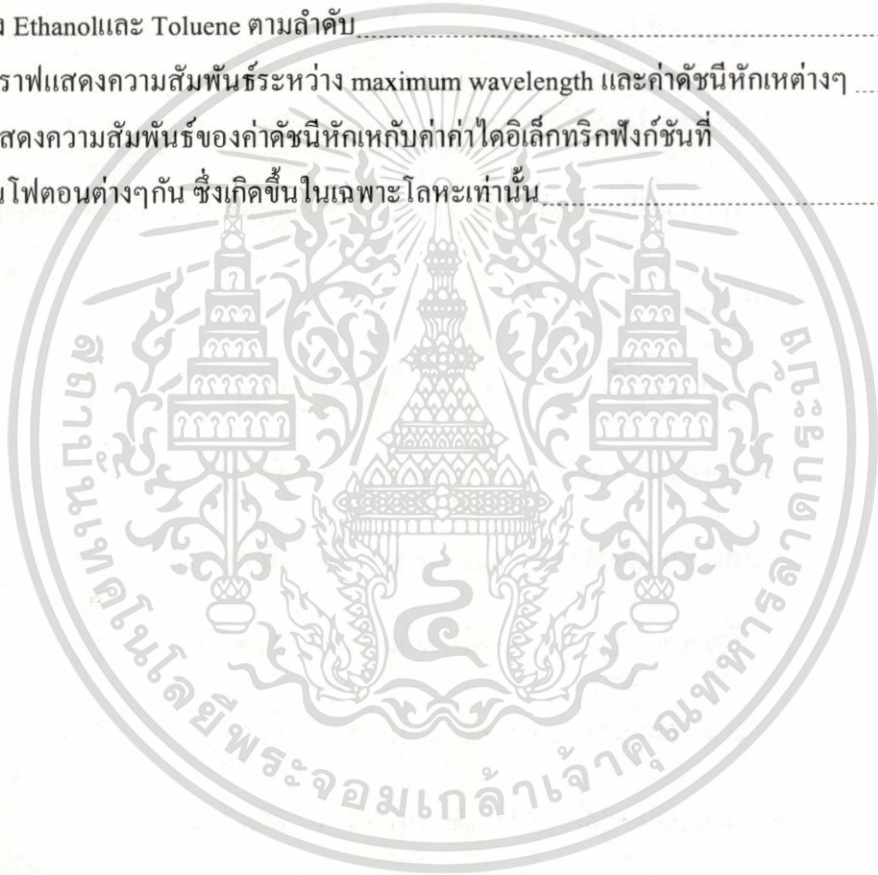
ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการผลิตวัสดุนาโนแบบ top-down และ bottom-up .....	5
2.2 ลักษณะโครงสร้างผลึกโลหะในระดับนาโนของกลุ่มก้อนอะตอม .....	6
2.3 แสดงรังสีตกกระทบด้วยความเข้ม $I_0$ และรังสีที่ทะลุผ่านมีความเข้ม $I$ เมื่อแสงเดินทางทะลุผ่านสารละลายที่มีระยะทาง $b$ .....	9
2.4 กระบวนการสั้นของพลาสมอน สำหรับอนุภาคทรงกลม .....	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับ extinction efficiency ของอนุภาคนาโนทองคำและเงิน .....	13
3.3.1 การต่ออุปกรณ์ทางแสง .....	19
4.1.1 แสดงการจัดตั้งระบบการทดลอง โดยอ่านค่าการดูดกลืนจากคอมพิวเตอร์ .....	20
4.1.2 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.001 mM กรด AA .....	21
4.1.3 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.01 mM กรด AA .....	21
4.1.4 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.1 mM กรด AA .....	22
4.1.5 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 1 mM กรด AA .....	22
4.1.6 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 5 mM กรด AA .....	23
4.1.7 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 10 mM กรด AA .....	23
4.1.8 กราฟแสดงตัวอย่างอัตราส่วนของแกน $a$ และ $b$ ที่มีผลต่อ การดูดกลืนของ nanorods โดย $a$ คือ ความยาวแนวรัศมี และ $b$ คือ ความยาวแนวแกน .....	24
4.1.9 กราฟไดอิเล็กทริกฟังก์ชันเชิงซ้อนแสดงแบบจำลองของค่าจำนวนจริงกับ จำนวนจินตภาพ จากอิเล็กตรอนอิสระของโลหะที่พลังงานโฟตอนต่างๆกัน .....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VIII

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1.10 แบบจำลองของMaxell-Garnet แสดงอนุภาคนาโนในตัวกลางไดอิเล็กทริก.....	27
4.1.11 กราฟแสดงค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันเชิงซ้อนที่ความถี่แสงต่างๆกัน .....	28
4.1.12 แสดงค่าส่วนจริงของไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะมีตระกูล.....	29
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 Ethanol และ Toluene ตามลำดับ.....	30
4.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum wavelength และค่าดัชนีหักเหต่างๆ.....	31
4.2.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหกับค่าค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันที่ พลังงานโฟตอนต่างๆกัน ซึ่งเกิดขึ้นในเฉพาะโลหะเท่านั้น.....	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

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

งานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะทำการศึกษาสมบัติทางแสงของแท่งโลหะทองคำนาโนที่เคลือบด้วยพลาตตินั่มที่ความหนาต่างๆกัน และส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาเงื่อนไขของตัวกลางต่อแท่งโลหะนาโน

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของความหนาของพลาตตินั่มต่ออนุภาคนาโนที่มีผลต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จาก Au@Pd nanorods และศึกษาผลของตัวกลางในอนุภาคนาโนที่มีต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จาก Au@Pd nanorods

#### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยจะเริ่มจากการเตรียมระบบการทดลองและวัสดุในการทดลอง จากนั้นทำการตรวจสอบระบบที่ใช้ในการทดลอง แล้วจะทำการตรวจสอบสมบัติทางแสงที่ได้ในแท่งโลหะนาโน โดยอาศัยหลักการที่แสงจากแหล่งกำเนิดเดินทางไปตกกระทบกับผิวแท่งโลหะนาโน บางส่วนจะถูกสะท้อนและบางส่วนจะถูกดูดกลืน สำหรับการหาค่าการดูดกลืนเราจะวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนตัวอย่าง โดยใช้แสงจากแหล่งกำเนิด

ที่มีความยาวคลื่นในแถบแสงขาว ปริมาณแสงที่ถูกส่งผ่านออกมาจะขึ้นอยู่กับระยะทางเดินแสง, ความหนา และประเภทของตัวกลางและรวมทั้งขนาดและรูปร่างของอนุภาค

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

กิจกรรม	ตค-พย 2555	ธค 2555	มค-มีค 2556	เมย-พค 2556	มิย-กค 2556	สค-กย 2556
1. Set up อุปกรณ์ทางแสง	←→					
2. ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางแสง		←→				
3. วัดคุณสมบัติทางแสงจากแท่งทองนาโนเคลือบด้วยพลาเดียม			←→			
4. สรุปรงานวิจัยพร้อมเขียนรายงาน				←→		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เรียนรู้และเข้าใจถึงสมบัติทางแสงของแท่งโลหะนาโน ได้เข้าใจระบบในการทดลองวัดสเปกตรัมแสงของแท่งโลหะนาโน และเข้าใจถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของแท่งโลหะนาโน และดัชนีหักเหของตัวกลางที่มีผลต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์ ตลอดจนสามารถนำแท่งโลหะนาโนไปประยุกต์ในด้าน photocatalysis และ biosensor เป็นต้น รวมทั้งนำงานวิจัยนี้ไปเขียนบทความทางวิชาการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

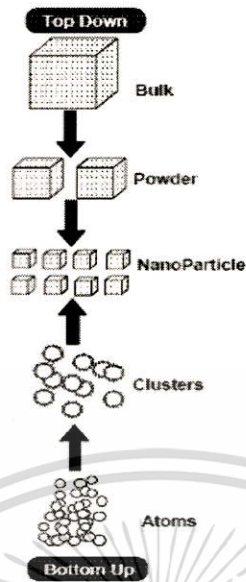
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุนาโนกับนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี ถือกำเนิดมาจากแนวคิดของริชาร์ดฟายน์แมน (Richard Feynman) ซึ่งเป็นผู้เปิดความคิดเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของนาโนเทคโนโลยีโดยเขาได้กล่าวไว้ตั้งแต่ปี 1965 ว่า “ในอนาคตข้างหน้า มนุษย์จะสามารถสร้างสิ่งต่างๆด้วยการจัดเรียงอะตอมได้ในระดับที่แม่นยำซึ่งณวันนี้ยังไม่มีกฎฟิสิกส์ใดๆ หรือรวมทั้งกฎแห่งความไม่แน่นอนใดๆมาขัดขวางความเป็นไปได้” จากนั้นจนถึงปัจจุบันนาโนเทคโนโลยี จึงมีการพัฒนาอย่างสืบเนื่องมาเป็นลำดับ

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

นาโนเทคโนโลยีถูกนิยามว่าเป็นเทคโนโลยีแห่งการประกอบและผลิตสิ่งต่างๆขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอมหรือโมเลกุลเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำและถูกต้องในระดับนาโนเมตรอาจนิยามเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นเป็น 2 แบบคือเทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk technology) เป็นการผลิตสิ่งของต่างๆโดยวิธีกลเช่น การตัดการกลึงการอัดการต่อกรงอเป็นต้นหรือโดยวิธีเคมีที่เกิดจากการผสมสารให้ทำปฏิกิริยากันโดยพยายามควบคุมสภาวะแวดล้อมต่างๆให้เหมาะสมแล้วปล่อยให้ทำปฏิกิริยากันเองเทคโนโลยีแบบนี้สามารถสร้างสิ่งเล็กๆได้ในระดับหนึ่งแต่ยังขาดความแม่นยำมีความบกพร่องสูงการนำเทคโนโลยีอย่างหยาบไปสร้างสิ่งของเล็กๆเช่นไมโครชิพเราเรียกว่าเป็นการใช้เทคโนโลยีแบบบนลงล่างดังภาพที่ 2.1 (Top-down technology) ซึ่งมีข้อจำกัดสูงจึงเรียกเทคโนโลยีประเภทนี้ว่าเทคโนโลยีอย่างหยาบเทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology) เป็นการผลิตสิ่งของต่างๆโดยวิธีการนำเอาอะตอมหรือโมเลกุลมาจัดเรียงณตำแหน่งที่ต้องการอย่างแม่นยำสิ่งที่ผลิตได้อาจเป็นสิ่งเล็กๆหรือเป็นสิ่งขนาดใหญ่ก็ได้การนำเอาเทคโนโลยีระดับโมเลกุลไปสร้างสิ่งใหญ่ๆเราเรียกเทคโนโลยีแบบนี้ว่าเป็นเทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน (bottom-up technology) ซึ่งเทคโนโลยีระดับโมเลกุลนี้เองที่พัฒนามาเป็นนาโนเทคโนโลยีดังภาพที่ 2.1

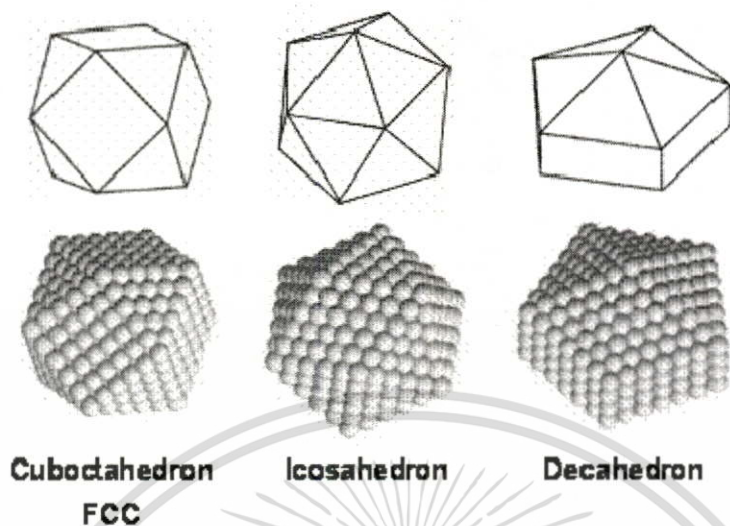


ภาพที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตวัสดุนาโนแบบ top-down และ bottom-up

## 2.2 โครงสร้างของวัสดุนาโน

ผลึกแบบก้อนใหญ่ (bulk crystals) ของโลหะจะมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยซ้ำๆกันที่เรียกว่าแลตทิซ (lattice) และมีการเรียงตัวอย่างเป็นระบบแต่สำหรับผลึกโลหะขนาดนาโนเมตร (metal nano-crystals) จะมีองค์ประกอบเป็นกลุ่มก้อนของอะตอมไม่กี่ร้อยอะตอมทำให้อะตอมส่วนมากเป็นอะตอมที่อยู่บริเวณผิวหน้าโดยที่รูปทรงของกลุ่มก้อนอะตอมจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวและพลังงานอิสระที่อยู่ในบริเวณผิวสัมผัสของโครงสร้างกลุ่มก้อนโดยทั่วไปแล้วรูปทรงของผลึกที่สภาวะสมดุลเกิดขึ้นจากการพยายามจัดรูปทรงของผลึกให้มีพลังงานอิสระบริเวณผิวหน้าต่อหน่วยปริมาตรน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้สำหรับผลึกขนาดใหญ่การจัดรูปทรงของผลึกจะเป็นไปตามกฎเกณฑ์แบบ “Wulff construction” แต่ผลึกที่มีขนาดในระดับนาโนอาจมีรูปทรงที่แตกต่างไปจากกฎเกณฑ์ดังกล่าวทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ผลึกนาโนมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงจึงทำให้ผลึกนาโนหรือกลุ่มก้อนอะตอมทั้งกลุ่มก้อนมีการจัดเรียงตัวกันใหม่กลายเป็นผลึกที่มีรูปทรงใหม่ๆที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในผลึกขนาดใหญ่เช่น จากการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนของทองคำโดยส่วนใหญ่จะมีรูปร่างผลึกเป็นแบบทรงเคทิวบอคตาฮีดรอน(truncated cuboctahedron) อย่งไรก็ตามมีการค้นพบว่าผลึกนาโนของทองคำมีรูปทรงเรขาคณิตแบบอื่นๆด้วยเช่นดีคาฮีดรอน (decahedron) โดเดคาฮีดรอน (dodecahedron) และไอโคซาฮีดรอน (icosahedron) ดังภาพที่2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างผลึกโลหะในระดับนาโนของกลุ่มก้อนอะตอม

ในเทอมของจุดหลอมเหลวสาเหตุที่ทำให้อนุภาคโลหะนาโนมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าปกติเกิดจากอนุภาคนาโนมีปริมาณอะตอมที่ผิวหน้ามากโดยที่อะตอมผิวหน้าจะมีระดับพลังงานที่ใช้ในการยึดติดกันและกันน้อยกว่าที่พบในของแข็งปกติและจากอิทธิพลเคลวิน (Kelvin effect) จะพบว่าอนุภาคนาโนจะมีความดันไอสูงขึ้นซึ่งจะทำให้ระเหยได้ง่ายขึ้นโลหะที่มีขนาดผลึกในระดับนาโนเมตร จึงมักจะมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโลหะแบบก้อนใหญ่โดยเมื่อขนาดอนุภาคยิ่งเล็กลงก็ยิ่งทำให้จุดหลอมเหลวของโลหะต่ำลงไปด้วย

### 2.3 การเตรียมวัสดุนาโน

วิธีการเตรียมอนุภาคนาโนโลหะสามารถเตรียมได้หลายวิธี ได้แก่

การบด (grinding) เป็นกระบวนการเตรียมผงละเอียดด้วยการลดขนาดทางกลของอนุภาคขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเช่นการบดย่อยด้วยลูกบดการบดย่อยแบบลูกกลิ้งแรงอัดสูงการบดย่อยแบบเจ็ตหรือแม้กระทั่งการบดมือที่ต้องอาศัยเวลาในการบดค่อนข้างนาน

อาร์คดิสชาร์จ (arc discharge) เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงตกร้อมระหว่างแท่งโลหะสองแท่งจะทำให้เกิดประกายไฟหรือเกิดสถานะพลาสมาขึ้นระหว่างแท่งโลหะนี้ภายใต้บรรยากาศปกติหรือกระทำในตัวกลางที่เป็นของเหลวผลลัพท์คือได้อนุภาคนาโนของโลหะตรงบริเวณกลางๆหัวของแท่งโลหะส่วนการควบคุมขนาดอาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของพลาสมาในขณะที่การควบคุมไอของโลหะสามารถเกิดในของเหลวที่เป็นฉนวน (dielectric liquid) ได้ดีกว่าก๊าซและอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ในตัวกลางที่เป็นน้ำมีการแยกตัวได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิโทกราฟี (lithography) เปรียบเหมือนกับการแกะสลักหรือการวาดแบบพื้นผิวของแข็ง (ก็คือเป็นการจัดการกับของแข็งชิ้นใหญ่นำมาแกะสลักให้เป็นของแข็งเล็กลง) ซึ่งเทคโนโลยีลิโทกราฟีเป็นวิธีการหลักที่ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์แต่สำหรับการศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโนนั้นจำเป็นที่จะต้องพัฒนาวิธีการของเทคโนโลยีลิโทกราฟีนี้ให้สามารถก่อสร้างโครงสร้างในระดับนาโนเมตรได้เพราะลิโทกราฟีในระดับนาโนไม่สามารถใช้แสงที่มองเห็นได้ในการจัดการ(แสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 – 900 นาโนเมตรซึ่งใหญ่เกินกว่าโครงสร้างระดับนาโน) ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาหลากหลายวิธีการเพื่อให้วิธีการลิโทกราฟีสามารถที่จะใช้ผลิตโครงสร้างนาโนได้

พัลส์เลเซอร์อะเบลชัน (pulsed laser ablation) เป็นวิธีการที่ให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือแสงเลเซอร์กับโลหะที่ต้องการเตรียมเป็นอนุภาคนาโนจากนั้นบริเวณผิวของโลหะจะมีการดูดกลืนพลังงานที่ตกกระทบและเกิดความร้อนสูงแล้วมีการเปลี่ยนสถานะเป็นไอของโลหะจากนั้นเกิดการควบแน่นเป็นอนุภาคนาโนของโลหะการควบแน่นไอของโลหะสามารถเกิดในตัวกลางที่เป็นของเหลวได้คือส่วนการควบคุมขนาดสามารถทำได้โดยการควบคุมด้วยพลังงานของแสงเลเซอร์ชนิดของตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือแม้กระทั่งความเข้มข้นของไอของโลหะก็เป็นตัวกำหนดขนาดของอนุภาคนาโนของโลหะ

รีดักชันทางเคมี (chemical reduction) เป็นวิธีการทางเคมีที่เตรียมจากไอออนของโลหะซึ่งมีเลขออกซิเดชันเป็นบวกหรือเป็นสารประกอบโลหะที่สามารถละลายในตัวกลางที่เป็นของเหลวและไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคเมื่อไอออนของโลหะได้รับอิเล็กตรอนจากตัวรีดิวซ์จะเปลี่ยนเป็นอะตอมของโลหะที่มีเลขออกซิเดชันเป็นศูนย์จากนั้นเกิดการควบแน่นเป็นอนุภาคของโลหะส่วนการควบคุมขนาดสามารถทำได้โดยการควบคุมด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างตัวรีดิวซ์กับสารประกอบโลหะชนิดของตัวรีดิวซ์และชนิดของสตาบิไลเซอร์ (stabilizer)

โฟโตเคมีสตรี (photochemistry) เป็นการให้แสงที่มีพลังงานพอดีกับพลังงานพันธะเพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสงของสารเคมีตั้งต้นจากนั้นสารตั้งต้นที่มีพลังงานสูงขึ้นก็จะพยายามจัดการกับพลังงานส่วนเกินนี้ในหลายๆวิธีซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือการเกิดปฏิกิริยาเคมีนั่นเองเรียกว่าปฏิกิริยาโฟโตเคมี (photochemical reaction) สำหรับการเตรียมอนุภาคนาโนของโลหะโดยปฏิกิริยาโฟโตเคมีจะใช้สารที่ให้อิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเช่นโลหะออกไซด์เมื่อไอออนของโลหะซึ่งมีเลขออกซิเดชันเป็นบวกหรือเป็นสารประกอบโลหะได้รับอิเล็กตรอนจากสารที่มีสมบัติตอบสนองต่อแสงหรือผู้ให้อิเล็กตรอน (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) หรืออุปกรณ์แสดงผลการตรวจสุขภาพ (structural health monitoring) เป็นต้น

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

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

3. ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ (engineering) เช่น วัสดุเชิงกลนาโน (nano-mechanics materials), ระบบไฟฟ้าเชิงกลนาโน (nanoelectro-mechanical systems), วัสดุโครงสร้างอัจฉริยะ (smart materials structures) และโครงสร้างป้องกันไฟ (fire retardant materials and structures) วัสดุผสม (composites) หรือพลาสติกแบบยืดหด (superplastic) เป็นต้น

4. ทางด้านพลังงานเช่นเป็นวัสดุกักเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (hydrogen storage) ไฟฟ้าเคมี (electrochemistry) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) หรือท่อคาร์บอนนาโนประเภทความหนาแน่นของกระแสสูง (highest current density carbon nanotubes) เป็นต้น

5. ทางด้านการวิจัยวิทยาศาสตร์พื้นฐานงานวิจัยทางด้านนาโนยังมีความจำเป็นที่ต้องอาศัยหลักการทฤษฎีและองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นเช่นคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปทางฟิสิกส์หรือเคมีของวัสดุนาโนที่แตกต่างไปจากวัสดุเดิมในระดับไมโครเป็นต้น

กล่าวโดยสรุปแล้ว ศักยภาพของวัสดุนาโนแต่ละชนิดบางชนิดมีประโยชน์มากมายบางชนิดอยู่ในระหว่างการศึกษาวิจัยซึ่งแต่ละชนิดอาจมีความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับศาสตร์หลายๆแขนงด้วยกันใน

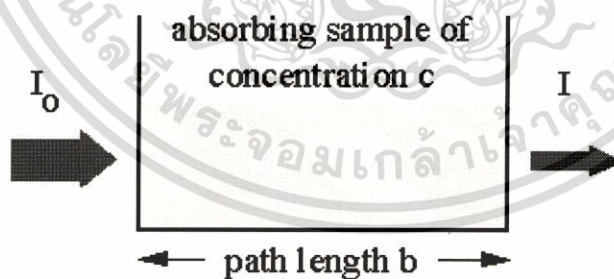
ปัจจุบันนี้วัสดุนาโนหลายๆชนิดสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์และมีคุณค่าอย่างยิ่งเช่นการพัฒนาหัวอ่านนาโนของเครื่อง scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) หรือ atomic force microscope (AFM) ซึ่งบางชนิดพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงการค้าได้แล้วอย่างไรก็ตามงานวิจัยทางด้านนาโนศาสตร์ในขณะนี้ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ซึ่งอาจต้องใช้เวลานานหนึ่งจึงจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริงในอนาคตข้างหน้าต่อไป

## 2.5 เทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล สเปกโทรสโกปี

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณในการหาปริมาณสารที่ต้องการจะวิเคราะห์ในตัวอย่างต่างๆซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปสารละลาย นอกจากนั้นยังเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและได้กลายมาเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่สำคัญที่ใช้ปัจจุบันเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่ายประยุกต์ใช้ได้กว้างมีความรวดเร็วและความแม่นยำสูงอีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูงเทคนิคนี้เลือกใช้แสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและช่วงวิสิเบิลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ในการวิเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสงโดยเมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่างตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะสามารถผ่านตัวอย่างออกไปได้ข้อมูลที่ได้จากช่วงอัลตราไวโอเลตและช่วงวิสิเบิลนั้นอาจใช้ในการช่วยยืนยันข้อมูลที่ได้จากช่วงอินฟราเรดหรือข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่นๆแต่จะไม่สามารถใช้ระบุชนิดของสารตัวอย่างได้อย่างถูกต้องนัก

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

แสดงการเดินทางของแสงผ่านสารละลายจะได้ค่าการทะลุผ่านและค่าการดูดกลืนดังสมการ (2.1) – (2.3)



ภาพที่ 2.3 แสดงรังสีตกกระทบด้วยความเข้ม  $I_0$  และรังสีที่ทะลุผ่านมีความเข้ม  $I$  เมื่อเดินทางทะลุผ่านสารละลายที่มีระยะทาง  $b$

ค่าการทะลุผ่าน (Transmittance)

$$T = I / I_0$$

(2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเทคนิคเทคนิคอัลตราไวโอเลต วิสิเบิล สเปกโตรสโคปีนี้อาศัยหลักการวิเคราะห์ตามกฎของ Beer-Lambert's Law ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่างในสารละลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการดูดกลืน (Absorbance) ของสารละลายนั้นดังสมการ 2.3

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

เมื่อ A คือค่าการดูดกลืน (absorbance)

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient)

b คือ ระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ในสารละลาย (path length)

c คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง

ในทางปฏิบัติการนิยมใช้ค่าการดูดกลืนเนื่องจากมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นซึ่งหาได้ง่ายกว่าเปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการทะลุผ่านซึ่งกฎนี้จะเป็นจริงกับแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic radiation) ซึ่งก็คือแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งๆเท่านั้น โดยแสงเมื่อผ่านสารละลายตัวอย่างที่อยู่ใน cell ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจะขึ้นกับความหนาของ cell (path length) และความเข้มข้นของสารละลายนั้นแต่จะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากกฎนี้ที่ความเข้มข้นสูงมากๆ

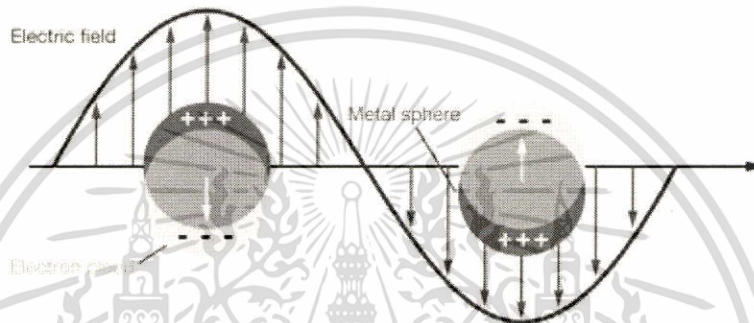
## 2.6 สมบัติทางแสงวัสดุนาโน

สมบัติทางแสงซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะจะแสดงสมบัติทางแสงอย่างเด่นชัดซึ่งอธิบายด้วยปรากฏการณ์เซอร์เฟอพลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance, SPR) ซึ่งเป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระที่มีลักษณะการสั่นพร้อมเพริ่งกันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยผิวต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริกเช่นระหว่างทองคำหรือกับอากาศหรือสารละลายโดยที่ขนาดของคลื่นและความกว้างของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของวัสดุต่างๆจะขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างประเภทของวัสดุและสภาพแวดล้อมรอบๆวัสดุนั้น

อนุภาคนาโนของทองคำจะมีสีแดงแทนที่จะเป็นสีเหลืองวาวอย่างที่พบได้ทั่วไปโลหะชนิดอื่นที่นอกเหนือไปจากทองคำก็สามารถแสดงปรากฏการณ์เชิงแสงในลักษณะเดียวกันนี้ได้เช่นกันเช่นอนุภาคนาโนของเงินจะมีสีเหลืองเข้มแทนที่จะเป็นสีเงินวาวที่เราคุ้นเคยอย่างไรก็ตามโลหะส่วนใหญ่จะมีความถี่เร

โซแนนต์อยู่ในช่วงใกล้รังสียูวีซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่มองเห็นนอกจากนี้อนุภาคนาโนของโลหะเกือบทุกชนิดไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมตามปกติ ทำให้เราไม่ค่อยพบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่นๆ

เซอร์เฟอพลาสมอนเรโซแนนซ์หรือสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะสามารถเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาของแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตัวอย่างเช่นแสงกับอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคนาโนของโลหะดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กระบวนการสั่นของพลาสมอน สำหรับอนุภาคทรงกลม

แสดงกระบวนการสั่นของพลาสมอนแสดงให้เห็นการกระจัดของกลุ่มประจุอิเล็กตรอน (conduction electron charge cloud) สัมพันธ์กับนิวเคลียสเมื่อได้รับแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างั้นกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นพ้องโดยความถี่ของการสั่นนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (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]

$$\text{Particle dipole moment } p = \epsilon_0 \epsilon_d P E_0 \tag{2.4}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $p$  คือไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำ

$R$  คือ รัศมีของอนุภาค

$\epsilon_m$  คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะ

$\epsilon_d$  คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของตัวกลาง

$E_0$  คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก

การเกิดอันตรกิริยาของแสงกับอนุภาคนาโนทรงกลมของโลหะจะทำให้แสงที่ตกกระทบเกิดการสูญเสีย (extinction) ในแต่ละความถี่ที่ไม่เท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างชนิดของโลหะและชนิดของตัวกลาง ซึ่งจัดว่าเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่ใช้จำแนกชนิดของอนุภาคนาโนของโลหะการสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงที่ตกกระทบกับอนุภาคนาโนทรงกลมของโลหะเกิดจากการกระเจิง (scattering) และดูดกลืน (absorption) ของอนุภาค

ตามหลักการประมาณทางไฟฟ้าสถิตสามารถเขียน extinction efficiency ดังสมการ (2.6) – (2.8)

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

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

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

โดยที่  $Q$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction efficiency)

$Q_{\text{scat}}$  คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง (scattering efficiency)

$Q_{\text{abs}}$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (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

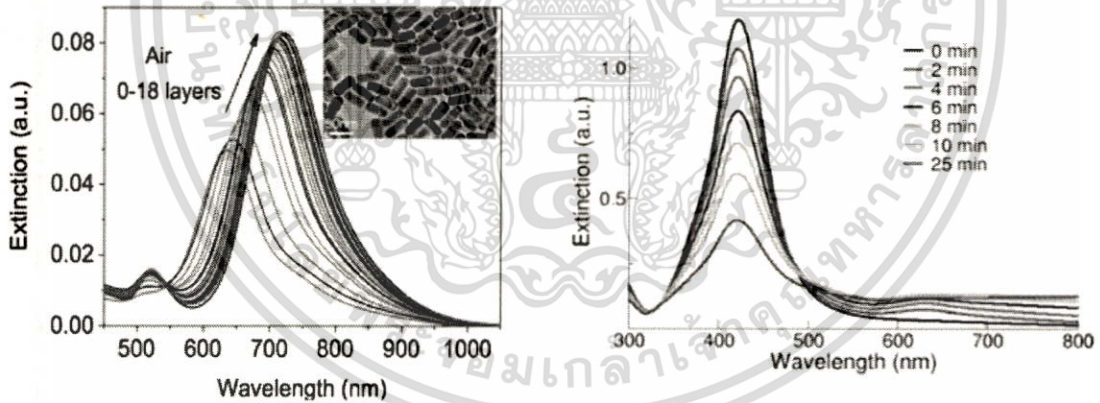
$$C_{\text{Ext}} = C_{\text{abs}} \quad (2.10)$$

$$\text{เมื่อ } Q = C / \pi R^2$$

$$\text{Absorption} = \alpha = NC = NQ(\pi R^2)$$

เมื่อ  $N$  = ความเข้มข้นของตัวกลาง

จากสมการ (2.6) – (2.10) สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะเป็นผลลัพธ์จากอันตรกิริยาของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนที่ผิวอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัว (characteristic peak) ของแต่ละธาตุรวมทั้งขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของอนุภาคนาโนของโลหะเหล่านั้นสำหรับสมบัติทางแสงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะแสดงดังภาพที่ 2.5 โดยตำแหน่ง extinction efficiency หรือยอดการดูดกลืน (absorption peak) จะสัมพันธ์กับการมองเห็นสีของอนุภาคนาโนของโลหะเช่นอนุภาคนาโนทองคำและเงินจะปรากฏสีแดงและเหลืองตามลำดับ



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

สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะที่ว่าด้วยการเกิดจากอันตรกิริยาของกลุ่มประจุอิเล็กตรอนที่ผิวอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากหัวข้อข้างต้นเช่นเดียวกันสำหรับอนุภาคโลหะที่มีขนาดเล็ก การกระเจิงแสงจะเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่ โดยจะเห็นการสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(extinction) มีค่าใกล้เคียงกับการดูดกลืน (absorption) ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์สมบัติทางแสงได้จากสมบัติการดูดกลืนแสงโดยอนุภาคนาโนของโลหะที่มีขนาดเล็กได้

การดูดกลืนแสงโดยอนุภาคนาโนของโลหะสามารถที่จะวิเคราะห์ด้วย absorption cross section ( $C_{\text{abs}}$ ) ผ่านสมการ 2.8 สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็จะมีค่าการดูดกลืนในความยาวคลื่นที่สูงขึ้นหรือมากกว่าในแบบจำลองของมิได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและ extinction cross-section ไว้ว่าอนุภาคทรงกลมของโลหะที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนสูงสุดหรือยอดการดูดกลืน ( $\lambda_{\text{max}}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นตำแหน่งความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนสูงสุดจึงสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคและสามารถอธิบายแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของขนาดอนุภาคได้ นอกจากนี้ในสารละลายที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีการกระจายของขนาด (particles size distribution) มากพบว่าความกว้างของการดูดกลืน (absorption width) จะมีค่าสูงด้วย

## 2.7 สมบัติทางเคมีของโลหะนาโน

โลหะที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรจะมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (surface-to-volume) สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่กว่าเช่นอนุภาคทองคำที่มีขนาด 2 นาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวสูงถึง 150 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่ออนุภาคเล็กลงจะทำให้พื้นที่ผิวสูงขึ้นดังนั้นการมีอะตอมจำนวนมากอยู่ที่บริเวณผิวหน้าจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวหน้าวัสดุได้ง่ายและยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆอันเนื่องมาจากอิทธิพลของเคมีผิวหน้า

ประโยชน์ที่ได้จากการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือการนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเคมีและการใช้เป็นตัวกรองแบบพิเศษการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุเมื่อวัสดุมีปริมาณอะตอมผิวหน้ามากขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากอิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์ (electronic and steric effects) โดยที่อิทธิพลอิเล็กทรอนิกส์จะเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) เช่นการเกิดประจุบวกหรือประจุลบขึ้นส่วนอิทธิพลสเตอริกจะเกี่ยวข้องกัลักษณะรูปร่างและความไม่เป็นระเบียบภายในโครงสร้าง

## บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

## 3.1 สเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ในสารละลาย ascorbic acid

โดยการเตรียม 0.001 mM Au@Pd nanorods ผสมกับ ascorbic acid (AA) ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อศึกษาผลของความหนาของพลาเดียมต่ออนุภาคนาโนที่มีผลต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จาก Au@Pd nanorods

- 3.1.1 เตรียม Au@Pd nanorods ที่ปริมาตร 0.123 ml โดยผสมกับน้ำ DI ที่ปริมาตร 14.877 ml จะได้ Au@Pd nanorods ที่ผ่านการเตรียมซึ่งมีความเข้มข้น 0.001 mM ปริมาตร 15 ml
- 3.1.2 เตรียมกรด AA โดยชั่งสารให้มือน้ำหนัก 0.0176 g แล้วนำไปผสมกับน้ำ DI ที่มีปริมาตร 10 ml จะได้กรด AA ที่ผ่านการเตรียมซึ่งมีความเข้มข้น 10 mM ในปริมาตร 10 ml
- 3.1.3 นำ 0.001 mM Au@Pd nanorods จาก 3.1.1 ผสมกับ AA จาก 3.1.2 ที่ความเข้มข้น 10, 5, 1, 0.1, 0.01, 0.001 mM ในอัตราส่วน 1:0, 1:1, 1:2, 2:1 ในคิวเวทปริมาตร 3 ml ดังตารางที่ 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5 และ 3.1.6 ตามลำดับ เพื่อวัดค่าการดูดกลืนทางแสง จากเครื่อง UV-Vis- spectroscopy ตามภาพที่ 3.1.1

ตารางที่ 3.1.1 0.001 mM Au@Pd nanorods + 10 mM กรด AA

Au@Pd : AA	0.001 mM Au/Pd	10 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 3.1.2 0.001 mM Au@Pd nanorods + 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 0.001 mM Au@Pd nanorods + 1 mM 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1.4** 0.001 mMAu@Pdnanorods + 0.1 mM 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** 0.001 mMAu@Pd nanorods + 0.01 mM 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1.6 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.001 mM 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 สเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ที่ค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกัน

โดยการเตรียม 0.001 mM Au@Pd nanorods ผสมในสารละลายผสมระหว่าง Ethanol กับ Toluene ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อศึกษาผลของตัวกลางในอนุภาคนาโนที่มีต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จาก Au@Pd nanorods

3.2.1 เตรียม Au@Pd nanorods 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@Pd nanorods ที่เตรียมจาก 3.2.1 มาผสม Ethanol/Toluene ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 2:1, 1:0, 0:1 และ 0:0 ดังตารางที่ 3.2.1 ในควเวทปริมาตร 3ml เพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนจากเครื่อง UV-Vis- spectroscopy ตามภาพที่ 3.1.1

ตารางที่ 3.2.1 0.001 mM Au@Pd nanorods + Ethanol : Toluene ที่อัตราส่วนต่างๆกัน

Ethanol : Toluene	0.001 mM Au@Pd nanorods	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



ภาพที่ 3.1.1 ไลอะแกรมการจับอุปกรณ์วัดการดูดกลืนแสง

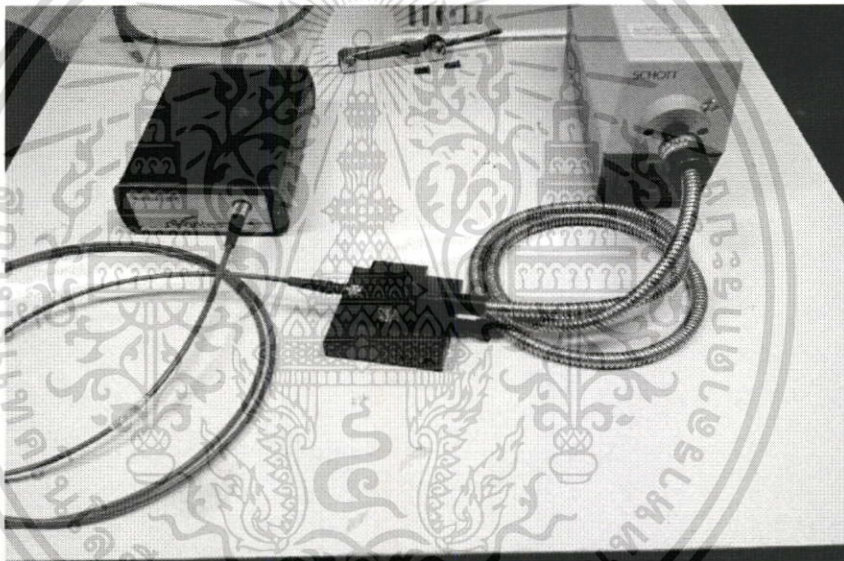
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

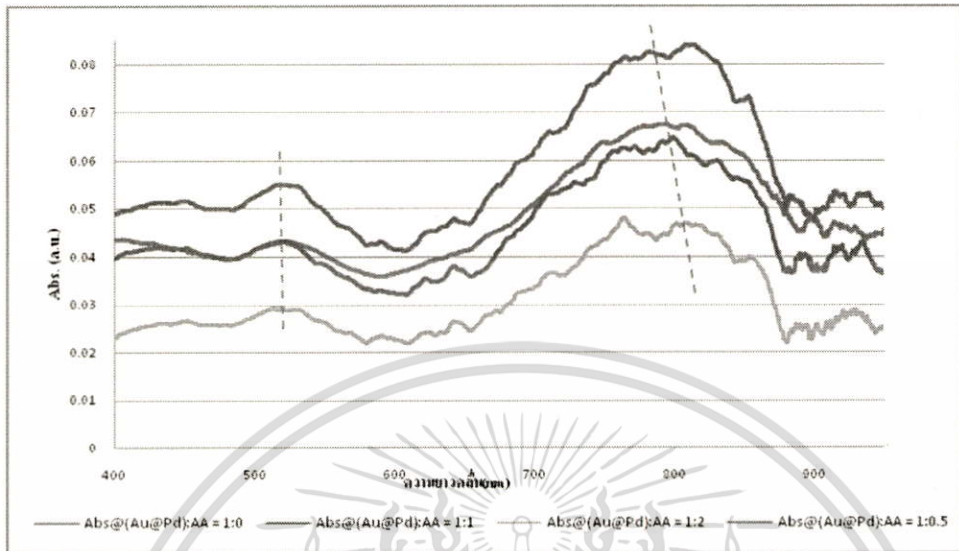
#### 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ในสารละลาย ascorbic acid

สำหรับงานวิจัยนี้เราได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของแท่งทองคำนาโนที่ถูกเคลือบด้วยพลาตาเดียม โดยขั้นแรกเราได้ทำการศึกษาผลของความหนาของพลาตาเดียมที่เคลือบแท่งทองคำนาโนที่มีผลต่อพลาสมอนเรโซแนนซ์จาก Au@Pd nanorods โดยใช้ความเข้มข้นของกรดวิตามินซี (ascorbic acid) ในการกักชั้นของพลาตาเดียม

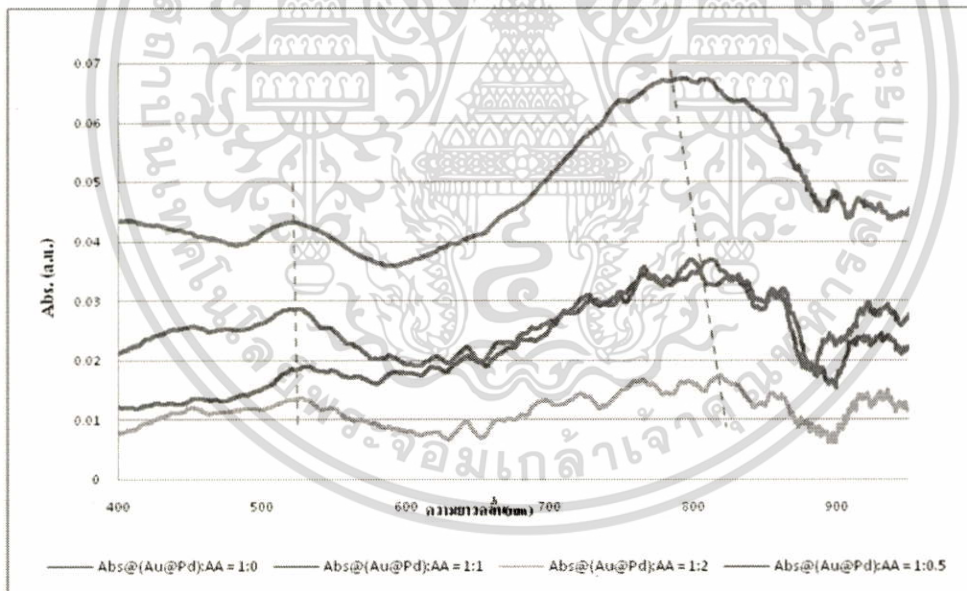


ภาพที่ 4.1.1 ชุดการทดลอง ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง Optic fiber แทนวางตัวอย่าง และชุดเครื่องวัดทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

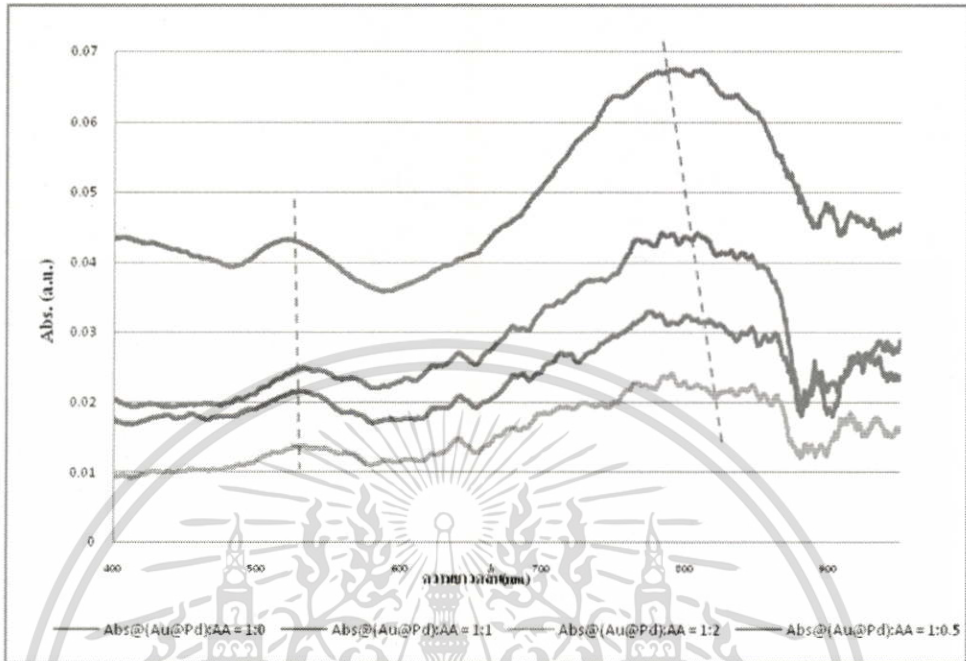


ภาพที่ 4.1.2 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.001 mM กรด AA

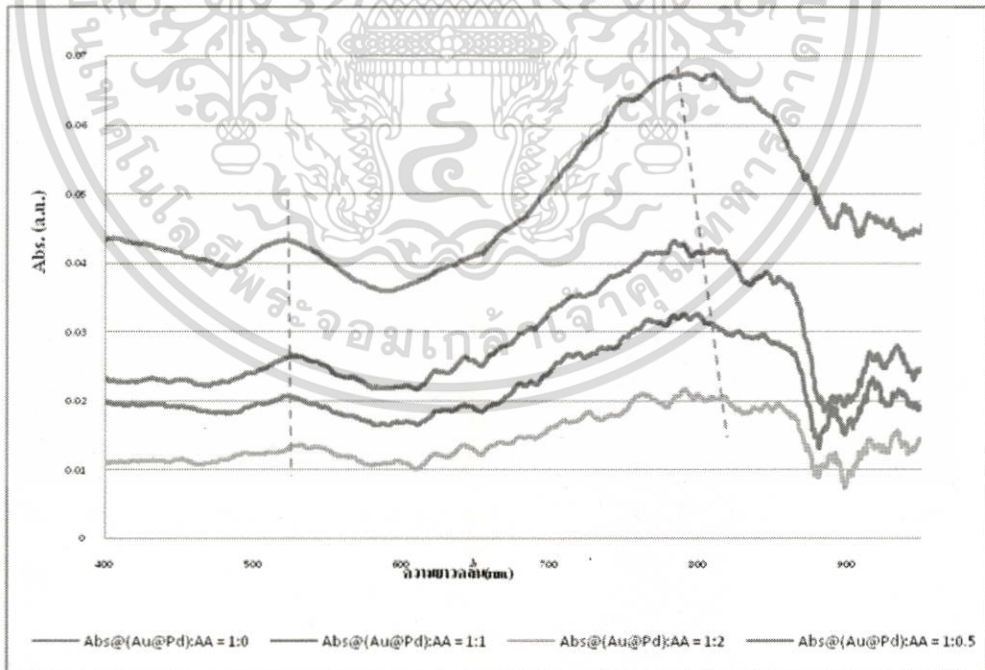


ภาพที่ 4.1.3 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.01 mM กรด AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

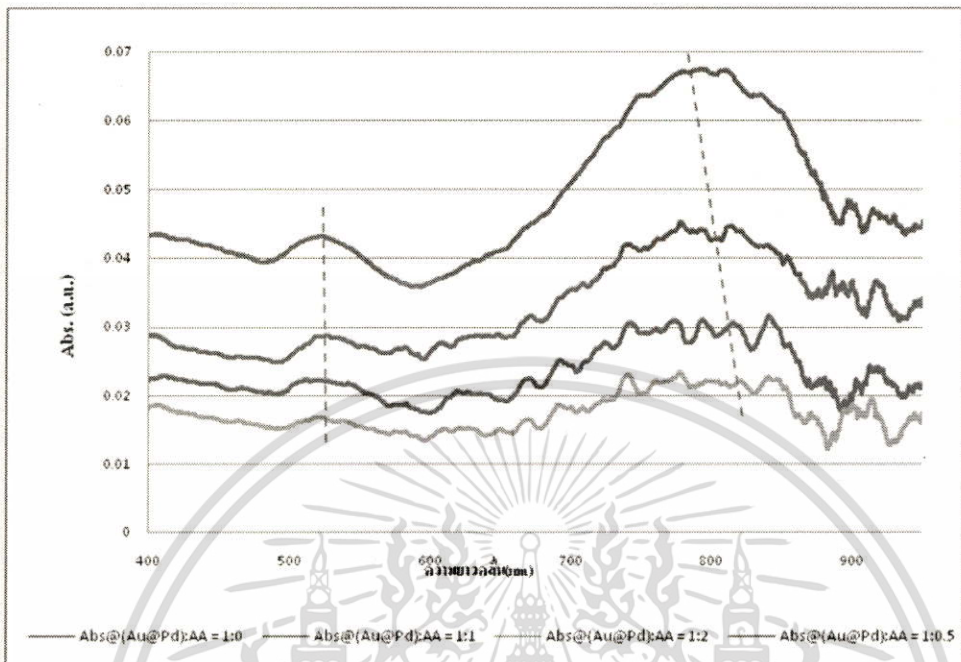


ภาพที่ 4.1.4 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 0.1 mM กรด AA

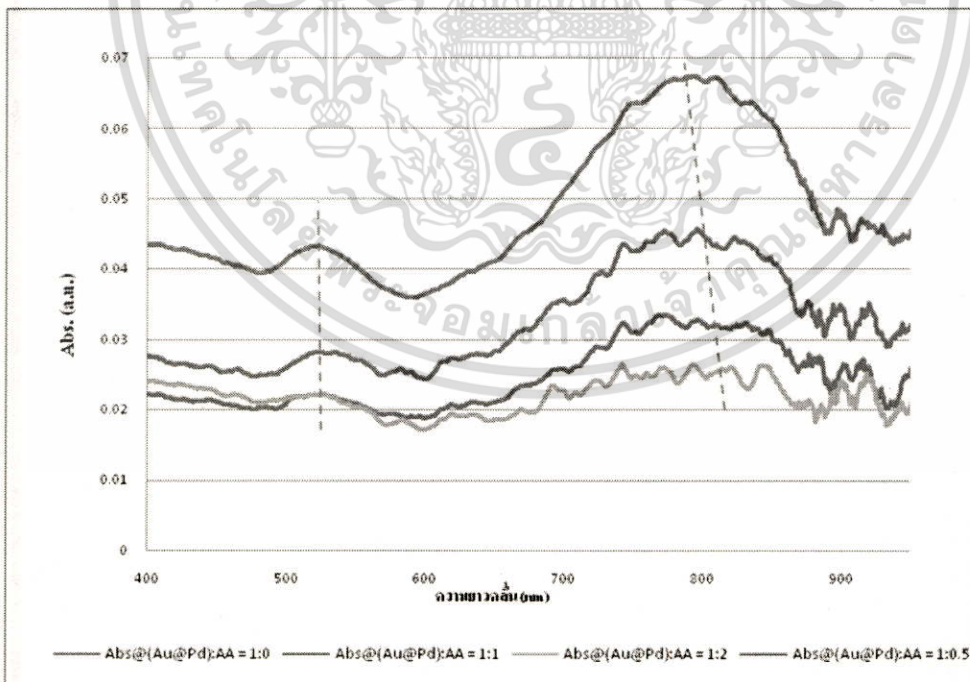


ภาพที่ 4.1.5 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 1 mM กรด AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



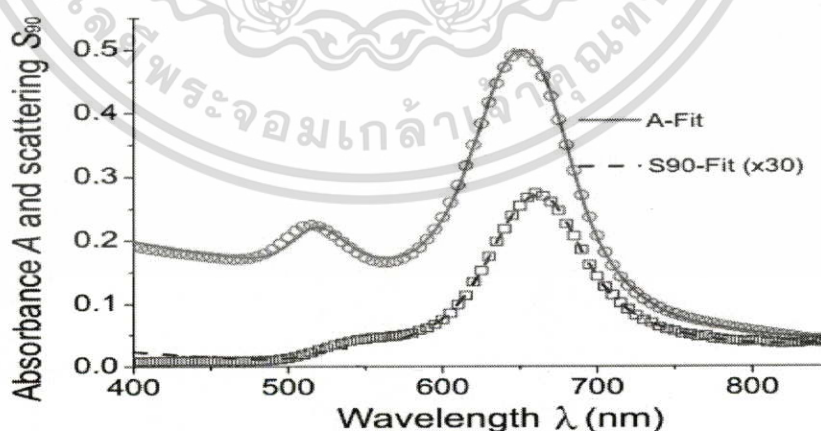
ภาพที่ 4.1.7 สเปกตรัมการดูดกลืนของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + 10 mM กรด AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ในสารละลาย Ascorbic acid (AA) เพื่อใช้ ascorbic acid ในการเลทาลาเดียมให้บางลงจากชุดการทดลองในภาพที่ 4.1.1 ให้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.1.2 - 4.1.7

ซึ่งมีข้อสังเกตเล็กน้อยที่อัตราส่วนระหว่าง Au@Pd nanorods 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@Pd nanorods อย่างเป็นนัยสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ค่าการดูดกลืนสำหรับ Au@Pd : AA = 1:0 ที่ 0.001 mM AA ให้พลาสมอนพีกที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ Au@Pd : AA = 1:0 ที่ 0.01 mM AA เป็นต้น แต่ผู้ทำการทดลองคาดว่าถ้าความเข้มข้นของ AA มากขึ้นกว่า 10 mM อาจจะทำให้เห็นค่าการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ที่ชัดเจนมากขึ้นและน่าจะเห็นค่าการดูดกลืนดังกล่าวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ด้วยสารตัวอย่างของเรามีราคาค่อนข้างสูงและมีปริมาณที่จำกัด เราจึงใช้สารในอัตราส่วนที่น้อยแต่ก็เพียงพอต่อการเรียนรู้ในเรื่องพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโน จากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ในสารละลาย Ascorbic acid (AA) นี้ได้เช่นกัน

เมื่อให้ค่าความเข้มข้นของโลหะนาโนและกรด AA คงที่ แล้วเราควบคุมอัตราส่วนในการผสมสารดังกล่าวพบว่า เมื่อกรด AA มีอัตราส่วนมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความยาวคลื่นในการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์มีค่าความยาวคลื่นสูงหรือเอียงไปทางแถบสีแดงนอกจากนั้นจากผลการทดลองจะสังเกตเห็นพีก ของกราฟมีสองช่วง ( $\lambda_1$  กับ  $\lambda_2$ ) เนื่องจากเราทำการศึกษาวัดดูนาโนที่ไม่มีความสมมาตรของแกน หรือเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ของรูปทรงวัสดุ (geometric effects) นั่นเอง จึงทำให้เกิดเป็นสองพีกของพลาสมอนภายใต้การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าดังภาพที่ 4.1.8



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

ซึ่งการเคลื่อนของพิกสามารถเริ่มอธิบายได้จากการสั้นของอิเล็กตรอนอิสระของโลหะภายใต้สนามไฟฟ้า โดยเกิดความร้อนเนื่องจากสนามไฟฟ้าและแรงจากการลดทอนซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ 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  $m\gamma \frac{dx}{dt}$

$m$  คือ มวลอิเล็กตรอน  $x$  คือ การกระจัด

$E$  คือ ค่าสนามไฟฟ้า  $\gamma$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การคูดกลืน

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

จะได้

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

ซึ่งสามารถเขียนการกระจัดสูงสุดในรูปแบบ

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

เมื่อค่าโพลาไรซ์

$$P = -Nex \quad (4.4)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมด และ  $x$  คือ การกระจัดสูงสุด

แทนสมการ (4.3) ลงใน (4.4) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

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

เมื่อเราทราบค่าโพลาไรซ์  $P$  จะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า จาก

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

เมื่อ  $D$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า

$E$  คือ ค่าสนามไฟฟ้า

$\epsilon_0$  คือ ค่าไดอิเล็กทริกในสุญญากาศ

แทนสมการ (4.5) ลงในสมการ (4.6) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการ 4.6 และ 4.7 จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลางใด  $\epsilon_r$  กับความเข้มของสนามไฟฟ้า D

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

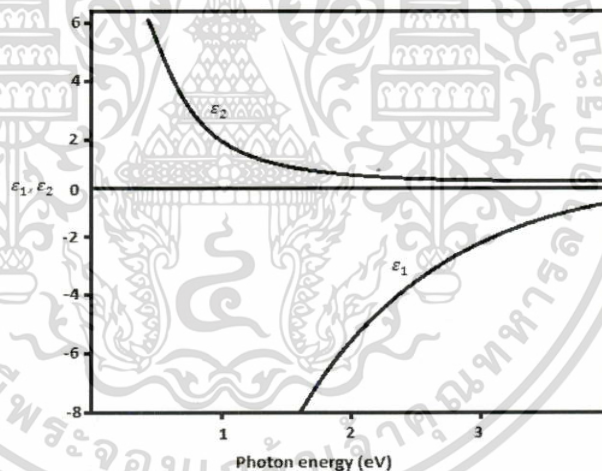
$$\text{กำหนดให้} \quad \omega^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}$$

$\omega^2$  คือ ความถี่ของพลาสมา

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

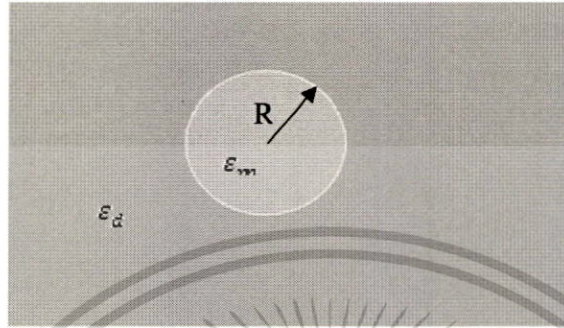
$$\text{เมื่อ} \quad \epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + \gamma^2)} + i \frac{\gamma\omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \gamma^2)} = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (4.10)$$

ซึ่งสุดท้าย จะได้ค่า ไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน ออกมาเป็น จำนวนจริง  $\epsilon_1$  กับจำนวนจินตภาพ  $i\epsilon_2$  และพล็อตเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4.2.8



ภาพที่ 4.1.9 ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันเชิงซ้อนแสดงแบบจำลองของค่าจำนวนจริง และ จำนวนจินตภาพ จากอิเล็กตรอนอิสระของโลหะที่พลังงานโฟตอนต่างๆกันโดยที่สนามไฟฟ้า  $E = E_0 e^{-i\omega t}$

สำหรับอนุภาคนาโนที่ทำการศึกษานี้ Maxell-Garnet [5] ได้อธิบายเอาไว้ว่าเมื่ออนุภาคนาโนมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่ ดังภาพที่ 4.1.10 ค่าโพลาไรซ์เซชันของอนุภาคนาโน สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้



ภาพที่ 4.1.10 แบบจำลองของMaxell-Garnet แสดงอนุภาคนาโนในตัวกลางไดอิเล็กทริก

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

P คือ โพลาไรซ์เซชัน

$\epsilon_d$  คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของตัวกลาง

$\epsilon_m$  คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะ

R คือ รัศมีของอนุภาค

ซึ่งค่าโพลาไรซ์เซชันของโลหะมีความสัมพันธ์กับการดูดกลืน (absorption cross-section) ดังสมการ

(4.12)

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

และจะเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตัวอย่างตาม สมการ

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

เมื่อ  $C_{ext}$  คือ Extinction Cross - section

$C_{Abs}$  คือ Absorption Cross - section

$C_{scat}$  คือ Scattering Cross - section

$\alpha_{ext}$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

N คือ ความเข้มข้นของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงเข้า-ออกและระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง คือ

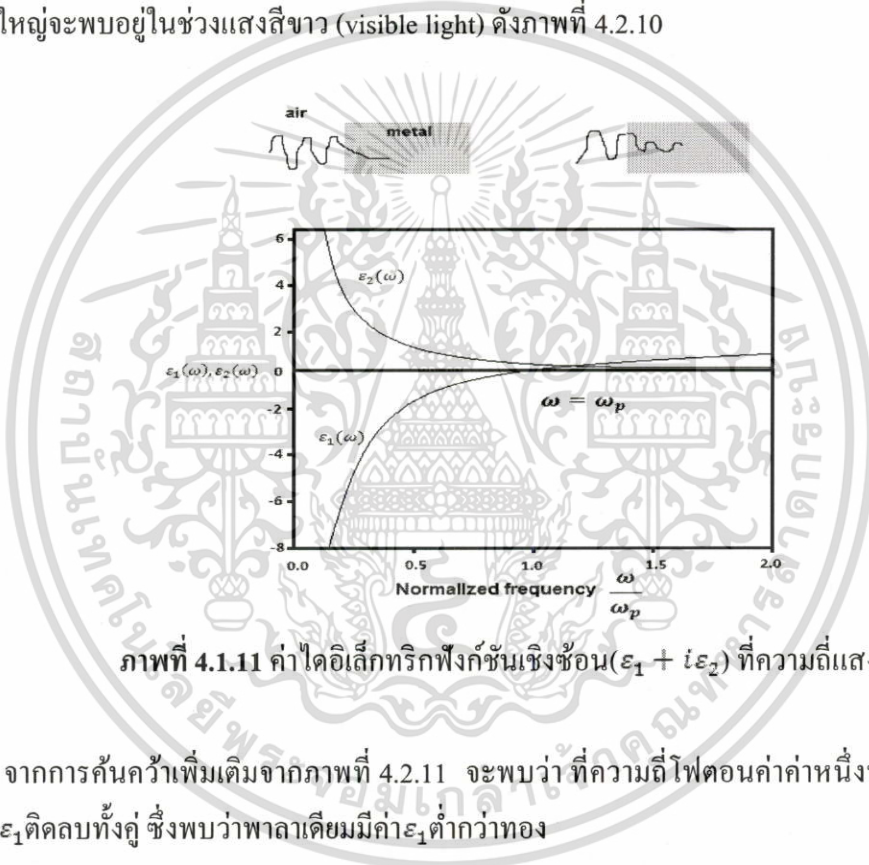
$$I = I_{\text{inc}} \text{ext}(-\alpha_{\text{ext}}L) \quad (4.14)$$

เมื่อ  $I_{\text{inc}}$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบบน

I คือ ความเข้มแสงที่ส่งผ่าน

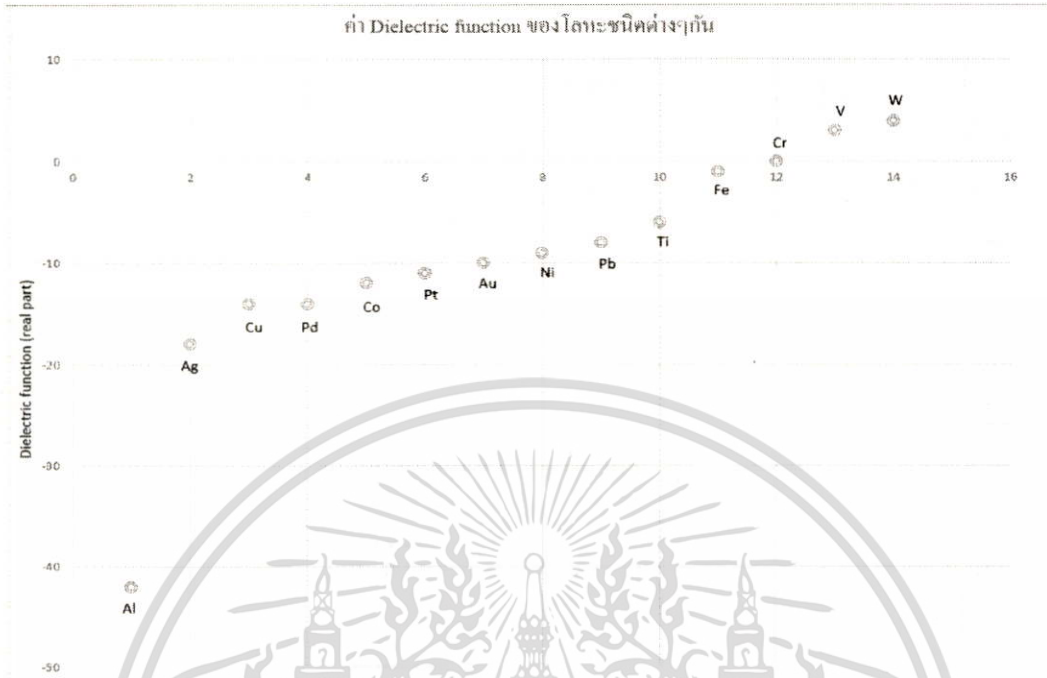
L คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง

จากสมการ (4.10) จะเห็นได้ว่าเมื่อนำค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันมาพล็อตกับความถี่โฟตอนที่แตกต่างกัน จะได้  $\epsilon_1$  ซึ่งมีค่าติดลบ ซึ่งสามารถพบในโลหะซึ่งจะเกิดการลดทอนภายใต้การเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่จะพบอยู่ในช่วงแสงสีขาวยุ (visible light) ดังภาพที่ 4.2.10



ภาพที่ 4.1.11 ค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันเชิงซ้อน ( $\epsilon_1 + i\epsilon_2$ ) ที่ความถี่แสงต่างๆกัน

จากการค้นคว้าเพิ่มเติมจากภาพที่ 4.2.11 จะพบว่า ที่ความถี่โฟตอนค่าค่าหนึ่งพลาสมาเดียม และทองต่างมีค่า  $\epsilon_1$  ติดลบทั้งคู่ ซึ่งพบว่าพลาสมาเดียมมีค่า  $\epsilon_1$  ต่ำกว่าทอง



ภาพที่ 4.1.12 แสดงค่าส่วนจริงของไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะมีตระกูล [5]

สุดท้ายจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $E = \hbar\omega$  ค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (4.1)–(4.14) จะทำให้ได้ว่า ค่า  $\epsilon_1$  ของพลาสมาเดียมจะอยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงิน ในขณะที่ค่า  $\epsilon_1$  ของทองจะอยู่ในช่วงของแสงสีแดง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเลาพลาสมาเดียมด้วย AA เป็นการทำให้สัดส่วนของทองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพลาสมาเดียม ดังนั้นภายใต้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้แสงสีขาวจึงทำให้ค่าการดูดกลืนของพลาสมาเดียม ชิฟไปทางแสงสีแดง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ถ้าพลาสมาเดียมไม่ได้ผ่านการเลาหรือยังมีความเป็นพลาสมาเดียมมาก ทำให้สัดส่วนของทองน้อยเมื่อเทียบกับพลาสมาเดียม ดังนั้นภายใต้สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้แสงสีขาวจึงทำให้ค่าการดูดกลืนของพลาสมาเดียม ชิฟไปทางสีน้ำเงิน

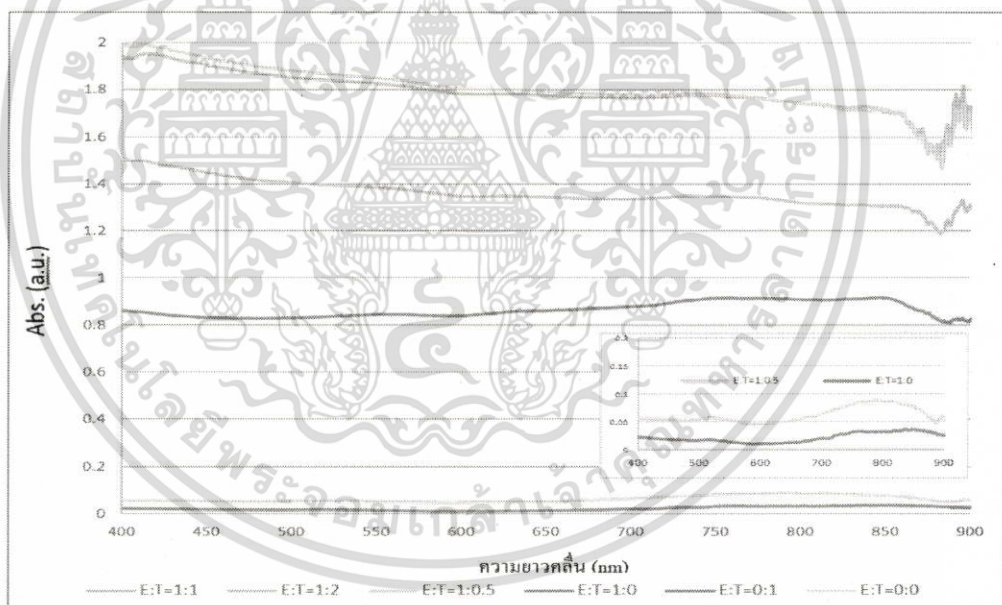
#### 4.2 การทดลองวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของ Au@Pd nanorods ที่อยู่ในตัวกลาง Ethanol :Toluene ที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆ

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางจากการเปลี่ยนอัตราส่วนของ Ethanol:Toluene ตามตารางที่ 4.2.1 ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงของ 0.001 mM Au@Pd nanorods ดังแสดงในภาพที่ 4.3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

Ethanol:Toluene	n	$\lambda_{\max}$
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

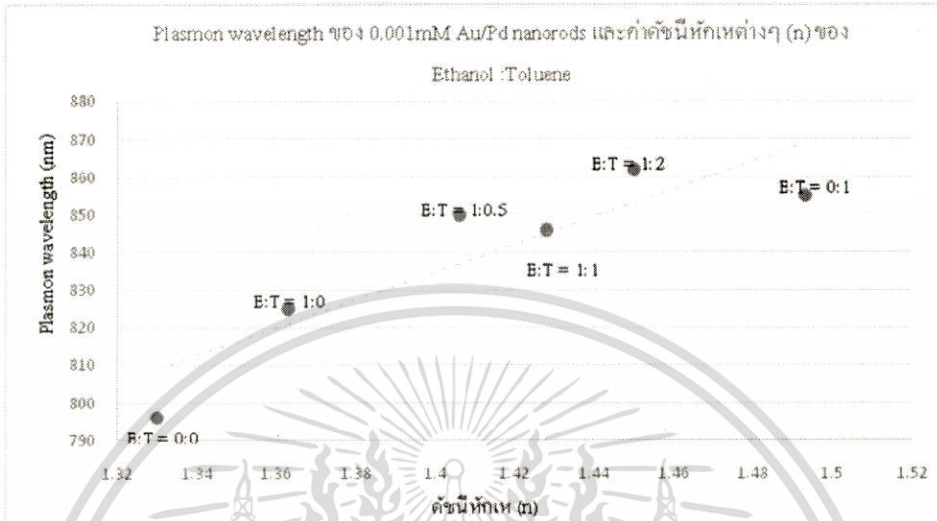


ภาพที่ 4.2.1 กราฟแสดงแถบการดูดกลืนแสงของ 0.001 mM Au@Pd nanorods + (E:T) อัตราส่วน โดยปริมาตร (E:T) = 1:0, 1:0.5, 1:1, 1:2, 0:1, 0:0 (E และ T หมายถึง Ethanol และ Toluene ตามลำดับ

จะเห็นว่าการเปลี่ยนอัตราส่วนของ Ethanol:Toluene นั้นจะทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงและสามารถทำให้เกิดการเลื่อนของค่า maximum wavelength ( $\lambda_{\max}$ ) เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของ Ethanol:Toluene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน Ethanol:Toluene เปลี่ยนแปลงด้วยตามภาพที่ 4.2.3 (หรือเทียบเคียงกับ  $\lambda_{max}$  ในตารางที่ 4.2.1)



ภาพที่ 4.2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum wavelength ( $\lambda_{max}$ ) และ ค่าดัชนีหักเหต่างๆ (n) ของ Ethanol:Toluene

ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหต่อ  $\lambda_{max}$  สามารถเริ่มต้นอธิบายได้จากค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \tag{4.15}$$

ดังนั้นเมื่อเราทราบค่าไดอิเล็กทริก  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$

$$\text{เมื่อค่า } n = \sqrt{\frac{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}{2} + \frac{\epsilon_1}{2}} \dots (4.15) \text{ และค่า } \kappa = \sqrt{\frac{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}{2} - \frac{\epsilon_1}{2}} \tag{4.16}$$

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

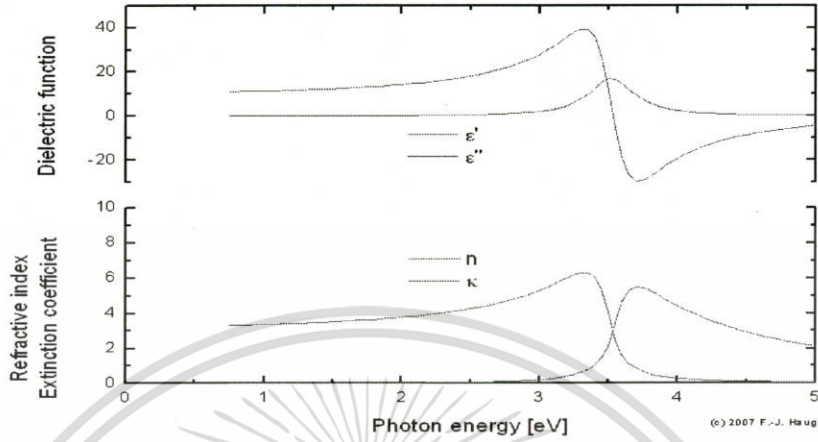
ในทำนองเดียวกัน เมื่อเราทราบค่าดัชนีหักเห  $n - i\kappa$

$$\text{เมื่อ } \epsilon_1 \text{ คือส่วนจริงของค่าไดอิเล็กทริก } \epsilon_1 = n^2 - \kappa^2$$

$$\text{และ } \epsilon_2 \text{ คือส่วนจินตภาพของค่าไดอิเล็กทริก } \epsilon_2 = 2n\kappa$$

ก็สามารถหาค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชัน  $\epsilon(\omega) = \epsilon_1 + i\epsilon_2$  ได้เช่นกัน

จากความสัมพันธ์ของค่า  $N(\omega)$  จากสมการที่ (4.15) และ  $\epsilon(\omega)$  จากสมการที่ (4.17) ทำให้สามารถพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง  $N(\omega)$  กับ  $\epsilon(\omega)$  เทียบกับพลังงานโฟตอนดังแสดงในภาพที่ 4.2.4 ซึ่งเป็นทัศนศาสตร์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นในโลหะเท่านั้น



ภาพที่ 4.2.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหกับค่าค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันที่พลังงานโฟตอนต่างๆกัน ซึ่งเกิดขึ้นในเฉพาะโลหะเท่านั้น [7]

และจากความสัมพันธ์

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

ทำให้เราทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห สนามไฟฟ้า และ ค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น โดยที่ค่าดัชนีหักเหส่วนจินตภาพ  $k$  จะเป็นตัวกำหนดค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น  $k$  โดยที่

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

ซึ่งค่าคงตัวการแพร่กระจายคลื่น  $k$  มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสง  $I$  โดยเป็นปฏิภาคโดยตรง กับค่าสนามไฟฟ้า  $E^2$

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

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

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

$I$  คือ ความเข้มของแสงตกกระทบ

ดังนั้นผลของค่าดัชนีหักเหในตัวกลางที่มากขึ้นมีผลต่อค่า maximum wavelength ( $\lambda_{\max}$ ) ที่เพิ่มขึ้น ด้วย ดังรูปที่ 4.2.3 ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการ 4.15 - 4.21 กล่าวคือ เมื่อค่าดัชนีหักเห  $N(\omega)$  มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าดัชนีหักเหส่วนจินตภาพ  $\kappa$  เพิ่มขึ้นตามสมการที่ 4.17 ดังนั้นจึงส่งผลต่อค่าการแพร่กระจายตัวของคลื่น ( $k$ ) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 4.19 ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\alpha$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ  $\alpha = 2k$  ดังนั้น เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\alpha$ ) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มของแสง ( $I$ ) น้อยลงตามสมการที่ 4.21 รวมทั้งค่าสนามไฟฟ้าที่ลดลงเช่นกัน ตามความสัมพันธ์ของ  $I$  ที่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าสนามไฟฟ้ากำลังสอง และจากค่าสนามไฟฟ้า  $E = E_0 e^{-i\omega t}$  เมื่อ  $\omega$  คือ ค่าความถี่ของแสงโดยมีค่าเท่ากับ  $2\pi f$  ซึ่ง  $f = \frac{c}{\lambda}$  จะทำให้ทราบว่า  $E$  จะเป็นปฏิภาคผกผันกับ  $\lambda$  นั่นหมายความว่า การเลื่อนของ maximum wavelength ( $\lambda_{\max}$ ) เป็นปฏิภาคผกผันกับสนามไฟฟ้างั้น เมื่อ  $\lambda_{\max}$  เพิ่มขึ้น จะทำให้สนามไฟฟ้า  $E$  มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าดัชนีหักเหมีค่าเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหของ Ethanol : Toluene มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า  $\lambda_{\max}$  เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เราได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางแสงของพลาสมาเคลือบบนผิวของแท่งทองคำนาโน โดยในการทดลองตอนที่ 1 เราเปลี่ยนค่าความเข้มข้นที่ต่าง ๆ กัน ของกรดวิตามินซี (ascorbic acid, AA) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ AA ตั้งแต่ 0.001 mM ถึง 10 mM เพื่อใช้ในการเคลือบพลาสมาให้บางลงผลการทดลองจะสังเกตเห็นพีคของกราฟการดูดกลืนมีสองช่วงในช่วงแสงสีขาวยุ เพราะจากเราทำการศึกษาวัดดูนาโนที่ไม่มีความสมมาตรของแกน หรือเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ของรูปทรงวัสดุ จึงทำให้เกิดเป็นสองพีคของพลาสมอนภายใต้การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าซึ่งจะสามารถนำสารตัวอย่างชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัว photo-catalyst ได้ภายใต้ช่วงแสงสีขาวยุ

นอกจากนั้น จากการให้ค่าความเข้มข้นของ Au@Pd nanorods และกรด AA คงที่ แล้วเราควบคุมอัตราส่วนในการผสมระหว่าง Au@Pd nanorods กับ กรด AA เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงความหนา - บางของตัวอย่างพบว่าเมื่อพลาสมาเคลือบให้บางลงจากการเติมกรด AA ที่มีอัตราส่วนให้มากขึ้น จะทำให้สารตัวอย่างของเรามีความเป็นทองมากขึ้น จึงทำให้ค่าความยาวคลื่นในการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์มีค่าความยาวคลื่นสูงหรือเคลื่อนที่ไปทางแถบสีแดง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การพลาสมาเคลือบในปริมาณน้อยๆจากการเติมกรด AA ให้มีอัตราส่วนที่ลดลง ทำให้สารตัวอย่างมีความเป็นพลาสมาเคลือบมากขึ้น จึงทำให้ค่าความยาวคลื่นในการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์มีค่าความยาวคลื่นต่ำหรือเคลื่อนที่ไปทางแถบสีน้ำเงินนั่นเอง

ส่วนในการทดลองตอนที่ 2 เป็นการศึกษาการทดลองวัดสเปกตรัมของ 0.001 mM Au@Pd nanorods ที่อยู่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างๆซึ่งจากการทดลองจะเห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ Toluene จะทำให้ค่าดัชนีหักเหมากขึ้น นั้นสามารถทำให้เกิดการเลื่อนของค่า maximum wavelength ให้มากขึ้นหรือเคลื่อนที่ไปทางสีแดงในทำนองเดียวกันเมื่อค่าดัชนีหักเหมี้น้อยลงจากการลดอัตราส่วนของ Toluene จะส่งผลต่อค่า maximum wavelength ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงไปด้วยนั่นเอง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองอุปกรณ์เครื่องแก้วในการบรรจุสารในการทดลองยังมีขนาดที่ไม่เหมาะสมต่อสารตัวอย่าง
2. อุปกรณ์ในการวัดปริมาตรสารยังมีขนาดสเกลไม่ละเอียดพอ
3. ในการจับ cuvette ควรใส่ถุงมือในการจับ มิฉะนั้นจะมีรอยนิ้วมือติดอาจทำให้การทดลองคลาดเคลื่อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ต้องมีความระมัดระวังในการทำการทดลองอยู่เสมอเพราะสารที่ความเข้มข้นต่างกันอาจจะมองด้วยตาเปล่าเพื่อสังเกตความแตกต่างของสารที่ความเข้มข้นต่างๆกันไม่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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 nanorodsenseble by an inverse extinction/scattering spectroscopic method", Optics Express, 21 (2013) 21639.
- [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, "Localized surface plasmon resonance of nanoporous gold", Applied Physics Letter, 98 (2011) 093701.
- [7] <http://www.superstrate.net/pv/optical/absorption.html>

## ภาคผนวก

Kitsakorn Locharoenrat and Pattareeya Kittidachachan, Optical Investigation of Palladium-Coated Gold Nanorods, Research Chemical on Intermediates, (to be submitted).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

## ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นาย กฤษกร โส้เจริญรัตน์

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

## ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
PhD	Physical Materials Science	JAIST	2007
MSc	Processing Technology	AIT	2000
BSc	Chemical Technology	Chulalongkorn U	1994

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

K. Locharoenrat, A. Sugawara, S. Takase, H. Sano, and G. Mizutani, Shadow Deposition of Copper Nanowires on the Faced NaCl(110) Template, Surface Science, 601 (2007) 4449.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Phenomenological Studies of Optical Properties of Cu Nanowires, Science & Technology of Advanced Materials, 8 (2007) 277.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Self-Organized Copper Nanowires Studied by Second Harmonic Spectroscopy, Optical Society of America Technical Digest of Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications (2007) WE5.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Rotational Anisotropy in Second Harmonic Intensity from Copper Nanowire Arrays on the NaCl(110) Substrates, J. Luminescence, 128 (2008) 824.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Second Harmonic Spectroscopy of Copper Nanowire Arrays of on the (110) Faceted Faces of NaCl Crystals, J. Physics: Conference Series, 100 (2008) 052050.

- K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Field Enhancement in Arrays of Copper Nanowires Investigated by the Finite-Difference Time-Domain Method, *Surface and Interface Analysis*, 40 (2008) 1635.
- K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Demonstration of Confocal Sum Frequency Microscopy, *Physica Status Solidi (c)*, 6 (2009) 304.
- G. Mizutani, K. Locharoenrat, H. Li, and H. Sano, Construction of an Optical Sum Frequency Microscope with Confocal Optics, *Optical Society of America Technical Digest of Nonlinear Optics: Optics & Photonics Congress (2009) JWA23*.
- G. Nishimura, K. Awasthi, K. Locharoenrat, S. Okawa, and Y. Yamada, Quantification of Fluorescence Target in Tissue Phantoms by Time-domain Diffuse Optical Tomography with Phantoms – Total-Light Approach, *Optical Society of America Technical Digest of Biomedical (2010), BTuD11*.
- G. Nishimura, K. Awasthi, K. Locharoenrat, S. Okawa, and Y. Yamada, Time-Domain Fluorescence Diffuse Optical Tomography for Live Animals by Total-Light Algorithm, *Proceedings of SPIE*, 7896 (2011) 78962Q.
- C-Y. Kao, C-W. Chang, K. Locharoenrat, C-M. Chang, Max T-K. Hou, and I-J. Hsu, Compact Optical Delay Line for Long-Range Scanning, *Optics Communications*, 284 (2011) 4243.
- K. Locharoenrat, and I-J. Hsu, Optical Delay Line for Rapid Scanning Low-Coherence Reflectometer, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2 (2012) 904.
- K. Locharoenrat, and G. Mizutani, Characterization, Optical, and Theoretical Investigation of Arrays of the Metallic Nanowires Fabricated by a Shadow Deposition Method, *Advanced Materials Research*, 622-623 (2013) 652.
- K. Locharoenrat, Nonlinear Optical Properties of Controlled Fabrication of Copper Nanowires by a Shadow Deposition, *Advanced Materials Research*, 622-623 (2013) 777.

A. Thedsakhulwong, K. Locharoenrat, and W. Thowladda, Nitrogen Concentrations on Structural and Optical Properties of Aluminium Nitride Films Deposited by Reactive RF-Magnetron Sputtering, *Advanced Materials Research*, 631-632 (2013) 186.

A. Thedsakhulwong, K. Locharoenrat, and W. Thowladda, Structure and Piezoelectric Properties of Aluminium Nitride Thin films on the Quartz Substrates deposited by Reactive RF-Magnetron Sputtering, *Advanced Materials Research* 699 (2013) 308.

K. Locharoenrat, and I-J. Hsu, Construction of the Optical Delay Line for the Optical Coherence Tomography, *International Journal of Applied Physics and Mathematics* 3 (2013) 137.

K. Locharoenrat, Copper Nanowires on NaCl (110) Template, *Applied Mechanics and Materials*, 313 (2013) 198.

K. Locharoenrat, Investigation of Temporal Profiles at the Symmetrical Points of the Target in Tissue Phantoms by Time-Resolved Fluorescence Diffuse Optical Tomography, *Proceedings of SPIE*, 8883 (2013) 88831I.

K. Locharoenrat, Preparations and Field Emission from Tungsten Nanotips, *Ferroelectrics*, 457 (2013) 76.

K. Locharoenrat, Second-Order Nonlinear Optical Response of Metal Nanostructures, *Advanced Materials Research* 858 (2014) 147.

K. Locharoenrat, REVIEW ARTICLE: Mechanism of Resonant Enhancement of Gold- and Copper-nanowires Arrays, *Advanced Materials Research*, 902 (2014) 29.

K. Locharoenrat, REVIEW ARTICLE: Recent Advances in Nanomaterial Fabrication, *Journal of. Physics: Conference Series* 495 (2014) 012018.

## ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นส. กัทธีรียา กิตติเดชาชาญ

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

## ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
PhD	Engineering Materials	University of Southampton	2007
MSc	Applied Physics	KMITL	2002
BSc	Applied Physics	KMITL	1997

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

P. Kittidachachan, W. Soonpanich, and B. Damrongsak Improved light harvesting in N719 sensitized nanocrystalline TiO<sub>2</sub> solar cells with Coumarin 6 dye, Proceeding of 11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering, December 18-21, Phuket, Thailand, 2013.

S. Rujihan, P. Kittidachachan, and B. Damrongsak, Prototype Microfluidic System for Fluorescence-based Chemical Sensing, Proceeding of Siam Physics Congress 2013, March 21-23, Chiangmai, Thailand, 2013.

S. Rujihan, P. Kittidachachan, and B. Damrongsak, Low-cost Fabrication of Masters for Plastic-Based Microfluidic Devices, Thai Journal of Physics, Series 8, 2012.

W. Soonpanich, U. Asawapirom, A. Keawprajak, and P. Kittidachachan, Spectral Down-Conversion for Dye Sensitized Solar Cells using Coumarin 6, Thai Journal of Physics, Series 8, 2012.

T. Kaewon, A. Chomna, P. Saowaros, P. Khunrungrueng, P. Kittidachachan, T. Taoladda, and B. Damrongsak, Development of Optical Beam Deflection Detection System for Microcantilever-Based Sensors, Thai Journal of Physics, Series 8, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิชัยพร สุญพานิช, ภัทรียา กิตติเดชาชาญ, อุดม อัครวาทิรมย์ การศึกษาผลการใช้ฟิล์มบางลูมิเนสเซนส์ต่อการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์, *Proceeding of the 7<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand*, 557-561, 3-5 พฤษภาคม 2554.

P.Kittidachachan, T. Markvart and L. Danos, Solar Cell Assembly, *International PCT Patent*, Patent number WO2011/042708, April 2011.

W. Soonpanich, U. Asawapirom, and P. Kittidachachan, Development of luminescence multilayer films for photovoltaic application, *Thai Journal of Physics*, Series 7, 2011.

วิชัยพร สุญพานิช, สุกฤต สมุทธระกพงษ์, ภัทรียา กิตติเดชาชาญ การศึกษาการรวมแสงของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนส์ นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5-7 พฤษภาคม 2553

P. Kittidachachan, B. Damrongsak, Low cost spectral response measurement system using high power LEDs, *Thai Journal of Physics*, Series 6, 2010.

P. Kittidachachan and W. Thowladda. Use of organic dyes to modify solar spectrum, *Proceeding of the 6<sup>th</sup> International conference on advanced materials*, 138-143, 2009.

P. Kittidachachan, T. Markvart, D.M. Bagnall, R. Greef, and G.J. Ensell. A detailed study of pn junction solar cells by means of collection efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2007; 91: 160–166. มี impact factor 2.321

P. Kittidachachan, L. Danos, T.J.J. Meyer, N. Alderman, and T. Markvart. Photon collection efficiency of fluorescent solar collectors. *CHIMIA* 2007; 61: 780-786. มี impact factor 0.517

P. Kittidachachan, T. Markvart, G.J. Ensell, R. Greef, and D.M. Bagnall. An analysis of a 'dead layer' in the emitter of  $n^+/p/p^+$  solar cells. In Conference Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pages 1103–1106, Orlando, Florida, USA, 2005.

T. Markvart, L. Danos, P. Kittidachachan, and R. Greef. Detailed balance efficiency of ideal single-stage fluorescent collectors. In 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pages 171–174, Barcelona, Spain, 2005.

P. Kittidachachan, L. Danos, R. Greef, T.J.J. Meyer, N. Alderman, and T. Markvart. Characterisation of fluorescent collectors in terms of spectral photon collection efficiency. In 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 2007.

P. Kittidachachan, N. Sangkeaw, A. Wichianchai. Barrier Height of Metal-Semiconductor Contacts Measurement System. In 27<sup>th</sup> Congress on Sciences and Technology of Thailand, Prince of Songkla University, 16-18 October 2001.

