

คุณสมบัติทางแสงของวัสดุโฟโตนิกส์จากโลหะมีตระกูลเคลือบบนปีกผีเสื้อ

OPTICAL PROPERTIES OF PHOTONIC MATERIALS FROM NOBLE
METALS COATED ON BUTTERFLY WING

ภวินท์ รักษศรีทอง

PAWIN RAKSRITHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2563

KMITL-2020-SC-M-030-022

คุณสมบัติทางแสงของวัสดุโฟโตนิกส์จากโลหะมีตระกูลเคลือบบนปีกผีเสื้อ

OPTICAL PROPERTIES OF PHOTONIC MATERIALS FROM NOBLE
METALS COATED ON BUTTERFLY WING

ภวินท์ รักษ์ศรีทอง

PAWIN RAKSRITHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2020-SC-M-030-022

*OPTICAL PROPERTIES OF PHOTONIC MATERIALS FROM NOBLE
METALS COATED ON BUTTERFLY WING*

PAWIN RAKSRITHONG

*A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS*

DEPARTMENT OF PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

KMITL-2020-SC-M-030-022

COPYRIGHT 2020

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติทางแสงของวัสดุโฟโตนิกส์จากโลหะมีตระกูลเคลือบบนปีกผีเสื้อ OPTICAL PROPERTIES OF PHOTONIC MATERIALS FROM NOBLE METALS COATED ON BUTTERFLY WING
ชื่อนักศึกษา	นายภวินท์ รัชศรีทอง
รหัสนักศึกษา	61605078
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.กฤษกร ไฉ้เจริญรัตน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการประยุกต์ใช้ หลักการ Finite - Difference Time - Domain (FDTD) เพื่อเข้าใจอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับกลุ่มหมอกอเล็กตรอนซึ่งมีพฤติกรรมการสั่นในลักษณะเป็นคลื่นบนผิวของโลหะมีตระกูลอันได้แก่โลหะ Au และ Pd ที่ถูกเคลือบบนโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ตัวอย่าง 3 สายพันธุ์อันได้แก่ *Danaus Genutia*, *Catopsilia Pomona* และ *Cetbosia pentbesilea* ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน อันตรกิริยาดังกล่าวถูกศึกษาในรูปแบบของค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของโครงสร้างตัวอย่างซึ่งเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) จากการทดลองพบว่าปรากฏการณ์ LSPR สามารถเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดีกับโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Cetbosia pentbesilea* ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au เนื่องมาจากโครงสร้างดังกล่าวมีขนาดเล็กที่สุดในบรรดาตัวอย่างทั้ง 3 สายพันธุ์จึงมีระยะห่างคาบระหว่างโครงสร้างที่น้อยซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้คลื่นอเล็กตรอนบนผิวโลหะที่อยู่บนโครงสร้างที่ใกล้เคียงกันสามารถเกิดการแทรกสอดส่งเสริมซึ่งกันและกันของสนามไฟฟ้าได้อย่างมาก เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติของโลหะ Au พบว่าคลื่นอเล็กตรอนบนพื้นผิววัสดุดังกล่าวมีค่าความถี่ธรรมชาติในการสั่นที่ต่ำจึงสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้น้อยและโลหะ Au ยังเป็นวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่ำจึงส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ Lightning-Rod Effect ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้เกิดปรากฏการณ์ LSPR ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : Finite - Difference Time - Domain (FDTD), Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), Lightning-Rod Effect

<i>Title</i>	<i>OPTICAL PROPERTIES OF PHOTONIC MATERIALS FROM NOBLE METALS COATED ON BUTTERFLY WING</i>
<i>Students Name</i>	<i>Mr. Pawin Raksrithong</i>
<i>Students ID</i>	<i>61605078</i>
<i>Degree</i>	<i>Master of Science (Applied Physics)</i>
<i>Department</i>	<i>Physics</i>
<i>Year</i>	<i>2020</i>
<i>Thesis Advisor</i>	<i>Assoc. Prof. Dr.Kitsakorn Locharoenrat</i>

Abstract

This thesis was aimed to apply Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method to understand the interaction between electromagnetic waves and electron cloud on the different surfaces of noble metals (Au and Pd) coated on the different wing structures of 3 different butterfly species- Danaus Genutia, Catopsilia Pomona and Cetbosia pentbesilea. Those interactions studied in terms of the distribution of electric fields and the absorption of electromagnetic waves on the surface of the specimens caused by Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR). This phenomenon existed well with Au coated on Cetbosia pentbesilea with the following reasons. One, Cetbosia pentbesilea has the smallest structure including the periodicity so that a coupling of electric field is dominant. Two, a low plasma frequency of Au results in low absorption intensity, whereas the lightning rod effect helps to increase to LSPR.

Keywor : Finite - Difference Time – Domain (FDTD), Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), Lightning-Rod Effect

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติทางแสงของวัสดุโฟโตนิกส์จากโลหะมีตระกูลเคลือบ บนปีกผีเสื้อ OPTICAL PROPERTIES OF PHOTONIC MATERIALS FROM NOBLE METALS COATED ON BUTTERFLY WING
ชื่อนักศึกษา	นายภวินท์ รักษ์ศรีทอง
รหัสนักศึกษา	61605078
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิลิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิลิกส์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.กฤษกร ไส้เจริญรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
อนุมัติให้วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(ฟิลิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ กรรมการ	
รศ.ดร.กฤษกร ไส้เจริญรัตน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 มิ.ย. 2563 เวลา 9.00 – 12.00 น.

ช่องทางการสอบ โปรแกรม Zoom

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

()

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ เดือน พ.ศ.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำจาก รศ.ดร.กฤษกร โส้เจริญรัตน์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการที่ติดต่อมา และยังเป็นผู้เสนอแนะข้อสงสัยรวมถึงตรวจและแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆตลอดระยะเวลาที่จัดทำวิทยานิพนธ์ จึงทำให้ผู้จัดทำมีความรู้ ความเข้าใจและแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.จรงค์ศักดิ์ พุมนวม ผู้ให้ปรึกษาในศาสตร์กัญญาวิทยาและให้ความอนุเคราะห์มอบตัวอย่างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์

ขอขอบพระคุณ คุณวาสนี ธรรมสถิต คุณสัญญา มีสิมและคุณวีรณูช เกษอุดม ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการตรวจสอบตัวอย่างปีกผีเสื้อด้วยเครื่อง SEM

ขอขอบพระคุณ คุณกิตติพิศ ส่งเกียรติวงศ์ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

ขอขอบพระคุณเพื่อนคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ช่วยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่านที่ได้ให้การอบรมสั่งสอนและให้ความรู้ตลอดมา ทำให้ผู้จัดทำสามารถนำความรู้ที่ได้รับมาประยุกต์ใช้กับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงและขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัวและพระอาจารย์แห่งวัดป่ายุบในที่คอยให้คำแนะนำและเป็นแรงผลักดันที่สำคัญทำให้ผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ภวินท์ รักษ์ศรีทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6 เอกสารอ้างอิง	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 โครงสร้างปีกผีเสื้อ	7
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างปีกผีเสื้อ	14
2.2.1 หลักการตรวจสอบตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อด้วย Scanning Electron Microscope	14
2.2.2 หลักการเคลือบโลหะทองคำบนตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อด้วยวิธี Sputtering	17
2.3 สมบัติเชิงแสงของโครงสร้างสีของปีกผีเสื้อ	18
2.3.1 โครงสร้างสีเชิงฟิสิกส์ (Physical color structure)	19
2.3.1.1 Diffraction grating	19
2.3.1.2 Optical Pathlength Difference	20
2.3.2 โครงสร้างสีเชิงเคมี (Chemical color structure)	21
2.3.2.1 Pigment ภายในโครงสร้างปีกผีเสื้อ	21
2.3.2.2 กฎของ Beer – Lambert	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	23
2.4.1.1 สมการของ Gauss สำหรับสนามไฟฟ้า	24
2.4.1.2 สมการของ Gauss สำหรับสนามแม่เหล็ก	25
2.4.1.3 สมการของ Faraday	25
2.4.1.4 สมการของ Ampere	26
2.5 Drude Model	27
2.6 ปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)	30
2.6.1 อัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาของผิวโลหะ (Aspect ratio)	33
2.6.2 ชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบผิวโลหะ	34
2.6.3 ความหนาของผิววัสดุโลหะ	35
2.6.4 ย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นอิเล็กตรอน	36
2.6.4.1 ความถี่ธรรมชาติของการสั่นของอิเล็กตรอนบนผิวโลหะ	36
2.6.5 ระยะห่างระหว่างโครงสร้างโลหะซึ่งเป็นองค์ประกอบของผิวโลหะ	37
2.6.6 ปรากฏการณ์ Lightning-Rod Effect ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโลหะ	39
2.7 Finite-Difference Time-Domain	39
2.7.1 Central finite difference	39
2.7.2 การแบ่งปริภูมีย่อยและ Yee Cell	41
2.8 สมการการดูดกลืน	44
2.9 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	47
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	49
3.1 ผลการตรวจสอบตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อ	49
3.2 การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Lumerical	50
3.2.1 การกำหนดตำแหน่งขององค์ประกอบของโครงสร้างปีกผีเสื้อและสารเคลือบโลหะ	50
3.2.1.1 การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชิ้นส่วนของ Ridge กับ Cross – ribs	51
3.2.1.2 การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชิ้นส่วนของชั้นโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้างปีกผีเสื้อ	52
3.2.1.3 การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชิ้นส่วนของชั้นโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้าง Ridge	55
3.2.1.4 การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชิ้นส่วนของชั้นโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้าง Cross – Ribs	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 คำสั่งพื้นฐานและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทดลอง	64
3.2.2.1 คำสั่งกำหนดขอบเขตการทดลอง	64
3.2.2.2 คำสั่งกำหนดการตรวจสอบ	68
3.2.2.3 คำสั่งกำหนดการสร้างวัตถุ	72
3.2.2.4 คำสั่งกำหนดแหล่งกำเนิดคลื่น	78
3.2.3 การจำลองการทดลองในโปรแกรม Lumerical	80
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	85
4.1 ผลการดุดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบน โครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์	85
4.1.1 ผลการจำลองการทดลองของสายพันธุ์ <i>Cetbosia Pentbesilea</i> (CPen)	85
4.1.1.1 ผลการดุดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการเคลือบ โลหะ	85
4.1.1.2 ผลการดุดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลมถูก เคลือบด้วยโลหะ	87
4.1.1.3 ผลการดุดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูก ด้วยโลหะ	89
4.1.1.4 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการ เคลือบด้วยโลหะ	91
4.1.1.5 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรง หัวแหลมถูกเคลือบด้วยโลหะ	93
4.1.1.6 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูก เคลือบด้วยโลหะ	95
4.1.2 ผลการจำลองการทดลองของสายพันธุ์ <i>Danaus Genutia</i> (DG)	97
4.1.2.1 ผลการดุดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการ เคลือบโลหะ	97
4.1.2.2 ผลการดุดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลมถูก เคลือบด้วยโลหะ	99

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2.3 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูก ด้วยโลหะ	101
4.1.2.4 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจาก การเคลือบด้วยโลหะ	103
4.1.2.5 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลม ถูก เคลือบด้วยโลหะ	105
4.1.2.6 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูก เคลือบด้วยโลหะ	107
4.1.3 ผลการจำลองการทดลองของสายพันธุ์ <i>Catopsilia Pomona</i> (CPom)	109
4.1.3.1 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการเคลือบ โลหะ	109
4.1.3.2 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลมถูก เคลือบ ด้วยโลหะ	111
4.1.3.3 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูก ด้วยโลหะ	113
4.1.3.4 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจาก การเคลือบด้วยโลหะ	115
4.1.3.5 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลม ถูก เคลือบด้วยโลหะ	117
4.1.3.6 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูก เคลือบด้วยโลหะ	119
4.2 การเปรียบเทียบผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการกระจายตัวของ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ทรงหัวแหลมและหัว ตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	122
4.2.1 ผลการเปรียบเทียบผลค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อ ทั้ง 3 สายพันธุ์ชนิดหัวแหลมและหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบและไม่เคลือบ	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.1 ผลการเปรียบเทียบผลค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีก ผีเสื้อ	122
ทั้ง 3 สายพันธุ์ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบด้วยโลหะ	
4.2.1.2 ผลการเปรียบเทียบผลดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อ	
ทั้ง 3 สายพันธุ์ทรงหัวแหลมและหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	123
4.2.1.3 ผลการเปรียบเทียบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อ	
ทั้ง 3 สายพันธุ์แบบหัวแหลมภายใต้เงื่อนไขด้วยโลหะ Au และ Pd	129
4.2.1.4 ผลการเปรียบเทียบผลดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อ	
ทั้ง 3 สายพันธุ์แบบหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	130
4.2.2 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ชนิดหัวแหลมและหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ	131
4.2.3 ผลการเปรียบเทียบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดบนโครงสร้างปีกผีเสื้อ ทั้ง	
3 สายพันธุ์ชนิดหัวแหลมและหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	133
4.3 อภิปรายผล	140
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	143
5.1 สรุปผลการวิจัย	143
5.2 ข้อเสนอแนะ	143
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก ก	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2561	3
ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2561	4
ตารางที่ 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562	4
ตารางที่ 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2562	4
ตารางที่ 2.1 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 1 (S1)	9
ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 2 (S2)	10
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 3 (S3)	11
ตารางที่ 2.4 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 4 (S4)	12
ตารางที่ 2.5 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 5 (S5)	13
ตารางที่ 3.1 ค่าขนาดขององค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญของปีกผีเสื้อจำนวน 4 สาย พันธุ์	49
ตารางที่ 4.1 ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ ชนิดหัวแหลมและหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd และการตกกระทบ TE mode และ TM mode	131
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของ โครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ CPen ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	132
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของ โครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ DG ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	132
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของ โครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ CPom ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	133
ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าความยาว คลื่นเฉพาะของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ CPen ชนิดหัวแหลมและหัว ตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd และการตกกระทบ TE mode และ TM mode	134

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าความยาวคลื่นเฉพาะของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ุ DG ชนิดหัวแหลมและหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd และการตกกระทบ TE mode และ TM mode	135
ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าความยาวคลื่นเฉพาะของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ุ CPom ชนิดหัวแหลมและหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd และการตกกระทบ TE mode และ TM mode	136
ตารางที่ 4.8 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ุ CPen ทรงหัวแหลมและหัวตัด ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	137
ตารางที่ 4.9 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ุ DG ทรงหัวแหลมและหัวตัด ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	137
ตารางที่ 4.10 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ุ CPom ทรงหัวแหลมและหัวตัด ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd	138
ตารางที่ 4.11 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ุ CPen เคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd (ค่าจากแบบจำลองและค่าจากการคำนวณ)	138
ตารางที่ 4.12 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ุ DG เคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd (ค่าจากแบบจำลองและค่าจากการคำนวณ)	139
ตารางที่ 4.13 เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ุ CPom เคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd (ค่าจากแบบจำลองและค่าจากการคำนวณ)	139

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโดยรวมของปีกผีเสื้อ	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของปีกผีเสื้อ 5 กลุ่ม	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างจำลองของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 1 (S1)	14
รูปที่ 2.4 โครงสร้างและส่วนประกอบของ SEM	16
รูปที่ 2.5 ลักษณะของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการชนกันของอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ ต้องการจะตรวจสอบ	17
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเครื่อง Sputter coater	18
รูปที่ 2.7 แสงย่าน Visible light ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแสงขาวสามารถจำแนกออก ได้ดังนี้ แสงสีม่วง (400 nm), แสงคราม (425 nm), แสงสีน้ำเงิน (470 nm), แสงสีเขียว (550 nm), แสงสีเหลือง (600 nm), แสงสีแสด (630 nm) และ แสงสีแดง (665 nm)	19
รูปที่ 2.8 การประยุกต์ใช้สมบัติ Diffraction grating ของโครงสร้างปีกผีเสื้อ	20
รูปที่ 2.9 ลำแสงสะท้อน A และ B มีเฟสที่ตรงกันจะส่งผลให้เกิดการแทรกสอดแบบ ส่งเสริมส่งผลให้เกิดลำแสง C ซึ่งมีแอมพลิจูดเป็น 2 เท่าของทั้งลำแสง สะท้อน A และ B	21
รูปที่ 2.10 แสงสะท้อน D และ E มีเฟสที่ไม่ตรงกันจะส่งผลให้เกิดการแทรกสอดแบบ หักล้างส่งผลให้ลำแสง F ที่เกิดขึ้นมีมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์	21
รูปที่ 2.11 การดูดกลืนพลังงานแสงของอิเล็กตรอนเป็นการเพิ่มพลังงานกระตุ้นให้ อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนระดับพลังงานที่อาศัยอยู่ไปยังระดับพลังงานชั้นที่ สูงขึ้น	22
รูปที่ 2.12 แสงที่ตกกระทบวัสดุจะถูกแยกออกเป็นแสงส่วนที่สามารถเกิดทางผ่านวัสดุ และแสงส่วนที่ถูกวัสดุดูดกลืน	22
รูปที่ 2.13 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตาม k-vector	23
รูปที่ 2.14 รูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	24
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก และทิศทางเกิดการเกิดสนามไฟฟ้าหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นไปตามกฎ มือซ้าย	26

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและ ทิศทางเกิดการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนวนรอบสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามกฎมือ ขวา	27
รูปที่ 2.17 องค์ประกอบของ Drude Model	28
รูปที่ 2.18 แอมพลิจูดการสั่นของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์ LSPR	31
รูปที่ 2.19 ปัจจัยเชิงมิติซึ่งมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ SPR บนผิวโลหะ	33
รูปที่ 2.20 การเกิดปรากฏการณ์ SPR บนผิวโลหะ Au ซึ่งเป็นผลมาจากคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า	34
รูปที่ 2.21 การเกิดปรากฏการณ์ SPR บนผิวโลหะที่ความหนาต่างๆ	35
รูปที่ 2.22 การกระตุ้นอิเล็กตรอนบนผิวโลหะด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่เฉพาะ	36
รูปที่ 2.23 ทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าในการกระตุ้นคลื่นอิเล็กตรอน	37
รูปที่ 2.24 การเกิดปรากฏการณ์ SPR ที่ระยะห่างต่างๆ	38
รูปที่ 2.25 การแบ่งปริภูมิออกเป็น Cell ย่อยลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศระ	42
รูปที่ 2.26 แต่ละ Cell ย่อยถูกพิจารณาเป็น Yee cell	42
รูปที่ 2.27 การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าให้เกิดสนามแม่เหล็กตามแกน x	43
รูปที่ 2.28 การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าให้เกิดสนามแม่เหล็กตามแกน z	43
รูปที่ 2.29 การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าให้เกิดสนามแม่เหล็กตามแกน y	44
รูปที่ 3.1 แบบจำลองขนาดย่อของโครงสร้างปีกผีเสื้อ	51
รูปที่ 3.2 การกำหนดขนาดของแบบจำลอง Cross - ribs ในพิกัด (x,y)	51
รูปที่ 3.3 การกำหนดตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ Ridge ทั้ง 4 ชั้น	52
รูปที่ 3.4 การกำหนดตำแหน่งขอบซ้ายและขวาของ Ridge ทั้ง 4 ชั้น	52
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการระบุตำแหน่ง	53
รูปที่ 3.6 จุด a ถึง d ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชั้น C1 ถูกสร้างด้วยวิธีการเลื่อน ตำแหน่งในแกน x จากจุดกำเนิดบน Bard	54
รูปที่ 3.7 จุด a ถึง d ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชั้น C2 สร้างขึ้นถัดจากชั้น C1	55
รูปที่ 3.8 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของ Ridge	55
รูปที่ 3.9 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น A	56
รูปที่ 3.10 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น B	56

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น C	57
รูปที่ 3.12 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น D	57
รูปที่ 3.13 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น E	58
รูปที่ 3.14 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น F	58
รูปที่ 3.15 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น G	59
รูปที่ 3.16 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น H	59
รูปที่ 3.17 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น I	60
รูปที่ 3.18 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น J	60
รูปที่ 3.19 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น K	61
รูปที่ 3.20 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น L	61
รูปที่ 3.21 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น M	62
รูปที่ 3.22 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น N	62
รูปที่ 3.23 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น O	63
รูปที่ 3.24 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น P	63
รูปที่ 3.25 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น Q	64
รูปที่ 3.26 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น R	64
รูปที่ 3.27 รูปทรงของขอบเขตของคำสั่ง Region ภายในปริภูมิ 3 มิติ	66
รูปที่ 3.28 การแบ่งขอบเขตของ Region ออกเป็น Mesh ย่อยๆ	68
รูปที่ 3.29 การสร้างระนาบตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	70
รูปที่ 3.30 การสร้างผิวปิดสำหรับตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยคำสั่ง <i>Frequency - domain field and power</i> ภายในโปรแกรม Lumerical	72
รูปที่ 3.31 การสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมจากคำสั่ง Triangle	74
รูปที่ 3.32 การสร้างรูปทรงหลายเหลี่ยมจากคำสั่ง Polygons	75
รูปที่ 3.33 การสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมจากคำสั่ง Rectangle	77
รูปที่ 3.34 การกำหนดกำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับองค์ประกอบของแบบจำลอง	78

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.35 แหล่งกำเนิดคลื่นจากคำสั่ง <i>Plane wave</i>	80
รูปที่ 3.36 ขั้นตอนการจำลองการทดลอง	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่าโครงสร้างสีบนปีกผีเสื้อเกิดขึ้นจากโครงสร้างระดับนาโนหรือไม่โครงสร้างที่เป็นโครงสร้างสีเชิงฟิสิกส์ กลไกดังกล่าวเกิดจากค่าดัชนีหักเหแสงของชิ้นส่วนเนื้อเยื่อปีกผีเสื้อที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นคาบสลับกับช่องว่างและความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นตัวอย่างของโครงสร้างปีกผีเสื้อในธรรมชาติซึ่งเป็นวัสดุโฟโตนิกส์จึงเป็นโครงสร้างที่ถูกเลือกมาใช้ในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ไฮบริดโฟโตนิกส์ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงแสงที่เสถียร สิ่งเหล่านี้เป็นแรงบันดาลใจให้ทำงานวิจัยจำนวนมากเพื่อสร้างเซนเซอร์ที่มีจุดเด่นคือย่อยสลายได้ เข้าได้กับธรรมชาติและเป็นโครงสร้างตั้งต้นที่เหมาะสมในการสร้างอุปกรณ์โฟโตนิกส์ อาทิเช่น Garrett et al. [1] ทำการเคลือบโครงสร้างของปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Graphium weiskei* ด้วยโลหะ Au เพื่อใช้ในการตรวจจับโรคมะเร็งปอดร่วมกับ Raman spectroscopy Elbaz et al. [2] ใช้โครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Morpho*, *Papilio* และ *Ornithoptera* เป็นโครงสร้างตั้งต้นในการจัดเรียงเซลล์ Narasimhan et al. [3] ใช้ฐานพอลิเมอร์ร่วมกับโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Chorinea* ในการตรวจสอบการตอบสนองของลูกตากระต่ายขาว Chen et al. [4] สร้าง Silicon multilayer ที่มีสมบัติเป็นรูพรุนและเว้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Papilio blumei* Jiang et al. [5] ใช้โครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Morpho didius* ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์ Principal Component Analysis (PCA) ในการตรวจจับแก๊สไนโตรเจน ไอร์ระเหยของเอทานอนและเมทานอน Wang et al. [6] ทำการเคลือบสารประกอบ ZnO บนโครงสร้าง *Pieris Canidia* เพื่อสร้างอุปกรณ์โฟโตนิกส์ชนิดต้นทุ่นต่ำ Aideo et al. [7] ทำการเคลือบสารประกอบ ZnO บนโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Graphium agamemon* เพื่อควบคุมคุณสมบัติเชิงแสงของ ZnO จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดบ่งชี้ถึงความแตกต่างของคุณสมบัติเชิงแสงและคุณสมบัติเชิงเคมีของโครงสร้างปีกผีเสื้อหลากหลายสายพันธุ์ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเชิงแสงของอุปกรณ์ไฮบริดโฟโตนิกส์ อาทิเช่น ค่าดัชนีหักเหแสงเป็นค่าที่สามารถถูกกำหนดได้จากชนิดของโลหะที่เคลือบบนโครงสร้างดังกล่าวโดยการเคลือบโลหะมีตระกูลบนวัสดุโฟโตนิกส์ที่มีในธรรมชาติเพื่อเพิ่มหรือลดค่าการดูดกลืนแสงของโครงสร้างดังกล่าวในรูปแบบของปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีหน่วยความจำที่มากขึ้นและมีความสามารถในการประมวลผลที่รวดเร็วยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อการศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ได้รับความสนใจและกลายมาเป็นปัจจัยสำคัญ

ที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเนื่องมาจากเป็นวิธีการที่ช่วยลดต้นทุนและลดระยะเวลาในการทดลอง การสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับโครงสร้างโฟโตนิกส์ของแบบจำลองจะอาศัยหลักการ Finite – Difference Time – Domain (FDTD) ซึ่งคือการแบ่งระบบที่ต้องการจะวัดออกเป็นโครงตาข่ายย่อยๆ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยสมการของ Maxwell

โปรแกรม Lumerical ถูกใช้เป็นซอฟต์แวร์หลักในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างไฮบริดโฟโตนิกส์ผ่านการสร้างแบบจำลองเพื่อการศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างโครงสร้างปีกผีเสื้อ 3 สายพันธุ์อันได้แก่ *Danaus Genutia*, *Catopsilia Pomona* และ *Cetbosia Pentbesilea* กับคลื่นแสงโพลาริซชันด Transverse Electric (TE) mode และ Transverse Magnetic (TM) mode ในลักษณะของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของแสงที่ตกกระทบและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้างแบบจำลอง อย่างไรก็ตามโครงสร้างปีกผีเสื้อดังกล่าวหากไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวด้วยโลหะจะมีความสามารถในการดูดกลืนคลื่นแสงที่ต่ำมาก ดังนั้นโครงสร้างจึงถูกเคลือบด้วยโลหะทองคำ (Au) หรือ แพลเลเดียม (Pd) เพื่อปรับเปลี่ยนความสามารถในการดูดกลืนคลื่นแสงของโครงสร้างปีกผีเสื้อ การศึกษาปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็นแนวทางที่นำไปสู่การพัฒนาโครงสร้างไฮบริดโฟโตนิกส์ประสิทธิภาพสูงจากโครงสร้างปีกผีเสื้อสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการแพทย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้ปัจจัยเชิงสัญญาณวิทยาของปีกผีเสื้อ 3 สายพันธุ์ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะมีตระกูล (Au,Pd)
- 2) เพื่อศึกษาผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายใต้ปัจจัยเชิงสัญญาณวิทยาของปีกผีเสื้อ 3 สายพันธุ์ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะมีตระกูล (Au,Pd)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เก็บตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ อันได้แก่ *Danaus Genutia*, *Catopsilia Pomona* และ *Cetbosia Pentbesilea* เป็นตัวอย่างทดลองที่สามารถพบได้ง่ายในประเทศไทยและตรวจสอบตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
- 2) โลหะมีตระกูล อาทิเช่น Au และ Pd ซึ่งเป็นโลหะที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ถูกเคลือบบนโครงสร้างปีกผีเสื้อเพื่อเพิ่มความเข้มของการเกิดปรากฏการณ์ LSPR บนโครงสร้างดังกล่าว

ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2561

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2561											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 4												
ขั้นตอนที่ 5												
ขั้นตอนที่ 6												
ขั้นตอนที่ 7												
ขั้นตอนที่ 8												

ตารางที่ 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2562											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 9												
ขั้นตอนที่ 10												
ขั้นตอนที่ 11												

ตารางที่ 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2562

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2562											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 12												
ขั้นตอนที่ 13												
ขั้นตอนที่ 14												
ขั้นตอนที่ 15												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ผู้วิจัยได้รับความรู้เรื่องโครงสร้างปีกผีเสื้อที่จัดเป็นหนึ่งในรูปแบบของวัสดุนาโนที่มีสมบัติเป็น periodic structure ซึ่งเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ LSPR
- 2) นักวิจัยท่านอื่นสามารถนำข้อมูลที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้ไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบและสร้างเซนเซอร์สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดเชิงแสง
- 3) ผู้วิจัยได้รับความรู้และความเข้าใจในหลักการทำงานของ SEM, Sputter coater และโปรแกรม Lumerical

4) ผู้วิจัยได้รับความรู้ ความเข้าใจในระเบียบวิธีวิจัยและกระบวนการของระเบียบวิธี FDTD

1.6 เอกสารอ้างอิง

- [1] N. L. Garrett, R. Sekine, M. W. A. Dixon, L. Tilley, K. R. Bambery, and B. R. Wood, "Bio-sensing with butterfly wings: Naturally occurring nanostructures for SERS-based malaria parasite detection," *Phys. Chem. Chem. Phys.* 17, 21164 (2015).
- [2] A. Elbaz, J. Lu, B. Gao, F. Zheng, Z. Mu, Y. Zhao, and Z. Gu, "Chitin-based anisotropic nanostructures of butterfly wings for regulating cells orientation," *Polymers* 9(12), 386 (2017).
- [3] V. Narasimhan, R. H. Siddique, J. O. Lee, S. Kumar, B. Ndjamen, J. Du, N. Hong, D. Sretavan, and H. Choo, "Multifunctional biophotonic nanostructures inspired by the longtail glasswing butterfly for medical devices," *Nature Nanotechnol.* 13, 512 (2018).
- [4] Z. Chen, F. F. Fu, Y. R. Yu, Y. X. Shang, H. Wang, and Y. J. Zhao, "Cardiomyocytes actuated Morpho butterfly wings," *Adv. Mater.* 31, 1805431 (2019).
- [5] T. Jiang, Z. Peng, W. Wu, T. Shi, and G. Liao, "Gas sensing using hierarchical micro/nanostructures of Morpho butterfly scales," *Sensor and Actuators A* 213, 63 (2014).
- [6] C. S. Wang, T. Y. Chang, T. Y. Lin, and Y. F. Chen, "Biologically inspired flexible quasi-single*mode random laser: An intergration of *Pieris canidia* butterfly wing and semiconductors," *Sci. Reports* 4, 6736 (2014).
- [7] S. N. Aideo and D. Mohanta, "Investigation of manifestation of optical properties of butterfly wings with nanoscale zinc oxide incorporation," *J. Phys.: Conf. Ser.* 765, 012019 (2016).

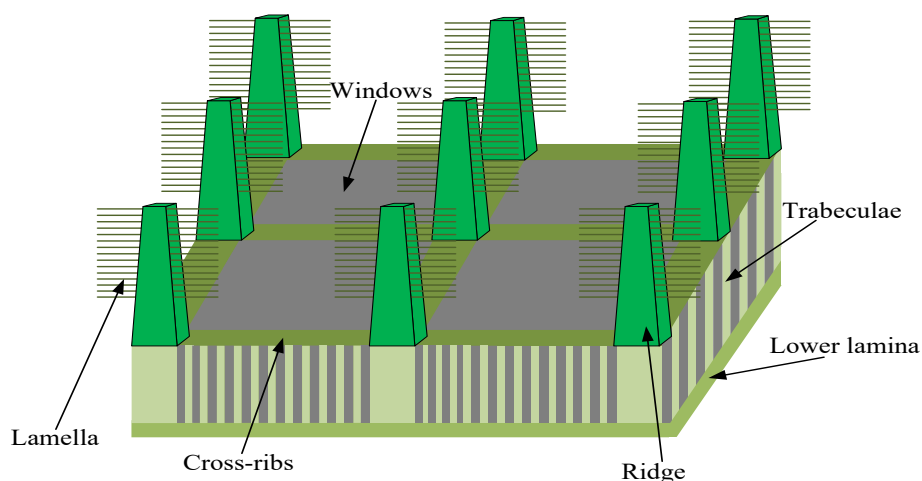
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับลักษณะเชิงกายภาพที่มีความสำคัญของตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อ หลักการตรวจสอบโครงสร้างตัวอย่างปีกผีเสื้อ โดย Scanning Electron Microscope (SEM) หลักการเกิดปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) สมบัติของสารเคลือบ Au กับ Pd และหลักการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีการ Finite-Difference Time-Domain (FDTD)

2.1 โครงสร้างปีกผีเสื้อ

โครงสร้างปีกผีเสื้อเป็นโครงสร้างระดับนาโนที่มีคุณสมบัติทางแสงที่โดดเด่นหลายประการ ซึ่งได้รับความสนใจจากเหล่านักวิจัยเป็นอย่างมาก อาทิเช่น มีสมบัติ Diffraction grating และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความเข้มของการเกิดปรากฏการณ์ LSPR เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้เหล่านักวิจัยพยายามนำโครงสร้างปีกผีเสื้อมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านแสงด้วย เหตุผลที่ว่าในปัจจุบันยังไม่สามารถสังเคราะห์โครงสร้างเลียนแบบปีกผีเสื้อได้อย่างสมบูรณ์แบบโครงสร้างโดยรวมของปีกผีเสื้อมีองค์ประกอบดังรูปที่ 2.1 [8]

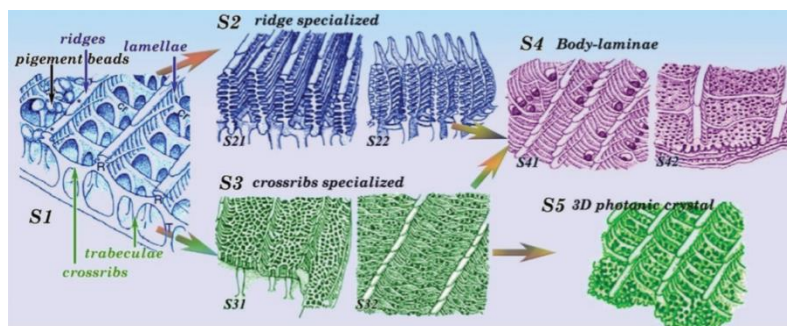


รูปที่ 2.1 โครงสร้างโดยรวมของปีกผีเสื้อ

- Main-ribs คือ โครงสร้างหลักที่ออกจาก Lamina
- Sub-ribs คือ ส่วนย่อยที่ออกจาก Main-ribs
- Cross-ribs คือ โครงสร้างที่เชื่อมต่อระหว่างแต่ละ Main-ribs

- Windows คือ ช่องว่างซึ่งถูกล้อมรอบด้วย Cross-ribs ที่ตัดกัน
- Lamina คือโครงสร้างค้ำจุนซึ่งอยู่ใต้ Main-ribs และ Cross-ribs

โครงสร้างของปีกผีเสื้อสามารถจำแนกได้เป็น 5 กลุ่ม [8] ดังรูปที่ 2.2






รูปที่ 2.2 โครงสร้างของปีกผีเสื้อ 5 กลุ่ม



- S1 (Pigment beads) มีโครงสร้าง Ridge ขนาดใหญ่ซ้อนกันเป็นชั้นๆ เชื่อมต่อกันโดย Cross-ribs และตั้งอยู่บน Trabeculae
- S2 (Ridge specialized) เป็นโครงสร้างซึ่งพัฒนามาจาก Upper structure ของ S1 โดยมีการเจริญเติบโตของ Lamella ออกจาก Ridges
- S3 (Crossrib specialized) เป็นโครงสร้างซึ่งพัฒนามาจาก Lower structure ของ S1 โดยบริเวณ Windows จะมีการเจริญเติบโตของ Trabeculae มีลักษณะเป็นรูพรุน
- S4 (Body-laminae) เป็นโครงสร้างซึ่งพัฒนามาจาก Trabeculae ของ S3 โดยชั้น Trabeculae จะมีการเจริญเติบโตซ้อนกันหลายชั้น
- S5 (3D photonic crystal) เป็นโครงสร้างซึ่งพัฒนามาจาก Trabeculae ของ S3 โดย รูพรุนบน Trabeculae มีการเจริญเติบโตเชื่อมต่อกันส่งผลให้รูพรุนดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้น

โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 1 - 5 แสดงดังตารางที่ 2.1 - 2.5 ตามลำดับ



ตารางที่ 2.1 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 1 (S1)

สายพันธุ์	ลักษณะ	ข้อมูล ที่สำคัญ
<i>Cetbosia Pentbesilea</i> [9]		<p>Kingdom <i>Animalia</i></p> <p>Phylum <i>Euarthropoda</i></p> <p>Class <i>Insecta</i></p> <p>Order <i>Lepidoptera</i></p> <p>Family <i>Nymphalidae</i></p> <p>Genus <i>Cethosia</i></p> <p>Species <i>C. penthesilea</i></p> <p>Found in <i>Southeast Asia</i></p>
<i>Danaus Genutia</i> [9]		<p>Kingdom <i>Animalia</i></p> <p>Phylum <i>Euarthropoda</i></p> <p>Class <i>Insecta</i></p> <p>Order <i>Lepidoptera</i></p> <p>Family <i>Nymphalidae</i></p> <p>Genus <i>Danaus</i></p> <p>Species <i>D. genutia</i></p> <p>Found in <i>Southeast Asia</i></p>
<i>Catopsilia Pomona</i> [9]		<p>Kingdom <i>Animalia</i></p> <p>Phylum <i>Arthropoda</i></p> <p>Class <i>Insecta</i></p> <p>Order <i>Lepidoptera</i></p> <p>Family <i>Pieridae</i></p> <p>Genus <i>Catopsilia</i></p> <p>Species <i>C. pomona</i></p> <p>Found in <i>Southeast Asia</i></p>



ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 2 (S2)

สายพันธุ์	ลักษณะ	ข้อมูล ที่สำคัญ
<i>Morpho Sulkowskyi</i> [10]		<p>Kingdom <i>Animalia</i> Phylum <i>Arthropoda</i> Class <i>Insecta</i> Order <i>Lepidoptera</i> Family <i>Nymphalidae</i> Genus <i>Morpho</i> Species <i>M. sulkowskyi</i> Found in <i>Peru</i></p>
<i>Morpho Didius</i> [11]		<p>Kingdom <i>Animalia</i> Phylum <i>Arthropoda</i> Class <i>Insecta</i> Order <i>Lepidoptera</i> Family <i>Nymphalidae</i> Genus <i>Morpho</i> Species <i>M. didius</i> Found in <i>South America</i></p>



ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 3 (S3)

สายพันธุ์	ลักษณะ	ข้อมูล ที่สำคัญ
<i>Morpho Rhetenor</i> [12]		<p>Kingdom <i>Animalia</i> Phylum <i>Arthropoda</i> Class <i>Insecta</i> Order <i>Lepidoptera</i> Family <i>Nymphalidae</i> Genus <i>Morpho</i> Species <i>M. rhetenor</i> Found in <i>Brazil</i></p>
<i>Papilio Paris</i> [13]		<p>Kingdom <i>Animalia</i> Phylum <i>Arthropoda</i> Class <i>Insecta</i> Order <i>Lepidoptera</i> Family <i>Papilionidae</i> Genus <i>Papilio</i> Species <i>P. paris</i> Found in <i>Southeast Asia</i></p>

ตารางที่ 2.4 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 4 (S4)

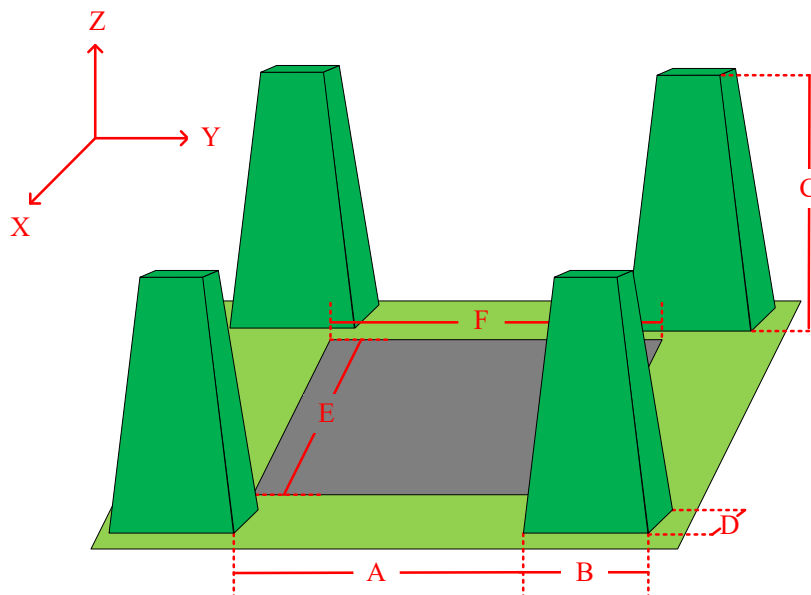
สายพันธุ์	ลักษณะ	ข้อมูล ที่สำคัญ
<p><i>Thermozephyrus ataxus</i> [13]</p>		<p>Kingdom <i>Animalia</i> Phylum <i>Arthropoda</i> Class <i>Insecta</i> Order <i>Lepidoptera</i> Family <i>Lycaenidae</i> Genus <i>Thermozephy</i> Species <i>T. ataxus</i> Found in <i>India</i></p>
<p><i>Chrysiridia Rhipheus</i> [14]</p>		<p>Kingdom <i>Animalia</i> Phylum <i>Euarthropoda</i> Class <i>Insecta</i> Order <i>Lepidoptera</i> Family <i>Uraniidae</i> Genus <i>Chrysiridia</i> Species <i>C. rhipheus</i> Found in <i>Madagascar</i></p>

ตารางที่ 2.5 โครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 5 (S5)

สายพันธุ์	ลักษณะ	ข้อมูล ที่สำคัญ
<i>Albulina Metallica</i> [13]		<p>Kingdom <i>Animalia</i> Phylum <i>Arthropoda</i> Class <i>Insecta</i> Order <i>Lepidoptera</i> Family <i>Lycaenidae</i> Genus <i>Albulina</i> Species <i>A. metallica</i> Found in <i>India</i></p>
<i>Callophrys Rubi</i> [15]		<p>Kingdom <i>Animalia</i> Phylum <i>Arthropoda</i> Class <i>Insecta</i> Order <i>Lepidoptera</i> Family <i>Lycaenidae</i> Genus <i>Callophrys</i> Species <i>C. rubi</i> Found in <i>Russia</i></p>

2.2 การตรวจสอบโครงสร้างปีกผีเสื้อ

ตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อในกลุ่มที่ 1 (S1) ได้รับความอนุเคราะห์มาจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา ซึ่งมีองค์ประกอบพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างจำลองของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 1 (S1)

- โดยที่
- A คือ ระยะห่างของ Main-ribs ตามแนวแกน y
 - B คือ ความกว้างของ Main-ribs ตามแนวแกน y
 - C คือ ความสูงของ Main-ribs ตามแนวแกน z
 - D คือ ความหนาของ Main-ribs ตามแนวแกน x
 - E คือ ความกว้างของ Windows ตามแนวแกน x
 - F คือ ความกว้างของ Windows ตามแนวแกน y

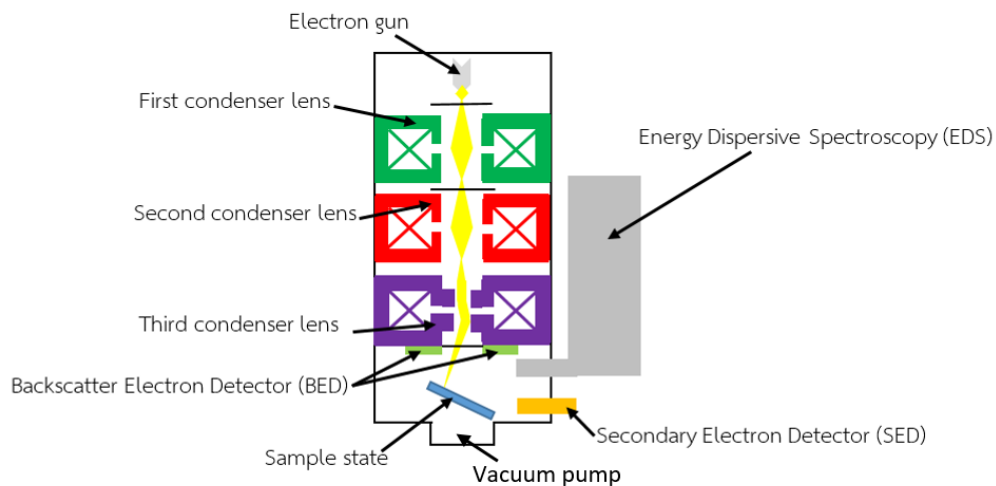
2.2.1 หลักการตรวจสอบตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

การตรวจสอบลักษณะเชิงสัณฐานวิทยาของปีกผีเสื้อซึ่งเป็นโครงสร้างระดับนาโนมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือในการตรวจสอบที่มีความละเอียดสูง อาทิเช่น SEM ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นตัวตรวจสอบชิ้นตัวอย่างแทนการใช้แสงด้วยเหตุผลที่ว่าอิเล็กตรอนมีค่าความยาวคลื่นที่สั้นกว่าแสงจึงส่งผลให้ SEM มีค่า Resolution ประมาณ 100 nm ซึ่งสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง องค์ประกอบของ SEM มีดังต่อไปนี้

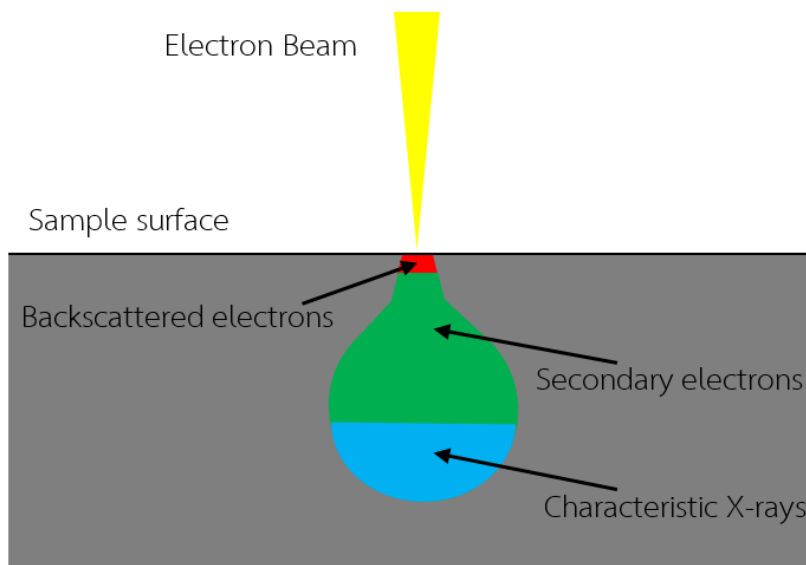
1. *Electron gun* คือแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิซึ่งมีหลักการทำงานในลักษณะเป็นขั้ว *Cathode* ที่สามารถเร่งอิเล็กตรอนให้เกิดการเคลื่อนที่ภายใต้ความต่างศักย์ 30,000 eV
2. *Electromagnetic lens* คืออุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการปรับคุณสมบัติของลำอิเล็กตรอนให้มีความเหมาะสมต่อการตรวจสอบชิ้นตัวอย่าง *lens* ในระบบสามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดดังนี้
 1. *First condenser lens* มีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของลำอิเล็กตรอน
 2. *Second condenser lens* มีหน้าที่กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน
 3. *Third condenser lens* หรือ *Deflection coils* มีหน้าที่กำหนดตำแหน่งโฟกัสของลำอิเล็กตรอน
3. *Sample state* คืออุปกรณ์ที่วางขึ้นตัวอย่างที่ต้องการจะตรวจสอบซึ่งมีลักษณะเป็นวัตถุทึบแสงและถูกต่อเข้ากับขั้ว *Anode*
4. *Vacuum pump* คืออุปกรณ์ที่ถูกใช้เพื่อลดค่าความดันภายในระบบให้อยู่ในย่าน *High vacuum*
5. *Detector* คืออุปกรณ์ที่ถูกใช้เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนปฐมภูมิเข้าชนชิ้นตัวอย่างซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิดดังต่อไปนี้
 1. *Secondary Electron Detector (SED)* ถูกใช้เพื่อตรวจจับรูปสัญญาณ *Secondary Electron Image (SEI)* ที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ เกิดขึ้นในผิวตัวอย่างที่ความลึกไม่เกิน 10 nm ให้ข้อมูลออกมาเป็นภาพลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง
 2. *Backscatter Electron Detector (BED)* ถูกใช้เพื่อตรวจจับรูปแบบสัญญาณ *Backscattered Electron Image (BEI)* จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับหรือคืออิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ตกกระทบตัวอย่างแล้วถ่ายทอดพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนทุติยภูมิจึงส่งผลให้อิเล็กตรอนดังกล่าวมีพลังงานมากพอที่จะกระเจิงออกจากชิ้นตัวอย่างด้วยมุมที่มีค่ามากกว่า 90° โดยจะเกิดในผิวตัวอย่างที่ความลึกมากกว่า 10 nm ซึ่งเกิดขึ้นได้ดีกับธาตุที่มีค่าเลขอะตอมสูงแสดงถึงความแตกต่างของเลขอะตอมเฉลี่ยในแต่ละจุดบนตัวอย่าง
 3. *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)* ถูกใช้เพื่อตรวจจับสัญญาณ *X-Ray Image (XRI)* ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิในระดับชั้น *k, L, M* เป็นต้นไปได้รับพลังงานกระตุ้นสูงจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิจึงส่งผลให้อิเล็กตรอนดังกล่าวหลุดออกจากพันธะเคมีซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่อยู่ในพันธะเคมีในระดับชั้นพลังงานที่สูงถัดขึ้นไปคายพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจนมีพลังงานสะสมในตัวต่ำพอที่จะสามารถลงมาอยู่แทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปได้โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดังกล่าวจะมีช่วงความยาวคลื่นในย่านรังสี *X-Ray* และเป็นค่าที่มีความ

เฉพาะตัวสำหรับธาตุนั้นจึงสามารถใช้ระบุชนิดของธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบของตัวอย่างได้

กระบวนการทำงานของ SEM เกิดขึ้นภายในสภาวะ High vacuum โดยเริ่มต้นจากการจ่ายความต่างศักย์ระหว่าง Electron gun กับ Sample state เพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจาก Electron gun ให้เคลื่อนที่ผ่าน Electronmagnetic lens ทั้ง 3 เพื่อปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อนการเคลื่อนที่เข้าชนชิ้นตัวอย่างซึ่งถูกตั้งบน Sample state หลังจากการชนกันจะเกิดผลลัพท์ที่สามารถตรวจสอบได้โดย Detector ใน 3 ลักษณะดังที่ได้กล่าวในหัวข้อก่อนหน้า องค์ประกอบของ SEM และรูปแบบของสัญญาณที่ Detector สามารถตรวจสอบได้แสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 [16,17]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างและส่วนประกอบของ SEM



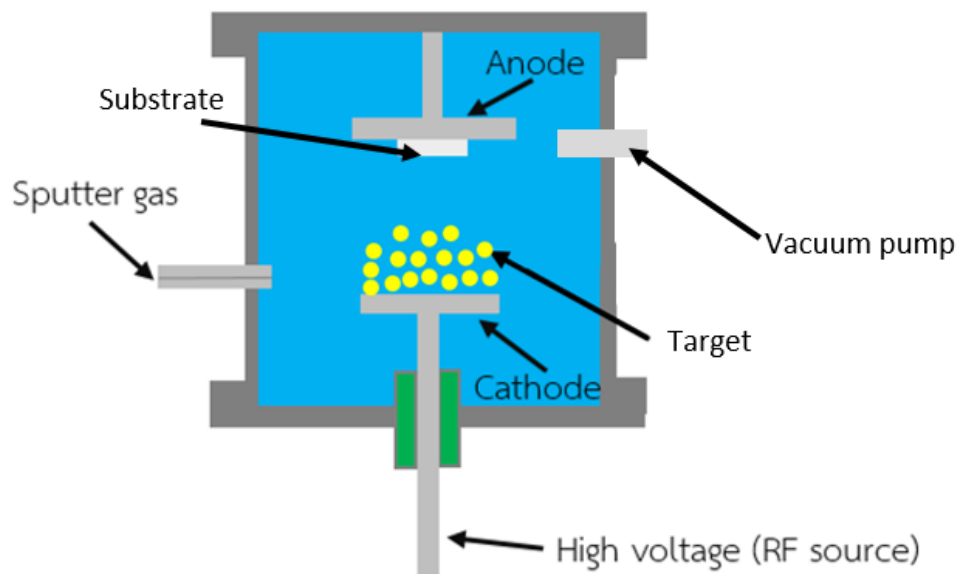
รูปที่ 2.5 ลักษณะของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการชนกันของอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับตัวอย่างที่ต้องการจะตรวจสอบ

2.2.2 หลักการเคลือบโลหะทองคำบนตัวอย่างโครงสร้างปิกฟีลล์ด้วยวิธี Sputtering การเคลือบทองคำที่ความหนาในระดับนาโนบนตัวอย่างปิกฟีลล์โดยเครื่อง Sputter coater ถูกเรียกว่าวิธี Sputtering ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญที่ต้องกระทำก่อนที่จะทำการตรวจสอบโครงสร้างดังกล่าวด้วย SEM อันเนื่องมาจากการตรวจสอบชิ้นตัวอย่างด้วยวิธีดังกล่าวตัวอย่างที่ต้องการจะตรวจสอบจำเป็นจะต้องมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า วิธี Sputtering เป็นหนึ่งในวิธี Physical Vapor Deposition (PVD) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีข้อดีหลายประการอันได้แก่ ต้นทุนในการดำเนินการไม่สูง กระบวนการมีความปลอดภัยและไม่มีความซับซ้อน โดยเครื่อง Sputter coater มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. High voltage Radio frequency-Source (RF-Source) คือแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ขนาด 10,000 eV ซึ่งถูกใช้เพื่อกระตุ้นให้เกิดอาร์กอน (Ar) ภายในระบบเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา
2. Substrate คือวัสดุที่ต้องการจะทำการเคลือบเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้สูงขึ้น วัสดุดังกล่าวถูกต่อเข้ากับขั้ว Anode ของ RF-Source
3. Target คือเป้าโลหะที่ถูกต่อเข้ากับขั้ว Cathode เป็นสารที่ต้องการจะให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพื่อเคลื่อนที่เข้าไปเคลือบบน Substrate
4. Vacuum pump คืออุปกรณ์ที่ถูกใช้เพื่อลดค่าความดันภายในระบบอยู่ในย่าน High vacuum

5. Sputter gas คืออุปกรณ์ที่ถูกใช้เพื่อจ่ายแก๊ส Ar เข้าสู่ระบบ Vacuum

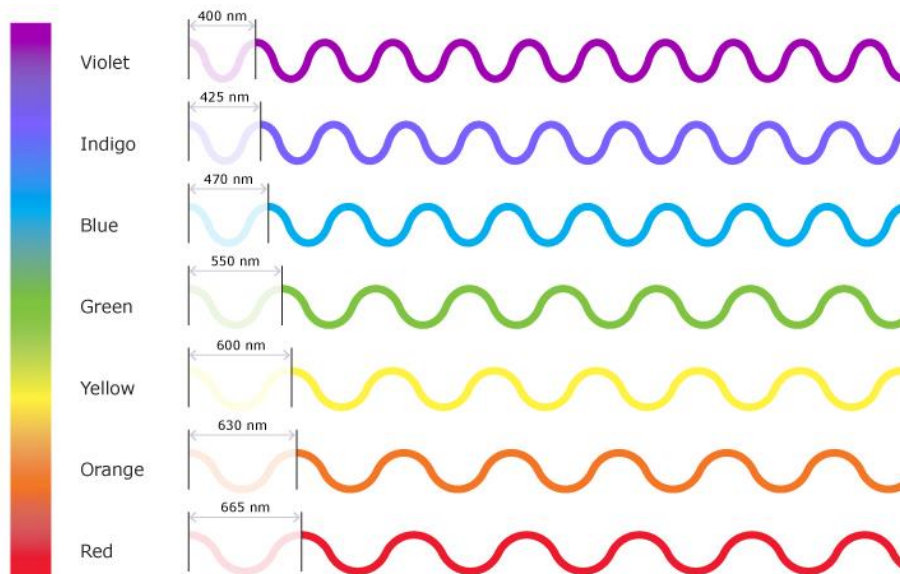
กระบวนการทำงานของเครื่อง Sputter coater เกิดขึ้นภายในบรรยากาศ Ar ที่ย่านความดัน High vacuum โดยเริ่มต้นจากการจ่ายความต่างศักย์ระหว่าง Target กับ Substrate เพื่อกระตุ้นให้แก๊ส Ar เกิดการแตกตัวเป็นไอออนและเคลื่อนที่เข้าชน Target ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุดังกล่าวเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมอิสระและเคลื่อนที่เข้าไปฝังตัวอยู่บนผิวหน้าของ Substrate ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ความหนา (Working distance) ของชั้นทองคำที่เคลือบบนตัวอย่างจะแปรผันตรงต่อเวลาในการดำเนินการ Sputtering และความหนาของชั้นทองคำที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจสอบด้วย SEM ดังนั้น หากเคลือบบางจนเกินไปจะส่งผลให้เกิดจุดสว่างจ้า (Charge up) บนภาพที่ได้จากการตรวจสอบแต่หากเคลือบหนาจนเกินไปจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียรายละเอียดของตัวอย่าง องค์ประกอบของเครื่อง Sputter coater แสดงดังรูปที่ 2.6 [18]



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของเครื่อง Sputter coater

2.3 สมบัติเชิงแสงของโครงสร้างสีของปีกผีเสื้อ

โครงสร้างสีของปีกผีเสื้อเป็นหนึ่งในสมบัติทางแสงที่มีความสำคัญต่อกระบวนการแยกแยะและจำแนกความแตกต่างของผีเสื้อสายพันธุ์ต่างๆออกจากกันโดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะให้ความสนใจกับโครงสร้างสีปีกผีเสื้อย่าน Visible light มีองค์ประกอบแสดงดังรูปที่ 2.7



รูป 2.7 แสงย่าน Visible light ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแสงขาวสามารถจำแนกออกได้ดังนี้ แสงสีม่วง (400 nm), แสงคราม (425 nm), แสงสีน้ำเงิน (470 nm), แสงสีเขียว (550 nm), แสงสีเหลือง (600 nm), แสงสีแสด (630 nm) และ แสงสีแดง (665 nm)

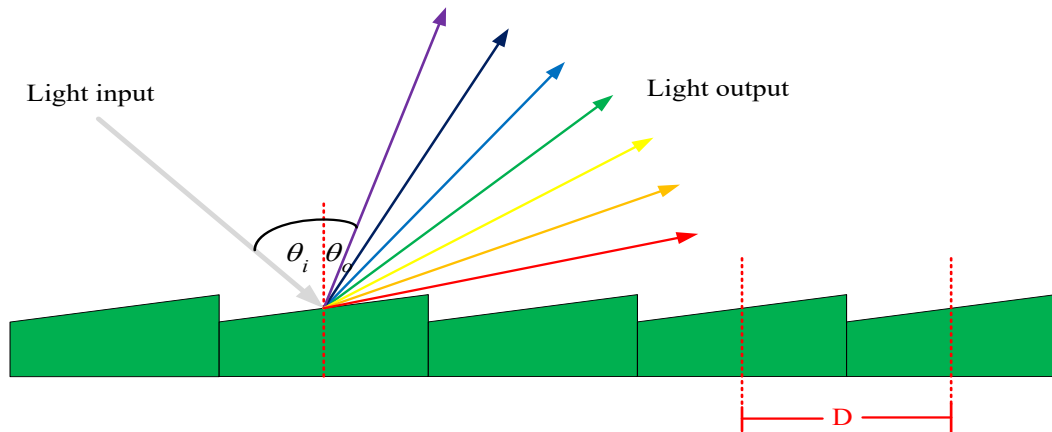
โครงสร้างสีของปีกผีเสื้อสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 นัยคือ โครงสร้างสีเชิงฟิสิกส์ และโครงสร้างสีเชิงเคมี

2.3.1 โครงสร้างสีเชิงฟิสิกส์ (Physical color structure)

โครงสร้างสีเชิงฟิสิกส์จะเป็นการพิจารณาคุณสมบัติการสะท้อนและความเป็น grating ของโครงสร้างปีกผีเสื้อซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางแสง โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ สมบัติการเป็น diffraction grating และสมบัติความเป็น Optical Pathlength Difference (OPD) ของ Thin-Film Interference

2.3.1.1 Diffraction grating

Diffraction grating เป็นสมบัติที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น periodic structure หรือโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูปแบบซ้ำกันโดยมีการวางตัวห่างกันเป็นระยะที่เท่ากันเสมอและมีระยะห่างกันน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ Diffraction grating ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการแยกแสงที่ความยาวคลื่นต่างกันให้แยกออกจากกันด้วยมุมสะท้อนที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.8



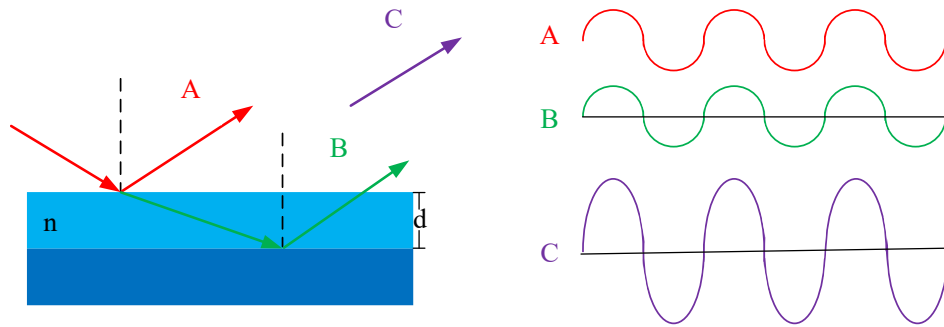
รูปที่ 2.8 การประยุกต์ใช้สมบัติ Diffraction grating ของโครงสร้างปีกผีเสื้อ

สมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างย่านความยาวคลื่นแสงกับมุมตกกระทบ มุมสะท้อนและระยะห่างของโครงสร้างปีกผีเสื้อ ดังสมการที่ (2.1)

$$D(\sin \theta_i - \sin \theta_o) = m\lambda \quad (2.1)$$

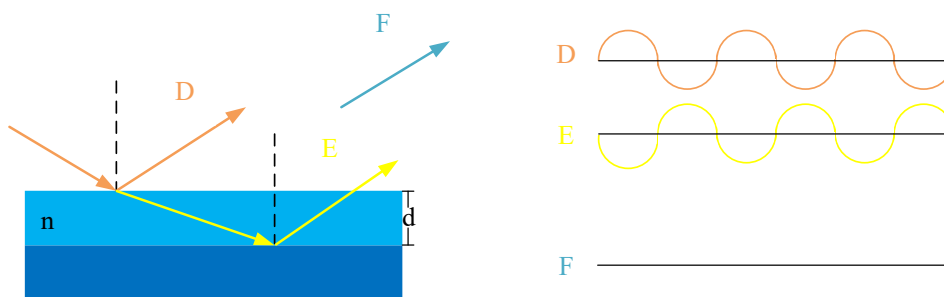
2.3.1.2 Optical Pathlength Difference

Optical Pathlength Difference (OPD) เป็นปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสง 2 ลำขึ้นไปที่เกิดการตกกระทบและสะท้อนจากผิวของ Thin-Film ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปโดยสามารถแบ่งปรากฏการณ์แทรกสอดดังกล่าวออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือการแทรกสอดแบบส่งเสริมซึ่งเกิดขึ้นเมื่อลำแสงทั้ง 2 ลำมีมุมเฟสที่ตรงกันจะส่งผลให้แอมพลิจูดของแสงที่สะท้อนออกจาก Thin-Film มีค่าสูงสุด และการแทรกสอดแบบหักล้างซึ่งเกิดขึ้นเมื่อลำแสงทั้ง 2 ลำมีมุมเฟสที่ต่างกัน 180° จะส่งผลให้แอมพลิจูดของแสงที่สะท้อนออกจาก Thin-Film มีค่าต่ำสุด [17] แสดงดังรูป 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 ลำแสงสะท้อน A และ B มีเฟสที่ตรงกันจะส่งผลให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมส่งผลให้เกิดลำแสง C ซึ่งมีแอมพลิจูดเป็น 2 เท่าของทั้งลำแสงสะท้อน A และ B ซึ่งอธิบายโดยสมการที่ (2.2)

$$2nd \cos \theta_o = m\lambda \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.10 แสงสะท้อน D และ E มีเฟสที่ตรงกันจะส่งผลให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างส่งผลให้ลำแสง F ที่เกิดขึ้นมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์ซึ่งอธิบายโดยสมการที่ (2.3)

$$2nd \cos \theta_o = \left[m - \frac{1}{2} \right] \lambda \quad (2.3)$$

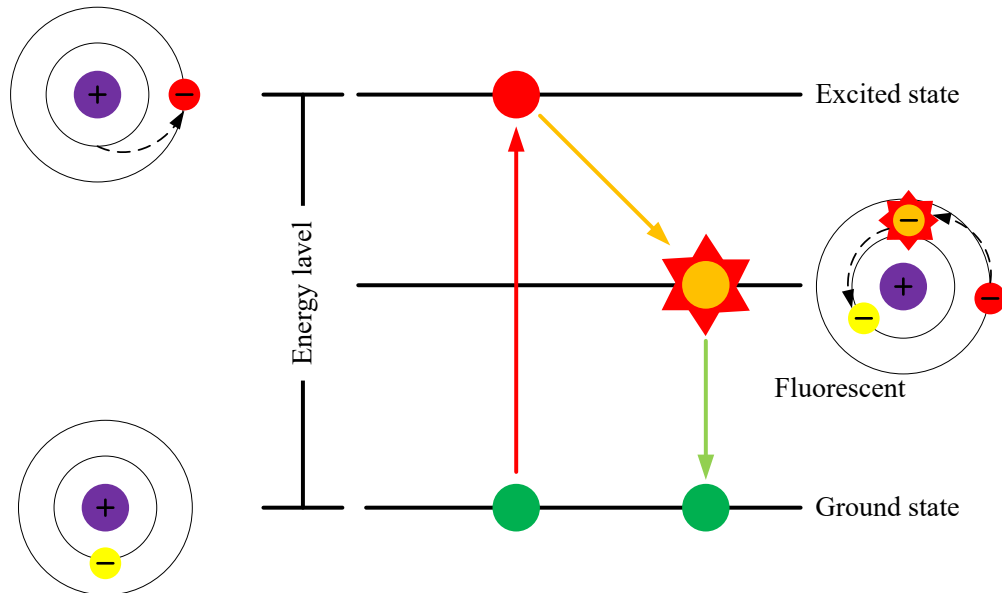
2.3.2 โครงสร้างสีเชิงเคมี (Chemical color structure)

โครงสร้างสีเชิงเคมีจะเป็นการพิจารณาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่ย่านความยาวคลื่นเฉพาะโดยกฎของ Beer - Lambert ซึ่งเกิดขึ้นกับ Pigment ภายในโครงสร้างปีกผีเสื้อ

2.3.2.1 Pigment ภายในโครงสร้างปีกผีเสื้อ

Pigment ภายในโครงสร้างของปีกผีเสื้อเป็นรงควัตถุซึ่งมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสง (Photon) ในย่านความยาวคลื่นเฉพาะ โดยอิเล็กตรอนซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน

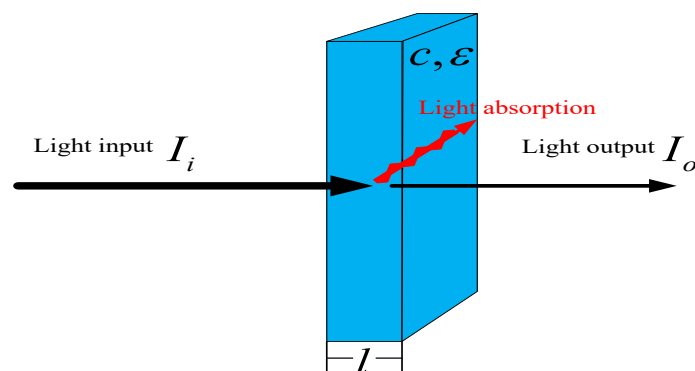
ของโครงสร้างโมเลกุลของ Pigment จะดูดกลืนพลังงานแสงเข้าไปและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ ซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนดังกล่าวสามารถเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานที่อาศัยอยู่จากระดับ Ground state ไปยังระดับ Excited state โดยปรากฏการณ์การดูดกลืนพลังงานแสงของ Pigment แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การดูดกลืนพลังงานแสงของอิเล็กตรอนเป็นการเพิ่มพลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนระดับพลังงานที่อาศัยอยู่ไปยังระดับพลังงานชั้นที่สูงขึ้น

2.3.2.2 กฎของ Beer - Lambert

กฎของ Beer - Lambert ถูกใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของวัสดุกับขนาดความหนา สัมประสิทธิ์การดูดกลืน และความเข้มข้นของสารซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสงที่ตกกระทบวัสดุจะถูกแยกออกเป็นแสงส่วนที่สามารถเกิดทางผ่านวัสดุและแสงส่วนที่ถูกวัสดุดูดกลืน

หลักการดูดกลืนของแสงแสดงดังสมการที่ (2.4)

$$A = -\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right) = \epsilon lc \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) สามารถถูกจัดรูปเพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสนามไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนกับค่าความเข้มแสง แสดงดังสมการที่ (2.5)

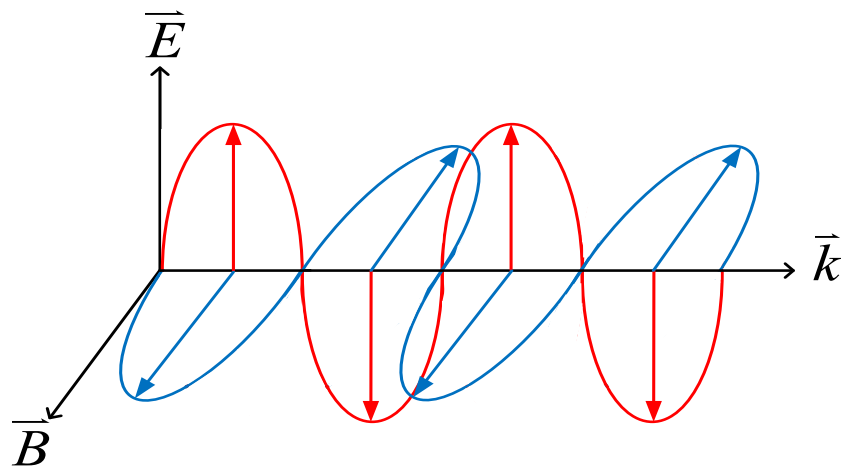
$$I(Z) \propto |\vec{E}_0|^2 e^{-2k\omega Z/c} = I_0 e^{-\alpha Z} \quad (2.5)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$\alpha = \frac{2k\omega}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.6)$$

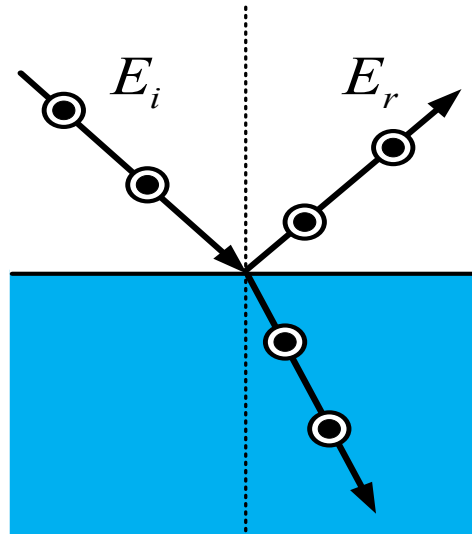
2.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นรูปแบบของคลื่นซึ่งไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ โดยมีต้นกำเนิดจากการเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศทางการสั่นตั้งฉากต่อกันและมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทั้งสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก [17] แสดงดังรูปที่ 2.13

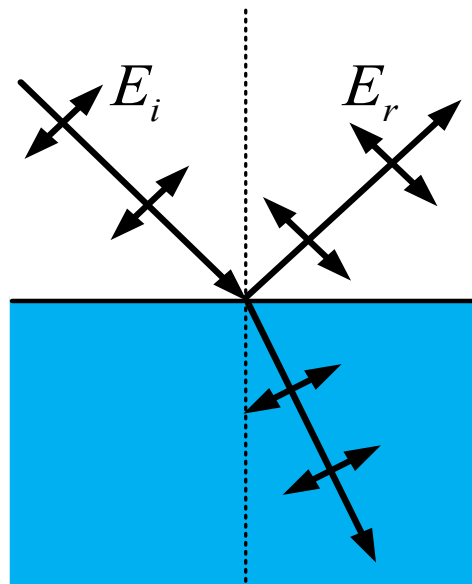


รูปที่ 2.13 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตาม k-vector

โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การเคลื่อนที่แบบ Transverse electric (TE) mode และ การเคลื่อนที่แบบ Transverse magnetic (TM) mode แสดงดังรูปที่ 2.14



(ก) การเคลื่อนที่แบบ Transverse electric (TE) mode



(ข) การเคลื่อนที่แบบ Transverse magnetic (TM) mode

รูปที่ 2.14 รูปแบบการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.4.1 Maxwell's equation

คุณสมบัติการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทั้ง 4 ของ Maxwell ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการศึกษาปรากฏการณ์ทางกลศาสตร์แม่เหล็กไฟฟ้าโดยสมการดังกล่าวประกอบไปด้วยสมการของ Gauss สำหรับสนามไฟฟ้า สมการของ Gauss สำหรับสนามแม่เหล็ก สมการของ Faraday และสมการของ Ampere สมการ

เหล่านี้สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 รูปแบบหลักคือสมการในรูปแบบ Integral form และสมการในรูปแบบ Differential form ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1.1 สมการของ Gauss สำหรับสนามไฟฟ้า

สมการของ Gauss สำหรับสนามไฟฟ้า คือ สมการที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าขนาดของสนามไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดซึ่งมีการแผ่สนามไฟฟ้าออกมาในลักษณะที่สมมาตรรอบจุดกำเนิด อันได้แก่การแผ่ของสนามไฟฟ้าในลักษณะผิวทรงกลม ผิวด้านประกอบของทรงกระบอก เป็นต้น โดยสมการในรูปแบบ Integral form และสมการในรูปแบบ Differential form แสดงดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \iiint \rho dV \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

2.4.1.2 สมการของ Gauss สำหรับสนามแม่เหล็ก

สมการของ Gauss สำหรับสนามแม่เหล็ก คือ สมการที่ถูกใช้เพื่ออธิบายคุณสมบัติพื้นฐานของแม่เหล็กว่าเป็นวัตถุที่มีองค์ประกอบเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้ซึ่งขั้วทั้ง 2 นี้ไม่สามารถถูกแยกออกจากกันได้ด้วยวิธีใดๆ ตัวอย่างเช่นหากทำการผ่าแท่งแม่เหล็กถาวรที่บริเวณกึ่งกลางของแท่งแม่เหล็กระหว่างขั้วทั้ง 2 ออกเป็น 2 ชิ้นจะส่งผลให้ชิ้นส่วนทั้ง 2 ซึ่งแยกออกจากกันแล้วเกิดการแบ่งขั้วออกเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้เช่นเดิม เปรียบได้กับการเกิดแท่งแม่เหล็กซึ่งมีขนาดเล็กลงขึ้นอีก 2 แท่งโดยสมการในรูปแบบ Integral form และสมการในรูปแบบ Differential form แสดงดังสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

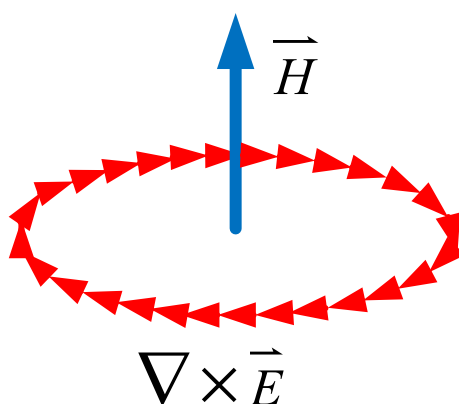
$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.10)$$

2.4.1.3 สมการของ Faraday

สมการของ Faraday คือ สมการซึ่งถูกใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสนามไฟฟ้าโดยสมการดังกล่าวมีใจความสำคัญคือหากก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กต่อหน่วยเวลาซึ่งกระทำต่อ

ตัวนำจะก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเนื้อวัสดุตัวนำซึ่งจะก่อให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำไหลในทิศทางที่ก่อให้เกิด ฟลักซ์แม่เหล็กในทิศสวนทางกับฟลักซ์แม่เหล็กที่เข้ามากระทำในตอนแรกเพื่อหักล้างหรือลดทอนผลของฟลักซ์ดังกล่าวหรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อหน่วยเวลาจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งมีการหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กดังกล่าวตามทศกฏมือซ้าย แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายโดยสมการในรูปแบบ Integral form และสมการในรูปแบบ Differential form แสดงดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กและทิศทางการเกิดสนามไฟฟ้าหมุนวนรอบสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นไปตามกฎมือซ้าย

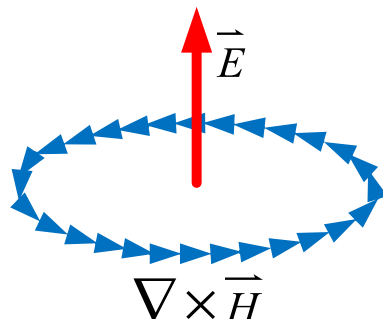
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\mu \frac{d}{dt} \iint \vec{H} \cdot d\vec{S} \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.12)$$

2.4.1.4 สมการของ Ampere

สมการของ Ampere คือสมการซึ่งถูกใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าไปเป็นสนามแม่เหล็กหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นรูปแบบการเกิดขึ้นแบบผกผันกับปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งถูกอธิบายไว้ข้างต้นโดยสมการของ Faraday โดยมีใจความสำคัญคือเมื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าต่อหน่วยเวลาและหรือทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นตัวนำจะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้ารอบตัวนำหรือรอบทิศของการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าโดยมีทิศทางตามกฎมือ

ขวาโดยแสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายโดยสมการในรูปแบบ Integral form และสมการในรูปแบบ Differential form แสดงดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) ตามลำดับตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและทิศทางที่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนวนรอบสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามกฎมือขวา

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{d}{dt} \iint \vec{J} \cdot d\vec{S} + \epsilon \frac{d}{dt} \iint \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (2.13)$$

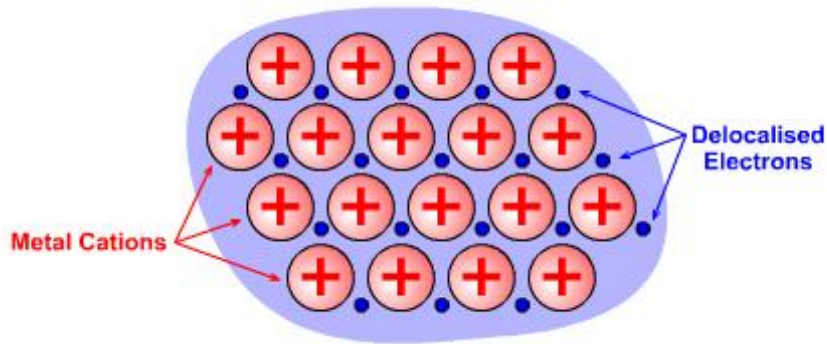
$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.14)$$

เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นสมการในรูปแบบ Differential form จึงถูกลดรูปเป็นดังสมการที่ (2.15)

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.15)$$

2.5 Drude Model

Drude Model ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1900 โดย Paul Prude โดยการประยุกต์ใช้รูปแบบของพลังงานจลน์ในการอธิบายพฤติกรรมการสั่นอย่างต่อเนื่องของอิเล็กตรอนใน Conduction band รอบโปรตอนซึ่งยึดเหนี่ยวให้อิเล็กตรอนอยู่บนผิวโลหะในลักษณะคล้ายกลุ่มหมอกปกคลุมบนผิวโลหะและมีการชนกันอย่างต่อเนื่องของอิเล็กตรอน [19] แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 องค์ประกอบของ Drude Model

ผลรวมของแรงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนของ Drude Model ถูกแสดงดังสมการที่ (2.16)

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_q + \vec{F}_{\text{electroncollisions}} \quad (2.16)$$

แรงคูลอมป์และแรงจากการชนกันของอิเล็กตรอนแสดงดังสมการที่ (2.17) และ (2.18) ตามลำดับ

$$\vec{F}_q = q\vec{E}(t) \quad (2.17)$$

$$\vec{F}_{\text{electroncollisions}} = -\frac{m^*}{\tau} \frac{d\vec{x}(t)}{dt} \quad (2.18)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.17) และ (2.18) ลงในสมการที่ (2.16) ได้สมการที่ (2.19)

$$\sum \vec{F} = q\vec{E}(t) - \frac{m^*}{\tau} \frac{d\vec{x}(t)}{dt} \quad (2.19)$$

ผลรวมของแรงทั้งสองซึ่งกระทำต่ออิเล็กตรอนส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ความเร็วในการเคลื่อนที่อันส่งผลให้เกิดความเร่ง แสดงดังสมการที่ (2.20)

$$\sum \vec{F} = m^* \vec{a} \quad (2.20)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.19) ในสมการที่ (2.20) ได้สมการที่ (2.21)

$$q\vec{E}(t) - \frac{m^*}{\tau} \frac{d\vec{x}(t)}{dt} = m^* \frac{d^2\vec{x}(t)}{dt^2} \quad (2.21)$$

ส่วนกลับของค่า Mean free time ถูกแสดงดังสมการที่ (2.22)

$$\tau = \frac{1}{\gamma} \quad (2.22)$$

สมการที่ (2.22) ถูกแทนค่าลงในสมการที่ (2.21) ได้สมการที่ (2.23)

$$q\vec{E}(t) - m^*\gamma \frac{d\vec{x}(t)}{dt} = m^* \frac{d^2\vec{x}(t)}{dt^2} \quad (2.23)$$

ค่าความหนาแน่นกระแสเชิงพื้นที่ถูกแสดงดังสมการที่ (2.24)

$$\vec{J}(t) = -Ne\vec{v}(t) \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.23) เมื่อคูณค่า $-Ne$ ทั้งสมการและจัดรูปจะได้สมการที่ (2.25)

$$\frac{d\vec{J}(t)}{dt} + \gamma\vec{J}(t) = \left(\frac{Ne^2}{m^*}\right)\vec{E}(t) \quad (2.25)$$

ขนาดของสนามไฟฟ้าและขนาดของค่าความหนาแน่นกระแสเชิงพื้นที่ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาถูกแสดงดังสมการที่ (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.26)$$

$$\vec{J}(t) = \vec{J}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.27)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.26) และ (2.27) ลงในสมการที่ (2.25) ได้สมการที่ (2.28)

$$\frac{d\vec{J}_0 e^{-i\omega t}}{dt} + \gamma \vec{J}_0 e^{-i\omega t} = \left(\frac{Ne^2}{m^*} \right) \vec{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.28)$$

การแก้สมการที่ (2.28) และจัดรูปได้สมการที่ (2.29)

$$\vec{J}_0 = \left(\frac{Ne^2}{m^*(-i\omega + \gamma)} \right) \vec{E}_0 \quad (2.29)$$

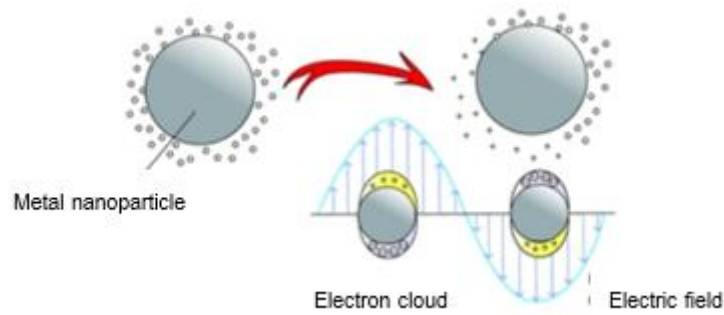
เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ (2.29) ได้สมการที่ (2.30)

$$\vec{J}_0 = \left(\frac{Ne^2}{m^*\gamma(1 - i\omega/\gamma)} \right) \vec{E}_0 \quad (2.30)$$

สมการที่ (2.30) ถูกเรียกว่าสมการความหนาแน่นกระแสเชิงพื้นที่ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่า Dynamic conductivity และสามารถถูกแบ่งการพิจารณาเงื่อนไขของค่า (ω/γ) ที่ส่งผลต่อลักษณะการสั่นของอิเล็กตรอนได้เป็นสองลักษณะดังนี้เมื่อค่า $(\omega/\gamma) \gg 1$ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการสั่นด้วยเฟสที่ต่างจากเฟสของสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นเป็นมุม 90° และเมื่อค่า $(\omega/\gamma) \ll 1$ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการสั่นด้วยเฟสที่ตรงกับเฟสของสนามไฟฟ้าที่มากกระตุ้น

2.6 ปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)

ปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) คือปรากฏการณ์ซึ่งเป็นการกระตุ้นการสั่นของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนนี้มีลักษณะการสั่นที่เป็นคลื่นซึ่งมีค่าแอมพลิจูดคงที่หลังจากแสงในความถี่ย่านที่ดวงตามนุษย์สามารถมองเห็นและมีความถี่เท่ากันความถี่ธรรมชาติของการสั่นของอิเล็กตรอนตกกระทบบนพื้นผิวโลหะจะส่งผลให้สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นองค์ประกอบของแสงถูกดูดกลืน [19] ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งปรากฏการดังกล่าวถูกอธิบายโดย Drude Model



รูปที่ 2.18 แอมพลิจูดการสั่นของอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์ LSPR

แอมพลิจูดการสั่นของอิเล็กตรอนแสดงดังสมการที่ (2.31)

$$\vec{x}(t) = \vec{x}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.31)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.26) และ (2.31) ในสมการที่ (2.21) แล้วทำการแก้สมการได้สมการที่ (2.32)

$$q\vec{E}_0 e^{-i\omega t} = m^* \left[-\omega^2 \vec{x}_0 - \frac{i\omega \vec{x}_0}{\tau} \right] e^{-i\omega t} \quad (2.32)$$

สมการที่ (2.32) ถูกจัดให้อยู่ในรูปของแอมพลิจูดการสั่นของอิเล็กตรอน แสดงดังสมการที่ (2.33)

$$\vec{x}_0 = \frac{q\vec{E}_0}{m^* \left[-\omega^2 - \frac{i\omega}{\tau} \right]} \quad (2.33)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการการเกิดโพลาไรซ์ของอะตอม (Polarization of atoms) แสดงดังสมการที่ (2.34) และ (2.35) ตามลำดับ

$$\vec{P} = -Nq\vec{x}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.34)$$

$$\vec{P} = (\epsilon - \epsilon_0)\vec{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.35)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.34) เท่ากับ (2.35) ได้สมการที่ (2.36)

$$-Nq\vec{x}_0 e^{-i\omega t} = (\epsilon - \epsilon_0)\vec{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.36)$$

สมการที่ (2.36) ถูกจัดให้อยู่ในรูปของ dielectric constant แสดงดังสมการที่ (2.37)

$$\epsilon = \epsilon_0 - \frac{Nq^2}{m^* \omega(\omega + \frac{i}{\tau})} \quad (2.37)$$

จากเงื่อนไข $\omega \gg \tau$ ส่งผลให้ $\frac{i}{\tau} \approx 0$ เมื่อแทนค่าเงื่อนไขดังกล่าวในสมการที่ (2.37) ได้สมการที่ (2.38) ซึ่งถูกจัดรูปได้สมการที่ (2.39)

$$\epsilon = \epsilon_0 - \frac{Nq^2}{m^* \omega^2} \quad (2.38)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \left[1 - \frac{Nq^2}{m^* \epsilon_0 \omega^2} \right] \quad (2.39)$$

จากสมการความถี่ธรรมชาติการสั่นของอิเล็กตรอน แสดงดังสมการที่ (2.40)

$$\omega_p^2 = \frac{Nq^2}{m^* \epsilon_0} \quad (2.40)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.40) ในสมการที่ (2.39) ได้สมการที่ (2.41)

$$\epsilon = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \quad (2.41)$$

จากสมการค่า complex dielectric constant ของโลหะ แสดงดังสมการที่ (2.42)

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon + i\epsilon_i \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.41) ส่งผลให้สมการที่ (2.42) มีการเปลี่ยนรูปเป็นสมการที่ (2.43)

$$\vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (2.43)$$

จากสมการ displacement field แสดงดังสมการที่ (2.44)

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \vec{P} \quad (2.44)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.41) ในสมการที่ (2.44) ได้สมการที่ (2.45)

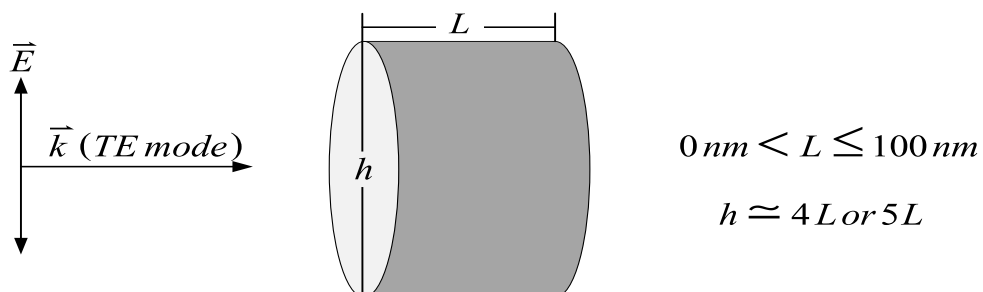
$$\vec{D} = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \vec{E} + \vec{P} \quad (2.45)$$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไข $\omega = \omega_p$ ในสมการที่ (2.41) ส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุดหรือเกิดปรากฏการณ์ LSPR

ปัจจัยซึ่งส่งผลต่อขนาดแอมพลิจูดการ สั่นของอิเล็กตรอนหรือการเกิดปรากฏการณ์ LSPR มีดังนี้

2.6.1 อัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาของผิวโลหะ (Aspect ratio)

ปรากฏการณ์ LSPR สามารถเกิดขึ้นได้กับผิวของโลหะภายใต้เงื่อนไขดังนี้โครงสร้างโลหะมีความหนาในช่วง 1 nm - 100 nm อัตราส่วนของความกว้างของผิวโลหะคิดเป็น 4 - 5 เท่าของความหนาของผิวโลหะแสดงดังรูปที่ 2.19



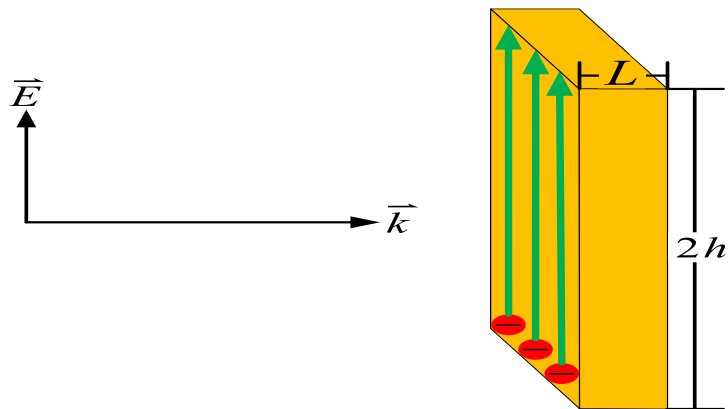
รูปที่ 2.19 ปัจจัยเชิงมิติซึ่งมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ SPR บนผิวโลหะ

โดยที่ L คือ ความกว้างของผิวโลหะ (nm)

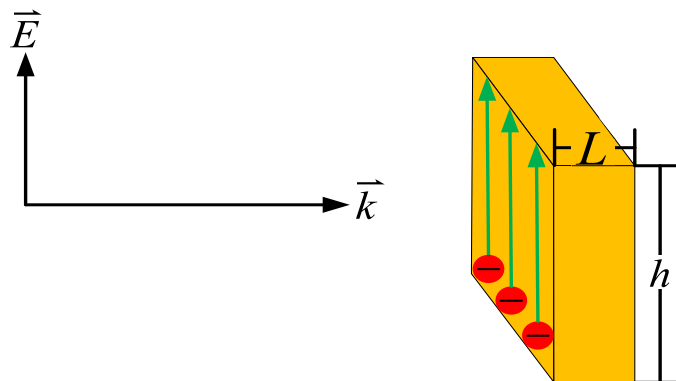
h คือ ความหนาของผิวโลหะ (nm)

2.6.2 ชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบผิวโลหะ

ปรากฏการณ์ LSPR สามารถเกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีทิศการสั่นของสนามไฟฟ้าบนพื้นผิวโลหะเป็นระยะทางยาว ซึ่งจะส่งผลให้คลื่นการสั่นของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวโลหะมีค่าแอมพลิจูดการสั่นเริ่มต้นที่สูงแม้ยังไม่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด *TM mode* ที่ตกกระทบผิวโลหะสามารถกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์ LSPR บนผิวโลหะได้อย่างชัดเจนมากกว่าการกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด *TE mode* [20] โดยแสดงดังรูปที่ 2.20 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด *TM mode*

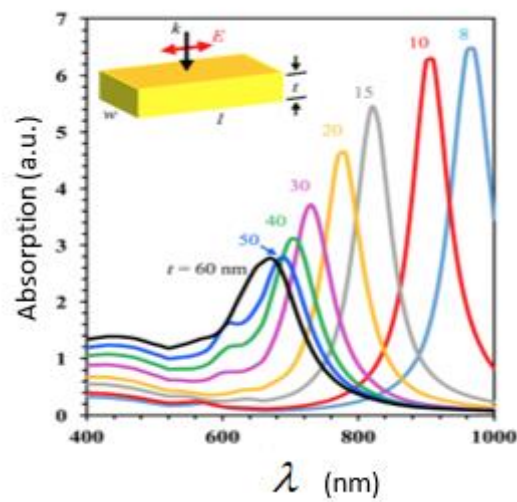


(ข) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด *TE mode*

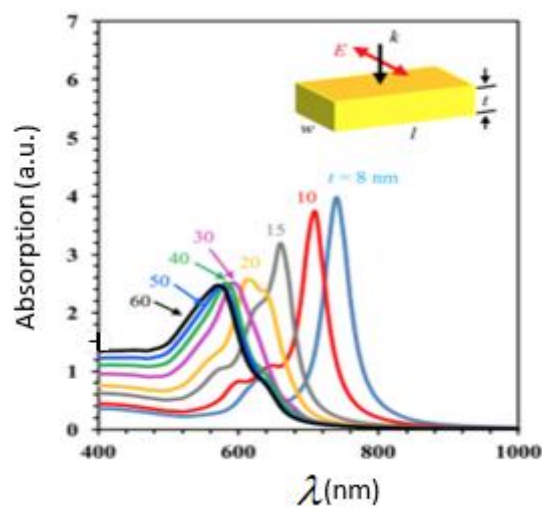
รูปที่ 2.20 การเกิดปรากฏการณ์ LSPR บนผิวโลหะ Au ซึ่งเป็นผลมาจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.6.3 ความหนาของผิววัสดุโลหะ

จากปัจจัยในข้อที่ 2.6.1 , 2.6.2 และความหนาของผิวโลหะ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของการเกิดปรากฏการณ์ LSPR ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด TM mode และ TE mode ที่ความหนาต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.21 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของผิวโลหะกับค่าแอมพลิจูดที่การสั่นของอิเล็กตรอนมีลักษณะแปรผกผันต่อกันและในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด TM mode ค่าแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นสูงกว่าแอมพลิจูดที่เกิดจากทุกค่าความหนาในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด TE mode [21]



(ก) ผลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด TM mode

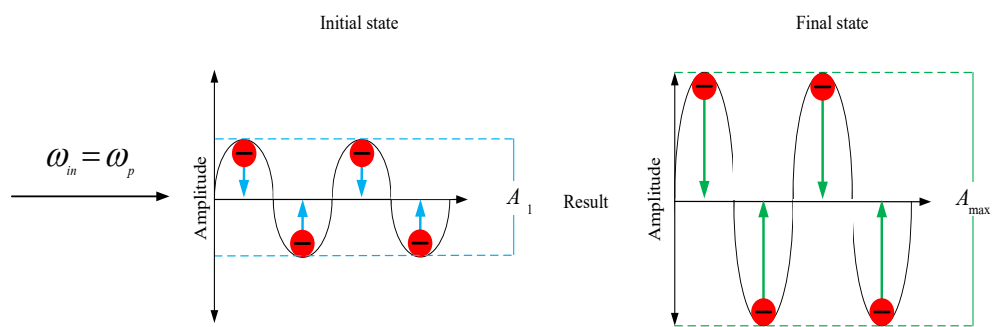


(ข) ผลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิด TE mode

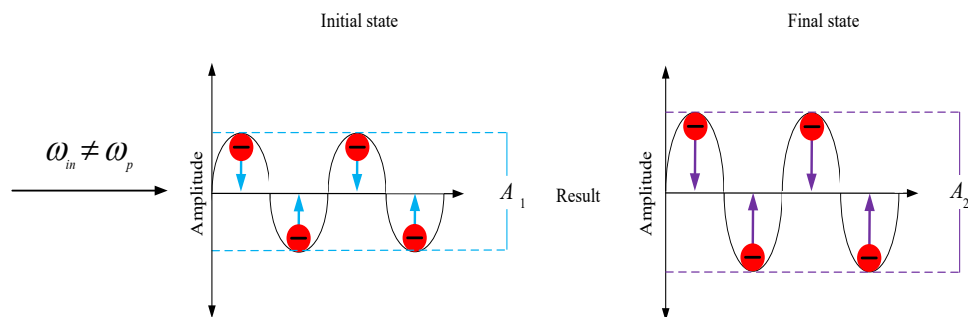
รูปที่ 2.21 การเกิดปรากฏการณ์ LSPR บนผิวโลหะที่มีความหนาต่างๆ

2.6.4 ย่านความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระตุ้นอิเล็กตรอน

จากทฤษฎีพื้นฐานเรื่องการแทรกสอดกันของคลื่น 2 ขบวนซึ่งอยู่ภายใต้ข้อกำหนดว่าคลื่นดังกล่าวมีแอมพลิจูดการสั่นที่เท่ากัน มีเฟสการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ตรงกันและมีการเดินทางเข้าหากันหากคลื่นทั้ง 2 ขบวนมีค่าความถี่ในการสั่นเท่ากันและมีค่าเท่ากับความเร็วธรรมชาติของการสั่นจะส่งผลให้คลื่นทั้ง 2 ขบวนเกิดการแทรกสอดส่งเสริมกันจนเกิดค่าแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดแต่หากค่าความถี่ดังกล่าวมีค่าที่ไม่เท่ากันจะส่งผลให้เกิดการแทรกสอดมีค่าแอมพลิจูดที่ลดลงมาแสดงดังรูป 2.22 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ความถี่กระตุ้นเท่ากับความเร็วธรรมชาติของการสั่นของอิเล็กตรอน



(ข) ความถี่กระตุ้นไม่เท่ากับความเร็วธรรมชาติของการสั่นของอิเล็กตรอน

รูปที่ 2.22 การกระตุ้นอิเล็กตรอนบนผิวโลหะด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่เฉพาะ

2.6.4.1 ความถี่ธรรมชาติของการสั่นของอิเล็กตรอนบนผิวโลหะ

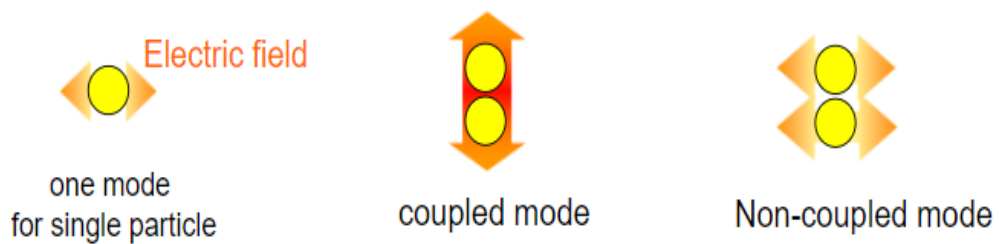
ความถี่ธรรมชาติคือความถี่ของการสั่นของวัตถุซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะโดยหากวัตถุที่กำลังสั่นได้รับการกระตุ้นจากภายนอกด้วยค่าความถี่ที่เท่ากับความเร็วธรรมชาติของการสั่นในตอนต้นจะส่งผลให้การสั่นดังกล่าวเกิดการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดจากค่าเริ่มต้นไปเป็นค่าสูงสุดโดยปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่าปรากฏการณ์กำทอน (Resonance) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกรณี อาทิเช่น กำทอนทางไฟฟ้าของวงจร AC RLC กำ

ทอนของคลื่นเสียงชนิด Helmholtz เป็นต้นและปรากฏการณ์ LSPR ก็จัดเป็นอีกกรณีที่เกิดขึ้นจากการถูกระตุ้นด้วยความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความเหมาะสมโดยแสดงดังสมการที่ (2.46)

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (2.46)$$

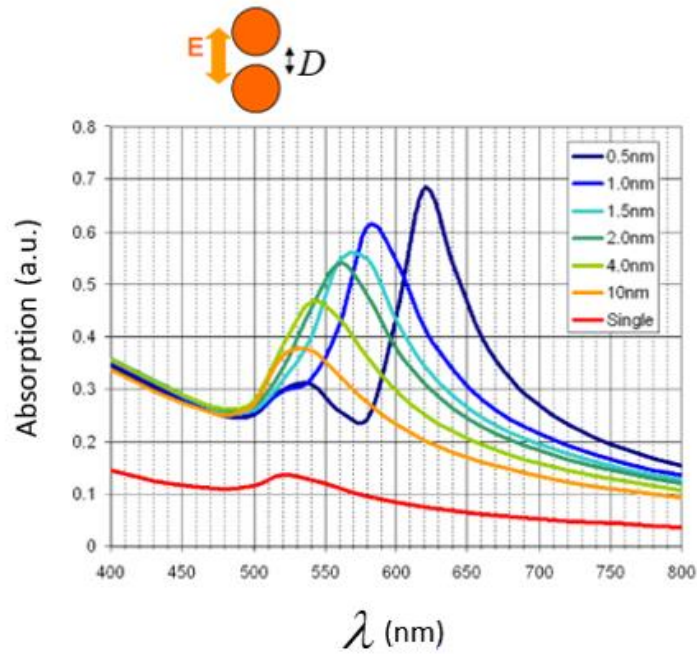
2.6.5 ระยะห่างระหว่างโครงสร้างโลหะซึ่งเป็นองค์ประกอบของผิวโลหะ

การเกิดปรากฏการณ์ LSPR บนผิวโลหะ Au เกิดขึ้นได้โดยมีแอมพลิจูดสูงสุดเมื่อการสั่นของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศทางที่ขนานกับการเรียงตัวของ Periodic structure (Coupled mode) ด้วยเหตุผลที่ว่า การสั่นในทิศทางดังกล่าวจะกระตุ้นการสั่นของคลื่นอิเล็กตรอนบนผิวของ Periodic structure ทั้ง 2 และคลื่นดังกล่าวจะเกิดการแทรกสอดส่งเสริมกัน แสดงดังรูปที่ 2.23

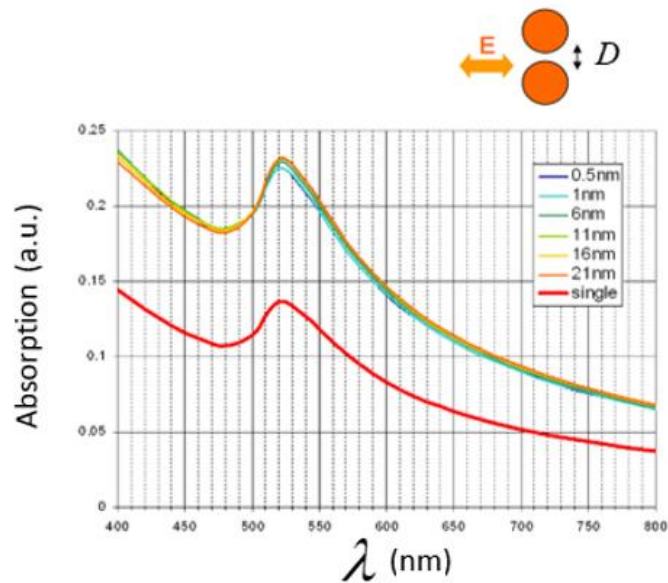


รูปที่ 2.23 ทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าในการกระตุ้นคลื่นอิเล็กตรอน

ตัวอย่างเปรียบเทียบการเกิด Coupled mode และ Non - coupled mode ที่ระยะห่างต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ การเปรียบเทียบนี้ทำให้ทราบว่าระยะห่างของ Periodic structure แปรผกผันกับค่าแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นและที่ทุกระยะห่างของ Periodic structure ใน Coupled mode แสดงแอมพลิจูดสูงกว่าทุกค่าใน Non - coupled mode [22]



(ก) Coupled mode



(ข) Non - coupled mode

รูปที่ 2.24 การเกิดปรากฏการณ์ LSPR ที่ระยะห่างต่างๆ

2.6.6 ปรากฏการณ์ Lightning-Rod Effect ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโลหะ

ปรากฏการณ์ Lightning-Rod Effect หรือคือการศึกษาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวของโลหะซึ่งถูกกระตุ้นด้วยแสงโดยมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงเรขาคณิต ค่าไดอิเล็กตริกของโลหะและสภาพแวดล้อมซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงที่ใช้กระตุ้นซึ่ง

สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.46) และสมการดังกล่าวถูกปรับให้สามารถใช้หาค่าอัตราส่วนขนาดสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้ดังสมการที่ (2.47)

$$\vec{E}_{tip} = \frac{\epsilon_0(\lambda)}{\epsilon_i(\lambda) + \{\epsilon_n(\lambda) - \epsilon_i(\lambda)\}} \vec{E}_0 \quad (2.46)$$

$$\eta \equiv \frac{|\vec{E}_{tip}|^2}{|\vec{E}_0|^2} = \left| \frac{\epsilon_0(\lambda)}{\epsilon_i(\lambda) + \{\epsilon_n(\lambda) - \epsilon_i(\lambda)\}} \right|^2 \quad (2.47)$$

2.7 Finite-Difference Time-Domain

Finite-Difference Time-Domain (FDTD) คือ หลักการทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาปรากฏการณ์ทางกลศาสตร์แม่เหล็กไฟฟ้าด้วย Numerical analysis ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นโดย Kane S. Yee ในปี 1966 FDTD แบบ Central difference ถูกใช้สำหรับการหาคำตอบจากสมการ Maxwell ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและเวลา หลักการ FDTD คือการแบ่งแบบจำลองของระบบปริภูมิ 3 มิติ ออกเป็น Cell ย่อย แต่ละ Cell ถูกเรียกว่า Yee cell ซึ่งจะบันทึกค่าเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากอันตรกิริยาแบบจำลอง

2.7.1 Central finite difference

สมการ Central finite difference เป็นสมการอนุพันธ์บางส่วนเชิงเส้นอันดับหนึ่งซึ่งถูกพัฒนามาจาก Taylor series แสดงดังสมการที่ (2.48)

$$f(x + \Delta x/2) = f(x) \pm \frac{\partial f(x)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \frac{1}{1!} + \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^2 \frac{1}{2!} \pm \frac{\partial^3 f(x)}{\partial x^3} \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^3 \frac{1}{3!} + \dots \quad (2.48)$$

ค่า Δx ในสมการที่ (2.48) ถูกพิจารณาว่ามีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการนี้จึงสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.49)

$$\frac{f(x + \Delta x/2) - f(x - \Delta x/2)}{\Delta x} = \frac{\partial f(x)}{\partial x} + (\Delta x)^2 \frac{\partial^3 f(x)}{\partial x^3} \frac{1}{24} + \dots \quad (2.49)$$

สมการที่ (2.49) ถูกลดรูปพจน์อนันต์กลายเป็นสมการที่ (2.50)

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} \approx \frac{f(x+\Delta x/2) - f(x-\Delta x/2)}{\Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (2.50)$$

รูปย่อของพจน์อนันต์ถูกตัดทิ้งสำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตั้งสมการที่ (2.51)

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} \approx \frac{f(x+\Delta x/2) - f(x-\Delta x/2)}{\Delta x} \quad (2.51)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลาแสดงตั้งสมการที่ (2.52)

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial x} = -\eta \left(\frac{\partial f(x,t)}{\partial t} \right) \quad (2.52)$$

สมการที่ (2.51) ถูกพิจารณาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลาในสมการที่ (2.52) ได้สมการที่ (2.53)

$$\frac{f(x+\Delta x/2,t) - f(x-\Delta x/2,t)}{\Delta x} = -\eta \left(\frac{f(x,t+\Delta t/2) - f(x,t-\Delta t/2)}{\Delta t} \right) \quad (2.53)$$

สมการที่ (2.53) ถูกแทนค่าในสมการที่ (2.15) ได้สมการที่ (2.54) ซึ่งถูกใช้เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติของการสั่นของอิเล็กตรอนบนผิวโลหะกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_o \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (2.54)$$

สมการการเกิด Polarization ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังนั้นสมการที่ (2.54) จึงถูกพิจารณาตัดพจน์ดังกล่าวออก แสดงตั้งสมการที่ (2.55)

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_o \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.55)$$

การ Curl ของสนามแม่เหล็กถูกจัดให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยขึ้นกับตำแหน่งแสดงดังสมการที่ (2.56)

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial x} = \epsilon_o \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.56)$$

การเปรียบเทียบสมการที่ (2.52) กับสมการที่ (2.56) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.57) ถึงสมการที่ (2.59)

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial \vec{H}}{\partial x} \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.58)$$

$$-\eta = \epsilon_o \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \quad (2.59)$$

สมการที่ (2.57) ถึงสมการที่ (2.59) ถูกแทนค่าลงในสมการที่ (2.53) ได้สมการที่ (2.60)

$$\frac{\vec{H}(x+\Delta x/2,t) - \vec{H}(x-\Delta x/2,t)}{\Delta x} = \epsilon_o \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \left(\frac{\vec{E}(x,t-\Delta t/2) - \vec{E}(x,t+\Delta t/2)}{\Delta t} \right) \quad (2.60)$$

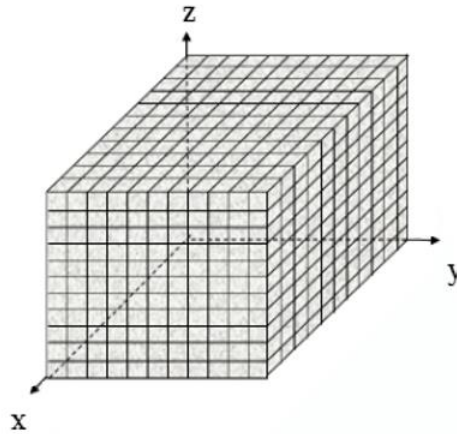
สมการที่ (2.60) ถูกเขียนแทนให้ตัวแปรอยู่ในรูปฟังก์ชันของตำแหน่งและเวลาแสดงดังสมการที่ (2.61)

$$\frac{\vec{H}_{x+\Delta x/2}^{t_i} - \vec{H}_{x-\Delta x/2}^{t_i}}{\Delta x} = \epsilon_o \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right] \left(\frac{\vec{E}_x^{t_f} - \vec{E}_x^{t_i}}{\Delta t} \right) \quad (2.61)$$

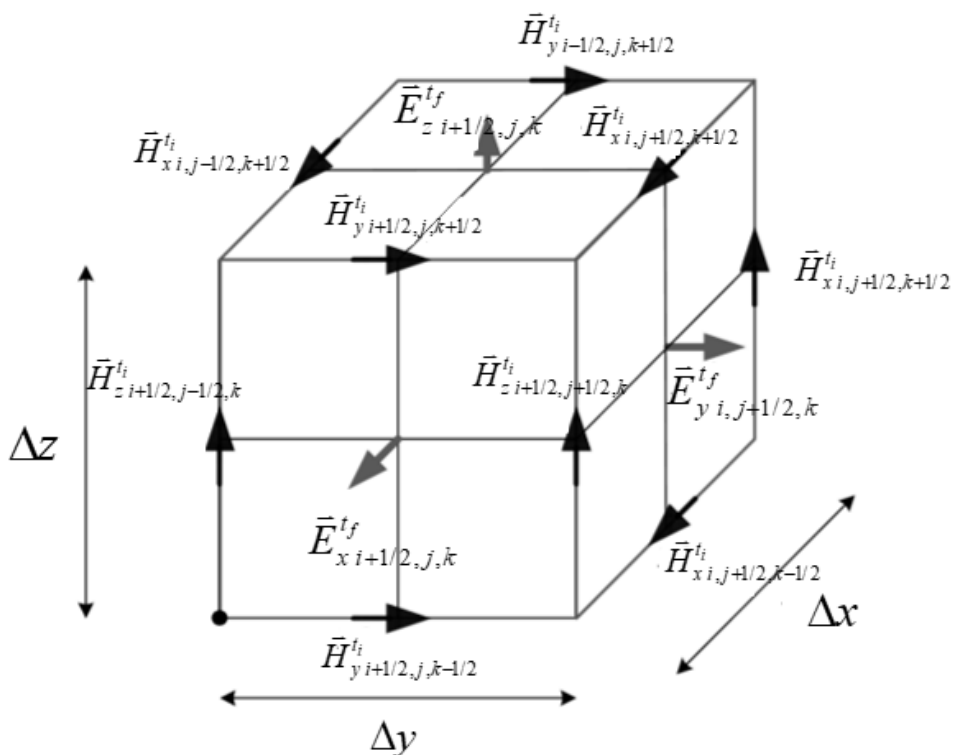
2.7.2 การแบ่งปริภูมีย่อยและ Yee Cell

ปริภูมิ 3 มิติของการจำลองการเกิดปรากฏการณ์ทางกลศาสตร์แม่เหล็กไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็น Cell ย่อยมีจำนวนเป็นอนันต์เพื่อให้ระบบสามารถคำนวณผลการเกิดปรากฏการณ์ได้ได้อย่างถูกต้องในทุกตำแหน่งของปริภูมิโดยแต่ละ Cell ถูกเรียกว่า Yee Cell และถูกพิจารณาการอันตรกิริยาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่ส่งผลให้สมการการคำนวณมีความเสถียรและลดค่าความคลาดเคลื่อน แสดงดังสมการที่ (2.62)

$$\Delta t < \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (2.62)$$

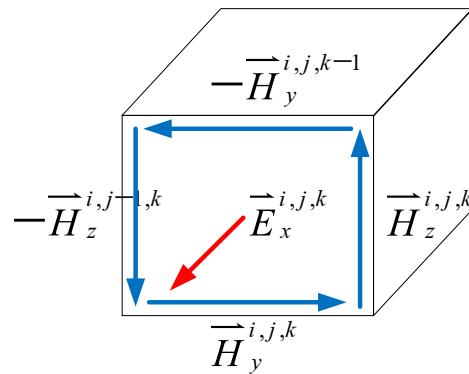


รูปที่ 2.25 การแบ่งปริภูมิออกเป็น Cell ย่อยลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศกร



รูปที่ 2.26 แต่ละ Cell ย่อยถูกพิจารณาเป็น Yee cell

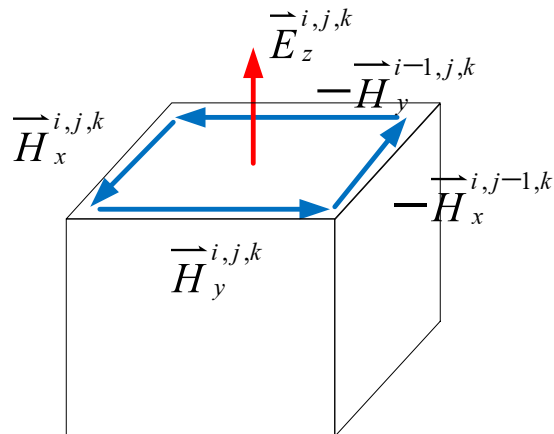
จากรูป 2.21 แต่ละ Yee cell ถูกแบ่งตามแนวแกน x y และ z เพื่อพิจารณาสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.27 - 2.29 โดยจะถูกพิจารณาเป็นการหมุนวนของสนามแม่เหล็กรอบสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา ซึ่งถูกพิจารณาจากสมการที่ (2.61)



รูปที่ 2.27 การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าให้เกิดสนามแม่เหล็กตามแกน x

การเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าในแนวแกน x แสดงดังสมการที่ (2.63)

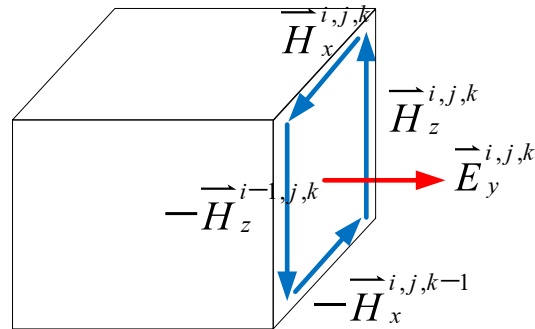
$$\begin{aligned} \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t} &= \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial z} - \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial y} \\ \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) \left(\frac{\vec{E}_x^{tf} - \vec{E}_x^{ti}}{\Delta t}\right) &= \left(\frac{\vec{H}_y^{i,j,k} - \vec{H}_y^{i,j,k+1}}{\Delta z}\right) - \left(\frac{\vec{H}_z^{i,j,k} - \vec{H}_z^{i,j+1,k}}{\Delta y}\right) \\ \vec{E}_x^{tf} &= \vec{E}_x^{ti} + \frac{\Delta t}{\epsilon_0(1 - \omega_p^2/\omega^2)} \left[\left(\frac{\vec{H}_y^{i,j,k} - \vec{H}_y^{i,j,k+1}}{\Delta z}\right) - \left(\frac{\vec{H}_z^{i,j,k} - \vec{H}_z^{i,j+1,k}}{\Delta y}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.63)$$



รูปที่ 2.28 การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าให้เกิดสนามแม่เหล็กตามแกน z

การเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าในแนวแกน z แสดงดังสมการที่ (2.64)

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial t} &= \frac{\partial \vec{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial y} \\ \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) \left(\frac{\vec{E}_z^{tf} - \vec{E}_z^{ti}}{\Delta t}\right) &= \left(\frac{\vec{H}_y^{i,j,k} - \vec{H}_y^{i+1,j,k}}{\Delta x}\right) - \left(\frac{\vec{H}_x^{i,j,k} - \vec{H}_x^{i,j+1,k}}{\Delta y}\right) \\ \vec{E}_z^{tf} = \vec{E}_z^{ti} + \frac{\Delta t}{\epsilon_0(1-\omega_p^2/\omega^2)} &\left[\left(\frac{\vec{H}_y^{i,j,k} - \vec{H}_y^{i+1,j,k}}{\Delta x}\right) - \left(\frac{\vec{H}_x^{i,j,k} - \vec{H}_x^{i,j+1,k}}{\Delta y}\right)\right] \end{aligned} \quad (2.64)$$



รูปที่ 2.29 การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าให้เกิดสนามแม่เหล็กตามแกน y

การเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าในแนวแกน y แสดงดังสมการที่ (2.65)

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial t} &= \frac{\partial \vec{H}_z}{\partial x} - \frac{\partial \vec{H}_x}{\partial z} \\ \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) \left(\frac{\vec{E}_y^{tf} - \vec{E}_y^{ti}}{\Delta t}\right) &= \left(\frac{\vec{H}_z^{i,j,k} - \vec{H}_z^{i+1,j,k}}{\Delta x}\right) - \left(\frac{\vec{H}_x^{i,j,k} - \vec{H}_x^{i,j,k+1}}{\Delta z}\right) \\ \vec{E}_y^{tf} = \vec{E}_y^{ti} + \frac{\Delta t}{\epsilon_0(1-\omega_p^2/\omega^2)} &\left[\left(\frac{\vec{H}_z^{i,j,k} - \vec{H}_z^{i+1,j,k}}{\Delta x}\right) - \left(\frac{\vec{H}_x^{i,j,k} - \vec{H}_x^{i,j,k+1}}{\Delta z}\right)\right] \end{aligned} \quad (2.65)$$

2.8 สมการการดูดกลืน

สมการการดูดกลืน คือ สมการที่นำเอาผลเฉลยของสนามไฟฟ้าที่เวลาใดๆ ในปริภูมิสามมิติจากสมการที่ 2.47 ถึงสมการที่ 2.49 มาพิจารณาหาค่าการดูดกลืนสนามไฟฟ้าของตัวอย่างทดลอง โดยสมการดังกล่าวคือสมการรูปสุทธิของสมการพลังงานสะสมในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.66)

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{2} \nabla \cdot \vec{S} - \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{J} \quad (2.66)$$

สมการความสัมพันธ์ของการลดลงของพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเทียบกับเวลาคือกำลังของการดูดกลืน ดังสมการที่ (2.67)

$$\frac{\partial U}{\partial t} = P_{abs} \quad (2.67)$$

สมการที่ (2.67) ถูกแทนค่าในสมการที่ (2.66) ได้สมการที่ (2.68)

$$P_{abs} = -\frac{1}{2} \nabla \cdot \vec{S} - \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{J} \quad (2.68)$$

Divergence ของ pointing vector ถูกเขียนให้อยู่ในรูปของสมการการ curl ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังสมการ (2.69)

$$\nabla \cdot \vec{S} = \vec{H}(\nabla \times \vec{E}) - \vec{E}(\nabla \times \vec{H}) \quad (2.69)$$

สมการที่ (2.69) ถูกแทนค่าในสมการที่ (2.68) ได้สมการที่ (2.70)

$$P_{abs} = -\frac{1}{2} [\vec{H}(\nabla \times \vec{E}) - \vec{E}(\nabla \times \vec{H})] - \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{J} \quad (2.70)$$

การ curl ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถูกเขียนแทนในรูปของ complex number แสดงดังสมการที่ (2.71) และ (2.72)

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega \vec{B} \quad (2.71)$$

$$\nabla \times \vec{H} = i\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (2.72)$$

สมการที่ (2.71) และ (2.72) ถูกแทนค่าในสมการที่ (2.70) ได้สมการที่ (2.73)

$$P_{abs} = -\frac{1}{2} [\vec{H}(-i\omega \vec{B}) - \vec{E}(i\omega \vec{D} + \vec{J})] - \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{J} \quad (2.73)$$

สมการที่ (2.73) ถูกจัดรูปได้สมการที่ (2.74)

$$P_{abs} = -\frac{i\omega}{2}(\vec{H} \cdot \vec{B}) + \frac{i\omega}{2}(\vec{E} \cdot \vec{D}) \quad (2.74)$$

สมการที่ (2.74) ถูกพิจารณาเฉพาะการดูดกลืนสนามแม่เหล็กจึงแทนค่า $\vec{H} \cdot \vec{B} = 0$ ลงในสมการดังกล่าวได้สมการที่ (2.75)

$$P_{abs} = \frac{i\omega}{2}(\vec{E} \cdot \vec{D}) \quad (2.75)$$

จากสมการ complex displacement field แสดงดังสมการที่ (2.76)

$$\vec{D} = \epsilon_i \vec{E}i \quad (2.76)$$

สมการที่ (2.76) ถูกแทนค่าในสมการที่ (2.75) ได้สมการที่ (2.77)

$$P_{abs} = \frac{i\omega}{2}(\vec{E} \cdot \epsilon_i \vec{E}i) \quad (2.77)$$

เงื่อนไข $i^2 = -1$ และ $\vec{E} \cdot \vec{E} = |\vec{E}|^2$ ถูกแทนค่าในสมการที่ (2.77) ได้สมการที่ (2.78)

$$P_{abs} = \frac{\omega}{2} |\vec{E}|^2 \epsilon_i \quad (2.78)$$

สมการที่ (2.78) ถูกเพิ่มพจน์ L เข้าไปเพื่อเป็นการพิจารณาผลในเชิงเรขาคณิต ได้สมการที่ (2.79)

$$P_{abs} = \frac{\omega}{2} |\vec{E}|^2 \epsilon_i \times L \quad (2.79)$$

2.9 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2014 Wang et al. ได้ทำการสร้างอุปกรณ์ Optoelectronic สำหรับนำไปประยุกต์กับงานด้าน Laser ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือใช้ต้นทุนที่ต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมขึ้น จากโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Pieris canidia* ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นฟังก์ชันคาบ โครงสร้างดังกล่าวถูกนำมาเคลือบด้วยอนุภาคนาโนของ ZnO อนุภาคนดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเปล่งแสงและก่อให้เกิดรูปแบบของปรากฏการณ์ Bio - inspired quasi - single - mode - random - laser โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถถูกตรวจวัดได้จากการเกิด Resonance ของ Fabry - Perot ที่มีอยู่บนโครงสร้างของปีกผีเสื้อ งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างทางชีวภาพและเป็นการแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์วัสดุ Photonic จากวัสดุในธรรมชาติ [6]

ในปี 2014 Jiang et al. ได้ประยุกต์ใช้คุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Morpho didius* ในการตรวจวัดแก๊สหรือไอระเหย โดยการบรรจุโครงสร้างดังกล่าวไว้ในสภาวะบรรยากาศ N_2 , CH_3OH , C_2H_5OH เพื่อศึกษาคุณสมบัติการสะท้อนแสงของโครงสร้างปีกผีเสื้อซึ่งถูกปกคลุมด้วยแก๊สและสารระเหยดังกล่าวซึ่งเป็นเสมือนการสร้างชั้นฟิล์มบางระดับนาโนที่มีคุณสมบัติจำเพาะตัวที่แตกต่างกันไปตามชนิดของสารที่เป็นองค์ประกอบนั้นๆและความหนาของชั้นฟิล์มแปรผันตรงต่อความเข้มข้นของสารระเหยที่อยู่ในบรรยากาศ ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง 2 มิติสำหรับการกระจายตัวของคลื่นแสงที่ตกกระทบบนโครงปีกผีเสื้อด้วยซอฟต์แวร์ Rsoft ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์แบบ Principal component analysis (PCA) เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเทียบกับเชิงทฤษฎี ผลต่างระหว่างการเปรียบเทียบดังกล่าวมีความสอดคล้องซึ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง ในงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นถึงค่า Sensitivity และความ Specificity ของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Morpho didius* ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสง [5]

ในปี 2015 Garrett et al. ได้ทำการเคลือบโลหะ Au บนโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ *Graphium weiskei* เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ Raman scattering (SERS) เพื่อนำไป

ประยุกต์ใช้กับงานทางด้านทางการแพทย์ในการตรวจจับเม็ดสี hemozoin ของมาลาเรียภายในเม็ดเลือดที่มี lysed จำนวน 0.005% และเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ติดเชื้อจำนวน 0.0005% แทนการตรวจวัดปริมาณของสารดังกล่าวด้วยกล้องจุลทรรศน์ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจสอบที่สูงกว่า [1]

ในปี 2016 Aideo et al. ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ Tailed Jay ก่อนและหลังการเคลือบด้วย $Zn(CH_3COO)_2$ และ C_2H_5OH โดยการเคลือบโครงสร้างปีกผีเสื้อด้วยสารประกอบดังกล่าวจะส่งผลให้ $Zn(OH)_2$ ในบรรยากาศแวดล้อมเกิดการแตกตัวกลายเป็นอนุภาค ZnO และเคลื่อนที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในรูพรุนบนโครงสร้างปีกผีเสื้อเพื่ออุดรูพรุนดังกล่าว โครงสร้างที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวสามารถถูกนำมาประยุกต์สร้างเป็น UV - V reflectance spectro scope ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของ Spectra ที่เกิดจากการเปลี่ยนชนิดของสารที่ถูกเคลือบบนโครงสร้างดังกล่าวได้ [7]

ในปี 2017 Elbaz et al. ได้ประยุกต์ใช้คุณสมบัติขนาดนาโนของ Ridges บนโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ Morpho Menelaus, Papilio Ulysses telegonus และ Ornithoptera Croesus lydius ในการควบคุมแนวการเจริญเติบโตของเซลล์และรักษาคุณสมบัติทางเคมีของเซลล์บนโครงสร้างดังกล่าว โดยทำการตรวจสอบลักษณะรูปแบบการเจริญเติบโตของเซลล์ซึ่งมีสมบัติ hydrophilic ด้วยการย้อมสีชนิด calcein acetoxymethyl ester (Calcein-AM) และกระบวนการสร้าง Methylthiazolyldiphenyl-tetrazoliumbromide (MTT) บนโครงสร้างปีกผีเสื้อที่ถูกใช้เป็นขอบเขตในการปลูกเซลล์ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการเจริญเติบโตที่เหมาะสมของเซลล์ fibroblast NIH - 3T3 และแสดงให้เห็นถึงแนวทางที่เป็นไปได้ในการพัฒนาวิศวกรรมเนื้อเยื่อซึ่งมีคุณสมบัติที่โดดเด่น อาทิเช่น ใช้ต้นทุนต่ำ มีข้อจำกัดที่น้อยกว่าวิธี top - down กับ bottom - up และเป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [2]

บทที่ 3

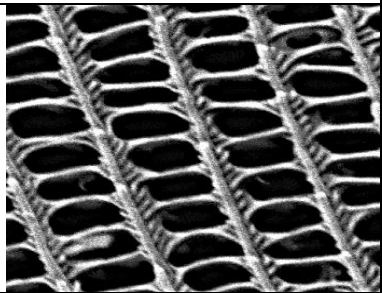
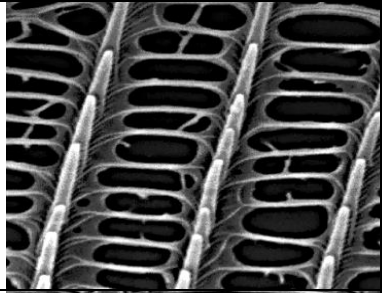
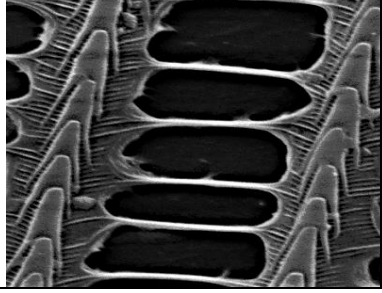
วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาโครงสร้างของปีกผีเสื้อกลุ่มที่ 1 (S1) จากการตรวจสอบโครงสร้างของปีกผีเสื้อจำนวน 3 สายพันธุ์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) เพื่อนำมาทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างปีกผีเสื้อขนาดย่อภายในโปรแกรม Lumerical

3.1 ผลการตรวจสอบตัวอย่างโครงสร้างปีกผีเสื้อ

การตรวจสอบรายละเอียดเชิงสัณฐานวิทยาของตัวอย่างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อให้ได้มาซึ่งขนาดและลักษณะรูปร่างขององค์ประกอบพื้นฐานของปีกที่แตกต่างกันซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อการสร้างแบบจำลองเพื่อการจำลองทดลองโดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

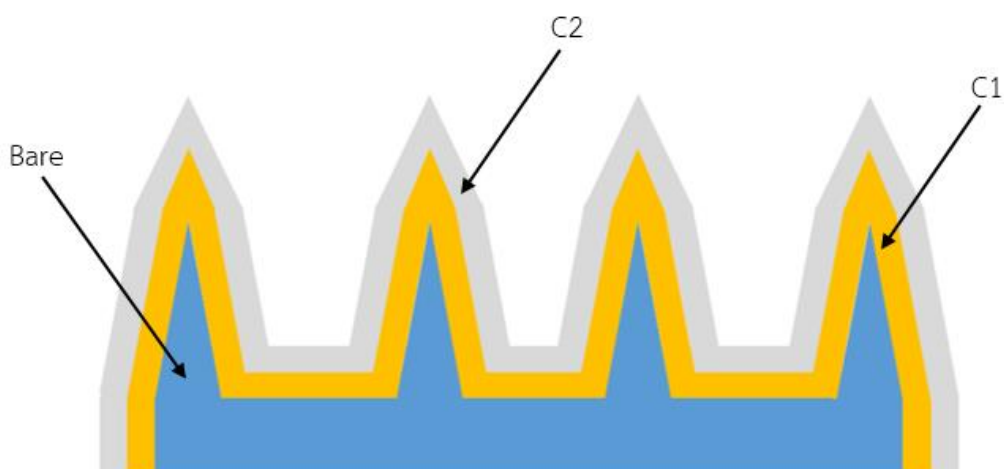
ตารางที่ 3.1 ค่าขนาดขององค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญต่างๆของปีกผีเสื้อจำนวน 4 สายพันธุ์

ชื่อสายพันธุ์	โครงสร้างจากการตรวจสอบโดย SEM	A (μm)	B (nm)	C (μm)	D (nm)	E (nm)
Cetbsia Pentbesile a		1.03 7	162.00 0	1.14 8	40.03 3	449.433
Danaus Genutia		1.51 1	228.57 1	1.83 1	37.00 0	489.737
Catopsilia Pomona		2.94 0	525.43 3	3.56 9	71.03 3	1823.00 0

3.2 การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Lumerical

3.2.1 การกำหนดตำแหน่งขององค์ประกอบของโครงสร้างปีกผีเสื้อและสารเคลือบโลหะ

ข้อมูลขนาดโครงสร้างของตัวอย่างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ที่ได้จากการตรวจสอบด้วย SEM ถูกใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองภายในโปรแกรม Lumerical โดยเป็นการกำหนดขนาดของแบบจำลองในขนาดย่อเนื่องด้วยข้อจำกัดเรื่องขนาดหน่วยความจำของฮาร์ดแวร์และระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผล แบบจำลองดังกล่าวถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่เหมือนกันทั้ง 3 สายพันธุ์โดยมีรูปแบบเป็นโครงสร้าง Ridge จำนวน 4 ชั้น ตั้งอยู่บนโครงสร้าง Cross - ribs ในลักษณะเป็นแถวหน้ากระดานและถูกแบ่งการเคลือบผิวบนโครงสร้างออกเป็น 2 รูปแบบคือโครงสร้างที่ไม่ถูกเคลือบด้วยชั้นโลหะกับโครงสร้างที่ถูกเคลือบด้วยชั้นโลหะซึ่งมีความหนา $0.2 \mu\text{m}$ ซึ่งถูกแบ่งการเคลือบออกเป็น 2 รูปแบบ (เคลือบชั้นใน (C1) /เคลือบชั้นนอก (C2)) ดังนี้คือ (Au/Au), (Pd/Pd) ขนาดความสูง ความหนาของ Ridge กับ Cross - ribs และระยะห่างระหว่าง Ridge แต่ละชั้นเป็นค่าเฉพาะของตัวอย่างปีกผีเสื้อแต่ละสายพันธุ์ รูปแบบโครงสร้างขนาดย่อของแบบจำลองปีกผีเสื้อที่ถูกเคลือบและไม่ถูกเคลือบด้วยโลหะ แสดงดังรูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) โครงสร้างขนาดย่อของแบบจำลองปีกผีเสื้อที่ถูกเคลือบด้วยโลหะ 2 ชั้น



(ข) โครงสร้างขนาดย่อของแบบจำลองปีกผีเสื้อที่ไม่ถูกเคลือบด้วยโลหะ

รูปที่ 3.1 แบบจำลองขนาดย่อของโครงสร้างปีกผีเสื้อ

การคำนวณและระบุพิกัดองค์ประกอบเพื่อสร้างแบบจำลองโครงสร้างปีกผีเสื้อสามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชั้นส่วนของ Ridge กับ Cross - ribs และการกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชั้นส่วนของชั้นโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้างปีกผีเสื้อ

3.2.1.1 การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชั้นส่วนของ Ridge กับ Cross - ribs

ขนาดความสูงกับระยะห่างของ Ridge แต่ละชั้นและขนาดของ Cross - ribs ของโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ถูกนำมาใช้ในการออกแบบสร้างแบบจำลองขนาดย่อในพิกัด (x,y,z) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

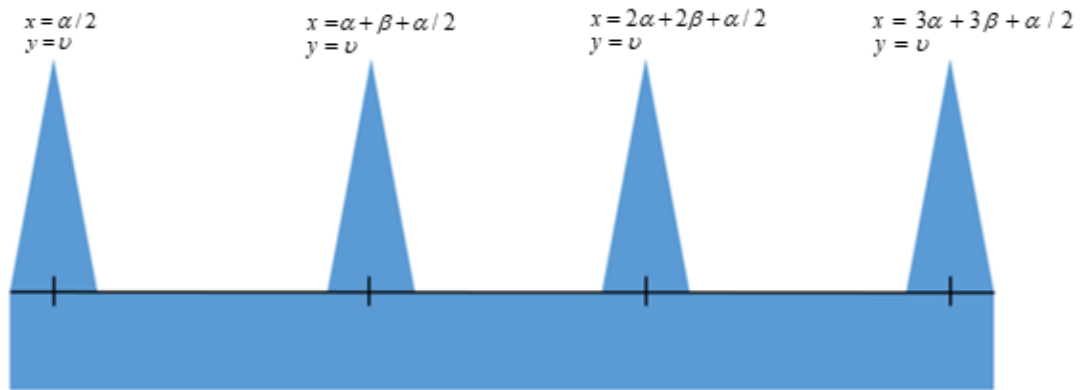
กำหนดขนาดความกว้างและความสูงของ Cross - ribs ในลักษณะเป็นจุดพิกัดซึ่งเป็นองค์ประกอบของรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การกำหนดขนาดของแบบจำลอง Cross - ribs ในพิกัด (x,y)

Ridge ทั้ง 4 ชั้นถูกสร้างขึ้นบน Cross - ribs ในลักษณะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่ว ตำแหน่งของจุดกึ่งกลาง Ridge ถูกคำนวณโดยสมการที่ 3.1 ผลของการคำนวณจากสมการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.3

$$o_n = (n - 1)\alpha + (n - 1)\beta + \frac{\alpha}{2} \quad (3.1)$$

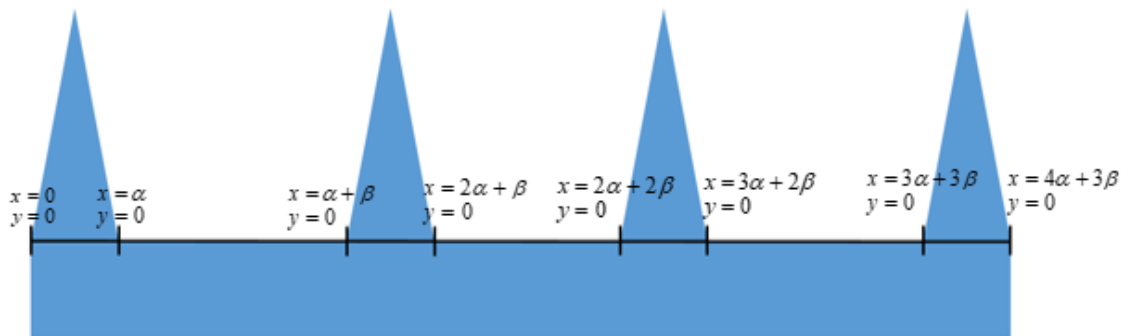


รูปที่ 3.3 การกำหนดตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ Ridge ทั้ง 4 ชั้น

ขนาดขอบเขตด้านซ้ายและขวาของ Ridge ทั้ง 4 ชั้นคำนวณโดยสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ผลของการคำนวณจากสมการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.4

$$L_n = (n - 1)(\alpha + \beta) \quad (3.2)$$

$$R_n = n\alpha + (n - 1)\beta \quad (3.3)$$



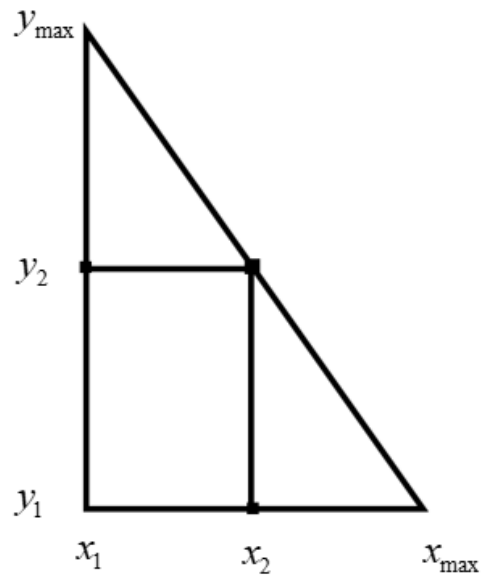
รูปที่ 3.4 การกำหนดตำแหน่งขอบซ้ายและขวาของ Ridge ทั้ง 4 ชั้น

3.2.1.2 การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชิ้นส่วนของชั้นโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้างปีก ผีเสื้อ

โครงสร้าง Ridge และ Cross - ribs ในแบบจำลองถูกเคลือบด้วยชั้นโลหะจำนวน 2 ชั้น โลหะดังกล่าวมีความหนาของการเคลือบที่เท่ากันทั้ง 2 ชั้นและมีค่าเท่ากันทุกจุดบนโครงสร้างของ Ridge และ Cross - ribs การกำหนดตำแหน่งของจุดองค์ประกอบของ

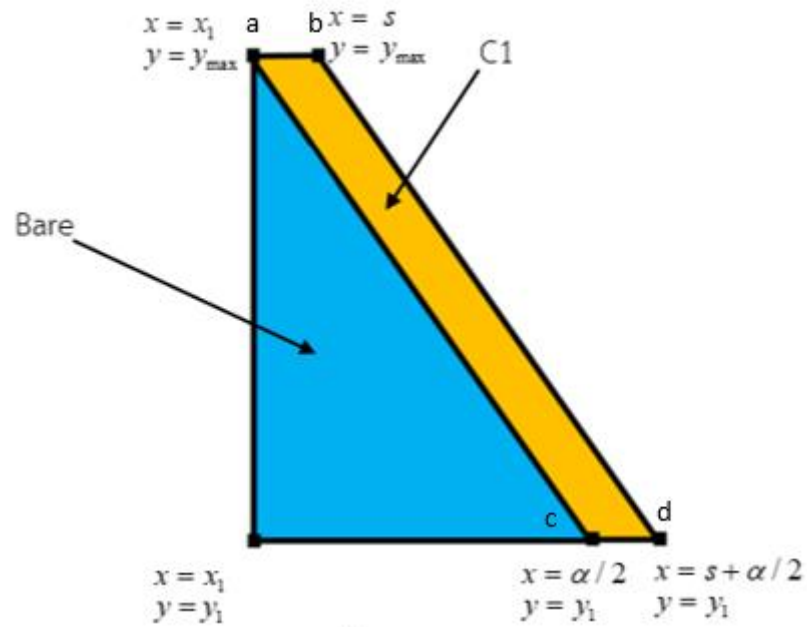
โลหะดังก้าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการดังก้าวแสดงดังรูปที่ 3.5

$$\frac{y_{\max} - y_2}{y_{\max} - y_1} = \frac{x_2 - x_1}{x_{\max} - x_1} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการระบุตำแหน่ง

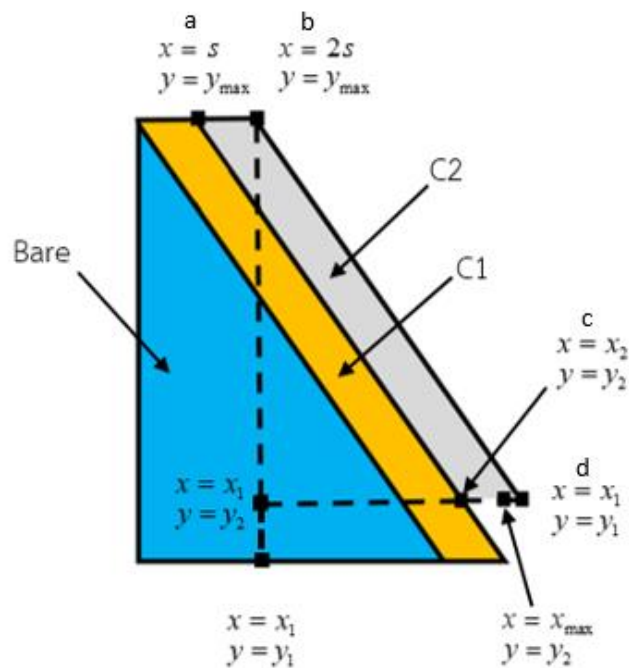
ขั้นตอนการกำหนดพิกัดจุดองค์ประกอบของชั้นโลหะซึ่งเคลือบบนโครงสร้าง Ridge ด้วยสมการที่ 3.4 แสดงดังรูปที่ 3.6 ถึง 3.7



รูปที่ 3.6 จุด a ถึง d ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชั้น C1 ถูกสร้างด้วยวิธีการเลื่อนตำแหน่งในแกน x จากจุดกำเนิดบน Bard ด้วยวิธีการบวก

สมการที่ 3.4 ถูกจัดรูปเป็นสมการที่ 3.5

$$x_2 = x_1 + (x_{max} - x_1) \left(\frac{y_{max} - y_2}{y_{max} - y_1} \right) \tag{3.5}$$



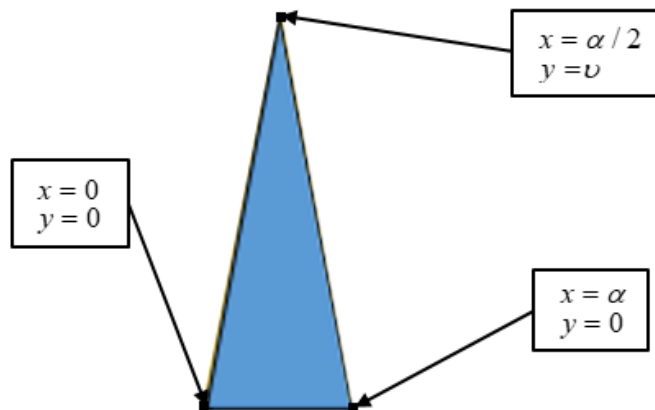
รูปที่ 3.7 จุด a ถึง d ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชั้น C2 ถูกกำหนดด้วยสมการที่ 3.5 และสร้างขึ้น ถัดจากชั้น C1

3.2.1.3 การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชิ้นส่วนของชั้นโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้าง

Ridge

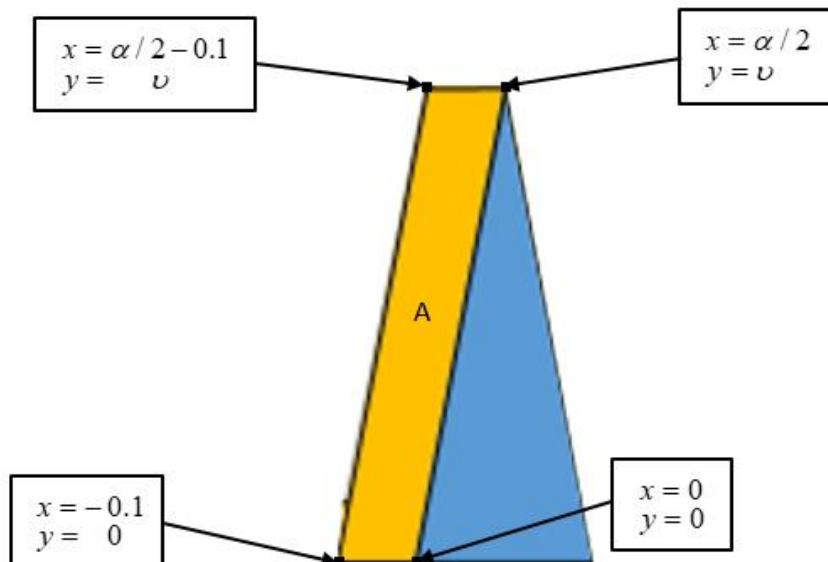
การเคลือบโลหะบน Ridge มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ Ridge ทั้ง 4 ชั้นด้วยสมการที่ 3.1 ถึง 3.3 แสดงดังรูปที่ 3.8



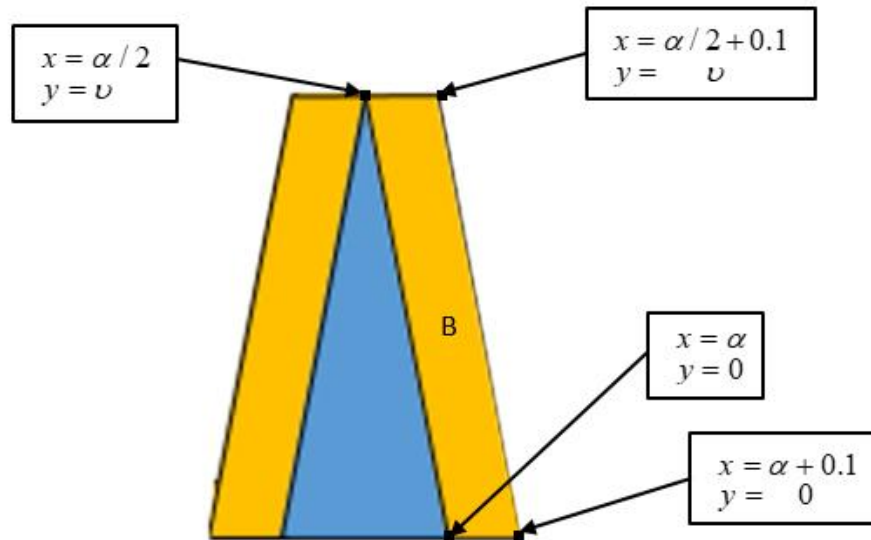
รูปที่ 3.8 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของ Ridge

2. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น A ด้วยสมการที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.9



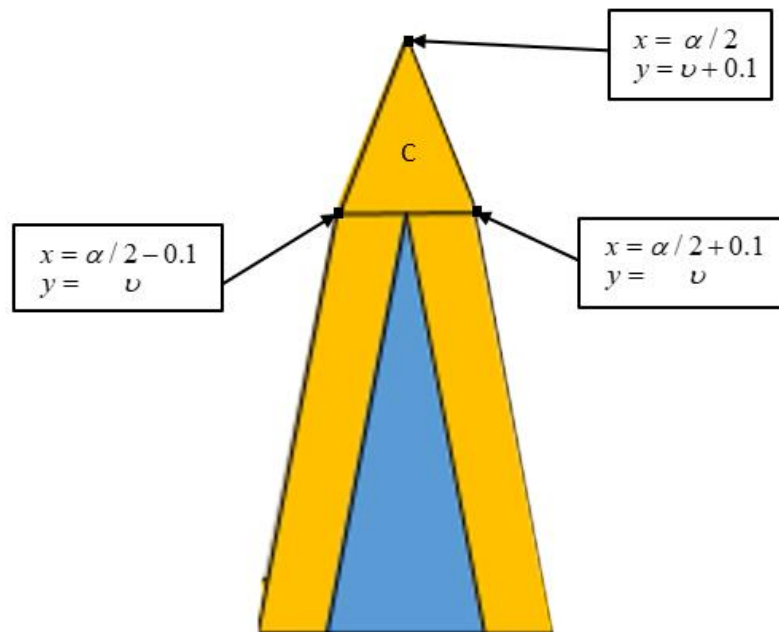
รูปที่ 3.9 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น A

3. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น B ด้วยสมการที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.10



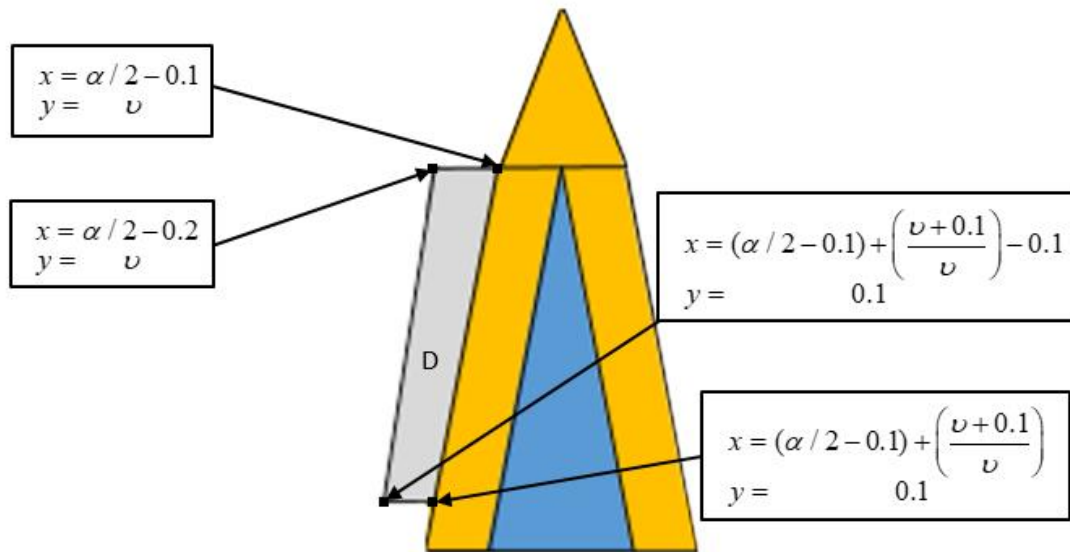
รูปที่ 3.10 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น B

4. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น C ด้วยสมการที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.11



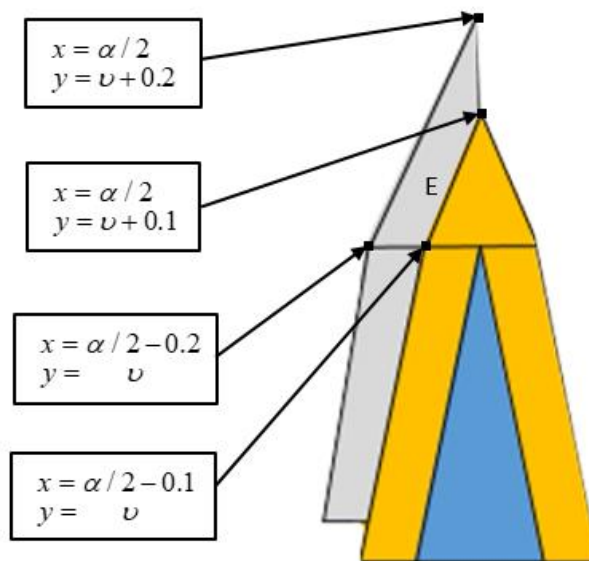
รูปที่ 3.11 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น C

5. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น D ด้วยสมการที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.12



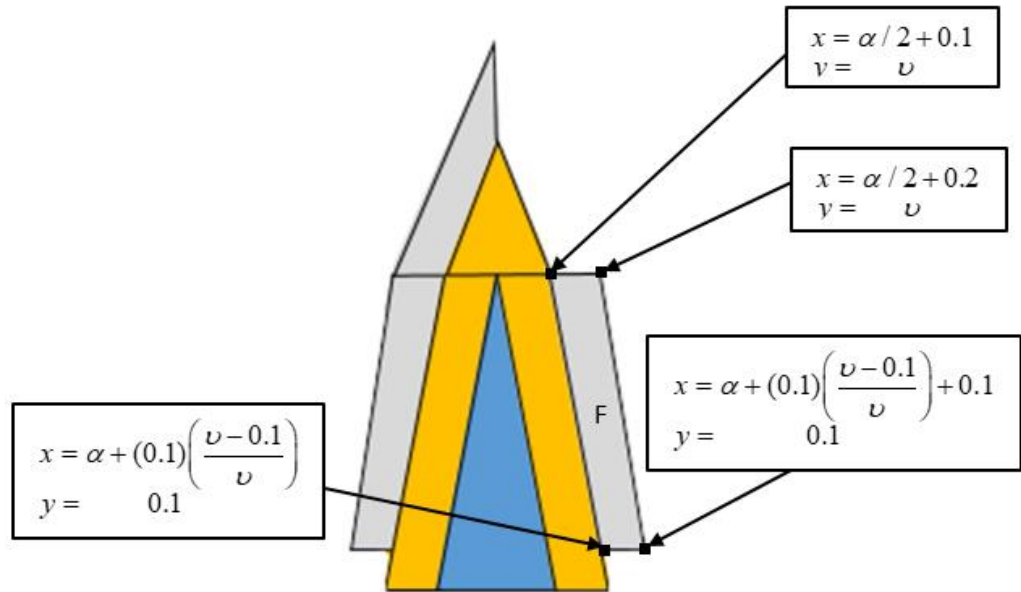
รูปที่ 3.12 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น D

6. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น E ด้วยสมการที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.13



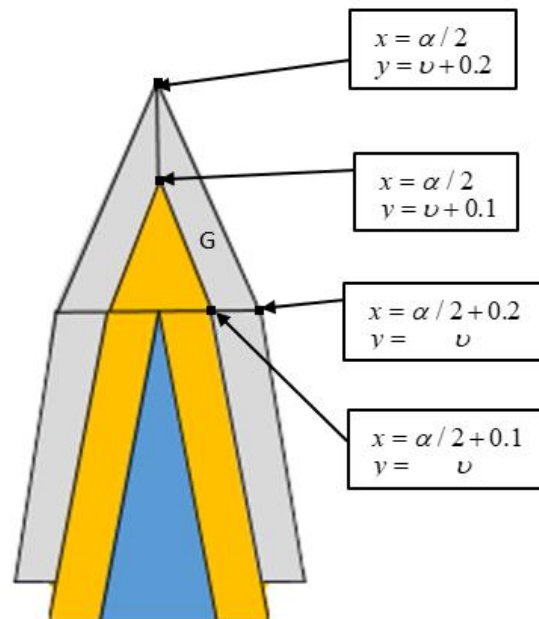
รูปที่ 3.13 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น E

7. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น F ด้วยสมการที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.14



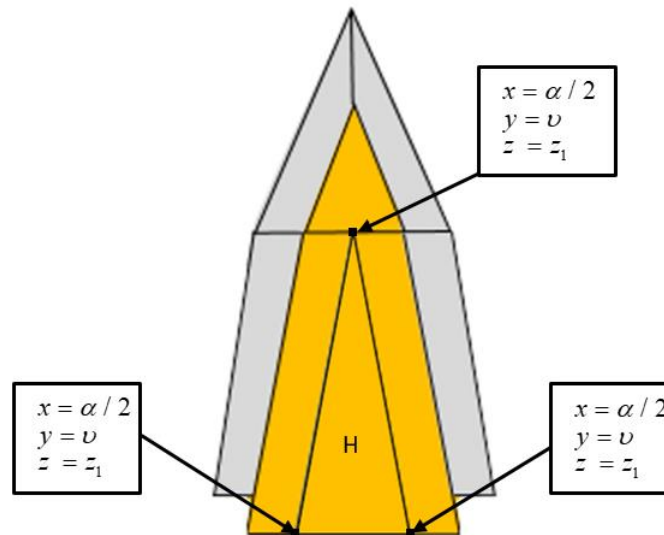
รูปที่ 3.14 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น F

8. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น G ด้วยสมการที่ 3.5 แสดงดังรูปที่ 3.15



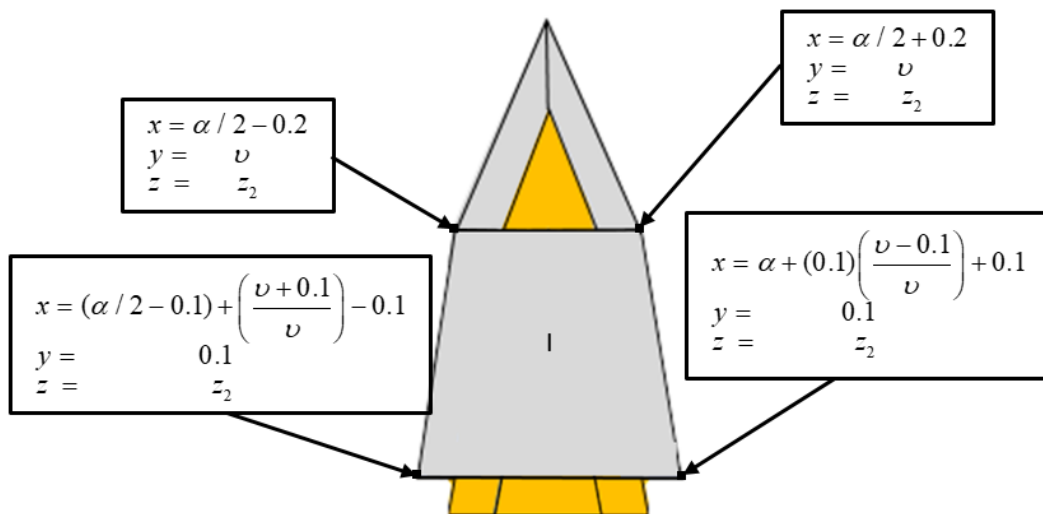
รูปที่ 3.15 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น G

9. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น H ด้วยสมการที่ 3.5 ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_1 แสดงดังรูปที่ 3.16



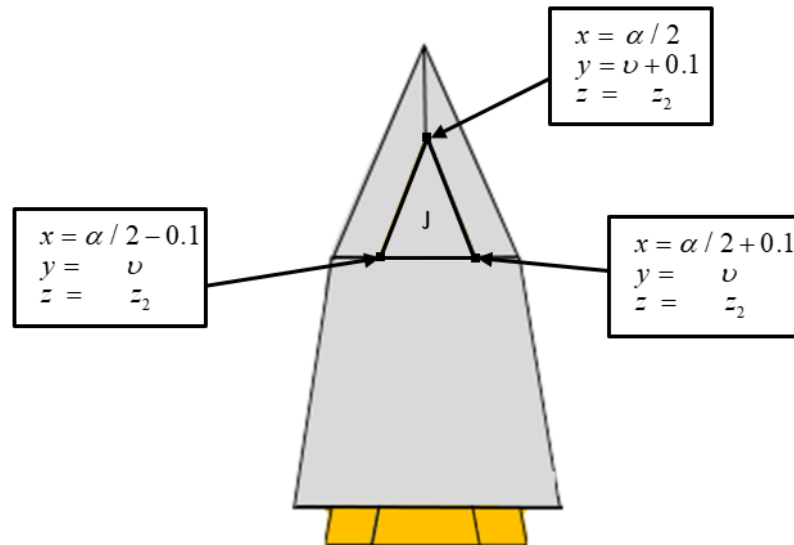
รูปที่ 3.16 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น H

10. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น I ด้วยสมการที่ 3.5 ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_2 แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น I

11. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น J ด้วยสมการที่ 3.5 ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_2 แสดงดังรูปที่ 3.18



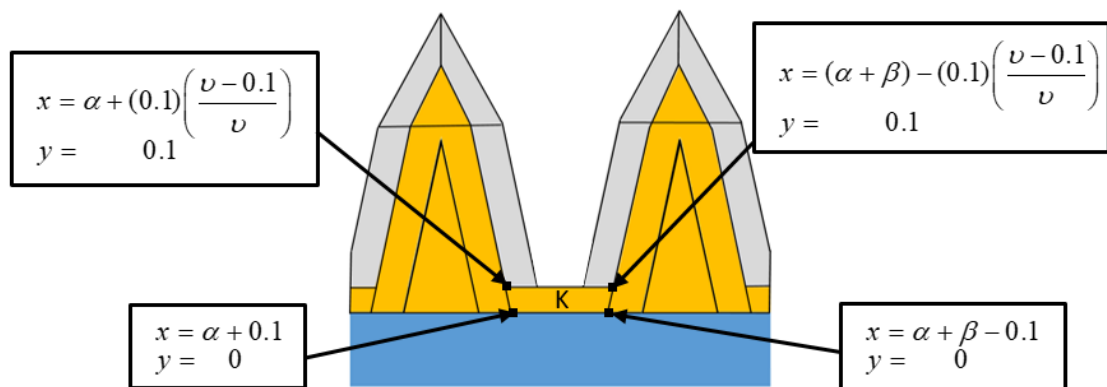
รูปที่ 3.18 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น J

3.2.1.4 การกำหนดพิกัดเพื่อสร้างชิ้นส่วนของชั้นโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้าง

Cross - ribs

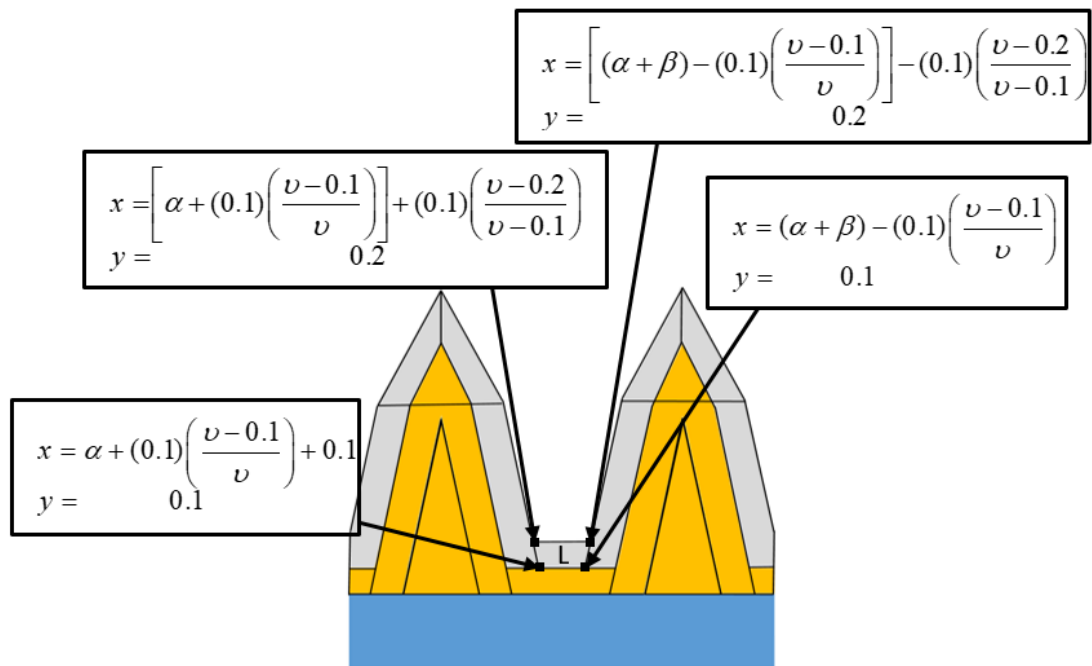
การเคลือบโลหะบน Cross - ribs มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น K ด้วยสมการที่ 3.5 ซึ่งรูปทรงดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3.19



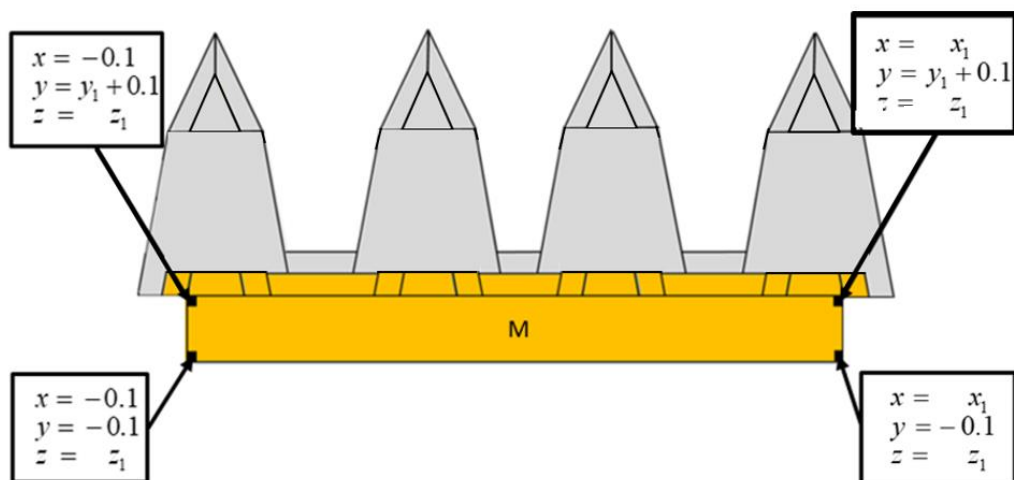
รูปที่ 3.19 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น K

2. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น L ด้วยสมการที่ 3.5 ซึ่งรูปทรงดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3.20



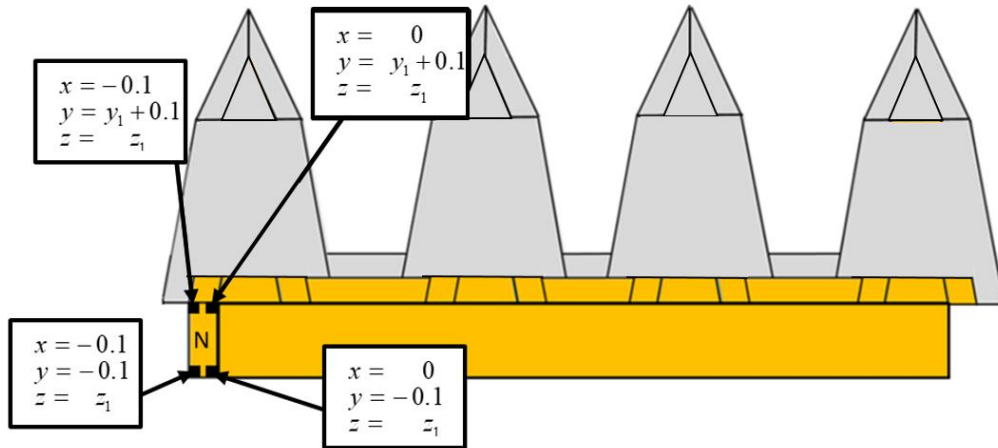
รูปที่ 3.20 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น L

3. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น M ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_1 แสดงดังรูปที่ 3.21



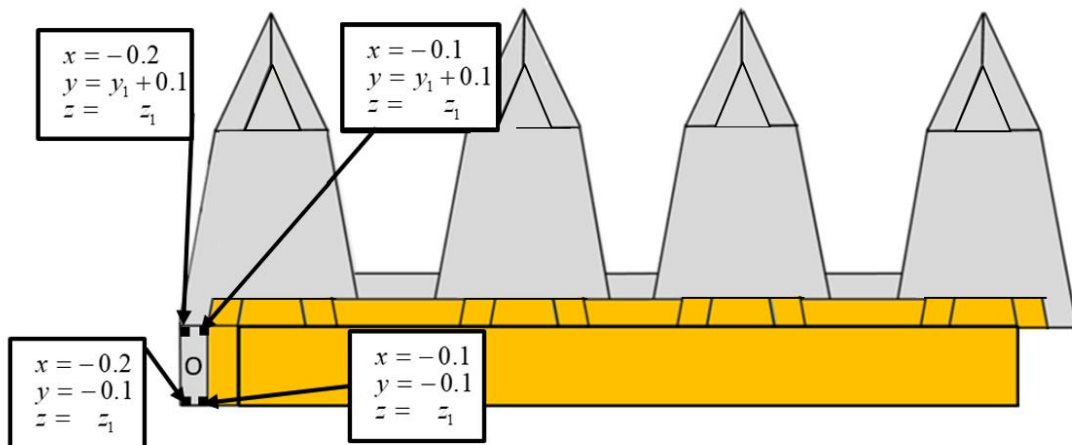
รูปที่ 3.21 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น M

4. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น N ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_1 แสดงดังรูปที่ 3.22



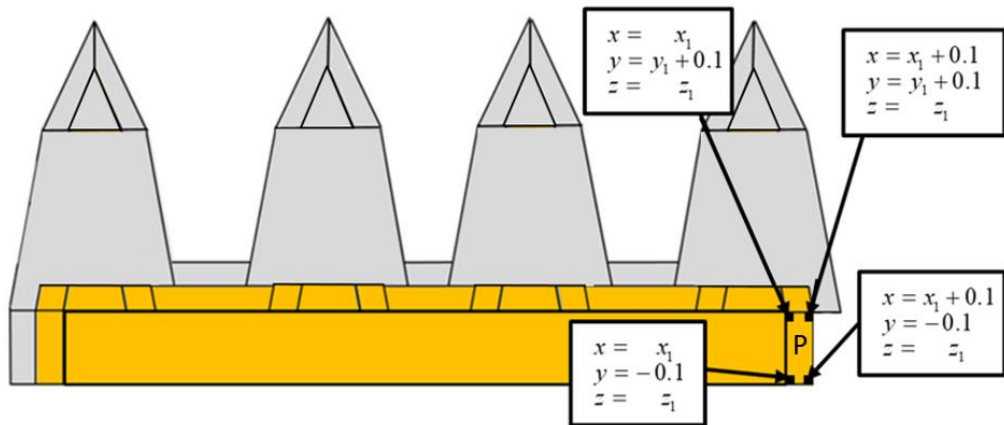
รูปที่ 3.22 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น N

5. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น O ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_1 แสดงดังรูปที่ 3.23
- 6.



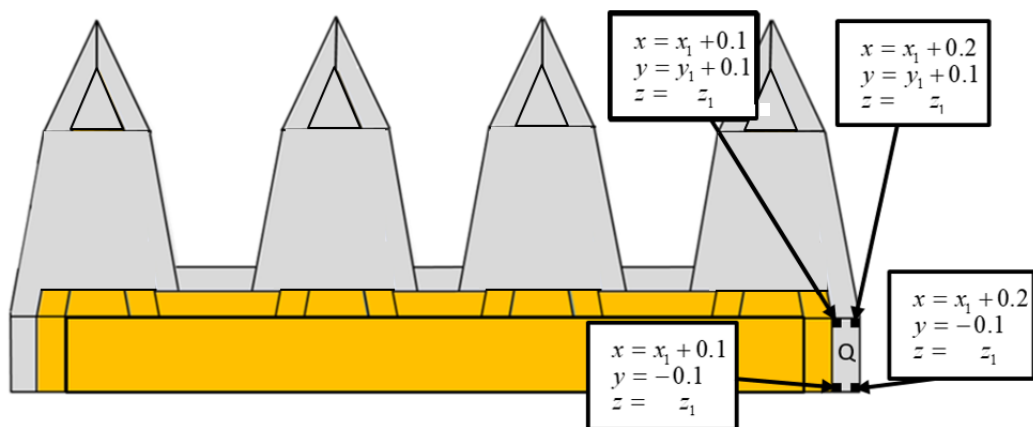
รูปที่ 3.23 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น O

7. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบชั้น P ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_1 แสดงดังรูปที่ 3.24



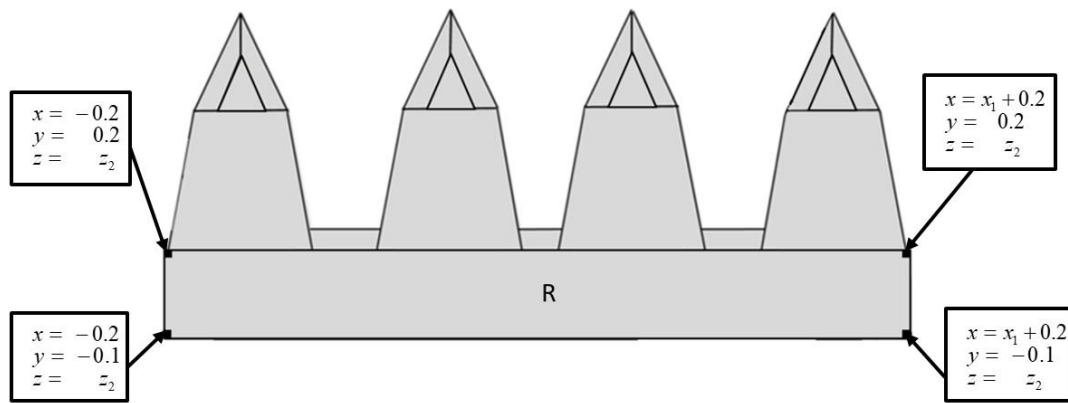
รูปที่ 3.24 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น P

8. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น Q ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_1 แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น Q

9. ทำการกำหนดตำแหน่งของจุดทั้ง 4 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น R ซึ่งรูปทรงดังกล่าวอยู่ในแกน z ที่ตำแหน่ง z_2 แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การกำหนดตำแหน่งจุดองค์ประกอบของโลหะเคลือบขึ้น R

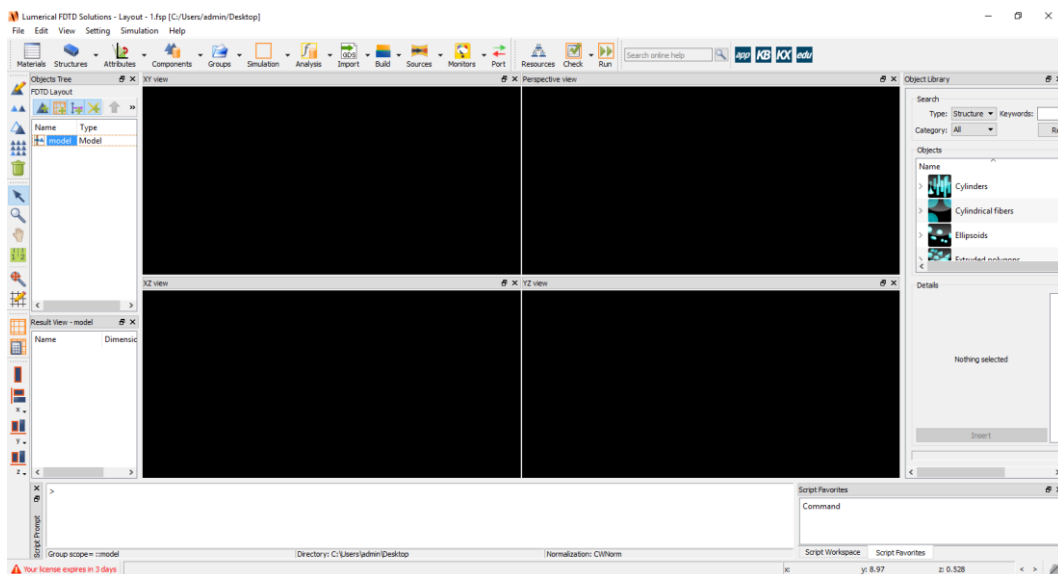
3.2.2 คำสั่งพื้นฐานและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทดลอง

โปรแกรม Lumerical คือ ซอฟต์แวร์หลักที่ถูกเลือกมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับโลหะซึ่งถูกเคลือบบนโครงสร้างของตัวอย่างปีกผีเสื้อ การประมวลผลโดยคำสั่งพื้นฐานในโปรแกรม Lumerical ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยชิ้นนี้สามารถถูกแบ่งออกได้ดังนี้

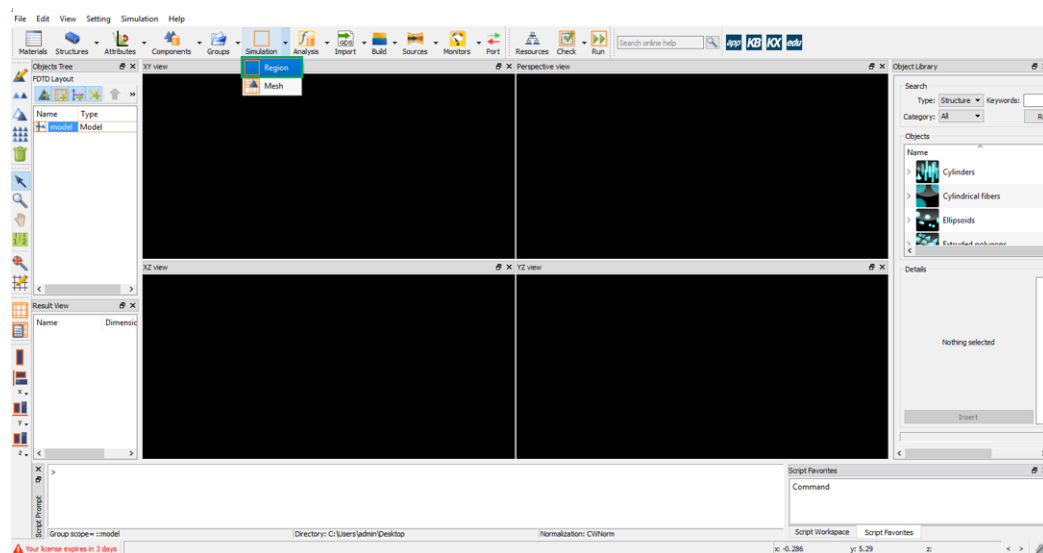
3.2.2.1 คำสั่งกำหนดขอบเขตการทดลอง

คำสั่งในกลุ่มนี้สามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ คำสั่ง Region และคำสั่ง Mesh คำสั่งทั้งสองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

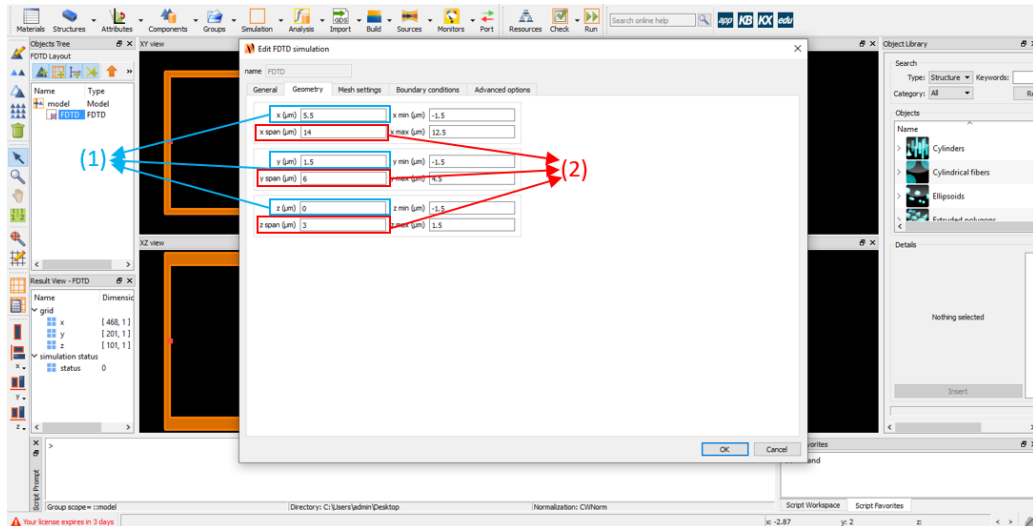
คำสั่ง Region คือคำสั่งที่ถูกใช้ในการกำหนดขอบเขตของแบบจำลองภายในโปรแกรมในลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ ในปริภูมิ 3 มิติโดยขนาดของขอบเขตดังกล่าวเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการประมวลผลและการจำลองการทดลองในลักษณะแปรผันตรงต่อกัน ขั้นตอนของการใช้คำสั่ง Region แสดงดังรูปที่ 3.27 (ก) ถึง (ง)



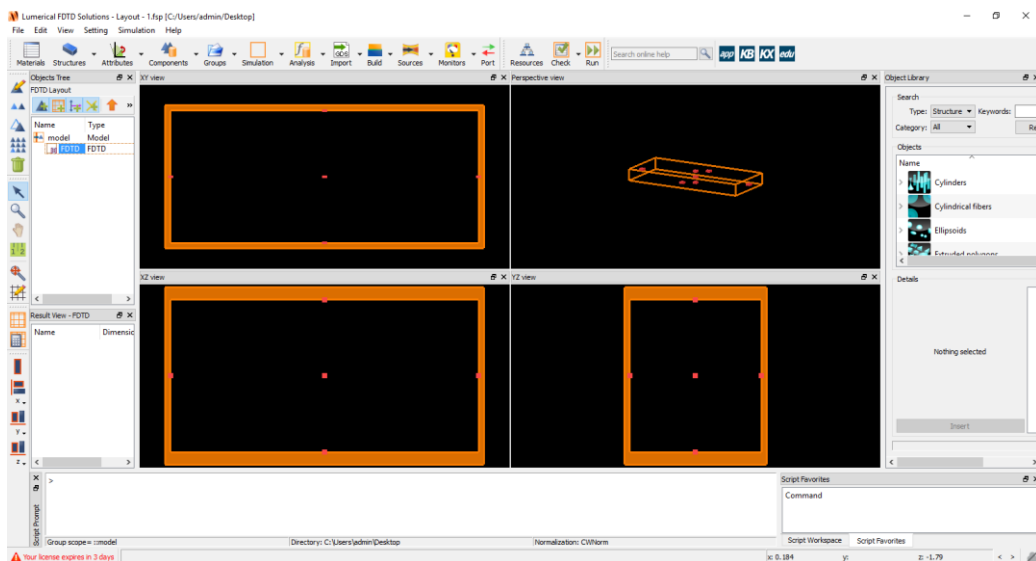
(ก) การเปิดหน้าต่างโปรแกรม Lumerical



(ข) การเปิดคำสั่ง Region จากไอคอน Simulation



(ค) การกำหนดขนาดของขอบเขตการทดลองในแนวแกน x , y และ z โดยไอคอนกลุ่ม (1) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดกำเนิดของขอบเขตในแต่ละแกน ไอคอนกลุ่มที่ (2) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดสิ้นสุดของขอบเขตในแต่ละแกน

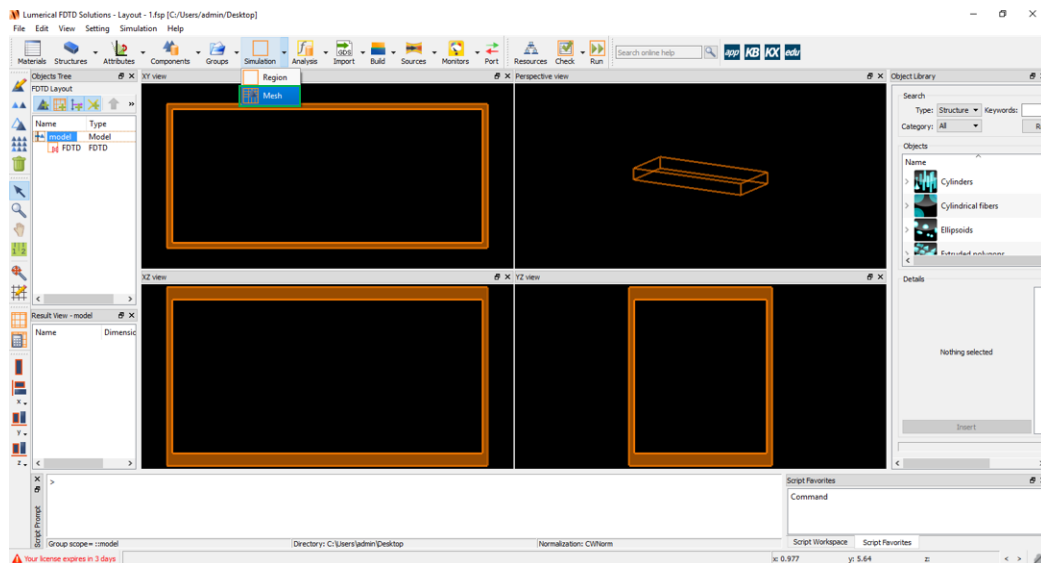


(ง) รูปแบบของขอบเขต Region ที่ได้จากการกำหนดค่าขอบเขตภายในโปรแกรม Lumerical

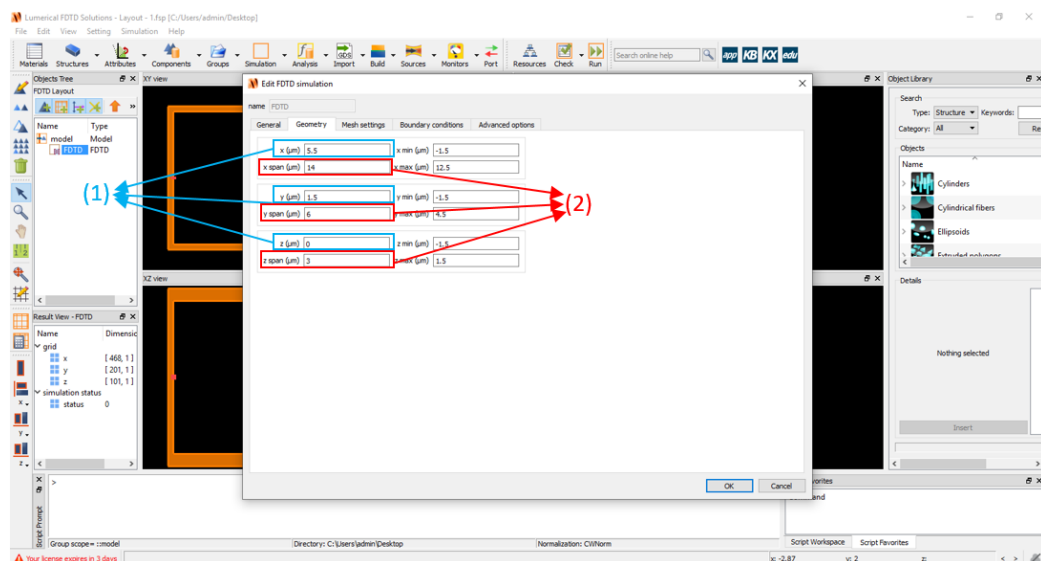
รูปที่ 3.27 รูปทรงของขอบเขตของคำสั่ง Region ภายในปริภูมิ 3 มิติ

คำสั่ง Mesh คือคำสั่งที่ถูกใช้เพื่อกำหนดค่าความละเอียดในการจำลองผลการทดลอง โดยจะเป็นการแบ่งขอบเขตของคำสั่ง Region ออกเป็นลูกบาศก์ย่อยหรืออาจกล่าวได้ว่าคำสั่งดังกล่าวคือคำสั่งที่ใช้ในการกำหนดขนาดของ Yee cell ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ผลการทดลองมีความชัดเจนของขนาดสนามไฟฟ้าที่ถูกดูดกลืนในแต่ละองค์ประกอบของแบบจำลองที่มีอันตร

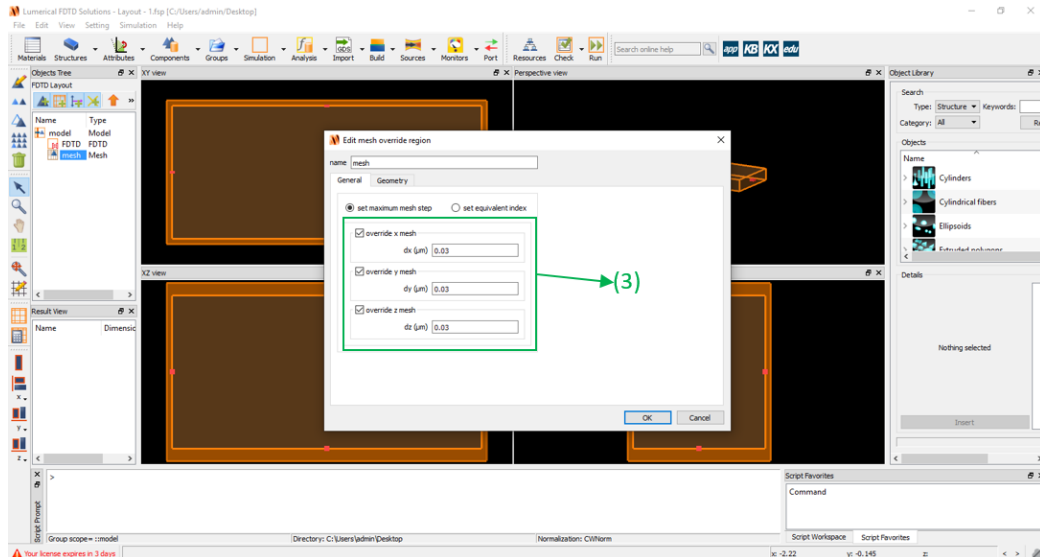
กิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเป็นอีกปัจจัยที่แปรผันตรงต่อระยะเวลาการประมวลผลและการจำลองการทดลองขั้นตอนการใช้งานคำสั่ง Mesh แสดงดังรูปที่ 3.28 (ก) ถึง (ง)



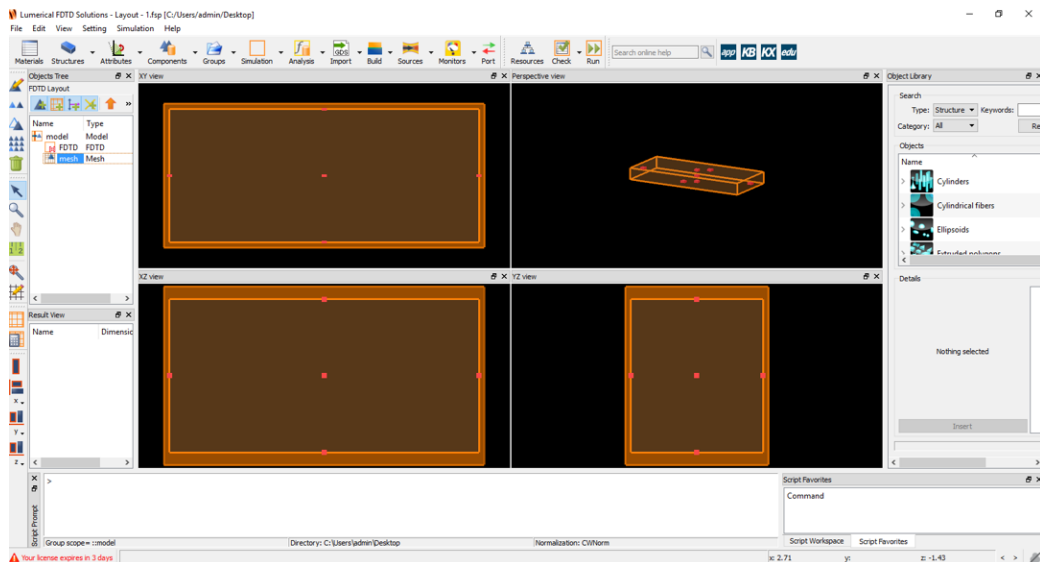
(ก) การเปิดคำสั่ง Mesh จากไอคอน Simulation



(ข) การกำหนดขนาดของขอบเขตที่ต้องการจะแบ่งออกเป็น Mesh ในแนวแกน x, y และ z โดยไอคอนกลุ่ม (1) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดกำเนิดของขอบเขตในแต่ละแกน ไอคอนกลุ่มที่ (2) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดสิ้นสุดของขอบเขตในแต่ละแกน



(ค) การกำหนดขนาดของแต่ละ Mesh ที่จะทำการแบ่งจาก Region โดยการในแนวแกน x , y และ z ด้วยไอคอนกลุ่ม (3)



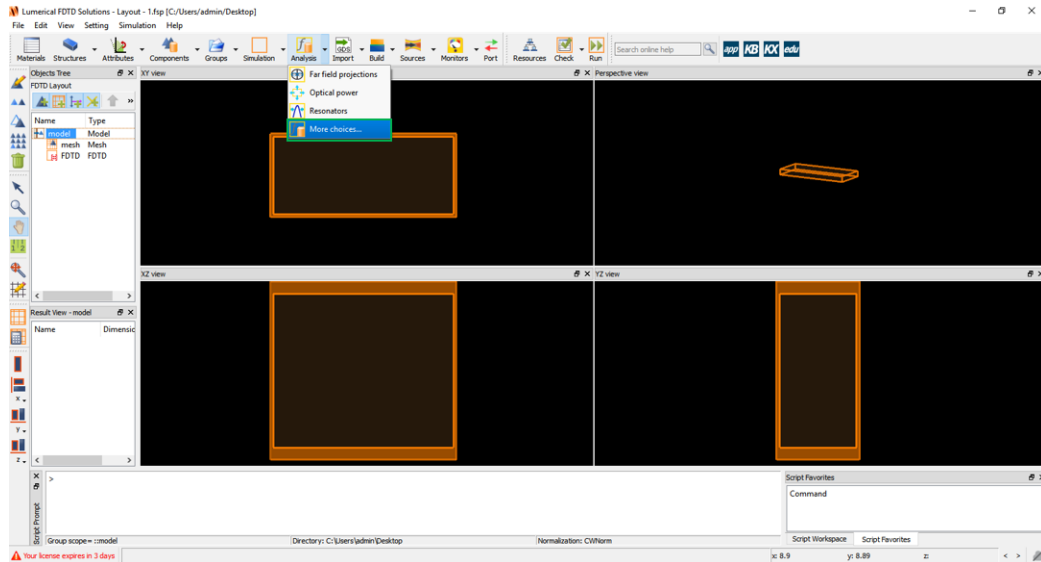
(ง) รูปแบบของการแบ่ง Mesh ที่ภายในโปรแกรม Lumerical รูปที่ 3.28 การแบ่งขอบเขตของ Region ออกเป็น Mesh ย่อยๆ

3.2.2.2 คำสั่งกำหนดการตรวจสอบ

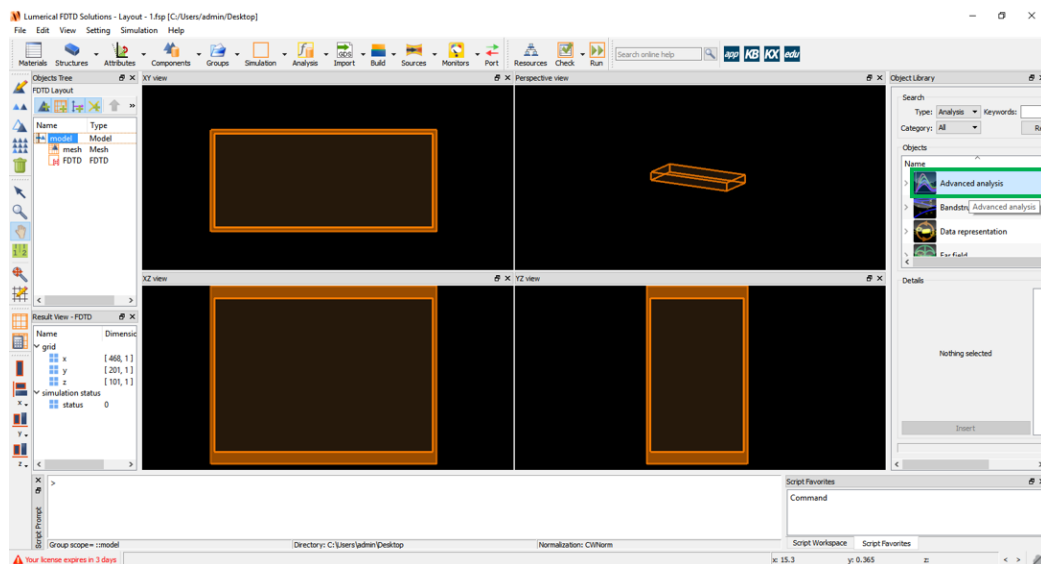
คำสั่งในกลุ่มนี้สามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ คำสั่ง *Advanced analysis* และคำสั่ง *Frequency - domain field and power* คำสั่งทั้งสองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

คำสั่ง *Advanced analysis* คือคำสั่งที่ถูกใช้เพื่อกำหนดให้โปรแกรม Lumerical ทำการเก็บข้อมูลค่าการดูดกลืนสนามไฟฟ้าของโลหะที่เคลือบบนโครงสร้างแบบจำลองซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบโครงสร้าง

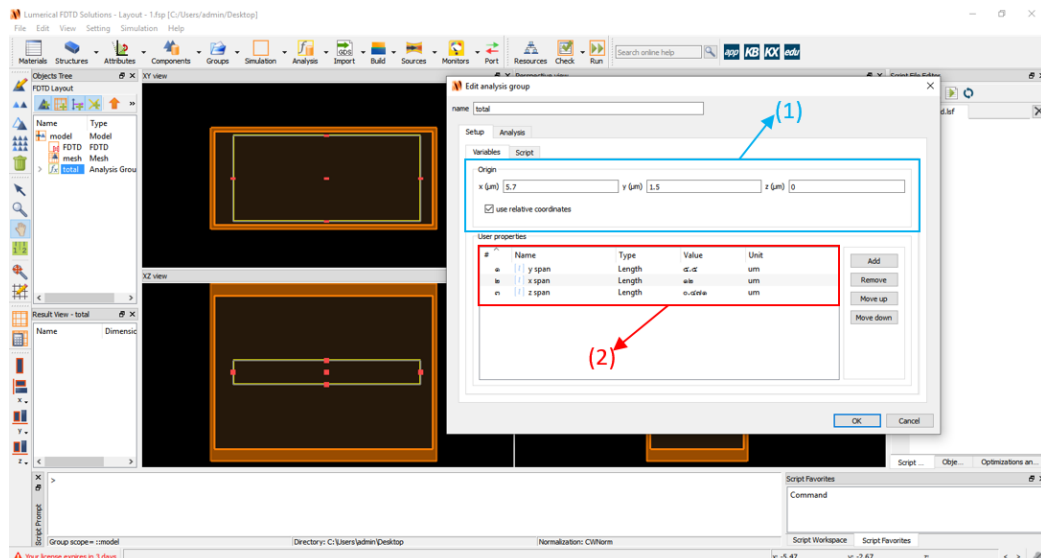
ดังกล่าวโดยลักษณะการใช้งานจะเป็นการกำหนดช่วงขอบเขตสร้างระนาบตรวจวัดบริเวณผิวหน้าของแบบจำลองในบริเวณที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบ ช่วงของการบันทึกค่าการูดกลืนสนามไฟฟ้าสามารถถูกกำหนดได้จากย่านความยาวคลื่นแสงจากคำสั่งแหล่งกำเนิดคลื่นขั้นตอนของการใช้คำสั่ง *Advanced analysis* แสดงดังรูปที่ 3.29 (ก) ถึง (ง)



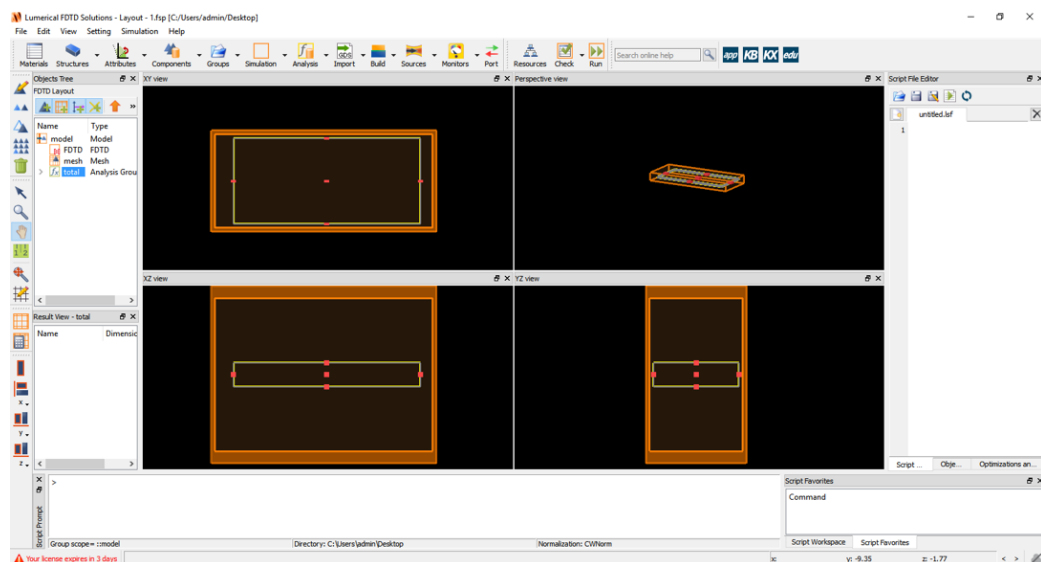
(ก) การเปิดคำสั่ง *Advanced analysis* โดยคลิก *Analysis* เลือก *More choices*



(ข) เลือก *Advanced analysis* จากชุดคำสั่ง *Objects*



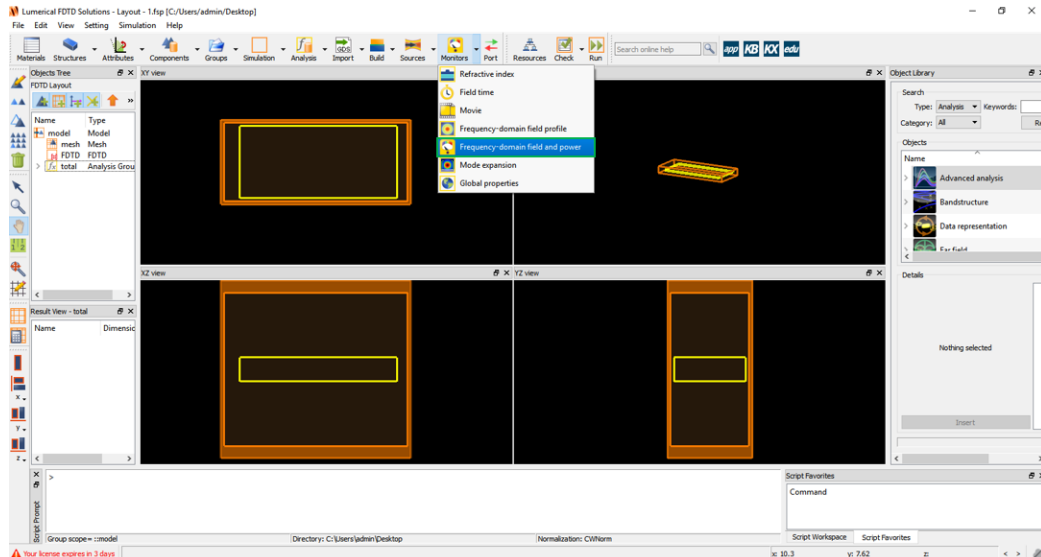
(ค) จุดกำเนิดของระนาบตรวจวัดในแนวแกน x , y และ z ถูกกำหนดโดยไอคอนในกลุ่มที่ (1) และขนาดความกว้างในแนวแกน x และ y ของระนาบตรวจวัดถูกกำหนดโดยไอคอนในกลุ่มที่ (2)



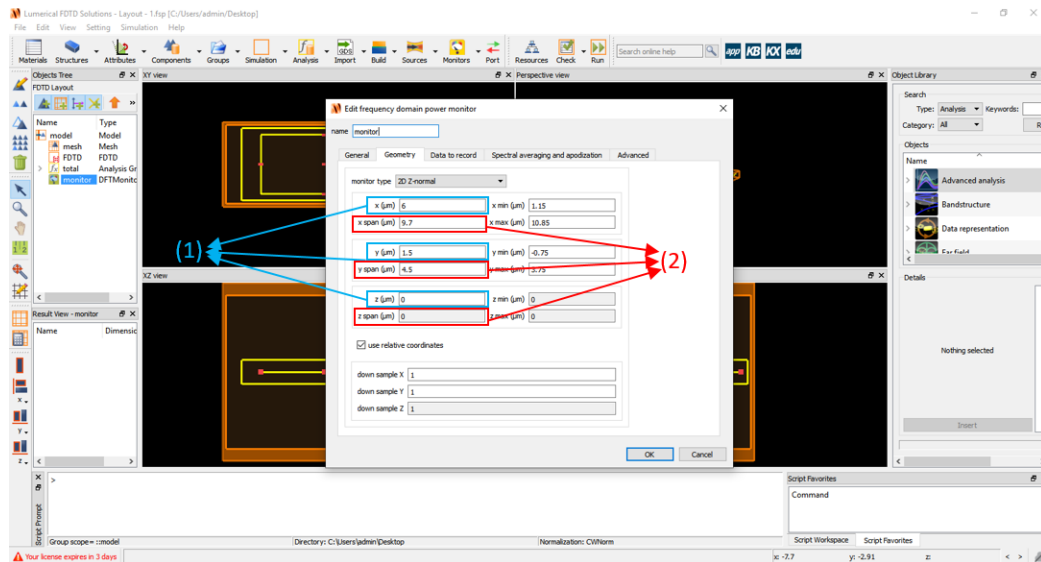
(ง) รูปทรงของระนาบตรวจวัดจากคำสั่ง *Advanced analysis* ที่ภายในโปรแกรม Lumerical

รูปที่ 3.29 การสร้างระนาบตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

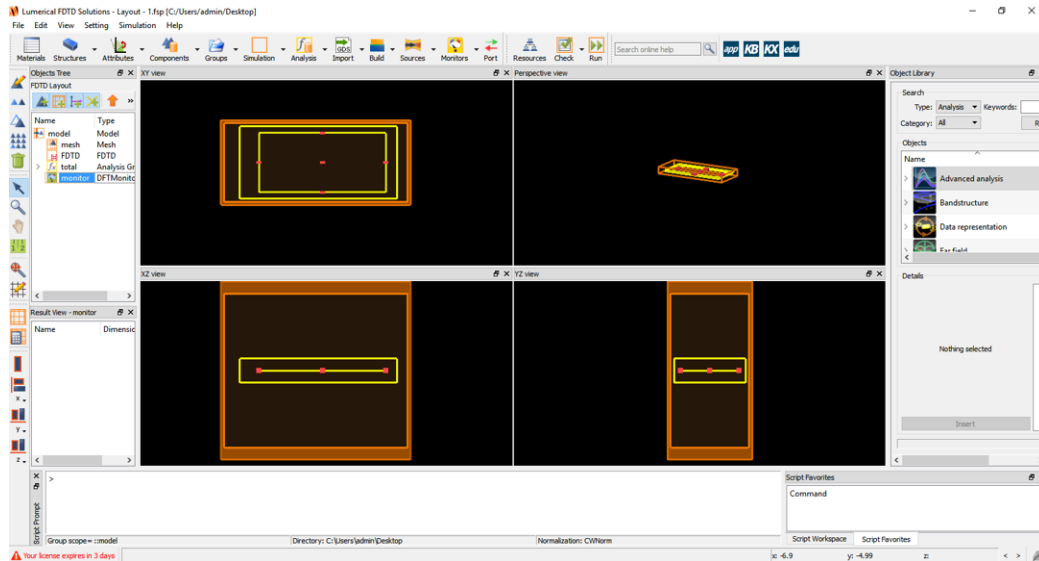
คำสั่ง *Frequency - domain field and power* คือคำสั่งที่ถูกใช้เพื่อกำหนดให้โปรแกรม Lumerical ทำการเก็บข้อมูลค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโลหะที่เคลือบบนโครงสร้างแบบจำลองในแต่ละบริเวณบนผิวของแบบจำลอง ขั้นตอนของการใช้คำสั่ง *Frequency - domain field and power* แสดงดังรูปที่ 3.30 (ก) ถึง (ค)



(ก) การเปิดคำสั่ง *Frequency – domain field and power* โดยคลิกที่ *Monitors*



(ข) ขนาดของ *Frequency – domain field and power* ในแนวแกน x , y และ z โดยไอคอนกลุ่ม (1) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดกำเนิดของขอบเขตในแต่ละแกน ไอคอนกลุ่มที่ (2) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดสิ้นสุดของขอบเขตในแต่ละแกน



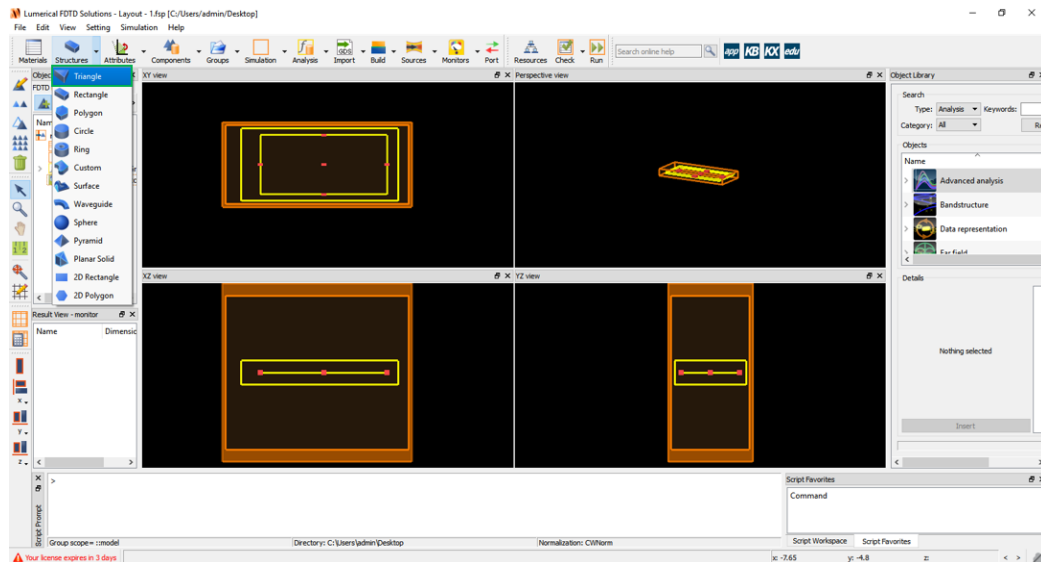
(ค) รูปทรงของผิวปิดซึ่งถูกสร้างด้วยคำสั่ง *Frequency - domain field and power*

รูปที่ 3.30 การสร้างผิวปิดสำหรับตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยคำสั่ง *Frequency - domain field and power* ภายในโปรแกรม *Lumerical*

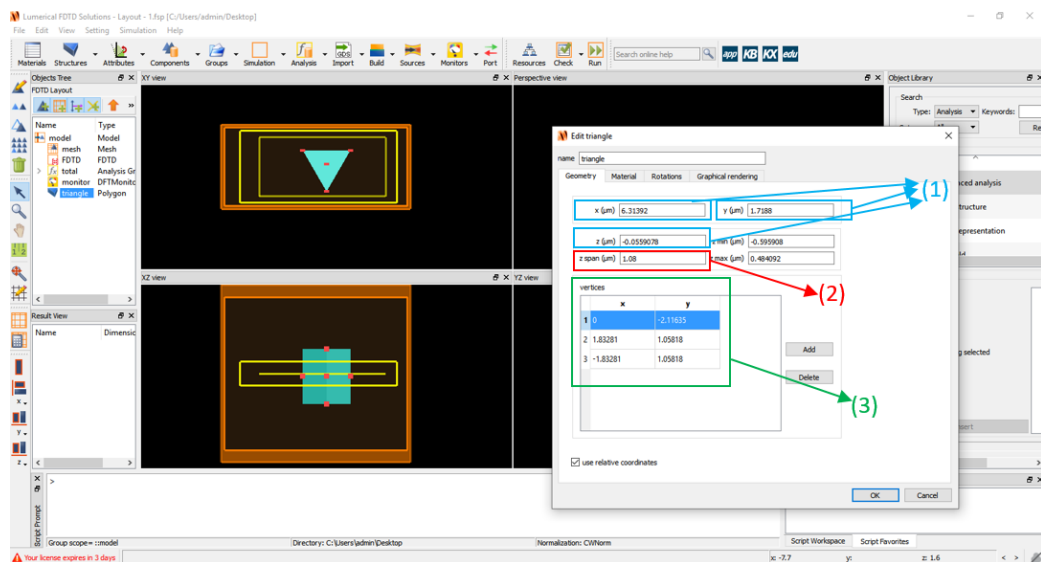
3.2.2.3 คำสั่งกำหนดการสร้างวัตถุ

แบบจำลองของโครงสร้างปีกผีเสื้อและสารเคลือบในงานวิจัยชิ้นนี้สามารถถูกแบ่งออกได้เป็น 3 รูปทรงหลักอันได้แก่รูปทรงสามเหลี่ยม หลายเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถสร้างได้จากคำสั่งเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้คือ คำสั่ง *Triangle*, คำสั่ง *Polygons*, คำสั่ง *Rectangle* และเงื่อนไขชนิดของวัสดุถูกกำหนดโดยคำสั่งกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ คำสั่งทั้งสี่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

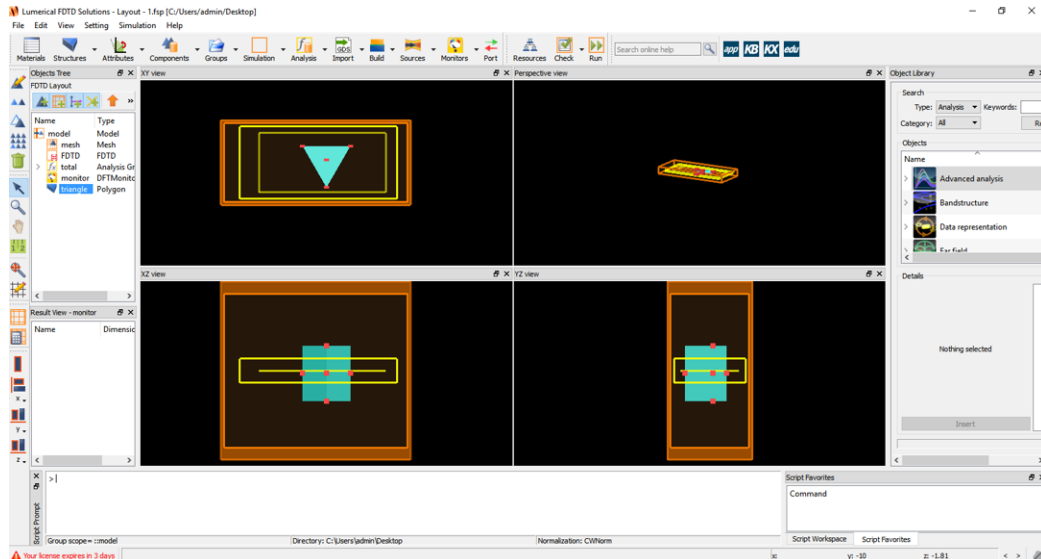
คำสั่ง *Triangle* คือคำสั่งที่ถูกใช้เพื่อสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างปีกผีเสื้อในส่วนของ *Ridge* ส่วนประกอบดังกล่าวเป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อแบบจำลองเพราะเป็น บริเวณที่มีลักษณะเป็น *periodic structure* ซึ่งคาดว่าน่าจะก่อให้เกิดผลของอันตรกิริยาในการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าสูง ขั้นตอนของการใช้คำสั่ง *Triangle* แสดงดังรูปที่ 3.31 (ก) ถึง (ค)



(ก) การเปิดคำสั่ง Triangle จากไอคอน Structure

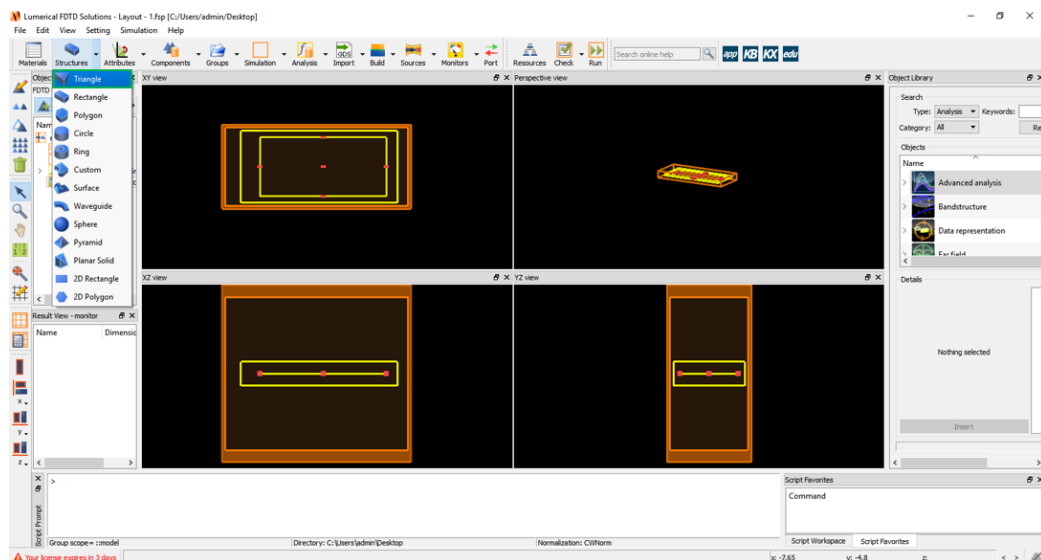


(ข) ทำการกำหนดขนาดโครงสร้างของแบบจำลองดังต่อไปนี้ จุดกำเนิดในแกน x และ y ถูกกำหนดโดยไอคอนกลุ่มที่ (1), ขนาดความแกน z ถูกกำหนดโดยไอคอนกลุ่มที่ (2) และจุดยอดซึ่งเป็นองค์ประกอบของรูปสามเหลี่ยมถูกกำหนดโดยไอคอนกลุ่มที่ (3)

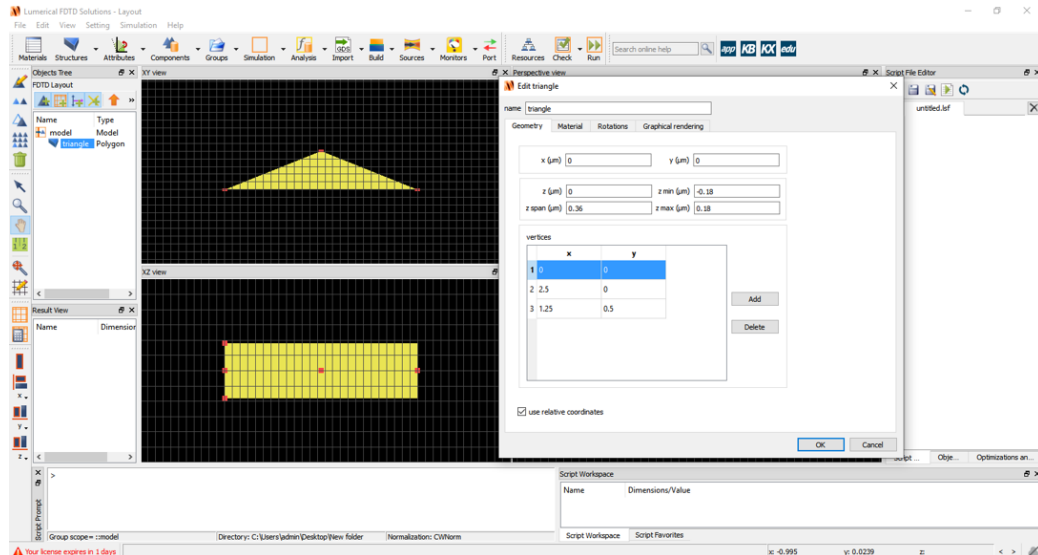


(ค) รูปทรงของ Triangle ที่ภายในโปรแกรม Lumerical
รูปที่ 3.31 การสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมจากคำสั่ง Triangle

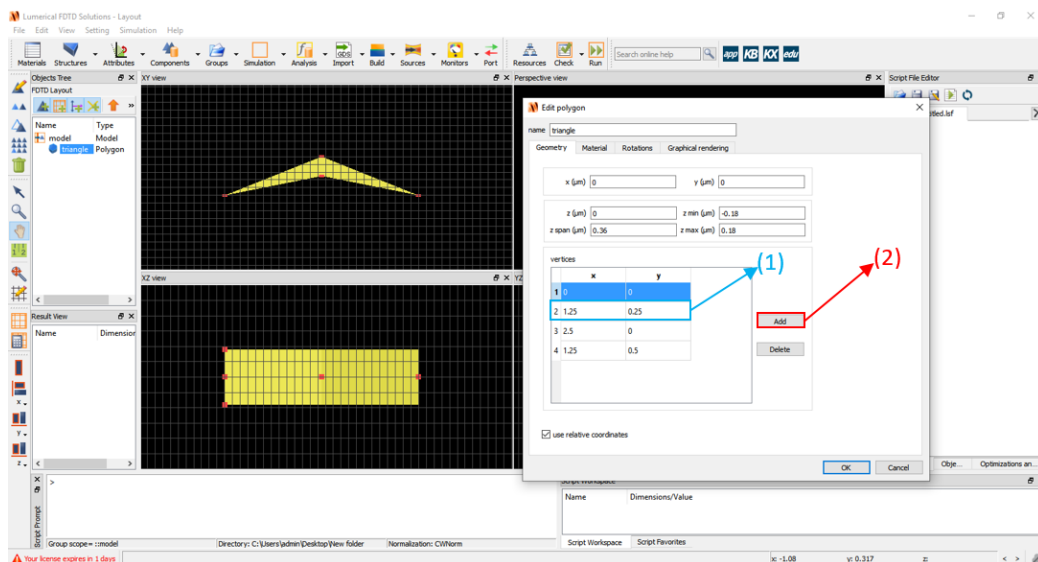
คำสั่ง Polygons คือคำสั่งที่ถูกใช้เพื่อสร้างรูปทรงหลายเหลี่ยมซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างแบบจำลองในส่วนของสารที่เคลือบอยู่บน Ridge โดยส่วนประกอบดังกล่าวเป็นส่วนที่กระทำอันตรกิริยาในการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขั้นตอนของการใช้คำสั่ง Polygons แสดงดังรูปที่ 3.32 (ก) ถึง (ค)



(ก) การเปิดคำสั่ง Triangle จากไอคอน Structure



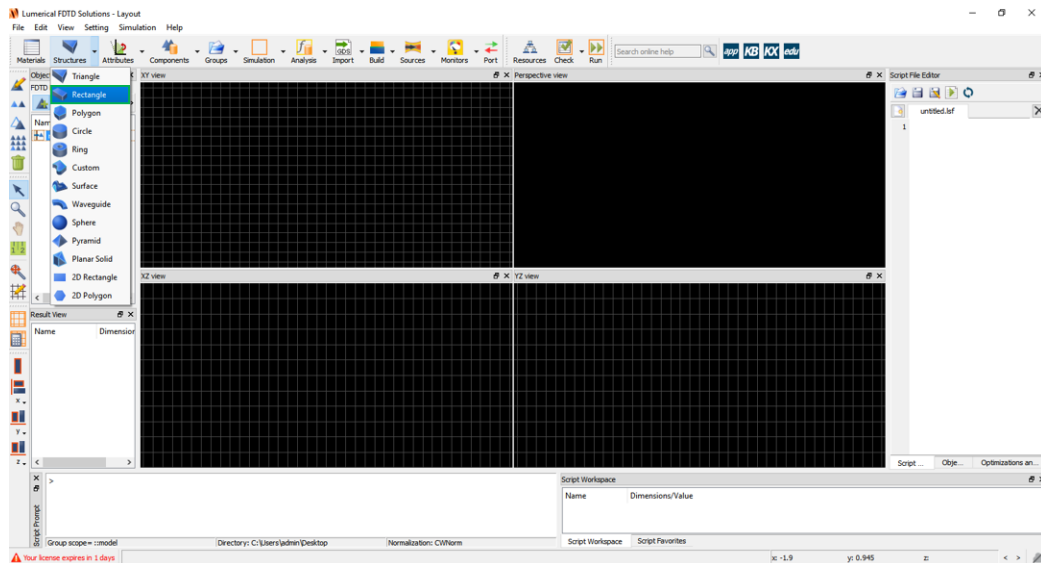
(ข) รูปทรงของ Triangle ที่จุดกำเนิด $x, y,$ และ z ที่ $(0,0,0)$ สามารถพัฒนาต่อไปเป็นรูปทรง Polygons ได้



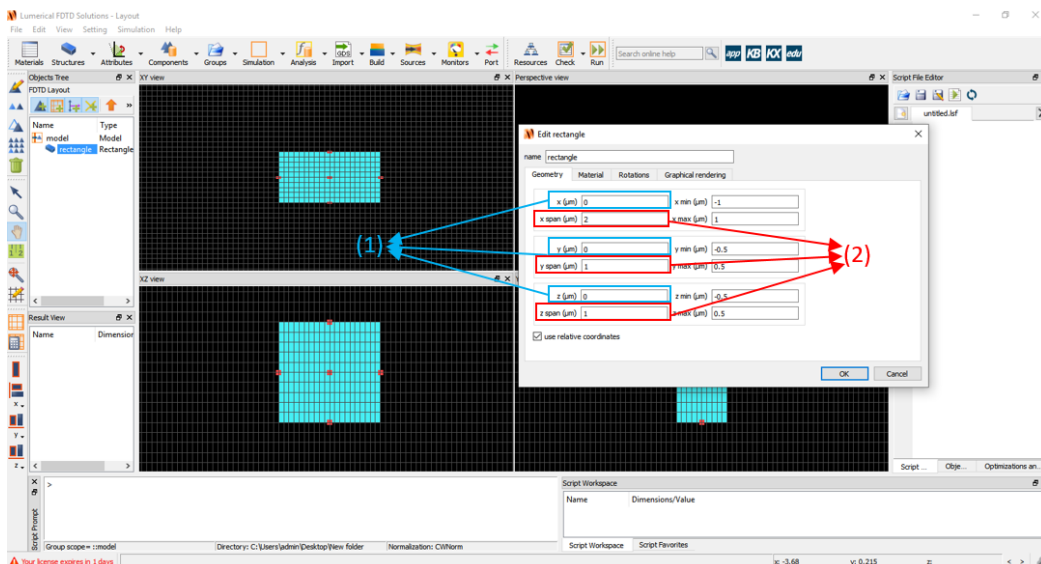
(ค) ตำแหน่งของจุดซึ่งเป็นองค์ประกอบของรูปหลายเหลี่ยมถูกกำหนดโดยไอคอนกลุ่มที่ (1) และจำนวนของจุดซึ่งเป็นองค์ประกอบของรูปหลายเหลี่ยมถูกกำหนดโดยไอคอนกลุ่มที่ (2)

รูปที่ 3.32 การสร้างรูปทรงหลายเหลี่ยมจากคำสั่ง Polygons

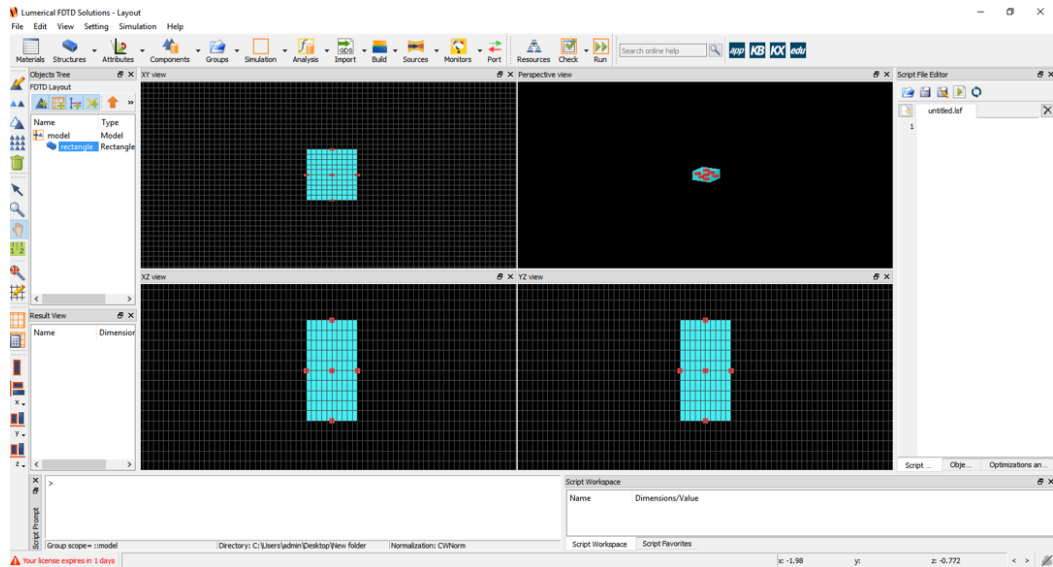
คำสั่ง *Rectangle* คือคำสั่งที่ถูกใช้เพื่อสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างปีกผีเสื้อในส่วนของ *Cross-ribs* และสารที่เคลือบพื้นผิวดังกล่าวซึ่งทั้งสององค์ประกอบล้วนแล้วแต่เป็นส่วนฐานของโครงสร้างปีกผีเสื้อ ขั้นตอนของการใช้คำสั่ง *Rectangle* แสดงดังรูปที่ 3.33 (ก) ถึง (ค)



(ก) การเปิดคำสั่ง Rectangle จากไอคอน Structure



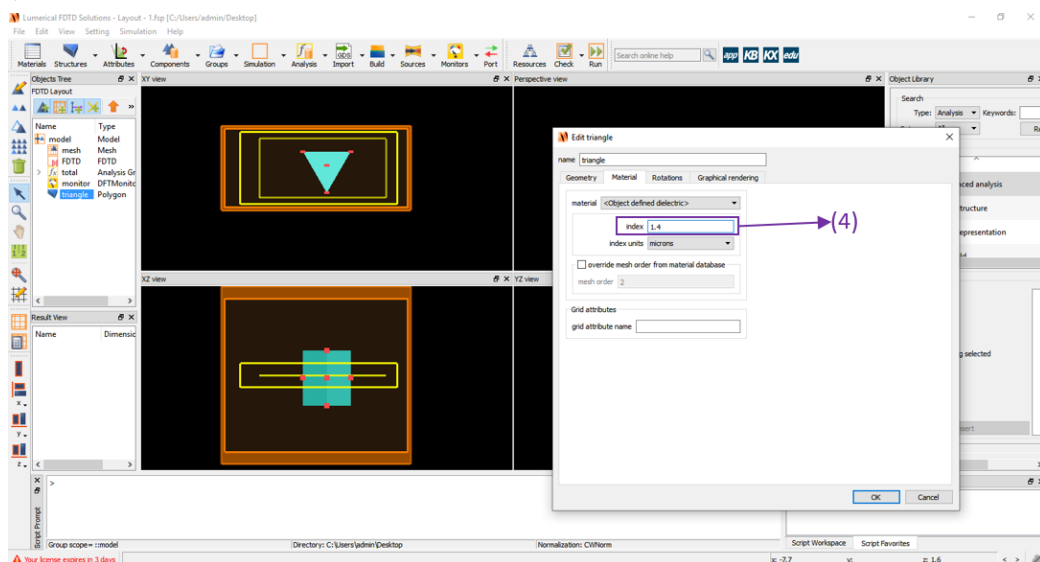
(ข) ขนาดของรูปทรงสี่เหลี่ยมในแนวแกน x, y และ z โดยไอคอนกลุ่ม (1) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดกำเนิดของขอบเขตในแต่ละแกน ไอคอนกลุ่มที่ (2) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดสิ้นสุดของขอบเขตในแต่ละแกน



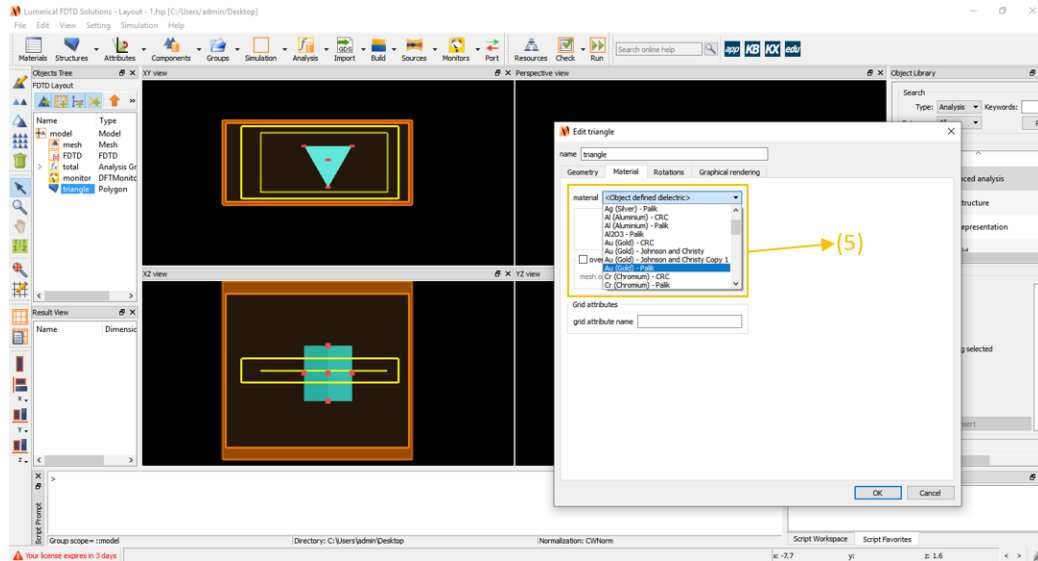
(ค) รูปทรงของ Rectangle ที่ภายในโปรแกรม Lumerical

รูปที่ 3.33 การสร้างรูปทรงสามเหลี่ยมจากคำสั่ง Rectangle

คำสั่งกำหนดคุณสมบัติของวัสดุคือ คำสั่งที่ถูกใช้เพื่อกำหนดคุณสมบัติทางแสงให้แก่วัตถุที่ถูกสร้างจากทั้งสามคำสั่งที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ อาทิเช่นค่าดัชนีหักเหแสงสำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและค่า dielectric constant สำหรับวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า วัสดุในงานวิจัยชิ้นนี้ถูกกำหนดค่าคุณสมบัติเป็น 3 ลักษณะคือค่าดัชนีหักเหมีค่าเป็น 1.55 สำหรับโครงสร้างปีกผีเสื้อค่า dielectric constant เป็น Au (Gold) – Palik และ Pd (Palladium) – Palik สำหรับสารที่เคลือบบนโครงสร้างปีกผีเสื้อ ขั้นตอนของการใช้คำสั่งกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแสดงดังรูปที่ 3.34 (ก) และ (ข)



(ก) การกำหนดค่าดัชนีหักเหแสงสำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนถูกกำหนดโดยไอคอนที่ (4)

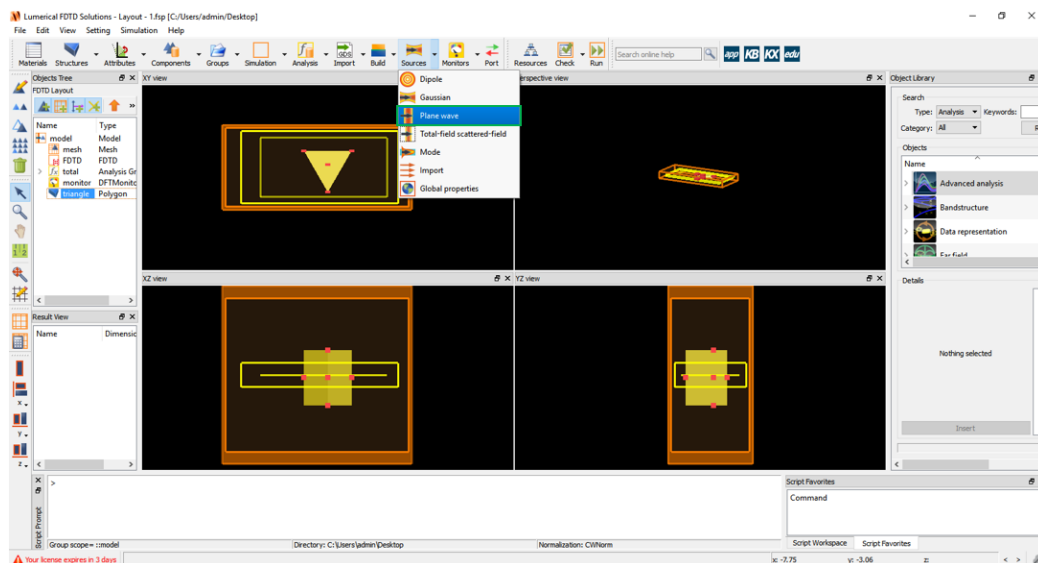


(ข) การกำหนดค่า dielectric constant สำหรับวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าถูกกำหนดโดย ไอคอนในกลุ่มที่ (5) ซึ่งเป็นตารางค่าคงที่ภายในโปรแกรมซึ่งอ้างอิงจากฐานข้อมูลผลการทดลองที่ผ่านมา

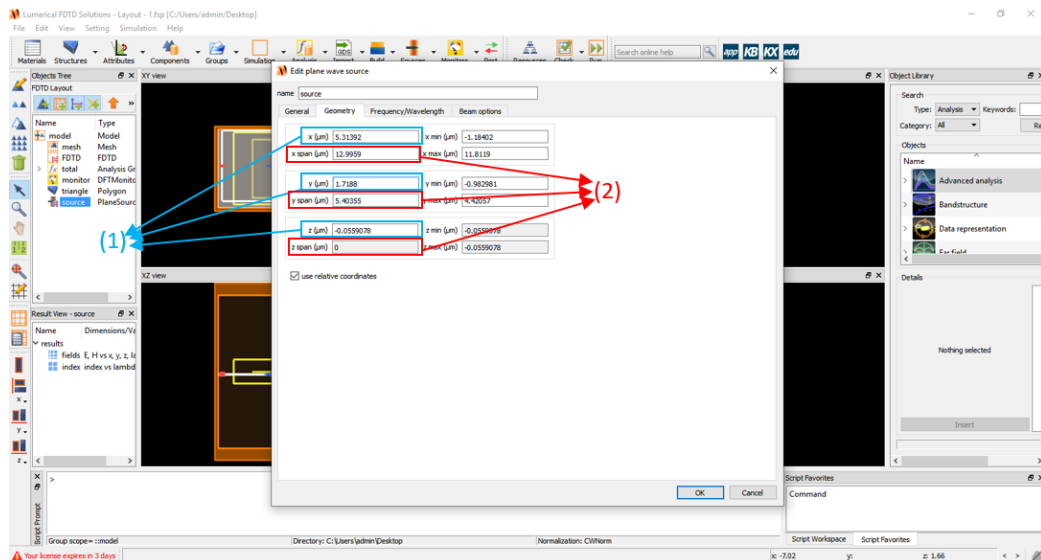
รูปที่ 3.34 การกำหนดกำหนดคุณสมบัติของวัสดุสำหรับองค์ประกอบของแบบจำลอง

3.2.2.4 คำสั่งกำหนดแหล่งกำเนิดคลื่น

คำสั่งที่ใช้เพื่อกำหนดค่าขนาดและเงื่อนไขของแหล่งกำเนิดคลื่น อาทิเช่น ชนิดของหน้าคลื่น ชนิดของการ Polarization ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขนาดหน้าคลื่น ขนาดแอมพลิจูด และความยาวของคลื่น ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการศึกษาปรากฏการณ์ LSPR ที่เกิดกับโลหะที่เคลือบบนโครงสร้างพิกมีเลื้อนในแบบจำลองขั้นตอนของการใช้คำสั่ง Advanced analysis แสดงดังรูปที่ 3.35 (ก) ถึง (จ)

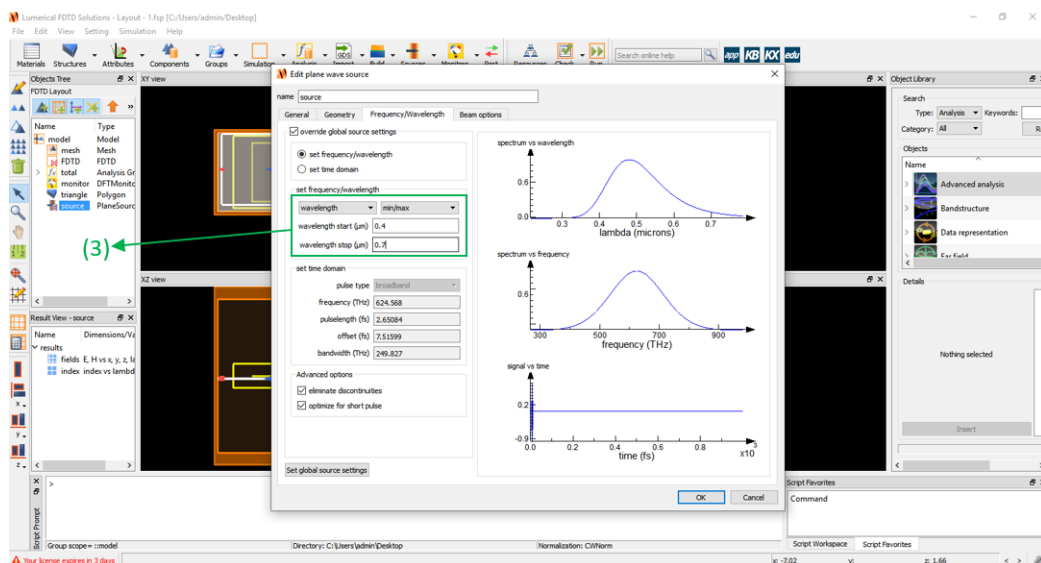


(ก) การเปิดคำสั่งกำหนดแหล่งกำเนิดคลื่นโดยคลิกที่ Sources เลือก Plane wave



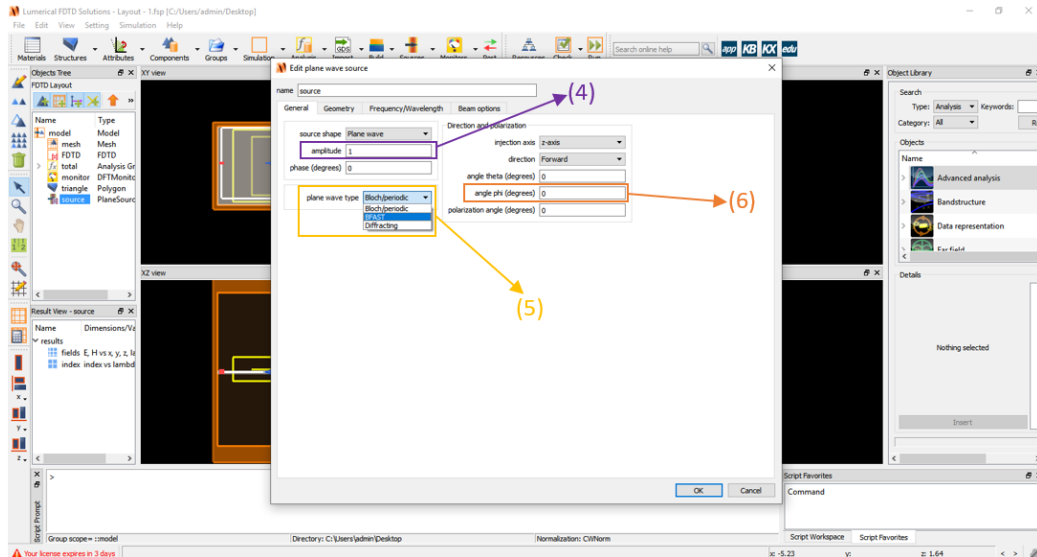
(ข) ขนาดของหน้าคลื่นในแนวแกน x , y และจุดกำเนิดในแกน z ถูกกำหนดโดยไอคอนกลุ่ม

(1) ไอคอนกลุ่มที่ (2) ถูกใช้เพื่อกำหนดจุดสิ้นสุดของขอบเขตในแต่ละแกน

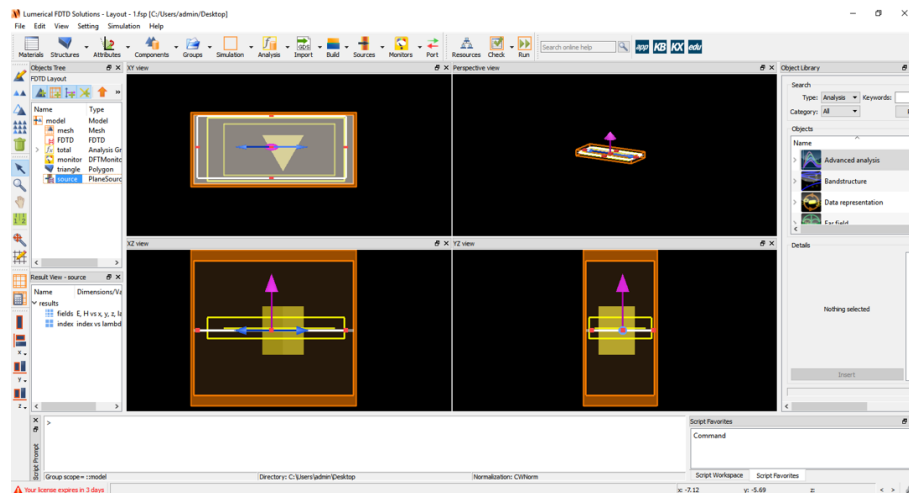


(ค) ช่วงค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในการจำลองการทดลองถูก

กำหนดโดยไอคอนในกลุ่มที่ (3)



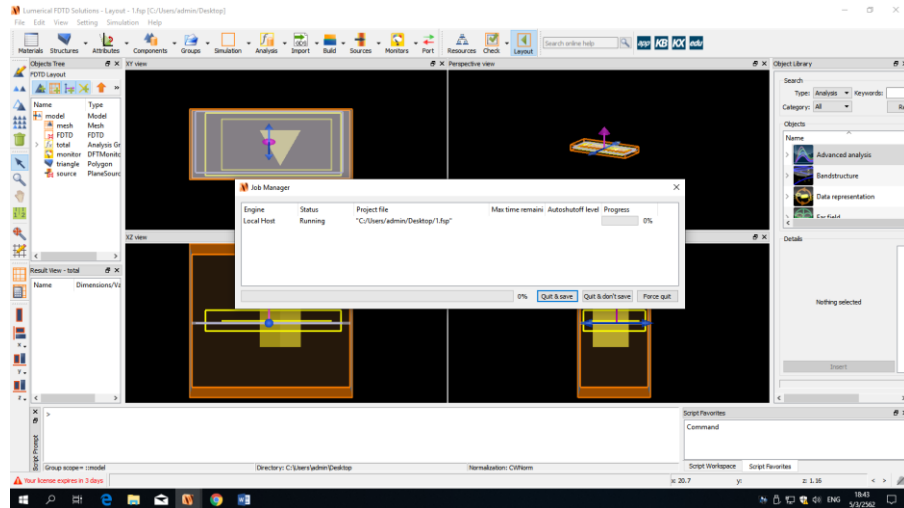
(ง) ขนาดแอมพลิจูดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ชนิดของหน้าคลื่นและชนิดของการ Polarization ถูกกำหนดโดยไอคอนในกลุ่มที่ (4) ถึง (6) ตามลำดับ



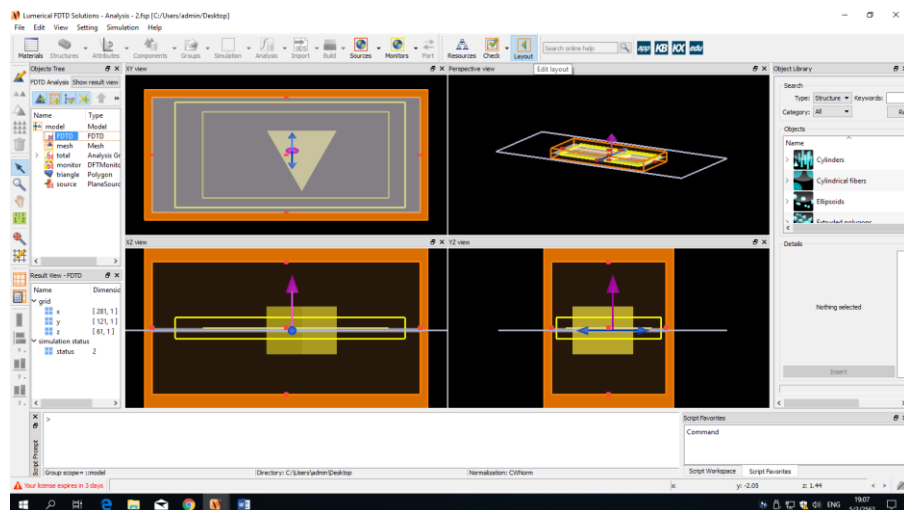
(จ) ระบายของแหล่งกำเนิดคลื่นที่ถูกสร้างภายในโปรแกรม Lumerical รูปที่ 3.35 แหล่งกำเนิดคลื่นจากคำสั่ง Plane wave

3.2.3 การจำลองการทดลองในโปรแกรม Lumerical

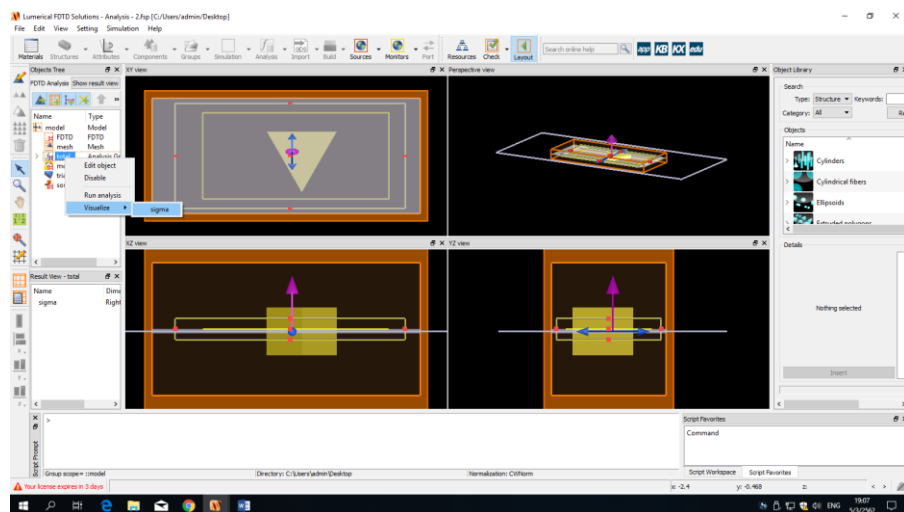
ภายหลังการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการจำลองการทดลองภายในโปรแกรม Lumerical เสร็จสิ้น ระบบสามารถเริ่มทำการจำลองการทดลองได้ภายใต้ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 3.36 (ก) ถึง (ด)



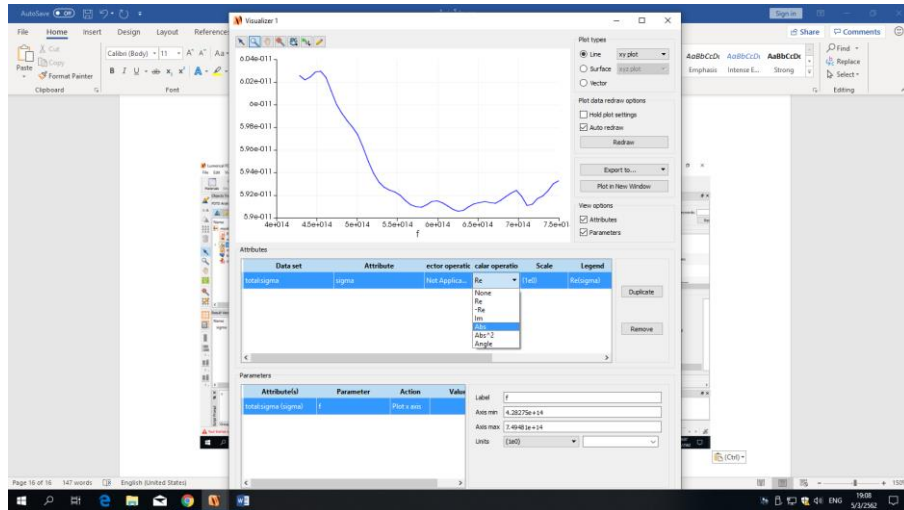
(ก) การเริ่มกระบวนการจำลองการทดลองภายในโปรแกรม Lumerical



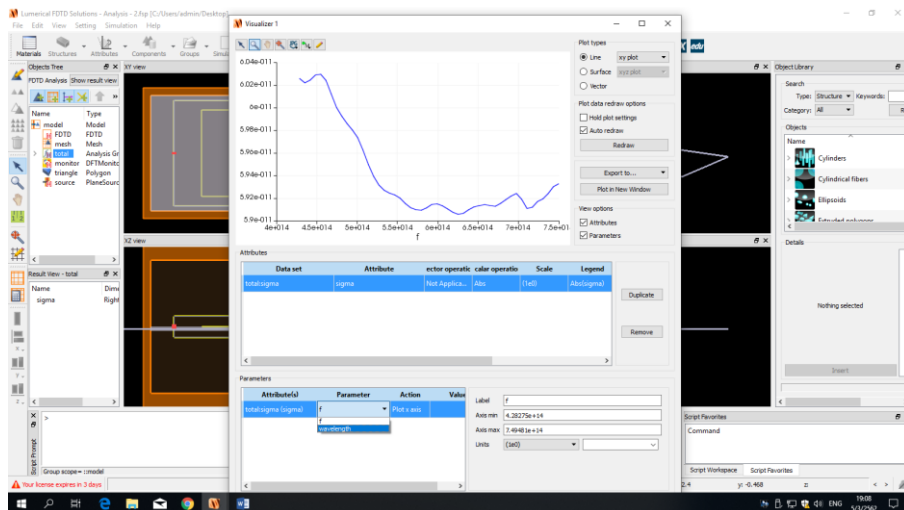
(ข) กระบวนการจำลองการทดลองในโปรแกรม Lumerical เสร็จสิ้น



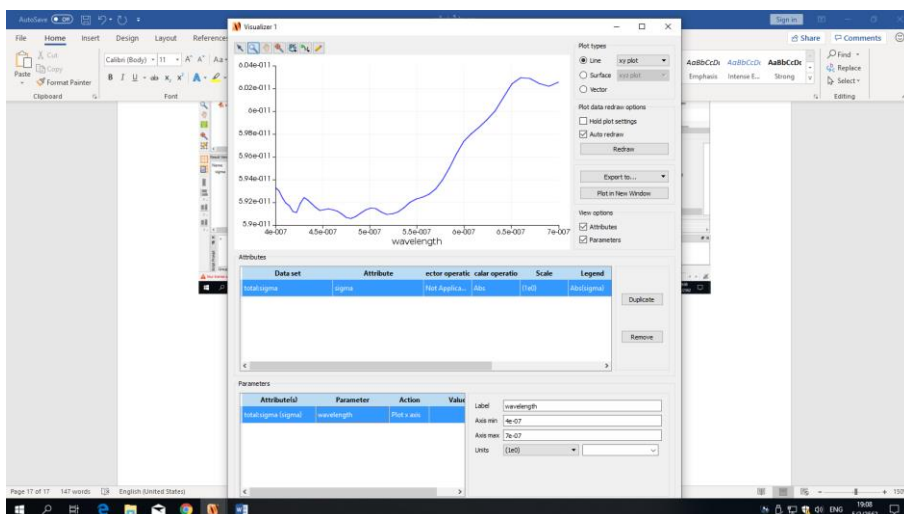
(ค) การบันทึกผลการจำลองการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



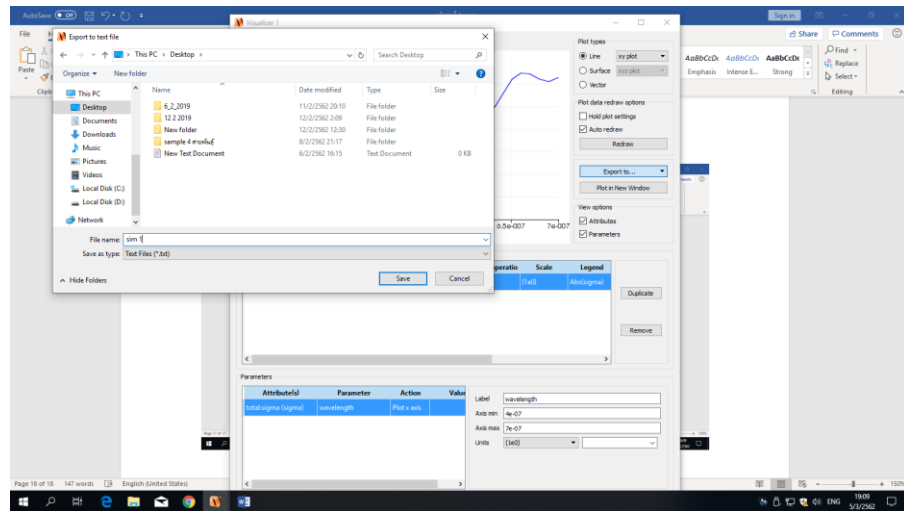
(ง) การตั้งค่าบันทึกผลค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



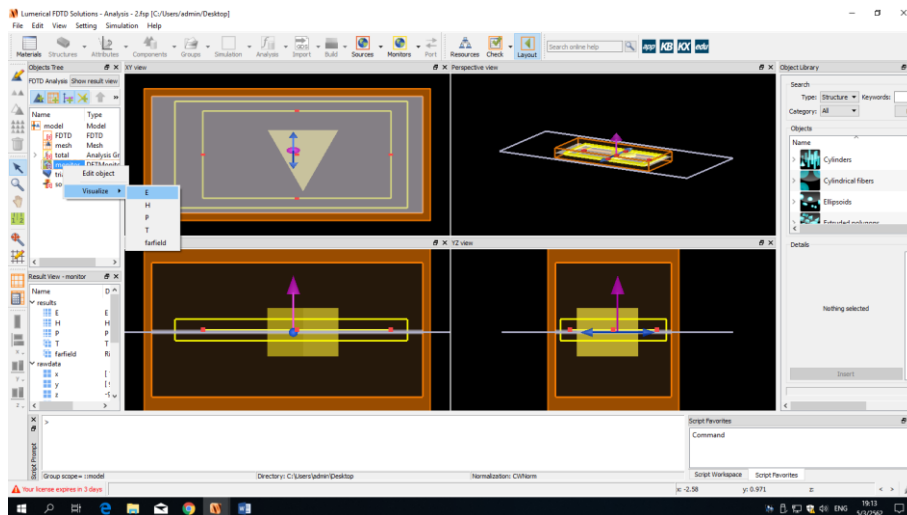
(จ) การตั้งค่าบันทึกผลค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงกับความยาวคลื่น



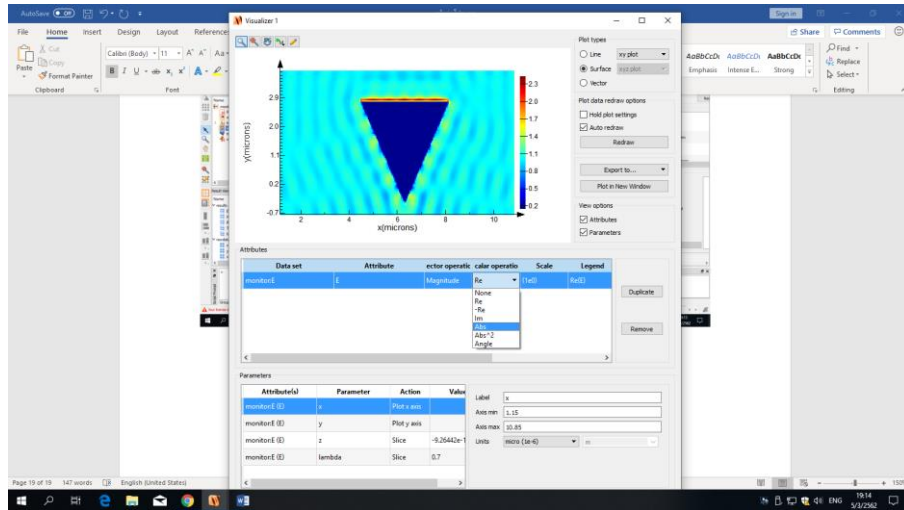
(ฉ) ผลค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



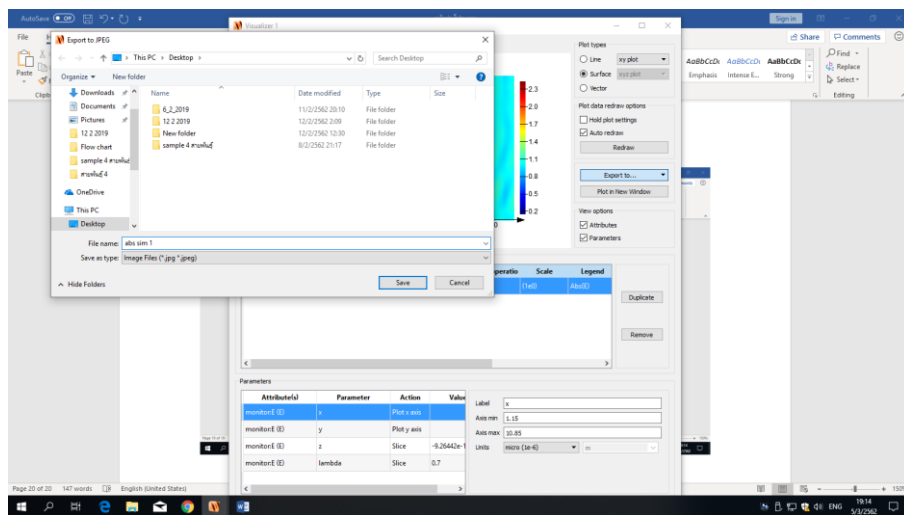
(ข) การเลือกตำแหน่งบันทึกผลค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



(จ) การตั้งค่าบันทึกผลค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



(จ) ผลค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



(ข) การเลือกตำแหน่งบันทึกผลค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
รูปที่ 3.36 ขั้นตอนการจำลองการทดลอง

บทที่ 4

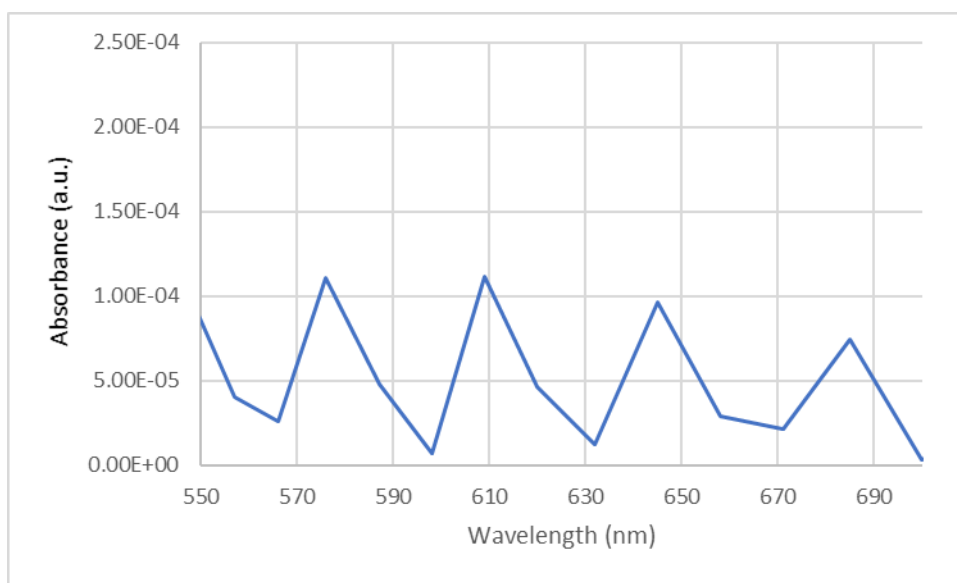
ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองการเกิดปรากฏการณ์ Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) ซึ่งพิจารณาจากอันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านแสงขาว ในรูปแบบการตกกระทบแบบ TE mode และ TM mode กับโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้งสามสายพันธุ์ อันได้แก่ CPen , DG และ CPom ในแต่ละเงื่อนไขนี้ ปรากฏจากการเคลือบโลหะ (Bare) ถูกเคลือบด้วยโลหะ Au หรือ Pd บนโครงสร้างปีกผีเสื้อในรูปแบบทรงหัวแหลมและรูปแบบทรงหัวตัด โดยผลการทดลองสามารถถูกจำแนกประเภทได้เป็น 2 รูปแบบคือผลการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างปีกผีเสื้อและผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างปีกผีเสื้อซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่นแสง แสดงดังต่อไปนี้

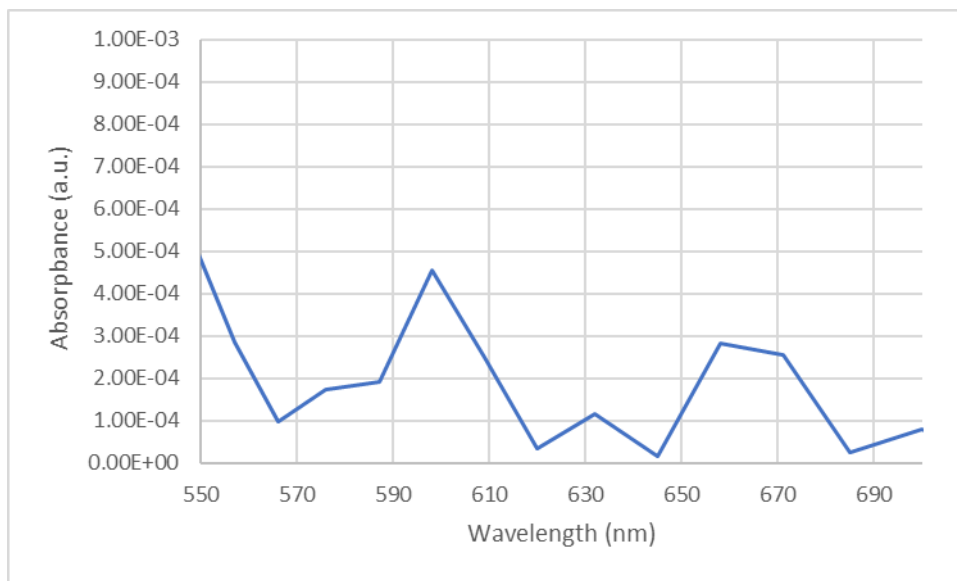
4.1 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์

4.1.1 ผลการจำลองการทดลองของสายพันธุ์ Cetbosia Pentbesilea (CPen)

4.1.1.1 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปรากฏจากการเคลือบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ปรากฏจากการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode ถูกแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ภายใต้เงื่อนไขปรากฏจากการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode



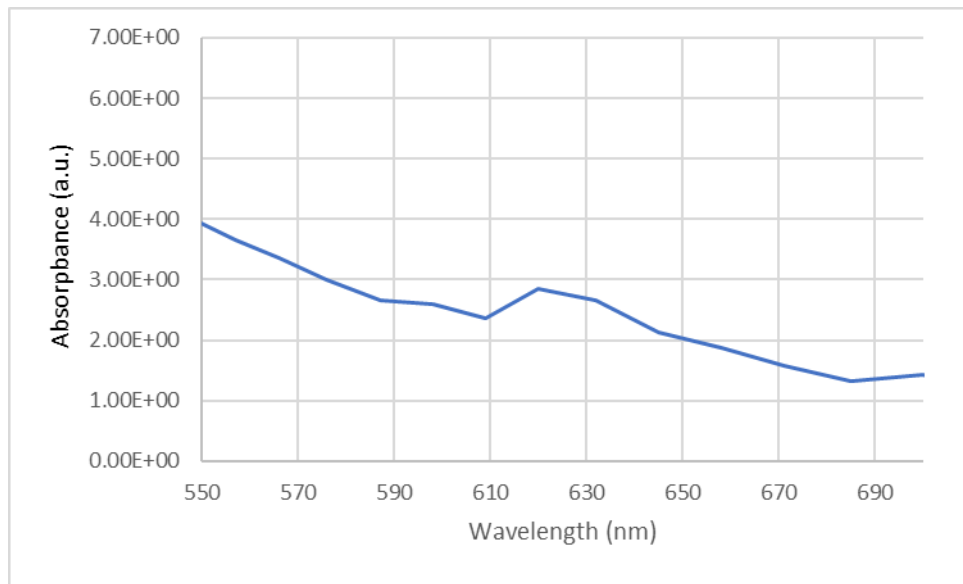
รูปที่ 4.2 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.1.2 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลม

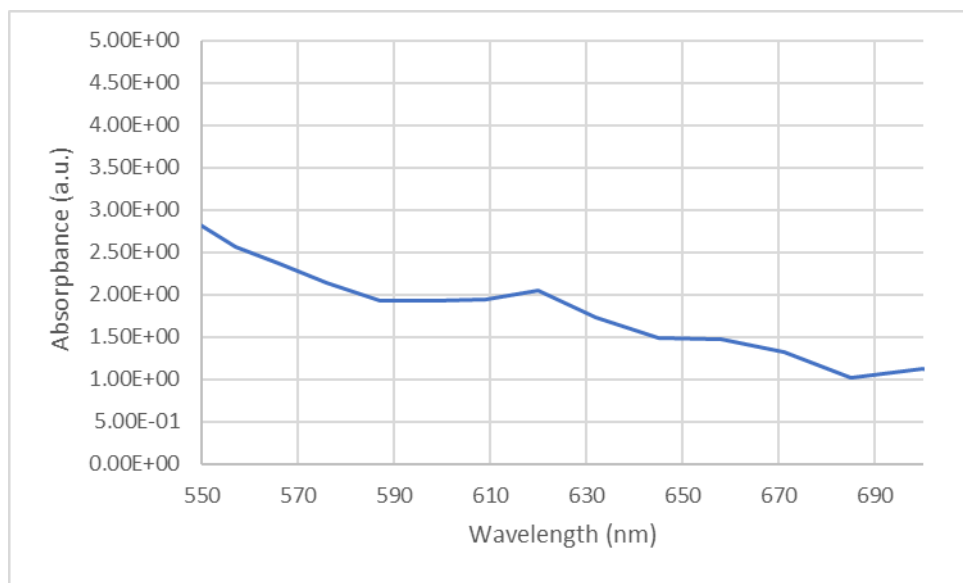
ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

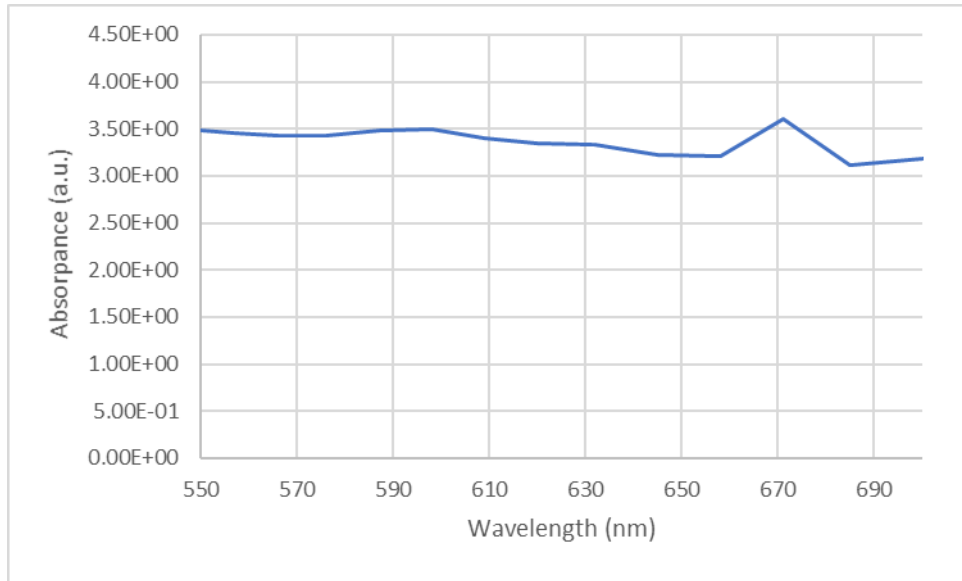
ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



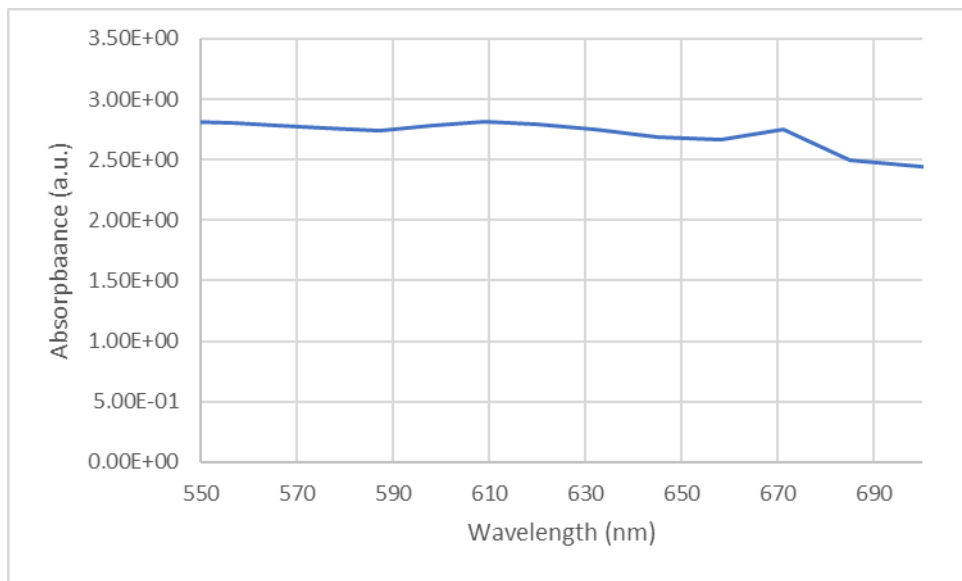
รูปที่ 4.3 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.4 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.5 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode



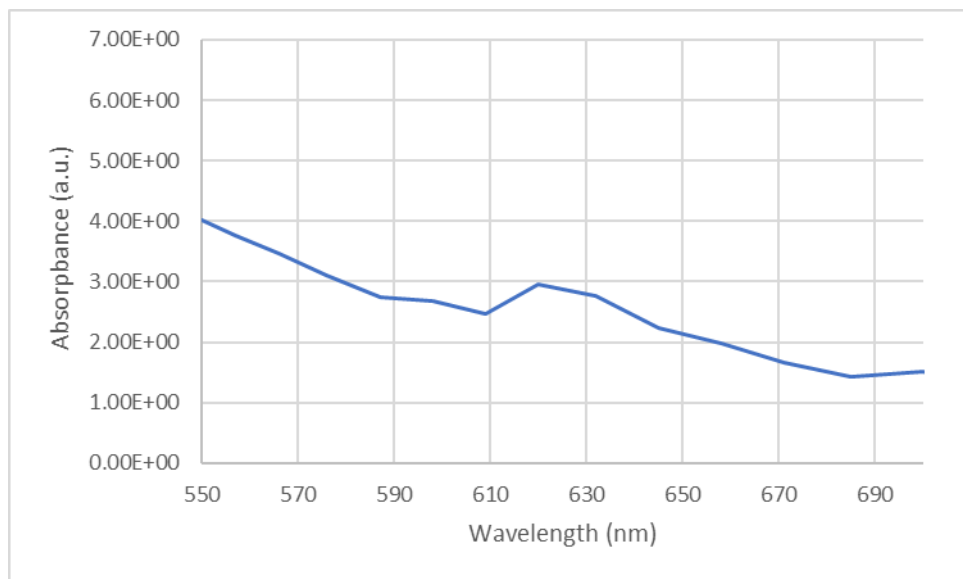
รูปที่ 4.6 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.1.3 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัด

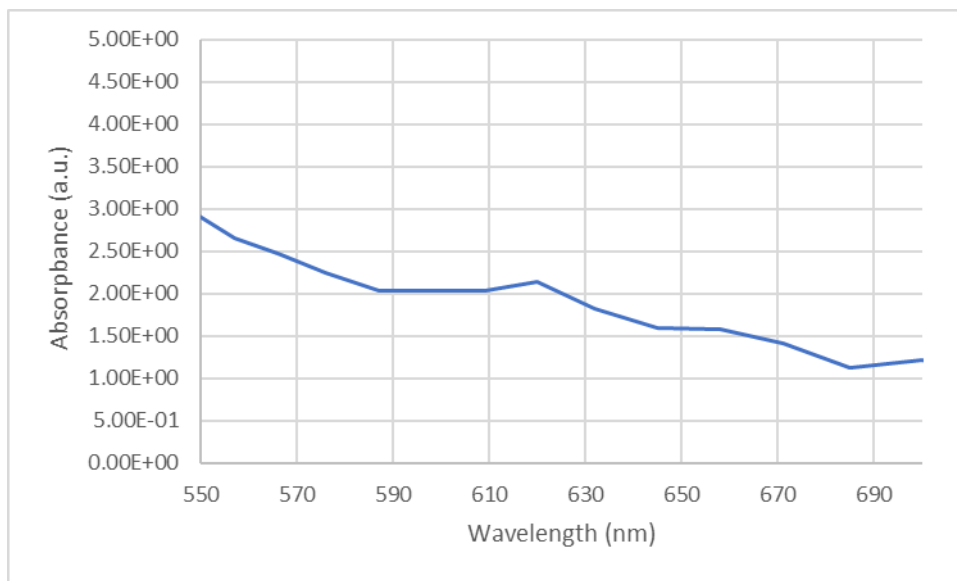
ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

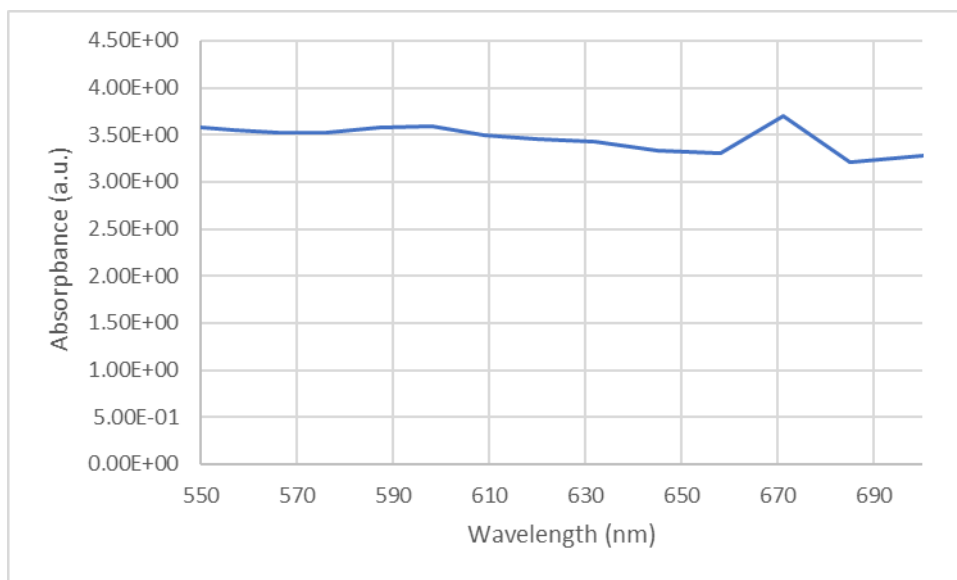
ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



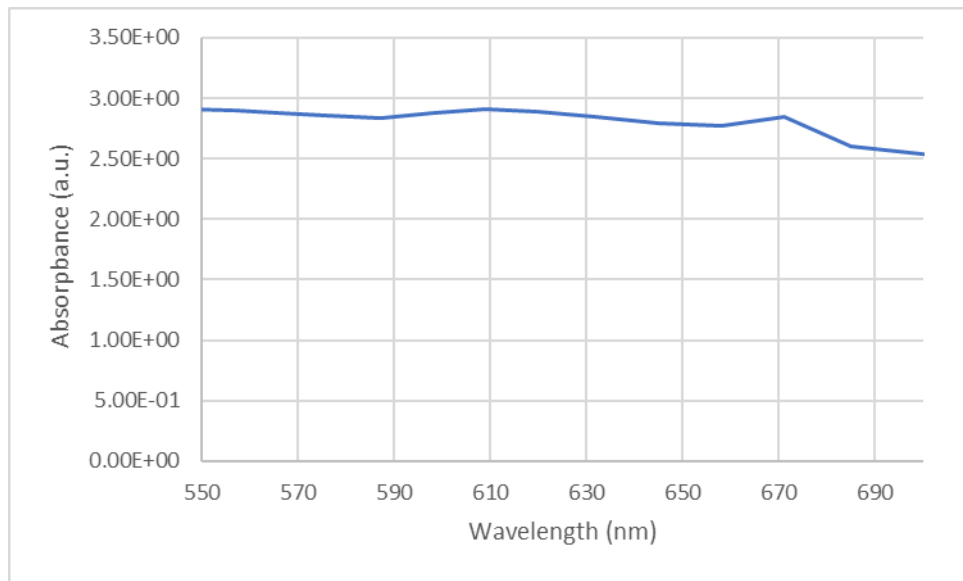
รูปที่ 4.7 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.8 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TE mode



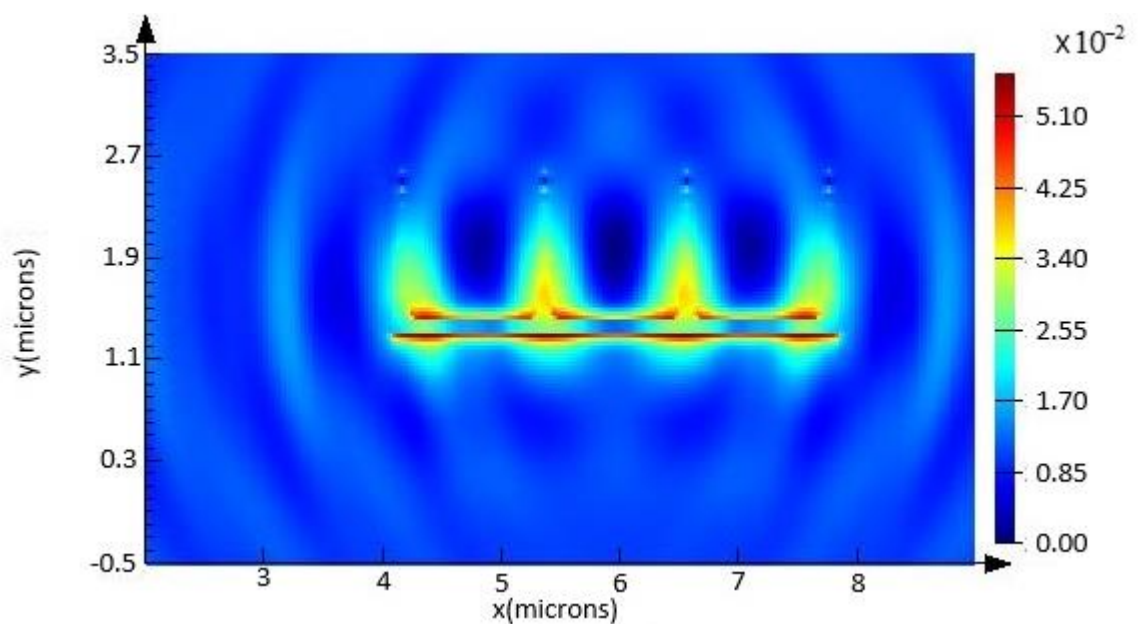
รูปที่ 4.9 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode



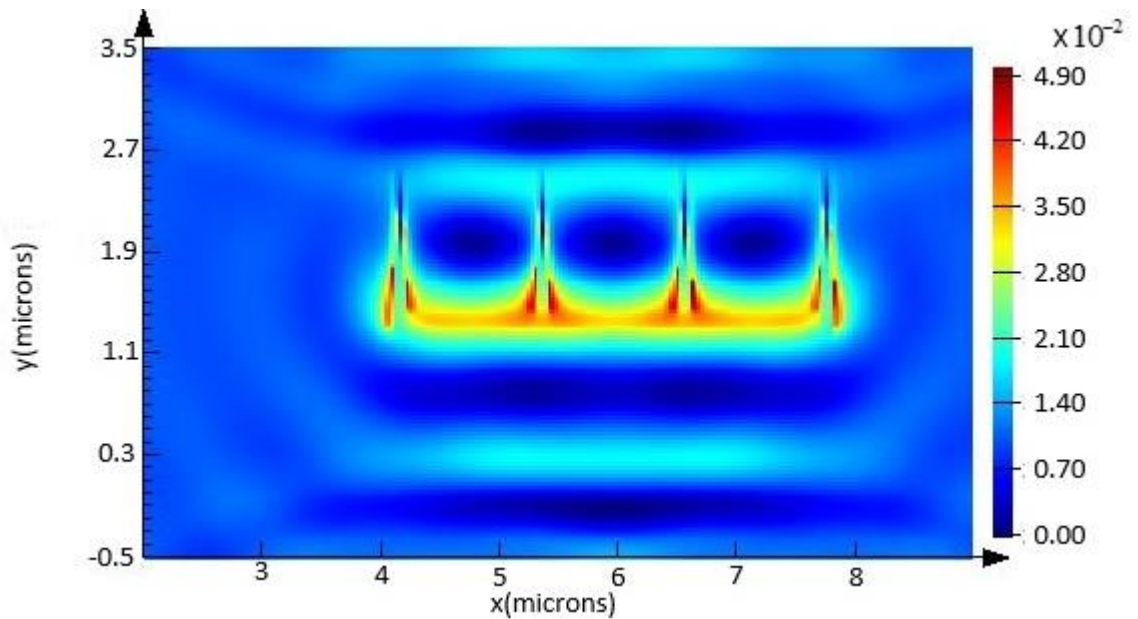
รูปที่ 4.10 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.1.4 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการเคลือบโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ปราศจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode

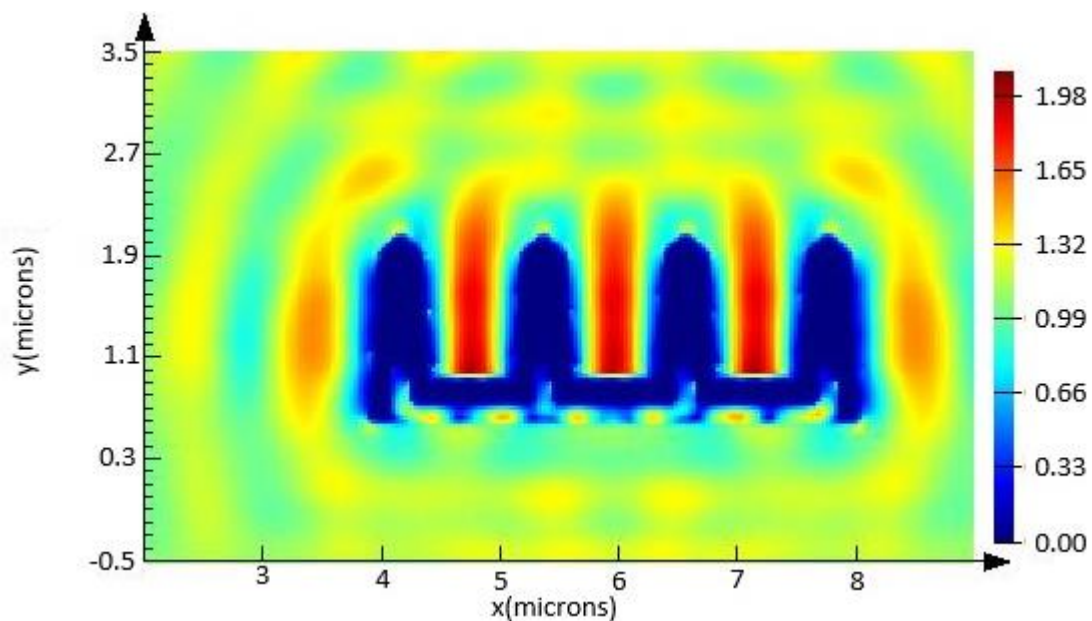


รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TE mode

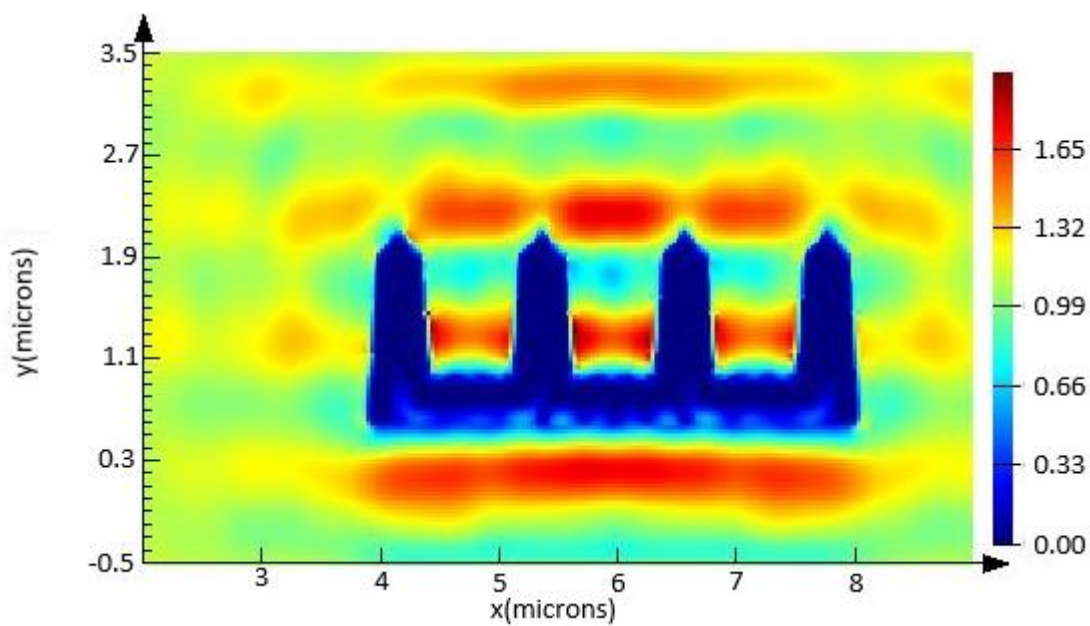
4.1.1.5 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลม ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

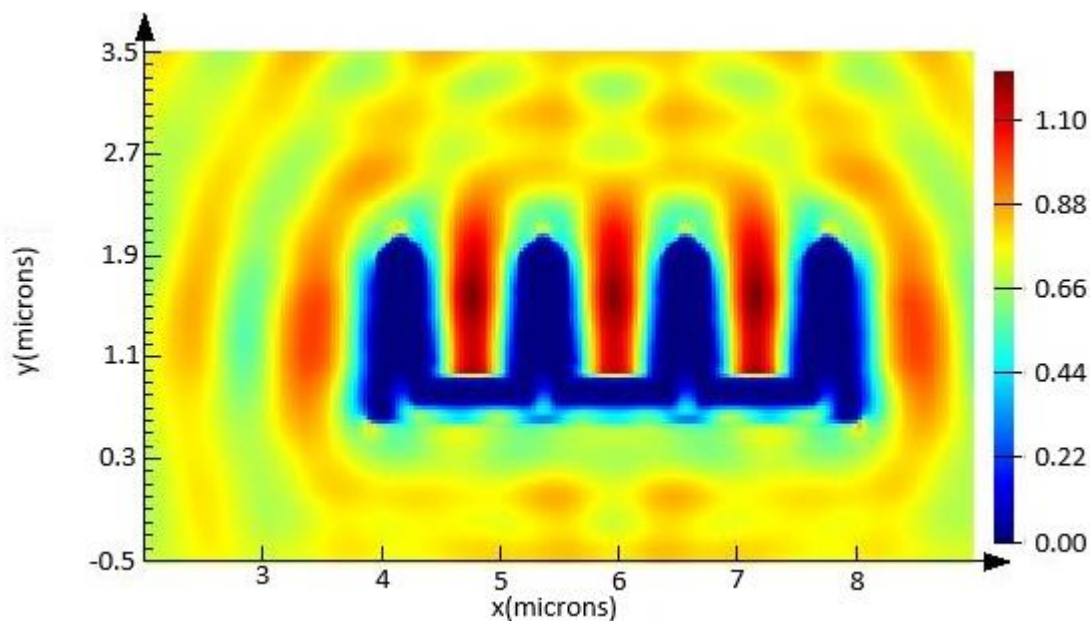
ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



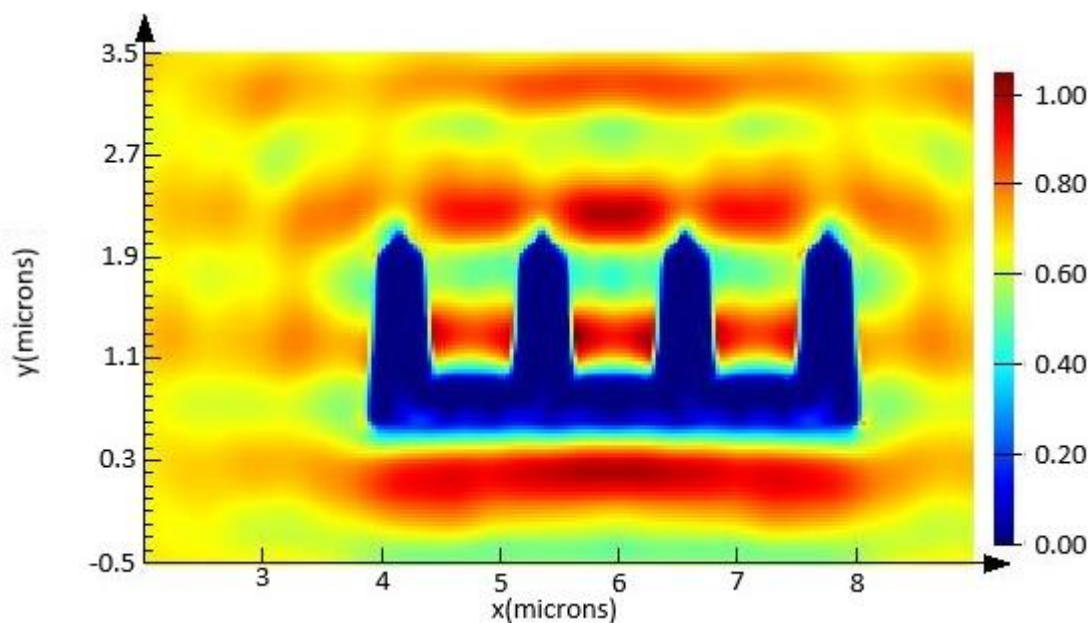
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode

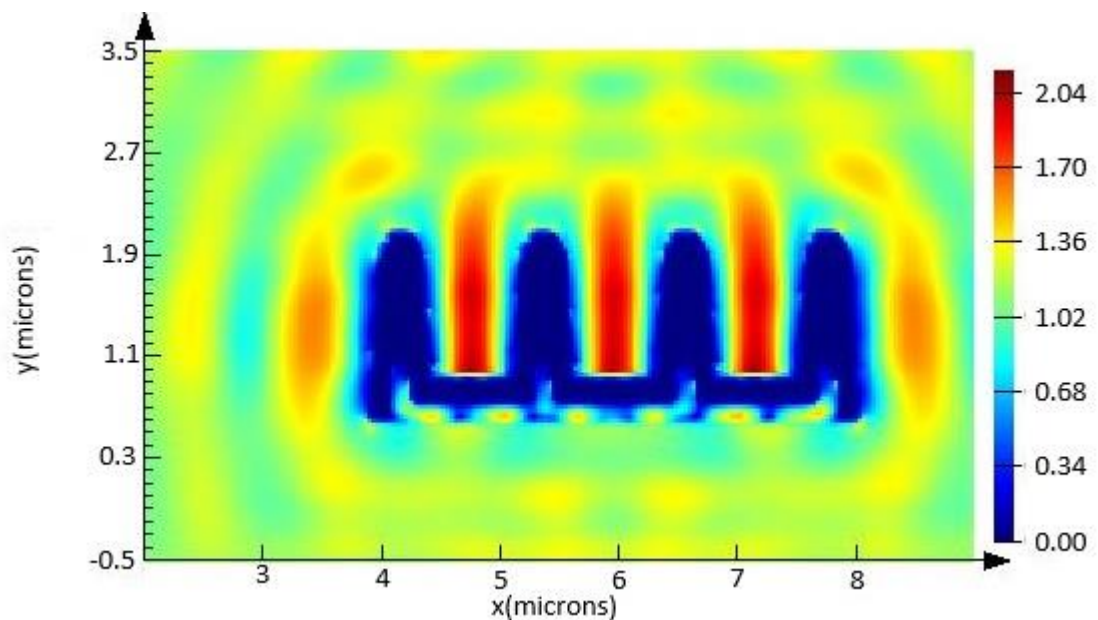


รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

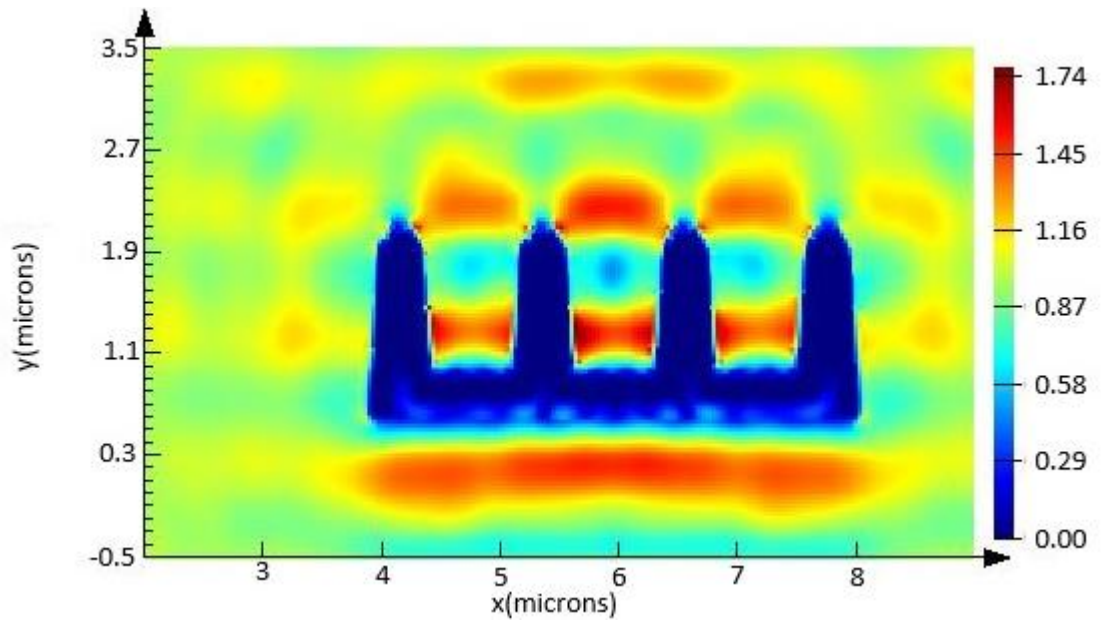
4.1.1.6 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

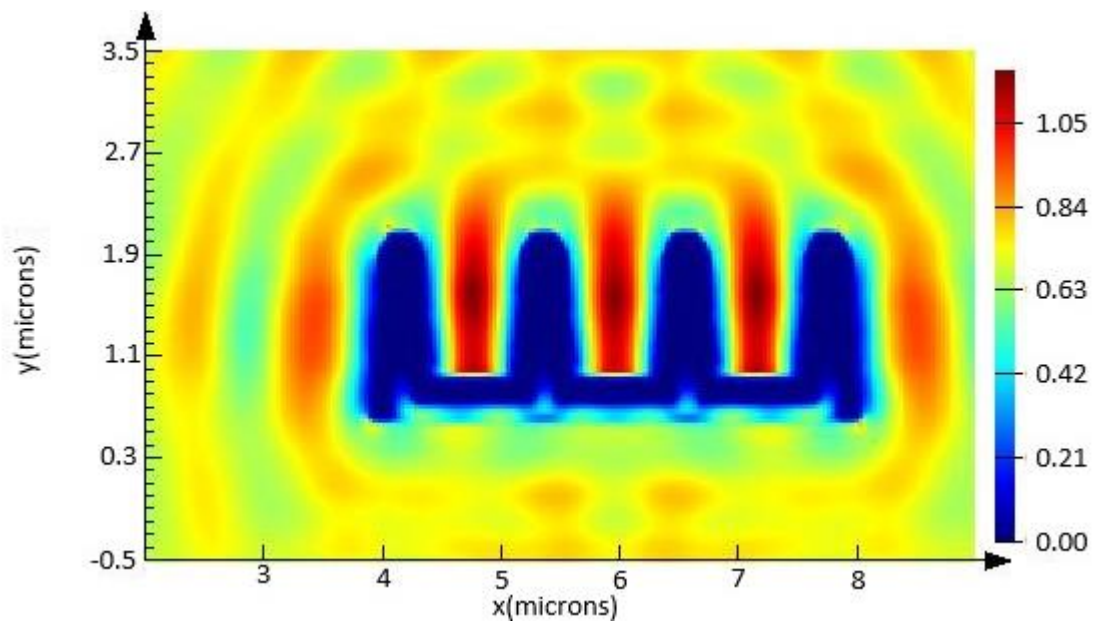
ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



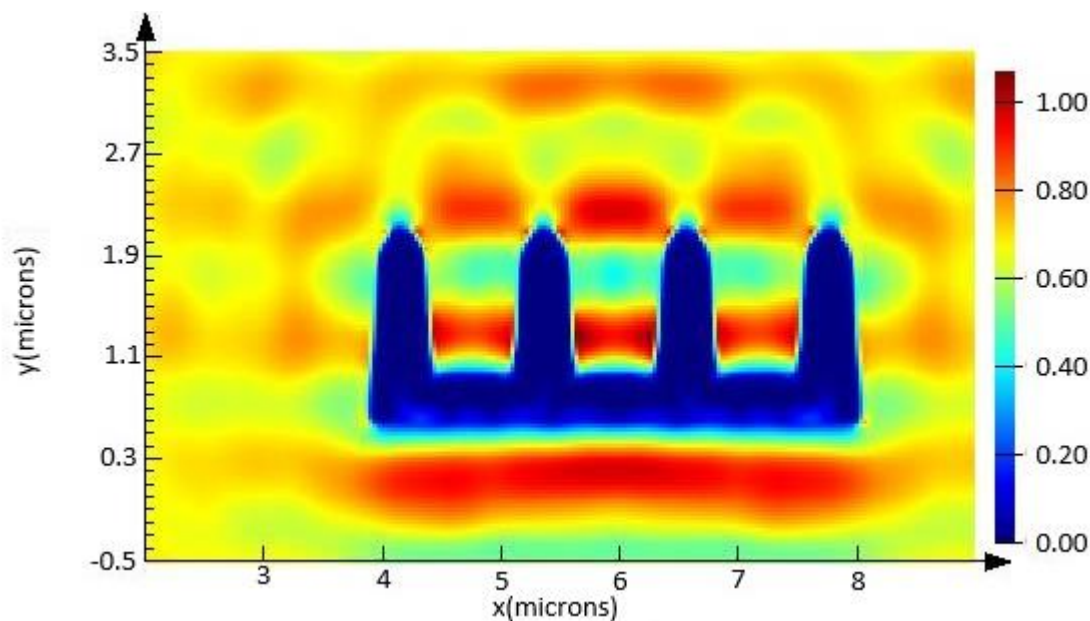
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode



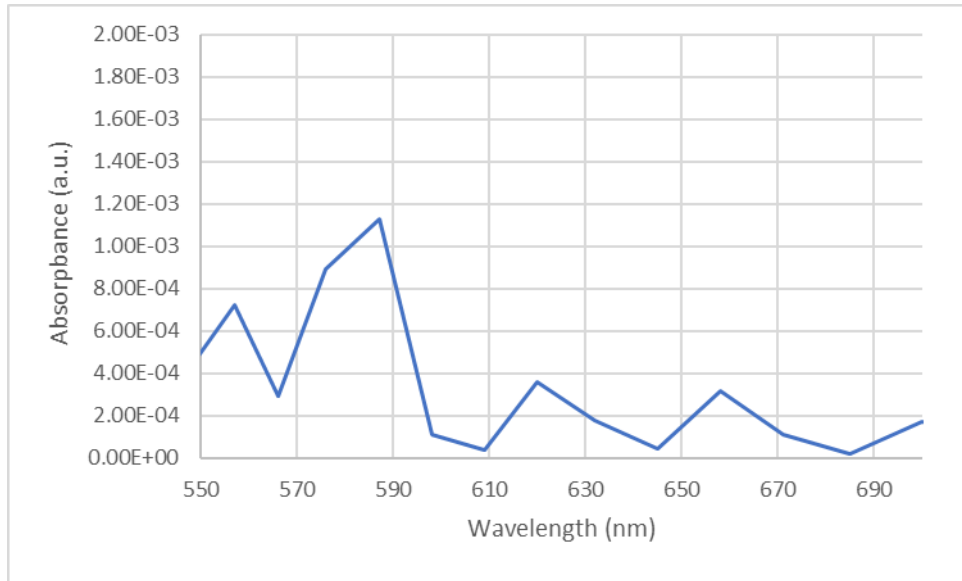
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPen ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.2 ผลการจำลองการทดลองของสายพันธุ์ Danaus Genutia (DG)

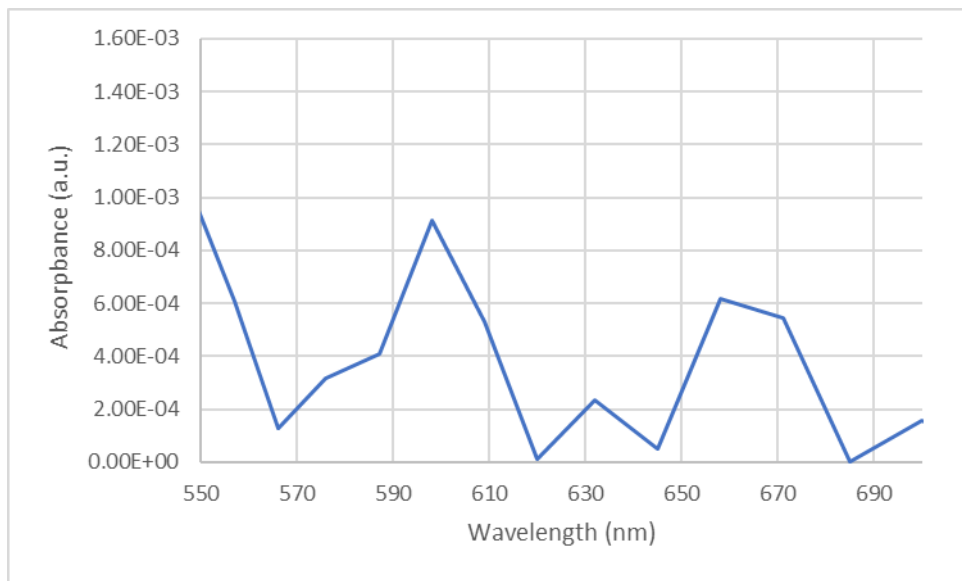
4.1.2.1 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการเคลือบ

โลหะ

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode ถูกแสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลื่อน
โหละและการตกกระทบแบบ TM mode



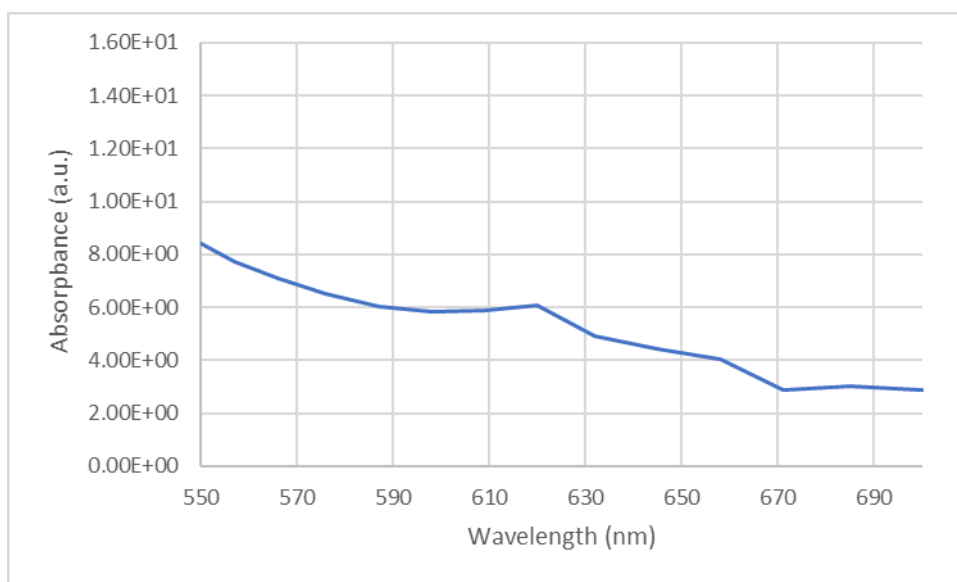
รูปที่ 4.22 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลื่อน
โหละและการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.2.2 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลม

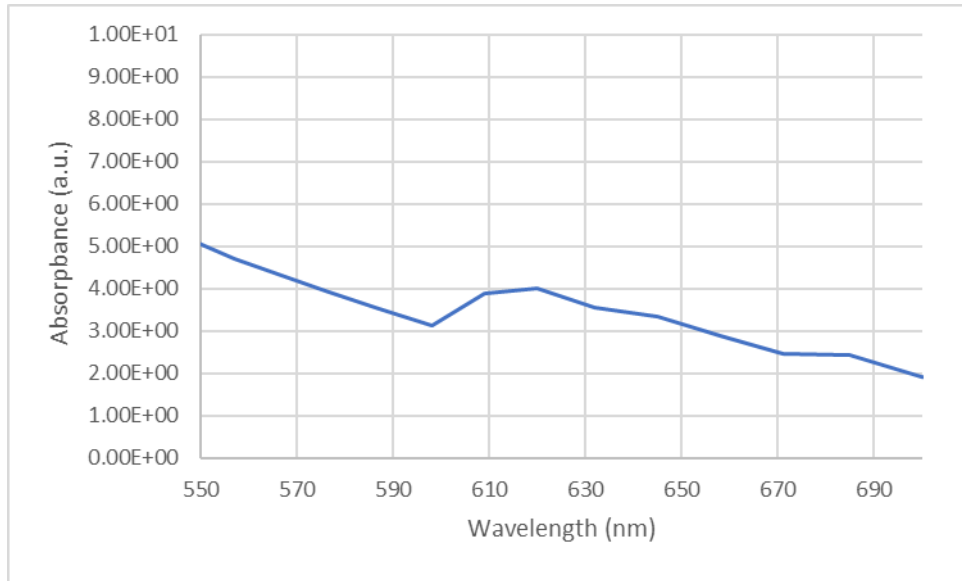
ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ

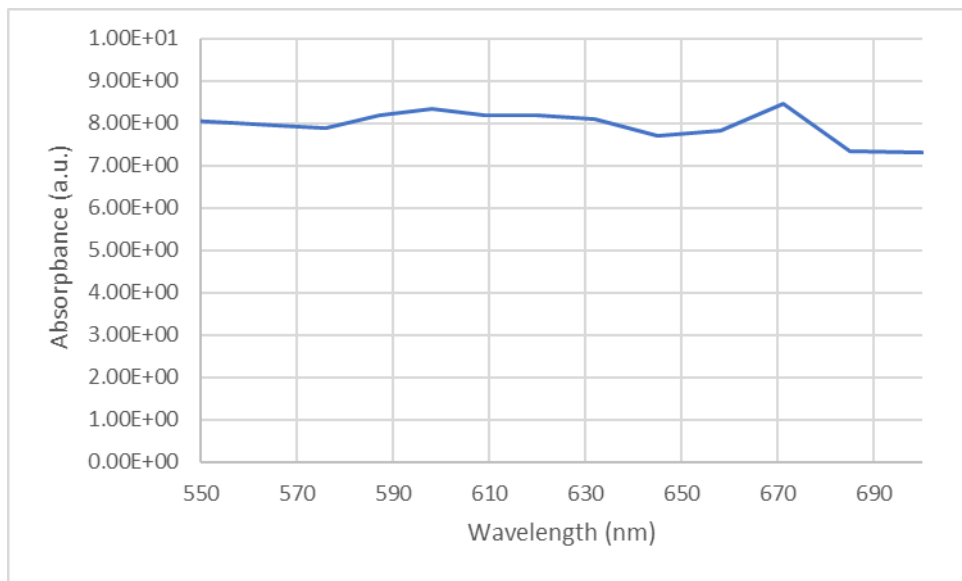
ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ



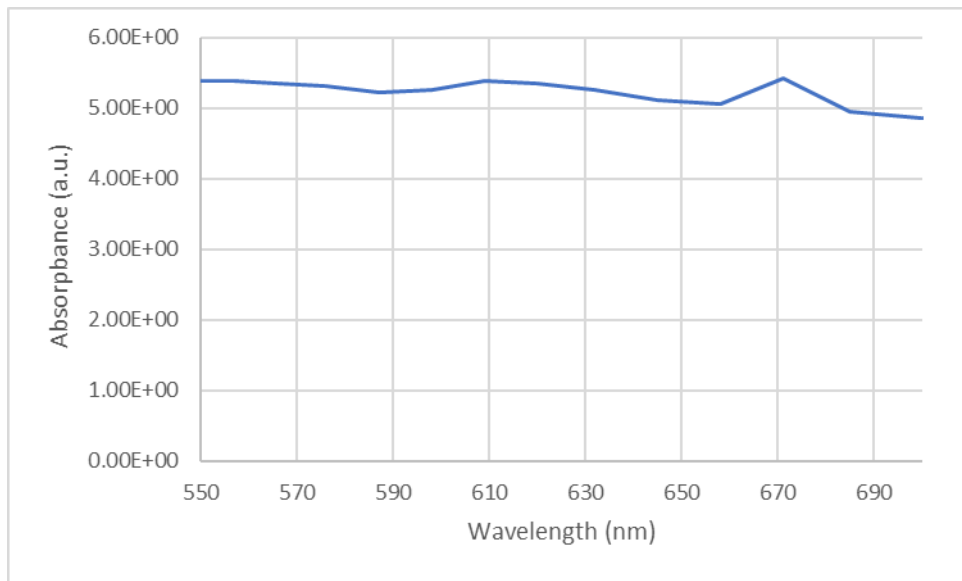
รูปที่ 4.23 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.24 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.25 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode



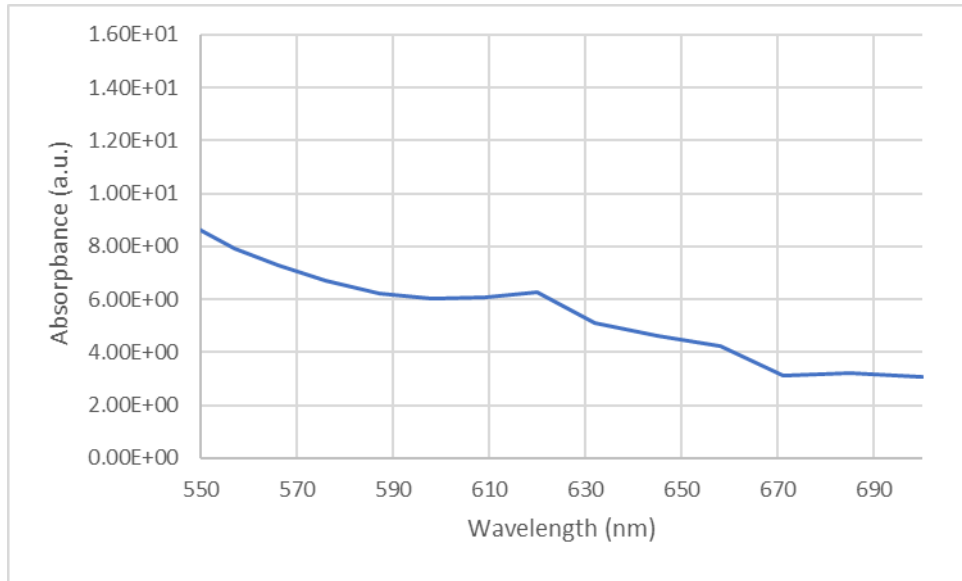
รูปที่ 4.26 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.2.3 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัด

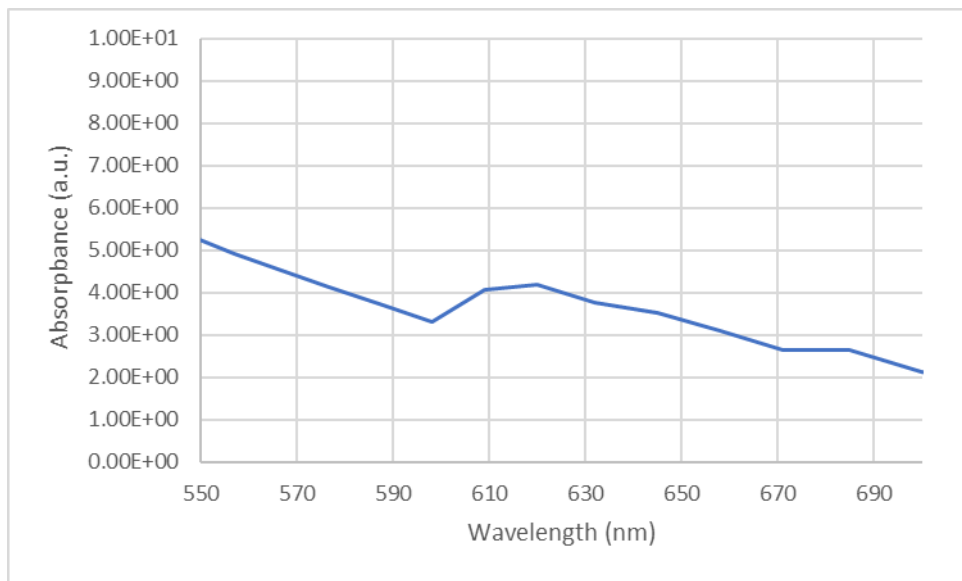
ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ

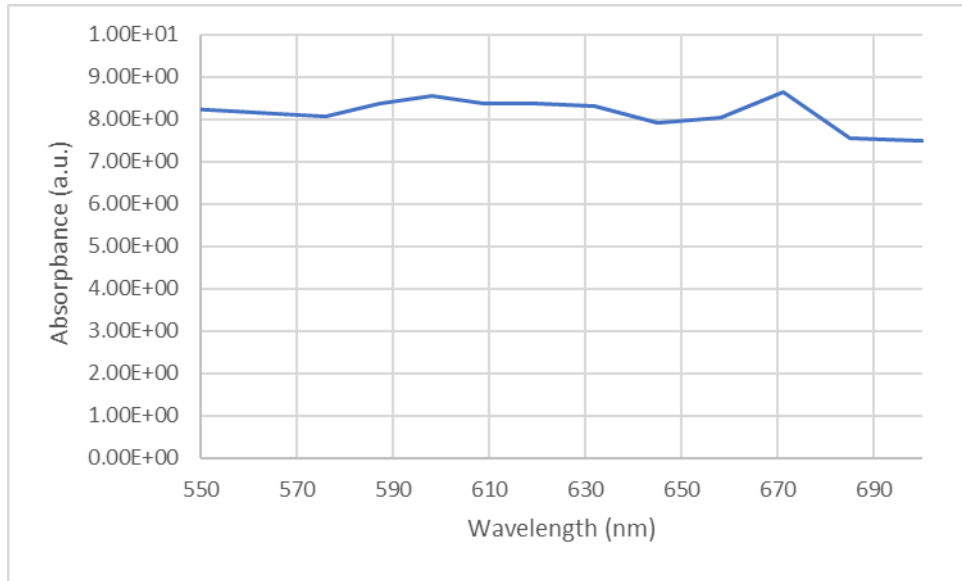
ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ



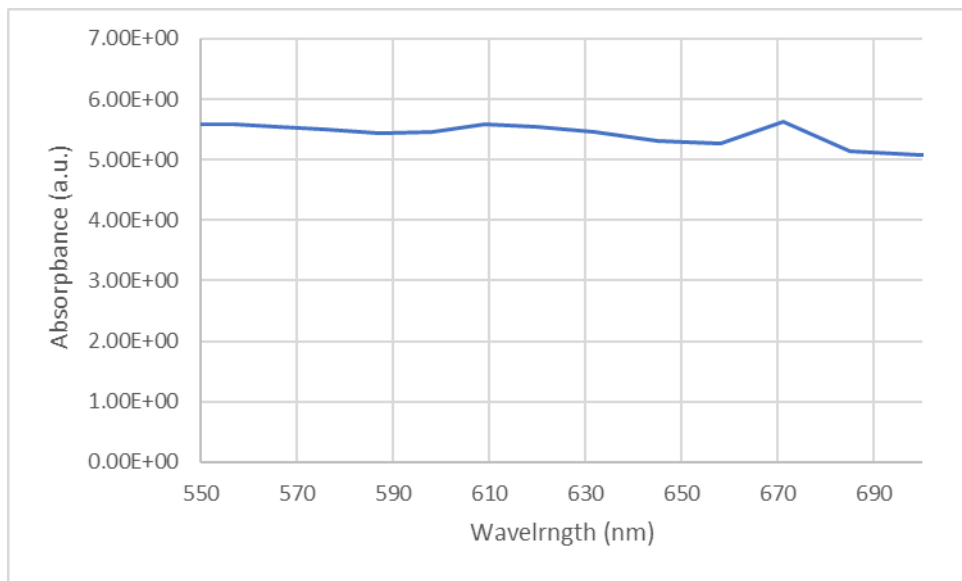
รูปที่ 4.27 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อน
 0.2 μ m Au และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.28 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อน
 0.2 μ m Au และการตกกระทบแบบ TE mode



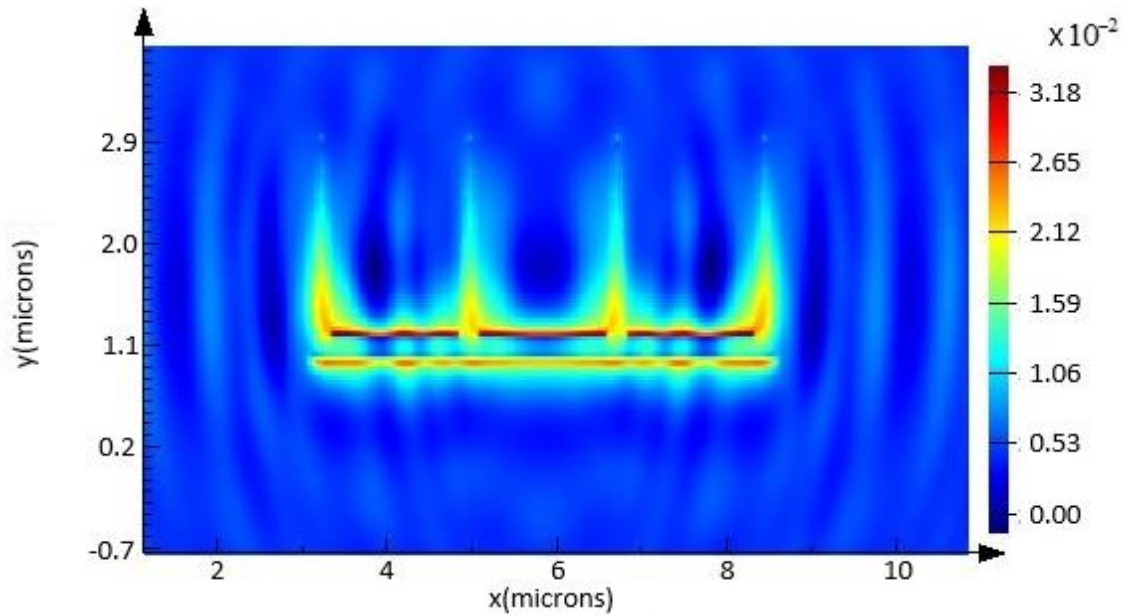
รูปที่ 4.29 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode



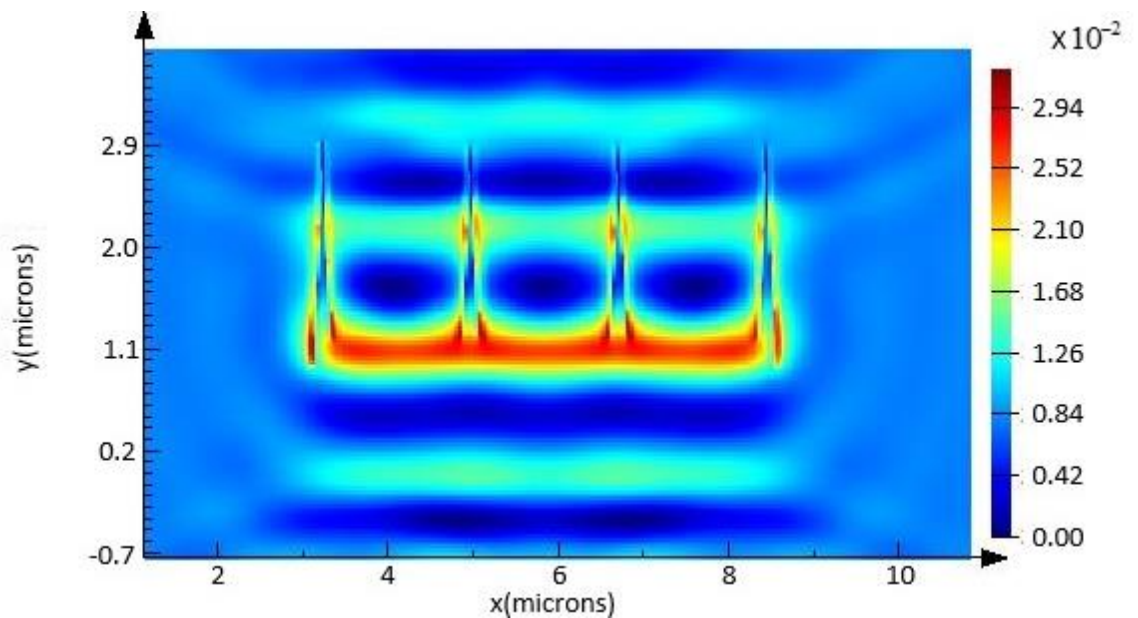
รูปที่ 4.30 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.2.4 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการเคลือบโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ปรากฏจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ภายใต้เงื่อนไขปรากฏจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode



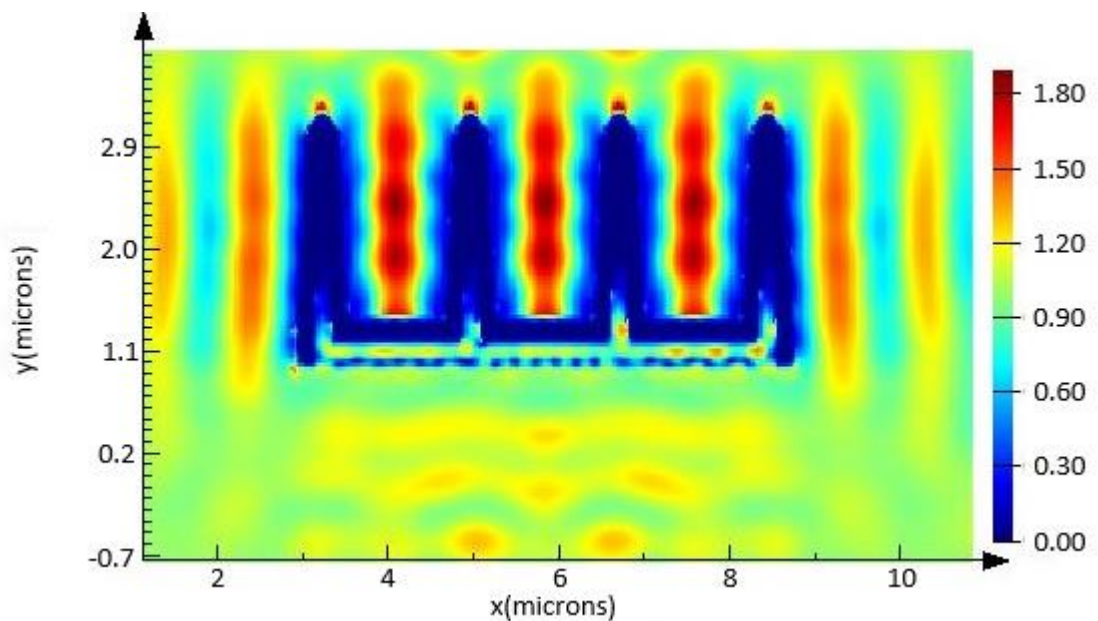
รูปที่ 4.32 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ภายใต้เงื่อนไขปรากฏจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.2.5 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลม

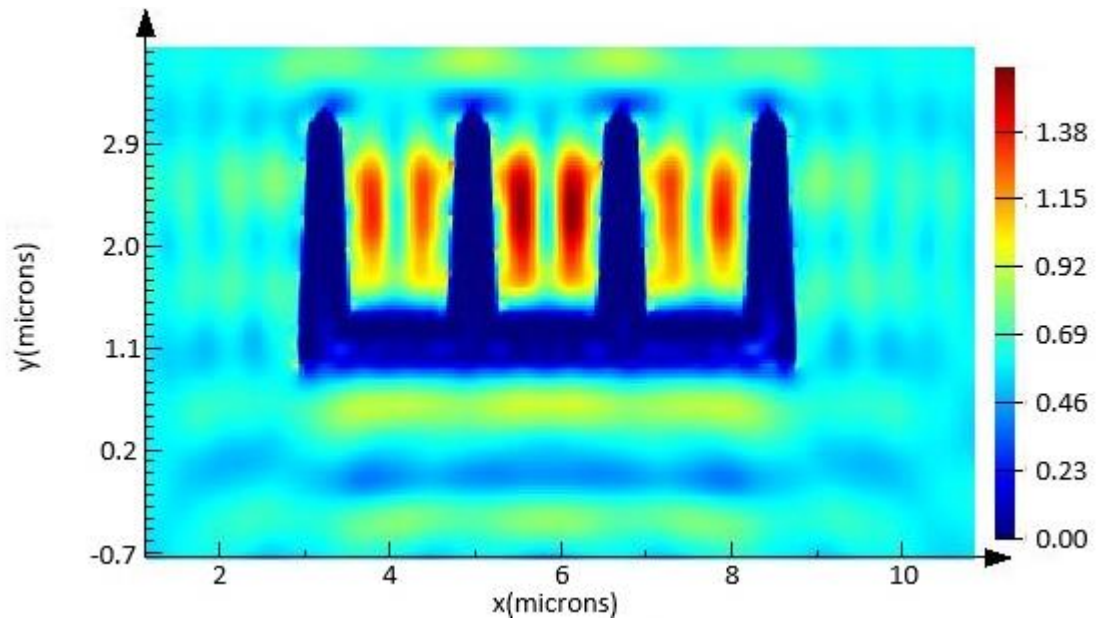
ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ

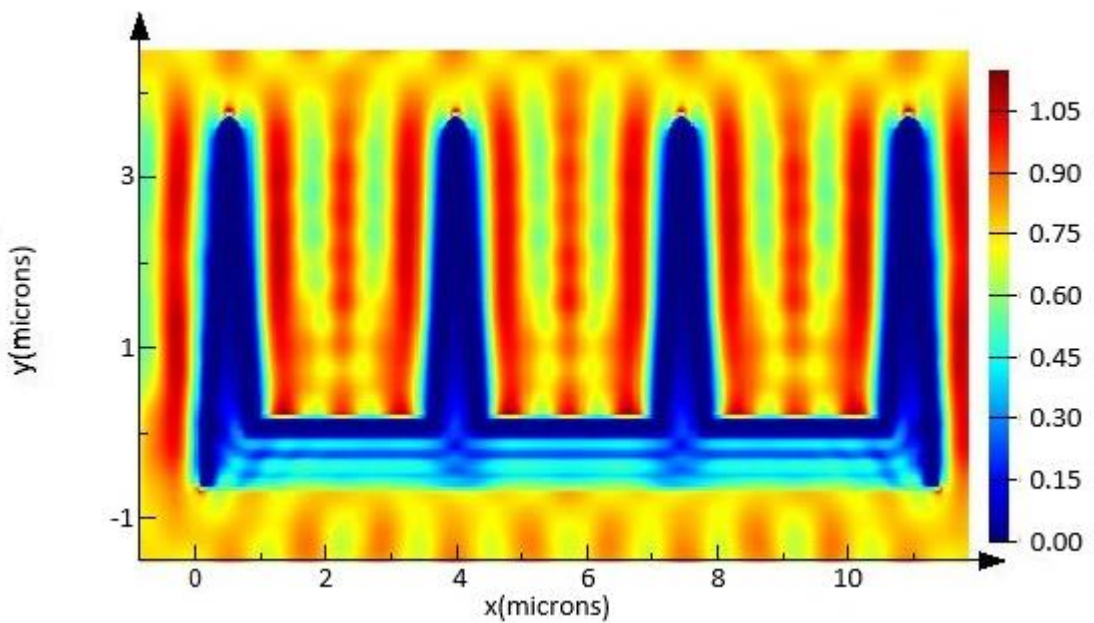
ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ



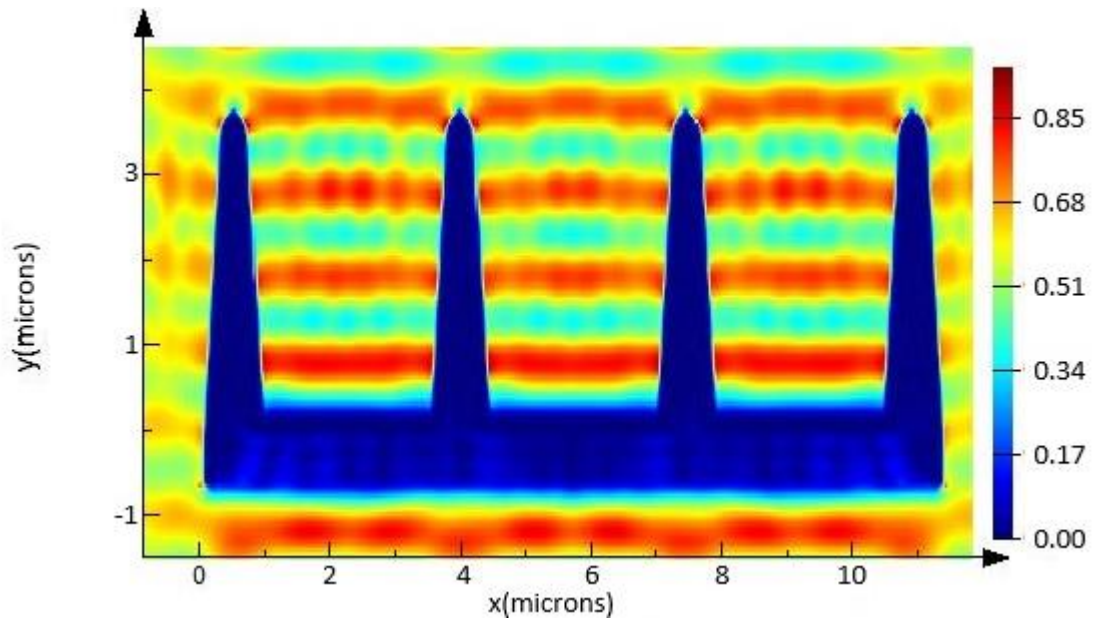
รูปที่ 4.33 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.34 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.35 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode

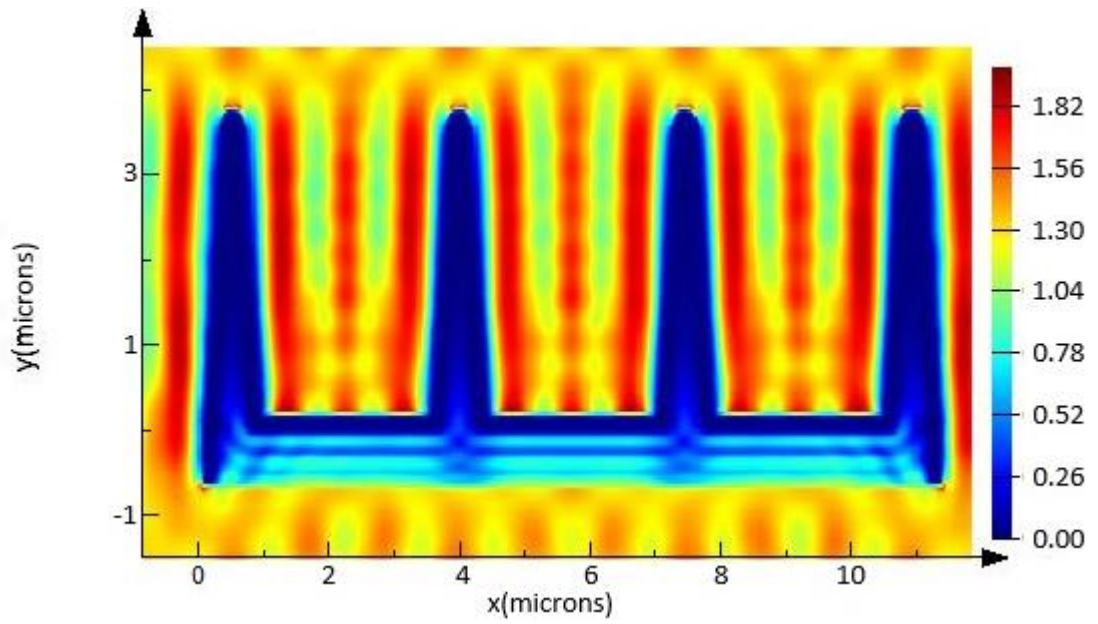


รูปที่ 4.36 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TE mode

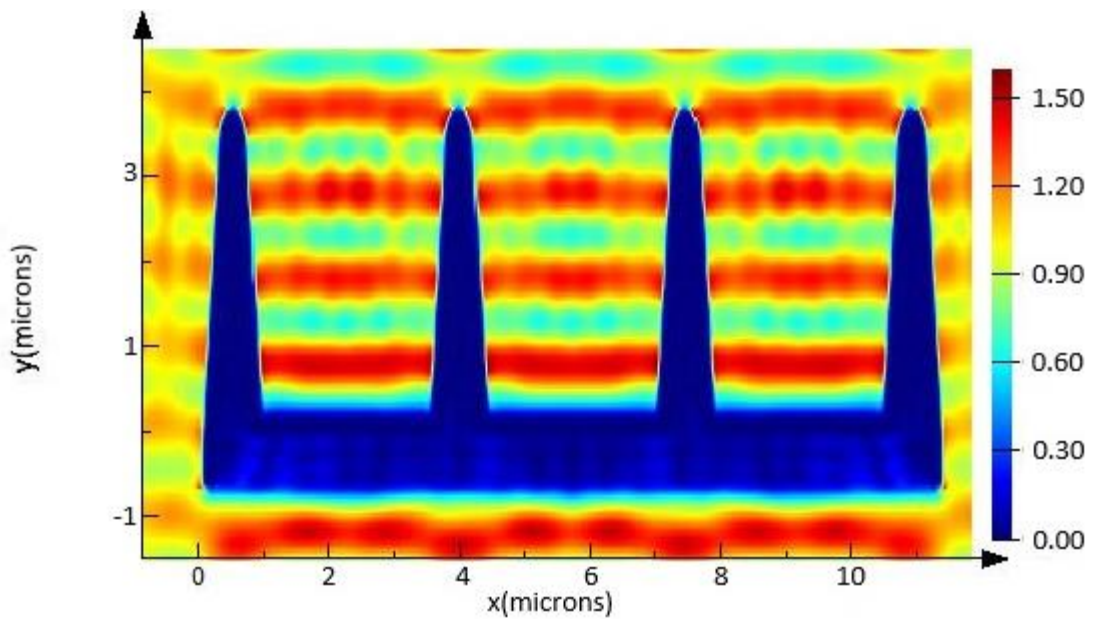
4.1.2.6 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูกเคลื่อนด้วยโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ

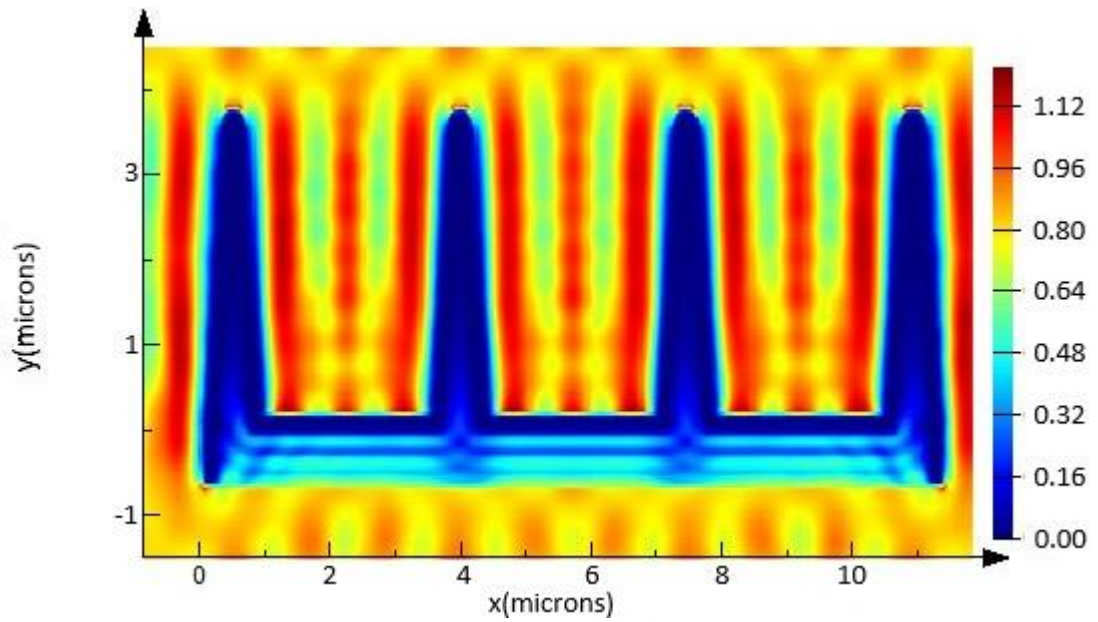
ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.39 และ 4.40 ตามลำดับ



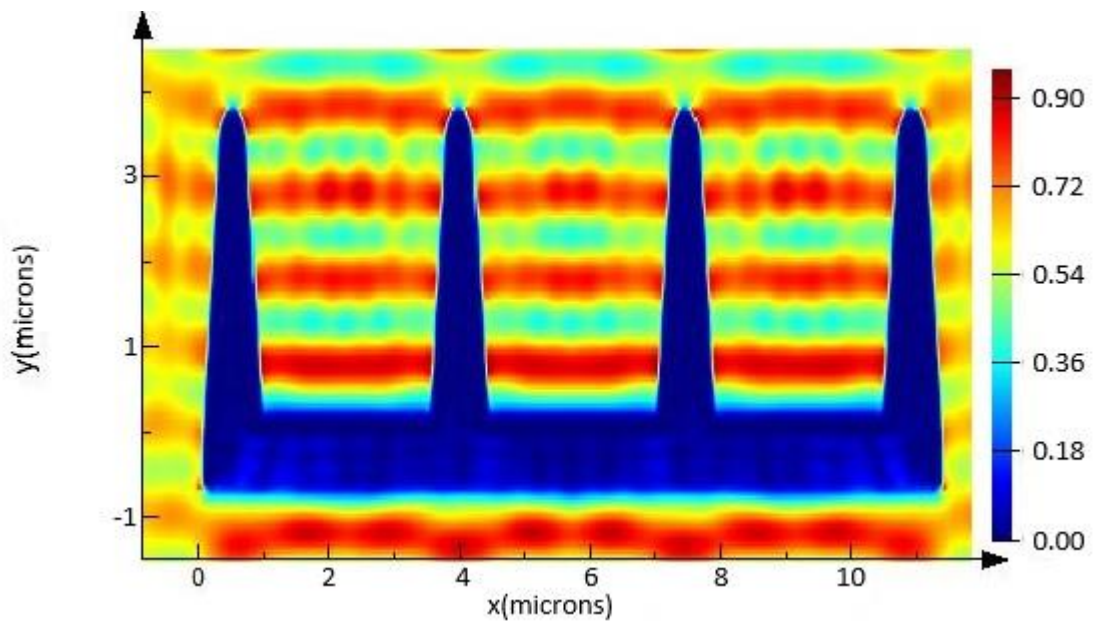
รูปที่ 4.37 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อน
 $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.38 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อน
 $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.39 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TM mode



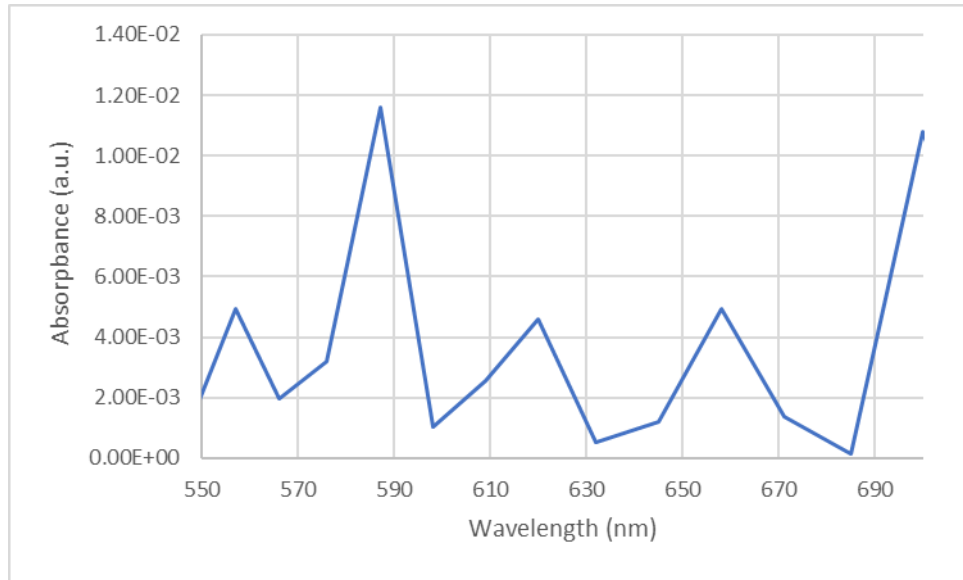
รูปที่ 4.40 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง DG ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m Pd}$ และการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.3 ผลการจำลองการทดลองของสายพันธุ์ *Catopsilia Pomona* (CPom)

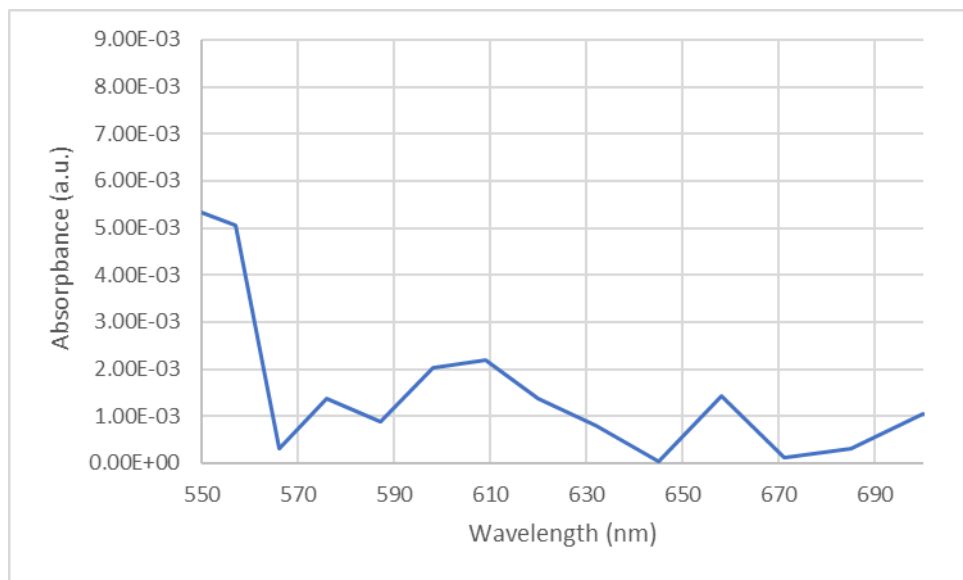
4.1.3.1 ผลการดูกลิ้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการเคลื่อน

โลหะ

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode ถูกแสดงดังรูปที่ 4.41 และ 4.42 ตามลำดับ



รูปที่ 4.41 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode



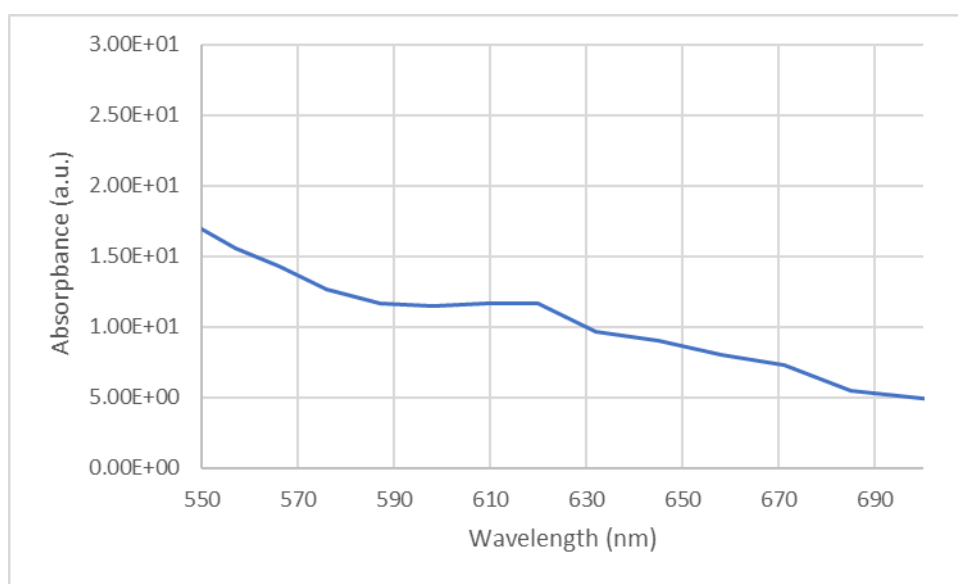
รูปที่ 4.42 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.3.2 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลม

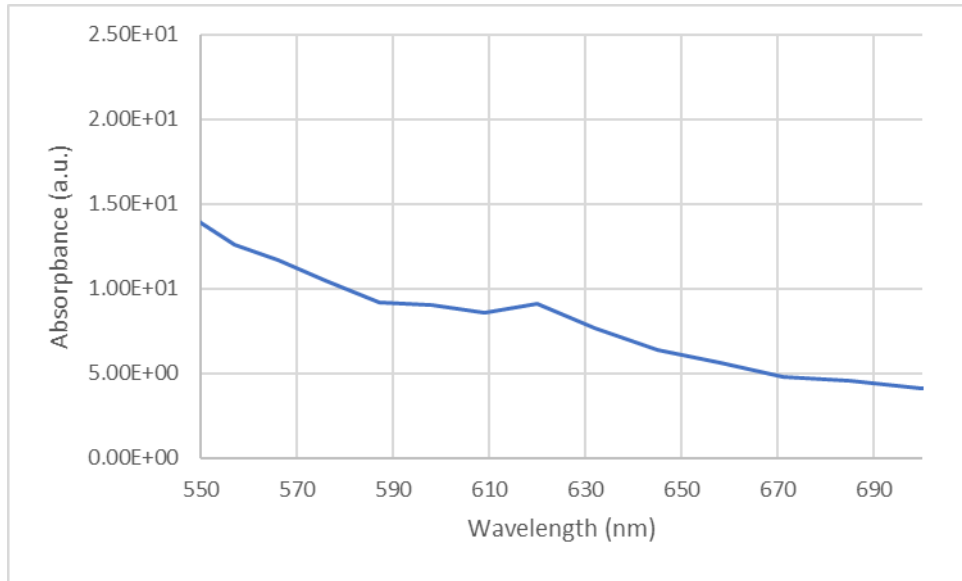
ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.43 และ 4.44 ตามลำดับ

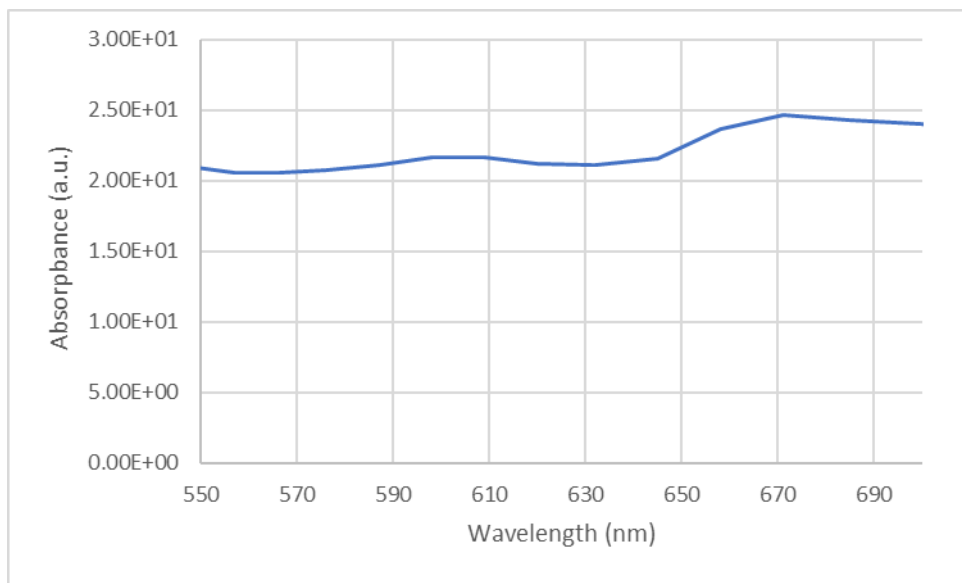
ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.45 และ 4.46 ตามลำดับ



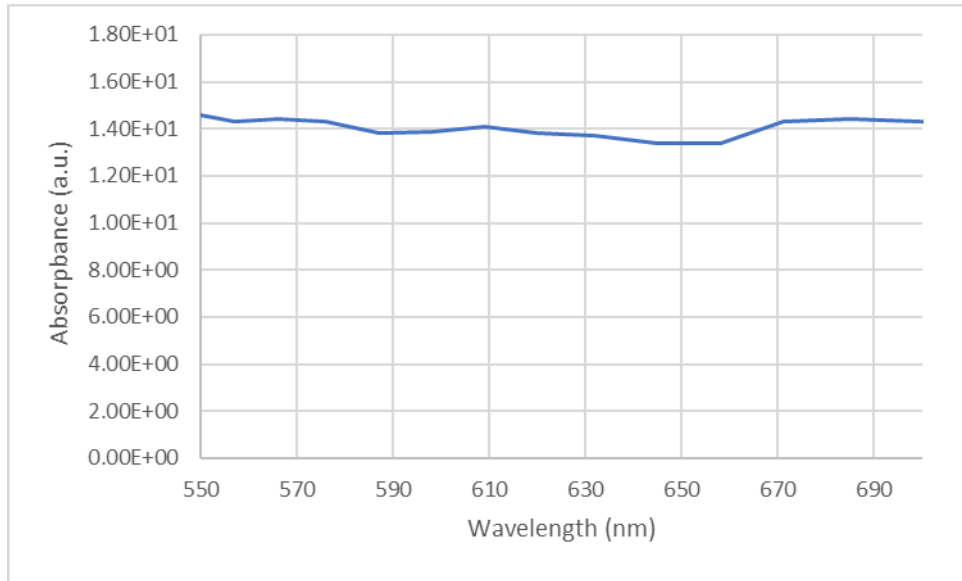
รูปที่ 4.43 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.44 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.45 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode



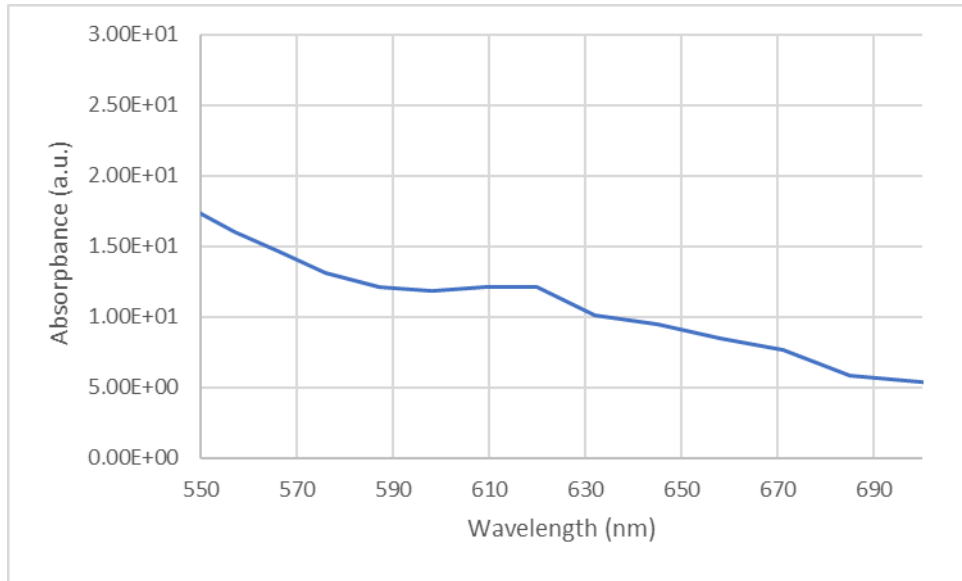
รูปที่ 4.46 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.3.3 ผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัด

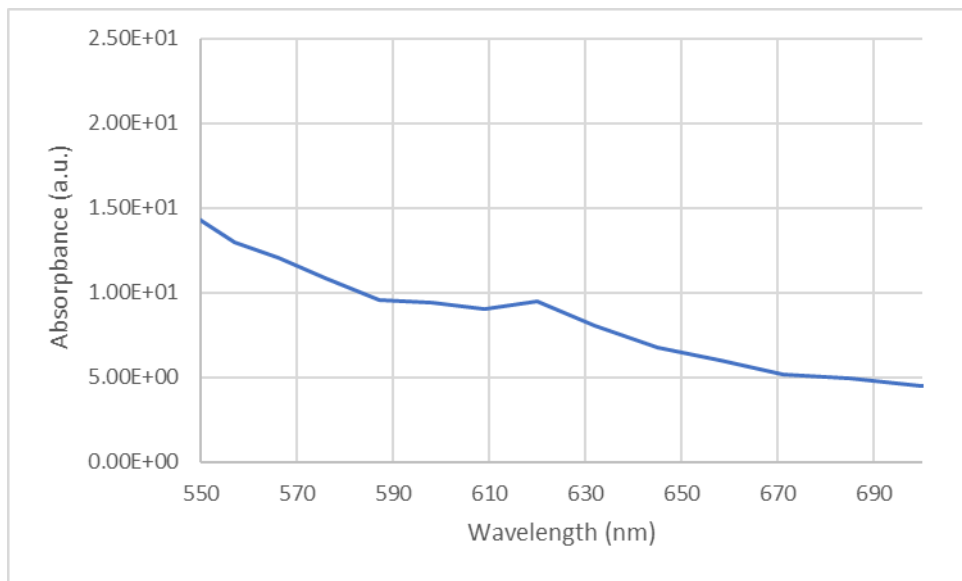
ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.47 และ 4.48 ตามลำดับ

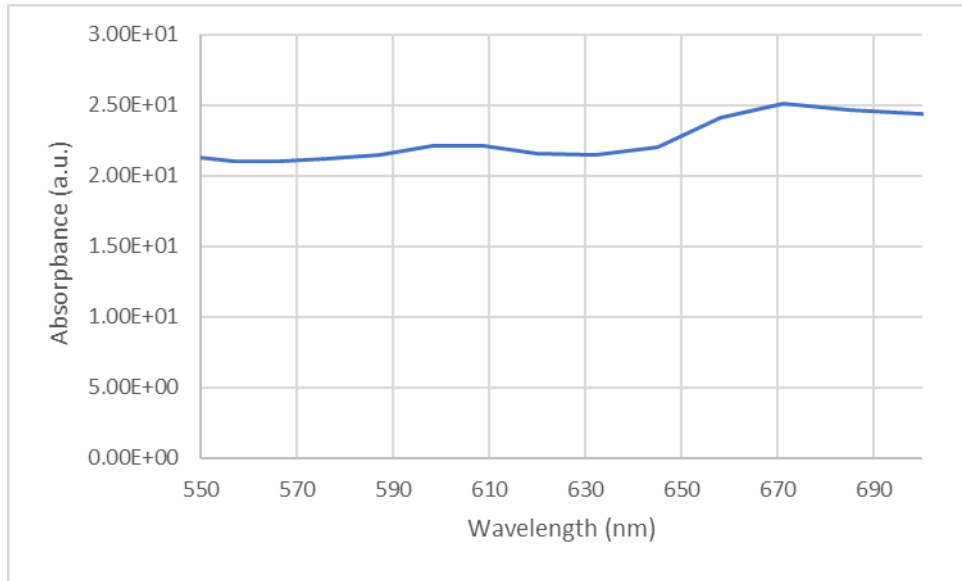
ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.49 และ 4.50 ตามลำดับ



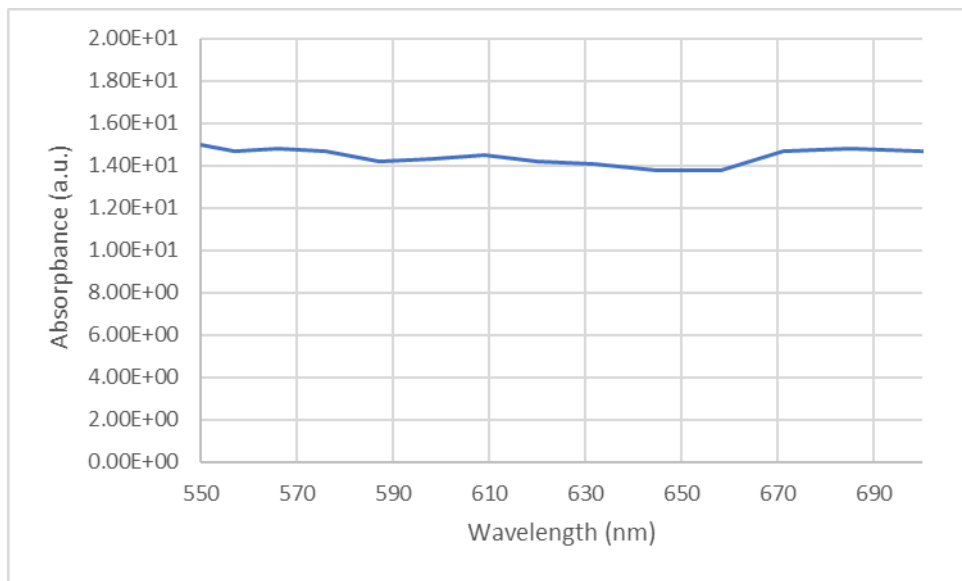
รูปที่ 4.47 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.48 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TE mode



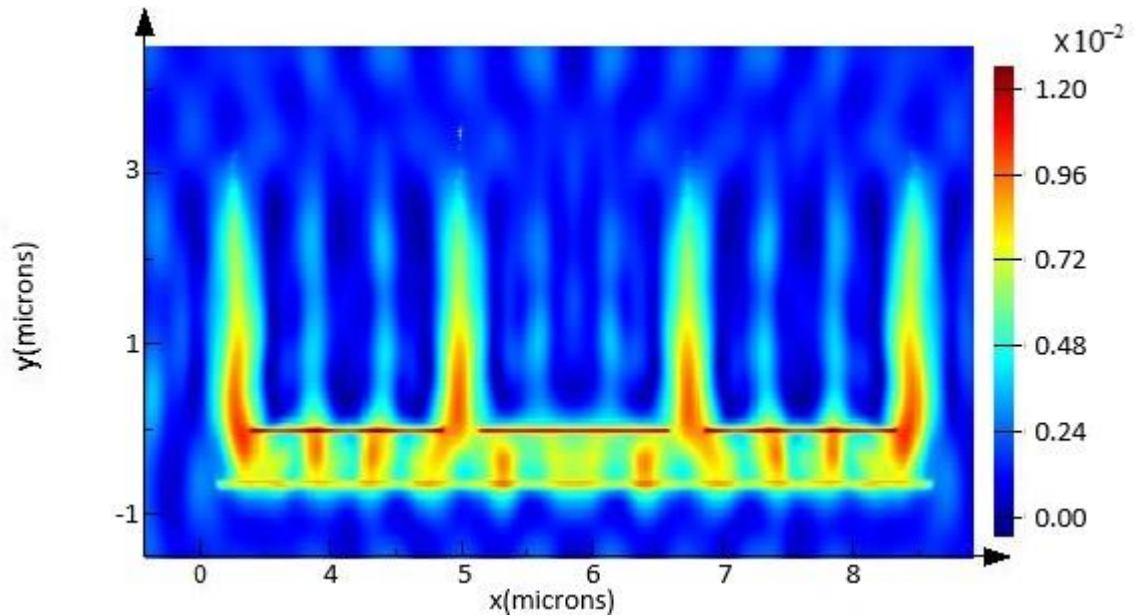
รูปที่ 4.49 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode



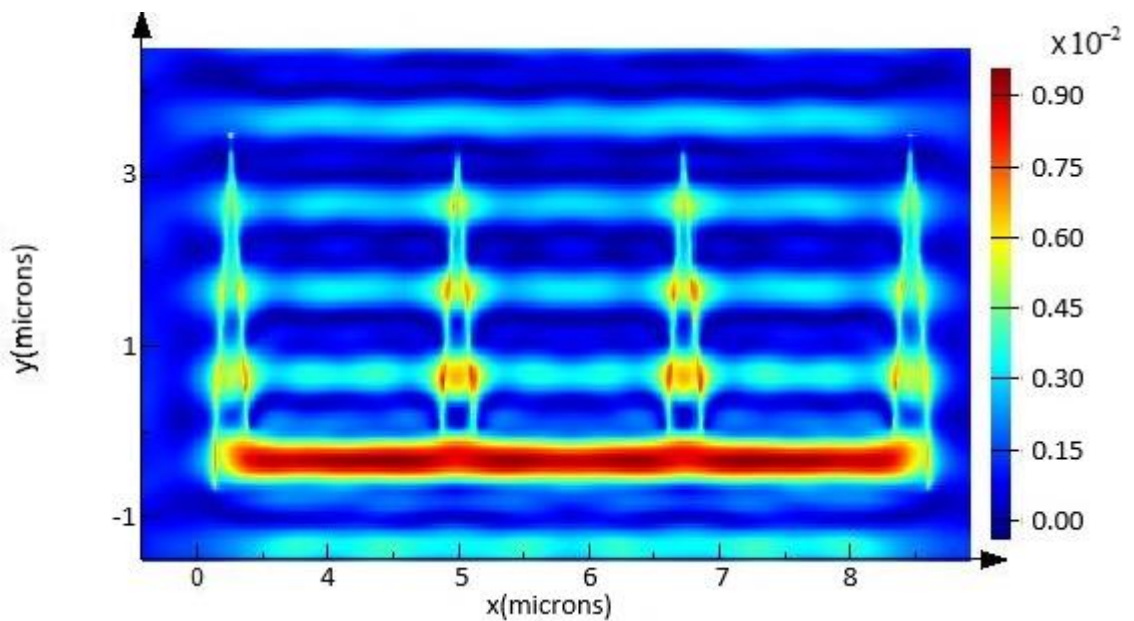
รูปที่ 4.50 การดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.3.4 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการเคลือบโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ปรากฏจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.51 และ 4.52 ตามลำดับ



รูปที่ 4.51 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode



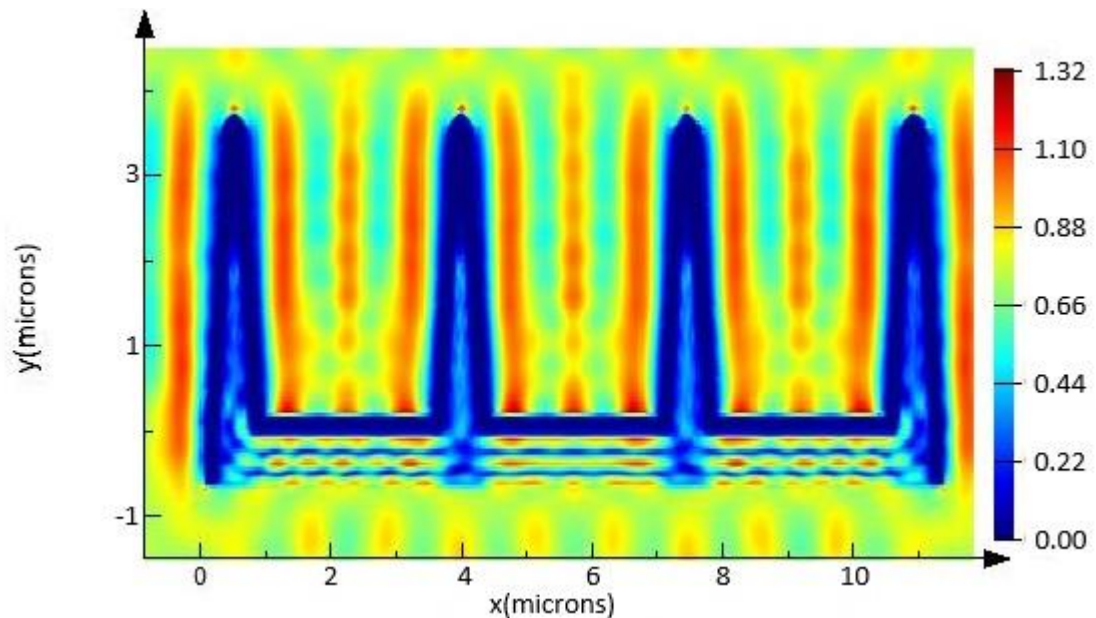
รูปที่ 4.52 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบโลหะและการตกกระทบแบบ TE mode

4.1.3.5 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวแหลม

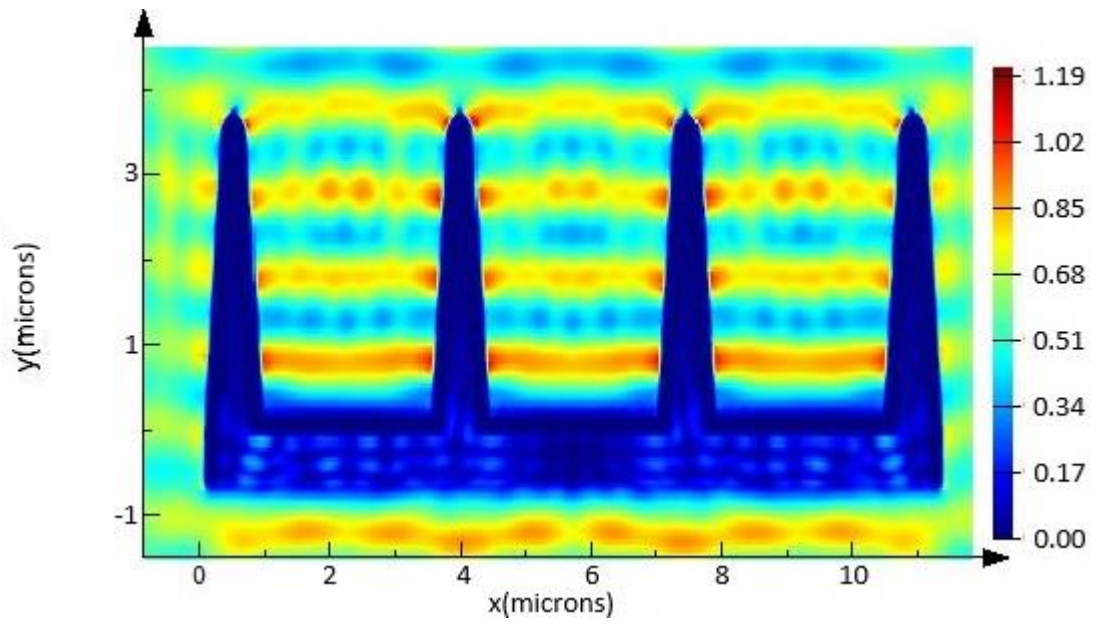
ถูกเคลือบด้วยโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.53 และ 4.54 ตามลำดับ

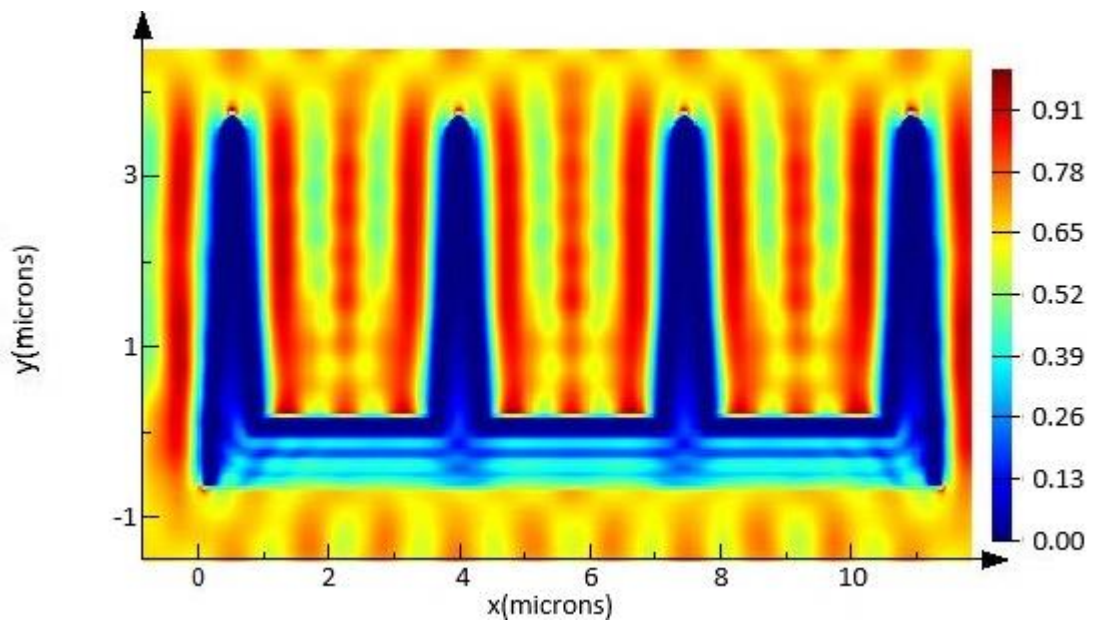
ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.55 และ 4.56 ตามลำดับ



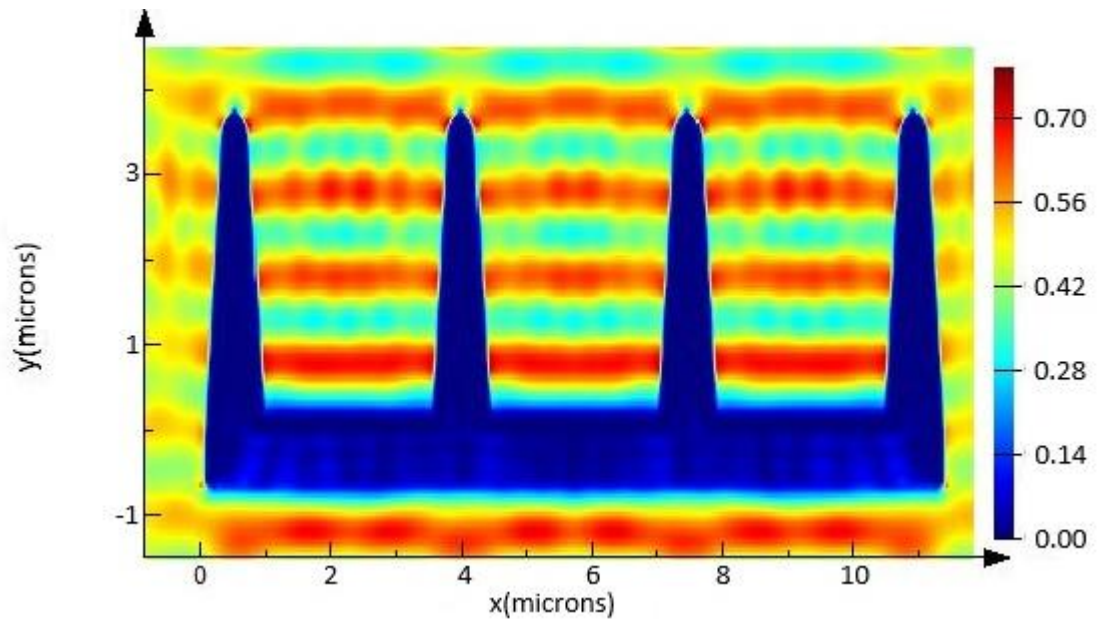
รูปที่ 4.53 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.54 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.55 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode

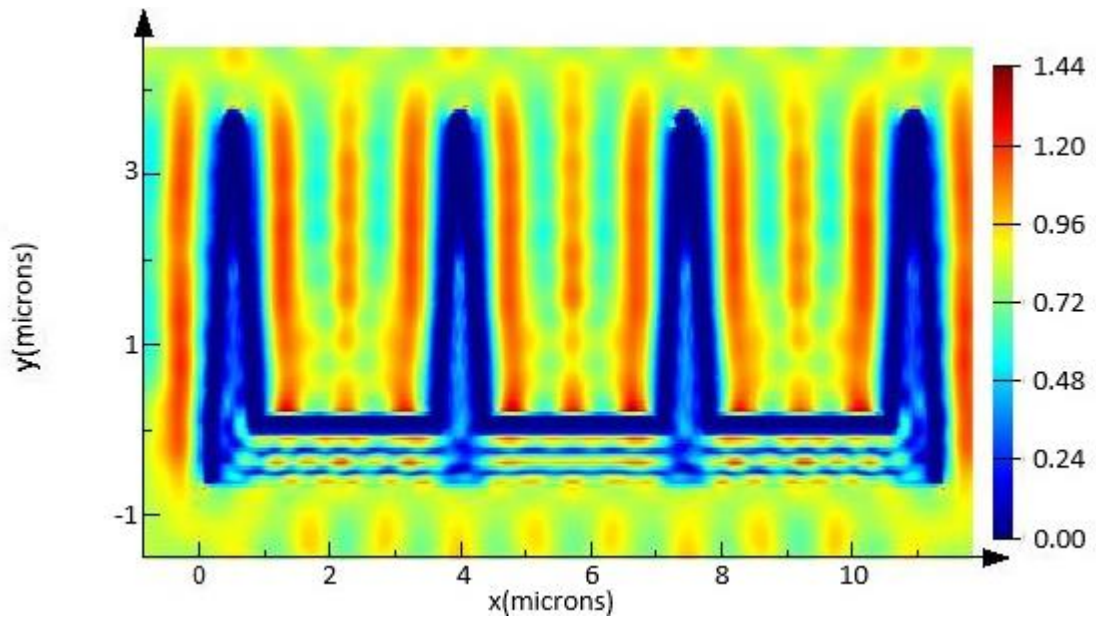


รูปที่ 4.56 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวแหลม ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

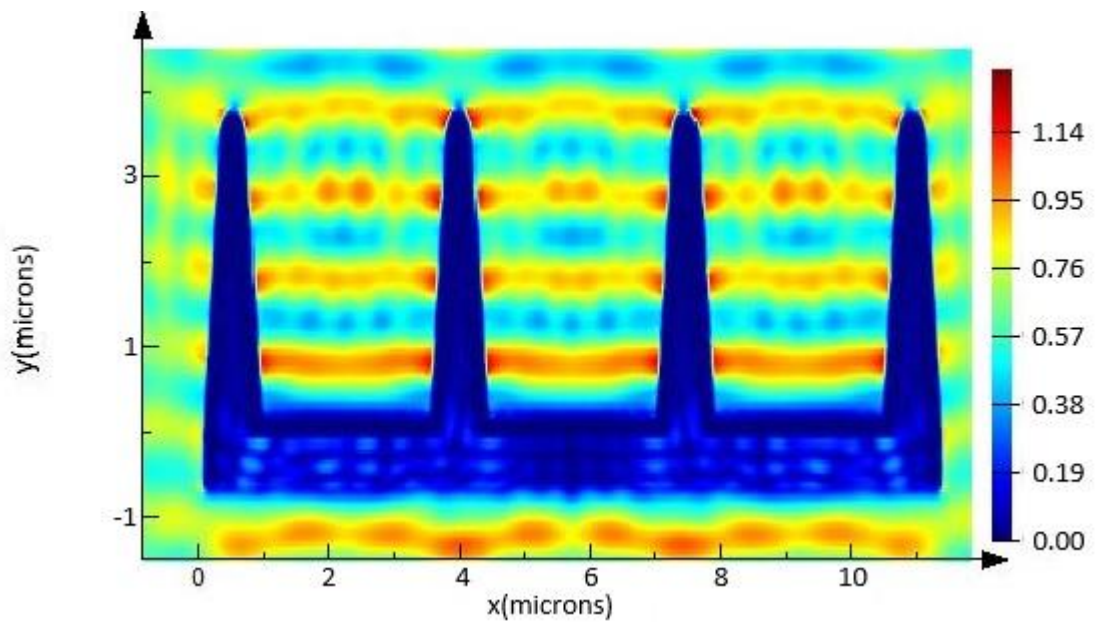
4.1.3.6 ผลการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทรงหัวตัดถูกเคลื่อนที่ด้วยโลหะ

ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Au และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.57 และ 4.58 ตามลำดับ

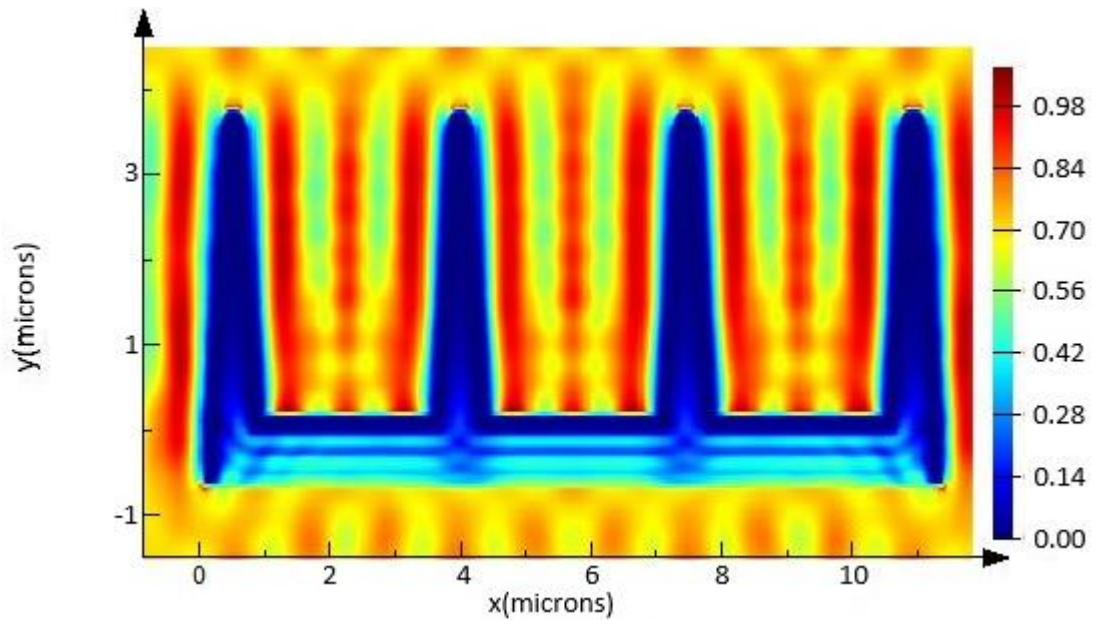
ค่าการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode แสดงดังรูปที่ 4.59 และ 4.60 ตามลำดับ



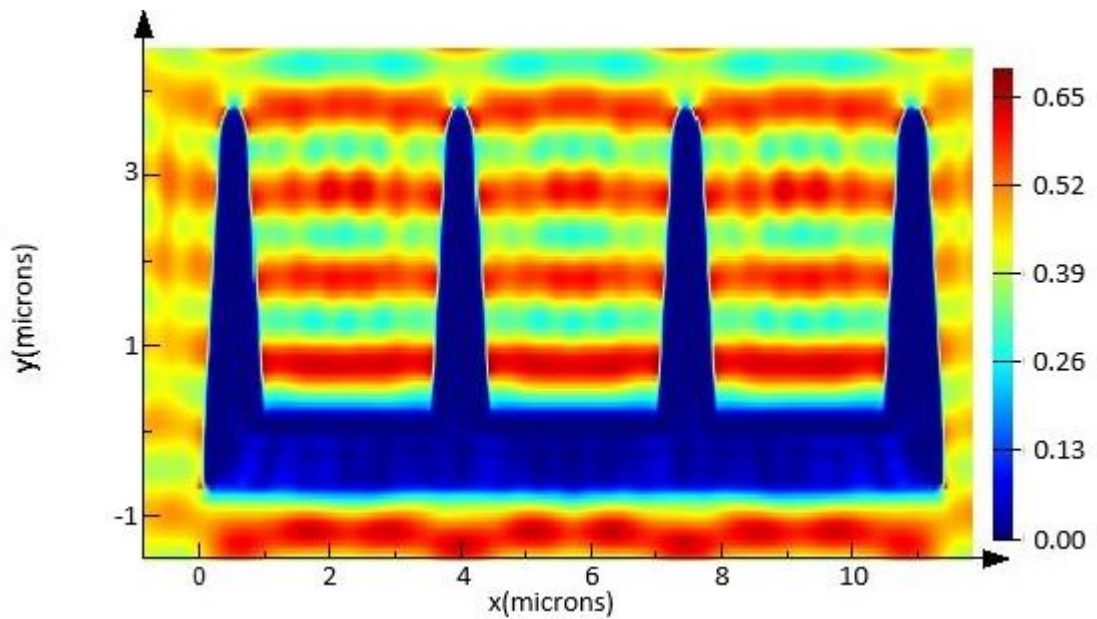
รูปที่ 4.57 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.58 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m Au}$ และการตกกระทบแบบ TE mode



รูปที่ 4.59 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TM mode



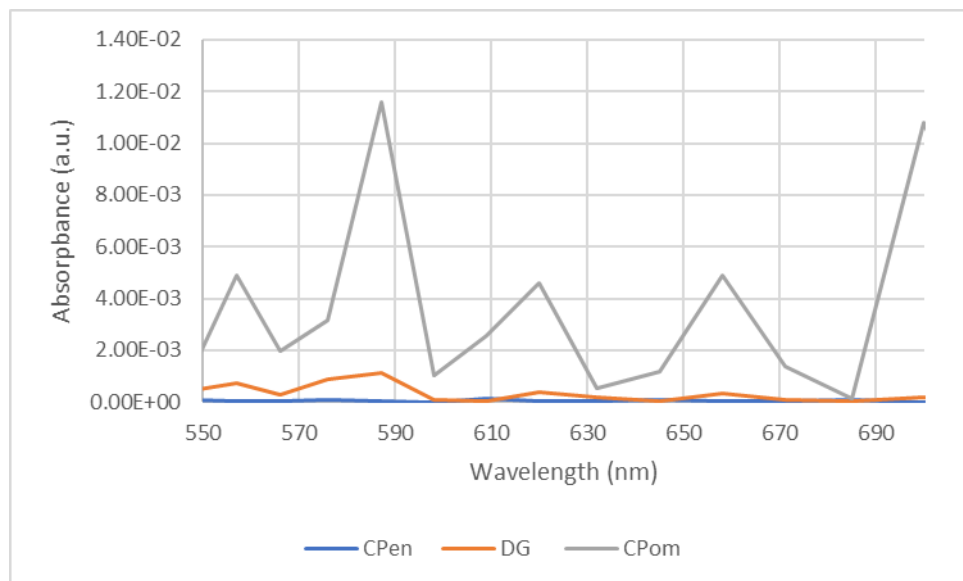
รูปที่ 4.60 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้าง CPom ทรงหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลื่อนที่ $0.2\mu\text{m}$ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode

4.2 การเปรียบเทียบผลการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ทรงหัวแหลมและหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd

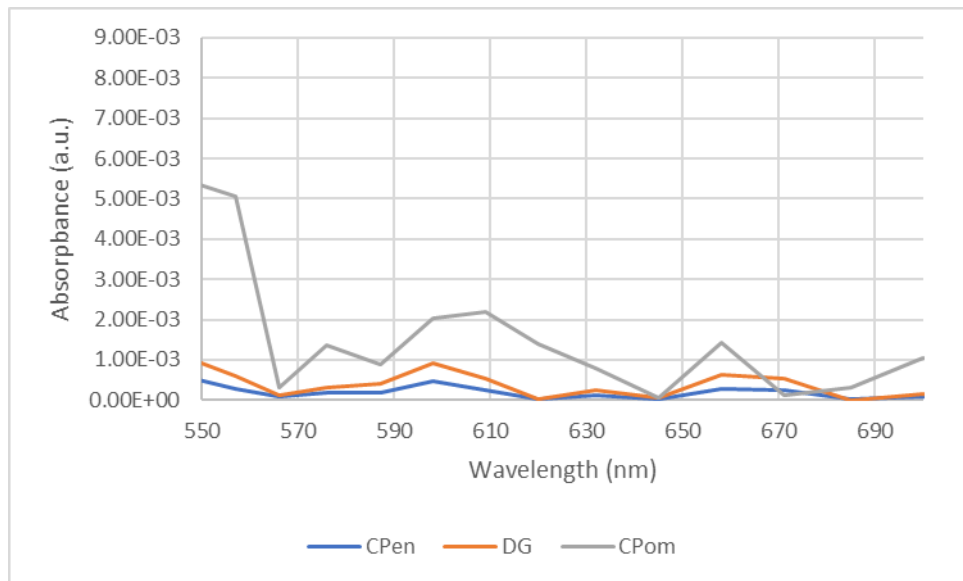
4.2.1 ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ชนิดหัวแหลมและหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบและไม่เคลือบด้วยโลหะ

4.2.1.1 ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบด้วยโลหะ

รูปที่ 4.61-4.62 พบว่าค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ มีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ภายใต้เงื่อนไขปราศจากการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode และ TE mode เนื่องจากโครงสร้างปีกผีเสื้อถูกกำหนดให้เป็นสารไดอิเล็กตริก



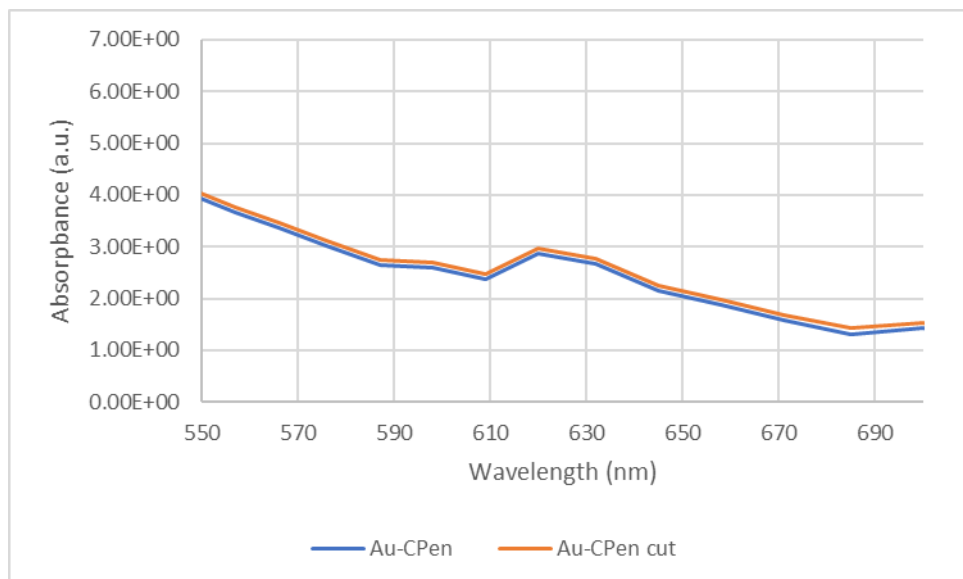
รูปที่ 4.61 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อปราศจากการเคลือบด้วยโลหะทั้ง 3 สายพันธุ์ ภายใต้การตกกระทบแบบ TM mode



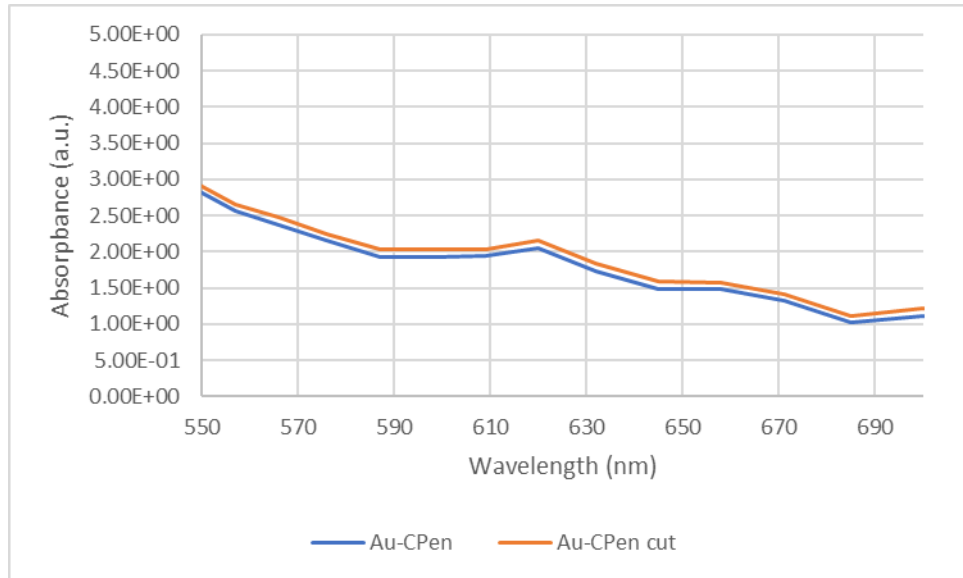
รูปที่ 4.62 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลื้อปราศจากการเคลือบด้วยโลหะทั้ง 3 สายพันธุ์ ภายใต้การตกกระทบแบบ TE mode

4.2.1.2 ผลการเปรียบเทียบผลดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ทรงหัวแหลมและหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd

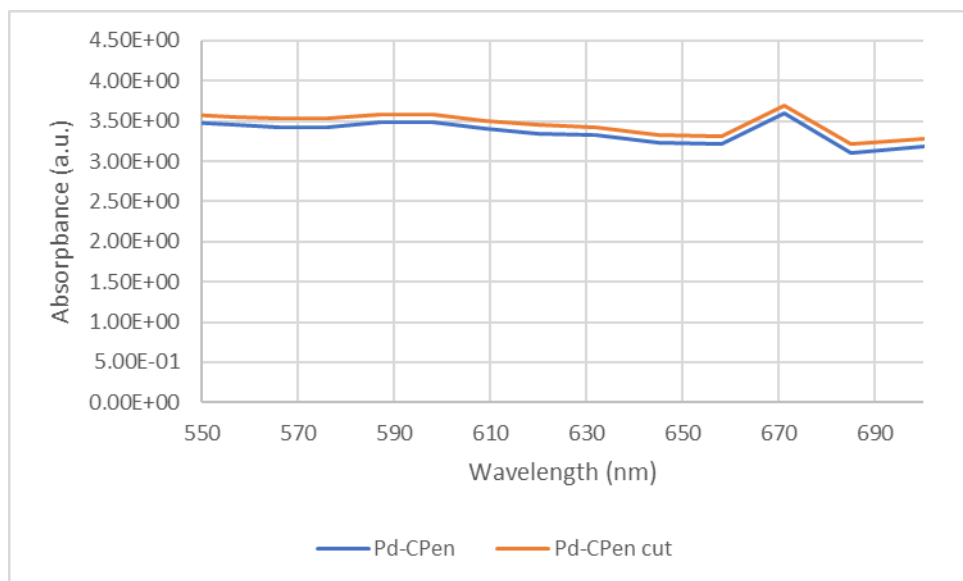
รูปที่ 4.63- 4.74 พบว่าโครงสร้างปีฟีลื้อทุกสายพันธุ์ชนิดหัวตัดจะมีค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูงกว่าชนิดหัวแหลมเนื่องจากผลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตทำให้เกิด corner effect (lightning rod effect)



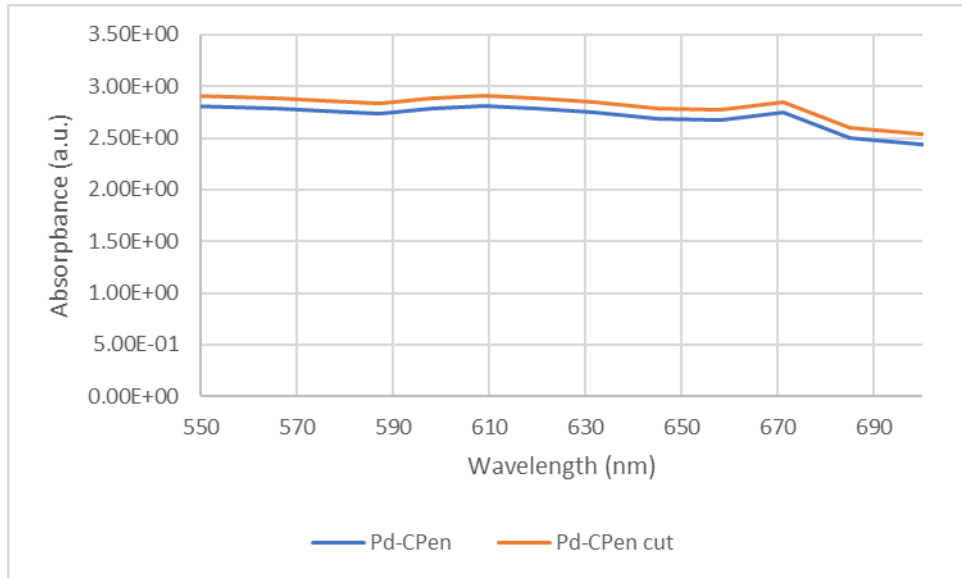
รูปที่ 4.63 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลื้อสายพันธุ์ CPen ซึ่งถูกเคลือบด้วย Au ภายใต้การตกกระทบแบบ TM mode



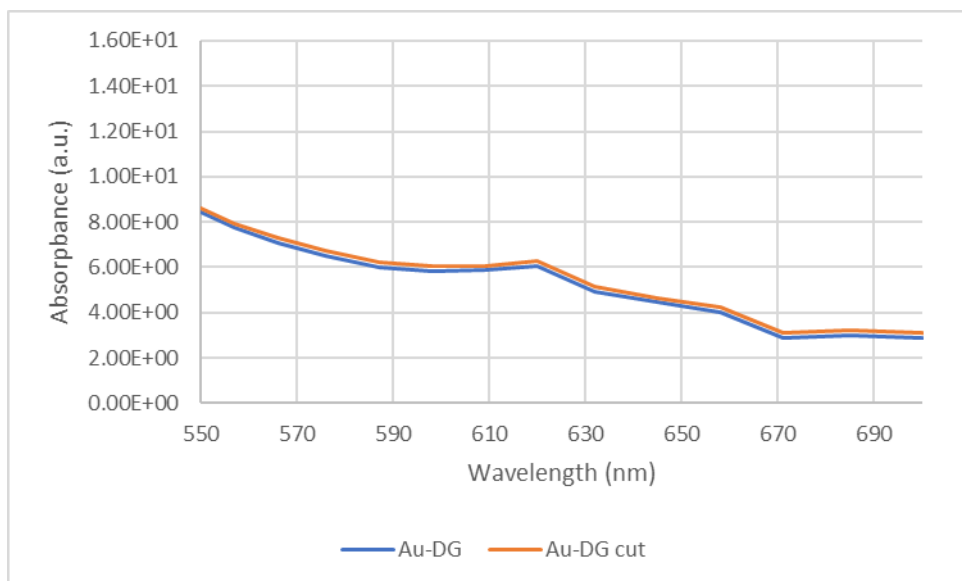
รูปที่ 4.64 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีพีเอเสื่อสายพันธุ์ CPen ซึ่งถูกเคลือบด้วย Au ภายใต้การตกกระทบแบบ TE mode



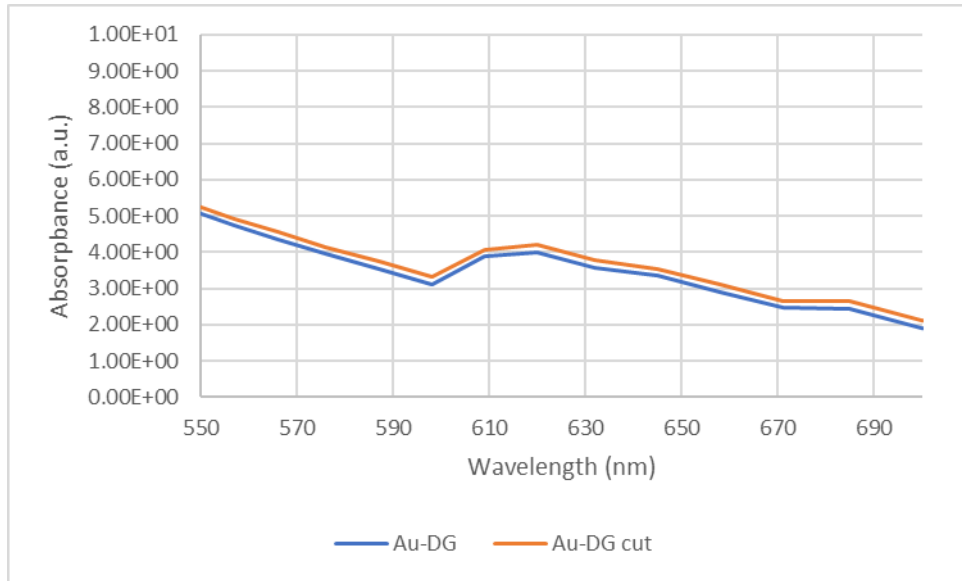
รูปที่ 4.65 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีพีเอเสื่อสายพันธุ์ CPen ซึ่งถูกเคลือบด้วย Pd ภายใต้การตกกระทบแบบ TM mode



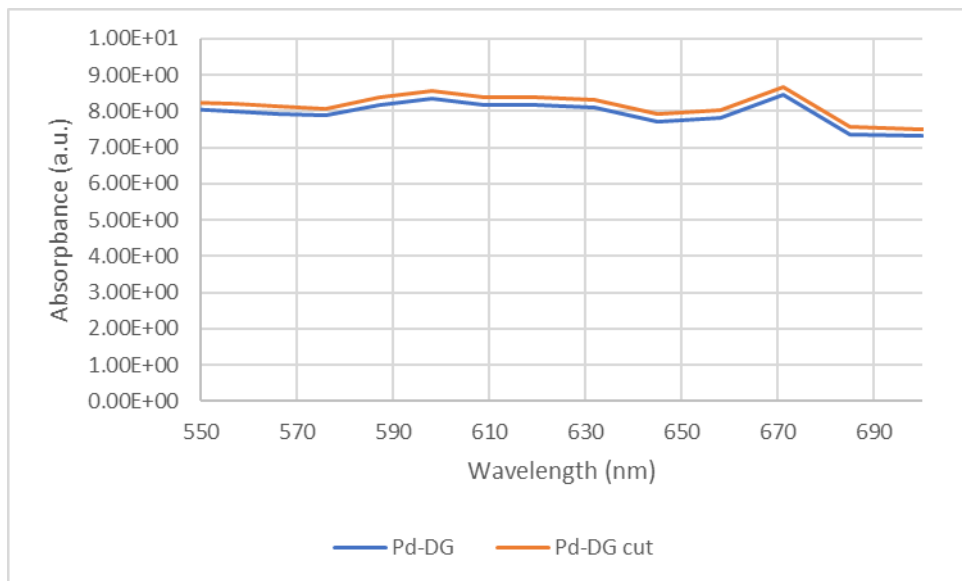
รูปที่ 4.66 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลีสายพันธุ์ CPen ซึ่งถูกเคลือบด้วย Pd ภายใต้การตกกระทบแบบ TE mode



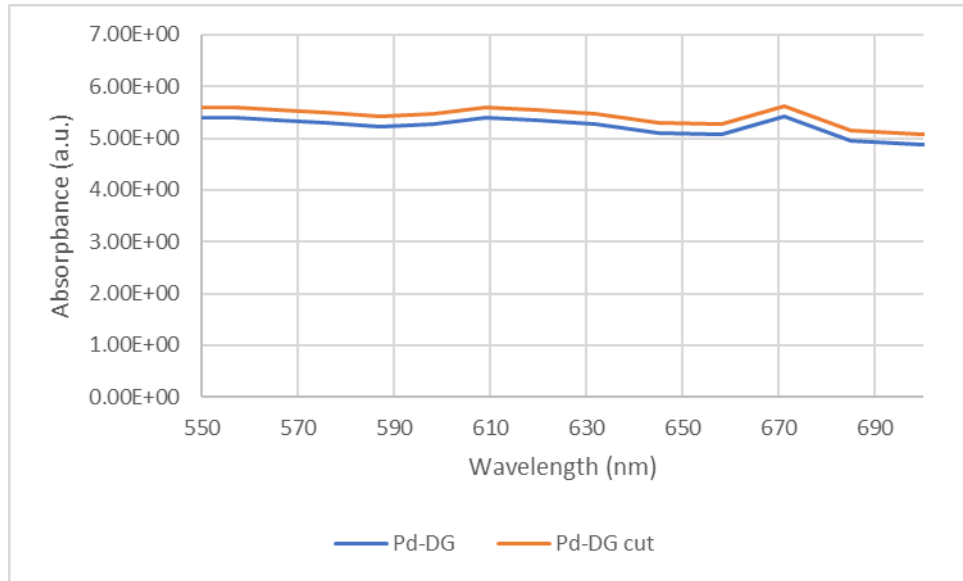
รูปที่ 4.67 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลีสายพันธุ์ DG ซึ่งถูกเคลือบด้วย Au ภายใต้การตกกระทบแบบ TM mode



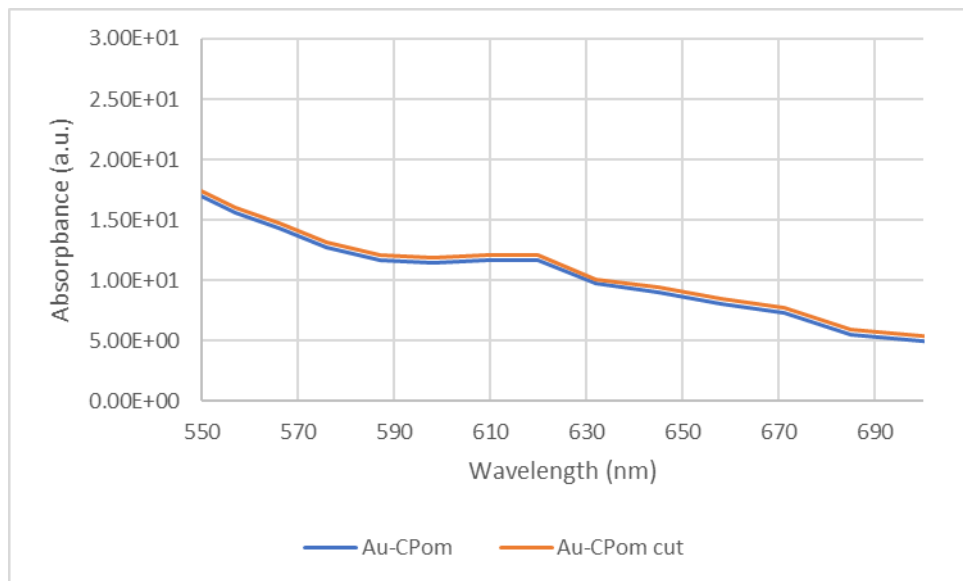
รูปที่ 4.68 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลีสายพันธุ์ DG ซึ่งถูกเคลือบด้วย Au ภายใต้การตกกระทบแบบ TE mode



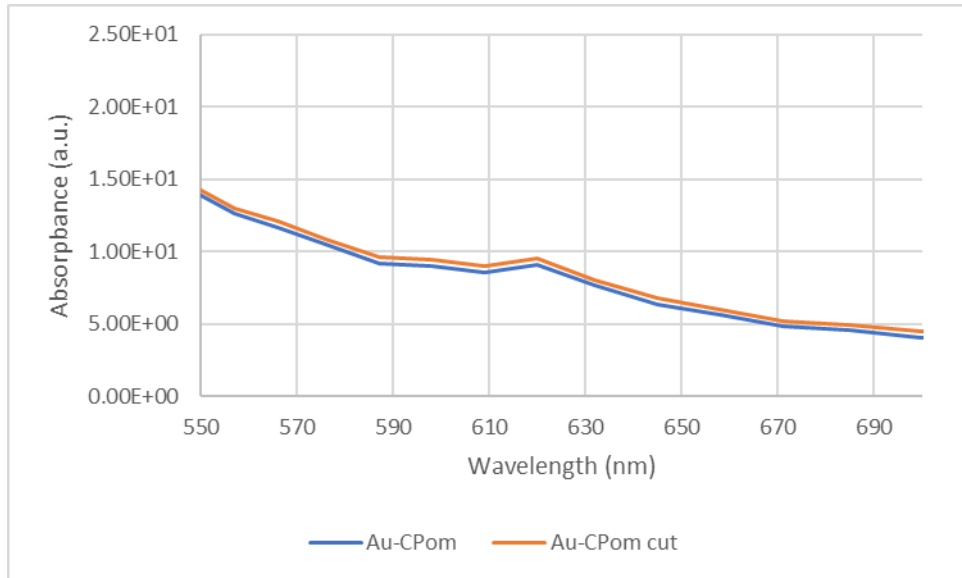
รูปที่ 4.69 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลีสายพันธุ์ DG ซึ่งถูกเคลือบด้วย Pd ภายใต้การตกกระทบแบบ TM mode



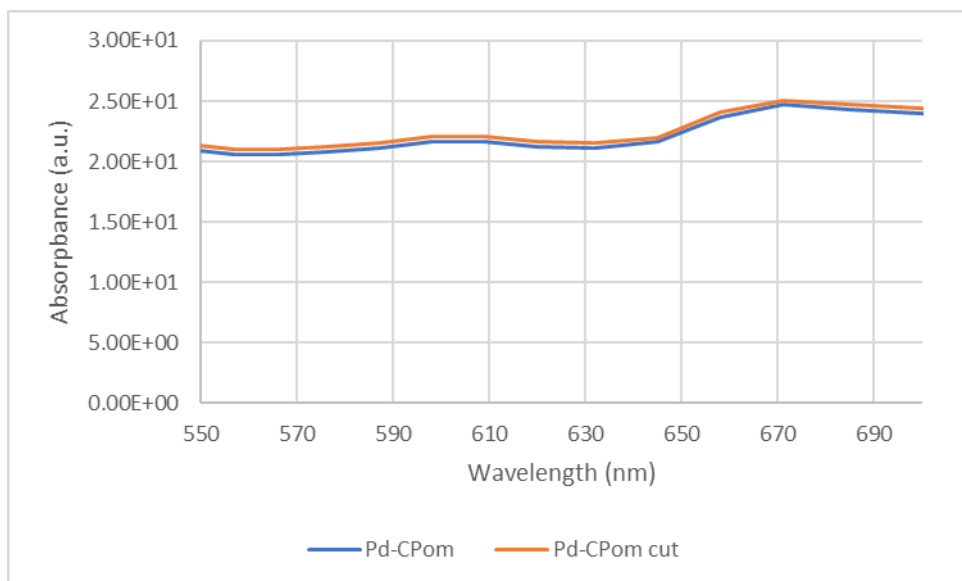
รูปที่ 4.70 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลีสายพันธุ์ DG ซึ่งถูกเคลือบด้วย Pd ภายใต้การตกกระทบแบบ TE mode



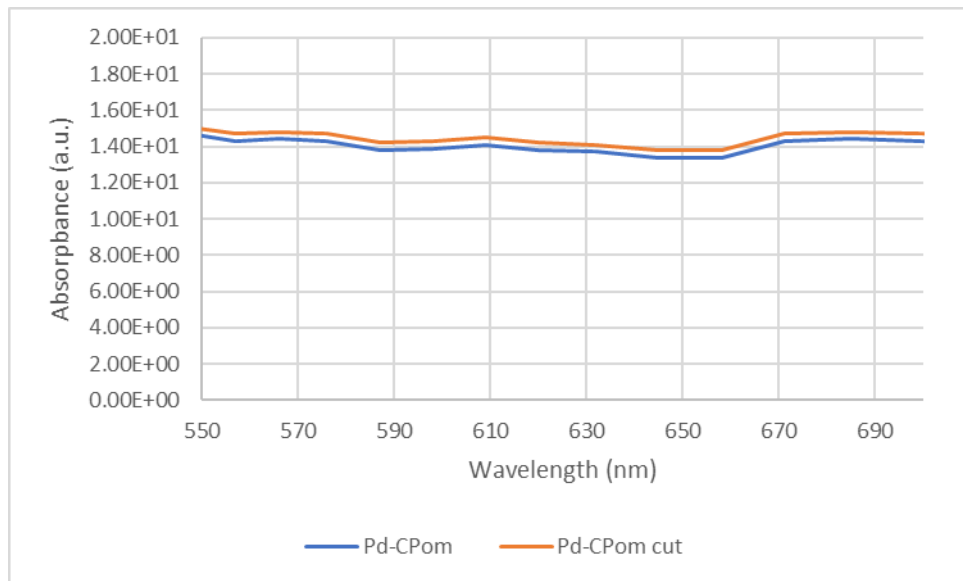
รูปที่ 4.71 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีลีสายพันธุ์ CPom ซึ่งถูกเคลือบด้วย Au ภายใต้การตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.72 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีพีเสื่อสายพันธุ์ CPom ซึ่งถูกเคลือบด้วย Au ภายใต้การตกกระทบแบบ TE mode



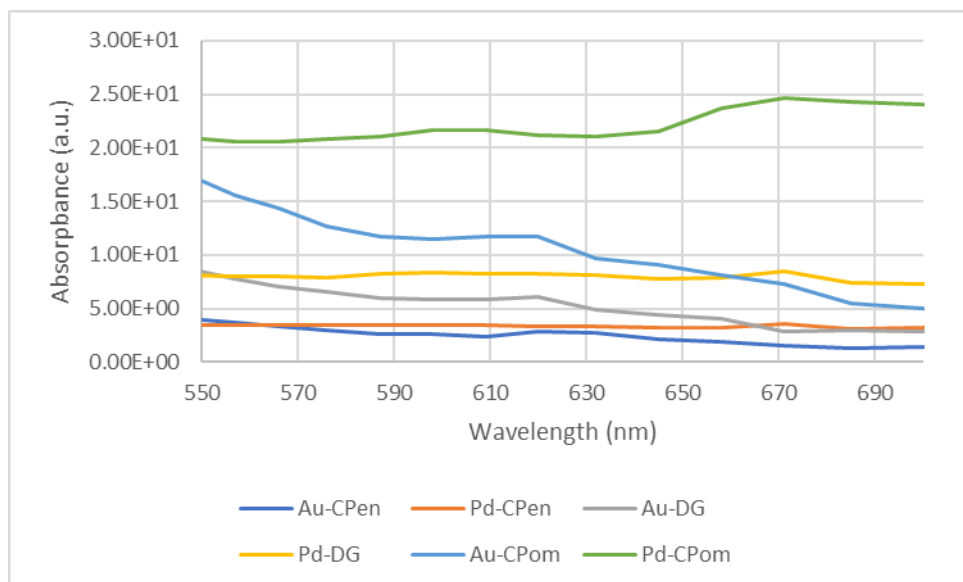
รูปที่ 4.73 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีพีเสื่อสายพันธุ์ CPom ซึ่งถูกเคลือบด้วย Pd ภายใต้การตกกระทบแบบ TM mode



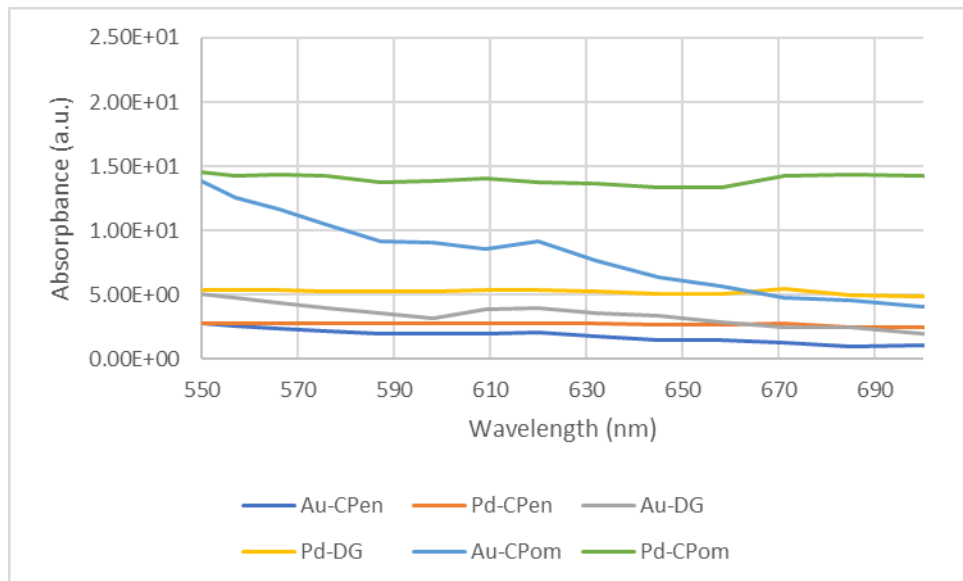
รูปที่ 4.74 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีพีเอสี่สายพันธุ์ CPom ซึ่งถูกเคลือบด้วย Pd ภายใต้การตกกระทบแบบ TE mode

4.2.1.3 ผลการเปรียบเทียบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีพีเอสี่สายพันธุ์ทั้ง 3 สายพันธุ์แบบหัวแหลมภายใต้เงื่อนไขด้วยโลหะ Au และ Pd

รูปที่ 4.75 – 4.76 ถูกสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 – 4.7



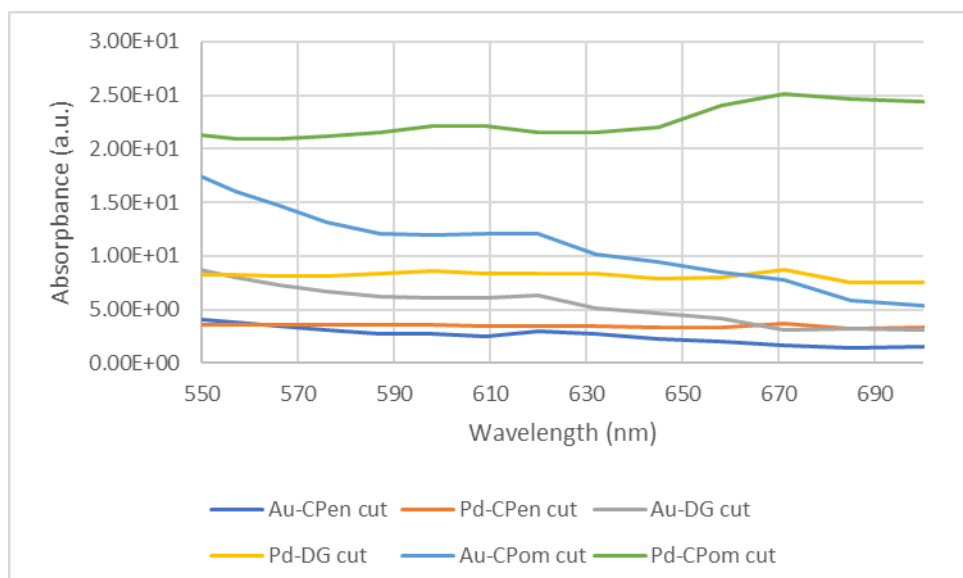
รูปที่ 4.75 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีพีเอสี่สายพันธุ์ชนิดหัวแหลมภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode



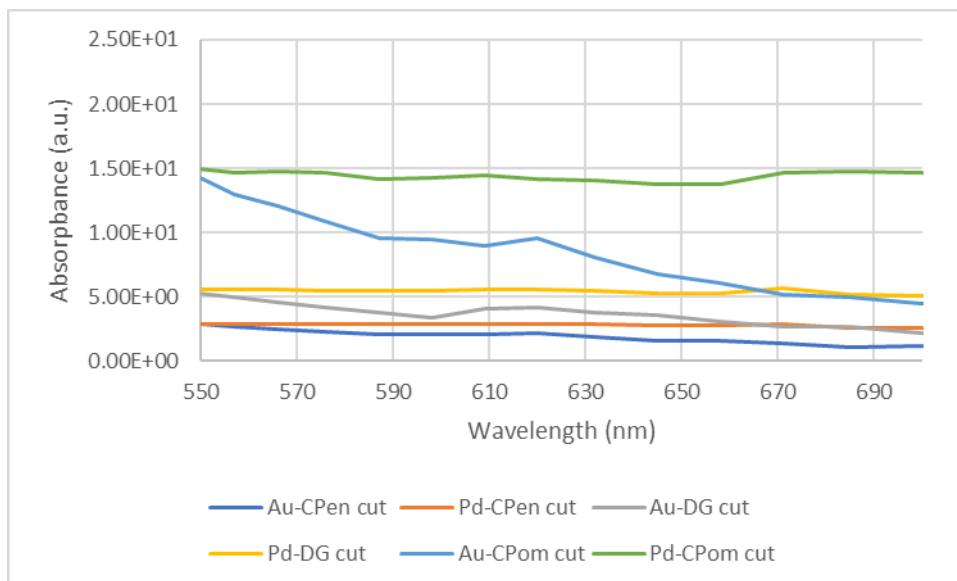
รูปที่ 4.76 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีเส้นีทั้ง 3 สาย พันธุ์ชนิดหัวแหลมภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TE mode

4.2.1.4 ผลการเปรียบเทียบผลดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีเส้นีทั้ง 3 สายพันธุ์แบบหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd

รูปที่ 4.77 - 4.78 ถูกสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 - 4.7



รูปที่ 4.77 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีฟีเส้นีทั้ง 3 สาย พันธุ์ชนิดหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TM mode



รูปที่ 4.78 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สาย พันธุ์ชนิดหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะและการตกกระทบแบบ TE mode

4.2.2 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ชนิดหัวแหลมและหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ

ตารางที่ 4.1 ถูกใช้เป็นข้อมูลดิบเพื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ภายใต้การเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd และการตกกระทบแบบ TE mode และ TM mode ดังแสดงในตารางที่ 4.2 – 4.4

ตารางที่ 4.1 ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ชนิดหัวแหลมและหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วย โลหะ Au และ Pd และการ

เคลือบ, โครงสร้าง	CPen		DG		CPom	
	TM [N/C]	TE [N/C]	TM [N/C]	TE [N/C]	TM [N/C]	TE [N/C]
- , เปลือย	0.059	0.049	0.033	0.031	0.013	0.011
Au, หัวแหลม	2.110	1.783	1.880	1.543	1.394	1.234
Pd, หัวแหลม	1.218	1.066	1.153	0.920	1.044	0.797
Au, หัวตัด	2.130	1.816	1.920	1.565	1.413	1.257
Pd, หัวตัด	1.226	1.076	1.168	0.937	1.049	0.804

ตารางที่ 4.2 - 4.4 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันของค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโลหะเคลือบบนโครงสร้างที่แตกต่างกันของปีกผีเสื้อ (แบบหัวแหลมและหัวตัด) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญภายใต้เงื่อนไข TE mode และ TM mode

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ CPen ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd

ชนิดของโลหะเคลือบ	CPen					
	ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างหัวแหลม [N/C]		ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างหัวตัด [N/C]		ความแตกต่าง (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au	2.110	1.783	2.130	1.816	0.47	0.91
Pd	1.218	1.066	1.226	1.076	0.32	0.46

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ DG ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd

ชนิดของโลหะเคลือบ	DG					
	ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างหัวแหลม [N/C]		ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างหัวตัด [N/C]		ความแตกต่าง (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au	1.880	1.543	1.920	1.565	1.05	0.70
Pd	1.153	0.920	1.168	0.937	0.64	0.91

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโครงสร้าง
ปีกผีเสื้อสายพันธุ์ CPom ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd

ชนิดของโลหะ เคลือบ	CPom					
	ค่าการกระจายตัว ของสนามไฟฟ้าของ โครงสร้างหัวแหลม [N/C]		ค่าการกระจายตัว ของสนามไฟฟ้าของ โครงสร้างหัวตัด [N/C]		ความแตกต่าง (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au	1.394	1.234	1.413	1.257	0.67	0.92
Pd	1.044	0.797	1.049	0.804	0.23	0.43

4.2.3 ผลการเปรียบเทียบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดบนโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3

สายพันธุ์ชนิดหัวแหลมและหัวตัดภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd

พบว่าค่าความยาวคลื่นที่วัดได้บ่งบอกถึงค่าการดูดกลืนของโลหะที่เคลือบบนโครงสร้างของปีก
ผีเสื้อทุกสายพันธุ์ (ตารางที่ 4.5 -4.7) โดยที่ LSPR ของ Au มีค่าเท่ากับ 620 nm ส่วน LSPR
ของ Pd มีค่าเท่ากับ 671 nm

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าความยาวคลื่นเฉพาะของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ CPen ชนิดหัวแหลมและหัวตัด ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd และการตกกระทบ TE mode และ TM mode

เคลือบ, โครงสร้าง	ชนิดการกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด (a.u.)	ความยาวคลื่น (nm)
-, เปลือย	TM	-	-
	TE	-	-
Au, หัวแหลม	TM	2.860	620
	TE	2.050	620
Pd, หัวแหลม	TM	3.600	671
	TE	2.750	671
Au, หัวตัด	TM	2.960	620
	TE	2.150	620
Pd, หัวตัด	TM	3.700	671
	TE	2.850	671

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าความยาวคลื่นเฉพาะของโครงสร้างปีฟีลีสายพันธุ์ DG ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วย โลหะ Au และ Pd เงื่อนไขการเคลือบหัวแหลมและหัวตัด การตกกระทบ TE mode และ TM mode

เคลือบ, โครงสร้าง	ชนิดการกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด (a.u.)	ความยาวคลื่น (nm)
-, เปลือย	TM	-	-
	TE	-	-
Au, หัวแหลม	TM	6.060	620
	TE	4.000	620
Pd, หัวแหลม	TM	8.460	671
	TE	5.430	671
Au, หัวตัด	TM	6.260	620
	TE	4.200	620
Pd, หัวตัด	TM	8.660	671
	TE	5.630	671

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดที่ค่าความยาวคลื่นเฉพาะของโครงสร้างปิพีเสื่อสายพันธุ CPom ภายใต้เงื่อนไขการเคลือบด้วย โลหะ Au และ Pd เงื่อนไขการเคลือบหัวแหลมและหัวตัด การตกกระทบ TE mode และ TM mode

เคลือบ, โครงสร้าง	ชนิดการกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด (a.u.)	ความยาวคลื่น (nm)
-, เปลือย	TM	-	-
	TE	-	-
Au, หัวแหลม	TM	11.700	620
	TE	9.130	620
Pd, หัวแหลม	TM	24.700	671
	TE	14.300	671
Au, หัวตัด	TM	12.100	620
	TE	9.530	620
Pd, หัวตัด	TM	25.100	671
	TE	14.700	671

ตารางที่ 4.8 - 4.10 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโลหะเคลือบบนโครงสร้างที่แตกต่างกันของปิพีเสื่อ (แบบหัวแหลมและหัวตัด) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญภายใต้เงื่อนไข TE mode และ TM mode (ดูจากภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.8 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีก
ผีเสื้อสายพันธ์ CPen ทรงหัวแหลม และหัวตัด ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ
Pd

ชนิดของโลหะ เคลือบ	CPen					
	ค่าการดูดกลืนคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าของ เงื่อนไขหัวแหลม (a.u.)		ค่าการดูดกลืนคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าของ เงื่อนไขหัวตัด (a.u.)		ความแตกต่าง (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au	2.860	2.050	2.960	2.150	1.71	2.38
Pd	3.600	2.750	3.700	2.850	1.36	1.78

ตารางที่ 4.9 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีก
ผีเสื้อสายพันธ์ DG ทรงหัวแหลม และหัวตัด ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd

ชนิดของโลหะ เคลือบ	DG					
	ค่าการดูดกลืนคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าของ เงื่อนไขหัวแหลม (a.u.)		ค่าการดูดกลืนคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าของ เงื่อนไขหัวตัด (a.u.)		ความแตกต่าง (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au	6.060	4.000	6.260	4.200	1.62	2.43
Pd	8.460	5.430	8.660	5.630	1.16	1.80

ตารางที่ 4.10 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีก
 ฝีเสื้อสายพันธ์ CPom ทรงหัวแหลม และหัวตัด ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au และ
 Pd

ชนิดของโลหะ เคลือบ	CPom					
	ค่าการดูดกลืนคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าของ เงื่อนไขหัวแหลม (a.u.)		ค่าการดูดกลืนคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าของ เงื่อนไขหัวตัด (a.u.)		ความแตกต่าง (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au	11.700	9.130	12.100	9.530	1.68	2.14
Pd	24.700	14.300	25.100	14.700	0.80	1.37

ตารางที่ 4.11 - 4.13 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจากการทดลอง
 และจากการคำนวณของการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโลหะเคลือบบน
 โครงสร้างที่แตกต่างกันของปีกฝีเสื้อ (แบบหัวแหลมและหัวตัด) ไม่มีความ
 ต่างอย่างมีนัยสำคัญภายใต้เงื่อนไข TE mode และ TM mode (ดูจาก
 ภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ CPen เคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd (ค่าจากการทดลองและค่าจากการคำนวณ)

เคลือบ, โครงสร้าง	CPen					
	ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบบจำลอง (a.u.)		ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการคำนวณ (a.u.)		ความคลาดเคลื่อน (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au, หัวแหลม	2.860	2.050	2.846	2.032	0.49	0.88
Pd, หัวแหลม	3.600	2.750	3.560	2.727	1.12	0.84
Au, หัวตัด	2.960	2.150	2.940	2.137	0.68	0.60
Pd, หัวตัด	3.700	2.850	3.656	2.816	1.20	1.20

ตารางที่ 4.12 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ DG เคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd (ค่าจากการทดลองและค่าจากการคำนวณ)

เคลือบ, โครงสร้าง	DG					
	ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบบจำลอง (a.u.)		ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการคำนวณ (a.u.)		ความคลาดเคลื่อน (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au, หัวแหลม	6.060	4.000	5.931	3.995	2.17	0.12
Pd, หัวแหลม	8.460	5.430	8.375	5.332	1.01	1.83
Au, หัวตัด	6.260	4.200	6.219	4.132	0.65	1.64
Pd, หัวตัด	8.660	5.630	8.639	5.560	0.24	1.25

ตารางที่ 4.13 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธ์ CPom เคลือบด้วยโลหะ Au และ Pd (ค่าจากการทดลองและค่าจากการคำนวณ)

เคลือบ, โครงสร้าง	CPom					
	ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบบจำลอง (a.u.)		ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการคำนวณ (a.u.)		ความคลาดเคลื่อน (%)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
Au, หัวแหลม	11.700	9.130	11.647	9.127	0.45	0.03
Pd, หัวแหลม	24.700	14.300	24.523	14.292	0.72	0.05
Au, หัวตัด	12.100	9.530	11.984	9.485	0.96	0.47
Pd, หัวตัด	25.100	14.700	24.795	14.565	1.23	0.92

4.3 อภิปรายผล

ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นบนโครงสร้างที่ถูกเคลือบด้วยโลหะ Au จะมีค่าสูงกว่าที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างที่ถูกเคลือบด้วยโลหะ Pd ภายใต้เงื่อนไขการตกกระทบชนิดเดียวกันและระยะคาบที่เท่ากันโดยเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Lightning-Rod Effect หรือคือการศึกษาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวของโลหะซึ่งถูกกระตุ้นด้วยแสงโดยมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงเรขาคณิต ค่าไดโพลีกริกของโลหะและสภาพแวดล้อมซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสงที่ใช้กระตุ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\vec{E}_{tip} = \frac{\epsilon_0(\lambda)}{\epsilon_i(\lambda) + \{\epsilon_0(\lambda) - \epsilon_i(\lambda)\}} \vec{E}_0$$

$$\eta \equiv \frac{|\vec{E}_{tip}|^2}{|\vec{E}_0|^2} = \left| \frac{\epsilon_0(\lambda)}{\epsilon_i(\lambda) + \{\epsilon_0(\lambda) - \epsilon_i(\lambda)\}} \right|^2$$

$$\eta_{(Pd)} = 1.473$$

$$\eta_{(Au)} = 5.531$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรตามเงื่อนไขข้างต้นเพื่อหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

ค่าความเข้มการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าเป็นค่าที่แปรผกผันกับค่าไดโพลีตริกของโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้างปีกผีเสื้อ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิงที่ [23] โดยพิจารณาที่เงื่อนไข Aspect Ratio เดียวกันพบว่าโลหะ Au ซึ่งมีค่าไดโพลีตริกที่ต่ำกว่าโลหะ Pd แสดงให้เห็นว่าค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าของโลหะ Au มีค่าที่สูงกว่าโลหะ Pd

ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผกผันกับขนาดระยะห่างระหว่างคาบปีกผีเสื้อ (period) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจากเอกสารอ้างอิงที่ [24] ดังจะเห็นได้จากค่าความเข้มการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทดลองเรียงค่าจากมากไปน้อยตามลำดับดังนี้ คือสายพันธุ์ CPen DG และ CPom ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของปรากฏการณ์ LSPR ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กลุ่มหมอกอิเล็กทรอนิกส์ในระดับชั้นพลังงานย่อย d-orbitals บนผิวโครงสร้างระดับนาโนของโลหะมีตระกูลซึ่งมีขนาดที่เล็กกว่าช่วงความยาวคลื่นของแสงกระตุ้นถูกกระตุ้นให้เกิดการสั่นในลักษณะเป็นคลื่นนิ่งรอบนิวเคลียสด้วยค่าแอมพลิจูดสูงสุดและอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวเกิดการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยค่าสูงสุดที่ค่าความยาวคลื่นเฉพาะโดยแสงย่าน visible ซึ่งมีค่าความถี่ที่เหมาะสม (ค่าดังกล่าวขึ้นกับคุณสมบัติเชิงเรขาคณิต , ความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ , ค่าไดโพลีตริกและระยะห่างระหว่างโครงสร้างโลหะ)

จากการทดลองวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าเมื่อผลสอดคล้องโครงสร้างโลหะ Pd พบว่ามีค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงกว่าของโลหะ Au เนื่องจากเมื่อกลุ่มหมอกอิเล็กทรอนิกส์บนผิวโลหะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสง อิเล็กตรอนดังกล่าวจะมีพลังงานสะสมภายในที่สูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นและสามารถเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานที่อาศัยอยู่ไปยังระดับที่สูงกว่าเพื่อพยายามปรับลดระดับพลังงานภายในให้กลับสู่ค่าปกติโดยการคายพลังงานดังกล่าวออกมาในรูปแสงสะท้อน ผลของการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนภายในเนื้อวัสดุเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้พลังงานสะสมถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานความร้อนและสูญเสียออกไปหรือคือพลังงานแสงที่ถูกอิเล็กตรอนดูดกลืนไปจากพลังงานแสงกระตุ้น ค่าความถี่ของแสงกระตุ้นสำหรับโครงสร้างโลหะที่มีค่าความถี่ธรรมชาติสูงจะมีแนวโน้มที่พลังงานแสงกระตุ้นจะถูกดูดกลืนด้วยค่าที่สูงและมีค่าสะท้อนกลับค่าต่ำแต่ในทางกลับกันในโครงสร้างโลหะที่มีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำจะมีแนวโน้มที่พลังงานแสงกระตุ้นจะสะท้อนกลับค่าสูงและถูกดูดกลืนด้วยค่าต่ำ ความถี่

ธรรมชาติเป็นค่าที่ขึ้นกับค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระบนผิวของโลหะในลักษณะแปรผันตรงต่อกันซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m_e \epsilon_0}}$$

$$\omega_{p(Au)} = 1.369 \times 10^{13} \text{ rad/s}$$

$$\omega_{p(Pd)} = 1.437 \times 10^{13} \text{ rad/s}$$

ดังนั้นโครงสร้างโลหะ Pd จึงมีค่าความถี่ธรรมชาติที่สูงกว่าโครงสร้างโลหะ Au เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สูงกว่าจึงส่งผลให้ค่าการดูดกลืนของโครงสร้างโลหะ Pd มีค่าที่สูงกว่าของโลหะ Au

ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างปีกผีเสื้อเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยระยะการเดินทางของแสงที่ตกกระทบลงบนปีกผีเสื้อตามความสัมพันธ์ของ Beer-Lambert หรือคือการอธิบายรูปแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการเทียบอัตราส่วนระหว่างความเข้มของแสงที่ตกกระทบและสะท้อนออกจากโครงสร้างดังกล่าวโดยมีลักษณะเป็นสมบัติคอลลิเกทีฟ (colligative properties) ซึ่งขึ้นกับปริมาตรของโครงสร้างปีกผีเสื้อโดยจะเห็นได้จากความเข้มของค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทดลองเรียงค่าจากมากไปน้อยตามลำดับดังนี้ คือสายพันธุ์ CPom DG และ CPen โดยไม่ขึ้นกับชนิดของโลหะที่เคลือบอยู่บนโครงสร้างปีกผีเสื้อ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตรงกับขนาดของโครงสร้างปีกผีเสื้อ ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$A = -\log\left(\frac{I_o}{I_i}\right) = \epsilon lc$$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ CPen มีอันตรกิริยากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องมาจากโครงสร้างดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่มีขนาดเล็กที่สุดและมีระยะห่างคาบระหว่างโครงสร้างน้อยที่สุดในบรรดากลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 สายพันธุ์จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนบนผิวเคลือบสามารถเกิดปรากฏการณ์ LSPR ขึ้นได้อย่างมากซึ่งส่งผลให้ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้างดังกล่าวมีค่าสูงสุดและมีค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดเมื่อพิจารณาด้วยความสัมพันธ์ของ Beer-Lambert

2. เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านวัสดุเคลือบที่ถูกเคลือบบนโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ CPen จะพบว่าปรากฏการณ์ Lightning-Rod Effect ที่เกิดขึ้นกับโลหะ Au ซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกต่ำกว่าโลหะ Pd จะส่งผลให้มีค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าบนโครงสร้างที่ถูกเคลือบด้วยโลหะ Au มีค่าที่สูงกว่าโครงสร้างที่ถูกเคลือบด้วยโลหะ Pd นอกจากนี้โลหะ Au ยังเป็นวัสดุที่มีค่าความถี่ธรรมชาติของอิเล็กตรอนในการสั่นที่น้อยกว่าโลหะ Pd จึงส่งผลให้มีค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่ำกว่า

3. จากการพิจารณาคูสมบัติที่โดดเด่น 2 ประการของโครงสร้างปีกผีเสื้อสายพันธุ์ CPen ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะ Au พบว่ามีเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการตรวจจับเชิงเคมีหรือเชิงชีววิทยาต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. โครงสร้างปีกผีเสื้อภายใต้เงื่อนไขการทดลองในครั้งนี้เป็นโครงสร้างลักษณะเป็นฟังก์ชันคาบ ซึ่งมีการเรียงกันเป็นแถวหน้ากระดานขนาด 4×1 ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถพิจารณาผลของการเกิดปรากฏการณ์ SPR ในรูปแบบแถวตอนลึกของโครงสร้างได้จึงควรมีการออกแบบโครงสร้างแบบจำลองในลักษณะเป็นอาเรย์ ขนาด 4×4 (ขนาดที่มากขึ้นจะส่งผลให้เวลาที่ใช้มากขึ้นแต่ถูกมา)

2. ในการออกแบบการทดลองควรมีการเพิ่มจำนวนของสายพันธุ์ผีเสื้อตัวอย่างที่พบในแถบใกล้เคียงกับประเทศไทยเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากสายพันธุ์ตัวในการ

ทดลองนี้เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาคุณสมบัติของปีกผีเสื้อซึ่งมีถิ่นที่อยู่อาศัยอยู่ที่
ภูมิภาคที่แตกต่างกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. L. Garrett, R. Sekine, M. W. A. Dixon, L. Tilley, K. R. Bambery, and B. R. Wood, "Bio-sensing with butterfly wings: Naturally occurring nanostructures for SERS-based malaria parasite detection," *Phys. Chem. Chem. Phys.* 17, 21164 (2015).
- [2] A. Elbaz, J. Lu, B. Gao, F. Zheng, Z. Mu, Y. Zhao, and Z. Gu, "Chitin-based anisotropic nanostructures of butterfly wings for regulating cells orientation," *Polymers* 9(12), 386 (2017).
- [3] V. Narasimhan, R. H. Siddique, J. O. Lee, S. Kumar, B. Ndjamen, J. Du, N. Hong, D. Sretavan, and H. Choo, "Multifunctional biophotonic nanostructures inspired by the longtail glasswing butterfly for medical devices," *Nature Nanotechnol.* 13, 512 (2018).
- [4] Z. Chen, F. F. Fu, Y. R. Yu, Y. X. Shang, H. Wang, and Y. J. Zhao, "Cardiomyocytes actuated Morpho butterfly wings," *Adv. Mater.* 31, 1805431 (2019).
- [5] T. Jiang, Z. Peng, W. Wu, T. Shi, and G. Liao, "Gas sensing using hierarchical micro/nanostructures of Morpho butterfly scales," *Sensor and Actuators A* 213, 63 (2014).
- [6] C. S. Wang, T. Y. Chang, T. Y. Lin, and Y. F. Chen, "Biologically inspired flexible quasi-single mode random laser: An intergration of *Pieris canidia* butterfly wing and semiconductors," *Sci. Reports* 4, 6736 (2014).
- [7] S. N. Aideo and D. Mohanta, "Investigation of manifestation of optical properties of butterfly wings with nanoscale zinc oxide incorporation," *J. Phys.: Conf. Ser.* 765, 012019 (2016).
- [8] W. Zhang, J. Gu, Q. Liu, H. Su, T. Fan, and D. Zhang "Butterfly effects: novel functional materials inspired from the wings scales." *Physical Chemistry Chemical Physics.* 1(1), 100 (2013).
- [9] B. Lekagul, K. Askins, J. Nabhitabhata and A. samruadkit 2520. *Field Guide to the Butterflies of Thailand.* กรุงเทพฯ : คูรุสภากา.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] R. A. Potyrailo, R. K. Bonam, J. G. Hartley, T. A. Starkey and P. Vukusic 2015. *Towards outperforming conventional sensor arrays with fabricated individual photonic vapour sensors inspired by Morpho butterflies*. London : Nature Communications.
- [11] S. Paul 1976. *The Illustrated Encyclopedia of the Butterfly World in Color*. London. Encyclopedie des papillons.
- [12] H. Fruhstorfer and A. Seitz 1913. *Family: Morphidae Macrolepidoptera of the world*. Germany Stuttgart Alfred Kernen.
- [13] R. K. Varshney and P. Smetacek 2015. *A Synoptic Catalogue of the Butterflies of India*. New Delhi.: New Delhi: Butterfly Research Centre. Bhimtal & Indinov Publishing.
- [14] M. Tait 2006. “Animal Tragic: Popular Misconceptions of Wildlife Through the Centuries.” *Think Books*. 1(1) : 38
- [15] R. B. Morris 1975. “Iridescence from diffraction structures in the wing scales of *Callophrys rubi* the Green Hairstreak.” *Journal of Entomology (A)* 49 : 149-154.
- [16] อัจฉราพร ศรีอ่อน. 2559 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [17] K Locharoenrat. 2016. *Optical Properties of Solids An Introductory Textbook*. PAN STANFORD PUBLISHING. Pte. Ltd.
- [18] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส มณีสายและปริญญา ศรีสัตยกุล. 2557. “การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบผิวโพลีบิโตนัมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการสเป็คเตอริง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- [19] M. Yamamoto 2008. *Surface Plasmon Resonance (SPR) Theory: Tutorial* Nishikyo-ku. JAPAN.
- [20] D. Joseph 2014. *Electrical Properties of Materials*. [Online]. Available : <https://slideplayer.com/slide/224872/>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [21] K. G. Pijush, T. D. Desalegn, A. David and B. H. Joseph 2017. Calculated thickness dependent plasmonic properties of gold nanobars in the visible to near-infrared light regime. [Online]. Available : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177463>. 1-11
- [22] T. sannomiya, C. Hafner and J. Voros 2015. localized surface plasmon resonance of optically coupled metal particles. [Online]. Available : <https://slideplayer.com/slide/4831962>
- [23] F. Norihiko and T. Katsuaki Lightning-Rod Effect of Plasmonic Field Enhancement on Hydrogen-Absorbing Transition Metals, DOI:10.3390/nano9091235 (2019).
- [24] A. Anchu, A. Arackal, J. George, Study of Surface Plasmon Excitation on Different Structures of Gold and Silver, Scientific & Academic Publishing doi:10.5923/j.nn.20150504.01 (2015).

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \omega_A \epsilon_i |\vec{E}|^2 L$$

$$\omega_P = \sqrt{\frac{ne^2}{m_e \epsilon_0}}$$

$$n_{Au} = 5.90 \times 10^{22} \text{ ตัว}$$

$$n_{Pd} = 6.50 \times 10^{22} \text{ ตัว}$$

$$\omega_{P(Au)} = 1.369 \times 10^{13} \text{ rad/s}$$

$$\omega_{P(Pd)} = 1.437 \times 10^{13} \text{ rad/s}$$

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

$$\omega_{(Au)} = \frac{2\pi(3 \times 10^8)}{620 \times 10^{-9}} = 3.040 \times 10^{15} \text{ rad/s}$$

$$\omega_{(Pd)} = \frac{2\pi(3 \times 10^8)}{671 \times 10^{-9}} = 2.809 \times 10^{15} \text{ rad/s}$$

$$\omega_A = \left(1 - \frac{\omega_P^2}{\omega^2}\right)$$

$$\omega_{A(Au)} = 0.999 \text{ rad/s}$$

$$\omega_{A(Pd)} = 0.999 \text{ rad/s}$$

$$\epsilon_i = 2nk$$

$$\epsilon_{i(Au)} = 0.800 \quad n_{Au} = 0.24 \quad k_{Au} = 1.660$$

$$\epsilon_{i(Pd)} = 3.003 \quad n_{Pd} = 0.54 \quad k_{Pd} = 2.781$$

ตารางที่ ก.1 พื้นที่ผิวของโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์

พื้นที่ผิว (μm^2)	CPen	DG	CPom
เปลือย	0.981	11.078	154.228
หัวแหลม	2.560	17.640	225.000
หัวตัด	2.630	17.825	225.660

ตารางที่ ก.2 ความยาวเฉลี่ยของโครงสร้างปีกผีเสื้อทั้ง 3 สายพันธุ์

ความยาว (μm)	CPen	DG	CPom
เปลือย	0.990	3.328	12.418
หัวแหลม	1.600	4.200	15.000
หัวตัด	1.622	4.222	15.022

สายพันธุ์ CPen

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - CPen (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (2.110)^2$$

$$= 2.846 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - CPen cut (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (2.130)^2 (1.622)$$

$$= 2.940 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - CPen (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (1.218)^2 (1.600)$$

$$= 3.560 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - CPen cut (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (1.226)^2 (1.622)$$

$$= 3.656 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - CPen (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.783)^2 (1.600)$$

$$= 2.032 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - CPen cut (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.816)^2 (1.622)$$

$$= 2.137 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - CPen (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (1.066)^2 (1.600)$$

$$= 2.727 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - CPen cut (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (1.076)^2 (1.622)$$

$$= 2.816 \text{ a.u.}$$

สายพันธุ์ DG

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - DG (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.880)^2 (4.200)$$

$$= 5.931 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - DG cut (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.920)^2 (4.222)$$

$$= 6.219 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - DG (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (1.153)^2 (4.200)$$

$$= 8.375 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - DG cut (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (1.168)^2 (4.222)$$

$$= 8.639 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - DG (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.543)^2 (4.200)$$

$$= 3.995 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธ์ุ Au - DG cut (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.565)^2 (4.222)$$

$$= 4.132 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธ์ุ Pd - DG (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (0.920)^2 (4.200)$$

$$= 5.332 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธ์ุ Pd - DG cut (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (0.937)^2 (4.222)$$

$$= 5.560 \text{ a.u.}$$

สายพันธ์ุ CPom

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธ์ุ Au - CPom (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.394)^2 (15.000)$$

$$= 11.647 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธ์ุ Au - CPom cut (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.413)^2 (15.022)$$

$$= 11.985 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - CPom (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (1.044)^2 (15.000)$$

$$= 24.523 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - CPom cut (TM mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (1.049)^2 (15.022)$$

$$= 24.795 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - CPom (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.234)^2 (15.000)$$

$$= 9.127 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Au - CPom cut (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (0.800) (1.257)^2 (15.022)$$

$$= 9.484 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - CPom (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (0.797)^2 (15.000)$$

$$= 14.292 \text{ a.u.}$$

ตัวอย่างการคำนวณของสายพันธุ์ Pd - CPom cut (TE mode)

$$P_{asb} = (0.5) (0.999) (3.003) (0.804)^2 (15.022)$$
$$= 14.565 \text{ a.u.}$$