

การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปรากฏการณ์เซอร์เฟส
พลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนทองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
SIMULATION AND ANALYSIS OF SURFACE PLASMON
RESONANCE ON GOLD NANOPARTICLES USING
THE FINITE ELEMENT METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2560
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION AND ANALYSIS OF SURFACE PLASMON
RESONANCE ON GOLD NANOPARTICLES USING
THE FINITE ELEMENT METHOD



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2017

หัวข้อโครงการพิเศษ การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนทองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
Simulation and Analysis of Surface Plasmon Resonance on Gold Nanoparticles Using the Finite Element Method

ชื่อนักศึกษา นางสาวกัญญาภัค อุ่นฤทธิชัย รหัสนักศึกษา 57050931
นางสาวชัชดา กรัสมิตร รหัสนักศึกษา 57050948

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษกร โล่เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ กรรมการ	
ดร.วรการ นียากร กรรมการ	
ผศ.ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนทองโดยวิธีไฟโนอิลิเมนต์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัญญาภัค อุ่นฤทธิชัย	รหัสนักศึกษา 57050931
	นางสาวชัชชดา กริมิตร	รหัสนักศึกษา 57050948
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ธนภรณ์ ลีลาวพัฒนานนท์	

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเซนเซอร์ชนิดที่อาศัยหลักการของคลื่นผิวพลาสมอนได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากคลื่นผิวพลาสมอนสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับงานทางด้านการฉายรังสีของโรคมะเร็ง, การพัฒนาทางยารักษาโรคเช่นเซอร์ตีเอ็นเอ และยังเป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาอันตรกิริยาของสารชีวโมเลกุล ในโครงการวิจัยนี้เราได้ทำการศึกษาการใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟโนอิลิเมนต์และทำการสร้างแบบจำลองขึ้นมาสำหรับการศึกษาการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ ซึ่งขอบเขตโครงการพิเศษนี้จะกำหนดเป็นสามกรณีคือ การออกแบบอนุภาคทองนาโนที่มีรูปร่างต่างๆกันและมีขนาดต่างๆกัน, การเปลี่ยนระยะห่างของแต่ละอนุภาค, การเปลี่ยนฐานรอง (substrate) ของอนุภาค และทำการวิเคราะห์หาค่าสนามไฟฟ้า, ความยาวคลื่นแสงที่ตอบสนองต่อการเกิดปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะและไดอิเล็กตริกในกรณีต่างๆ ซึ่งเราทำการสร้างแบบจำลองโดยกำหนดให้มีรูปร่างและขนาดต่างๆ เช่น ทรงกลมทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม และทรงวงรี โดยมีระยะห่างของแต่ละอนุภาคที่ 5 และ 10 นาโนเมตร และมีฐานรองอนุภาค 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และ แก้ว (BK-7) เพื่อหารูปร่างของอนุภาคที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่บริเวณรอยต่อดังกล่าว

คำสำคัญ: คลื่นผิวพลาสมอน , แสงตกกระทบชนิด TM mode , วิธีการไฟโนอิลิเมนต์ , อนุภาคทองนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Simulation and Analysis of Surface Plasmon Resonance on Gold Nanoparticles Using the Finite Element Method		
Student	Miss Kanyapak Ounrittichai	student ID	57050931
	Miss Chatchada Krimitr	student ID	57050948
Degree	Bachelor of science (Applied Physics)		
Department	Physics		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2017		
Advisor	Assist.Prof. Tanaporn Leelawattananon		

Abstract

Nowadays surface plasmon resonance sensors are becoming increasingly popular. Since they can be used for biometric applications such as the development of the immune system sensor, the development of drug therapies, the DNA sensor and also a tool for studying the plasma wave at the interface between metal and air, our projects have studied the surface plasmon resonance phenomenon between the gold nanoparticles and air interface by using the simulation program which support the finite element method. The scope of this special project is defined in three cases. The first is about designing the model of gold nanoparticles shapes with size different, the second is about changing the distance between the gold nanoparticles in each model and the third is about changing substrate of gold nanoparticles in each model. For results, we have analyzed the electric field and the responding wavelength for surface plasmon resonance phenomenon at the interface between gold nanoparticles and dielectric in each model. Our nanoparticles models are defined different shapes and different size such as cube rectangular and oval with a space between the gold nanoparticles at 5 nm. and 10 nm. Varying two types of substrate of nanoparticles are silicon and glass (BK-7) are also defined. For the findings the best shape of nanoparticles give maximum electric field at the interface of the two media.

Keywords : Surface Plasmon Resonance, Transverse magnetic (TM) modes , Finite Element method , Gold nanoparticle.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรณภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่คอยแนะนำสั่งสอน และได้มอบหมายหัวข้อโครงการวิจัยนี้แก่ผู้วิจัยได้ศึกษาตามความถนัด ความสามารถ สนับสนุนด้านการใช้โปรแกรมที่สนับสนุนด้วยวิธีไฟโนลิเมต์ แนวความคิด การวางแผนลงมือปฏิบัติงาน รวมถึงความช่วยเหลือในด้านต่างๆทั้งทางด้านทฤษฎีและทางด้านปฏิบัติ จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณ เพื่อนนิสิตนักศึกษา สาขาวิชาหลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือผู้ศึกษาค้นคว้าเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้มอบวิชาความรู้ต่างๆด้านฟิสิกส์ให้แก่ผู้วิจัยเพื่อนำไปใช้ในการดำเนินชีวิตและประกอบอาชีพในอนาคตได้

การศึกษาค้นคว้าเพื่อจัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้ ทำให้ผู้ศึกษาค้นคว้าได้รับความรู้ใหม่ๆและการทำงานร่วมกับผู้อื่น และผู้ศึกษาค้นคว้าขอขอบโครงการพิเศษนี้เพื่อเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงความกตัญญูต่อบิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณต่อผู้ศึกษาค้นคว้าทุกท่าน และผู้ศึกษาหวังว่าโครงการพิเศษฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เข้ามาศึกษาสืบต่อไป

กัญญาภัค อุ่นฤทธิชัย
ชัชดา กริมิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 หลักการของ surface plasmon resonance	3
2.2 ทฤษฎี Mie และ บทความที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 ทฤษฎีทางฟิสิกส์เกี่ยวกับ localized surface plasmon resonance (LSPR)	5
2.4 อนุภาคนาโนของโลหะมีตระกูลในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าภายนอก	8
2.5 ทฤษฎี Mie	10
2.6 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element)	11
2.6.1 การแบ่งโครงสร้างเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์	11
2.7 การหักเหของแสง (Refraction)	12
2.7.1 สาเหตุที่ทำให้แสงเกิดการหักเห	12
2.7.2 ดรรชนีหักเหของตัวกลาง (Index of Refraction)	13
2.7.3 กฎการหักเหของแสง	14
2.7.4 การหักเหของแสงเกิดขึ้นได้ 2 แบบ	15
2.7.5 มุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมด	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8 แสงประเภท TM mode และแสงประเภท TE mode	17
2.8.1 ทรานส์เวอร์สอิเล็กทริกเวฟ (Transverse Electric Wave; TE)	17
2.8.2 ทรานส์เวอร์สแมกเนตริกเวฟ (Transverse Magnetic Wave; TM)	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	18
3.1 ขอบเขตการวิจัย	18
3.2 ศึกษาหลักการการทำงานของโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนลิเมนต์	18
3.3 การกำหนดค่า Parameters เริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์	19
3.4 การสร้างและออกแบบการจำลอง	20
3.4.1 การออกแบบและกำหนดฐานรองอนุภาคทองคำนาโน	20
3.4.2 รูปทรงของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 20x20x20 นาโนเมตร ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	21
3.4.3 รูปทรงของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 30x30x30 นาโนเมตร ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	23
3.4.4 รูปทรงของแท่งสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 20x20x40 นาโนเมตร ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	25
3.4.5 รูปทรงของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 30x30x40 nm ระยะห่าง 5 nm	27
3.4.6 ขั้นตอนการกำหนดค่า Material	29
3.5 การประมวลผลและการนำข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์	30
3.5.1 จากขั้นตอนดังกล่าวเมื่อเรากำหนดค่า Parameter ต่างๆ	30
3.5.2 กติ Build Mesh และ กติ Compute	30
3.5.3 โปรแกรมจะคำนวณค่าของผลสนามไฟฟ้า	30
3.5.4 กติผิวของอนุภาค และ บันทึกค่าของสนามไฟฟ้า	30
3.5.5 นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาสร้างกราฟ	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย	32
4.1 การออกแบบอนุภาครูปทรงต่างๆ และ มีขนาดต่างๆ ทั้งหมด 4 กรณี	32
4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter) และการบันทึกผลค่าสนามไฟฟ้า	33
4.3 การพล็อตกราฟค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละความยาวคลื่น	35
4.4 กรณีอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	39
4.4.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	39
4.5 กรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	40
4.5.1 สรุปผลการจำลองอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	43
4.5.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	43
4.6 กรณีอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	44
4.6.1 สรุปผลการจำลองทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	47
4.6.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	47
4.7 กรณีอนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	48
4.7.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	51
4.7.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	51
4.8 การวิเคราะห์ผลภาพสนามไฟฟ้าจากกราฟและผลภาพ ที่ระยะห่าง 5, 10 นาโนเมตร	52
4.9 กรณีอนุภาคทรงกลมขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	53
4.10 กรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	59
4.11 กรณีอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	65
4.12 กรณีอนุภาคทรงวงรี ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	71
4.13 สรุปการวิเคราะห์ผล ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	77
4.14 การออกแบบอนุภาครูปทรงต่างๆและมีขนาดต่างๆ ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	79
4.15 กรณีอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	80
4.15.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	83
4.15.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	83
4.16 กรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	84
4.16.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	87
4.16.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	87
4.17 กรณีอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	88
4.17.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	91

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 4.17.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร ประโยชน์ 91 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.18 กรณีนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	92
4.18.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	95
4.18.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	95
4.19 กรณีนุภาคทรงกลมขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	96
4.20 กรณีนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	102
4.21 กรณีนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	108
4.22 กรณีนุภาคทรงวงรี ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	114
4.23 สรุปการวิเคราะห์ผล ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	120
4.24 รวมผลสรุปการวิเคราะห์	122
4.24.1 รวมผลสรุปการวิเคราะห์กรณีระยะห่าง 5 นาโนเมตร	122
4.24.2 รวมผลสรุปการวิเคราะห์กรณีระยะห่าง 10 นาโนเมตร	123
4.24.3 รวมผลสรุปการวิเคราะห์กรณีฐานรอง	124
4.24.4 รวมผลสรุปการวิเคราะห์กรณีรูปทรงสมมาตรและรูปทรงไม่สมมาตร	126
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	127
5.1 สรุปผลงานวิจัย	127
5.2 ข้อเสนอแนะ	128
เอกสารอ้างอิง	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แนวทางดำเนินงาน	1
2.1 ความเร็วของแสงเมื่อผ่านตัวกลาง และ ค่าดัชนีหักเห	13
3.1 ตัวอย่างตารางค่า Parameters เริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ของอนุภาคทองนาโนใน แต่ละรูปทรงที่ต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 250 นาโนเมตร	19
3.4.1.1 การกำหนดค่า Block โดยที่การกำหนดขนาดของฐานรองและปรับค่าตามขนาดอนุภาค	20
3.4.2.1 การกำหนดแต่ละอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 20x20x20 นาโนเมตร	21
3.4.3.1 การกำหนดแต่ละอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 30x30x30 นาโนเมตร	23
3.4.4.1 การกำหนดแต่ละอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 20x20x40 นาโนเมตร	25
3.4.5.1 การกำหนดแต่ละอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 30x30x40 นาโนเมตร	27
4.1.1 อนุภาคทรงกลม มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร	32
4.1.2 อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร	32
4.1.3 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร	33
4.1.4 อนุภาคทรงวงรี มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร	33
4.4 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	36
4.5 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	40
4.6 ผลภาพ กรณีอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	44
4.7 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	48
4.9 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงกลมขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	53
4.10 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	59
4.11 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	65
4.12 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงวงรี ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	71
4.14.1 อนุภาคทรงกลม มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร	79
4.14.2 อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร	79
4.14.3 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร	79
4.14.4 อนุภาคทรงวงรี มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ใดเห็นหน้าปกเอกสารนี้เป็นการนำ
ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถือเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 ผลกราฟกรณีนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	80
4.16 ผลกราฟกรณีนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	84
4.17 ผลกราฟกรณีนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	88
4.18 ผลกราฟกรณีนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	92
4.19 ผลภาพกรณีนุภาคทรงกลมขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	96
4.20 ผลภาพกรณีนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	102
4.21 ผลภาพกรณีนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	108
4.22 ผลภาพกรณีนุภาคทรงวงรี ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	114



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ก) กระบวนการสั้นพ้องของพลาสมอน ที่ชั้นรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางโลหะและชั้นไดอิเล็กตริก	4
ข) กระบวนการสั้นพ้องของพลาสมอน สำหรับอนุภาคนาโนทรงกลม	
2.2 แบบจำลองการคำนวณของ Drude กราฟแสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่น LSPR ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง	6
2.3 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยและเอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม	11
2.4 การหักเหและการสะท้อนของแสง	12
2.5 กฎของสเนลล์	14
2.6 การหักเหเข้าหาเส้นแนวฉาก	15
2.7 การหักเหเข้าออกเส้นแนวฉาก	15
2.8 มุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมด	16
2.9 ภาพแสดงการลึกลับจริงและลึกลับปรากฏ	16
3.1 ชั้นที่ประกอบในอนุภาคนาโนโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟโนอิลิเมต	18
3.2 ฐานรอง (substrate) อนุภาคนาโนที่เราได้ทำการออกแบบ	20
3.3 ขนาดรูปทรงอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ 20x20x20 nm ระยะห่าง 5 nm โดยมีแสงตกกระทบบนแบบ Linearly polarized plane wave ด้วยมุมตกกระทบบน $\frac{\pi}{4}$ rad	22
3.4 ขนาดรูปทรงอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ 30x30x30 nm ระยะห่าง 5 nm โดยมีแสงตกกระทบบนแบบ Linearly polarized plane wave ด้วยมุมตกกระทบบน $\frac{\pi}{4}$ rad	24
3.5 ขนาดรูปทรงอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ 20x20x40 nm ระยะห่าง 5 nm โดยมีแสงตกกระทบบนแบบ Linearly polarized plane wave ด้วยมุมตกกระทบบน $\frac{\pi}{4}$ rad	26
3.6 ขนาดรูปทรงอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ 30x30x40 nm ระยะห่าง 5 nm โดยมีแสงตกกระทบบนแบบ Linearly polarized plane wave ด้วยมุมตกกระทบบน $\frac{\pi}{4}$ rad	28
3.7 ตัวอย่างตารางค่า Material ของ Air ที่ความยาวคลื่น 250 nm	29
3.8 ตัวอย่างตารางค่า Material ของ Au ที่ความยาวคลื่น 250 nm	29
3.9 ตัวอย่างตารางค่า Material ที่ความยาวคลื่น 250 nm	29
3.10 สัญลักษณ์ Build Mesh และ Compute	30
3.11 อนุภาคสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ 30x30x30 nm ระยะห่าง 5 nm ที่ความยาวคลื่น 250 nm	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 การกตที่ผิวของอนุภาค และ ตารางค่าของสนามไฟฟ้า	30
3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนกับไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ อนุภาค 20 นาโนเมตร ระยะอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร	31
3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและระยะต่างๆที่อนุภาค 20 nm	31
4.1 ตัวอย่างตารางการกำหนดค่าพารามิเตอร์	33
4.2 ตัวอย่างกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Au และ ฐานรอง	33
4.3 ตัวอย่างการกำหนดภาพฐานรองในแต่ละชนิด	34
4.4 ตัวอย่างการกต Build Mesh และกต Compute	34
4.5 ตัวอย่างการกำหนดระยะความสูงของแต่ละอนุภาคเพื่อบันทึกค่าสนามไฟฟ้า	34
4.6 ตัวอย่างตารางการบันทึกค่าสนามไฟฟ้า	34
4.7 ตัวอย่างตารางและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าและความยาวคลื่น	35
4.8 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดในแต่ละช่วง	35
4.9 ช่วงความยาวคลื่นต่างๆที่จุดสูงสุดของอนุภาค	52
4.10 ตัวอย่างผลภาพช่วงความยาวคลื่นต่างๆ	52
4.11 กราฟรวมของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่มีรูปทรงและขนาดต่างๆกัน ระยะห่าง 5 นาโนเมตร	78
4.12 กราฟรวมของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่มีรูปทรงและขนาดต่างๆกัน ระยะห่าง 10 นาโนเมตร	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
SPR	Surface Plasmon resonance
TIR	การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection)
TM	Transverse magnetic
TE	Transverse electric



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในระยะหลังมานี้ทำให้โลหะที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตรถูกผลิตขึ้นมาได้ซึ่งเป็นที่สนใจต่อกลุ่มของนักฟิสิกส์, นักเคมี, นักวิทยาศาสตร์และนักชีววิทยา โดยเฉพาะในแง่ของเซอร์เฟสพลาสมอนเป็นปรากฏการณ์ที่มีการกระตุ้นของอิเล็กตรอนอิสระที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวนเมื่อรอยตอดังกล่าวมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดเลือนหายไปอย่างรวดเร็วเกิดขึ้น (evanescent electromagnetic waves) การเกิดเซอร์เฟสพลาสมอนสามารถกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์อื่นๆที่แตกต่างกันอีกมากมายได้รวมไปถึงยังมีผลต่อการตอบสนองทางแสงของวัสดุอีกด้วยการคับปลิงกันระหว่างแสงกับเซอร์เฟสพลาสมอนในโครงสร้างของวัสดุระดับนาโนเมตรสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์เด่นๆได้ เช่น ปรากฏการณ์การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับที่พื้นผิว (surface-enhanced sensing) และยังสามารถวัดระยะห่างภายในโมเลกุลได้อีกด้วย (measuring intra molecular distances in molecule)

การตอบสนองทางแสงของอนุภาคโลหะนาโน (NPs) สามารถปรับได้โดยการควบคุมขนาดอนุภาค รูปร่างของอนุภาคและสภาพแวดล้อมซึ่งกลายเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับงานวิจัยในบางด้าน เช่น โฟโตนิกส์ เซอร์เฟสพลาสมอนหรือที่เรียกว่า พลาสมอนิกส์ ในอีกแง่มุมหนึ่งก็เกิดวิธีการด้านสังเคราะห์ของอนุภาคนาโนด้วยเทคนิคใหม่ๆเพื่อให้ได้อนุภาคนาโนที่มีขนาดและรูปร่างที่สนับสนุนให้เกิดคุณสมบัติ เซอร์เฟสพลาสมอนที่ดีขึ้นสำหรับการนำไปใช้ในงานหลายๆด้าน เช่น งานทางด้านแสงเชิงแม่เหล็ก (magneto-optic) หรืองานทางด้านที่เกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการกระเจิงแบบรามานที่พื้นผิวซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านตรวจจับทางชีวภาพ หรือใช้ประโยชน์ทางด้านเคมีบำบัดได้โดยอาศัยการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนของอนุภาคนาโน

ในปัจจุบันนี้ยังพบอีกว่ารูปร่างของอนุภาคนาโนมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของอนุภาคโลหะนาโน และมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเหล่านี้ว่าขึ้นอยู่กับรูปร่าง และขนาดของอนุภาคอย่างไรทั้งรูปร่างแบบทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ หรือ ทรงหลายเหลี่ยมอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนด้วยเช่นเดียวกัน

ในโครงการพิเศษนี้เราจะทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนนซ์ของอนุภาคทองนาโนที่มีรูปร่างต่างๆกันและมีขนาดต่างๆกันโดยใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อดูผลและคุณภาพของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นกับอนุภาคทองนาโนเหล่านี้ ซึ่งจะเป็ข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการผลิตอนุภาคทองนาโนที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเซอร์เฟสพลาสมอนอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) สามารถอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนได้
- 2) ศึกษาการใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองในการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำนาโนได้
- 3) วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปร่างต่างๆ เช่น ทรงแบบทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม และทรงวงรี เป็นต้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) สามารถอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนได้
- 2) ศึกษาการใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองในการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำนาโนได้
- 3) วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปร่างต่างๆ เช่น รูปร่างแบบทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม และทรงวงรี เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาหลักการการทำงานของโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 2) ทำการออกแบบโครงสร้างของอนุภาคทองคำนาโนให้มีรูปร่างต่างๆกันโดยใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 3) วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำนาโนแต่ละรูปร่าง
- 4) สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 1.1 แนวทางการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
	60	60	60	60	61	61	61	61	61
1. เสนอหัวข้อโครงการ									
2. ศึกษาข้อมูลการใช้โปรแกรม									
3. ลงมือทำโครงการ									
4. ทำเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์									

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1) ได้รับความรู้ทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำนาโนได้
- 2) วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปร่างต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการผลิตอนุภาคทองคำนาโนที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นประโยชน์ทางด้านเซอร์เฟสพลาสมอนได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ตีหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

surface plasmon resonance biosensor เป็นเทคนิคเชิงแสงที่ใช้ศึกษาการจับกันของด้านโมเลกุลของสารสองชนิดโดยตรงโดยไม่ต้องติดฉลากสารที่ต้องการตรวจวัด และสามารถตรวจวัดได้แบบ real time โดยสารที่ใช้ตรวจจับ (ligand) จะถูกตรึงอยู่บนผิวของ sensor ซึ่งเป็นโลหะที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเมื่อสารที่ต้องการตรวจวัด (analyte) จับกับ ligand ที่ตรึงอยู่บนผิวของ sensor จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) เมื่อแสงตกกระทบผิวของ sensor ทำให้มุมสะท้อนของแสงเปลี่ยนแปลงไปจึงสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารทั้งสองชนิดได้เทคนิคนี้สามารถนำมาใช้ในการตรวจวัดโปรตีน สารพันธุกรรม (DNA หรือ RNA) คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเซลล์ต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาตรวจหาการติดเชื้อ เช่น การตรวจหาเชื้อไวรัส และแบคทีเรีย เป็นต้น

2.1 หลักการของ surface plasmon resonance

สมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนของโลหะเกิดจากการสั่น (oscillation) ของอิเล็กตรอนที่ผิวของอนุภาคนาโน (localized surface plasmons) เป็นขบวนการควอนไทซ์ (quantized) กล่าวคือเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบลงบนอนุภาค (localized surface plasmons) จะเกิดการสั่นพ้องก็ต่อเมื่อความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับความถี่ในการสั่นของอิเล็กตรอน (plasmon frequency) เนื่องจากการแทรกสอดแบบเสริมกันจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance) ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ความถี่เฉพาะเจาะจงค่าหนึ่งๆ ส่งผลให้อนุภาคนาโนมีสีที่แตกต่างกันออกไปจากโลหะแบบก้อน (bulk metal) โดยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเท่ากับ E_p ดังสมการต่อไปนี้

$$E_p = \hbar \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}} \quad \text{สมการที่ (2.1)}$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่า permittivity เมื่ออยู่ใน free space

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

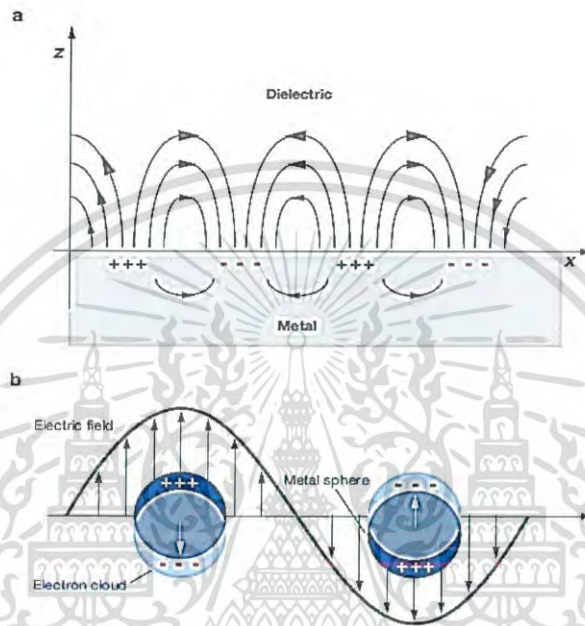
e คือ ประจุอิเล็กตรอน

m คือ ค่ามวลของอิเล็กตรอน

(ในที่นี้ bulk หมายถึง ก้อนวัสดุที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของแสงใน 3 มิติ)

คลื่นผิวพลาสมอนเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวโลหะเป็นคลื่นที่สั่นอย่างพร้อมเพรียงกันของประจุที่บริเวณผิวโลหะโดยแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ชั้นรอยต่อระหว่างผิวโลหะ และชั้นไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่ออยู่ห่างจากผิวโลหะเรียกสนามไฟฟ้านี้ว่า evanescent field นอกจากนี้คลื่นผิวพลาสมอนสามารถเคลื่อนที่ไปตามพื้นผิวรอยต่อระหว่างชั้นไดอิเล็กตริกและชั้นโลหะ (propagation length) ได้ในระยะประมาณ 10-20 ไมโครเมตรก็จะสูญเสียไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานไปจนหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.1ก) สำหรับวิธีการกระตุ้นคลื่นผิวพลาสมอนที่นิยมใช้ทั่วไป คือ วิธีการจัดแสงแบบ “Kretschmann configuration” โดยให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงยิงผ่านปริซึม และตกกระทบกับฟิล์มบางของโลหะซึ่งเคลือบอยู่บนปริซึม และแสงสะท้อนเข้าสู่ตัวตรวจจับแสงโดยฟิล์มบางของโลหะที่สามารถเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ได้ คือ โลหะมีตระกูล เช่น ทอง เงิน เป็นต้น โดยที่ความหนาของชั้นฟิล์มบางของโลหะโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 50 นาโนเมตร เงื่อนไขการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ คือ ค่าเลขคลื่น (k_x) ของแสงตกกระทบในแนวขนานกับพื้นผิวโลหะต้องมืขนาดเท่ากับเลขคลื่นของคลื่นผิวพลาสมอน (k_{sp})



รูปที่ 2.1

- ก) กระบวนการสั่นพ้องของพลาสมอน ที่ชั้นรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางโลหะและชั้นไดอิเล็กทริก
 ข) กระบวนการสั่นพ้องของพลาสมอน สำหรับอนุภาคนาโนทรงกลม [1]

จากรูปที่ 2.1ข) เมื่อแสงตกกระทบที่โครงสร้างระดับนาโนของโลหะอิเล็กทรอนิกส์ในโลหะจะถูกกระตุ้นไปยังแถบเหนี่ยวนำ และจะเกิดการสั่นพ้องกับแสงที่ตกกระทบ ซึ่งจะทำให้เกิดพลาสมอนโพลาไรตรอนซึ่งจะสามารถถ่ายทอระหว่างรอยต่อของโลหะและไดอิเล็กทริกซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดอยู่บริเวณเปลือกชั้นนอกของโลหะนาโน เพราะแสงจากภายนอกไม่สามารถส่องทะลุผ่านเข้าไปภายในวัสดุได้โดยทั่วไปจึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า localized surface plasmon resonance (LSPR) แสงที่ตกกระทบที่พื้นผิวของวัสดุจะทำอันตรกิริยากับวัสดุสองแบบ คือ การดูดกลืน (absorption) และการกระเจิง (scattering) โดยแสงที่ถูกดูดกลืนจะทำให้เกิดการสั่นภายในผลึกของวัสดุนาโนและจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฆ่าเซลล์มะเร็งด้วยความร้อนได้ ขณะที่แสงที่เกิดการกระเจิงซึ่งจะมีความยาวคลื่นเท่ากับแสงที่ตกกระทบจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างภาพถ่ายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎี Mie และ บทความที่เกี่ยวข้อง

นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ กุสตาฟ มี (Gustave Mie) ผู้ที่แสดงให้เห็นถึงทฤษฎีการกระเจิงแสงของอนุภาค ซึ่งเป็นทฤษฎีหนึ่งที่เกี่ยวข้องและเป็นพื้นฐานสำหรับวิทยาศาสตร์ระดับนาโนทฤษฎีของเขาทำให้เห็นว่าแสงจะเกิดการกระเจิงแสง (scattering) ได้ดีกับอนุภาคที่มีความยาวคลื่นสั้นมากกว่าอนุภาคที่มีความยาวคลื่นยาว ตัวอย่างเช่น การที่เราเห็นท้องฟ้าเป็นสีฟ้าก็เพราะว่าอนุภาคของโมเลกุลที่อยู่ในอากาศ (เช่น โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน เป็นต้น) มีขนาดเหมาะกับการกระเจิงแสงของช่วงแสงสีฟ้าจากแสงของดวงอาทิตย์ได้ดีกว่าช่วงแสงสีเหลืองหรือสีแดง เพราะช่วงแสงสีฟ้ามีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าแสงสีเหลืองและสีแดง (แต่ความจริงแล้วแสงสีม่วงสามารถที่จะกระเจิงได้ดีกว่าแสงสีแดงถึง 16 เท่า แต่เรตินาของคนเรามีประสาทรับแสงที่ไวต่อแสงสีฟ้ามากกว่าแสงสีม่วงจึงทำให้เรามองไม่ค่อยเห็นส่วนที่เป็นสีม่วงมากนักแต่จะเห็นส่วนที่เป็นสีฟ้ามากกว่า) แต่เมื่อดวงอาทิตย์กำลังจะตกแสงของดวงอาทิตย์จะส่องเข้ามาหาเราในลักษณะเฉียงเป็นมุมทแยงกับพื้นโลกจึงทำให้แสงต้องเดินทางผ่านบรรยากาศที่หนาแน่นมากขึ้นกว่าตอนที่ดวงอาทิตย์อยู่สูงเหนือหัวเราขึ้นไปตรงๆ ซึ่งทำให้แสงสีฟ้าเกิดการกระเจิงออกไปสู่ชั้นบรรยากาศด้านบนทำให้เหลือกลุ่มที่เป็นแสงสีแดงหรือสีเหลืองมากขึ้นจึงทำให้เกิดการเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดงในช่วงที่ดวงอาทิตย์กำลังจะตก (หรือในช่วงที่ดวงอาทิตย์กำลังจะขึ้นเช่นเดียวกัน) ทฤษฎีของกุสตาฟ มี ทำให้นักวิทยาศาสตร์เข้าใจปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้จากขนาดของอนุภาคระดับนาโนที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นตัวการหนึ่งที่กำหนดการมองเห็นสีของคนเราและเขายังทำการพัฒนาวิธีการที่จะคำนวณหาขนาดของอนุภาคโดยการพิจารณาจากแสงที่เกิดการกระเจิงออกมาของแต่ละอนุภาคอีกด้วย [2]

2.3 ทฤษฎีทางฟิสิกส์เกี่ยวกับ localized surface plasmon resonance (LSPR)

เราสามารถใช้อผลเฉลยของ Mie theory เพื่ออธิบายการกระเจิงและการดูดกลืนแสงตกกระทบที่เกิดจากอนุภาคทรงกลมได้ (spherical particles) โดยอธิบายค่า extinction cross section (σ_{ext}) ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ ($\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{sca}$) ผลรวมของค่า absorption cross section (σ_{abs}) กับค่า scattering cross section (σ_{sca}) ของอนุภาคนาโนของโลหะ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ($d \ll \lambda$) จะได้รูปแบบสมการ Mie สำหรับอธิบายค่า (σ_{ext}) สำหรับอนุภาคนาโนทรงกลม ดังนี้ [3]

$$\sigma_{ext} = 9 \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \varepsilon^2 v_0 \frac{\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m)^2 + \varepsilon_2^2} \quad \text{สมการที่ (2.2)}$$

$$\text{โดย } v_0 = \left(\frac{4\pi}{3} \right) R^3$$

$$\omega \text{ คือ ความถี่เชิงมุมของแสงตกกระทบ } \left(\frac{2\pi c}{\lambda_{ตกกระทบ}} \right)$$

ε_m คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของอนุภาคนาโนโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยที่ ค่า ε_1 และ ε_2 คือ ค่าจริง และ จินตภาพของไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของอนุภาคนาโนโลหะ ไม่วารณณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.2) แถบการดูดกลืนแสงของ plasmon จะปรากฏขึ้นเมื่อ $\epsilon_1(\omega) \approx -2\epsilon_m$ สำหรับการตรวจจับสัญญาณ LSPR นั้นพบว่ารูปทรงของอนุภาคนาโนมีผลอย่างมากต่อสัญญาณ LSPR โดยรูปทรงของอนุภาคนาโนที่มีได้หลากหลายรูปทรง เช่น nanospheres , nanodiscs , nanopyramids และ nanorods โดยที่รูปทรง nanorods มีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางมากกว่ารูปแบบ nanospheres เราสามารถอธิบายการหาค่า absorption cross section $\sigma(abs)$ อนุภาคนาโนทรงกลมได้ดังนี้ [3]

$$\sigma_{abs} = \frac{\omega}{3C} \epsilon_m^{\frac{3}{2}} v \sum_j \frac{(1/P_j^2) \epsilon_2}{[\epsilon_1 + \{(1-P_j)/P_j\} \epsilon_m]^2 + \epsilon_2} \quad \text{สมการที่ (2.3)}$$

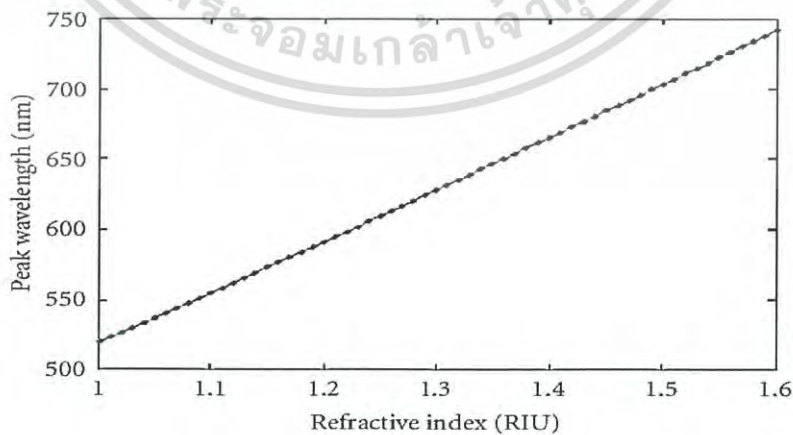
โดยที่ j สื่อความหมายถึงความเป็น 3 มิติของอนุภาคนาโน และ P_j ประกอบด้วย P_A P_B และ P_C ในเทอมของ depolarization factor

$$\text{โดยที่ } P_A = \frac{1-e^2}{e^2} \left[\frac{1}{2e} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) - 1 \right] \quad \text{สมการที่ (2.4)}$$

$$\text{และ } P_B = P_C = \frac{1-P_A}{2}$$

$$\text{และ } e = \left[1 - \left(\frac{B}{A} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{1}{R^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{สมการที่ (2.5)}$$

สเปกตรัมของ extinction ซึ่งเป็นผลมาจากสมการที่ (3) จะพบว่าเป็นสเปกตรัมที่มีจุดยอด 2 จุดโดยจุดยอดแรกแสดงการเกิดขึ้นของพลาสมอนแบบ transverse plasmon ในแกน x และ แกน Y สำหรับจุดยอดที่สอง แสดงการเกิดขึ้นของพลาสมอนแบบ longitudinal plasmon ในแนวแกน z



รูปที่ 2.2 แบบจำลองการคำนวณของ Drude กราฟแสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่น LSPR เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง [5] ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาข้างต้น LSPR-based sensors สามารถนำมาใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนที่ของสเปกตรัม เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางไดอิเล็กทริกใดๆที่อยู่แวดล้อมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยที่ความยาวคลื่น LSPR Peak จะขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของตัวกลางที่อยู่แวดล้อมปรากฏการณ์ LSPR สามารถถูกอธิบายได้ด้วย Drude model ดังสมการนี้

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \quad \text{สมการที่ (2.6)}$$

โดยที่ ω_p คือ ความถี่ plasmon

และ γ คือ damping factor โลหะในย่านแสงที่ตามองเห็น และบริเวณที่ใกล้อินฟราเรด

ในกรณี $\gamma \ll \omega_p$ สามารถเขียนใหม่ ได้ดังนี้

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad \text{สมการที่ (2.7)}$$

ภายใต้เงื่อนไขการเกิดปรากฏการณ์ SPR ที่กล่าวว่า ($\varepsilon_1 = -2\varepsilon_m$) จะทำให้

$$\omega_{\max} = \frac{\omega_p}{\sqrt{2\varepsilon_m + 1}} \quad \text{สมการที่ (2.8)}$$

โดย ω_{\max} คือ ความถี่ที่จุดยอดของ LSPR

เราสามารถแทนความถี่ด้วยความยาวคลื่นได้เท่ากับ $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหของแสง ดังนี้ $\varepsilon_m = n^2$ และทำให้สมการที่ (8) เปลี่ยนรูปใหม่เป็นดังนี้

$$\lambda_{\max} = \lambda_p = \sqrt{2n_m^2 + 1} \quad \text{สมการที่ (2.9)}$$

โดยที่ λ_{\max} คือ ความยาวคลื่นสูงสุดของ LSPR

และ λ_p คือ ความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับความถี่ของพลาสมอนในก้อนโลหะ (bulk metal)

ดังนั้น เราจึงพบความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ระหว่างความยาวคลื่นสูงสุดของ LSPR และดัชนีหักเหซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการตรวจจับความไวแสงในระดับโมเลกุลและใช้ในการวิเคราะห์ทางชีวภาพเชิงปริมาณ โดยการใช้ LSPR – based sensors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 อนุภาคนาโนของโลหะมีตระกูลในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าภายนอก

สำหรับอนุภาคนาโนทรงกลมที่มีขนาด d เล็กมาก ๆ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ($d \ll \lambda$) ในตัวกลางใดๆ เราสามารถอธิบาย spatial field ด้วยสมการของ Laplace ได้ดังนี้ เมื่อศักย์ไฟฟ้า $\nabla^2 \phi = 0$ จะทำให้สนามไฟฟ้า $E = -\nabla \phi$ ผลเฉลยของ field distribution เป็นที่รู้จักกันดังนี้ [6]

$$\Phi_{in} = -\frac{3\epsilon_{NP}}{\epsilon_{NP} + 2\epsilon_m} E_0 r \cos \theta \quad \text{สมการที่ (2.10)}$$

$$\Phi_{out} = -E_0 r \cos \theta + \frac{\epsilon_{NP} - \epsilon_m}{\epsilon_{NP} + 2\epsilon_m} E_0 \left(\frac{d}{2}\right)^3 \frac{\cos \theta}{r^2} \quad \text{สมการที่ (2.11)}$$

โดยที่

E_0 คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

ϵ_{NP} คือ ค่า dielectric permittivity ของอนุภาคนาโนโลหะ

ϵ_m คือ ค่า dielectric permittivity ของตัวกลางที่อยู่ล้อมรอบ

Φ_{out} คือ การเกิด superposition ระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอก (applied field) และ ไดโพล (dipole) ที่กึ่งกลางของอนุภาคโลหะ นั่นคือ สนามไฟฟ้าภายนอกเหนี่ยวนำให้เกิด dipole moment ภายในอนุภาคทรงกลม ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่า $|E_0|$ นอกจากนี้ เราสามารถเขียนได้ว่า [6]

$$\alpha = 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \frac{\epsilon_{NP} - \epsilon_m}{\epsilon_{NP} + 2\epsilon_m} \quad \text{สมการที่ (2.12)}$$

โดยที่ α คือ (complex) polarizability ของอนุภาคนาโน

ภายใต้เงื่อนไข $|\epsilon_{NP} + 2\epsilon_m|$ ที่มีค่าต่ำสุด โพลาริเซชันของแสงตกกระทบจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ขึ้น ดังนั้น เราสามารถใช้เงื่อนไขของ Fröhlich condition ที่กล่าวว่าค่าจริงของ $[\epsilon(\omega)_{NP}] = -2\epsilon_m$ คือ ส่วนที่เกี่ยวข้องกับ dipole surface plasmon ของอนุภาคนาโน การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า E_{in} ภายในอนุภาคทรงกลม และ E_{out} ภายนอกอนุภาคทรงกลม สามารถเขียนได้ดังนี้ [6]

$$E_{in} = \frac{3\epsilon_m}{\epsilon_{NP} + 2\epsilon_m} E_0 \quad \text{สมการที่ (2.13)}$$

$$E_{out} = E_0 + \frac{3n(n.p) - p}{4\pi\epsilon_0\epsilon_m} \left(\frac{1}{r}\right)^3 \quad \text{สมการที่ (2.14)}$$

ในที่นี้ $p = \epsilon_0\epsilon_m\alpha E_0$ คือ dipole moment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะพิจารณาค้นตกกระทบเป็นชนิดคลื่นระนาบ สมการคลื่นระนาบ เป็นดังนี้ $E(r,t)=E_0e^{-i\omega t}$ และมี dipole moment เป็น $p(t) = \epsilon_0\epsilon_m\alpha E_0e^{-i\omega t}$ นั่นก็คือมีการกระเจิงของระนาบคลื่นที่เกิดขึ้นโดย NPs ในแง่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับ electric dipole เป็นดังนี้ [6]

$$H = \frac{ck^2}{4\pi} (n \times p) \frac{e^{ikr}}{r} \left(1 - \frac{1}{ikr} \right) \quad \text{สมการที่ (2.15)}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_m} \left\{ 3n(n \cdot p) - p \left(\frac{1}{r^2} - \frac{ik}{r^2} \right) e^{ikr} \right\} \quad \text{สมการที่ (2.16)}$$

โดยที่ $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ และ n คือ unit vector ที่จุด P ใดๆ

เมื่อ $kr \ll 1$ (near zone) เรามีผลลัพธ์ของไฟฟ้าสถิต เป็นไปตามสมการที่ (2.14) และมีค่าสนามแม่เหล็ก เป็นดังนี้ $H = \frac{i\omega}{4\pi} \frac{(n \times p)e^{ikr}}{r}$ ในบริเวณของ near field สนามไฟฟ้าจะเป็น predominantly electric และ สำหรับ static field ($kr \rightarrow 0$) สนามแม่เหล็กจะหายไป

เมื่อ $kr \gg 1$ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าไดโพล (dipole field) จะมีรูปแบบเป็นคลื่นทรงกลมโดยสนามแม่เหล็ก มีค่าเท่ากับ $H = \frac{ck^2}{4\pi} \frac{(n \times p)e^{ikr}}{r}$ และสนามไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ $E = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0\epsilon_m}}$

จากมุมมองทางแสง (optic) พบว่าเป็นที่น่าสนใจมาก เมื่อค่า dielectric function ของอนุภาคนาโนทรงกลม เท่ากับ $\epsilon_{NP} = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ เราสามารถอธิบาย extinction cross section σ_{ext} ได้จากค่าความสัมพันธ์ดังนี้ $\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{sca}$ โดยที่

$$\sigma_{ext} = 9 \frac{\omega}{c} \epsilon_m \frac{\frac{3}{2} \epsilon_2}{(\epsilon_1 + 2\epsilon_2)^2 + \epsilon_2^2} \quad \text{สมการที่ (2.17)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎี Mie

สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เราจะใช้ทฤษฎีของ Gustav Mie หาค่าเฉลยของสมการ Maxwell ในกรณีที่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดคลื่นระนาบตกกระทบบนอนุภาคทรงกลม โดยการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ถูกต้องสำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างอนุภาคนาโนโลหะและตัวกลางที่อยู่แวดล้อมทฤษฎีของ Gustav Mie ได้อธิบายว่าเราสามารถคำนวณหาค่า extinction cross section σ_{ext} ของอนุภาคทรงกลม ได้จากสมการ ดังนี้ [7]

$$\sigma_{ext} = \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \text{Re}\{a_n + b_n\} \quad \text{สมการที่ (2.18)}$$

โดยที่ พารามิเตอร์ a_n และ b_n ในที่นี้คือ

$$a_n = \frac{\Psi_n(\beta)\Psi'_n(m\beta) - m\Psi_n(m\beta)\Psi'_n(\beta)}{\xi_n(\beta)\Psi'_n(m\beta) - m\Psi_n(m\beta)\xi'_n(\beta)} \quad \text{สมการที่ (2.19)}$$

$$b_n = \frac{m\Psi_n(\beta)\Psi'_n(m\beta) - \Psi_n(m\beta)\Psi'_n(\beta)}{\xi_n(\beta)\Psi'_n(m\beta) - m\Psi_n(m\beta)\xi'_n(\beta)} \quad \text{สมการที่ (2.20)}$$

$$\text{โดยที่ } \beta = \frac{\pi d m_0}{\lambda_0}$$

λ_0 คือ ความยาวคลื่นตกกระทบบ ที่สุญญากาศ

m_0 คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่อยู่แวดล้อม

$$\Psi_n(x) = \left(\frac{rx}{2}\right)^{0.5} J_{n+1/2}(x)$$

$$\xi_n(x) = \left(\frac{rx}{2}\right)^{0.5} H_{n+1/2}(x)$$

$H_{n+1/2}(x)$ คือ half-integer-order Hankel function ของชนิดที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์การแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังกล่าวชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆอย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน เช่น รูปที่ 2.3 แสดงชิ้นส่วนย่อยเรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะไม่วิเคราะห์ปัญหาทีเดียวทั้งระบบแต่จะวิเคราะห์หาค่าที่แต่ละเอลิเมนต์นำมารวมกันเข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ



รูปที่ 2.3 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยและเอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม [8]

2.6.1 การแบ่งโครงสร้างเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยจะต้องคำนึงถึงลักษณะโครงสร้างเดิม คือ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุดคือ บริเวณที่เป็น ส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู ก็จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องแม่นยำ

การแบ่งชิ้นส่วนอาจเริ่มแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ๆก่อนแล้วจึงแบ่งออกเป็นสามเหลี่ยมย่อยอีกครั้งหนึ่งตำแหน่งของจุดต่อ (Node)

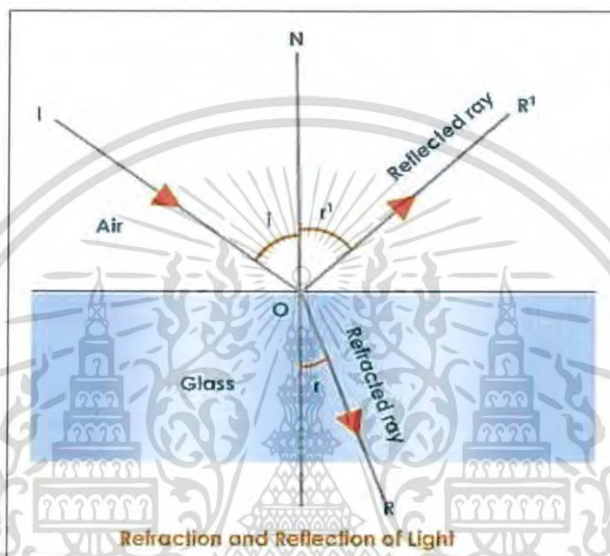
ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไปจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูงและอาจจะทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดไม่เพียงพอในส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์นั้นจะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างและการกระทำของโหลดรวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ผู้วิเคราะห์ต้องการคืออาจเลือกใช้เอลิเมนต์แบบมิติเดียว สองมิติ สามมิติ หรือ เอลิเมนต์ชนิดแกนสมมาตร [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การหักเหของแสง (Refraction)

เกิดจากการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันเป็นผลทำให้ทิศทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งในขณะที่แสงเกิดการหักเหก็จะเกิดการสะท้อนของแสงขึ้นพร้อม ๆ กันด้วย แสดงดังรูปที่ 2.4

เมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุหรือตัวกลางโปร่งใส เช่น อากาศ แก้ว น้ำ พลาสติกใส แสงจะสามารถเดินทางผ่านได้เกือบหมด เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงเสมอ แต่ถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลางหลายตัวกลาง แสงจะหักเห



รูปที่ 2.4 การหักเหและการสะท้อนของแสง [8]

2.7.1 สาเหตุที่ทำให้แสงเกิดการหักเห

เกิดจากการเดินทางของแสงจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งซึ่งมีความหนาแน่นแตกต่างกันจะมีความเร็วไม่เท่ากันด้วย โดยที่แสงจะเคลื่อนที่ในตัวกลางโปร่งกว่าได้เร็วกว่าตัวกลางที่ทึบกว่า เช่น ความเร็วของแสงในอากาศมากกว่าความเร็วของแสงในน้ำและความเร็วของแสงในน้ำมากกว่าความเร็วของแสงในแก้วหรือพลาสติกการที่แสงเคลื่อนที่ผ่านอากาศและแก้วไม่เป็นแนวเส้นตรงเดียวกันเพราะเกิดการหักเหของแสง โดยแสงจะเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า (โปร่งกว่า) ไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า (ทึบกว่า) แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติในทางตรงข้ามถ้าแสงเดินทางจากยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 ดรรชนีหักเหของตัวกลาง (Index of Refraction)

การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางต่างชนิดกันจะมีอัตราเร็วต่างกัน เช่น ถ้าแสงเคลื่อนที่ในอากาศจะมีอัตราเร็วเท่ากับ 300,000,000 เมตรต่อวินาที แต่ถ้าแสงเคลื่อนที่ในแก้วหรือพลาสติกจะมีอัตราเร็วประมาณ 200,000,000 เมตรต่อวินาที การเปลี่ยนความเร็วของแสงเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกันทำให้เกิดการหักเห อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศต่ออัตราเร็วของแสงในตัวกลางใดๆ เรียกว่า ดรรชนีหักเหของตัวกลางนั้น $\text{ดรรชนีหักเหของตัวกลาง} = \frac{\text{อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ}}{\text{อัตราเร็วของแสงในตัวกลางใดๆ}}$ (อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ = 3×10^8 เมตร/วินาที) การหักเหของแสงทำให้เรามองเห็นภาพของวัตถุอันหนึ่งที่จมอยู่ในกันสระว่ายน้ำอยู่ตื้นกว่าความเป็นจริงที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าแสงจากกันสระว่ายน้ำจะหักเหเมื่อเดินทางจากน้ำสู่อากาศ ทั้งนี้เพราะความเร็วของแสงที่เดินทางในอากาศเร็วกว่าเดินทางในน้ำจึงทำให้เห็นภาพของวัตถุอยู่ตื้นกว่าความเป็นจริง [9]

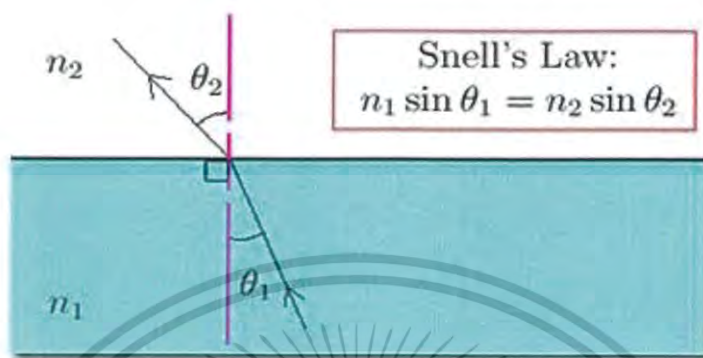
ตารางที่ 2.1 ความเร็วของแสงเมื่อผ่านตัวกลาง และ ค่าดัชนีหักเห [9]

ชื่อสาร	ความเร็ว ($\times 10^8 \text{ m/s}$)	ดัชนีหักเห (e/v)
สุญญากาศ	e = 2.997925	1.0
อากาศ	2.99706	1.00029
คาร์บอนไดออกไซด์	2.99782	1.00045
ฮีเลียม	2.99782	1.000034
น้ำ (20° ซ)	2.2490	1.3330
เอซิลแอลกอฮอล์	2.2016	1.3617
เมธิลแอลกอฮอล์	2.2555	1.3292
เบนซิน	1.9968	1.5014
คาร์บอนไดซัลเฟอร์	1.8415	1.6279
น้ำเชื่อม 50%	2.1112	1.4200
แก้ว, light crown	1.976	1.517
แก้ว, dense crown	1.888	1.588
แก้ว, light flint	1.899	1.579
แก้ว, heavy flint	1.820	1.647
ฟลูออไรท์	2.091	1.434
เพชร	1.240	2.417

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 กฎการหักเหของแสง

1. รังสีตกกระทบ เส้นแนวฉาก และรังสีหักเห อยู่ในระนาบเดียวกัน
2. สำหรับตัวกลางคู่หนึ่งๆ อัตราส่วนระหว่างค่า \sin ของมุมตกกระทบ ในตัวกลางหนึ่งกับค่า \sin ของมุมหักเหในอีกตัวกลางหนึ่งมีค่าคงที่เสมอ จากกฎข้อ 2 สเนลล์นำมาตั้งเป็นกฎของสเนลล์



รูปที่ 2.5 กฎของสเนลล์ [9]

$$n = \frac{c}{v}$$

.....สมการที่ 2.20

โดยที่ค่าของตัวแปร

v = ความเร็วของแสง ในตัวกลางใดๆ เมตร / วินาที

n = ดัชนีหักเหของแสงในตัวกลาง (ไม่มีหน่วย) หรือ คือ ดัชนีหักเหสัมพัทธ์ระหว่างตัวกลางที่ 2 เทียบกับ ตัวกลางที่ 1

c = ความเร็วแสงในสุญญากาศ (3×10^8 เมตร/วินาที) นั่นคือ ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงน้อย (ความหนาแน่นน้อย) แสงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงมาก (ความหนาแน่นมาก) แสงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ

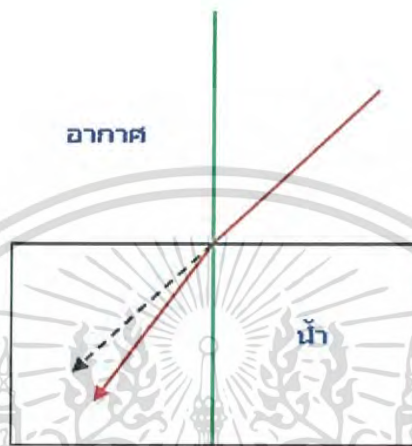
หมายเหตุ : ข้อควรจำ n อากาศ = 1 และ ส่วน n ตัวกลางอื่นๆ > 1 เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 การหักเหของแสงเกิดขึ้นได้ 2 แบบ

1. การหักเหเข้าหาเส้นแนวฉาก เกิดขึ้นเมื่อ

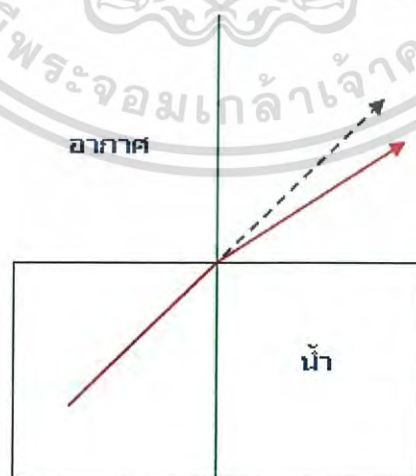
- แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยไปสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก
- แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห่น้อยไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมาก
- แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความเร็วมากไปสู่ตัวกลางที่มีความเร็วน้อย



รูปที่ 2.6 การหักเหเข้าหาเส้นแนวฉาก

2. การหักเหออกจากเส้นแนวฉาก เกิดขึ้นเมื่อ

- แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากไปสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย
- แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเห่น้อย
- แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความเร็วน้อยไปสู่ตัวกลางที่มีความเร็วมาก



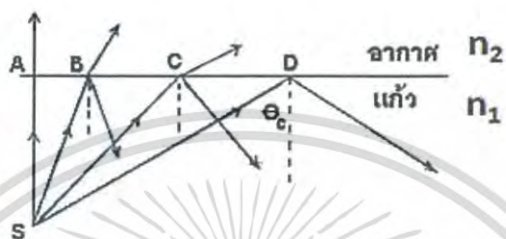
รูปที่ 2.7 การหักเหเข้าออกเส้นแนวฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 มุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมด

มุมวิกฤติ คือ มุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหเท่ากับ 90° จะเกิดมุมวิกฤติได้เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากไปสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย

- แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมาก
- แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความเร็วมากไปสู่ตัวกลางที่มีความเร็วช้าการสะท้อนกลับหมดจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีมุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤติ ขณะที่เกิดการสะท้อนกลับหมดจะไม่มีแสงผ่านเข้าไปสู่ตัวกลางที่ 2



รูปที่ 2.8 มุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมด [9]

- ✓ ให้จุดกำเนิดแสงอยู่ที่ S จะมีแสงออกจากจุด S นี้ไปยังจุดต่างๆของผิวแก้ว ดังรูป
 - ที่จุด A แสงจะพุ่งออกจากแก้วไปยังอากาศโดยไม่มีการหักเห
 - ที่จุด B จะมีการหักเหเล็กน้อย และมีบางส่วนสะท้อนกลับมากในแก้ว
 - ที่จุด C จะมีการหักเหมากขึ้นเล็กน้อย และมีบางส่วนสะท้อนกลับมากในแก้ว
 - ที่จุด D จะไม่มีการหักเหแสงจากจุด S ทั้งหมดจะสะท้อนกลับมากในแก้ว ณ จุดนี้จะเรียกมุม θ_c ว่ามุมวิกฤติ (Critical angle) ทำให้เกิดปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด (Total reflection) หากค่ามุม θ_c ได้จากสมการนี้

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)$$

สมการที่ (2.21)

ความลึกจริง ความลึกปรากฏเป็นปรากฏการณ์ที่ผู้สังเกตมองวัตถุซึ่งอยู่ในตัวกลางที่ต่างจากตาของผู้สังเกตแล้วทำให้มองเห็นภาพที่ปรากฏอยู่คนละตำแหน่งกับวัตถุจริงซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงและการที่ตาของคนจะมองเห็นภาพได้จะต้องมีรังสีของแสงออกจากวัตถุเดินทางเข้าสู่ตาคนแต่เนื่องจากแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่ต่างกันจึงทำให้เกิดมุมหักเหทำให้ทางเดินแสงเปลี่ยนไปเมื่อแสงเข้าสู่ตาทำให้ผู้มองเห็นภาพที่ปรากฏไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับวัตถุจริงทำให้เกิดปรากฏการณ์ความลึกจริงและลึกปรากฏ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปภาพที่ 2.9 ภาพแสดงการลึกจริงและลึกปรากฏ [9]
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 แสงประเภท TM mode และแสงประเภท TE mode

2.8.1 ทรานสเวอร์สอิเล็กทริกเวฟ (Transverse Electric Wave; TE)

หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง ซึ่งสนาม H มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน x และ z ของสนาม E หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางของการแพร่กระจายของคลื่น แต่มีเฉพาะสนามแม่เหล็กในทิศทางนั้น

$$E_z = 0, H_z \neq 0 \quad \text{สมการที่ (2.22)}$$

2.8.2 ทรานสเวอร์สแมกเนตริกเวฟ (Transverse Magnetic Wave; TM)

หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวาง ซึ่งสนาม E มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน x และ z ของสนาม H หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศของการแพร่กระจายของคลื่น แต่มีเฉพาะสนามไฟฟ้าในทิศทางนั้น

$$H_z = 0, E_z \neq 0 \quad \text{สมการที่ (2.23)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขอบเขตการวิจัย

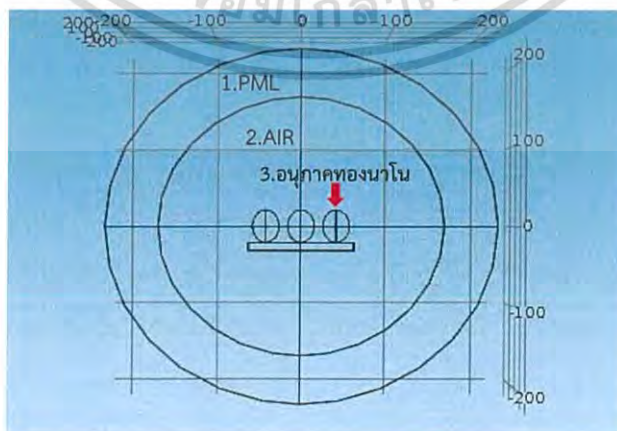
โครงการพิเศษนี้จะทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ของอนุภาคทองคำที่มีรูปร่างต่างๆกันและมีขนาดต่างๆกัน ซึ่งจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. ศึกษาหลักการทำงานของโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ทำการออกแบบโครงสร้างของอนุภาคทองคำให้มีรูปร่างและขนาดต่างๆกัน เช่น ทรงทรงแกลม ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม และทรงวงรี โดยใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำที่มีรูปร่างต่างๆได้เพื่อเป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการผลิตอนุภาคทองคำที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเซอร์เฟสพลาสมอนอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

3.2 ศึกษาหลักการทำงานของโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในโครงการนี้เราจะใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยจะทำการวิเคราะห์ขนาดสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นบนอนุภาคทองคำที่มีรูปร่างต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการผลิตอนุภาคทองคำที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเซอร์เฟสพลาสมอนอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

ดังนั้นเราจึงเริ่มต้นจากการทำความเข้าใจกับโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการศึกษาจากตัวอย่างฝึกหัดของโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวกับการกระเจิงของแสงตรงบนอนุภาคทองคำ (Optical Scattering Off a Gold Nanosphere) และทำการดัดแปลงตัวอย่างดังกล่าวให้เป็นแบบจำลองการเกิดคลื่นสนามไฟฟ้าบนอนุภาคทองคำที่มีรูปร่างต่างๆที่ระยะห่างต่างๆกันในแต่ละความยาวคลื่น



รูปที่ 3.1 ชั้นที่ประกอบในอนุภาคในโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการขังเงินเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การกำหนดค่า Parameters เริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในโครงการนี้เราใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟในอิลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยจะทำการวิเคราะห์ขนาดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กทริกที่เป็นอากาศ โดยที่อนุภาคทองนาโนมีขนาดและรูปร่างต่างๆกันและเมื่อเปิดโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟในอิลิเมนต์ขึ้นมาเราจะกำหนดค่าของ Parameters เริ่มต้นดังตารางตัวอย่างต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างตารางค่า Parameters เริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ของอนุภาคทองนาโนในแต่ละรูปร่างที่ต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 250 นาโนเมตร

Name	Expression	Value	Description
e_1	-16.486	-16.486	Relative permittivity (real part)
e_2	1.0643i	1.0643i	Relative permittivity (imaginary part)
e_m	1	1	
f	c_const/lambda	1.1992E6 m/s	frequency
lambda	250	250	initial wavelength
lambda_max	250	250	initial wavelength
lambda_min	250	250	final wavelength
lambda_step	1	1	wavelength step
r_pml	11*radius	2.2E-7 m	radius of the pml
radius	20[nm]	2E-8 m	radius of the sphere
t_pml	3*radius	6E-8 m	thickness of the pml
V	8E-24[m]	8E-24 m	Volume of nanoparticle

โดยที่ตัวแปรตามดังตารางที่ 3.1 นี้ค่าจะเปลี่ยนไปตามที่เรากำหนดในแต่ละความยาวคลื่นต่างๆ

e_1 = ค่า Relative permittivity (real part) ของ Au

e_2 = ค่า Relative permittivity (imaginary part) ของ Au

V = ค่าปริมาตรของรูปร่าง

lambda / lambda_max / lambda_min = ค่าความยาวคลื่นที่เรากำหนดในแต่ละความยาวคลื่นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

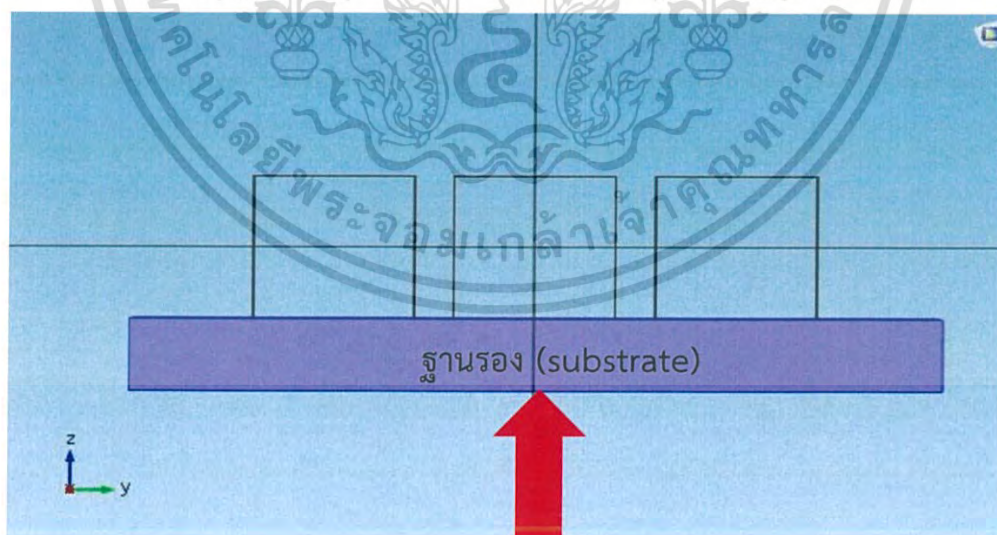
3.4 การสร้างและออกแบบการจำลองอนุภาคทองคำนาโน

ในการสร้างแบบจำลองจากขอบเขตงานเราจะทำการออกแบบโครงสร้างของอนุภาคทองคำนาโนให้มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ กัน เช่น ทรงทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม และทรงวงรี โดยในแต่ละรูปร่างนั้นเราจะกำหนดให้มีสัดส่วน ขนาด ความกว้าง ความลึก ความสูง และระยะห่างของอนุภาครวมทั้งฐานรองของอนุภาคที่แตกต่างกันในแต่ละรูปร่าง

3.4.1 การออกแบบและกำหนดฐานรองอนุภาคทองคำนาโน

ตารางที่ 3.4.1.1 การกำหนดค่า Block โดยที่การกำหนดขนาดของฐานรองและปรับค่าตามขนาดอนุภาค

Size	
Width	80 nm
Depth	110 nm
Height	10 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	0 nm
z	-15 nm
Axis	z-axis
Rotation Angle	0



รูปที่ 3.2 ฐานรอง (substrate) อนุภาคทองคำนาโนที่เราได้ทำการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 รูปทรงของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 20x20x20 นาโนเมตร ระยะห่าง 5 นาโนเมตร
 ตารางที่ 3.4.2.1 การกำหนดแต่ละอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ขนาด 20x20x20 นาโนเมตร

อนุภาคที่ 1

Object Type (Solid)	
Size	
Width	20 nm
Depth	20 nm
Height	20 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	0 nm
z	0 nm
Axis	z-axis
Rotation Angle	0

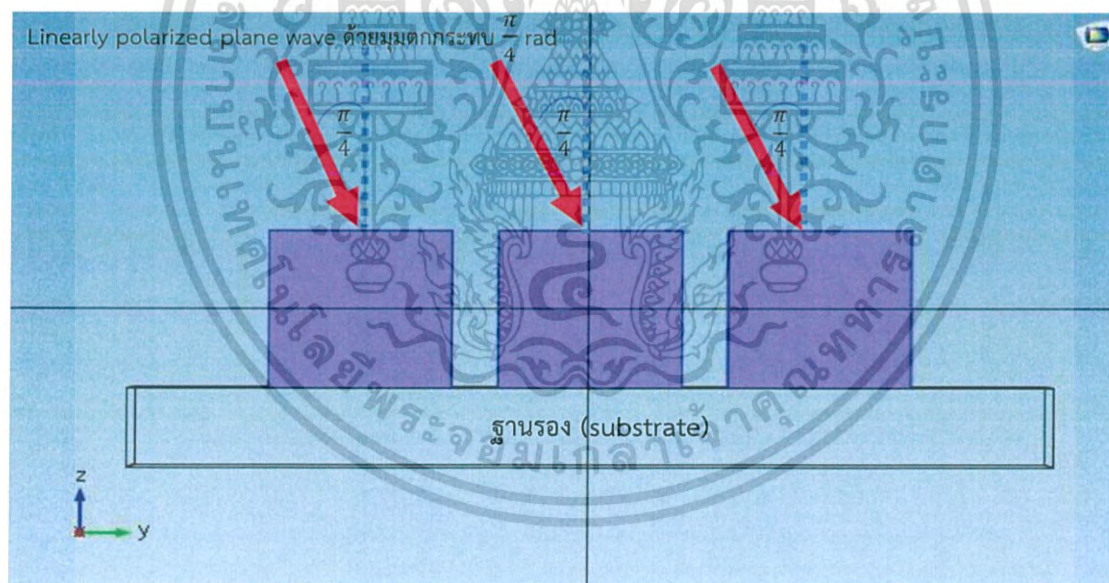
อนุภาคที่ 2

Object Type (Solid)	
Size	
Width	20 nm
Depth	20 nm
Height	20 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	25 nm
z	0 nm
Axis	z-axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคที่ 3

Object Type (Solid)	
Size	
Width	20 nm
Depth	20 nm
Height	20 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	-25 nm
z	0 nm
Axis	z-axis



รูปที่ 3.3 ขนาดรูปทรงอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ $20 \times 20 \times 20$ nm ระยะห่าง 5 nm โดยมีแสงตกกระทบแบบ Linearly polarized plane wave ด้วยมุมตกกระทบ $\frac{\pi}{4}$ rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 รูปทรงของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 30x30x30 นาโนเมตร ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

ตารางที่ 3.4.3.1 กำหนดแต่ละอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 30x30x30 นาโนเมตร

อนุภาคที่ 1

Object Type (Solid)	
Size	
Width	30 nm
Depth	30 nm
Height	30 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	0 nm
z	0 nm
Axis	z-axis
Rotation Angle	0

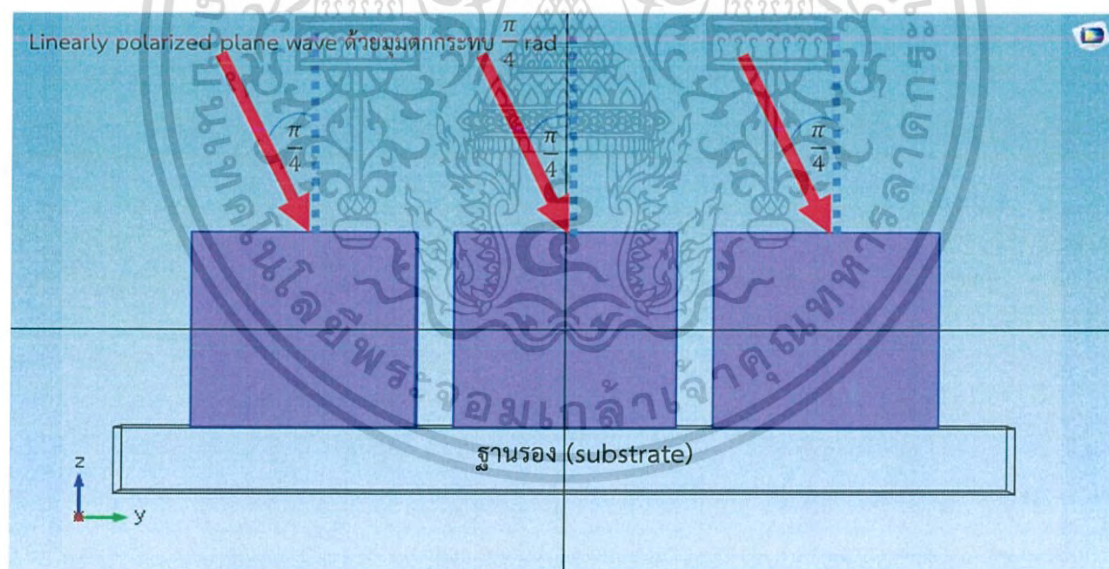
อนุภาคที่ 2

Object Type (Solid)	
Size	
Width	30 nm
Depth	30 nm
Height	30 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	35 nm
z	0 nm
Axis	z-axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งออกไปสำหรับเคอร์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
 ไม่ทำกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคที่ 3

Object Type (Solid)	
Size	
Width	30 nm
Depth	30 nm
Height	30 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	-35 nm
z	0 nm
Axis	z-axis



รูปที่ 3.4 ขนาดรูปทรงอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ $30 \times 30 \times 30$ nm ระยะห่าง 5 nm โดยมีแสงตกกระทบแบบ Linearly polarized plane wave ด้วยมุมตกกระทบ $\frac{\pi}{4}$ rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 รูปทรงของแท่งสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 20x20x40 นาโนเมตร ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

ตารางที่ 3.4.4.1 การกำหนดแต่ละอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 20x20x40 นาโนเมตร

อนุภาคที่ 1

Object Type (Solid)	
Size	
Width	20 nm
Depth	20 nm
Height	40 nm
Position....Center	
x	0 nm
y	0 nm
z	0 nm
Axis	z-axis
Rotation Angle	0

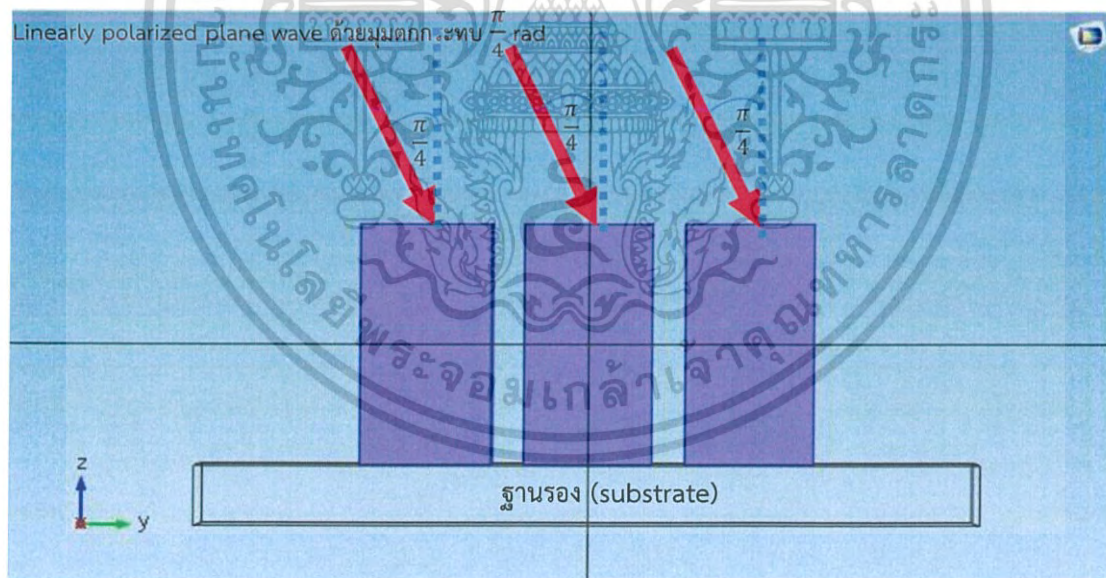
อนุภาคที่ 2

Object Type (Solid)	
Size	
Width	20 nm
Depth	20 nm
Height	40 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	25 nm
z	0 nm
Axis	z-axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคที่ 3

Object Type (Solid)	
Size	
Width	20 nm
Depth	20 nm
Height	40 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	-25 nm
z	0 nm
Axis	z-axis



รูปที่ 3.5 ขนาดรูปทรงอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ 20x20x40 nm ระยะห่าง 5 nm โดย
มีแสงตกกระทบแบบ Linearly polarized plane wave ด้วยมุมตกกระทบ $\frac{\pi}{4}$ rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 รูปทรงของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด 30x30x40 นาโนเมตร ระยะห่าง 5 nm

ตารางที่ 3.4.5.1 การกำหนดแต่ละอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 30x30x40 นาโนเมตร

อนุภาคที่ 1

Object Type (Solid)	
Size	
Width	30 nm
Depth	30 nm
Height	40 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	0 nm
z	0 nm
Axis	z-axis
Rotation Angle	0

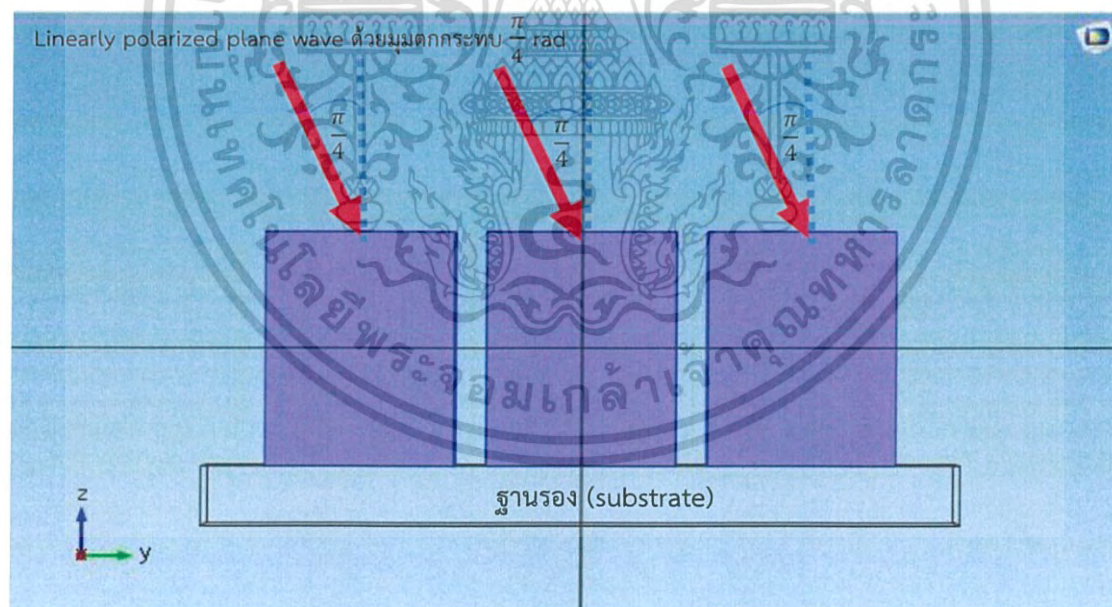
อนุภาคที่ 2

Object Type (Solid)	
Size	
Width	30 nm
Depth	30 nm
Height	40 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	35 nm
z	0 nm
Axis	z-axis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคที่ 3

Object Type (Solid)	
Size	
Width	30 nm
Depth	30 nm
Height	40 nm
Position...Center	
x	0 nm
y	-35 nm
z	0 nm
Axis	z-axis



รูปที่ 3.6 ขนาดรูปทรงอนุภาคของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่ 30x30x40 nm ระยะห่าง 5 nm โดย
มีแสงตกกระทบแบบ Linearly polarized plane wave ด้วยมุมตกกระทบ $\frac{\pi}{4}$ rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 ขั้นตอนการกำหนดค่า Material

ในการกำหนดค่า Material เราจะกำหนดค่าของ Air(อากาศ), Au(ทอง), Silicon(ซิลิคอน), แก้ว (BK-7) ดังตารางที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.5 เช่น กำหนดที่ความยาวคลื่น 250 nm

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/>	Refractive index	n	1	1	Refractive index
<input checked="" type="checkbox"/>	Refractive index, imaginary part	ki	0	1	Refractive index
	Relative permeability	mur	1	1	Basic
	Relative permittivity	epsilonNr	1	1	Basic
	Dynamic viscosity	mu	eta(T[1/K])[Pa*s]	Pa-s	Basic
	Ratio of specific heats	gamma	1.4	1	Basic
	Electrical conductivity	sigma	0[S/m]	S/m	Basic
	Heat capacity at constant pressure	Cp	Cp(T[1/K])[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
	Density	rho	rho(pA[1/Pa],T[1/K])[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
	Thermal conductivity	k	k(T[1/K])[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
	Speed of sound	c	cs(T[1/K])[m/s]	m/s	Basic

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างตารางค่า Material ของ Air ที่ความยาวคลื่น 250 nm

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/>	Refractive index	n	1.3300	1	Refractive index
<input checked="" type="checkbox"/>	Refractive index, imaginary part	ki	k_interp(1[1/m]*c_const/freq)	1	Refractive index
	Relative permittivity	epsilonNr	-0.92183+4.3633i	1	Basic
	Relative permeability	mur	1	1	Basic
	Electrical conductivity	sigma	4.1E7	S/m	Basic
	Relative permittivity (imaginary part)	epsilonBis	4.3633	1	Dielectric losses
	Relative permittivity (real part)	epsilonPrim	-0.92183	1	Dielectric losses
	Dielectric loss factor	eta_epsilon	0	1	Dielectric losses

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างตารางค่า Material ของ Au ที่ความยาวคลื่น 250 nm

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/>	Refractive index	n	1.5808	1	Refractive index
<input checked="" type="checkbox"/>	Refractive index, imaginary part	ki	0	1	Refractive index
	dL	(dL_solid_1(T[1/K])-dL_solid_1(Tempref[1/K]))/(1+d...			Basic
	CTE	CTE(T[1/K])[1/K]	1/K		Basic
	Thermal conductivity	k	k_solid_bulk_1(T[1/K])[W/(m*K)]	W/(m*K)	Basic
	Coefficient of thermal expansion	alpha	(alpha_solid_1(T[1/K])[1/K]+(Tempref-293[K])*if(ab...	1/K	Basic
	Heat capacity at constant pressure	Cp	C_solid_1(T[1/K])[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
	HC	HC	HC_solid_1(T[1/K])[J/(mol*K)]	J/(mol*K)	Basic
	Density	rho	rho_solid_1(T[1/K])[kg/m^3]	kg/m^3	Basic
	VP	VP	VP_solid_1(T[1/K])[Pa]	Pa	Basic
	Relative permittivity	epsilonNr	-10.740+11.504i	1	Basic
	Relative permeability	mur	1	1	Basic

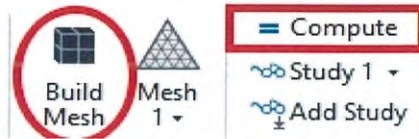
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างตารางค่า Material ที่ความยาวคลื่น 250 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การประมวลผลและการนำข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์

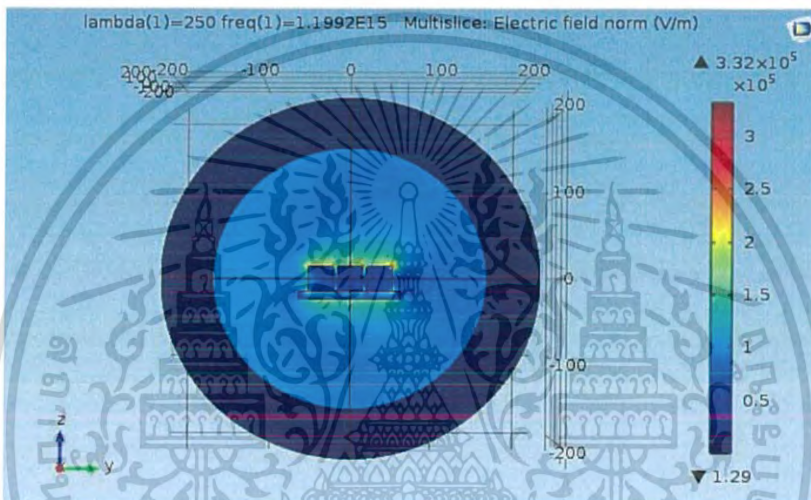
3.5.1 จากขั้นตอนดังกล่าวเมื่อเรากำหนดค่า Parameter ต่างๆ

3.5.2 กดที่ Build Mesh และ กด Compute



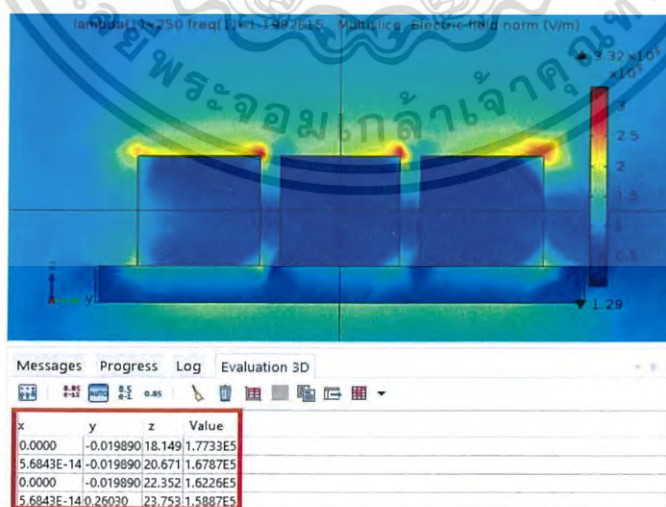
รูปที่ 3.10 สัญลักษณ์ Build Mesh และ Compute

3.5.3 โปรแกรมจะคำนวณค่าของผลสนามไฟฟ้า ตัวอย่าง ที่ความยาวคลื่น 250 nm



รูปที่ 3.11 อนุภาคสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ $30 \times 30 \times 30$ nm ระยะห่าง 5 nm ที่ความยาวคลื่น 250 nm

3.5.4 กดที่ผิวของอนุภาค และ บันทึกค่าของสนามไฟฟ้า

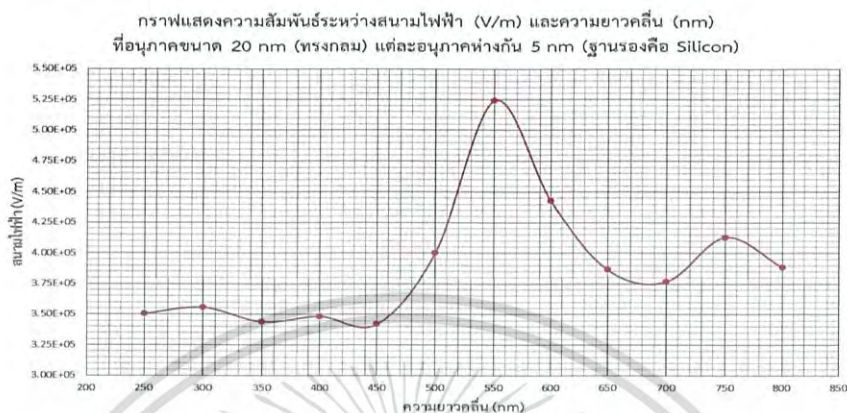


รูปที่ 3.12 การกดที่ผิวของอนุภาค และ ตารางค่าของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

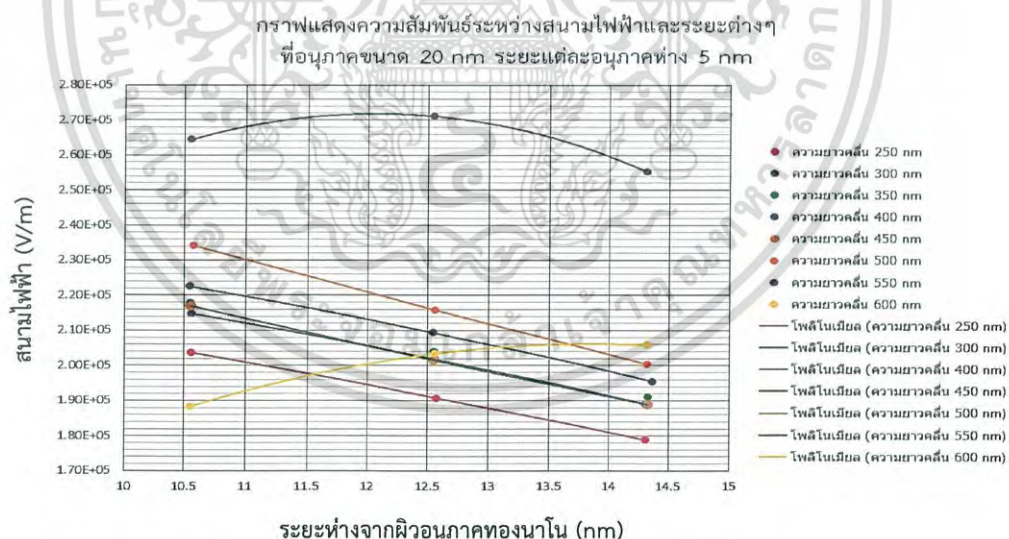
3.5.5 นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาสร้างกราฟ ดังนี้

1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนกับไดอิเล็กทริกที่เป็นอากาศที่มีแสงตกกระทบอนุภาคที่ความยาวคลื่นต่างๆ กรณีอนุภาค $20 \times 20 \times 20$ นาโนเมตร ระยะอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนกับไดอิเล็กทริกที่เป็นอากาศ อนุภาค 20 นาโนเมตร ระยะอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร

2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนกับไดอิเล็กทริกที่เป็นอากาศที่มีแสงตกกระทบอนุภาคที่ความยาวคลื่นต่างๆ และที่ระยะห่างจากผิวอนุภาคทองคำนาโน อนุภาค 20 นาโนเมตร ระยะอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและระยะต่างๆ ที่อนุภาค 20 nm

3. นำผลของค่าสนามไฟฟ้าที่ได้และค่าจากกราฟทั้งหมดนั้นมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาความยาวคลื่น และรูปทรงที่เหมาะสมในการเกิดสัญญาณ SPR เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

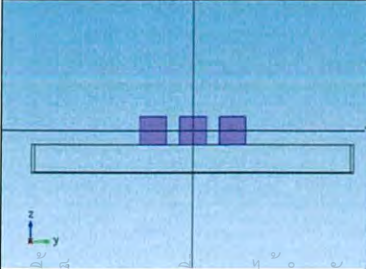
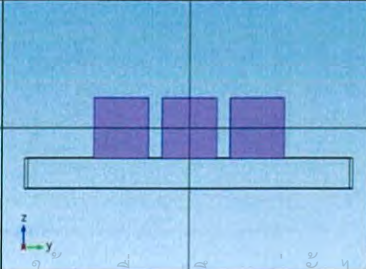
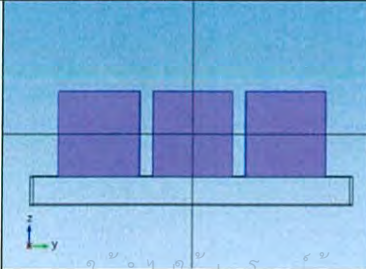
โครงการพิเศษนี้จะทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์เซอ์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปร่างต่างๆกันและมีขนาดต่างๆกัน พร้อมทำการบันทึกค่าของสนามไฟฟ้าในแต่ละความยาวคลื่นแล้วนำผลมาวิเคราะห์เพื่อหาว่ารูปร่างของอนุภาคใดที่เกิดค่าสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งในโครงการเรานี้จะมีขอบเขตทำการศึกษาดังต่อไปนี้ 3 กรณี ดังนี้

- 1) การเปลี่ยนระยะห่างแต่ละอนุภาค 2 ระยะห่าง ดังนี้
 - 1.1 อนุภาคแต่ละอนุภาคห่างกัน 5 นาโนเมตร
 - 1.2 อนุภาคแต่ละอนุภาคห่างกัน 10 นาโนเมตร
- 2) การเปลี่ยนฐานรอง (substrate) ทั้ง 2 ชนิด ดังนี้
 - 2.1 ฐานรองแบบชนิด ซิลิคอน (silicon)
 - 2.2 ฐานรองแบบชนิด แก้ว (BK-7)
- 3) ทำการออกแบบอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปร่างต่างๆ และมีขนาดต่างๆกัน เช่น ทรงกลม, สี่เหลี่ยมลูกบาศก์, แท่งสี่เหลี่ยม และทรงวงรี ทั้งหมด 4 กรณี ดังนี้

4.1 การออกแบบอนุภาครูปทรงต่างๆ และมีขนาดต่างๆ ทั้งหมด 4 กรณี ดังนี้
ตารางที่ 4.1.1 อนุภาคทรงกลม มีรูปร่างและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร

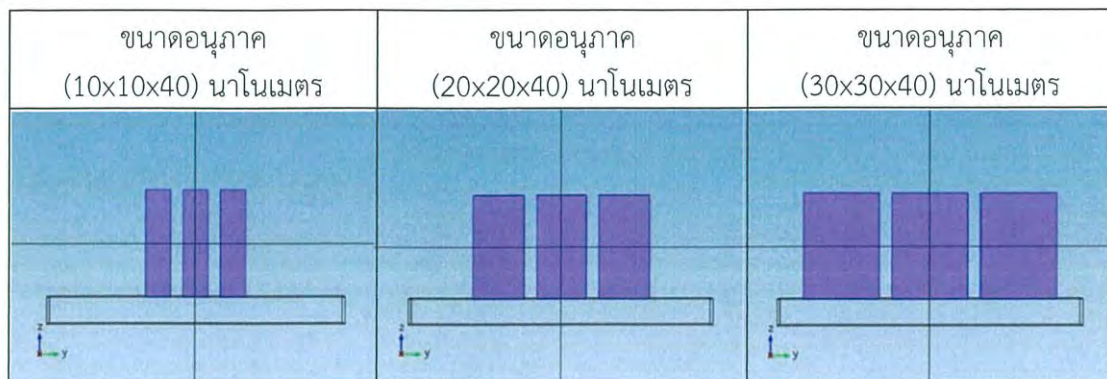
ขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร	ขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร	ขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร
		

ตารางที่ 4.1.2 อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีรูปร่างและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค (10x10x10) นาโนเมตร	ขนาดอนุภาค (20x20x20) นาโนเมตร	ขนาดอนุภาค (30x30x30) นาโนเมตร
		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1.3 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร



ตารางที่ 4.1.4 อนุภาคทรงวงรี มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร



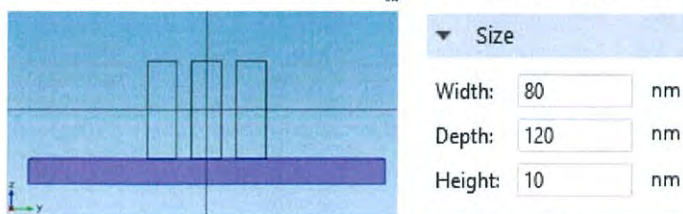
4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ (Parameter) และการบันทึกผลค่าสนามไฟฟ้า

4.2.1) กำหนดค่าพารามิเตอร์ตามค่าความยาวคลื่นต่างๆ

Parameters			
Parameters			
Name	Expression	Value	Description
radius	20[nm]	2E-8 m	radius of a sphere
r_pml	11*radius	2.2E-7 m	radius of the pml
t_pml	3*radius	6E-8 m	thickness of the pml
lambda	300	300	initial wavelength
lambda_...	300	300	initial wavelength
lambda_...	300	300	final wavelength
lambda_st...	1	1	wavelength step
f	c_const/lambda	9.9931E5 m/s	frequency
e_m	1	1	
V	8E-24[m]	8E-24 m	volume of nanoparticle
e_1	=1.2360	=1.236	Relative permittivity (real...
e_2	5.7608i	5.7608i	Relative permittivity (ima...

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างตารางการกำหนดค่าพารามิเตอร์

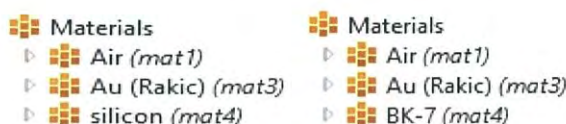
4.2.2) กำหนดค่าพารามิเตอร์ของ ทอง Au และฐานรอง (substrate) ทั้ง 2 ชนิด ดังนี้



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ Au และ ฐานรอง

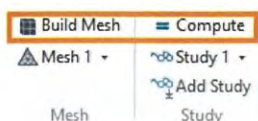
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.1) ฐานรอง (substrate) แบบชนิด ซิลิคอน (silicon) และ แบบชนิด แก้ว (BK-7)



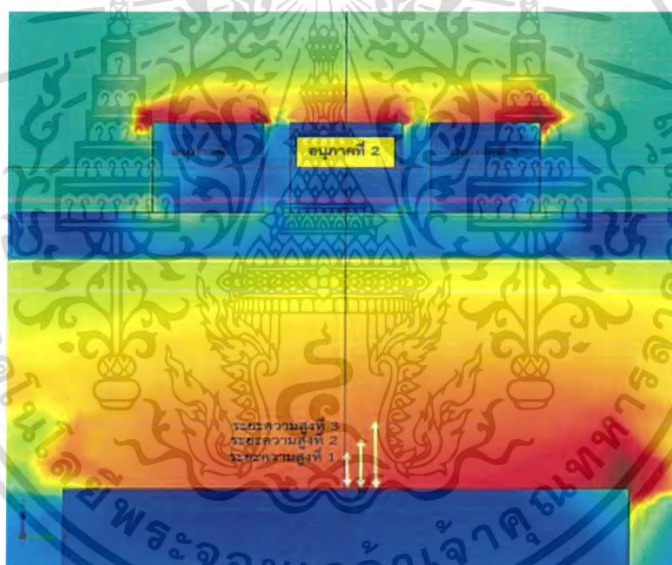
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการกำหนดภาพฐานรองในแต่ละชนิด

4.2.3) เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ครบแล้วทำการ กด Build Mesh และกด Compute



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการกด Build Mesh และกด Compute

4.2.4) บันทึกค่าสนามไฟฟ้าบนอนุภาคทองคำโนลงตารางที่เก็บบันทึกผล ซึ่งอนุภาคที่เราจะกำหนดเป็นอนุภาคตรงกลาง (อนุภาคที่ 2) และเลือกด้านบนของผิวอนุภาคทั้งหมด 3 ระยะเวลาสูงแต่ละตำแหน่ง



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการกำหนดระยะเวลาสูงของแต่ละอนุภาคเพื่อบันทึกค่าสนามไฟฟ้า

4.2.5) เมื่อเรากดเลือกค่าด้านบนของผิวอนุภาคทั้งหมด 3 จุด ที่แต่ละตำแหน่งและทำการเก็บบันทึกผลโดยเก็บบันทึกผลค่าของแกน x , y , z และ ค่า Value

x	y	z	Value
-5.6843E-14	-0.036142	11.137	1.8409E5
-5.6843E-14	-0.036142	11.548	1.8200E5
-5.6843E-14	-0.036142	11.672	1.8137E5

→

อนุภาค	x	y	z	Value
อนุภาค 1				
ครั้งที่ 1				
ครั้งที่ 2				
ครั้งที่ 3				
อนุภาค 2				
ครั้งที่ 1	5.6843E-14	-0.036142	11.137	1.8409E5
ครั้งที่ 2	5.6843E-14	-0.036142	11.548	1.8200E5
ครั้งที่ 3	5.6843E-14	-0.036142	11.672	1.8137E5

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างตารางการบันทึกค่าสนามไฟฟ้า

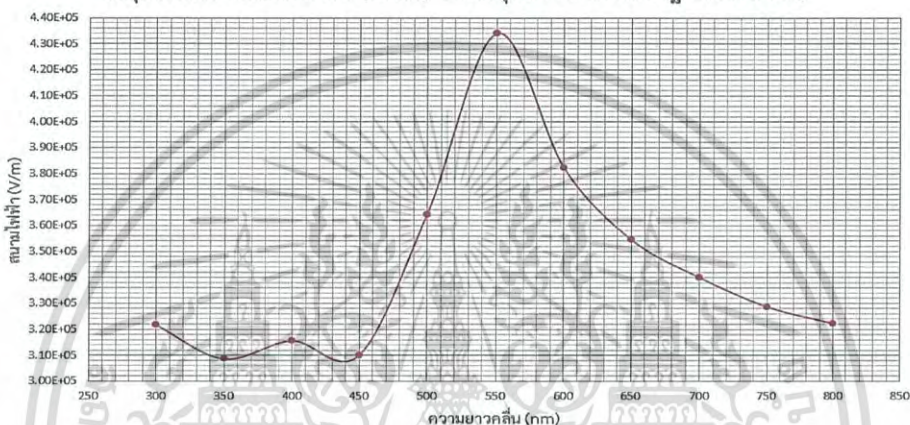
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การพล็อตกราฟค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละความยาวคลื่น

4.3.1 การพล็อตกราฟค่าสนามไฟฟ้า (V/m) กับ ค่าความยาวคลื่น (nm) จะเลือกค่าแกน z และค่า Value จากตารางบันทึกผลการทดลองในทุกความยาวคลื่นแต่ละอนุภาคนั้น

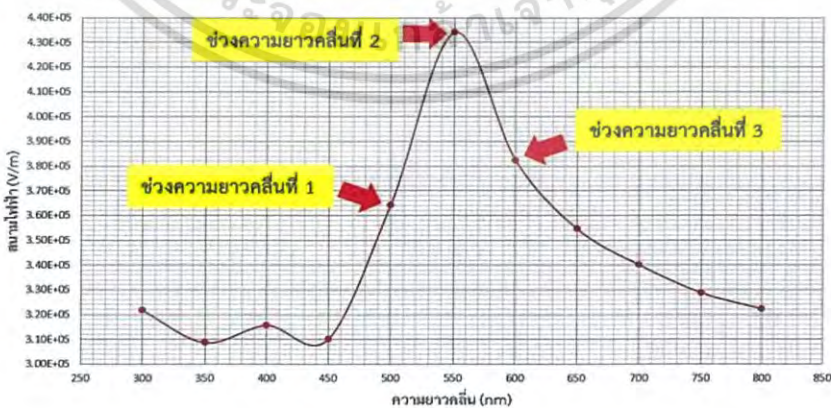
อนุภาค	X	Y	Z	Value
อนุภาค 1				
ครั้งที่ 1				
ครั้งที่ 2				
ครั้งที่ 3				
อนุภาค 2				
ครั้งที่ 1	5.6843E 14	0.036142	11.137	1.8409E5
ครั้งที่ 2	5.6843E 14	0.036142	11.548	1.8200E5
ครั้งที่ 3	5.6843E 14	0.036142	11.672	1.8137E5

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm) ที่อนุภาคขนาด 15x15x15 nm (วงกลม) แต่ละอนุภาคห่างกัน 5 nm (ฐานรองคือ BK7)



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างตารางและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้าและความยาวคลื่น

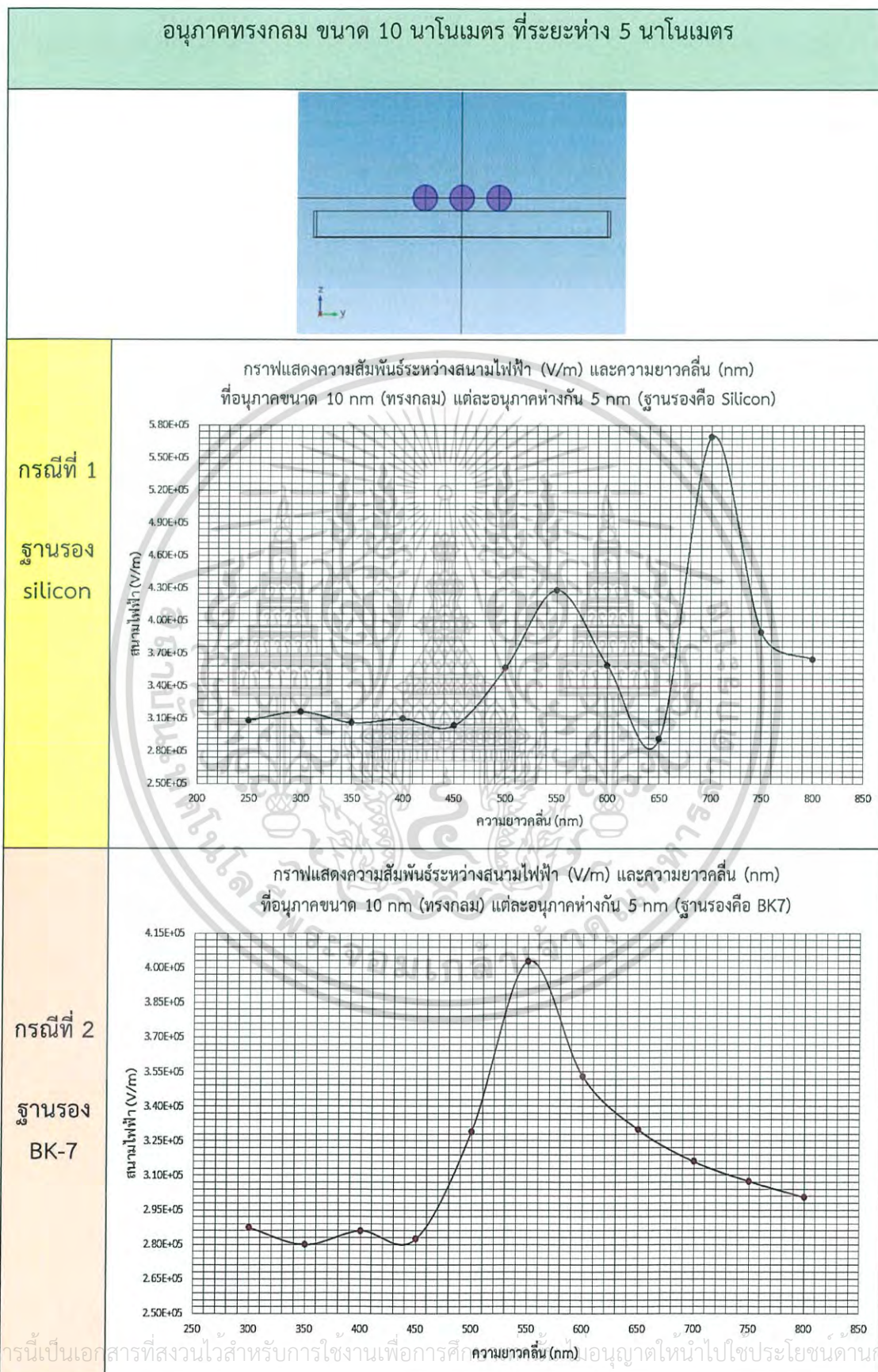
4.3.2 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเราจะสังเกตเห็นช่วงความยาวคลื่นสูงสุดว่าอยู่ที่ตำแหน่งในแต่ละความยาวคลื่นนั้นและทำการจดบันทึกผลว่าช่วงความยาวคลื่นที่สูงที่สุดนั้นจะมีค่าสนามไฟฟ้าที่เท่าไรพร้อมทั้งสังเกตช่วงที่อยู่ระหว่างช่วงความยาวคลื่นสูงสุดนั้นและภาพผลของสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบในแต่ละความยาวคลื่นทั้ง 3 ช่วง



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างกราฟแสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดในแต่ละช่วง

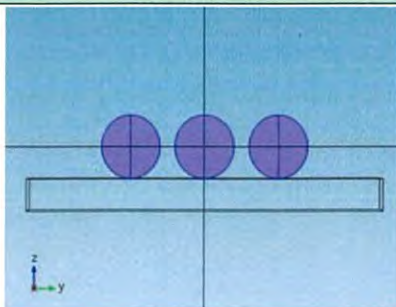
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลกราฟกรณีอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



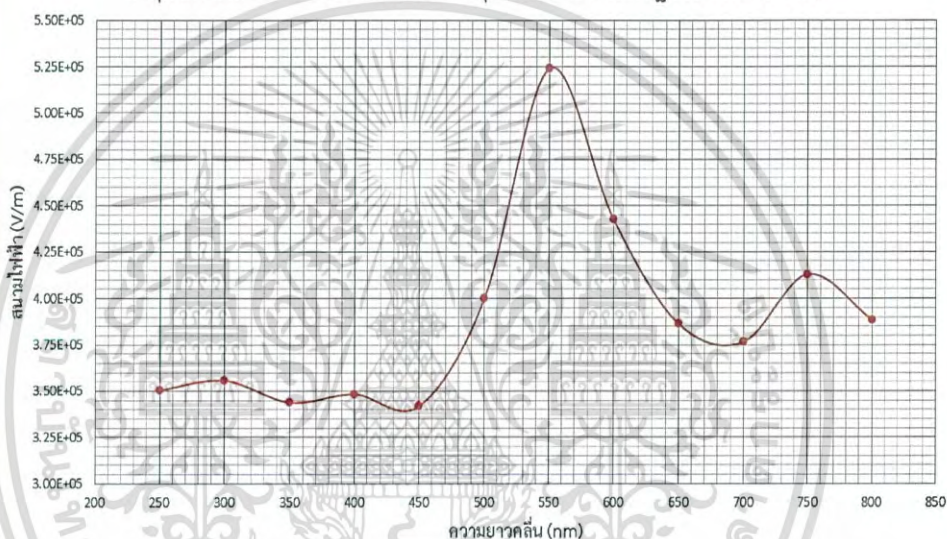
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ความยาวคลื่น (nm) มอนูญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคทรงกลม ขนาด 20 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



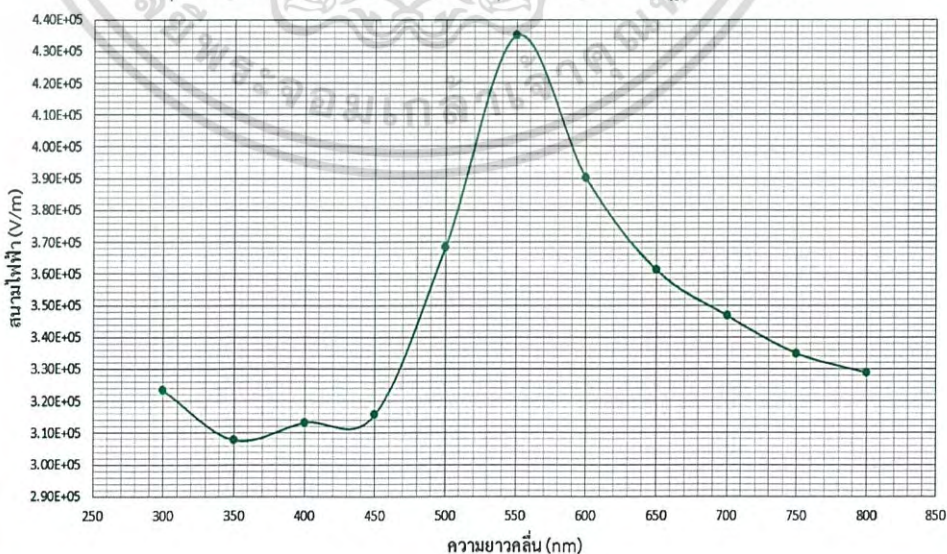
กรณีที่ 3
ฐานรอง silicon

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm) ที่อนุภาคขนาด 20 nm (ทรงกลม) แต่ละอนุภาคห่างกัน 5 nm (ฐานรองคือ Silicon)



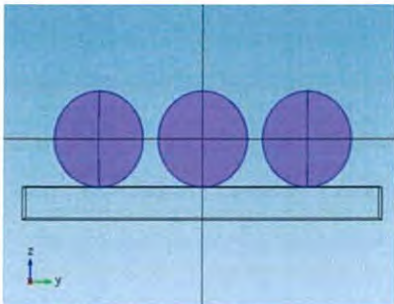
กรณีที่ 4
ฐานรอง BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) กับความยาวคลื่น (nm) ที่อนุภาคขนาด 20 nm (ทรงกลม) แต่ละอนุภาคห่างกัน 5 nm (ฐานรองคือ BK7)

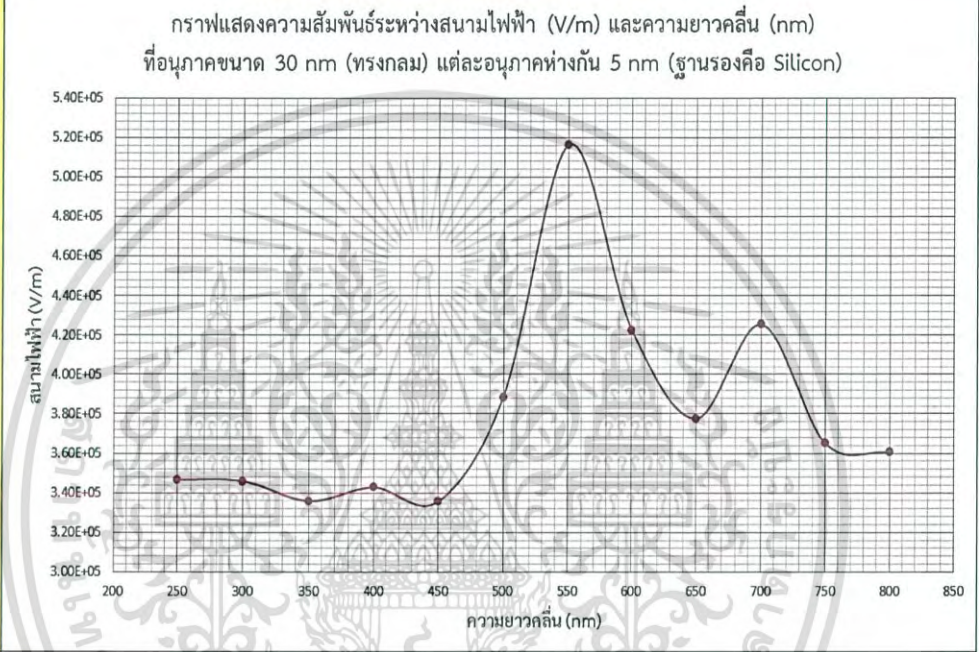


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

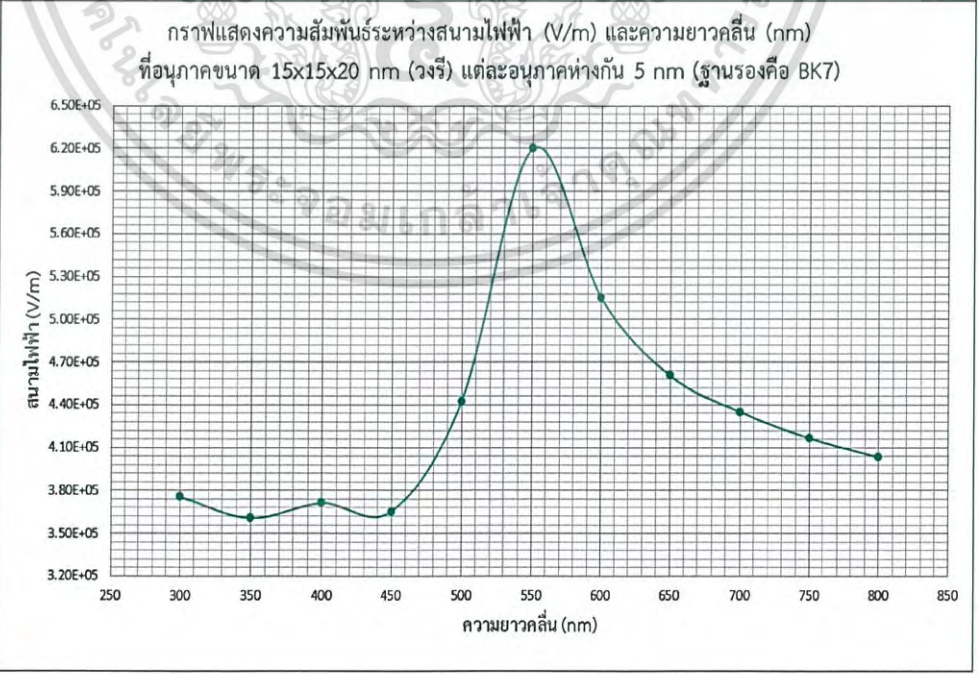
อนุภาคทรงกลม ขนาด 30 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



กรณีที่ 5
ฐานรอง silicon



กรณีที่ 6
ฐานรอง BK-7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร ในแต่ละกรณี

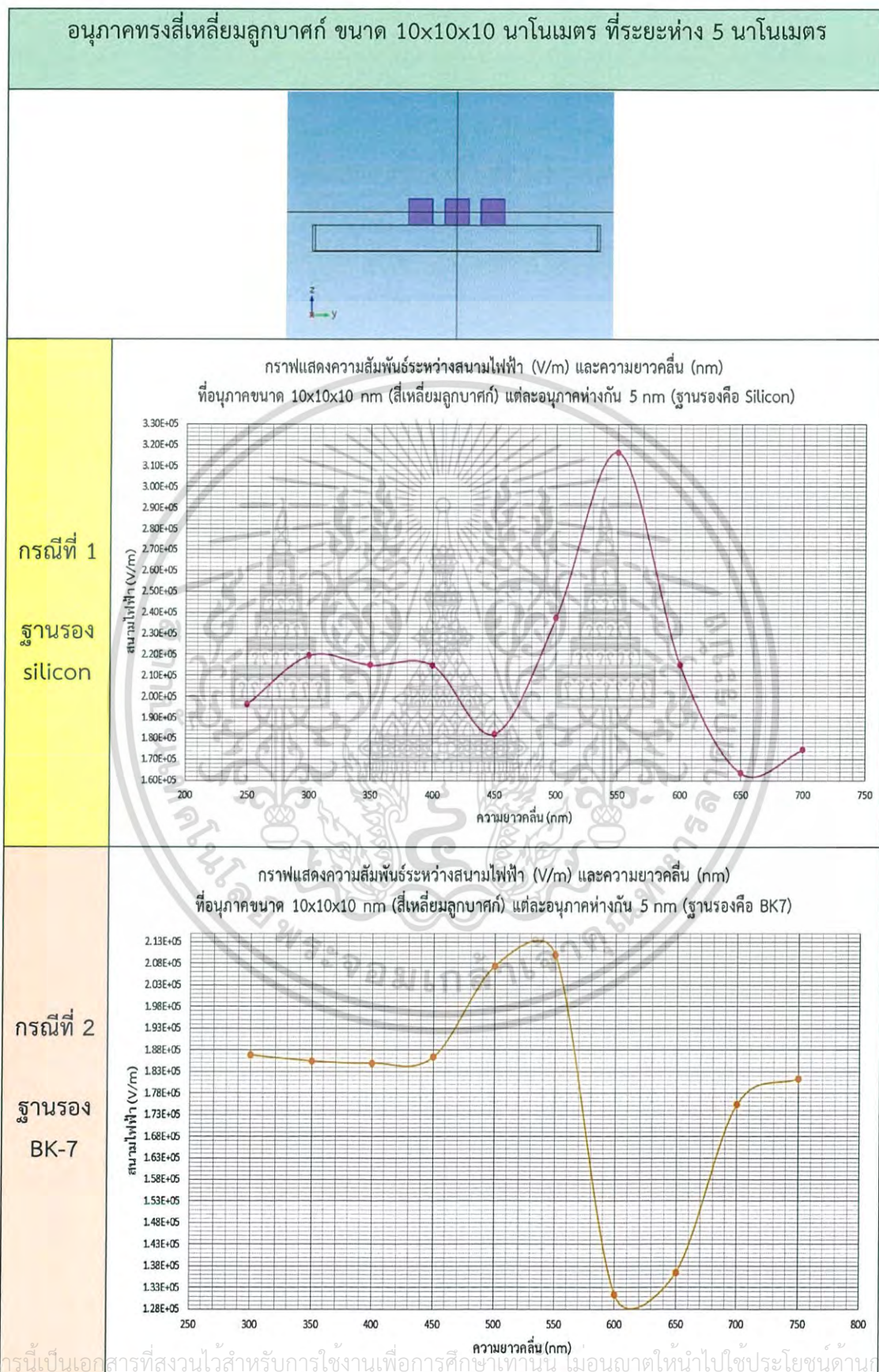
- 1) กรณีที่ 1 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.70×10^5 V/m
- 2) กรณีที่ 2 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.08×10^5 V/m
- 3) กรณีที่ 3 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.24×10^5 V/m
- 4) กรณีที่ 4 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.38×10^5 V/m
- 5) กรณีที่ 5 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.19×10^5 V/m
- 6) กรณีที่ 6 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.38×10^5 V/m

4.4.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

- 1) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ ทรงกลมขนาดอนุภาค 10, 20 และ 30 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 2) ยกเว้นกรณีที่ 1 ทรงกลมขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250 -800 นาโนเมตร แตกต่างกัน คือจะอยู่ช่วงความยาวคลื่นที่ 650,700,750 นาโนเมตร กรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
- 3) กรณีที่ 4 และ 6 ทรงกลมขนาดอนุภาค 20 และ 30 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าที่ตรงกัน คือ 4.38×10^5 V/m กรณี (ฐานรอง BK-7)
- 4) กรณีที่ 1 ทรงกลมขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.70×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)

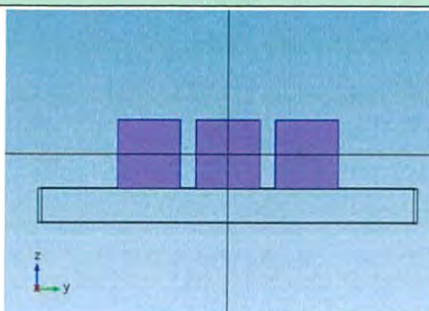
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรเอาผิดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ (ฐานรอง BK-7) อาจมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลกราฟกรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

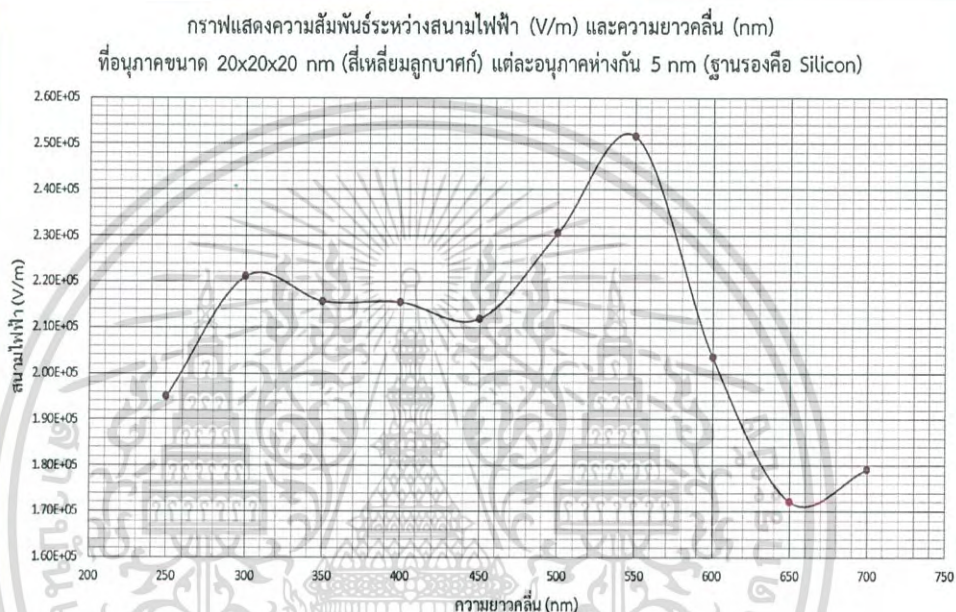


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

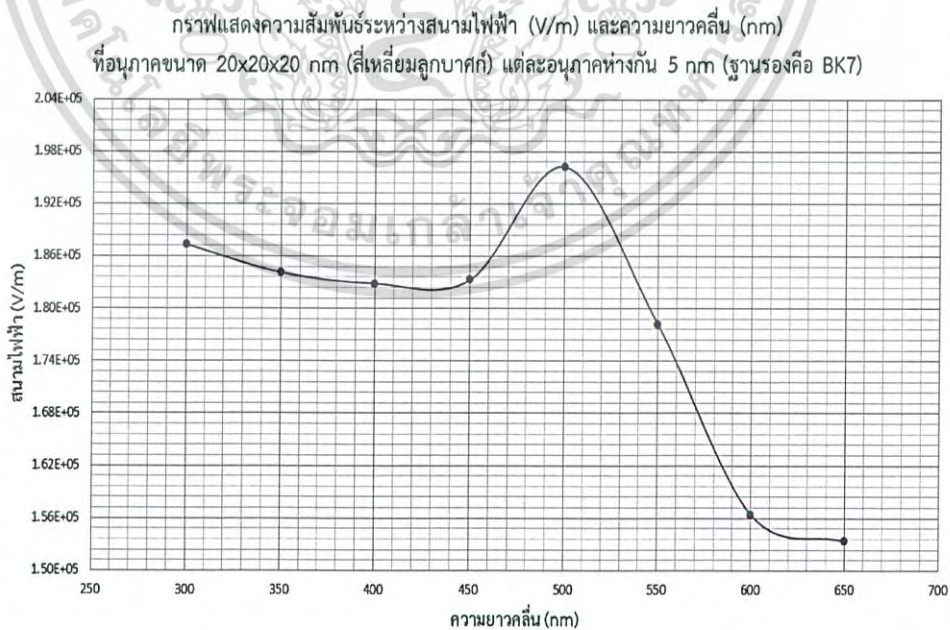
อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 20x20x20 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



กรณีที่ 3
ฐานรอง
silicon

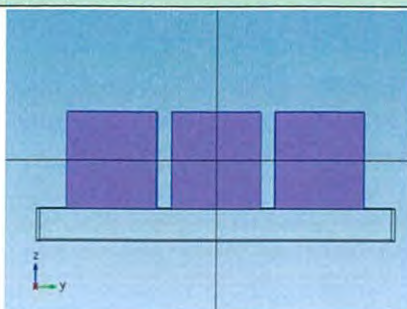


กรณีที่ 4
ฐานรอง
BK-7



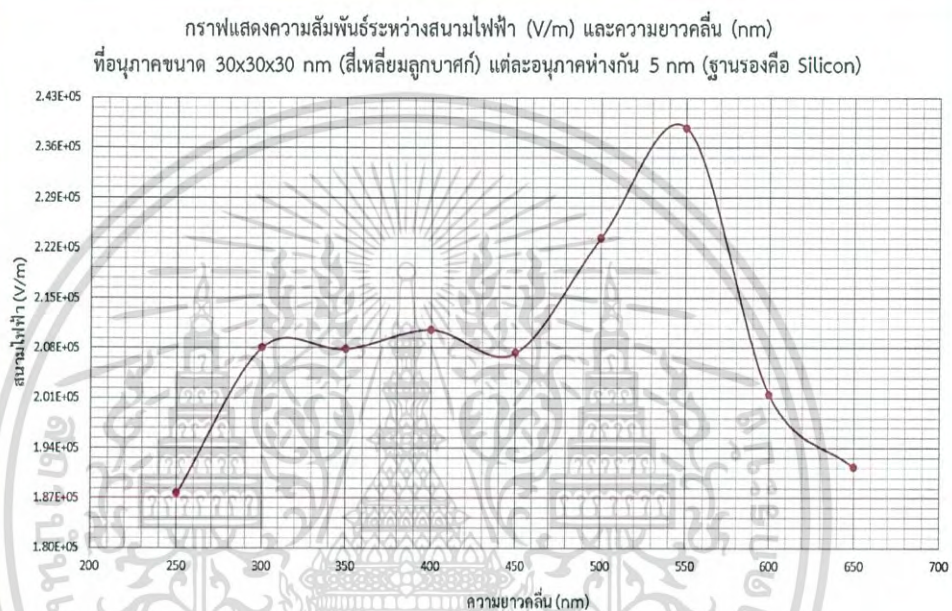
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 30x30x30 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



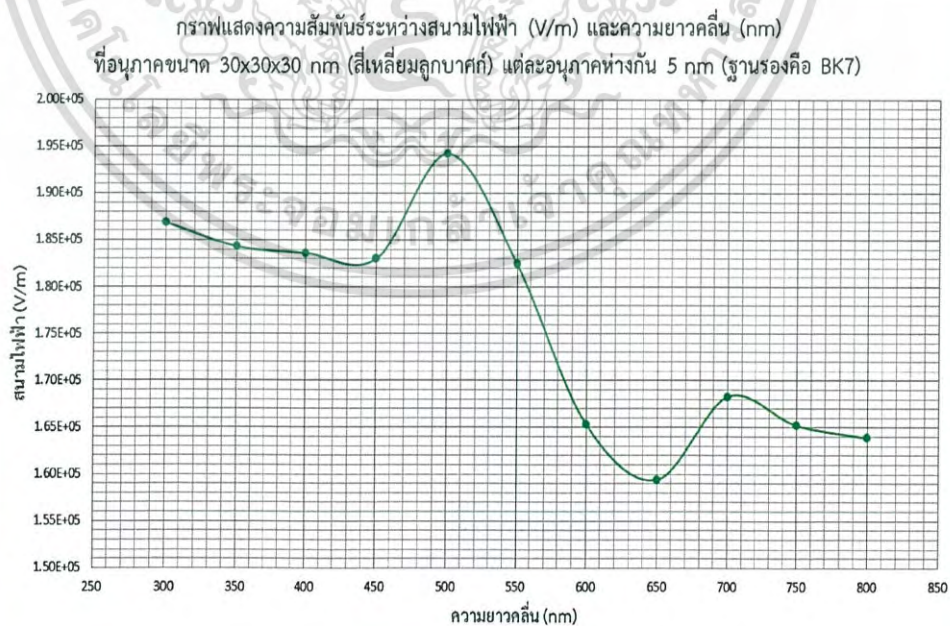
กรณีที่ 5

ฐานรอง
silicon



กรณีที่ 6

ฐานรอง
BK-7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 สรุปผลการจำลองอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร ในแต่ละกรณี

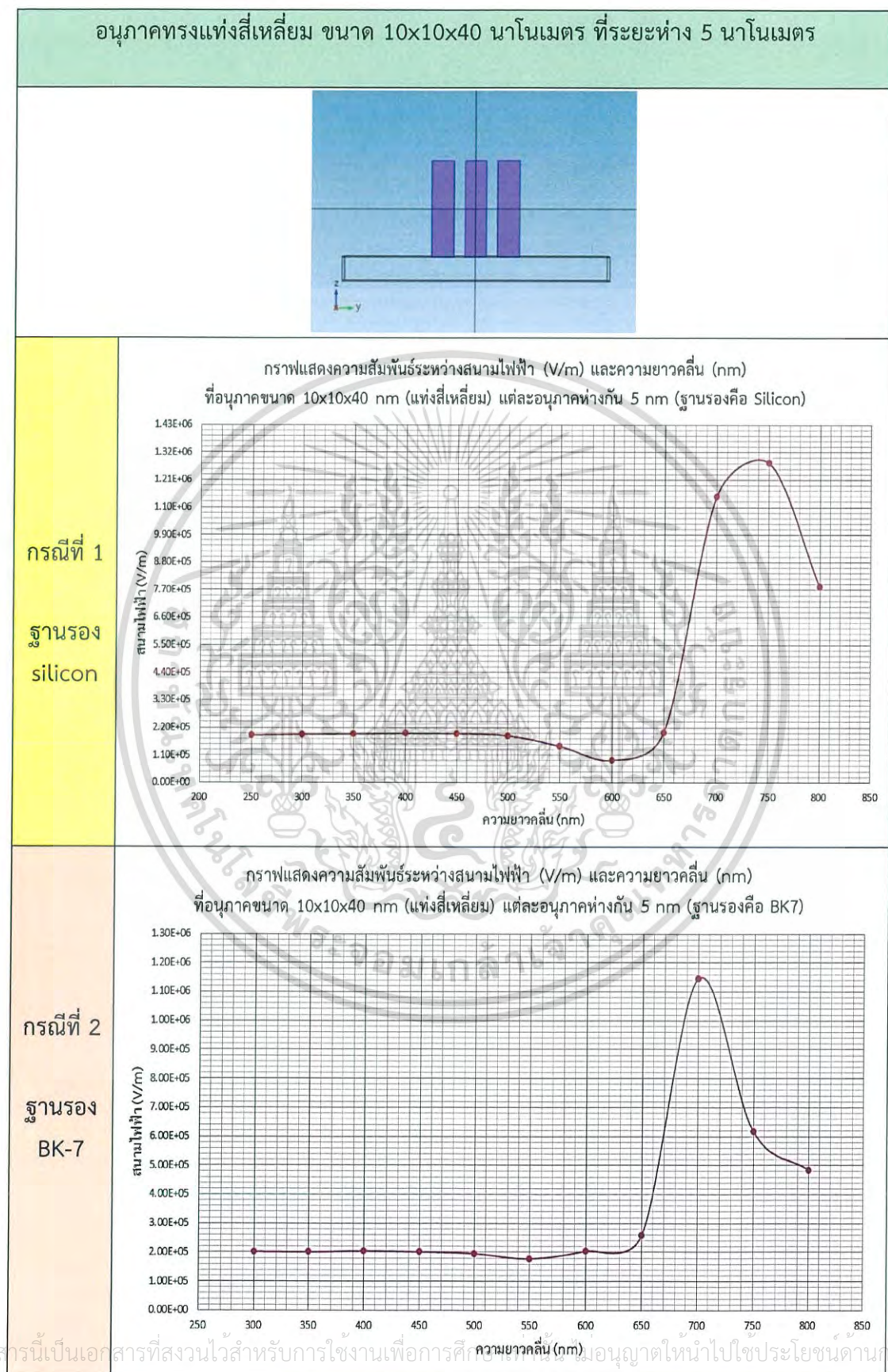
- 1) กรณีที่ 1 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $10 \times 10 \times 10$ นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-700 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 3.18×10^5 V/m
- 2) กรณีที่ 2 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $10 \times 10 \times 10$ นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-750 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.10×10^5 V/m
- 3) กรณีที่ 3 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $20 \times 20 \times 20$ นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-700 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.51×10^5 V/m
- 4) กรณีที่ 4 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $20 \times 20 \times 20$ นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-650 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.97×10^5 V/m
- 5) กรณีที่ 5 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $30 \times 30 \times 30$ นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-650 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.39×10^5 V/m
- 6) กรณีที่ 6 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $30 \times 30 \times 30$ นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.94×10^5 V/m

4.5.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

- 1) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด $(10 \times 10 \times 10), (20 \times 20 \times 20), (30 \times 30 \times 30)$ นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-700 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
- 2) กรณีที่ 1 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาค $(10 \times 10 \times 10)$ นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 3) กรณีที่ 4 และ 6 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาค $(20 \times 20 \times 20)$ และ $(30 \times 30 \times 30)$ นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 500 และ 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 4) กรณีที่ 1 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาค $(10 \times 10 \times 10)$ ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ ตั้งแต่ 250-700 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 3.18×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลกราฟกรณีอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

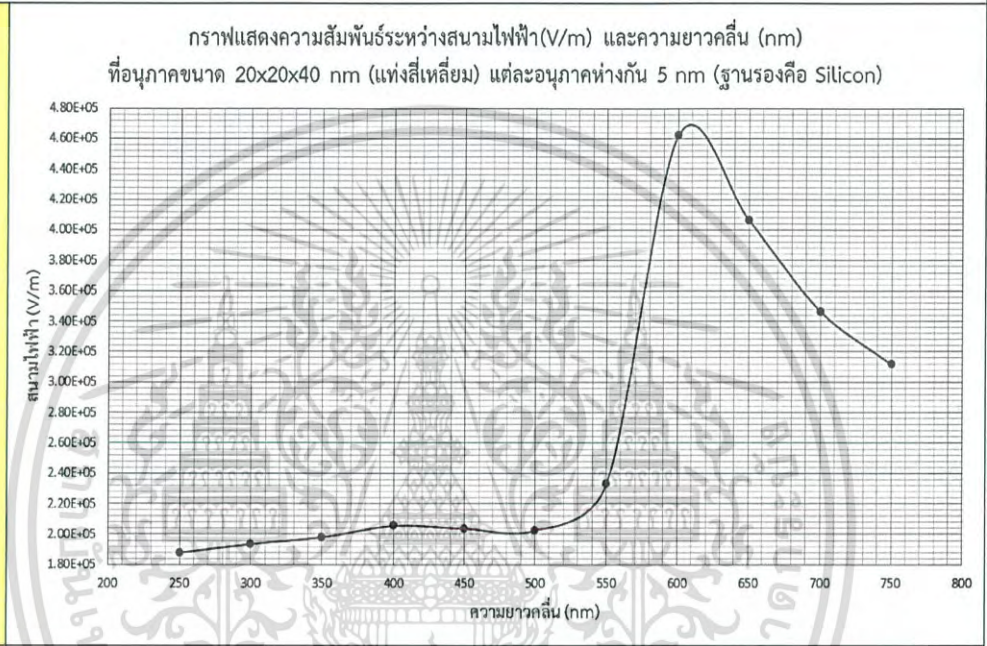


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

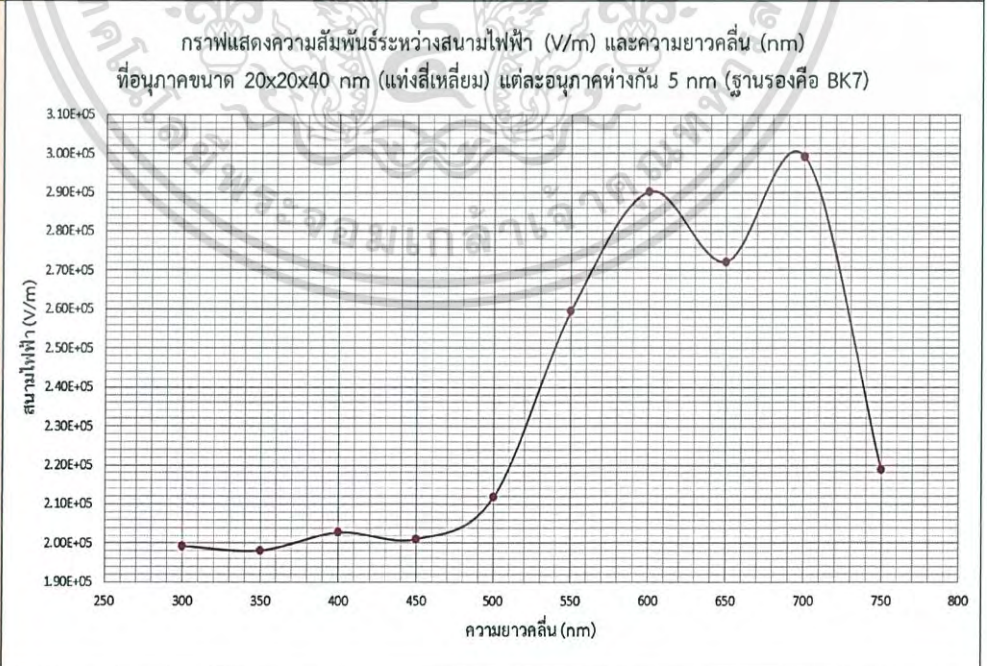
อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด 20x20x40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



กรณีที่ 3
ฐานรอง silicon

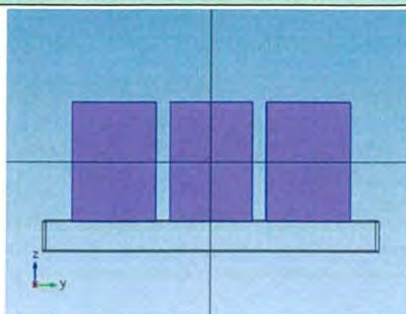


กรณีที่ 4
ฐานรอง BK-7

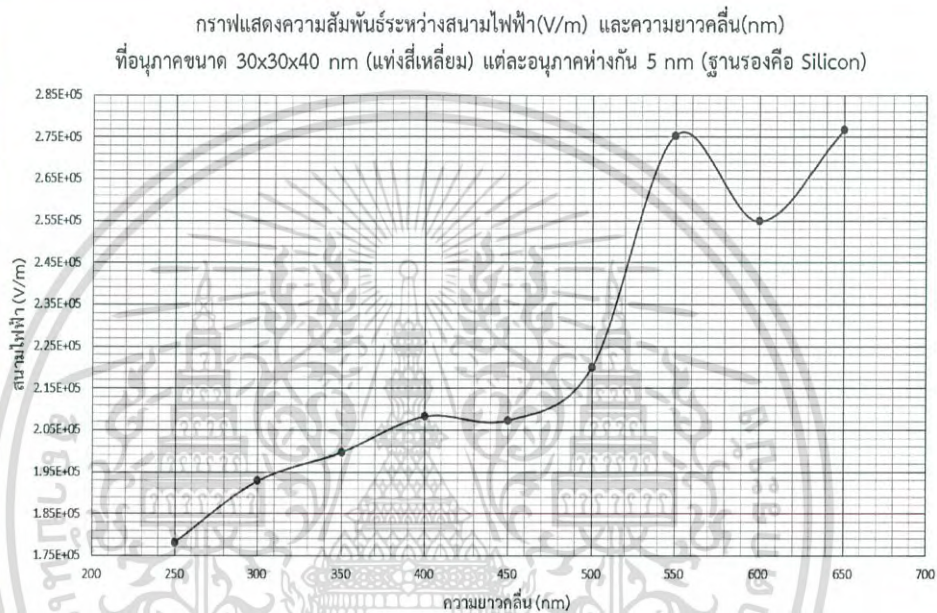


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

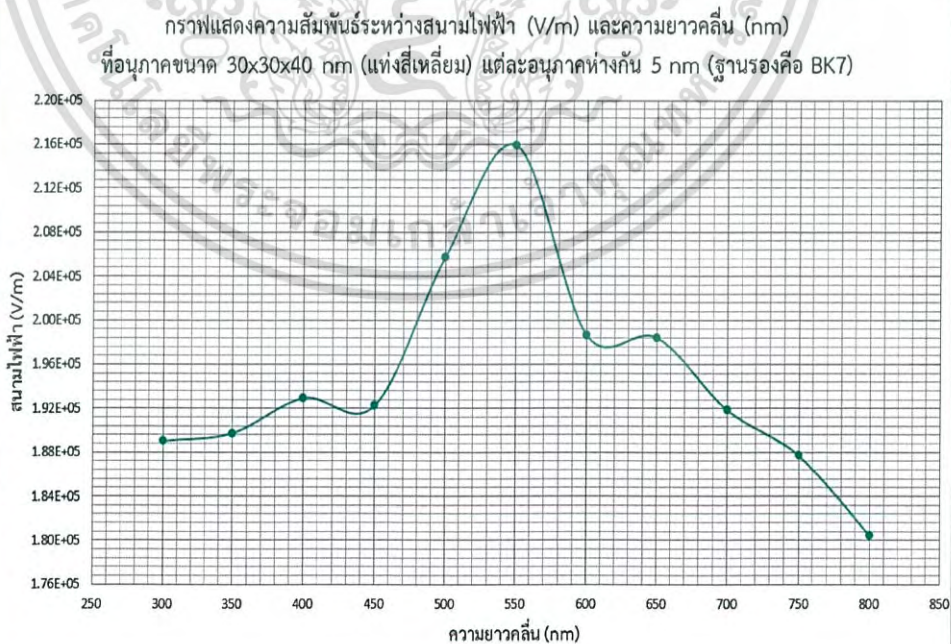
อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด 30x30x40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



กรณีที่ 5
ฐานรอง
silicon



กรณีที่ 6
ฐานรอง
BK-7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตรในแต่ละกรณี

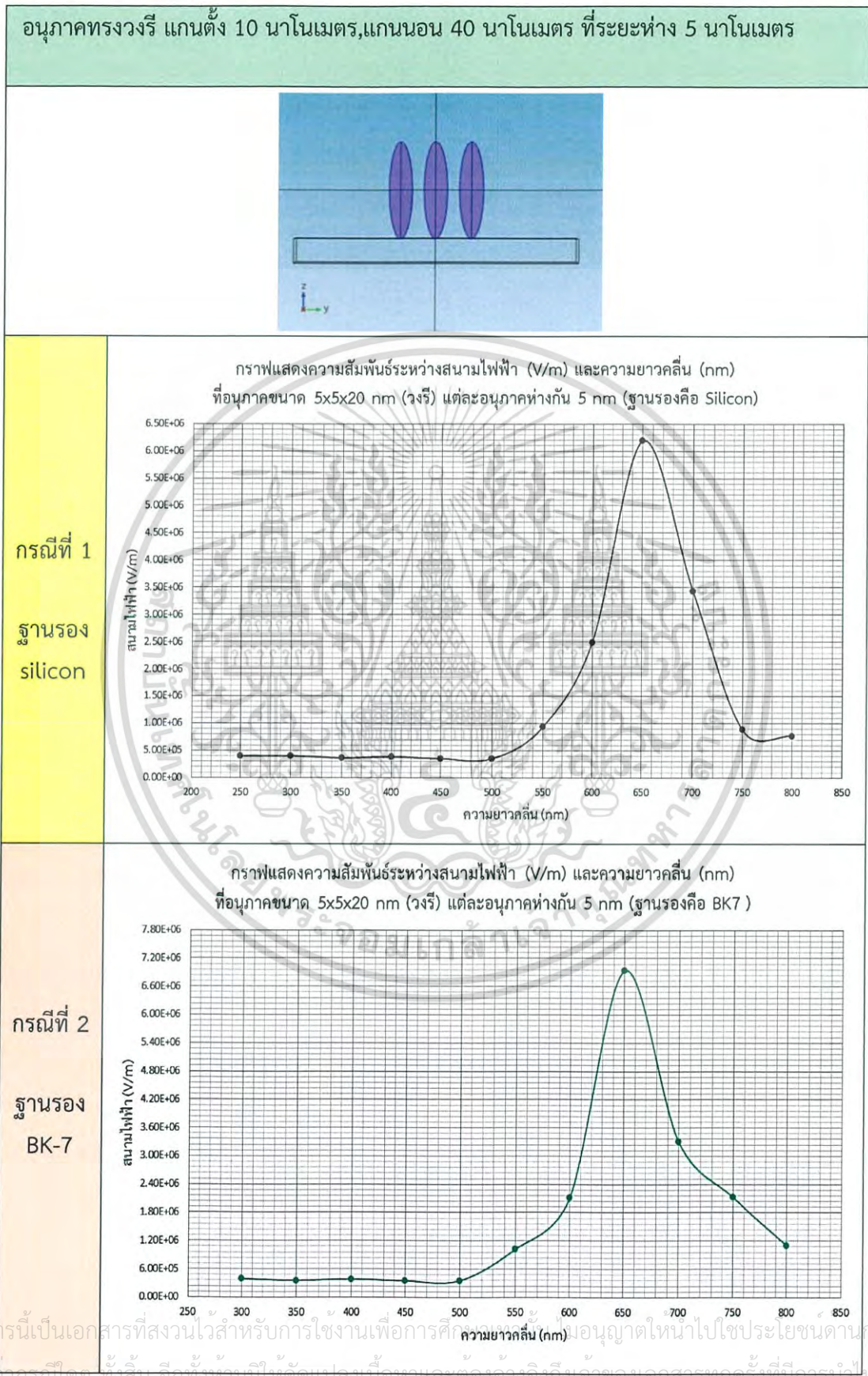
- 1) กรณีที่ 1 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (10×10×40) นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.30×10^6 V/m
- 2) กรณีที่ 2 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (10×10×40) นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.15×10^6 V/m
- 3) กรณีที่ 3 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (20×20×40) นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-700 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.61×10^5 V/m
- 4) กรณีที่ 4 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (20×20×40) นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-7500 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.99×10^5 V/m
- 5) กรณีที่ 5 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (30×30×40) นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-650 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.77×10^5 V/m
- 6) กรณีที่ 6 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (30×30×40) นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.16×10^5 V/m

4.6.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

- 1) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ แท่งสี่เหลี่ยมขนาดอนุภาค (10×10×40),(20×20×40) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
- 2) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ แท่งสี่เหลี่ยมขนาดอนุภาค (30×30×40) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วง 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 3) กรณีที่ 1 แท่งสี่เหลี่ยมขนาดอนุภาค (10×10×40) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.30×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)

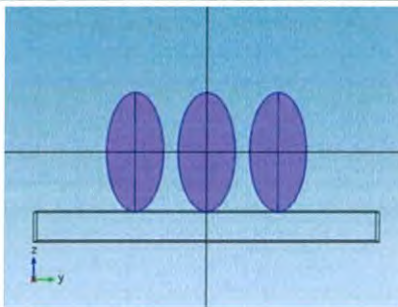
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลกราฟกรณีอนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



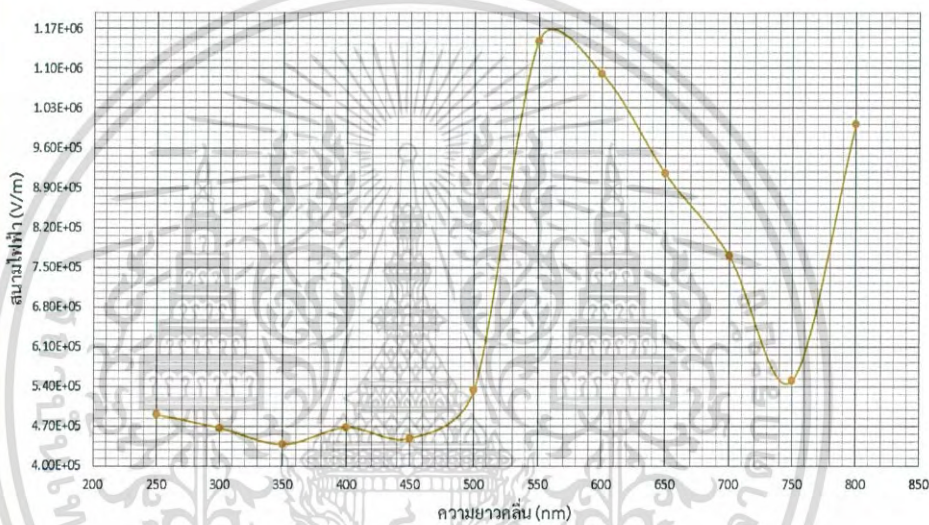
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่มีการตีพิมพ์ ห้ามนำไปใช้ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

อนุภาคทรงวงรี แกนตั้ง 20 นาโนเมตร , แกนนอน 40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



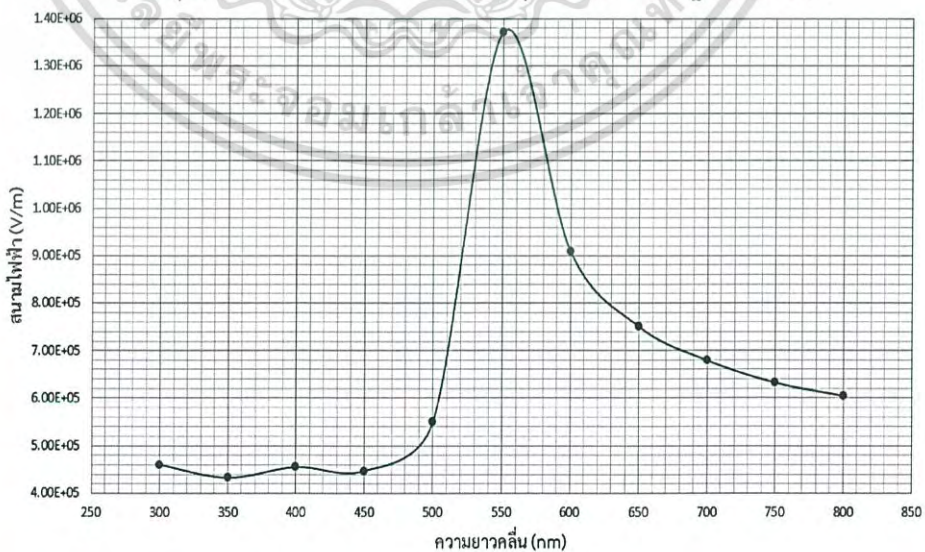
กรณีที่ 3
ฐานรอง
silicon

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm) ที่อนุภาคขนาด 10x10x20 nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 5 nm (ฐานรอง คือ Silicon)



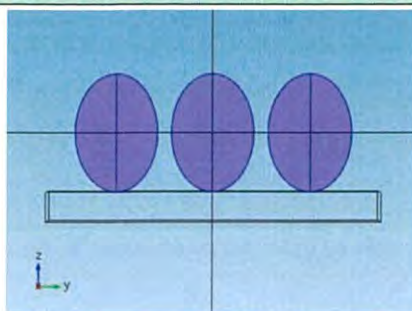
กรณีที่ 4
ฐานรอง
BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm) ที่อนุภาคขนาด 10x10x20 nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 5 nm (ฐานรองคือ BK7)



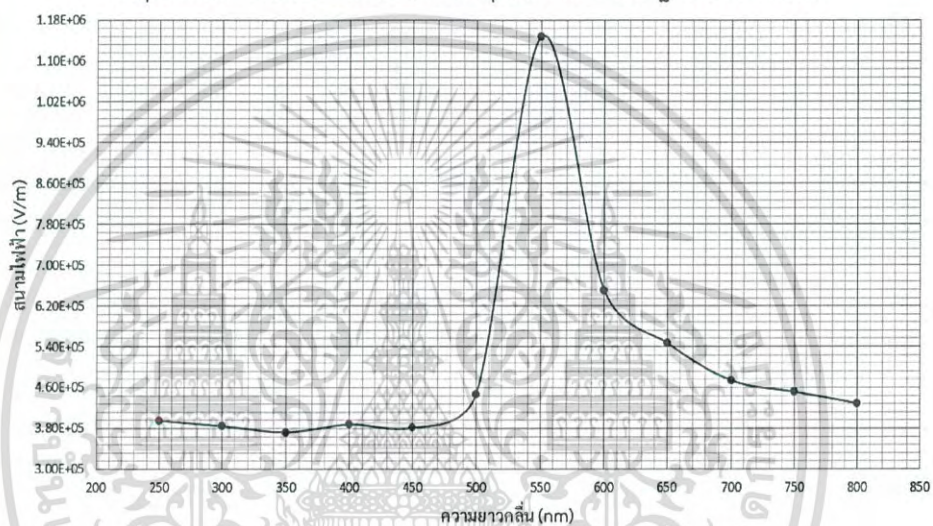
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคทรงวงรี แกนตั้ง 30 นาโนเมตร , แกนนอน 40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร



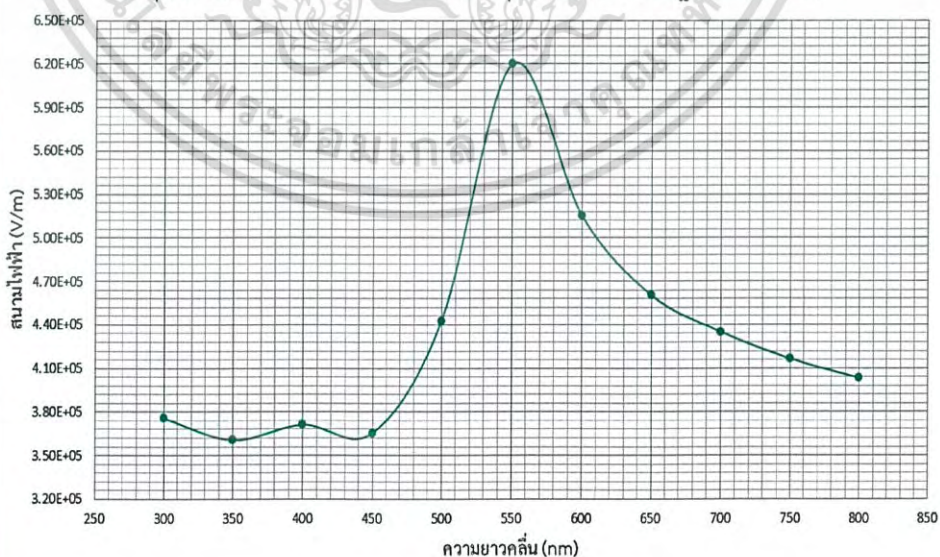
กรณีที่ 5
ฐานรอง
silicon

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm)
ที่อนุภาคขนาด $15 \times 15 \times 20$ nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 5 nm (ฐานรองคือ Silicon)



กรณีที่ 6
ฐานรอง
BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm)
ที่อนุภาคขนาด $15 \times 15 \times 20$ nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 5 nm (ฐานรองคือ BK7)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร ในแต่ละกรณี

- 1) กรณีที่ 1 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 10 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 6.30×10^6 V/m
- 2) กรณีที่ 2 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 10 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 7.00×10^5 V/m
- 3) กรณีที่ 3 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 20 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.16×10^6 V/m
- 4) กรณีที่ 4 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 20 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.39×10^6 V/m
- 5) กรณีที่ 5 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 30 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.16×10^6 V/m
- 6) กรณีที่ 6 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 30 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 6.20×10^5 V/m

4.7.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

- 1) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ วงรีขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 20,30 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 2) ยกเว้นในกรณีที่ 1 และ 2 วงรีขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 3) กรณีที่ 3 และ 5 วงรีขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 20,30 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน และมีค่าสนามไฟฟ้าเท่ากัน คือ 1.16×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
- 4) กรณีที่ 2 วงรีขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 6.30×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับกรณีใช้งานที่ถูกต้องเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การวิเคราะห์ผลภาพสนามไฟฟ้าจากกราฟและผลภาพ ที่ระยะห่าง 5 และ 10 นาโนเมตร

4.8.1 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเราจะสังเกตเห็นช่วงความยาวคลื่นสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งใดในแต่ละความยาวคลื่นนั้นและทำการจัดบันทึกผลว่าช่วงความยาวคลื่นที่สูงที่สุดนั้นมีค่าสนามไฟฟ้าที่เท่าไรพร้อมทั้งสังเกตช่วงที่อยู่ระหว่างช่วงความยาวคลื่นสูงสุดนั้นและดูภาพผลของสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบในแต่ละความยาวคลื่นทั้ง 3 ช่วง



รูปที่ 4.9 ช่วงความยาวคลื่นต่างๆที่จุดสูงสุดของอนุภาค

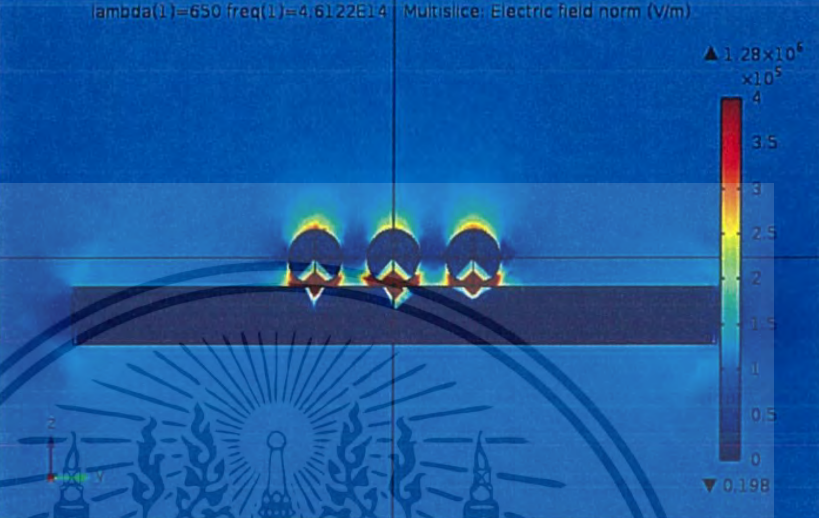

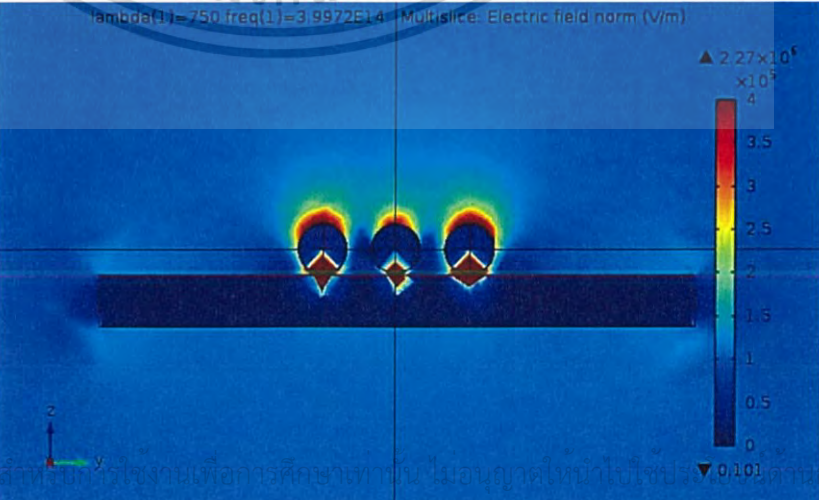
4.8.2 นำผลภาพการแสดงผลค่าสนามไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นที่ 1,2 และ 3 มาสังเกตและเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ผลของอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปทรงและขนาดต่างๆ ดังภาพนี้

ขนาดอนุภาค 30x10x10 นาโน	อนุภาค silicon	ขนาดอนุภาค 30x10x10 นาโน	อนุภาค BK-7
<ul style="list-style-type: none"> • ความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 0.198 V/m • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.28×10^7 V/m 		<ul style="list-style-type: none"> • ความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 0.228 V/m • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 5.49×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> • ความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 0.168 V/m • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 6.46×10^7 V/m 		<ul style="list-style-type: none"> • ความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 0.164 V/m • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.02×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> • ความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 0.183 V/m • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.27×10^7 V/m 		<ul style="list-style-type: none"> • ความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 0.228 V/m • ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 5.49×10^7 V/m 	

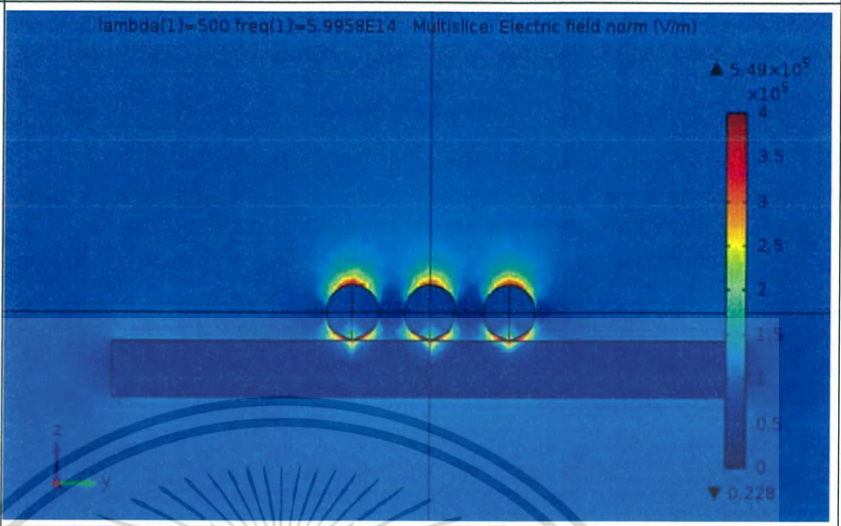
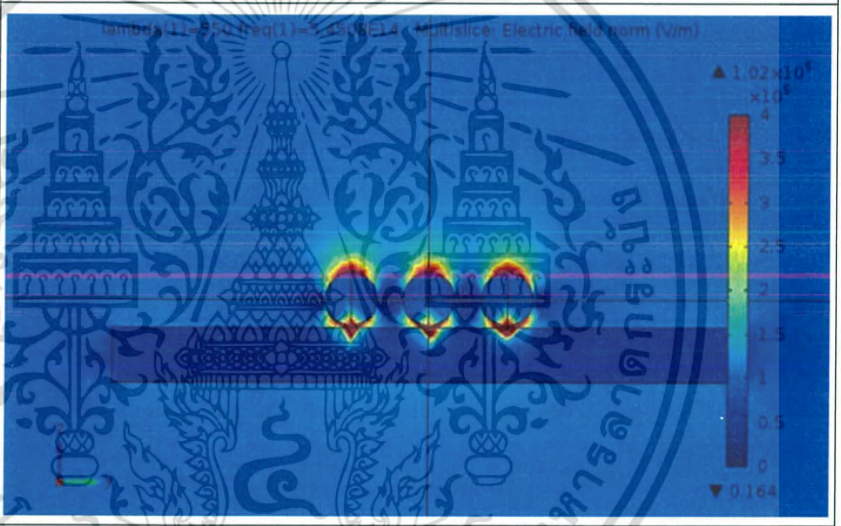
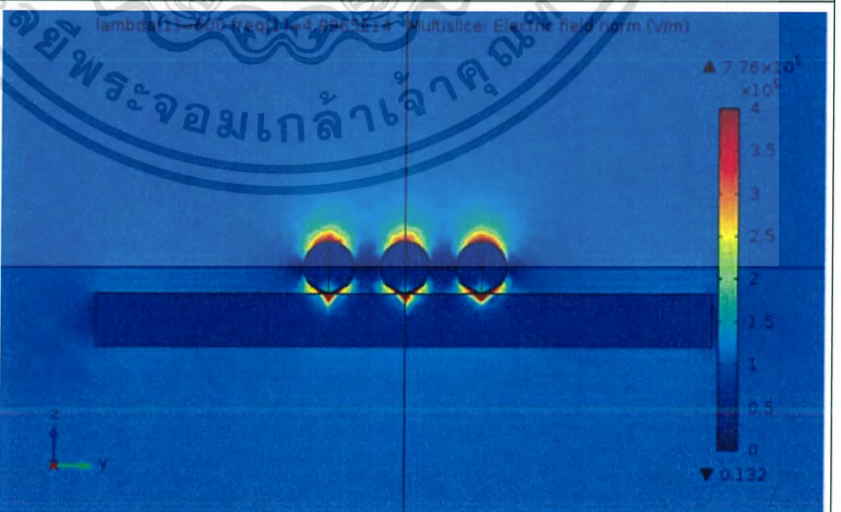
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ชมเป็นกรณีศึกษาเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงกลมขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

4.9.1 อนุภาคทรงกลมขนาด 10 นาโนเมตร

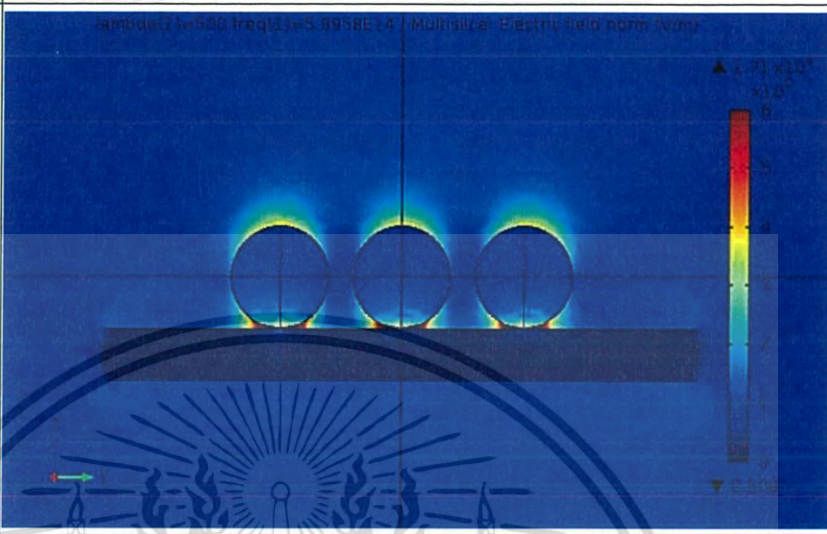
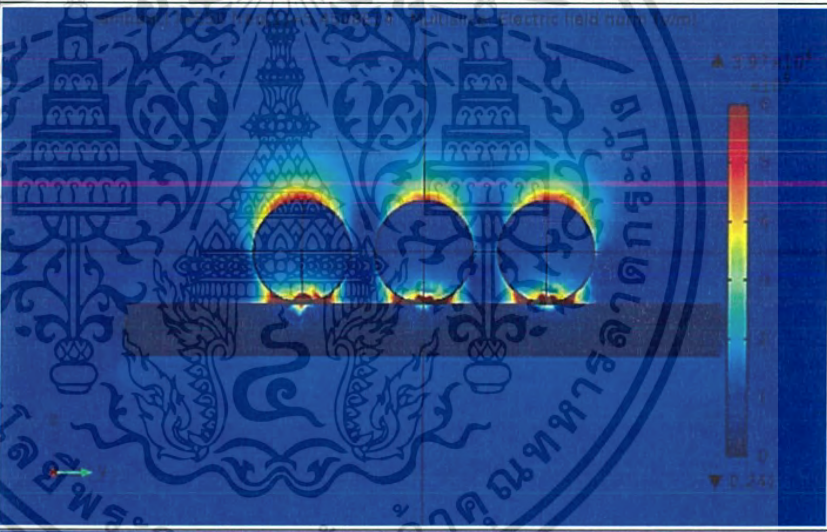
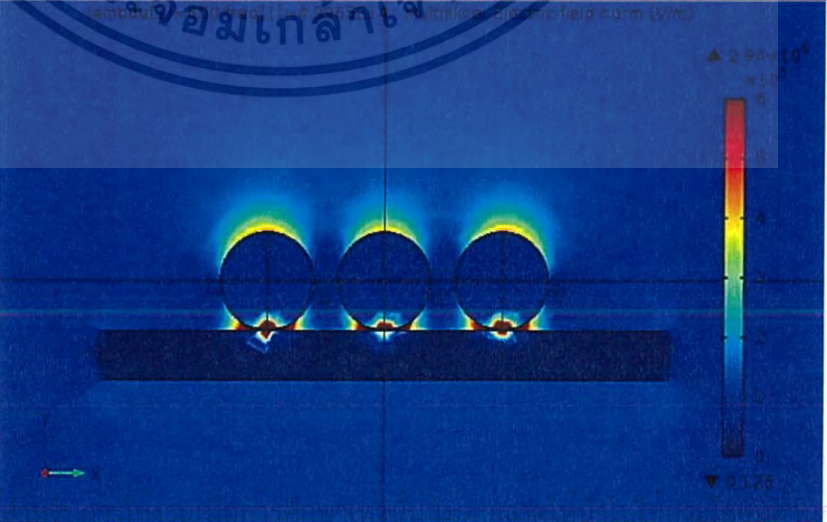
ขนาดอนุภาค 10 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.198 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.28×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.165 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 6.46×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 750 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.101 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.27×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาค 10 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.228 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.49×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=500 freq(1)=5.9958E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 5.49×10^5 x10⁵</p> <p>▼ 0.228</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.164 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.02×10^6 V/m 	 <p>lambda(1)=550 freq(1)=5.2509E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 1.02×10^6 x10⁶</p> <p>▼ 0.164</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.228 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.49×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=600 freq(1)=4.9982E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 5.49×10^5 x10⁵</p> <p>▼ 0.228</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9.2 อนุภาคทรงกลมขนาด 20 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค 20 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.508 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.71×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.241 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.97×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.126 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.94×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ขนาดอนุภาค 20 nm</p>	<p>ฐานรอง BK-7</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.28 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.72×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.123 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.59×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.126 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.17×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 ไม่สามารถคืนค่า ฟังก์ชัน อีกทีหนึ่ง หากมีเหตุใดเหตุหนึ่งเกิดขึ้นและต้องขอโทษเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกท่านที่นำเอาไปใช้

4.9.3 อนุภาคทรงกลมขนาด 30 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค 30 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.543 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.05×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0875 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.42×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0785 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.55×10^6 V/m 	

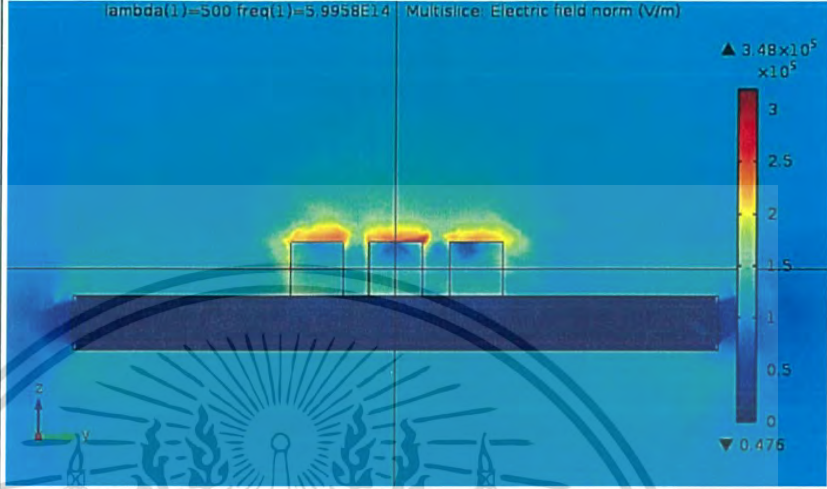

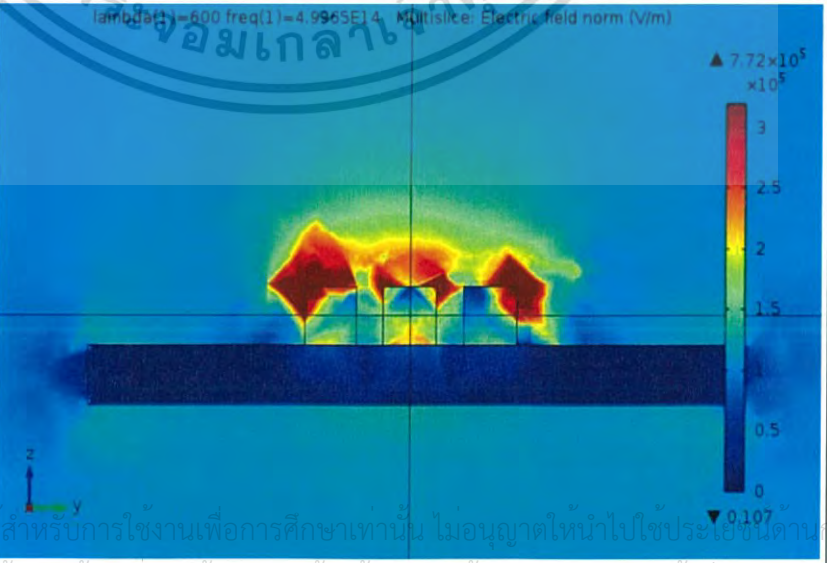
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>ขนาดอนุภาค 30 nm</p>	<p>ฐานรอง BK-7</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.373 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.42×10^5 V/m 	<p>lambda(1)=500 freq(1)=5.9958E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 8.42×10^5 $\times 10^5$ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.373</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.12 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.38×10^6 V/m 	<p>lambda(1)=550 freq(1)=4.950E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 1.38×10^6 $\times 10^5$ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.12</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0896 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.05×10^6 V/m 	<p>lambda(1)=600 freq(1)=4.9965E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 1.05×10^6 $\times 10^5$ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.0896</p>

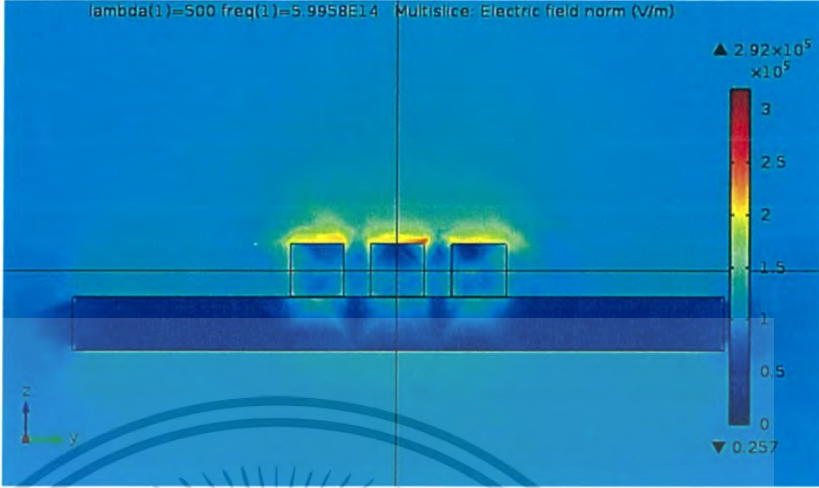

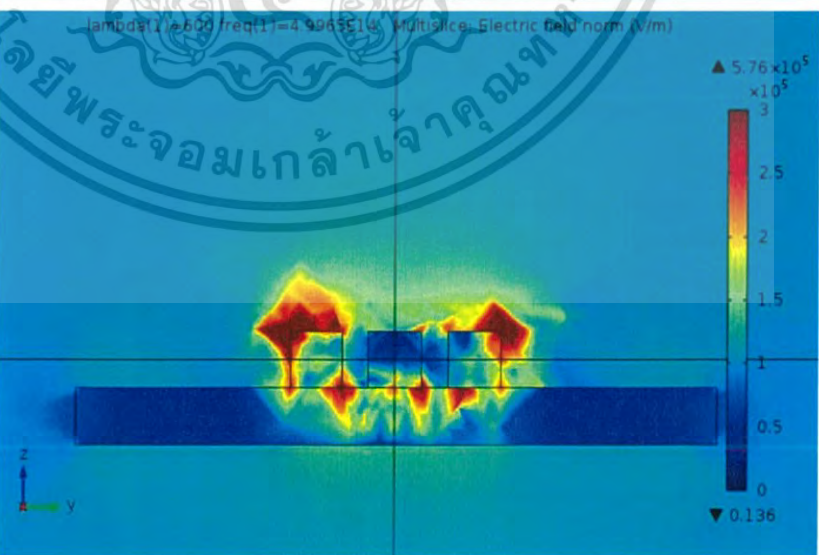
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

4.10.1 อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 นาโนเมตร

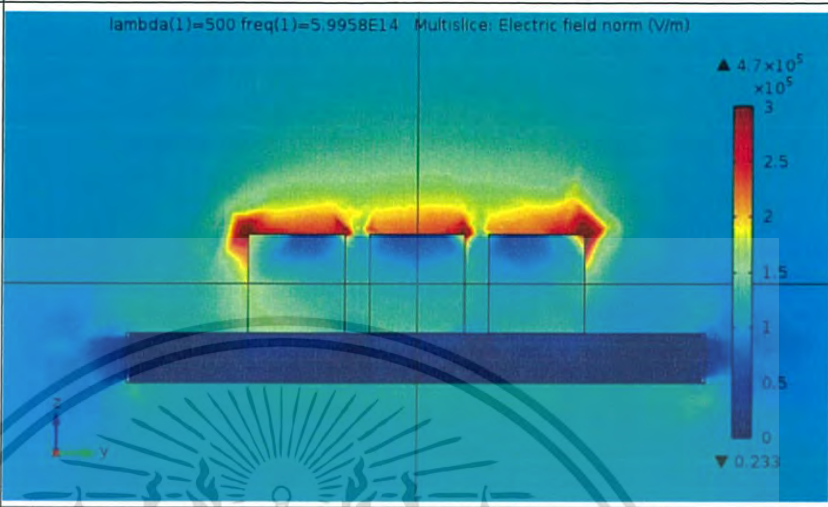
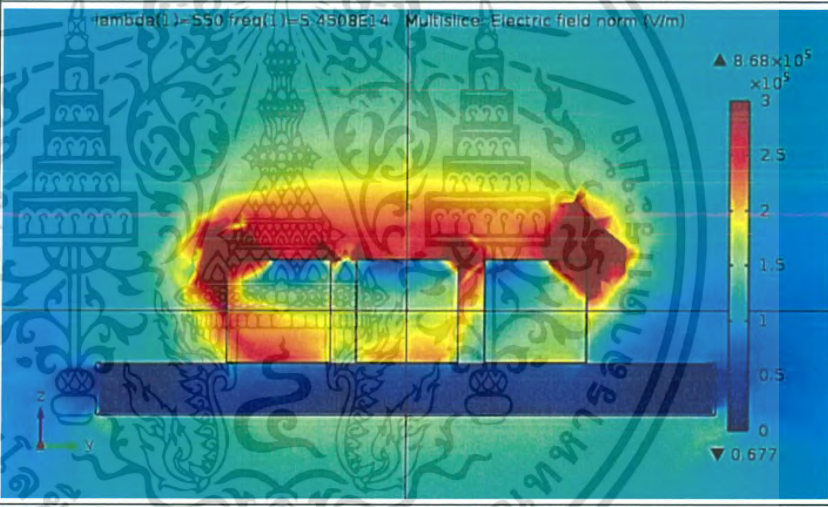
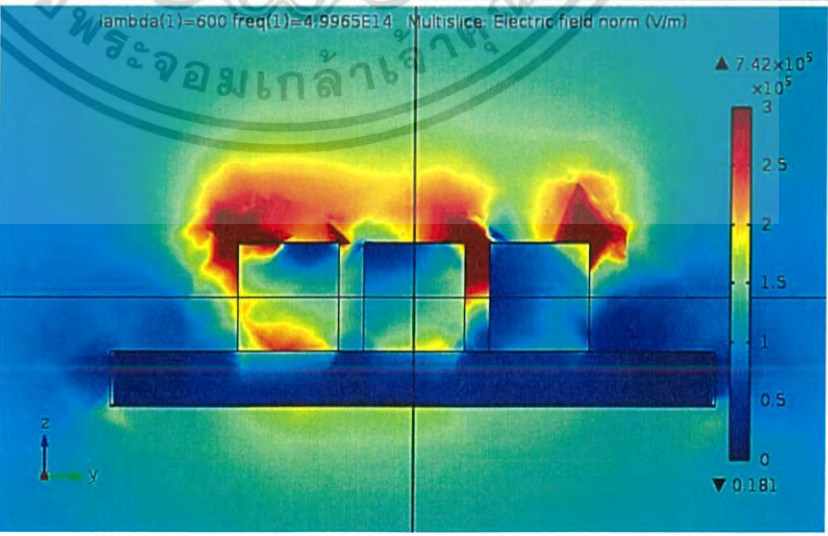
ขนาดอนุภาค 10x10x10 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.476 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.48×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.217 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.8×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.107 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.72×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

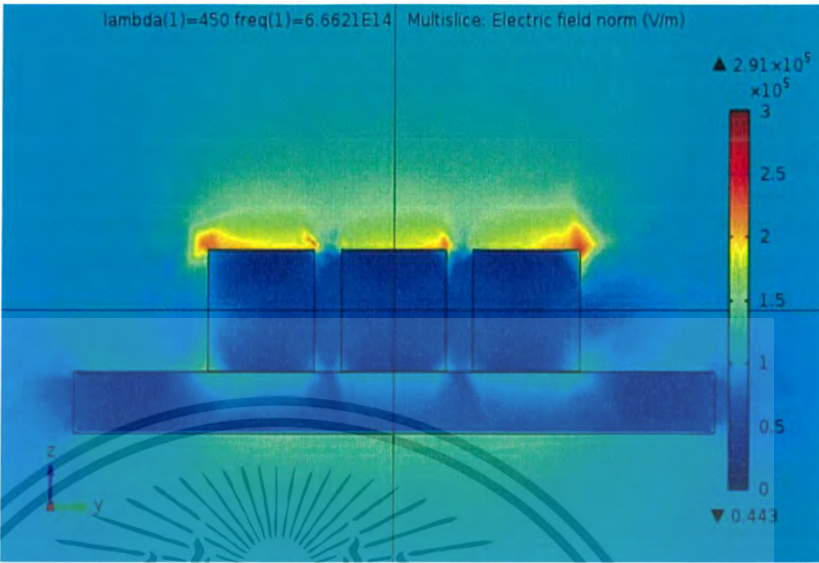
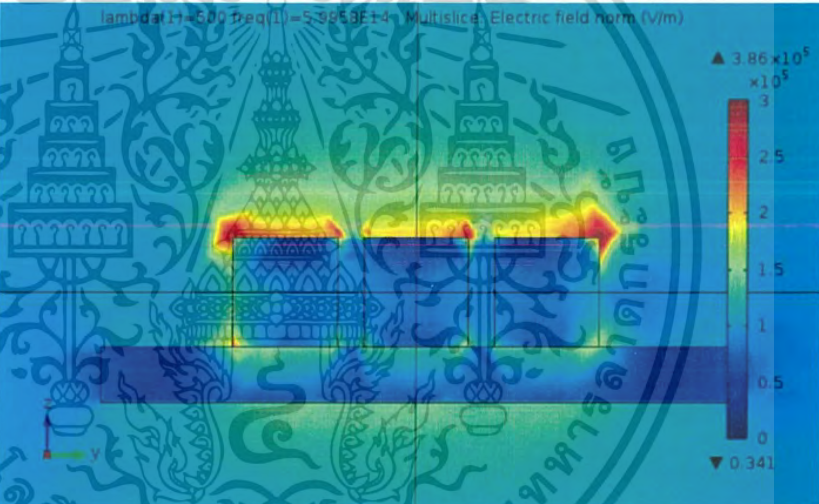
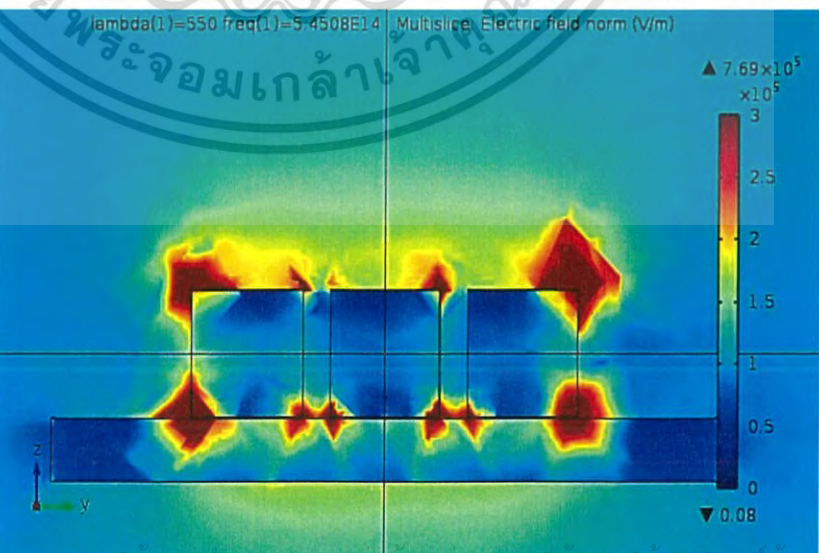
ขนาดอนุภาค 10x10x10 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.257 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.92×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.126 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.78×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.136 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.76×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10.2 อนุภาคสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 20x20x20 นาโนเมตร

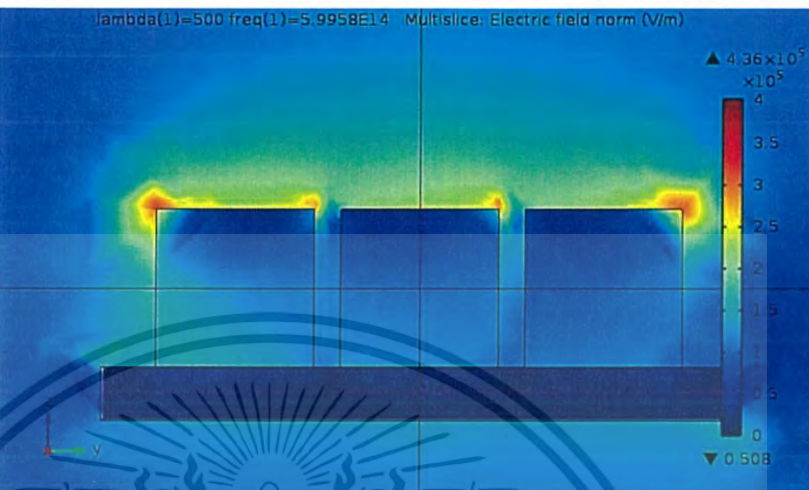
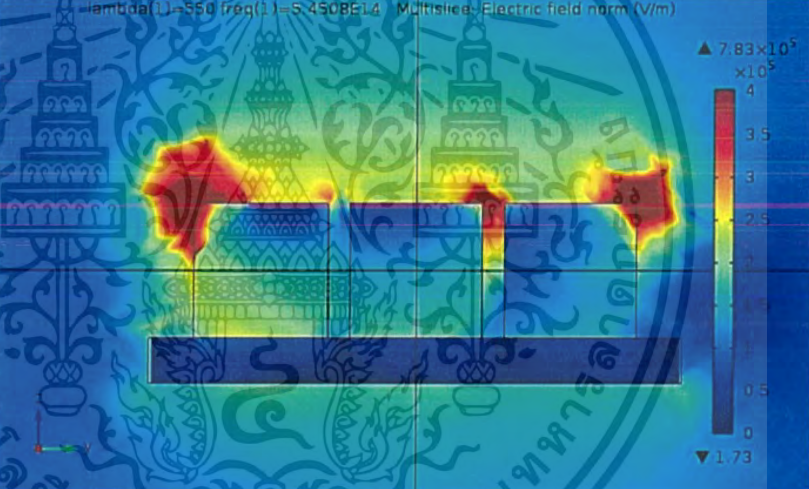
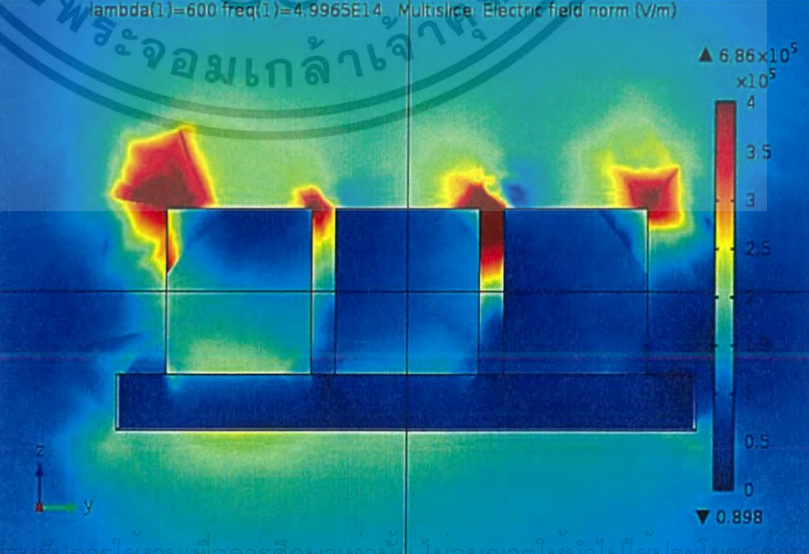
ขนาดอนุภาค 20x20x20 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.233 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.7×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.677 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.68×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.107 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.72×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

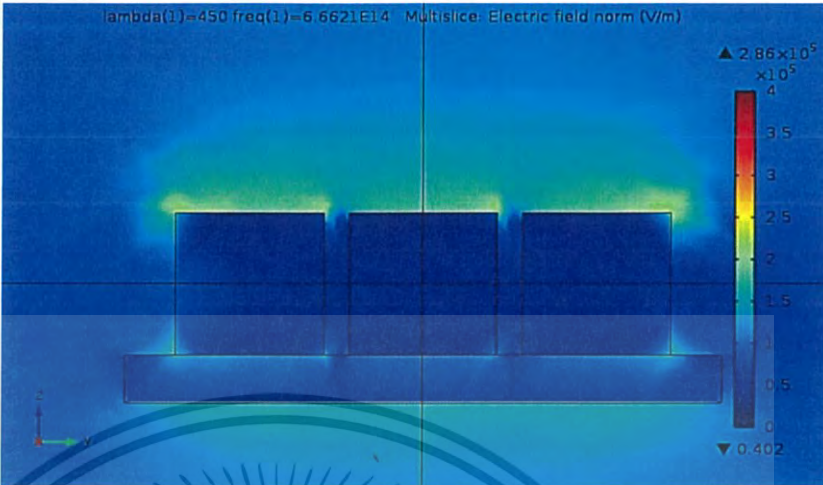

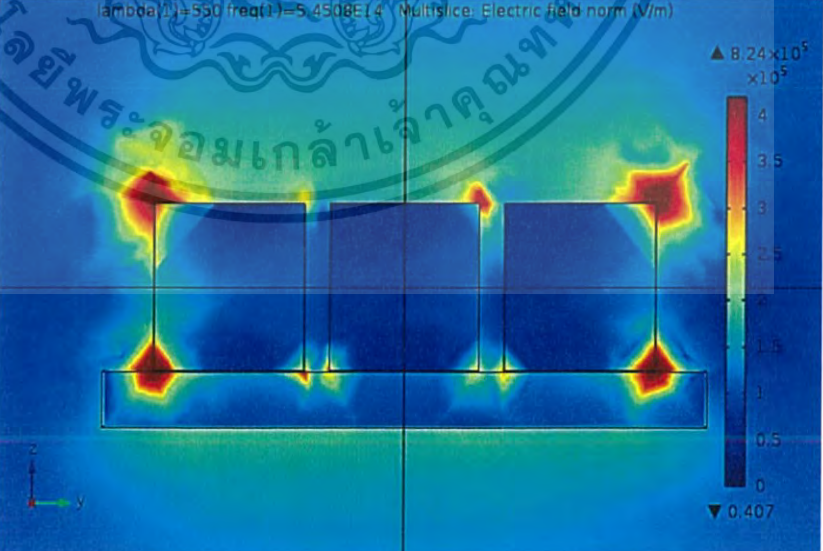
ขนาดอนุภาค 20x20x20 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.443 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.91×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=450 freq(1)=6.6621E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 2.91×10^5 $\times 10^5$ 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.443</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.341 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.86×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=500 freq(1)=5.9959E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 3.86×10^5 $\times 10^5$ 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.341</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.08 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.69×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=550 freq(1)=5.4508E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 7.69×10^5 $\times 10^5$ 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.08</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10.3 อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 30x30x30 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค 30x30x30 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.508 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.36×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.73 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.83×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.898 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 6.86×10^5 V/m 	

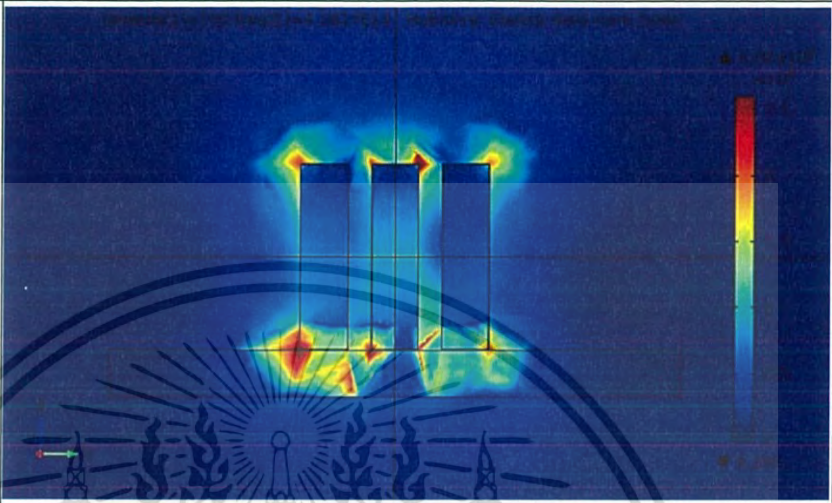

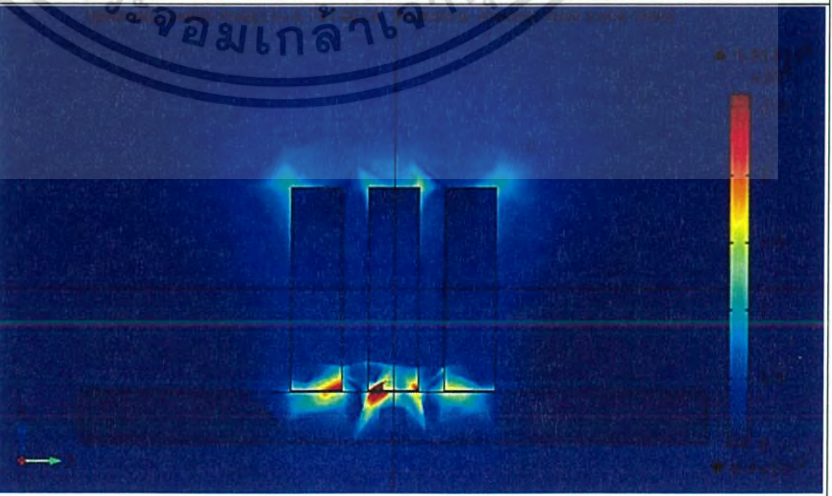
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาค 30x30x30 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.402 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.86×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.133 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.61×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.407 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.24×10^5 V/m 	

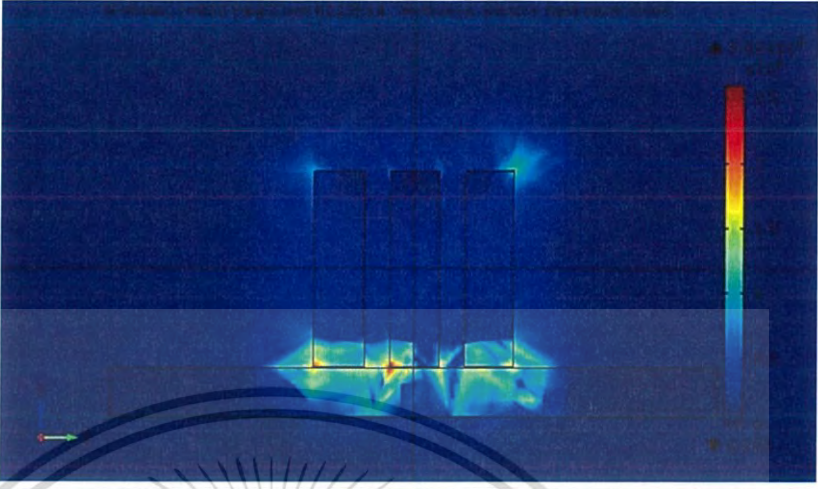
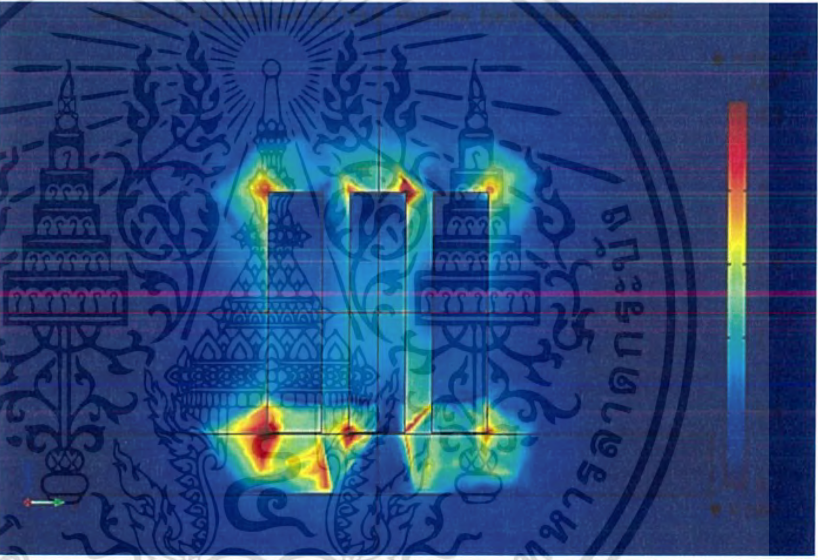
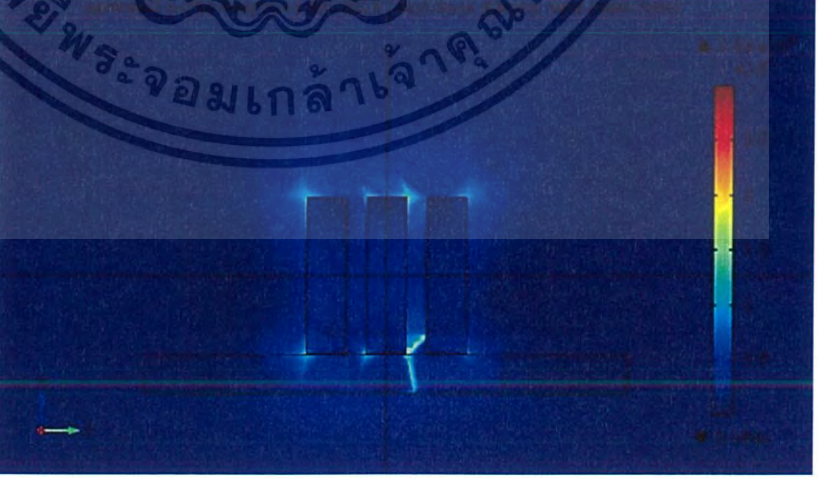
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลภาพกรณีนีออนูภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

4.11.1 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 10x10x40 นาโนเมตร

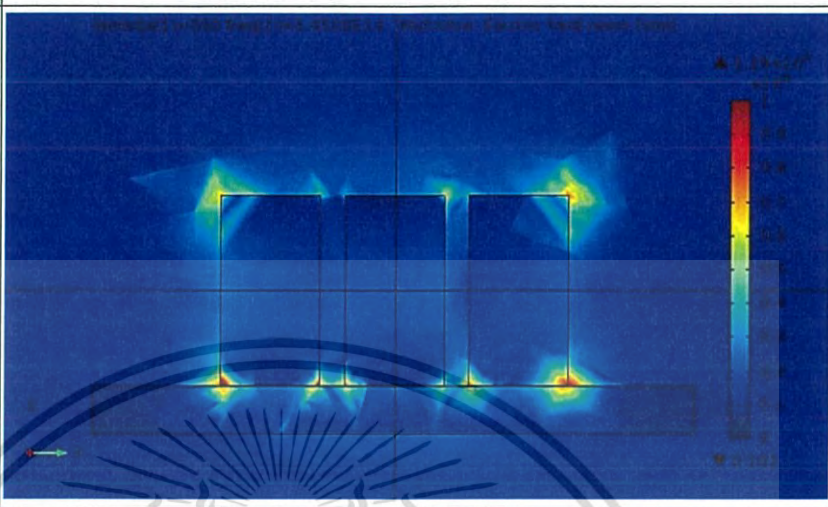
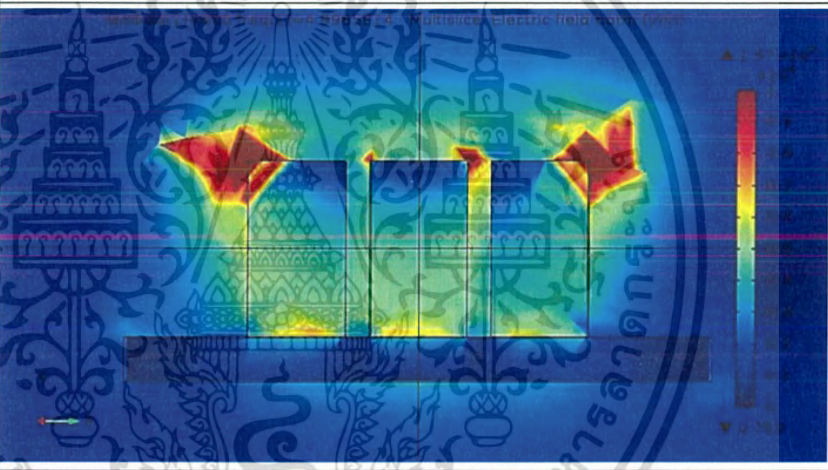
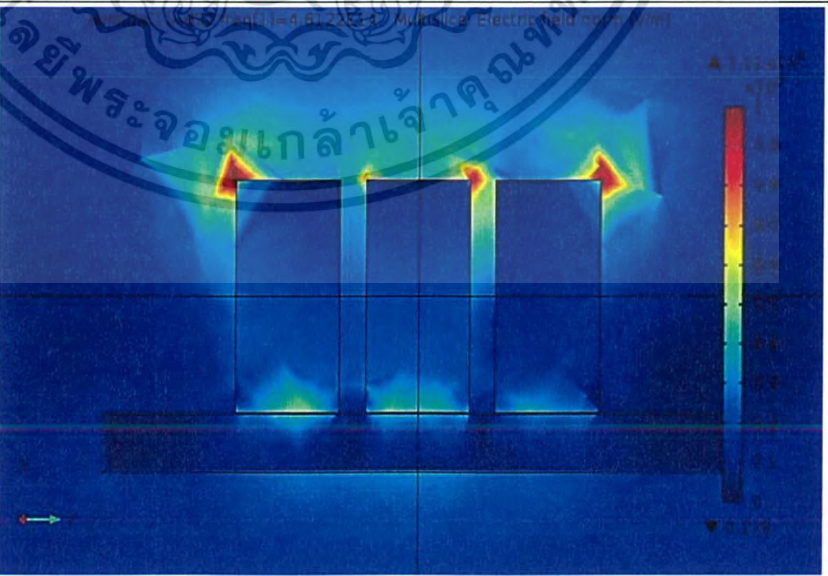
ขนาดอนุภาค 10x10x40 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.285 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.05×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 750 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0532 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.37×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 800 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 8.4×10^{-3} V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.49×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

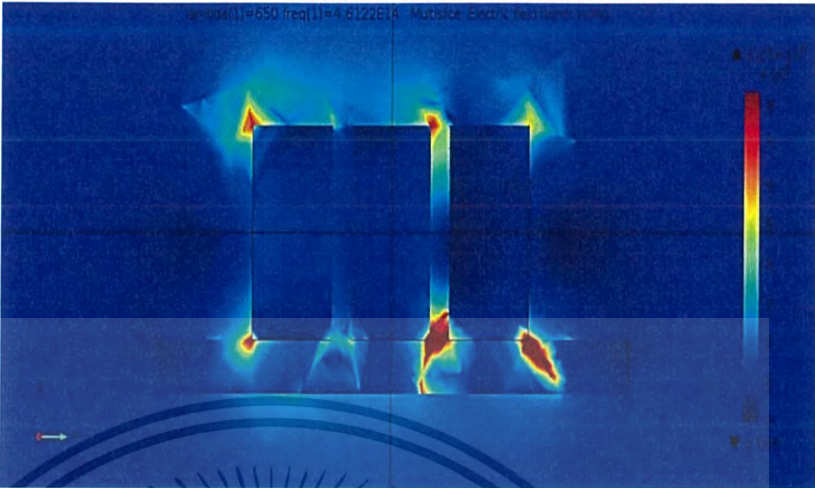

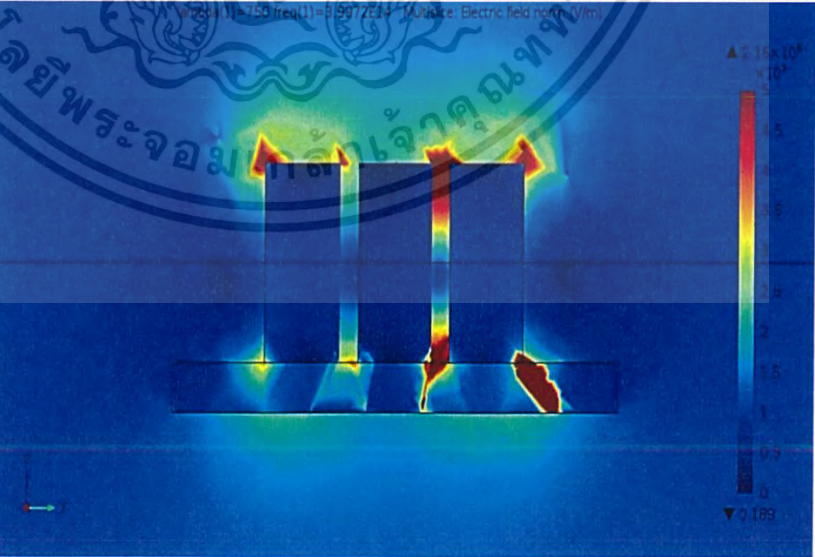
ขนาดอนุภาค 10x10x40 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่น ที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.107 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 3.02×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่น ที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.285 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 3.05×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่น ที่ 750 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.0461 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.99×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11.2 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 20x20x40 นาโนเมตร

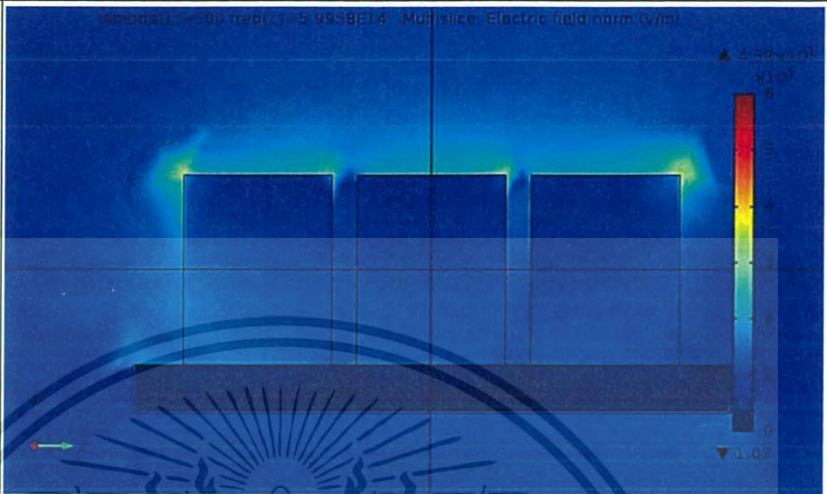

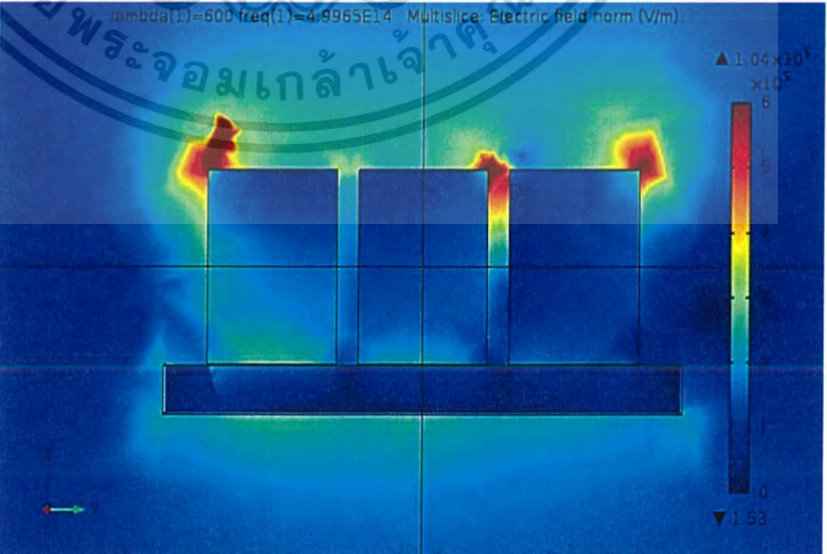
ขนาดอนุภาค 20x20x40 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.101 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.29×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.763 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.97×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.278 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.11×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

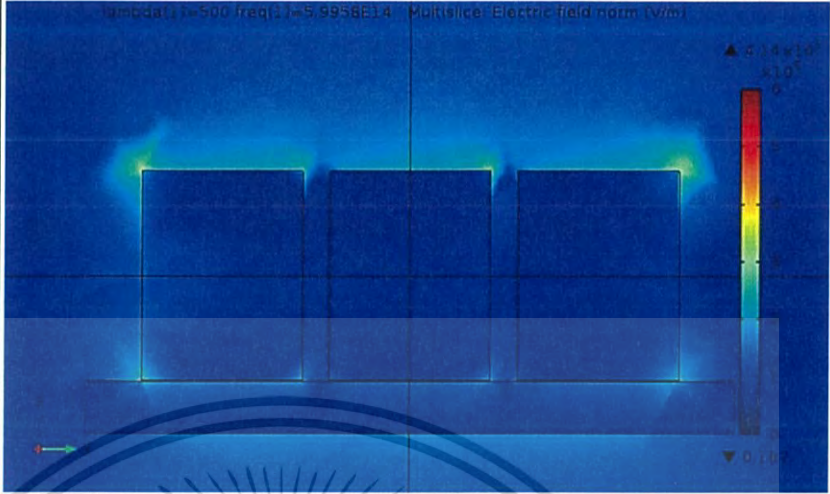
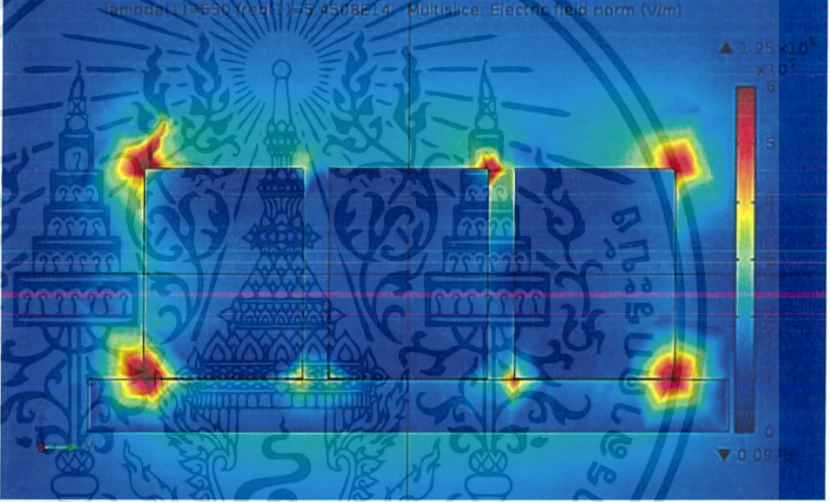
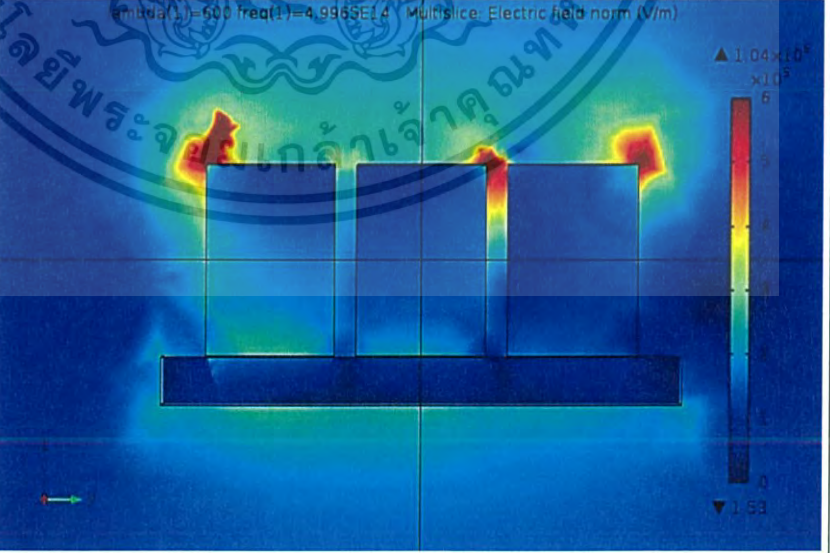
ขนาดอนุภาค 20x20x40 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.036 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.25×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.579 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.49×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 750 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.189 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.16×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11.3 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 30x30x40 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค 30x30x40 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.07 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.58×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 2.71 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.04×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.53 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.04×10^6 V/m 	

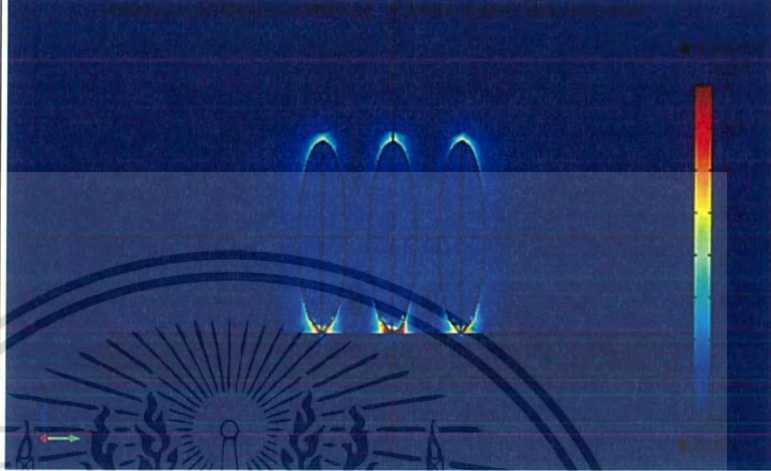
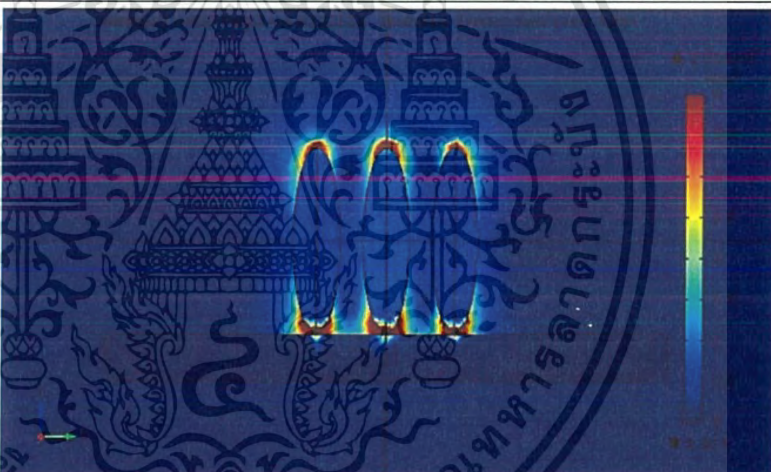
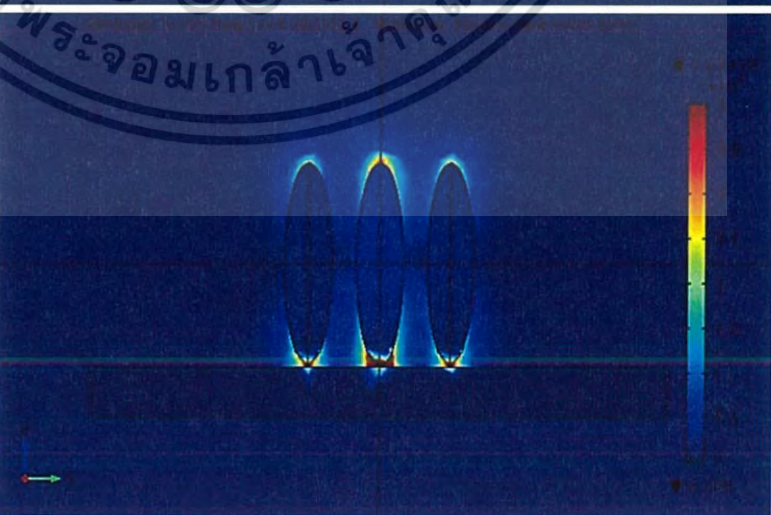
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาค 30x30x40 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.162 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.14×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0975 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.25×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.53 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.04×10^6 V/m 	

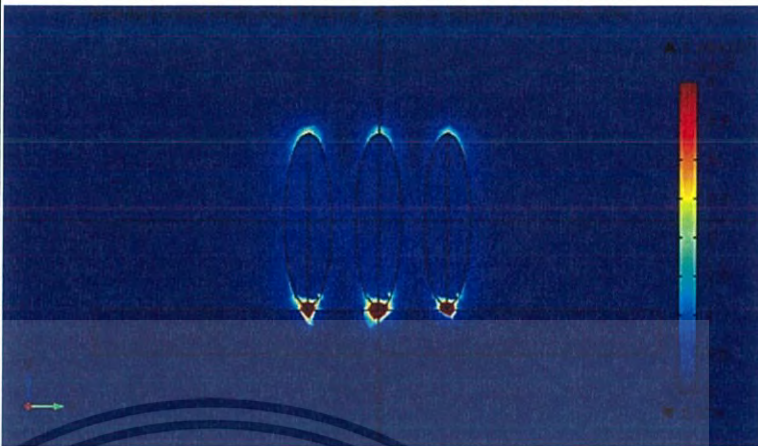

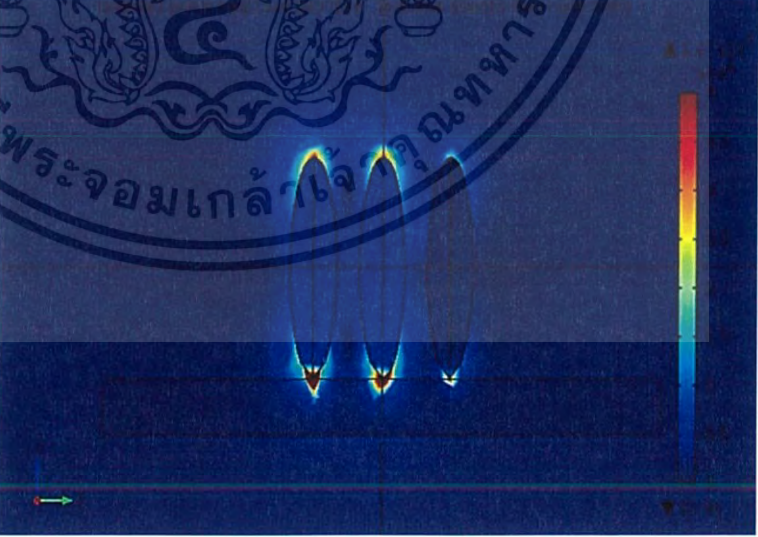
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงวงรี ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

4.12.1 อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 10 นาโนเมตร, แกนนอน 40 นาโนเมตร)

<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 10 นาโนเมตร ▪ แกนนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.307 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 8.53×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.313 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.02×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.123 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.12×10^7 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

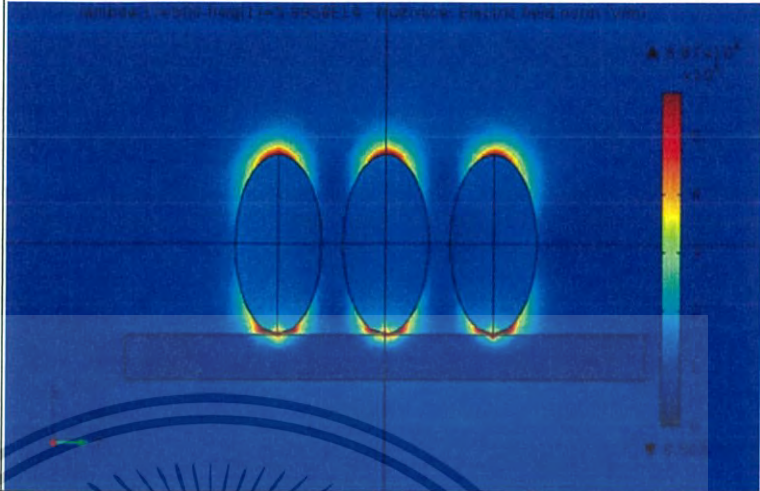
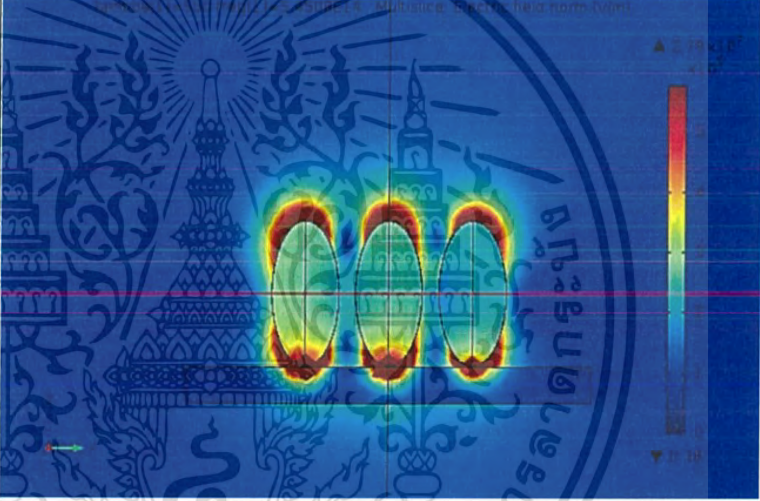
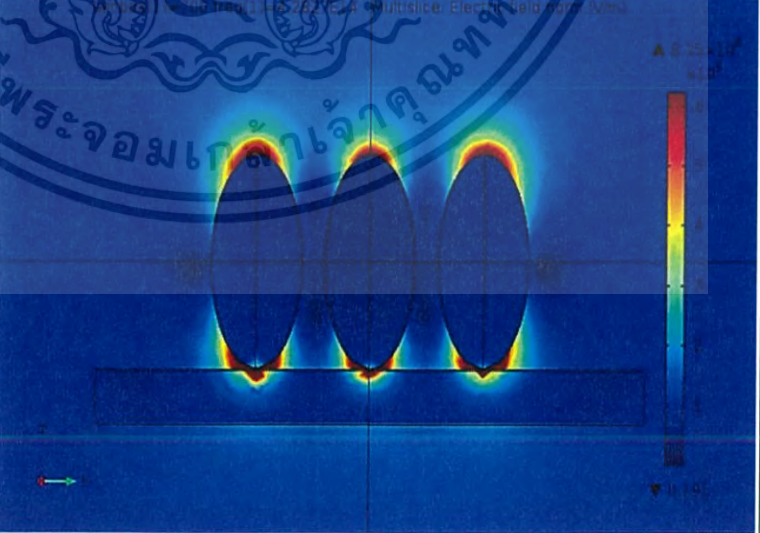
<ul style="list-style-type: none"> ▪ แขนตั้ง 10 นาโนเมตร ▪ แขนนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.274 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.29×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.191 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 3.49×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.195 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.17×10^7 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12.2 อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 20 นาโนเมตร, แขนงนอน 40 นาโนเมตร)

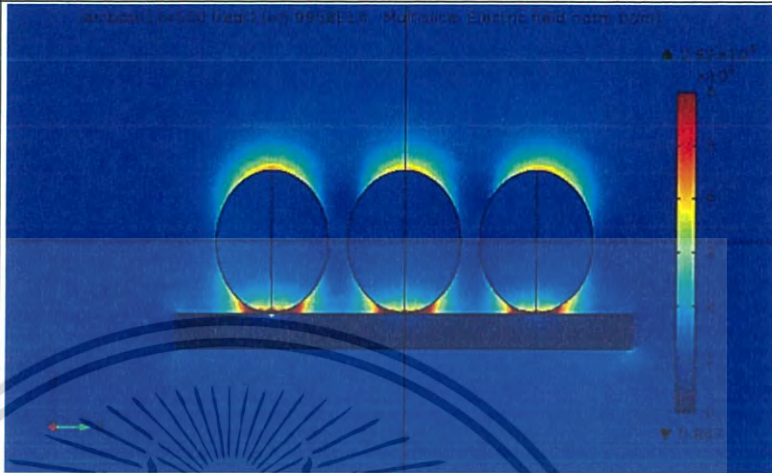
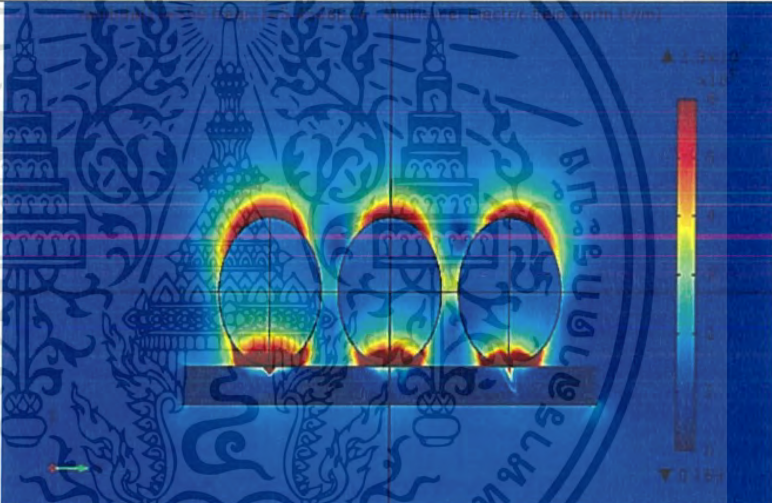
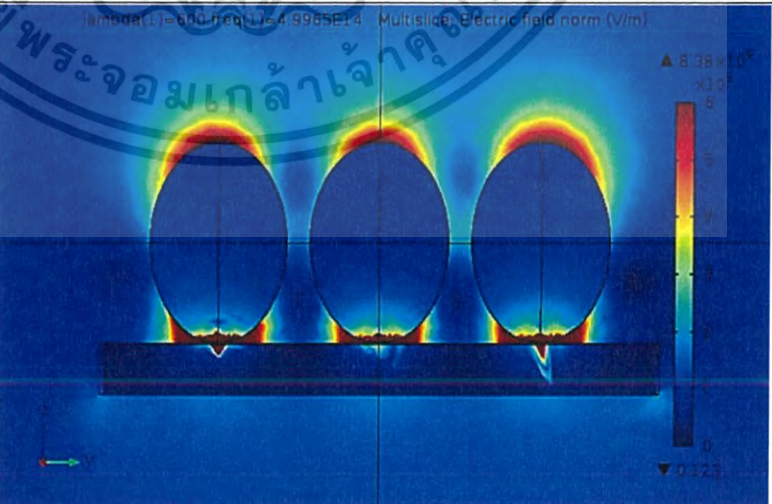
<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 20 นาโนเมตร ▪ แขนงนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.342 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.45×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.674 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.50×10^8 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.205 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 9.38×10^7 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

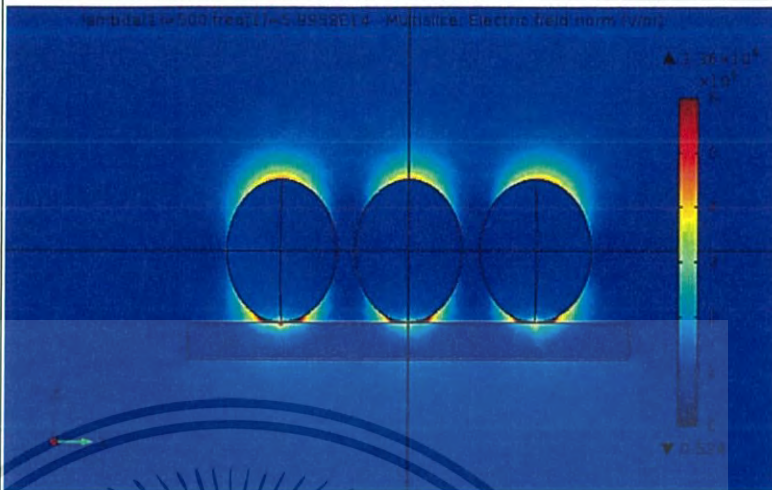
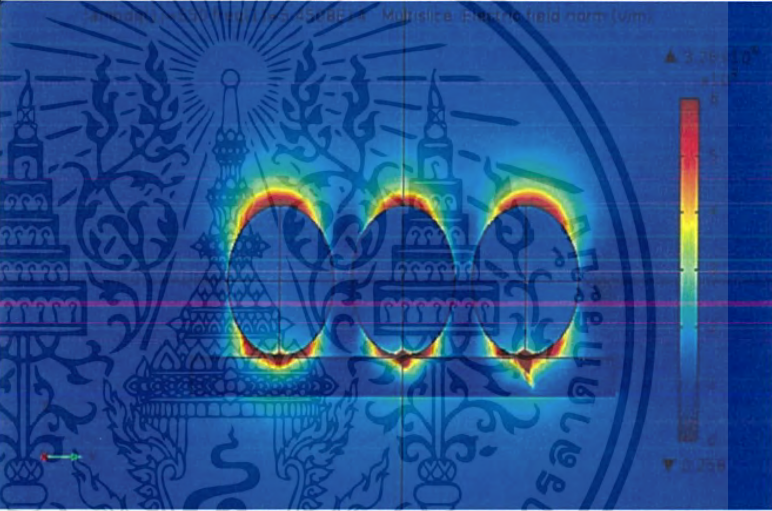
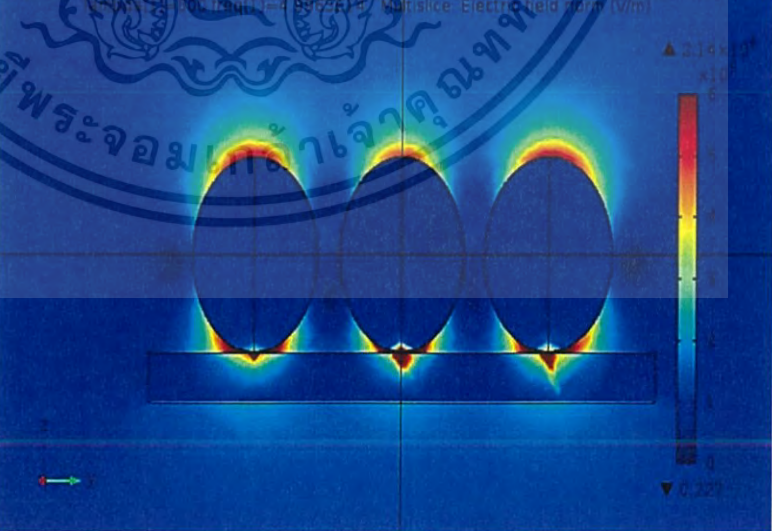
<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 20 นาโนเมตร ▪ แกนนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.502 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 6.87×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.36 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.79×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.191 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 8.35×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12.3 อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 30 นาโนเมตร, แขนงนอน 40 นาโนเมตร)

<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 30 นาโนเมตร ▪ แขนงนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.847 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.82×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.163 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.30×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.123 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 8.38×10^6 V/m 	

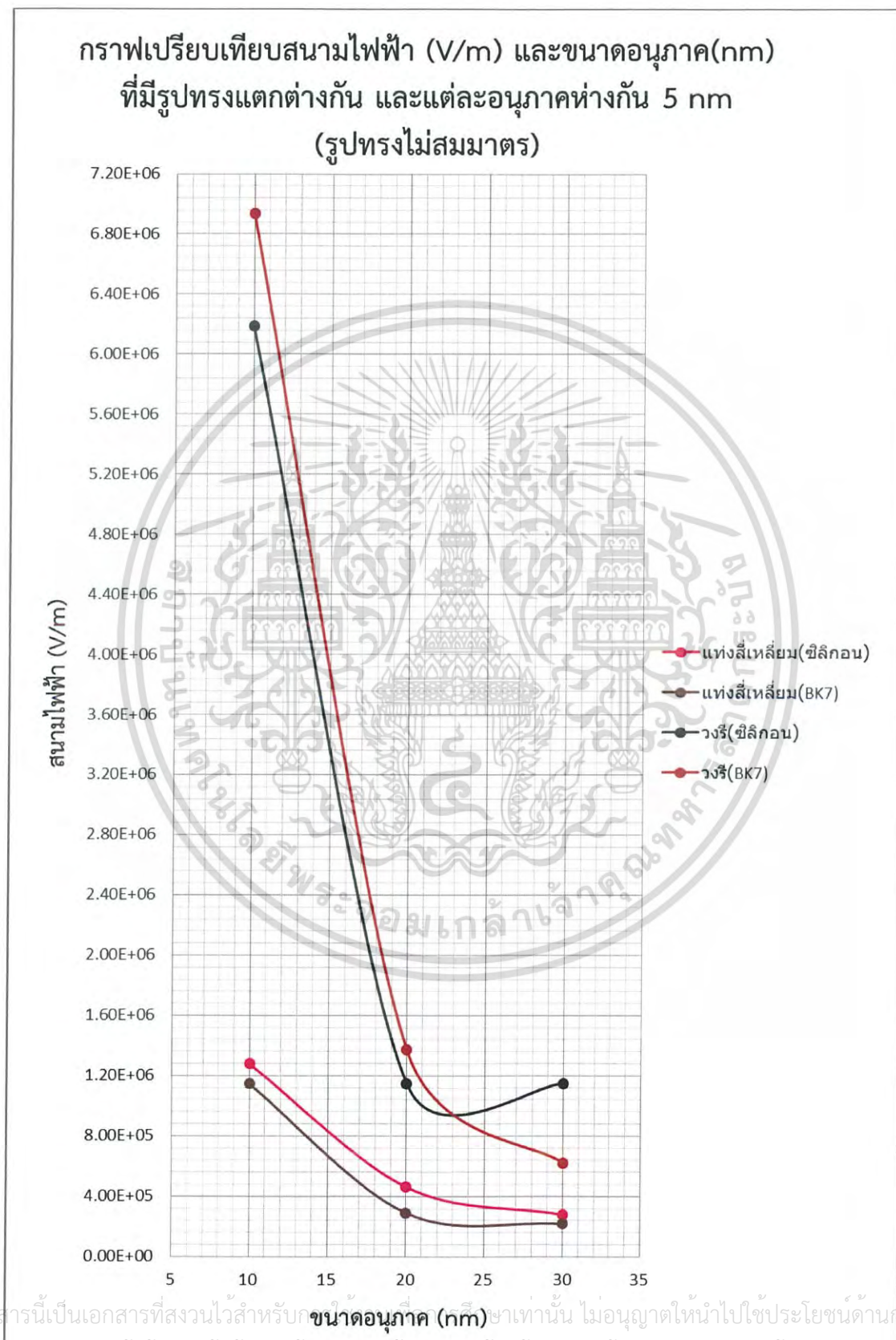
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<ul style="list-style-type: none"> ▪ แคนตั้ง 30 นาโนเมตร ▪ แคนนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.524 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.36×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.258 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.26×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.227 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.14×10^6 V/m 	

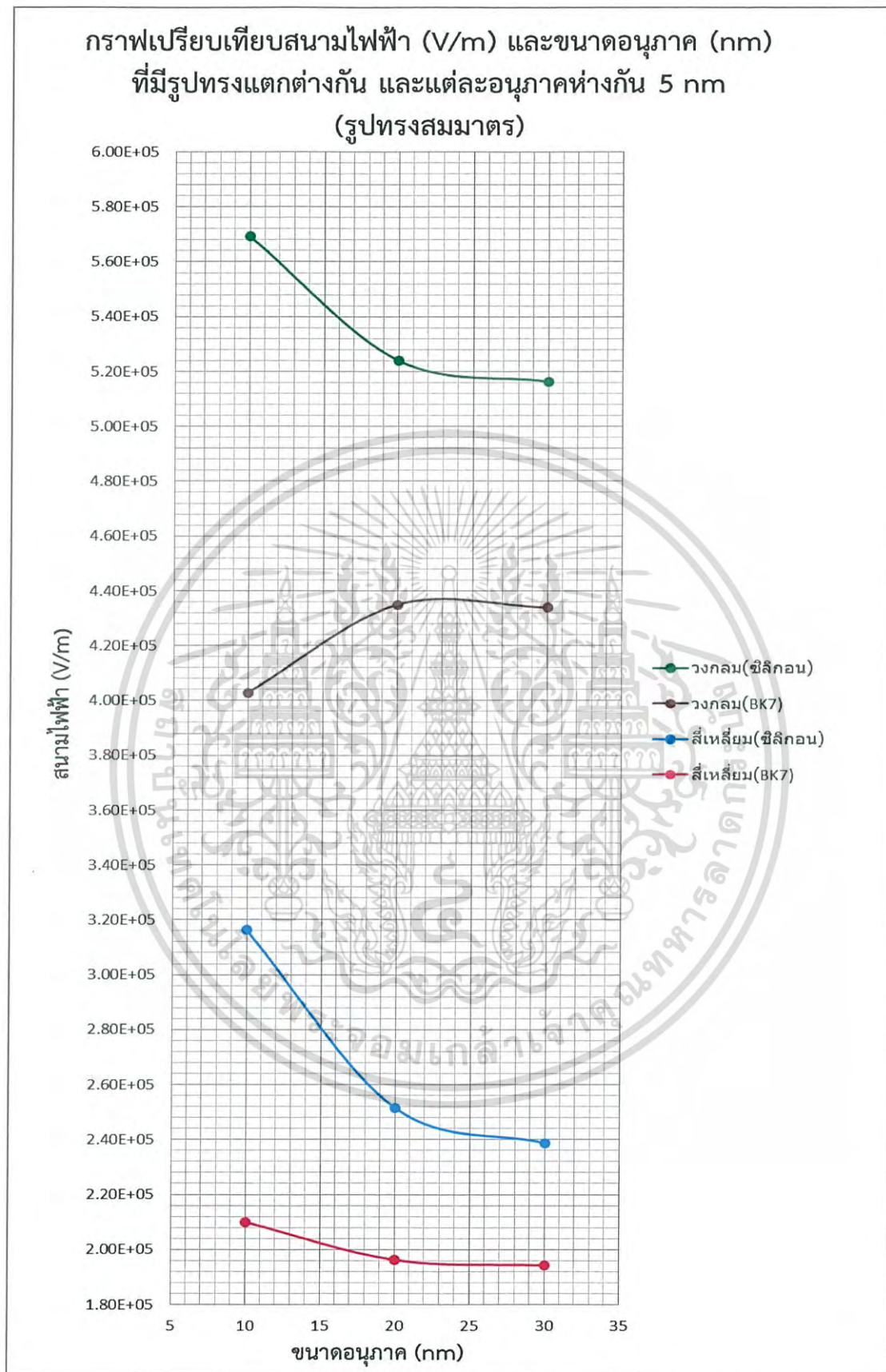
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 สรุปการวิเคราะห์ผลที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร

4.13.1 กราฟรวมของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่มีรูปทรงและขนาดต่างกัน



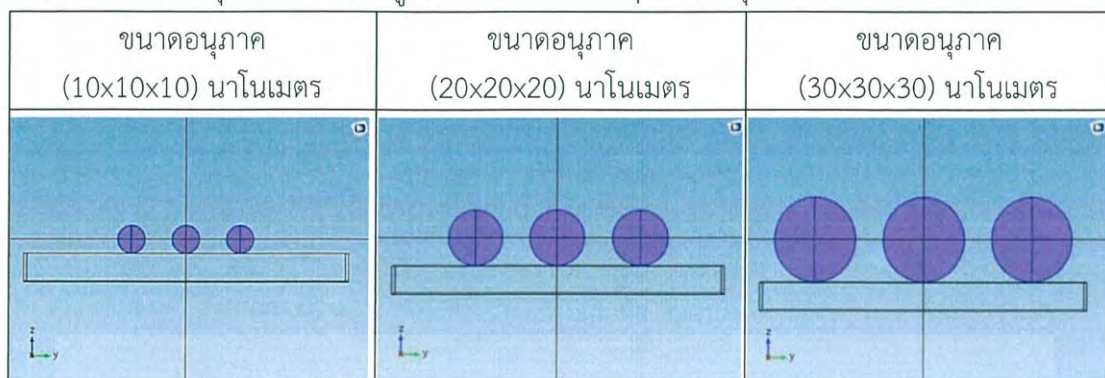
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



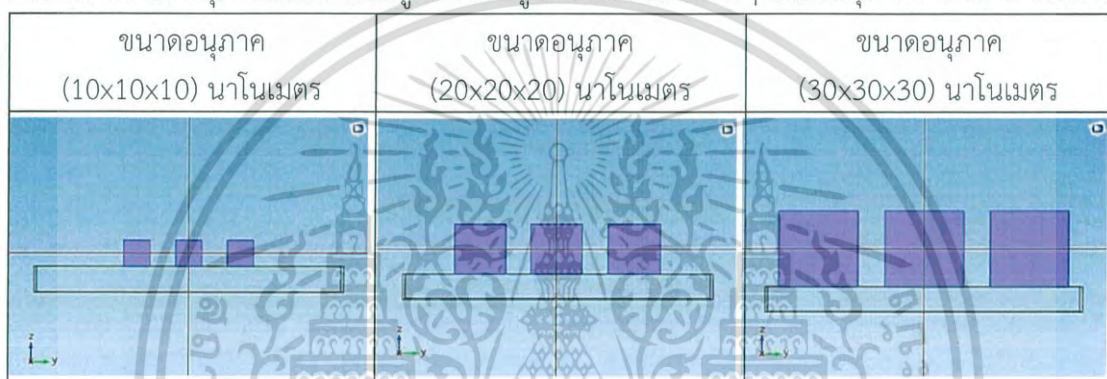
รูปที่ 4.11 กราฟรวมของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่มีรูปทรงและขนาดต่าง ๆ กัน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้ เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 การออกแบบอนุภาครูปทรงต่างๆ และมีขนาดต่างๆ ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

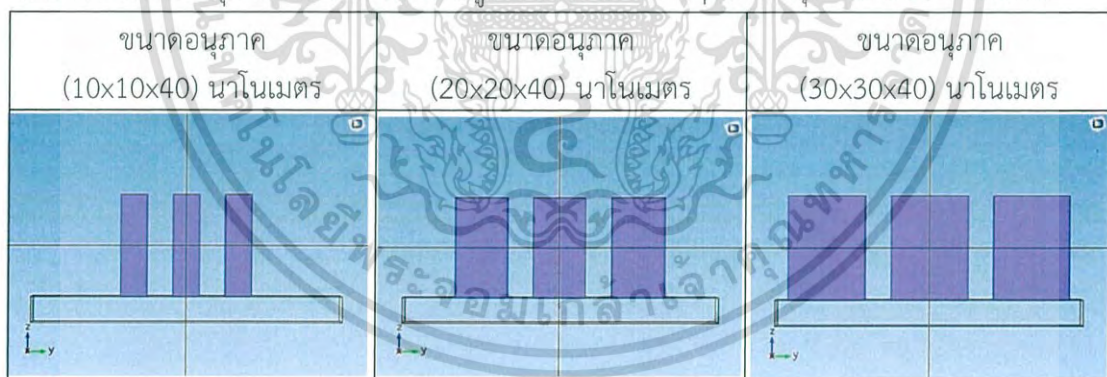
ตารางที่ 4.14.1 อนุภาคทรงกลม มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร



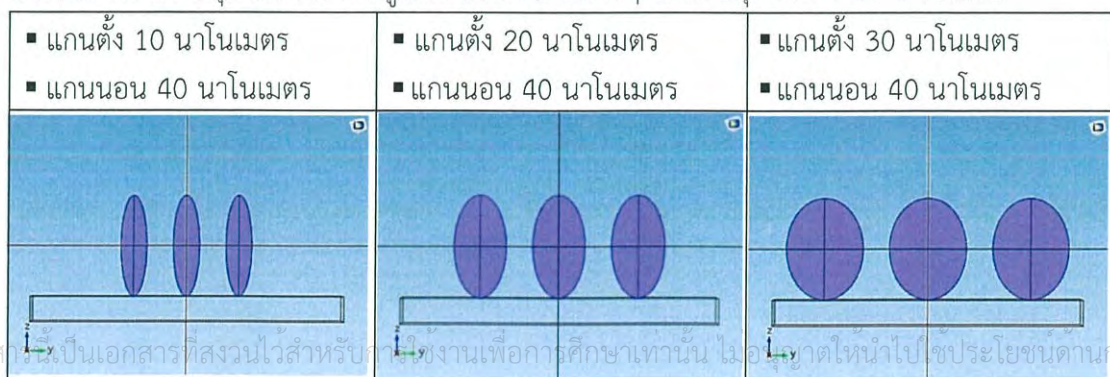
ตารางที่ 4.14.2 อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร



ตารางที่ 4.14.3 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร



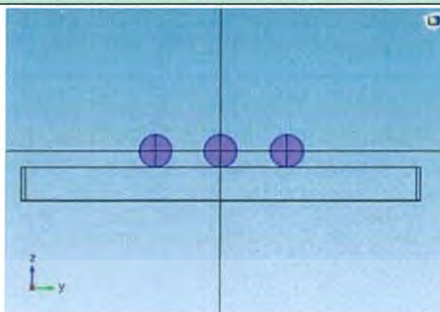
ตารางที่ 4.14.4 อนุภาคทรงวงรี มีรูปทรงและขนาดต่างๆ แต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร



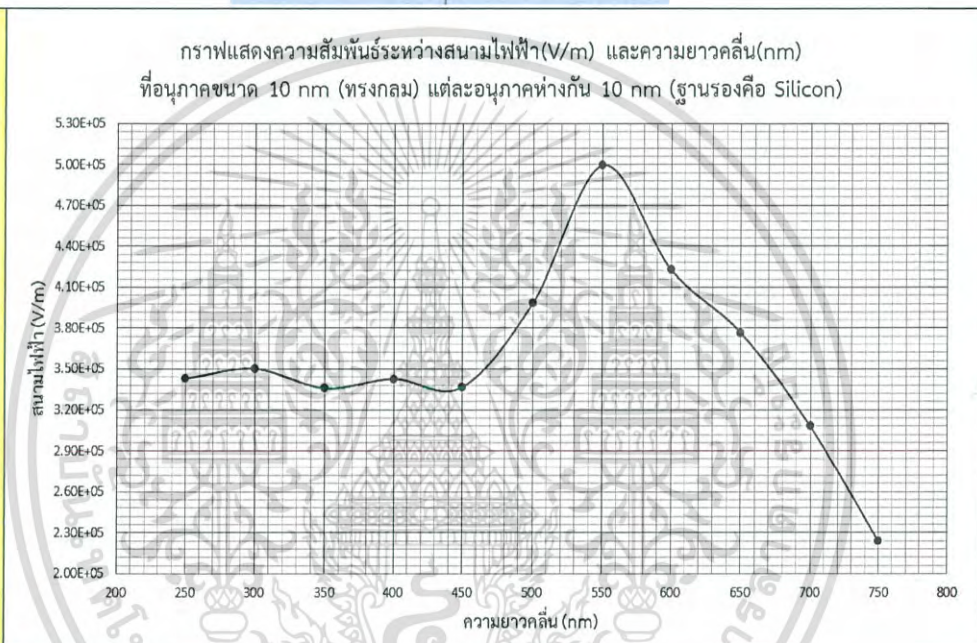
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลกราฟกรณีอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

อนุภาคทรงกลม ขนาด 10x10x10 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



กรณีที่ 1
ฐานรอง silicon

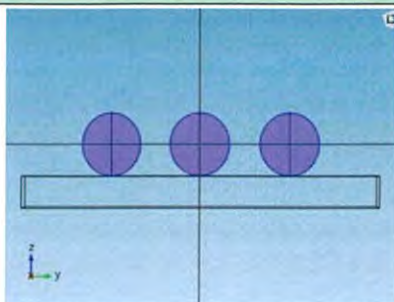


กรณีที่ 2
ฐานรอง BK-7



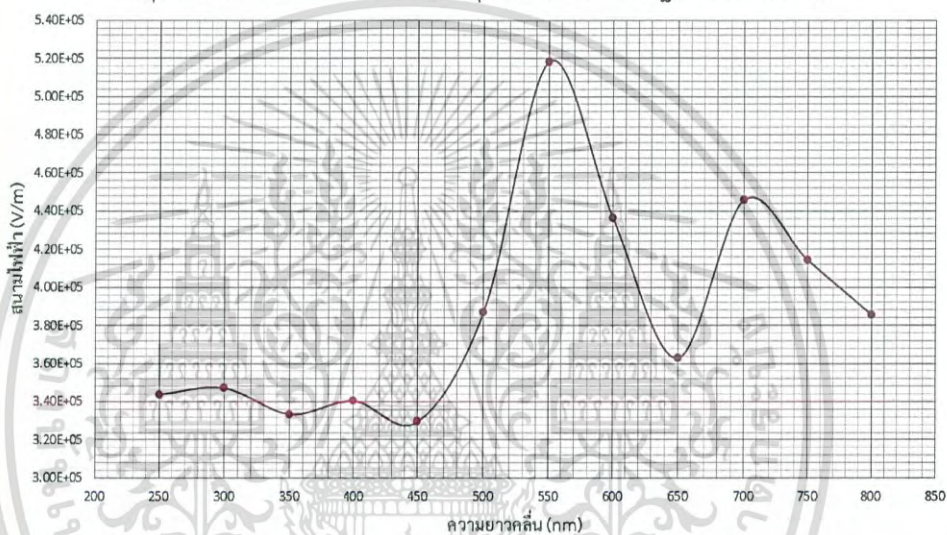
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคทรงกลม ขนาด 20x20x20 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



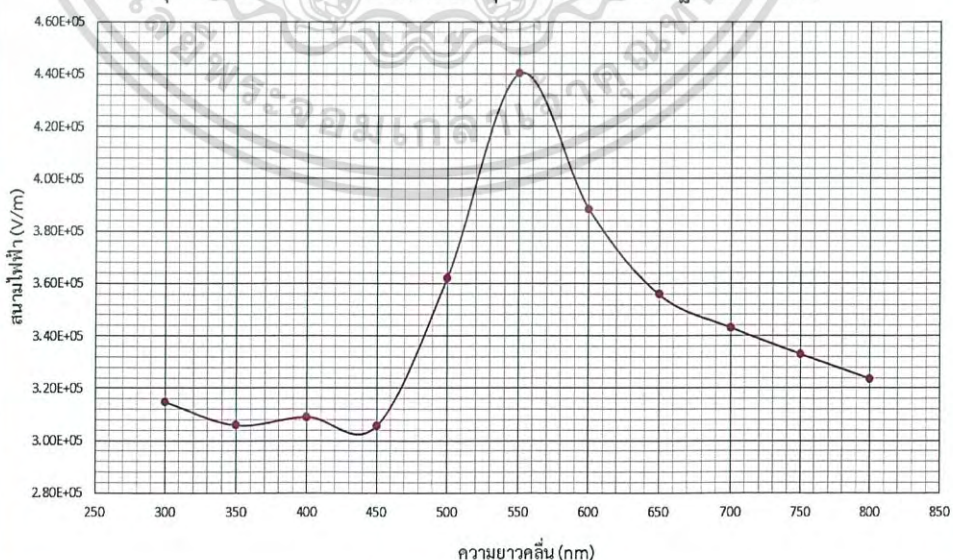
กรณีที่ 3
ฐานรอง
silicon

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า(V/m) และความยาวคลื่น(nm)
ที่อนุภาคขนาด 20 nm (ทรงกลม) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ Silicon)



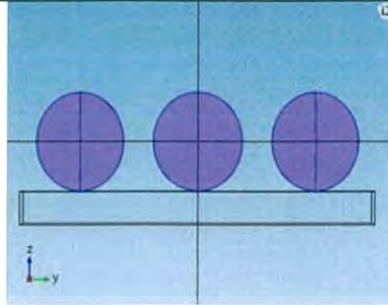
กรณีที่ 4
ฐานรอง
BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า(V/m) และความยาวคลื่น (nm)
ที่อนุภาคขนาด 20 nm (ทรงกลม) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ BK7)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

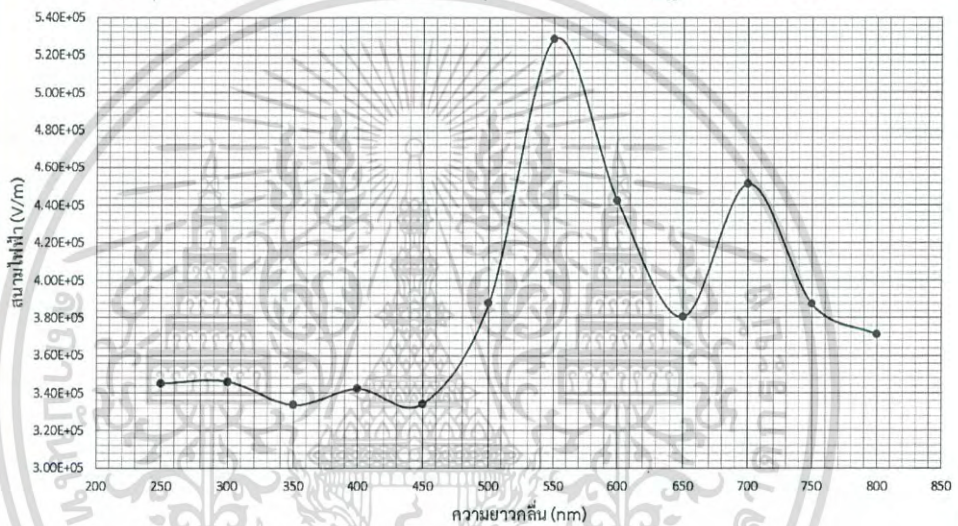
อนุภาคทรงกลม ขนาด 30x30x30 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



กรณีที่ 5

ฐานรอง
silicon

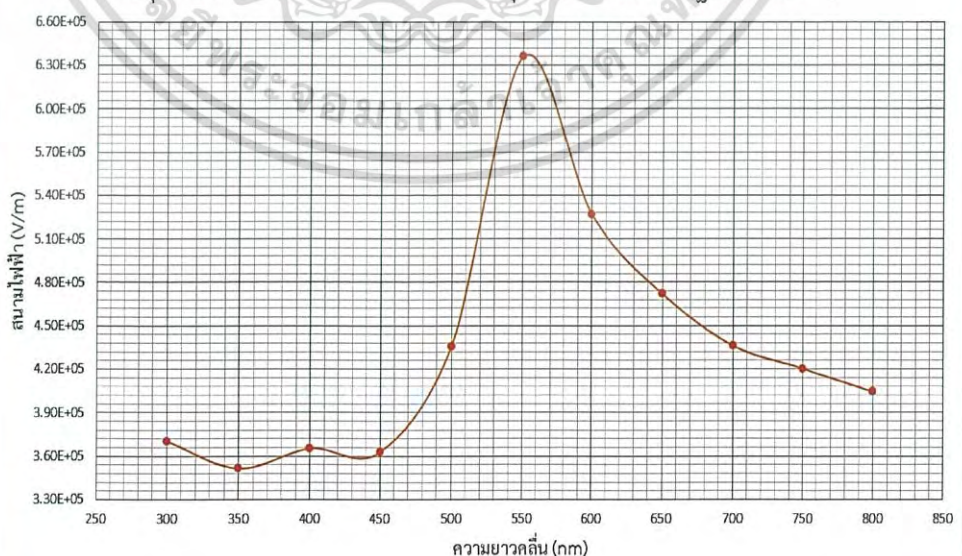
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า(V/m) และความยาวคลื่น(nm)
ที่อนุภาคขนาด 30 nm (ทรงกลม) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ Silicon)



กรณีที่ 6

ฐานรอง
BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm)
ที่อนุภาคขนาด 15x15x20 nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ BK7)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.15.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงกลม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร ในแต่ละกรณี

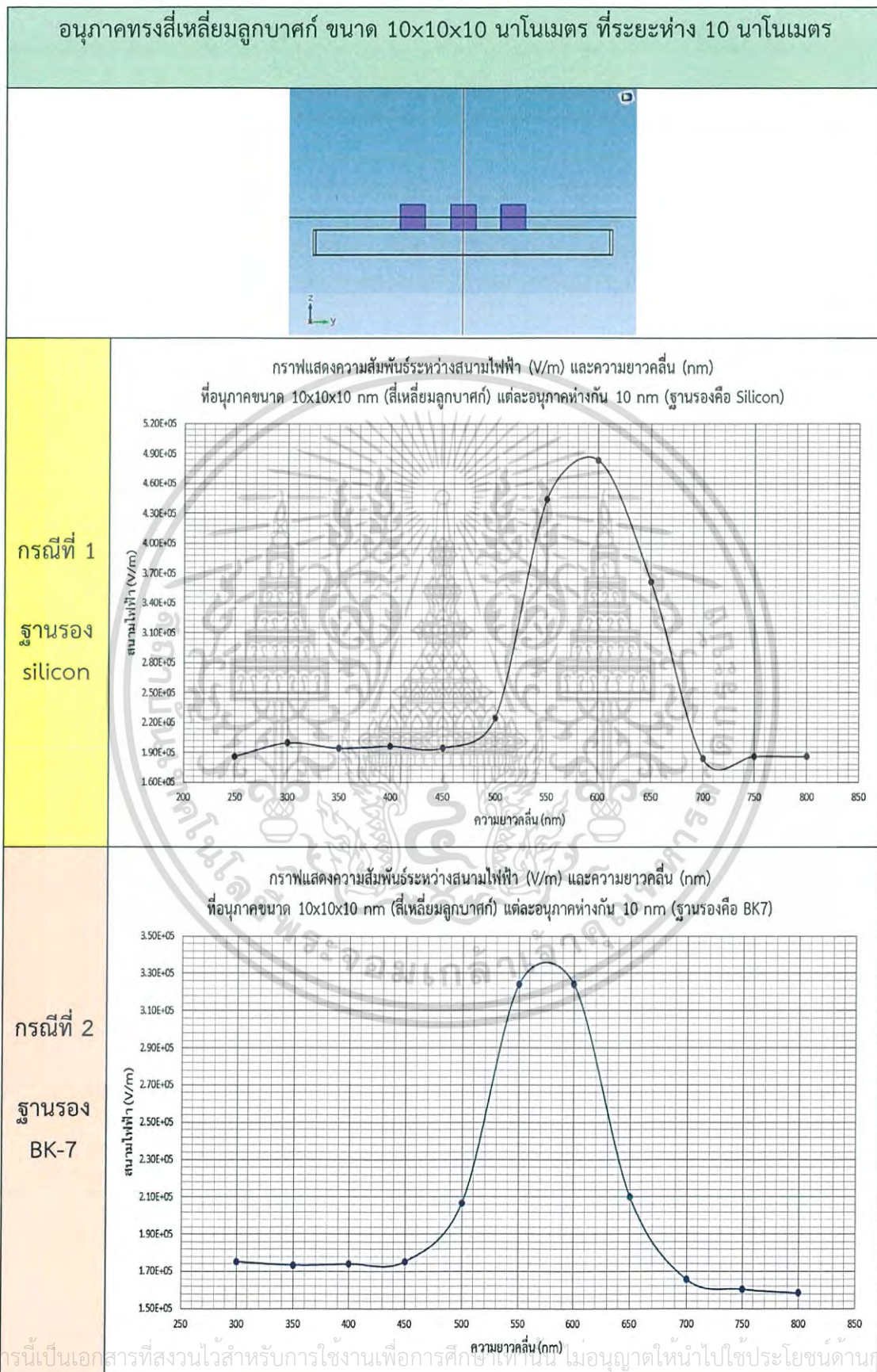
- 1) กรณีที่ 1 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-750 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.00×10^5 V/m
- 2) กรณีที่ 2 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.62×10^5 V/m
- 3) กรณีที่ 3 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.20×10^5 V/m
- 4) กรณีที่ 4 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.40×10^5 V/m
- 5) กรณีที่ 5 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.30×10^5 V/m
- 6) กรณีที่ 6 ทรงกลม ขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.40×10^5 V/m

4.15.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

- 1) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ ทรงกลม ขนาดอนุภาค (10,20,30) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 2) กรณีที่ 5 วงกลมขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.30×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
- 3) อนุภาคทรงกลมทุกขนาดที่มีฐานรองเป็น ซิลิคอน จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่า ฐานรองที่เป็น BK-7

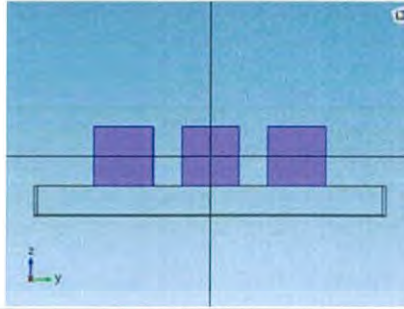
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ผลกราฟกรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



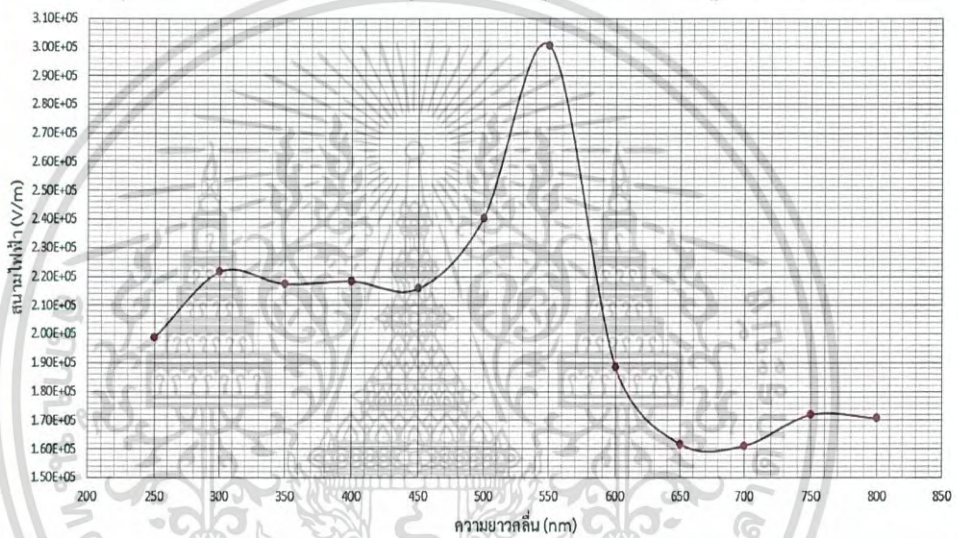
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 20x20x20 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



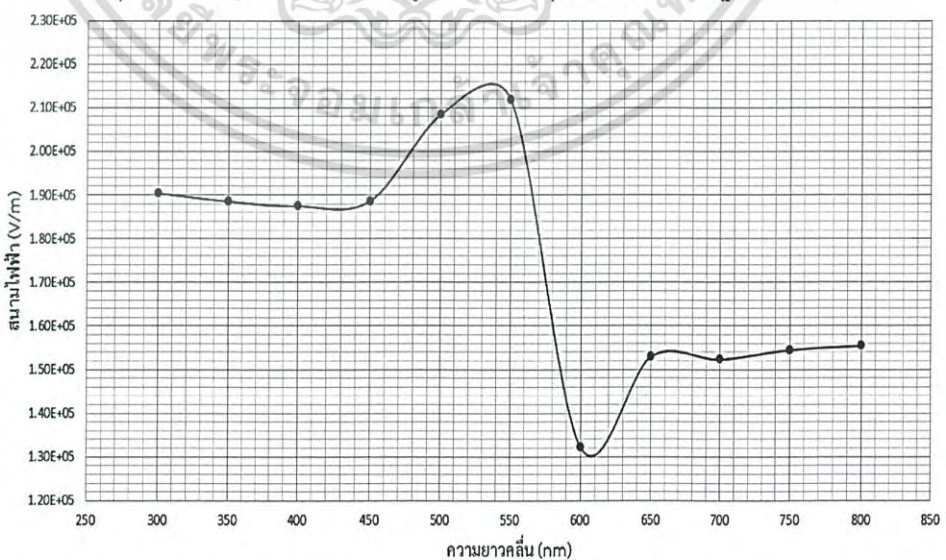
กรณีที่ 3
ฐานรอง
silicon

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm)
ที่อนุภาคขนาด 20x20x20 nm (สี่เหลี่ยมลูกบาศก์) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ Silicon)



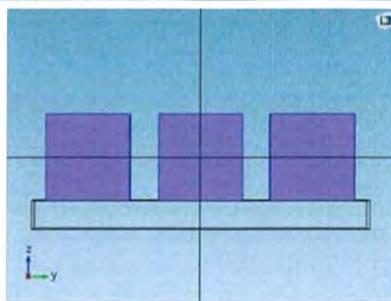
กรณีที่ 4
ฐานรอง
BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm)
ที่อนุภาคขนาด 20x20x20 nm (สี่เหลี่ยมลูกบาศก์) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ BK7)

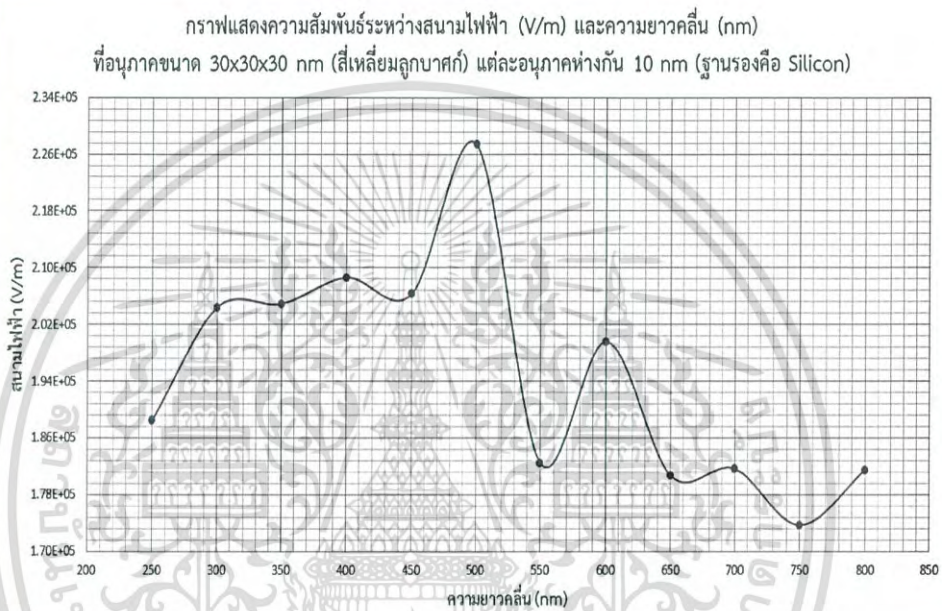


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

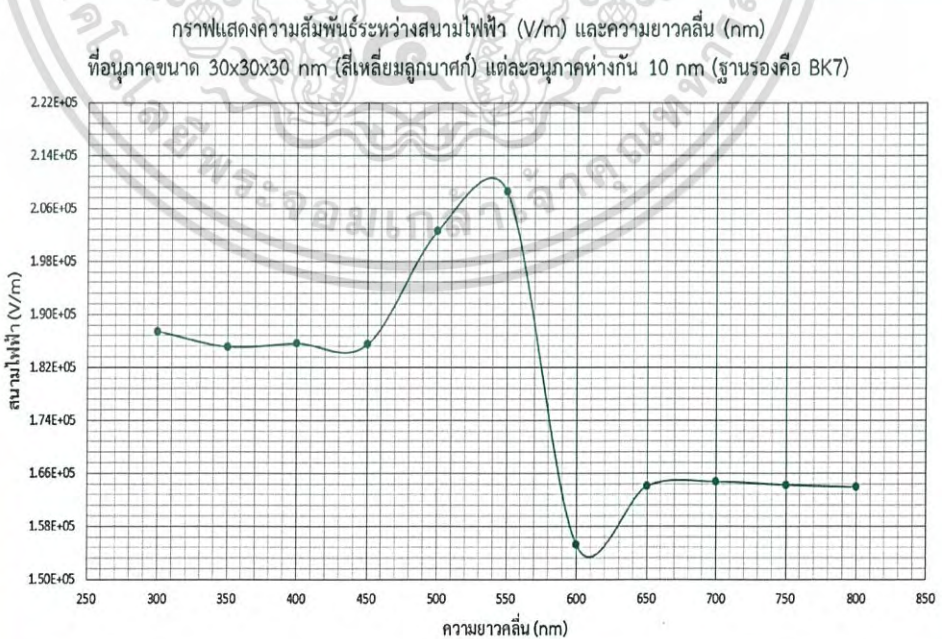
อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 30x30x30 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



กรณีที่ 5
ฐานรอง
silicon



กรณีที่ 6
ฐานรอง
BK-7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร ในแต่ละกรณี

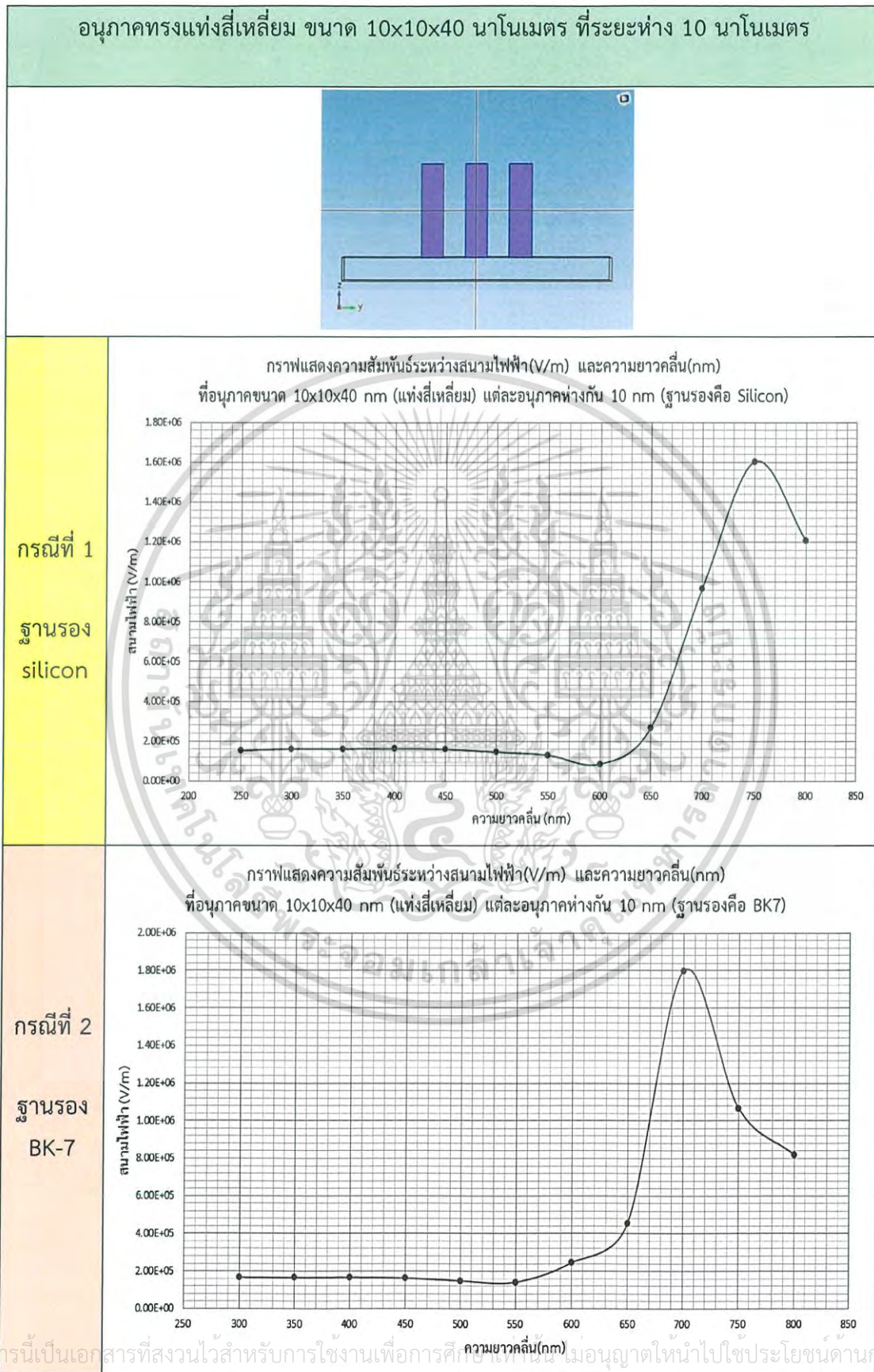
- 1) กรณีที่ 1 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $10 \times 10 \times 10$ นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.80×10^5 V/m
- 2) กรณีที่ 2 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $10 \times 10 \times 10$ นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 3.20×10^5 V/m
- 3) กรณีที่ 3 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $20 \times 20 \times 20$ นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 3.00×10^5 V/m
- 4) กรณีที่ 4 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $20 \times 20 \times 20$ นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.11×10^5 V/m
- 5) กรณีที่ 5 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $30 \times 30 \times 30$ นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.27×10^5 V/m
- 6) กรณีที่ 6 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $30 \times 30 \times 30$ นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.07×10^5 V/m

4.16.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี

- 1) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด $(20 \times 20 \times 20)$ นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 2) ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด $(10 \times 10 \times 10), (20 \times 20 \times 20), (30 \times 30 \times 30)$ นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
- 3) กรณีที่ 1 ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค $(10 \times 10 \times 10)$ นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.80×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
- 4) กราฟในกรณี 4 และ 6 มีลักษณะภาพคล้ายคลึงกัน
- 5) อนุภาคทรงกลมทุกขนาดที่ฐานรองเป็น ซิลิคอน จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่า ฐานรองที่เป็น BK-7

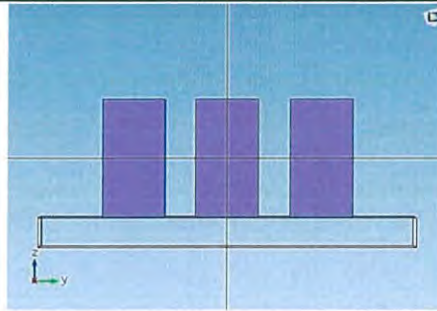
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์จะเผยแพร่บนฐานการค้นคว้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ผลกราฟกรณีอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



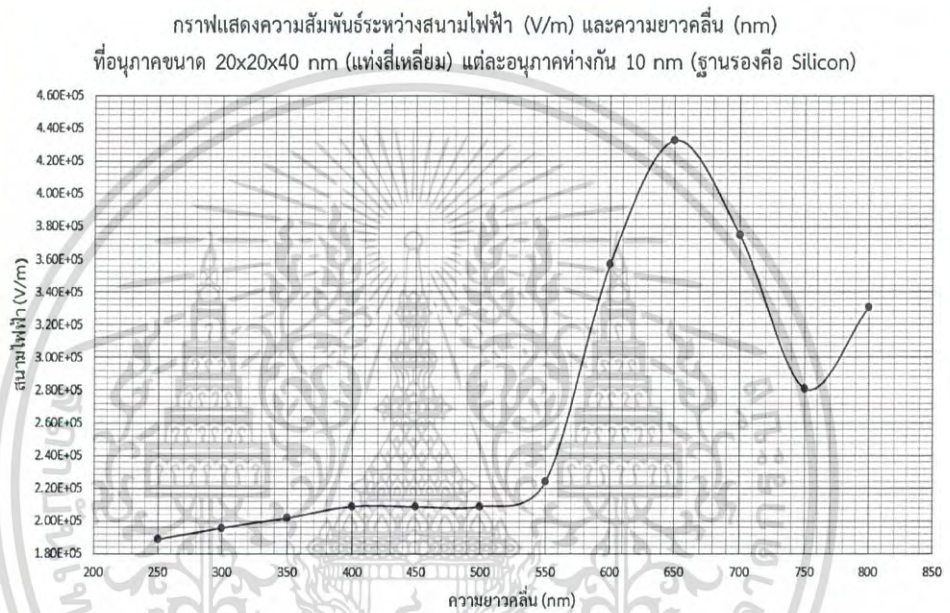
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด 20x20x40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



กรณีที่ 3

ฐานรอง
silicon



กรณีที่ 4

ฐานรอง
BK-7



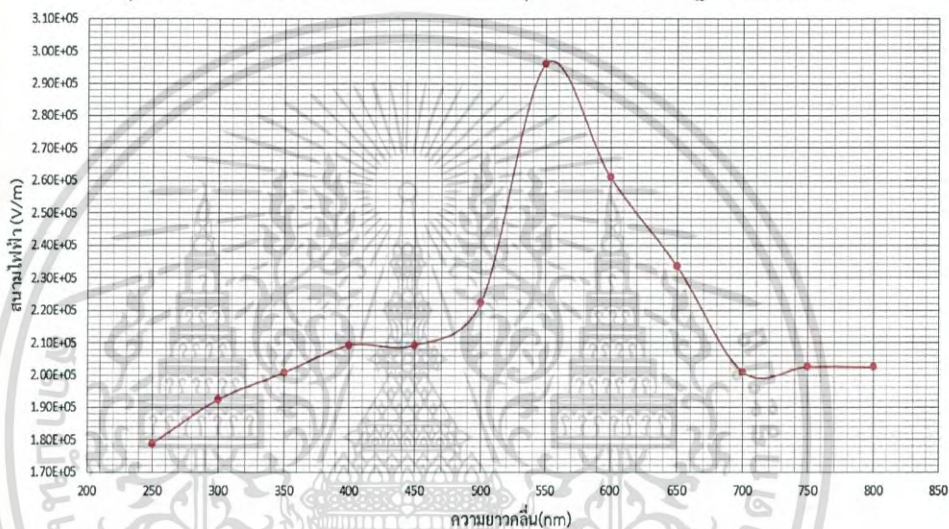
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด 30x30x40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



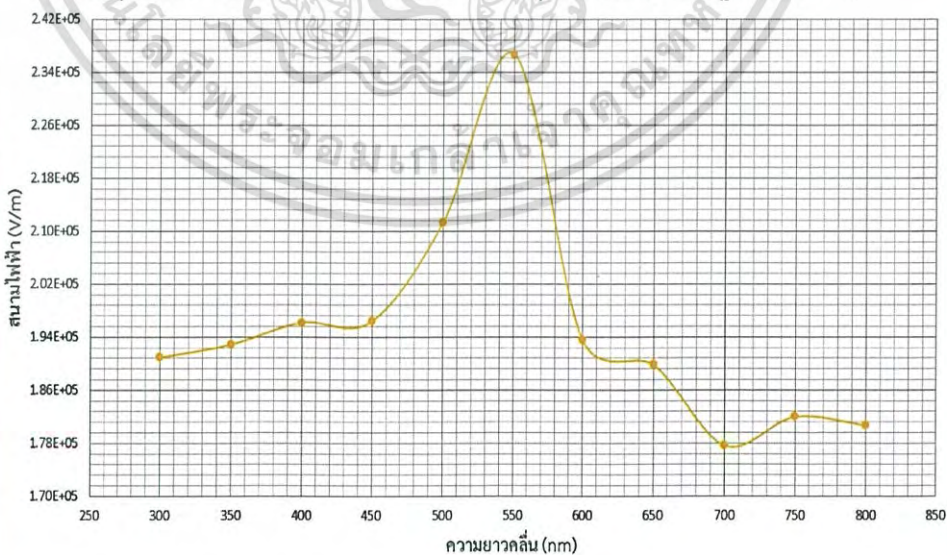
กรณีที่ 5
ฐานรอง
silicon

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า(V/m) และความยาวคลื่น(nm) ที่อนุภาคขนาด 30x30x40 nm (แท่งสี่เหลี่ยม) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ Silicon)



กรณีที่ 6
ฐานรอง
BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า(V/m) และความยาวคลื่น(nm) ที่อนุภาคขนาด 30x30x40 nm (แท่งสี่เหลี่ยม) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ BK7)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.17.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร ในแต่ละกรณี

- 1) กรณีที่ 1 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (10×10×40) นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.60×10^6 V/m
- 2) กรณีที่ 2 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (10×10×40) นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.81×10^6 V/m
- 3) กรณีที่ 3 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (20×20×40) นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.40×10^5 V/m
- 4) กรณีที่ 4 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (20×20×40) นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 3.00×10^5 V/m
- 5) กรณีที่ 5 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (30×30×40) นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.95×10^5 V/m
- 6) กรณีที่ 6 ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (30×30×40) นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 2.40×10^5 V/m

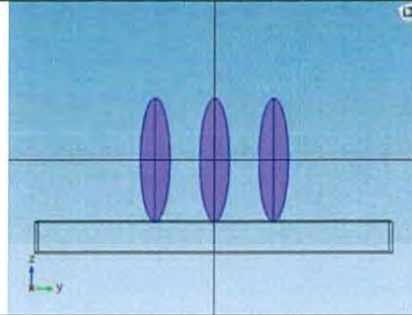
4.17.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี

- 1) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด (20×20×40) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 2) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด (30×30×40) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 3) กรณีที่ 2 แท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (10×10×40) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.81×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)

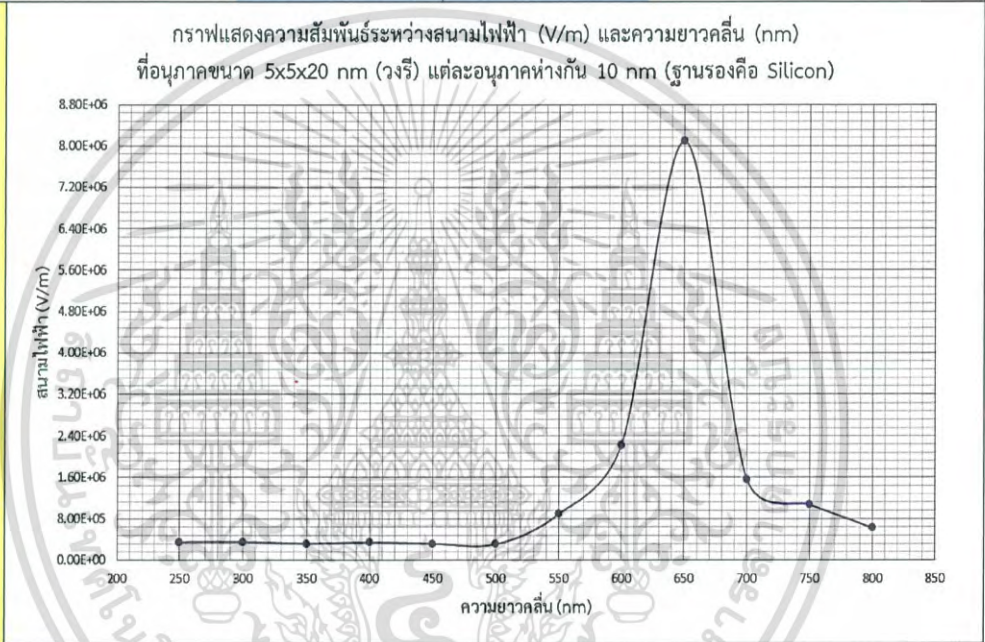
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ผลกราฟกรณีอนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

อนุภาคทรงวงรี แกนตั้ง 10 นาโนเมตร , แกนนอน 40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



กรณีที่ 1
ฐานรอง silicon

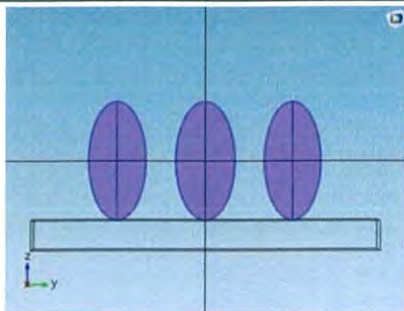


กรณีที่ 2
ฐานรอง BK-7



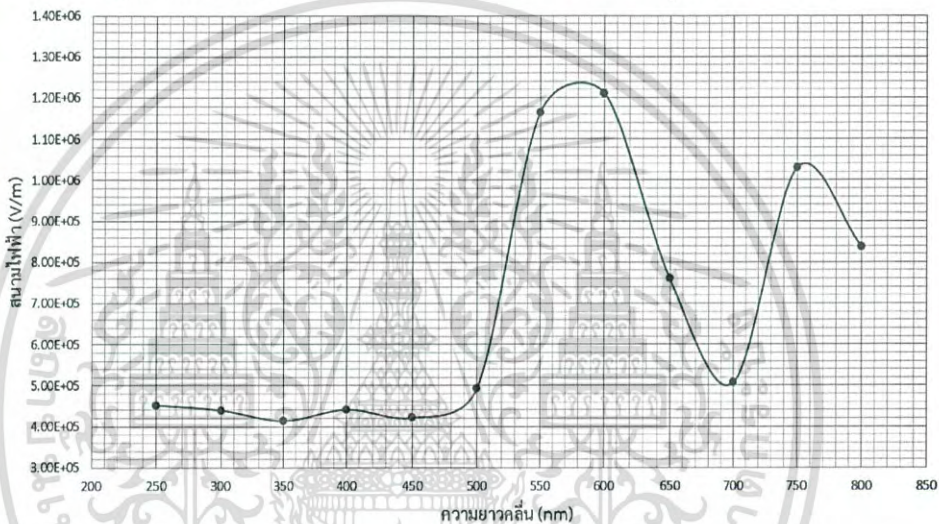
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาความยาวคลื่น (nm) มอนูญาติไหนไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคทรงวงรี แกนตั้ง 20 นาโนเมตร , แกนนอน 40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



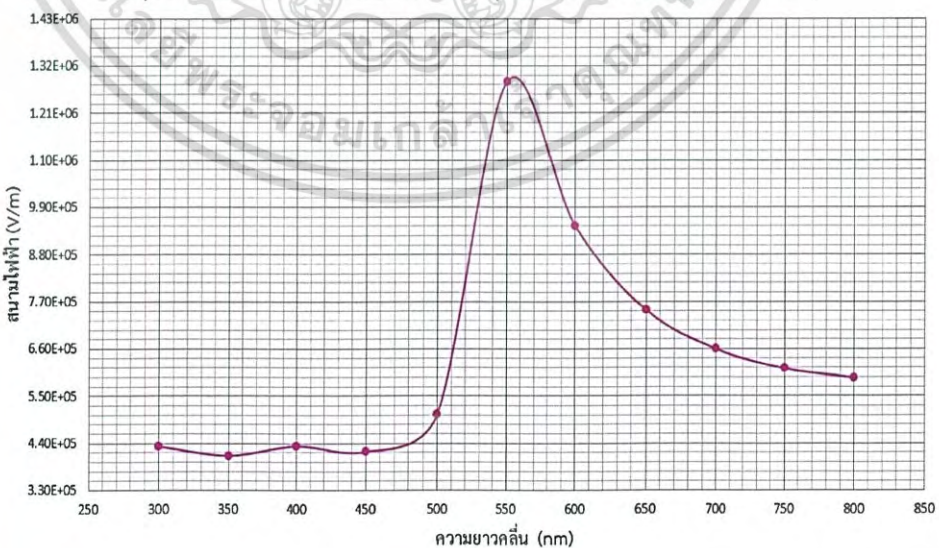
กรณีที่ 3
ฐานรอง silicon

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm) ที่อนุภาคขนาด 10x10x20 nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ Silicon)



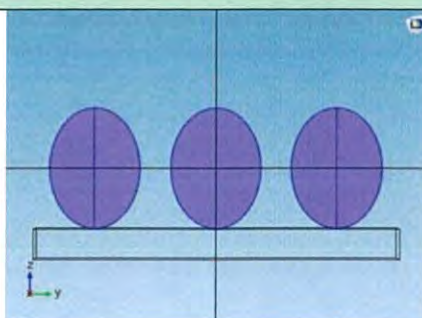
กรณีที่ 4
ฐานรอง BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm) ที่อนุภาคขนาด 10x10x20 nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ BK7)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

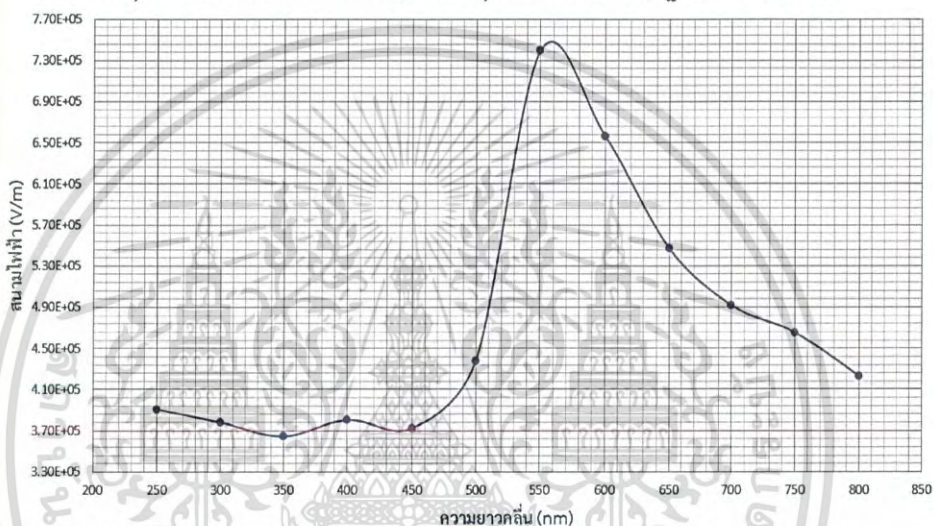
อนุภาคทรงวงรี แกนตั้ง 30 นาโนเมตร , แกนนอน 40 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



กรณีที่ 5

ฐานรอง
silicon

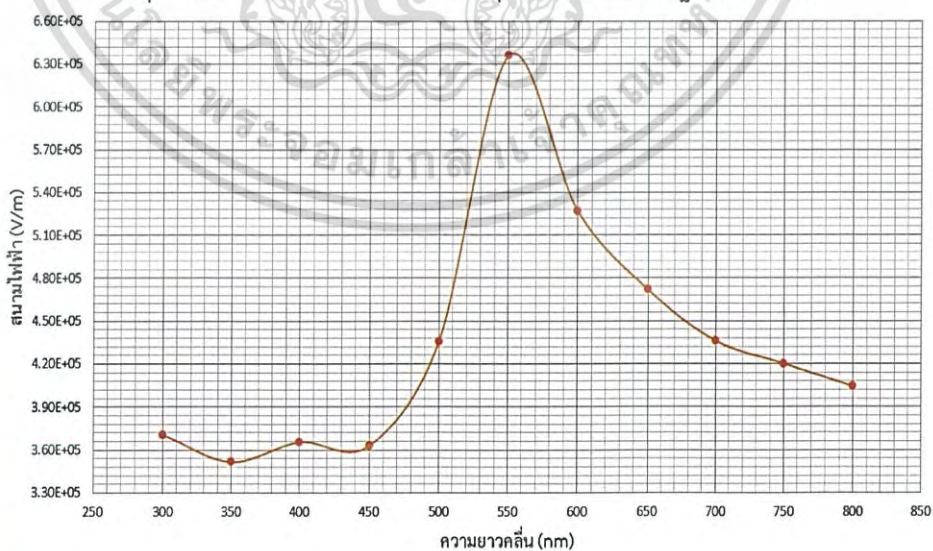
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm)
ที่อนุภาคขนาด 15x15x20 nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ Silicon)



กรณีที่ 6

ฐานรอง
BK-7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (V/m) และความยาวคลื่น (nm)
ที่อนุภาคขนาด 15x15x20 nm (วงรี) แต่ละอนุภาคห่างกัน 10 nm (ฐานรองคือ BK7)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.18.1 สรุปผลการจำลองของอนุภาคทรงวงรี ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร ในแต่ละกรณี

- 1) กรณีที่ 1 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 10 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 8.00×10^6 V/m
- 2) กรณีที่ 2 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 10 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 8.50×10^5 V/m
- 3) กรณีที่ 3 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 20 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.20×10^6 V/m
- 4) กรณีที่ 4 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 20 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.30×10^6 V/m
- 5) กรณีที่ 5 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 30 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 7.40×10^5 V/m
- 6) กรณีที่ 6 ทรงวงรี ขนาดอนุภาคแกนตั้ง 30 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 6.30×10^5 V/m

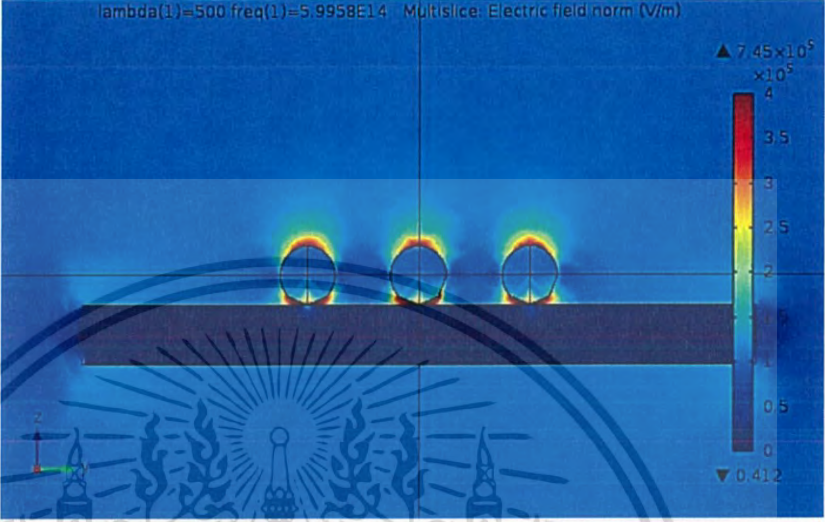

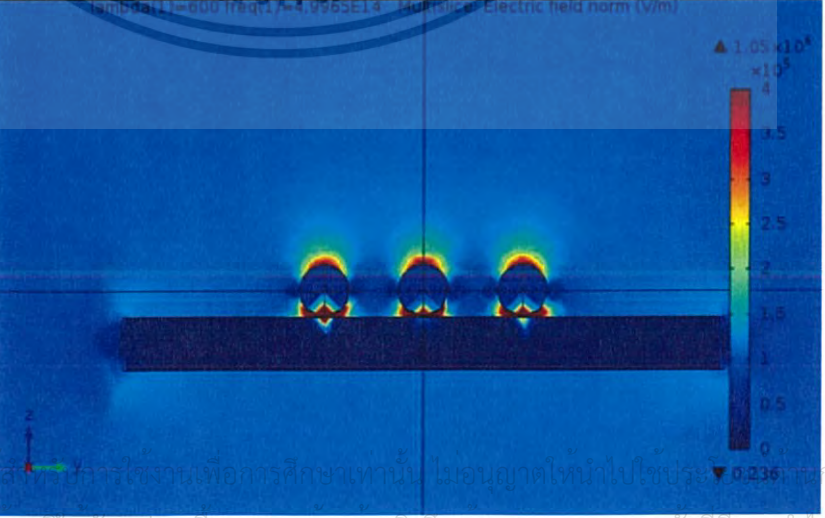
4.18.2 ข้อสรุปผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี

- 1) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10 และแกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 2) จากการที่พิจารณาในแต่ละกรณีต่างๆ ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 30 และแกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- 3) กรณีที่ 4 และ 6 ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 20,30 และ แกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
- 4) กรณีที่ 2 ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10 แกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 8.50×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง BK-7)

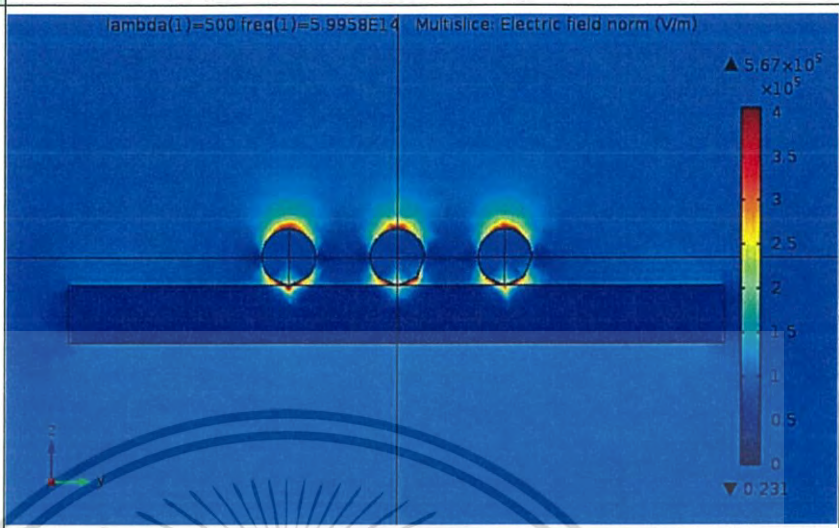

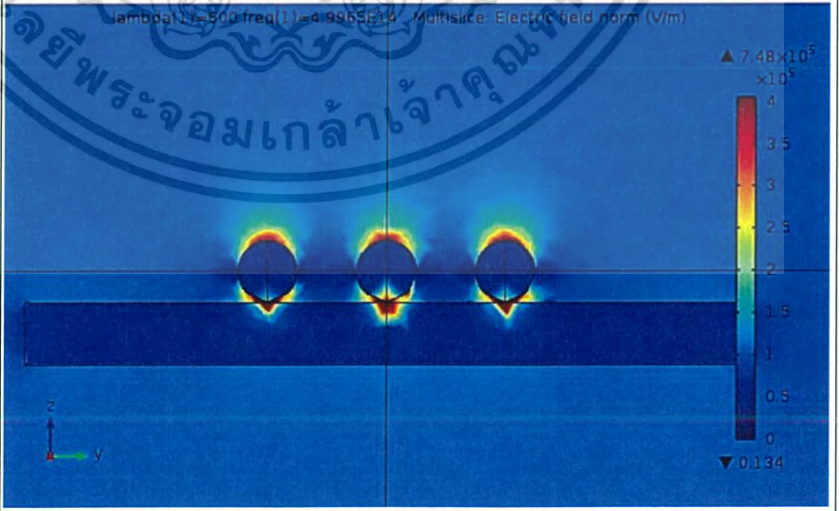
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงกลมขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

4.19.1 อนุภาคทรงกลมขนาด 10 นาโนเมตร

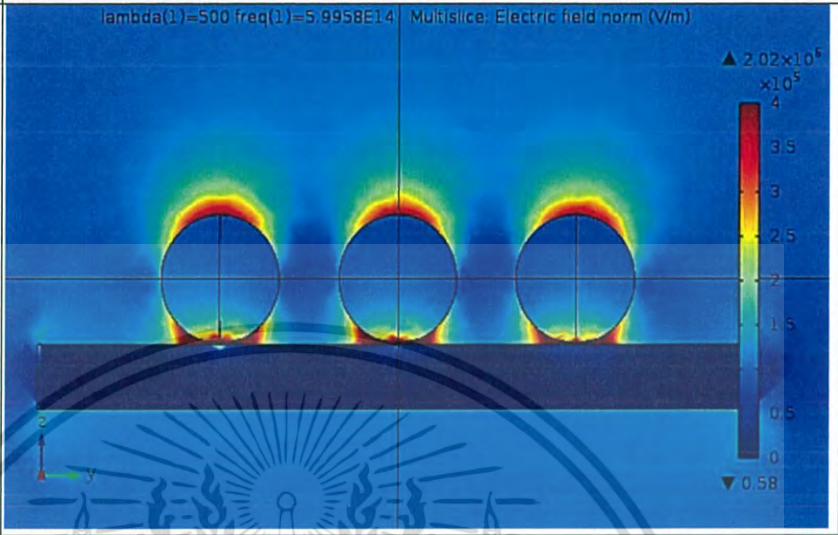
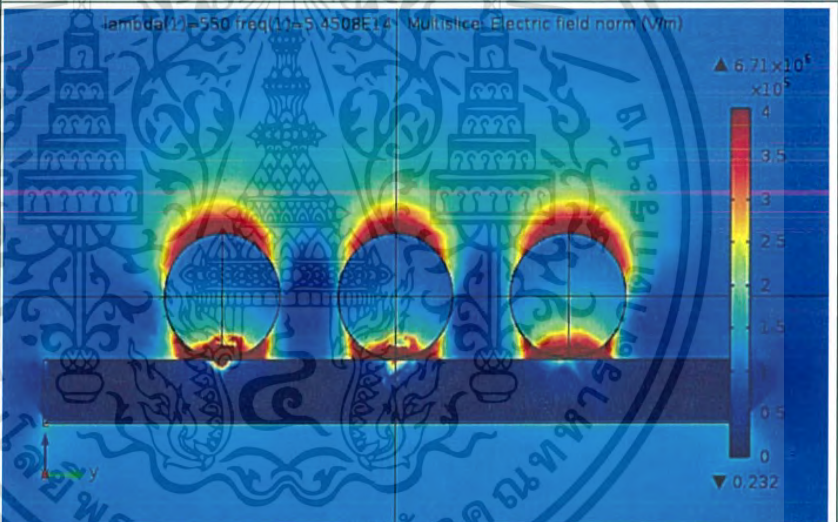
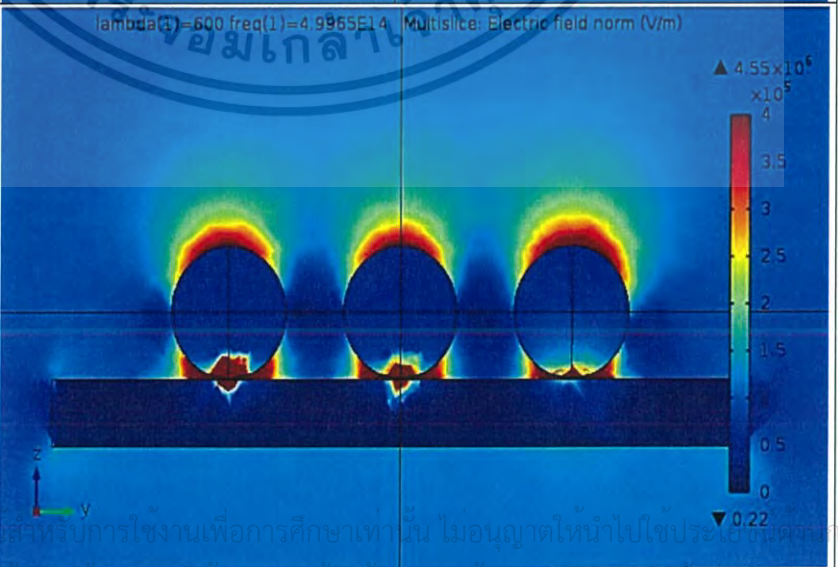
ขนาดอนุภาค 10 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.412 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.45×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=500 freq(1)=5.9958E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 7.45×10^5 $\times 10^5$ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.412</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.282 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.16×10^6 V/m 	 <p>lambda(1)=550 freq(1)=5.4508E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 1.16×10^6 $\times 10^6$ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.282</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.236 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.05×10^6 V/m 	 <p>lambda(1)=600 freq(1)=5.0063E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 1.05×10^6 $\times 10^6$ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.236</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปเพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดลงเนื้อหาและดัดแปลงข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

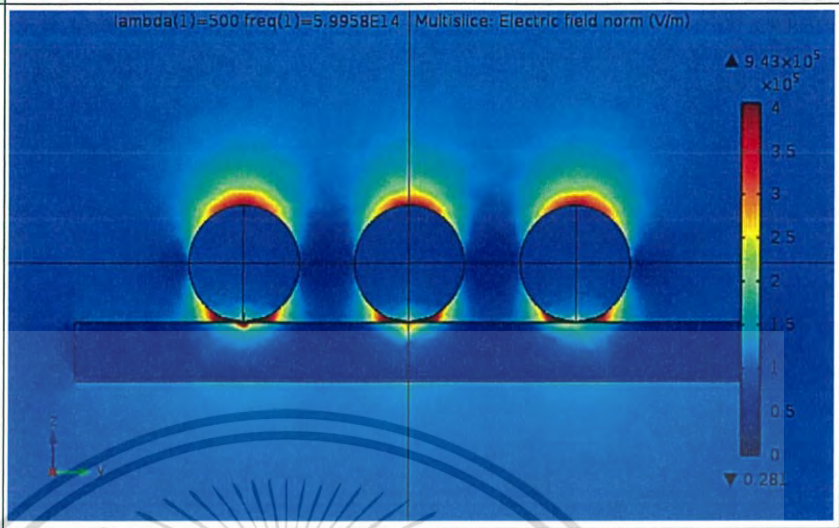
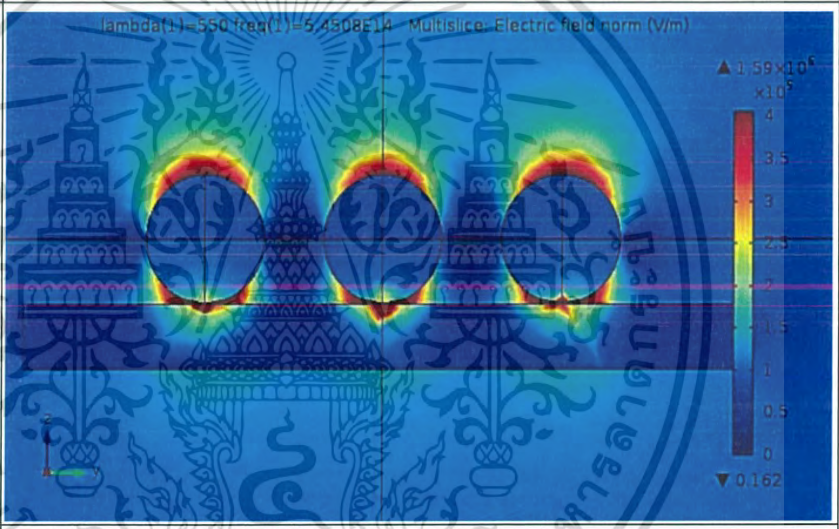
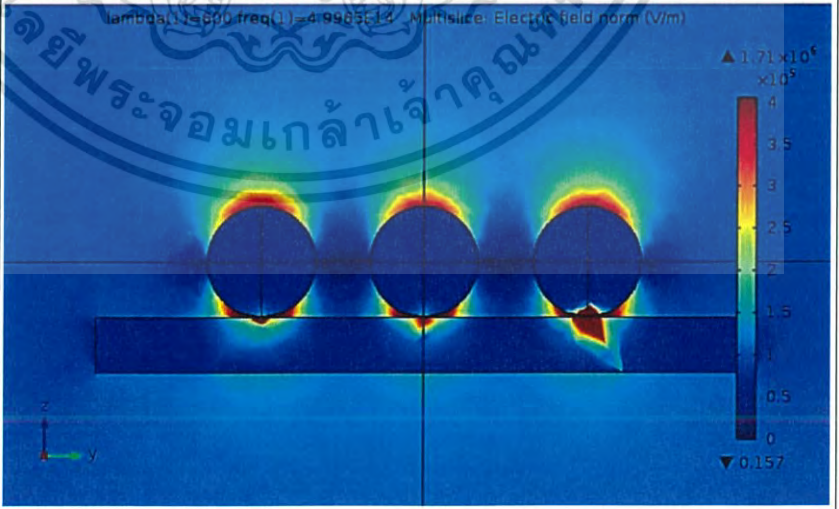
ขนาดอนุภาค 10 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.231 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.67×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.168 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 9.85×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.134 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.48×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.19.2 อนุภาคทรงกลมขนาด 20 นาโนเมตร

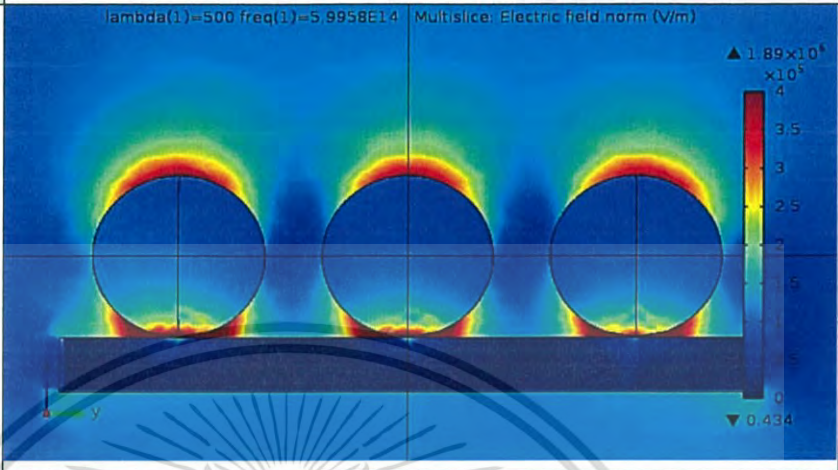
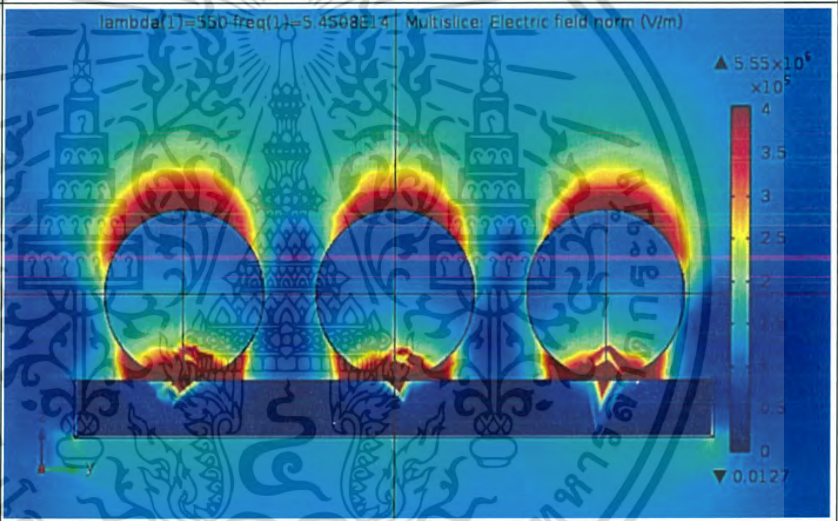
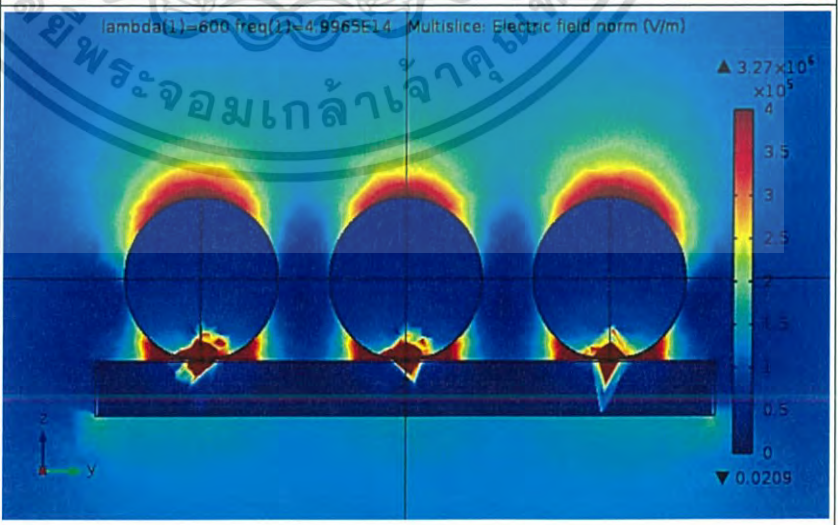
ขนาดอนุภาค 20 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.58 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.02×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.232 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 6.71×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.22 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.55×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

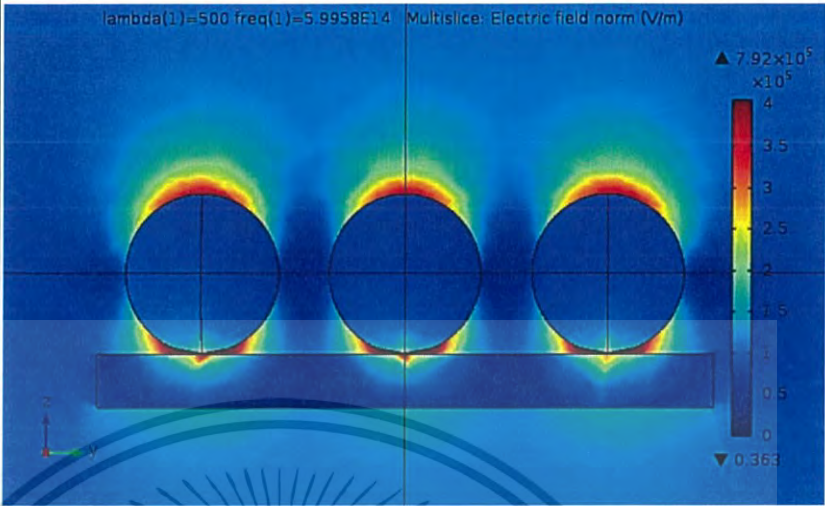
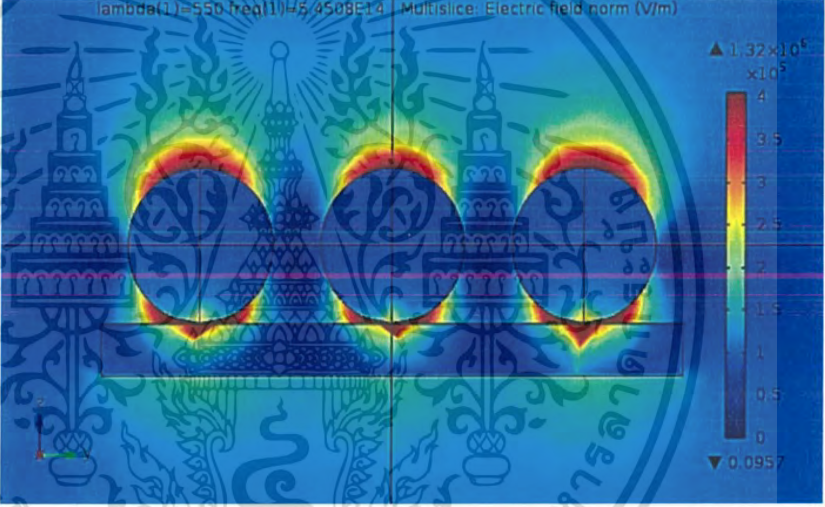
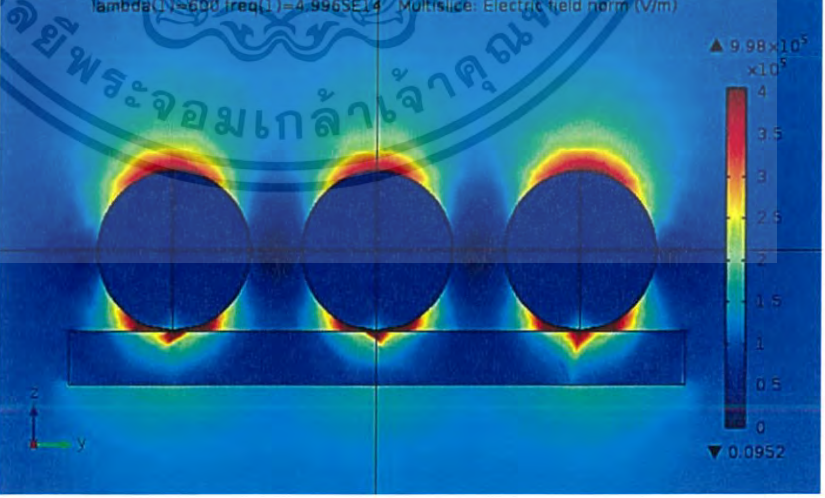
ขนาดอนุภาค 20 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.281 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 9.43×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.162 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.59×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.157 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.71×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.19.3 อนุภาคทรงกลมขนาด 30 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค 30 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.434 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.86×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0127 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.55×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0209 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.27×10^6 V/m 	

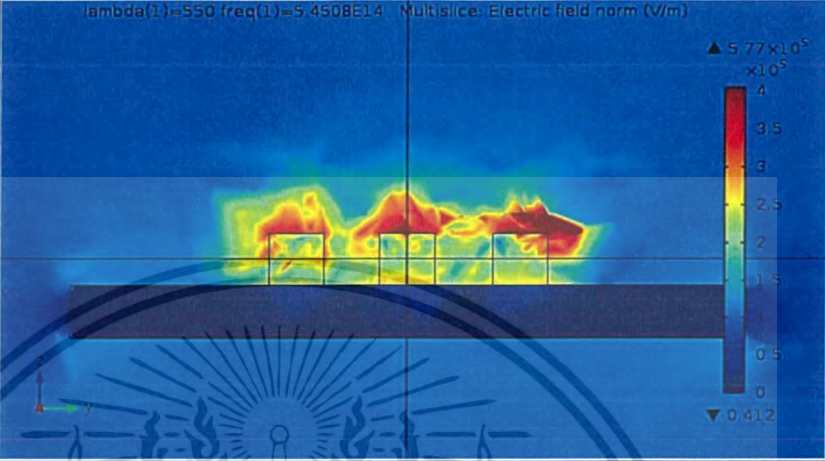
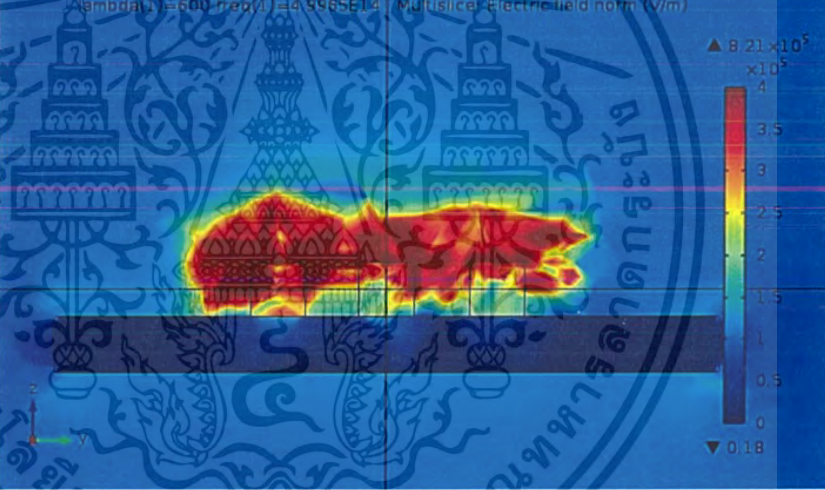
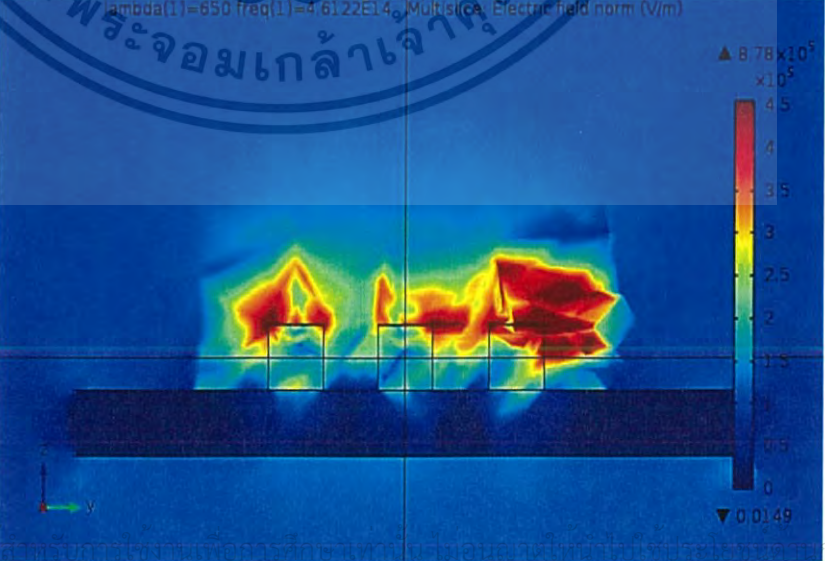
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาค 30 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.363 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.92×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0957 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.32×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0952 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 9.98×10^5 V/m 	

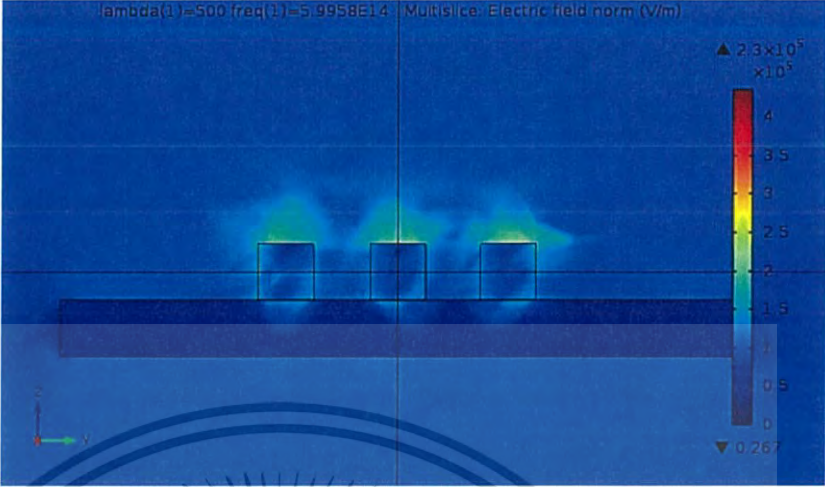

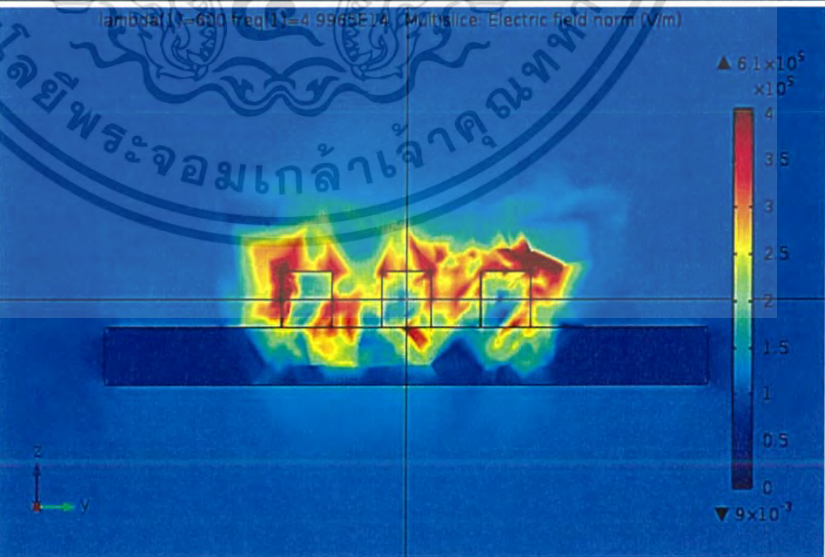
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

4.20.1 อนุภาคทรงกลมขนาด 10x10x10 นาโนเมตร

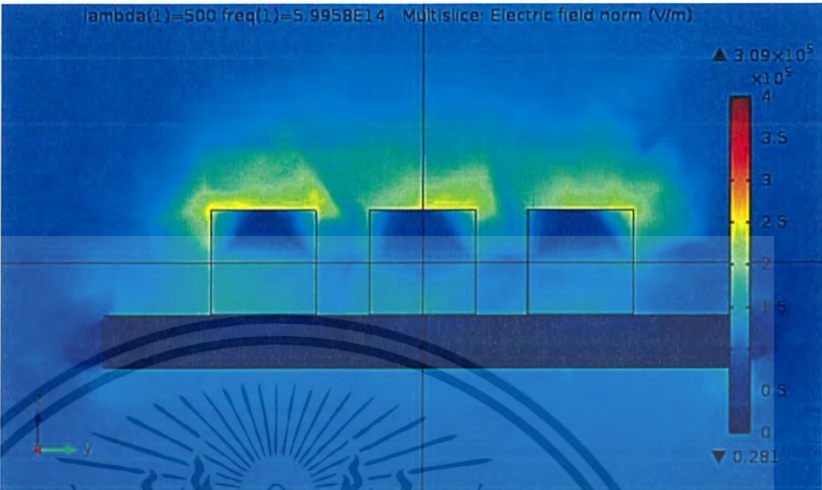
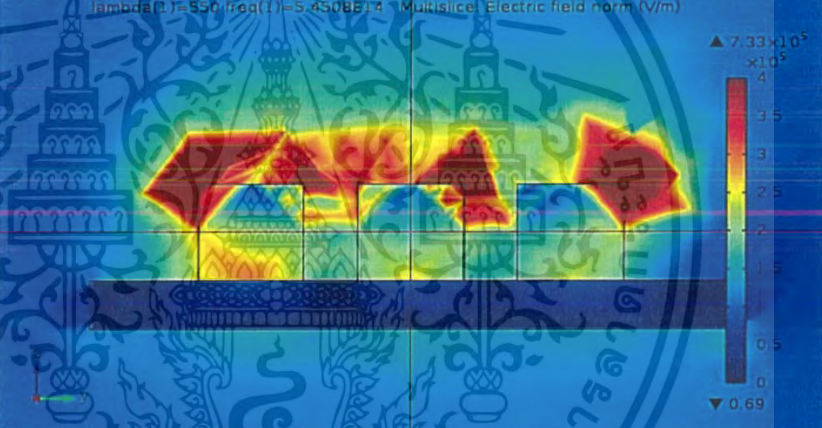
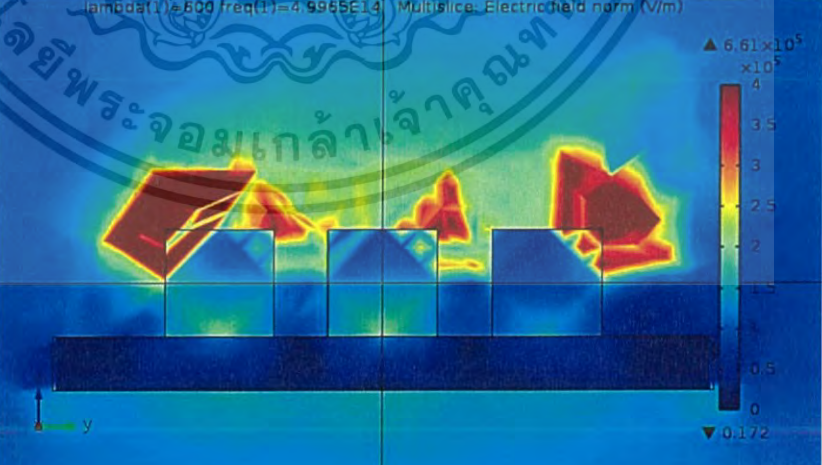
ขนาดอนุภาค 10x10x10 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.412 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.77×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.18 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.21×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0149 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.78×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

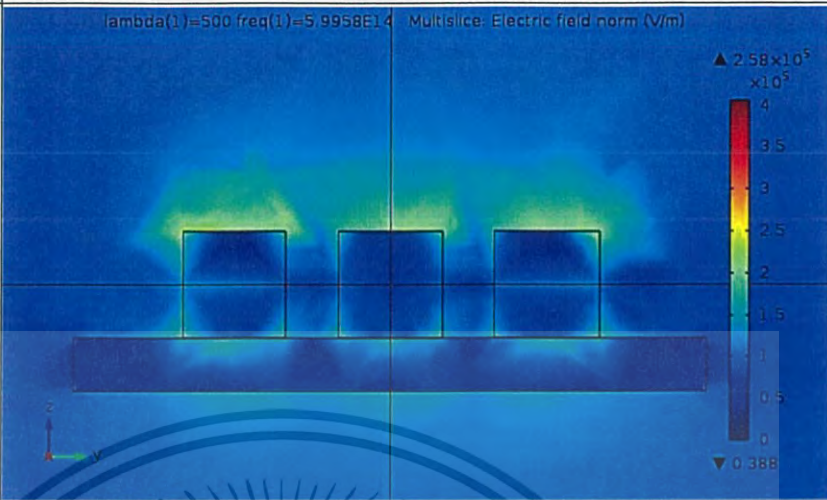
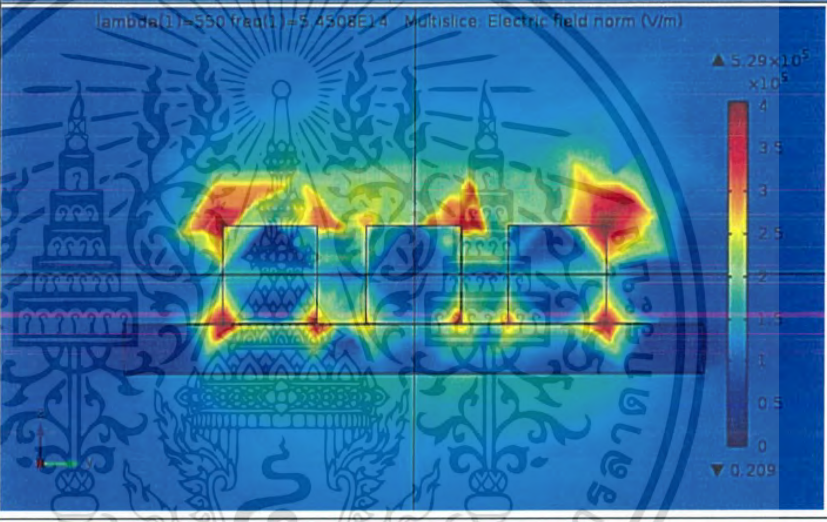
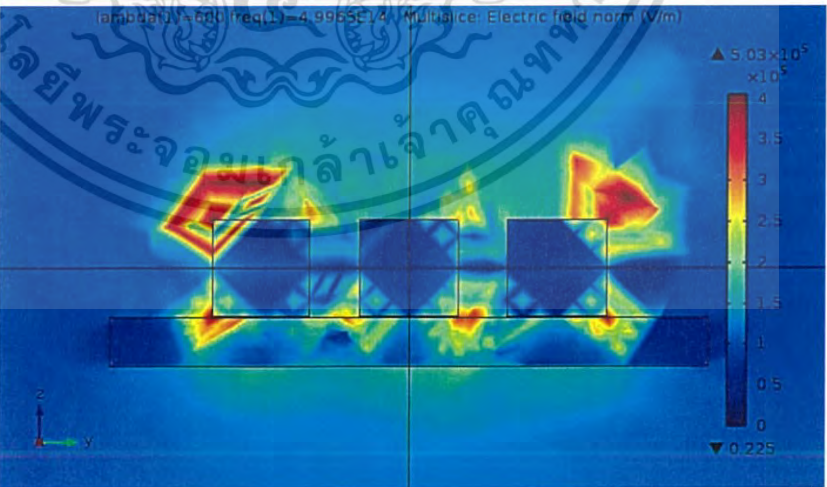
ขนาดอนุภาค 10x10x10 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.267 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.30×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=500 freq(1)=5.9958E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ $2.3 \times 10^5 \times 10^5$</p> <p>▼ 0.267</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.117 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.25×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=550 freq(1)=5.4508E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ $4.25 \times 10^5 \times 10^5$</p> <p>▼ 0.117</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 9×10^{-3} V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 6.1×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=600 freq(1)=4.9966E14 Multislice: Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ $6.1 \times 10^5 \times 10^5$</p> <p>▼ 9×10^{-3}</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.20.2 อนุภาคทรงกลมขนาด 20x20x20 นาโนเมตร

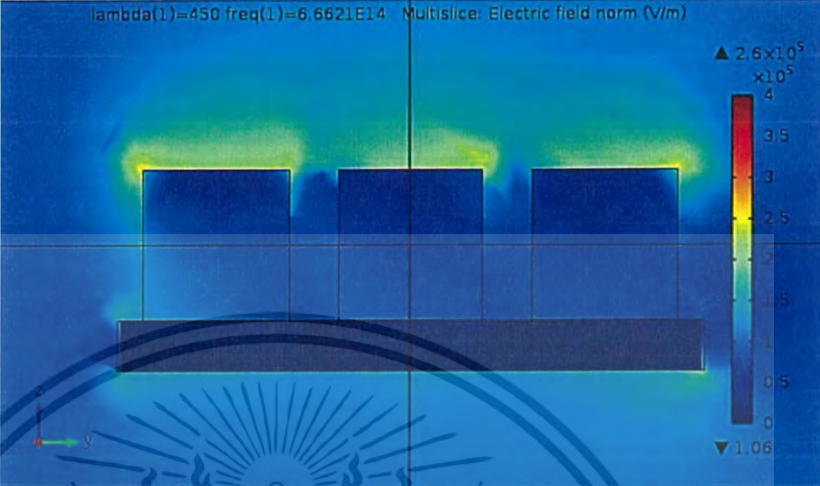

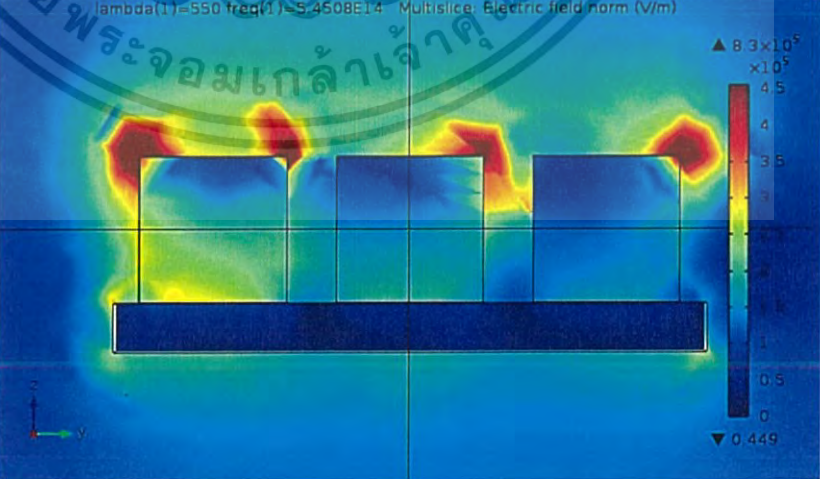
ขนาดอนุภาค 20x20x20 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.218 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.09×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=500 freq(1)=5.9958E14 Multislice Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 3.09×10^5 x10⁵ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.281</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.69 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.33×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=550 freq(1)=5.4508E14 Multislice Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 7.33×10^5 x10⁵ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.69</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.172 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 6.61×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=600 freq(1)=4.9965E14 Multislice Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 6.61×10^5 x10⁵ 4 3.5 3 2.5 2 1.5 1 0.5 0 ▼ 0.172</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาค 20x20x20 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.388 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.58×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.209 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.29×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.225 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.03×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.20.3 อนุภาคทรงกลมขนาด 30x30x30 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค 30x30x30 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.06 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.6×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.04 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.39×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.449 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.3×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาค 30x30x30 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.314 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.04×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.344 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.72×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.03 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.25×10^5 V/m 	

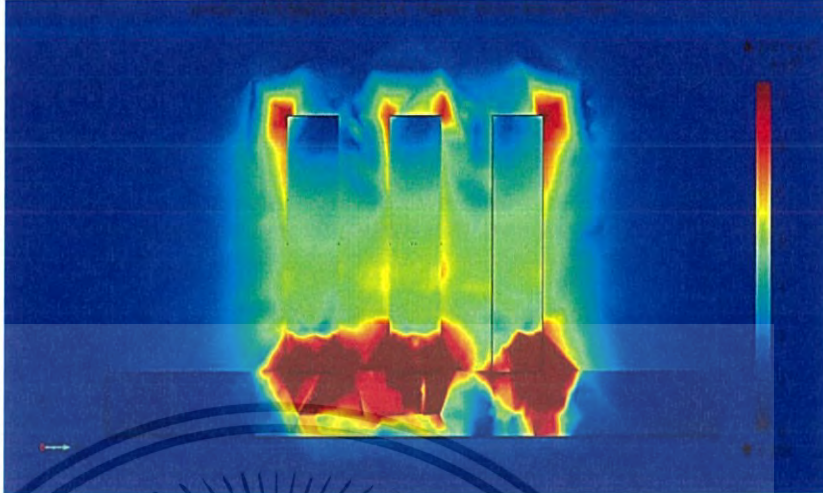
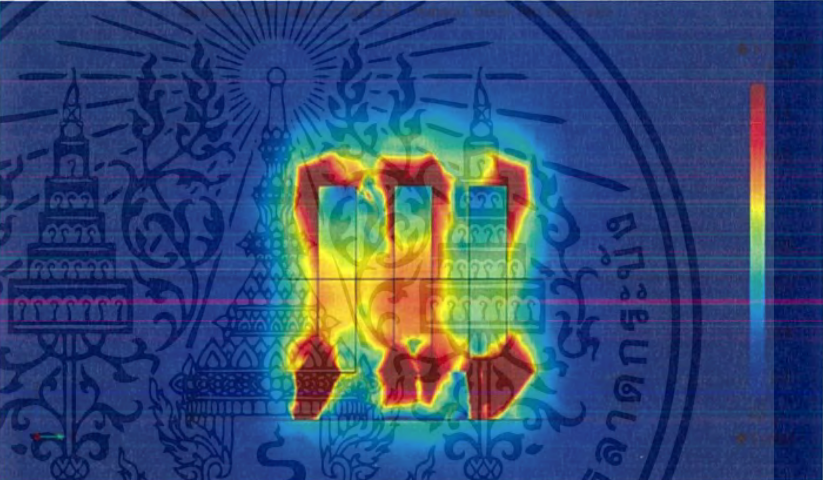
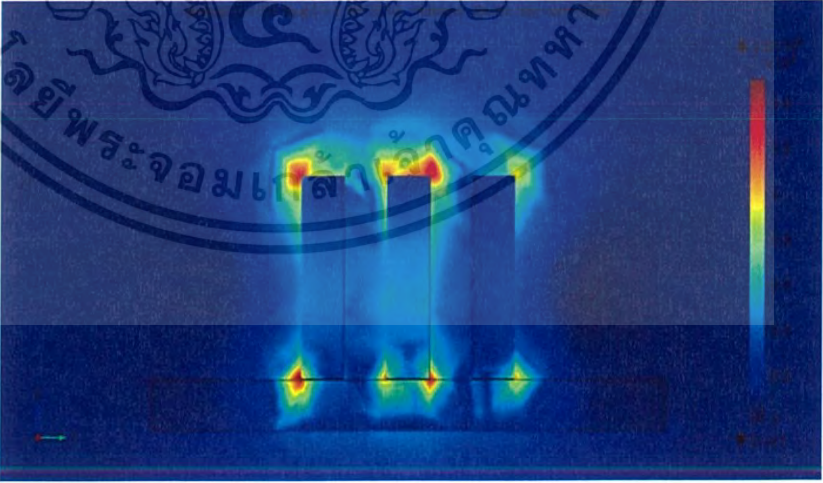
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

4.21.1 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 10x10x40 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค 10x10x40 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.506 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.52×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 750 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.035 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 7.72×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 800 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0814V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.96×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

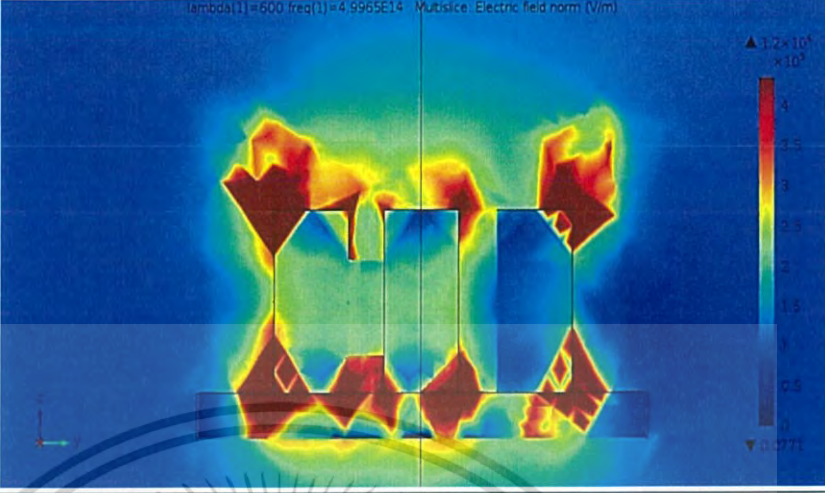
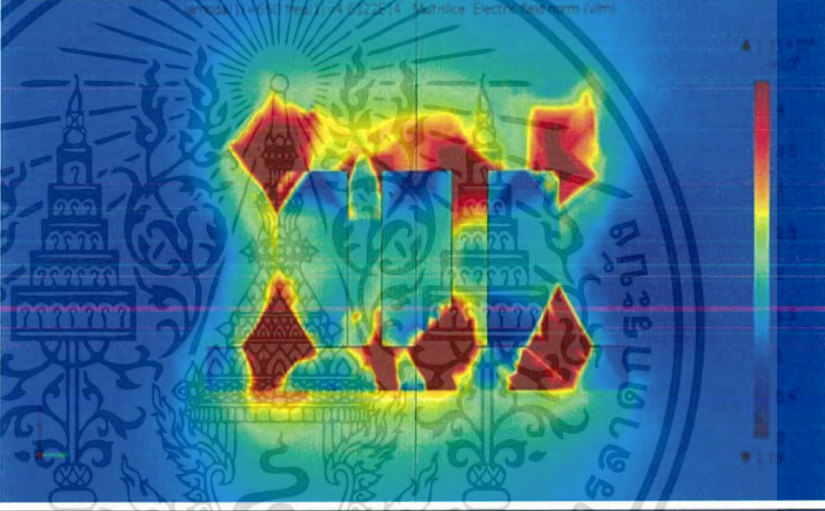
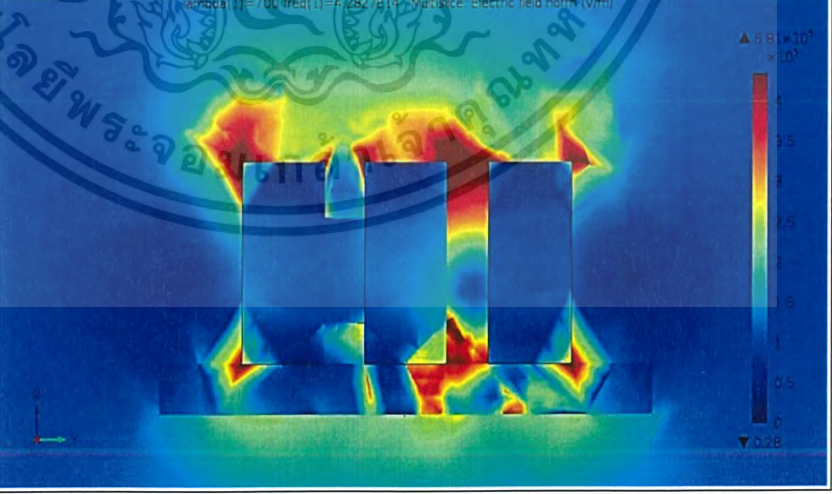
ขนาดอนุภาค 10x10x40 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.105 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.07×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0889 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 5.73×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 750 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.127 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.6×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.21.2 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 20x20x40 นาโนเมตร

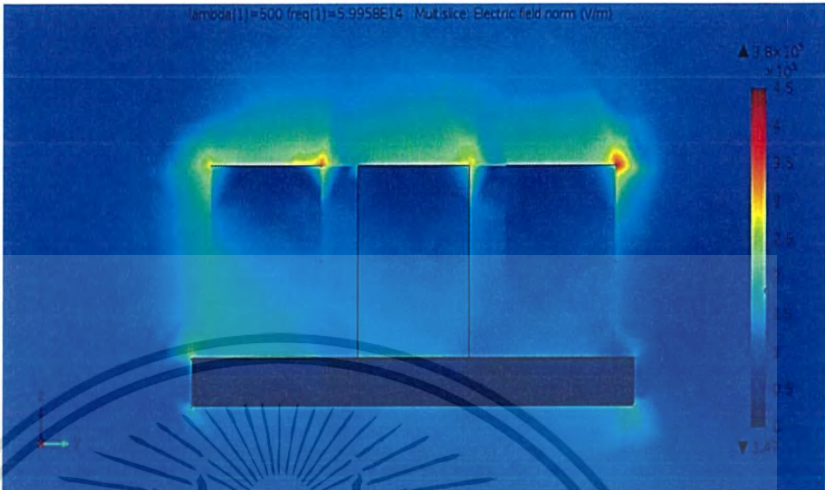
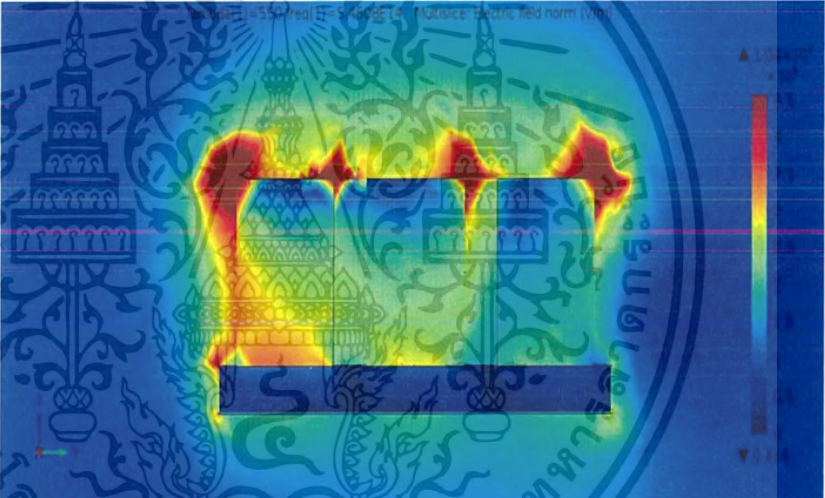
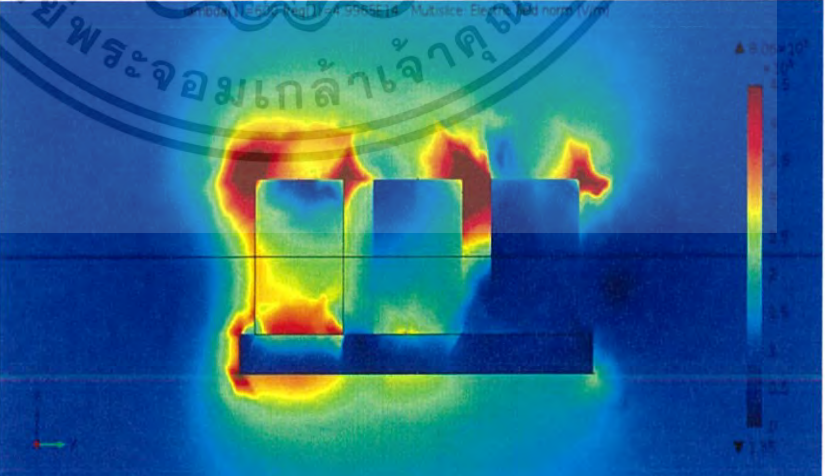
ขนาดอนุภาค 20x20x40 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.063 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.91×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0931 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.23×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.414 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.55×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

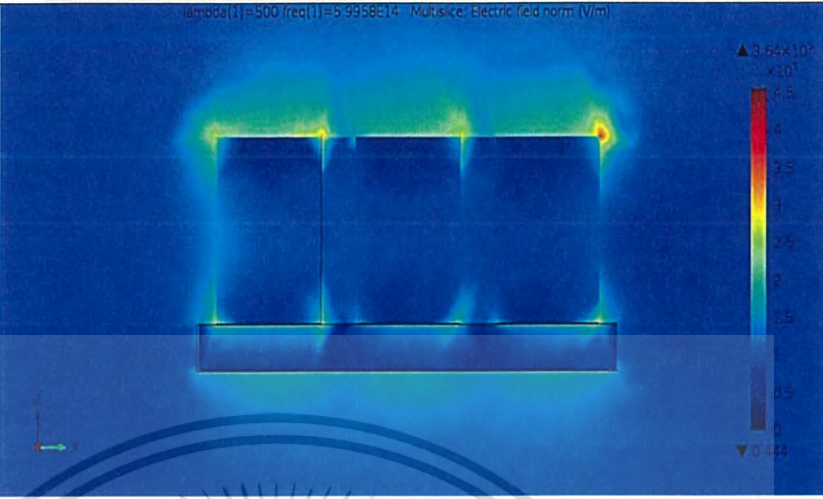
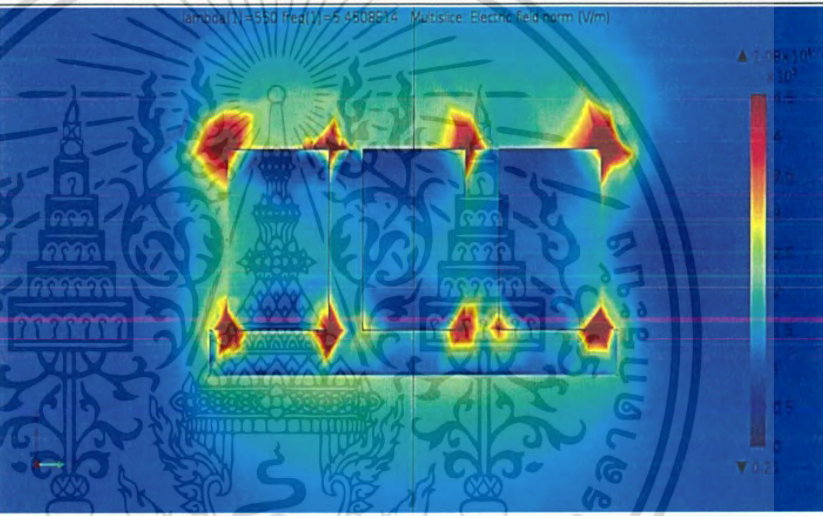
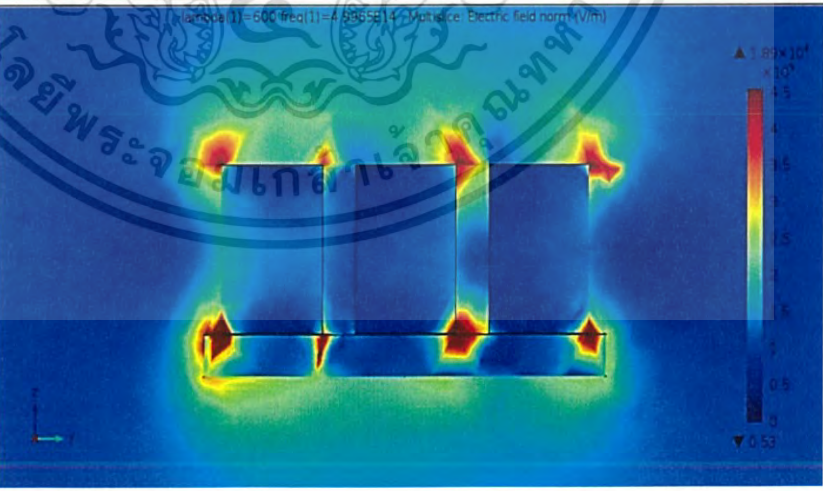
ขนาดอนุภาค 20x20x40 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.0771 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.2×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.79 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.31×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.28 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 6.81×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.21.3 อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 30x30x40 นาโนเมตร

ขนาดอนุภาค 30x30x40 nm	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.47 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.8×10^5 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.434 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.04×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 1.55 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 8.06×10^5 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาค 30x30x40 nm	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.444 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 3.64×10^5 V/m 	 <p>lambda(1)=500 freq(1)=5.9958E14 Multislice Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 3.64×10^5 x 10⁵</p> <p>▼ 0.444</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.21 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.08×10^6 V/m 	 <p>lambda(1)=550 freq(1)=5.4508E14 Multislice Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 1.08×10^6 x 10⁶</p> <p>▼ 0.21</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.53 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.89×10^6 V/m 	 <p>lambda(1)=600 freq(1)=4.9958E14 Multislice Electric field norm (V/m)</p> <p>▲ 1.89×10^6 x 10⁶</p> <p>▼ 0.53</p>

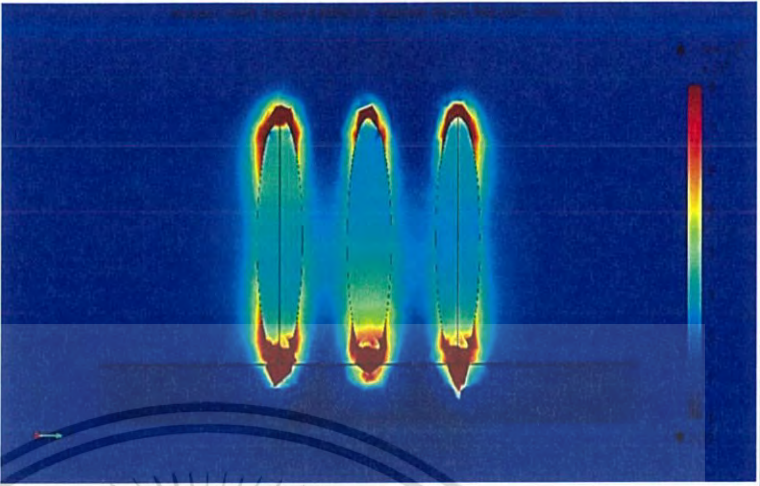

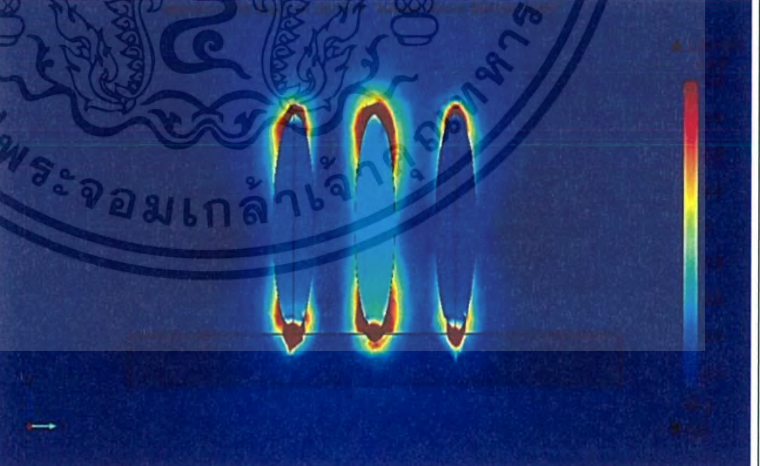
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ผลภาพกรณีอนุภาคทรงวงรี ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

4.22.1 อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 10 นาโนเมตร, แขนงนอน 40 นาโนเมตร)

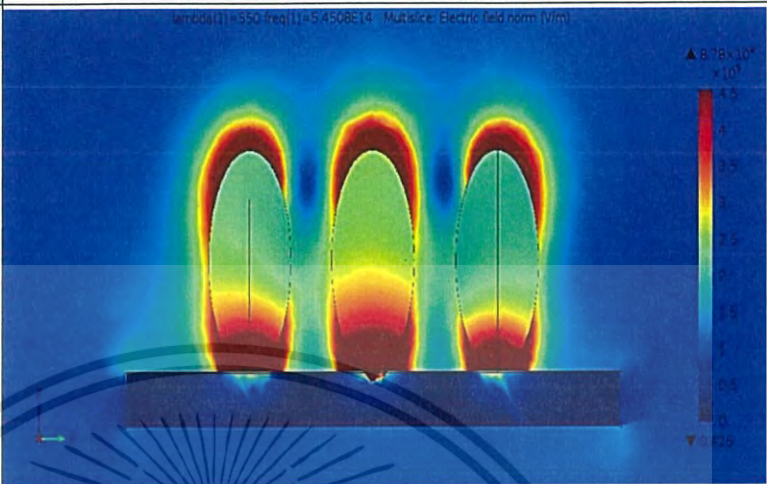

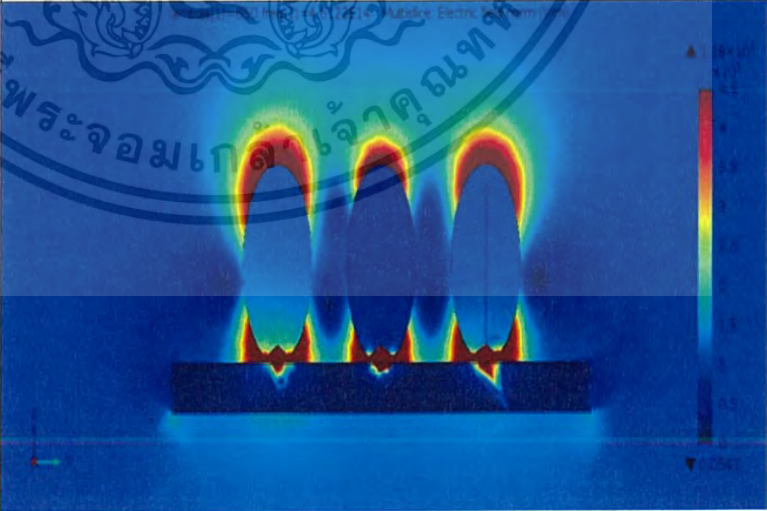
<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 10 นาโนเมตร ▪ แขนงนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.226 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 6.33×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.409 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.35×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.145 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 9.77×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ...
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

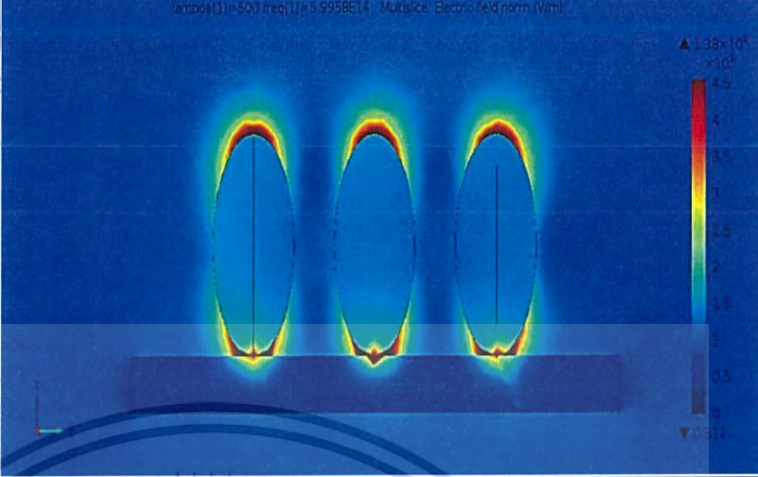
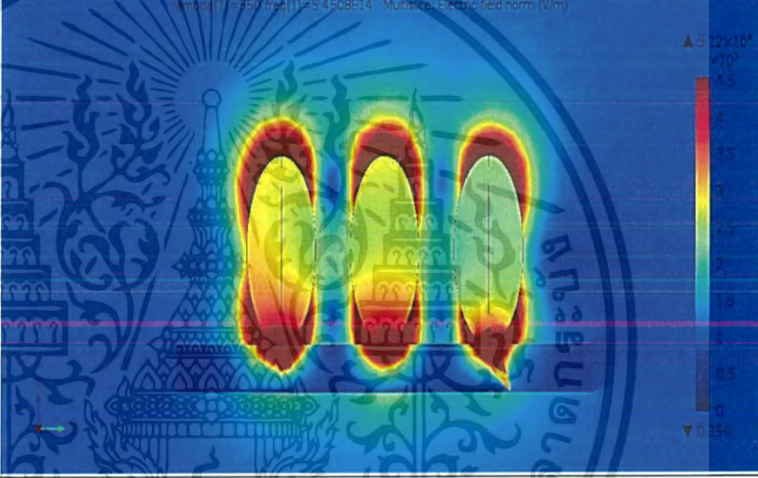
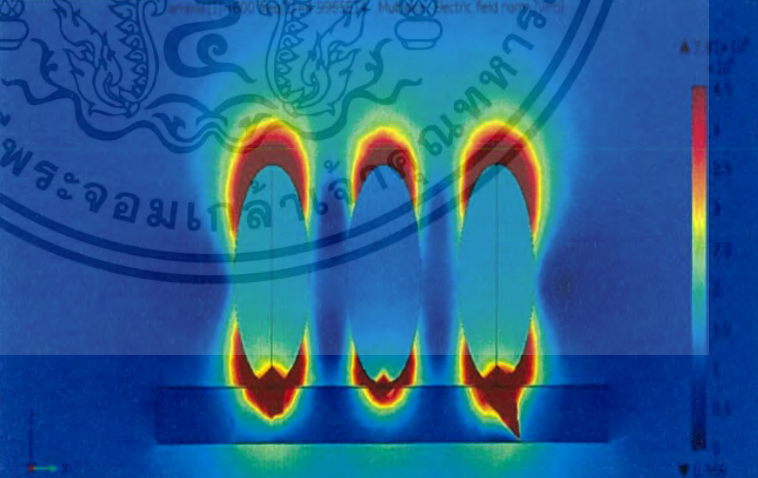
<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 10 นาโนเมตร ▪ แกนนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.25 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 7.39×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.109 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.23×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.21 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.13×10^7 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.22.2 อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 20 นาโนเมตร, แขนนอน 40 นาโนเมตร)

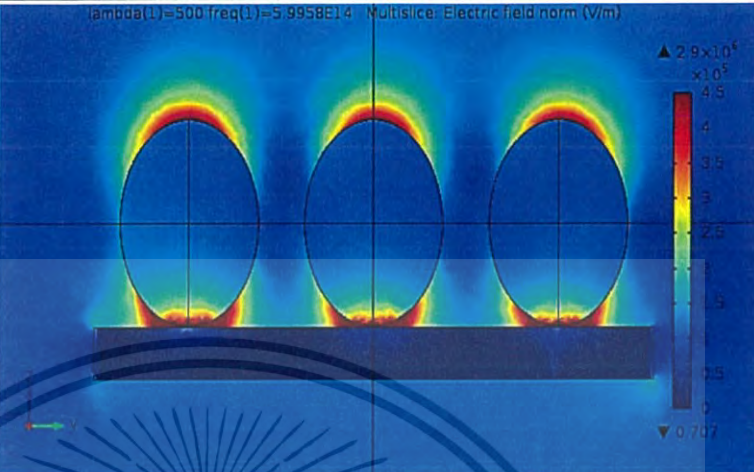
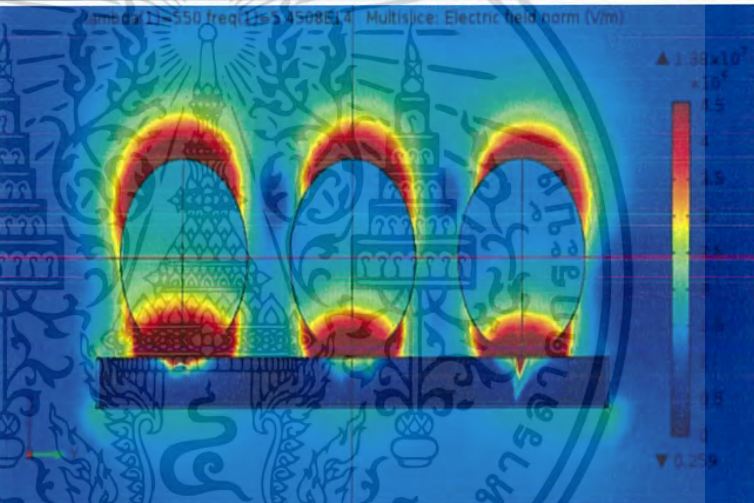
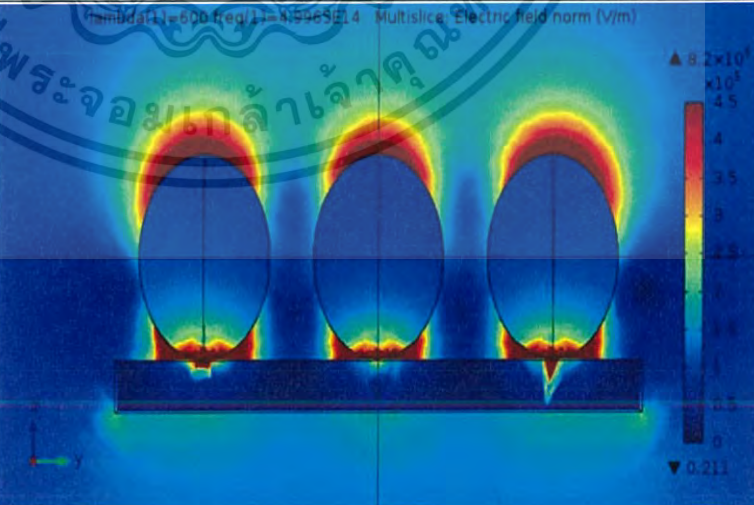
<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 20 นาโนเมตร ▪ แขนนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.425 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 8.78×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.43 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.34×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 650 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.0541 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.18×10^7 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

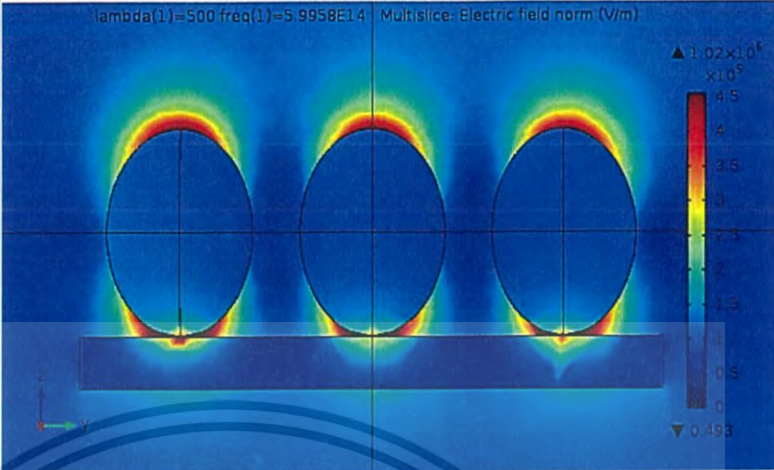
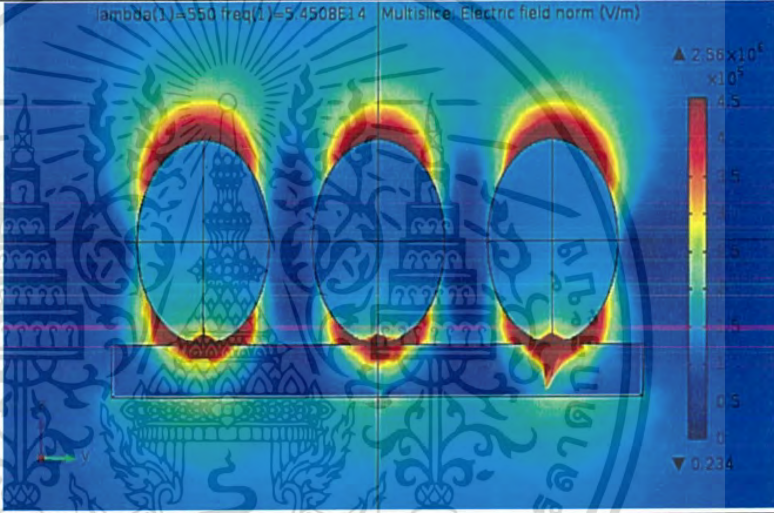
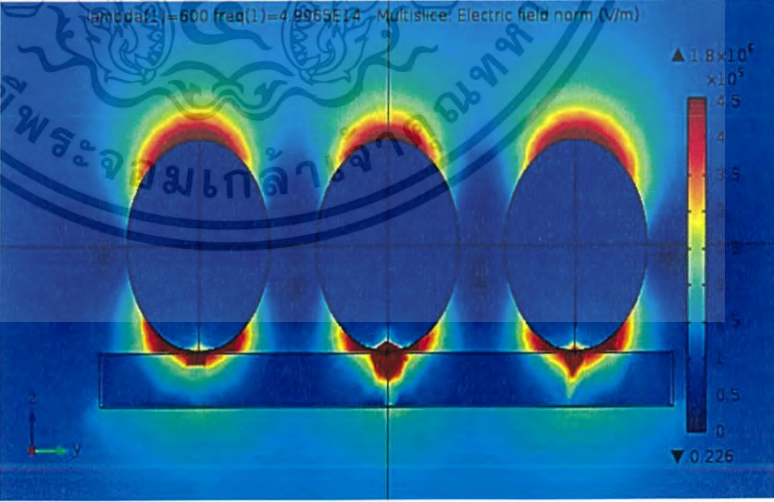
<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 20 นาโนเมตร ▪ แกนนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.517 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.38×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.394 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 5.12×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.368 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 7.81×10^6 V/m 	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.22.3 อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 30 นาโนเมตร, แขนงอน 40 นาโนเมตร)

<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 30 นาโนเมตร ▪ แขนงอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง silicon
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.707 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 2.9×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.259 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.38×10^7 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.211 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด คือ 8.2×10^6 V/m 	

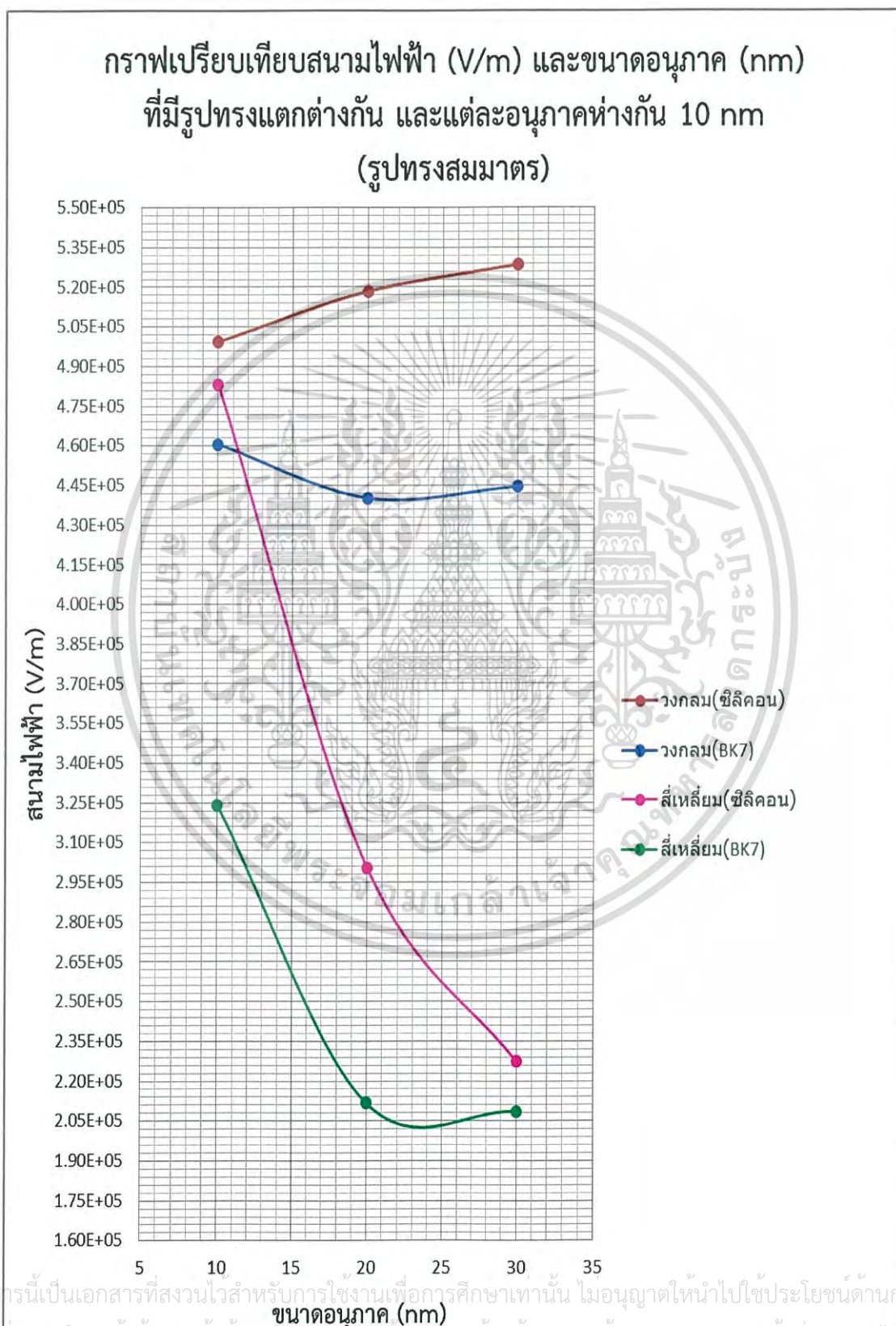
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<ul style="list-style-type: none"> ▪ แกนตั้ง 30 นาโนเมตร ▪ แกนนอน 40 นาโนเมตร 	ฐานรอง BK-7
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.493 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.02×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.234 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 2.56×10^6 V/m 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ ค่าความยาวคลื่นที่ 600 นาโนเมตร ▪ ค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดคือ 0.226 V/m ▪ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.8×10^6 V/m 	

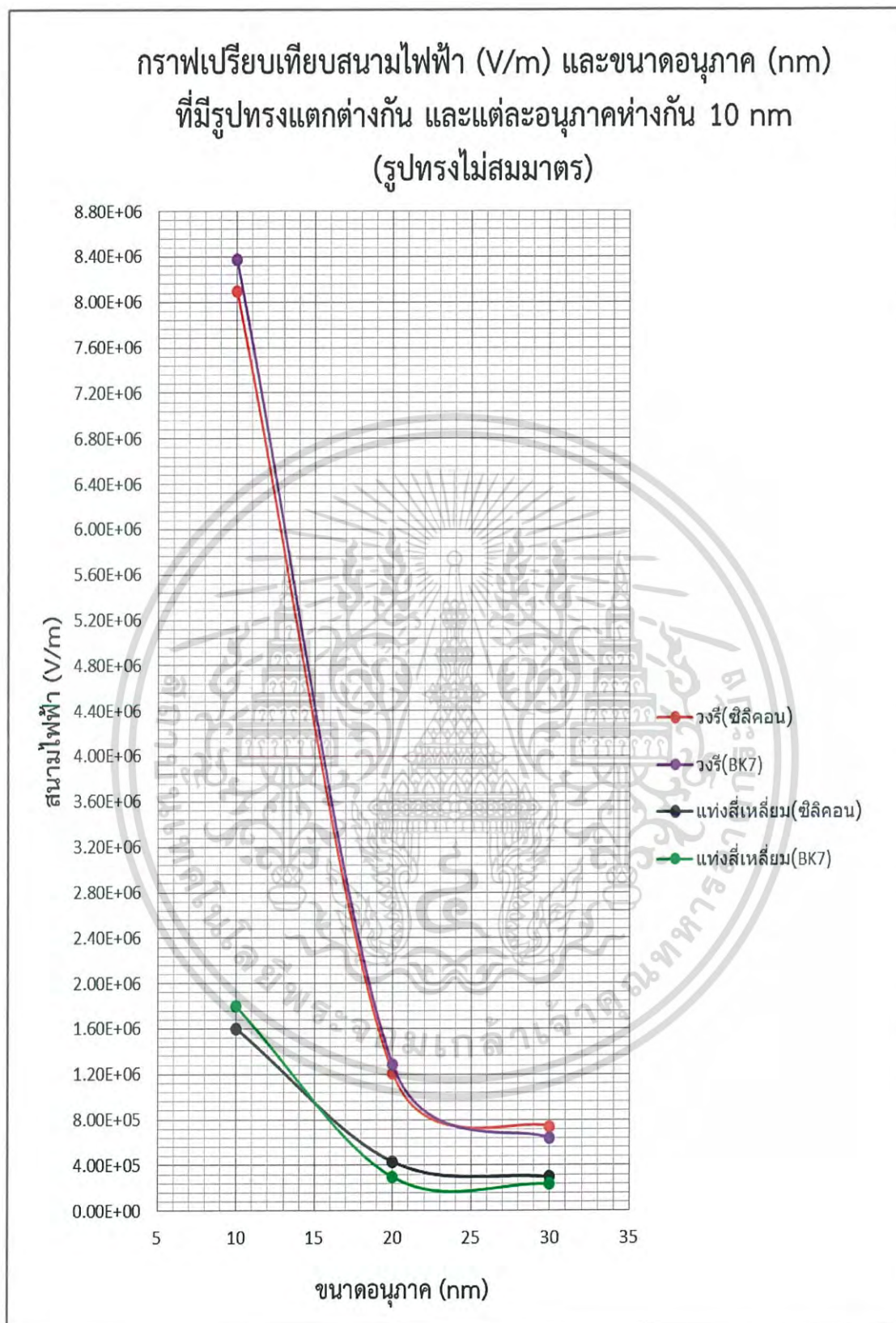
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.23 สรุปการวิเคราะห์ผล ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

4.23.1 รวมกราฟของแต่ละอนุภาคแต่ละอนุภาคที่มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กัน ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถคัดลอก หักฉีก หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟรวมของอนุภาคแต่ละอนุภาคที่มีรูปทรงและขนาดต่างๆกัน ระยะห่าง 10 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.24 รวมผลสรุปการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กันนั้น มีขอบเขตทำการศึกษาแต่ละกรณีทั้ง 3 กรณี ดังนี้

- 1) การเปลี่ยนระยะห่างแต่ละอนุภาค 2 ระยะห่าง ดังนี้
 - 1.1) ระยะห่างแต่ละอนุภาคห่าง 5 นาโนเมตร และ ระยะห่างแต่ละอนุภาคห่าง 10 นาโนเมตร
- 2) การเปลี่ยนฐานรอง (substrate) ทั้ง 2 ชนิด ดังนี้
 - 2.1) ฐานรอง แบบชนิด ซิลิคอน (silicon) และ ฐานรอง แบบชนิด แก้ว (BK-7)
- 3) ทำการออกแบบอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กัน (รูปร่างสมมาตรและไม่สมมาตร) เช่น ทรงกลม, ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์, ทรงแท่งสี่เหลี่ยม และ ทรงวงรี

4.24.1 รวมผลสรุปการวิเคราะห์กรณีระยะห่าง 5 นาโนเมตร

เราจะสรุปผลโดยการพิจารณาจากค่าวิเคราะห์ขนาดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ โดยอนุภาคทองคำนาโนมีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ กันเราจะสรุปว่าช่วงค่าความยาวคลื่นแสงที่ตอบสนองต่อการเกิดปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อดังกล่าวนี้ พบว่าอยู่ระหว่าง 550-750 nm และที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนที่มีรูปร่างวงรีและไดอิเล็กตริกของอากาศ พบว่ามีขนาดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นสูงกว่าอนุภาคทองคำนาโนรูปร่างอื่น และฐานรองที่มีผลต่ออนุภาคที่เหมาะสมทำให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดคือ ฐานรอง (substrate) แบบชนิดซิลิคอน (silicon) ซึ่งอนุภาครูปร่างที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงที่สุดคือ รูปร่างวงรี และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

- ทรงกลม ขนาดอนุภาค (20 และ 30 นาโนเมตร) พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเหมือนกันทุกรูปร่างอยู่ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
- ทรงกลม ขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้คือ 5.70×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
- ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค (10x10x10) นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ BK-7)
- ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค (10x10x10) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 3.18×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
- ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (30x30x40) นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ BK-7)
- ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (10x10x40) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.30×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน) เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10,20,30 แกนนอน 40 นาโนเมตร) พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 550 และ 650 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ BK-7)
- ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10, แกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 6.30×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)

4.24.2 รวมผลสรุปการวิเคราะห์กรณีระยะห่าง 10 นาโนเมตร

เราจะสรุปผลโดยการพิจารณาจากค่าวิเคราะห์ขนาดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคของนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ โดยอนุภาคของนาโนมีขนาดและรูปร่างต่างกัน เราจะสรุปว่าช่วงค่าความยาวคลื่นแสงที่ตอบสนองต่อการเกิดปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อดังกล่าวนี้ พบว่าอยู่ระหว่างค่า 550-750 nm และที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคของนาโนที่มีรูปร่างวงรีและไดอิเล็กตริกของอากาศพบว่ามีความยาวคลื่นสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นสูงกว่าอนุภาคของนาโนรูปร่างอื่น และฐานรองที่มีผลต่ออนุภาคที่เหมาะสมทำให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดคือ ฐานรอง (substrate) แบบชนิด BK-7 ซึ่งอนุภาครูปทรงที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าที่สูงที่สุดคือ ทรงวงรี และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้ได้ดังนี้

- ทรงกลม ขนาดอนุภาค (10,20 และ 30 นาโนเมตร) พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ BK-7)
- ทรงกลม ขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้คือ 5.30×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
- ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค (20x20x20) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร
- ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค (10x10x10) นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเหมือนกันอยู่ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ BK-7)
- ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดอนุภาค (10x10x10) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 250-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเหมือนกันอยู่ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.80×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
- ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (20x20x40) และ (30x30x40) นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเหมือนกันอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 550 และ 650 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ BK-7)
- ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาดอนุภาค (10x10x40) นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.81×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
- ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10,20,30 แกนนอน 40 นาโนเมตร) พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 550 และ 650 นาโนเมตร ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ BK-7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10, แกนนอน 40 นาโนเมตร) ความยาวคลื่นที่เราวิเคราะห์ตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 8.50×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง BK-7)

4.24.3 รวมผลสรุปการวิเคราะห์กรณีฐานรอง

- กรณีระยะห่าง 5 นาโนเมตร (ฐานรอง ซิลิคอน)
 1. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงกลม ทุกขนาดของอนุภาค ในกรณี ฐานรอง ซิลิคอน พบว่าเกิดค่าของสนามไฟฟ้าสูงกว่า ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
 2. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงกลมขนาด 10 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.70×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
 3. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทุกขนาดของอนุภาค กรณี (ฐานรอง ซิลิคอน) จะพบว่าเกิดค่าของสนามไฟฟ้าสูงกว่า ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
 4. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด $10 \times 10 \times 10$ นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 3.18×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
 5. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ทุกขนาดของอนุภาค กรณี (ฐานรอง ซิลิคอน) พบว่าเกิดค่าของสนามไฟฟ้าสูงกว่า ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
 6. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด $10 \times 10 \times 40$ นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.30×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
 7. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 10 นาโนเมตร และแกนนอน 40 นาโนเมตร) กรณี (ฐานรอง ซิลิคอน) พบว่าเกิดค่าของสนามไฟฟ้าสูงกว่า กรณี (ฐานรอง BK-7) เพียงกรณีเดียว
 8. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 10 นาโนเมตร และแกนนอน 40 นาโนเมตร) พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 6.30×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

▪ กรณีระยะห่าง 10 นาโนเมตร (ฐานรอง BK-7)

1. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงกลม พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ทุกขนาดของอนุภาค ทั้งกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน และ ฐานรอง BK-7)
2. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงกลมขนาด 30 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.40×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
3. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทุกขนาดของอนุภาค กรณี ฐานรอง BK-7 จะพบว่าเกิดค่าของสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ที่ช่วงความยาวคลื่นเดียวกันหมด
4. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด $10 \times 10 \times 10$ นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 4.80×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
5. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด $10 \times 10 \times 40$ นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 1.81×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
6. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงวงรี ขนาด (แกนตั้ง 10 นาโนเมตร และแกนนอน 40 นาโนเมตร) พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 8.50×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
7. จากการวิเคราะห์ผล อนุภาคทรงวงรี พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 และ 10 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.24.4 รวมผลสรุปการวิเคราะห์กรณีรูปทรงสมมาตรและรูปทรงไม่สมมาตร

▪ กรณีระยะห่าง 5 นาโนเมตร

1. จากการวิเคราะห์ผล รูปทรงสมมาตร (ทรงกลม, สี่เหลี่ยมลูกบาศก์) ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 550-700 นาโนเมตร ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
2. จากการวิเคราะห์ผล รูปทรงสมมาตร (ทรงกลม) ขนาด 10 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.70×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
3. จากการวิเคราะห์ผล รูปทรงไม่สมมาตร (แท่งสี่เหลี่ยม, วงรี) ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 550-750 นาโนเมตร ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
4. จากการวิเคราะห์ผล รูปทรงไม่สมมาตร (วงรี) ขนาด (แกนตั้ง 10 นาโนเมตร และแกนนอน 40 นาโนเมตร) ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 6.30×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)

▪ กรณีระยะห่าง 10 นาโนเมตร

1. จากการวิเคราะห์ผล รูปทรงสมมาตร (ทรงกลม, สี่เหลี่ยมลูกบาศก์) ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 500-600 นาโนเมตร ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
2. จากการวิเคราะห์ผล รูปทรงสมมาตร (ทรงกลม) ขนาด 30 นาโนเมตร ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 5.30×10^5 V/m ในกรณี (ฐานรอง ซิลิคอน)
3. จากการวิเคราะห์ผล รูปทรงไม่สมมาตร (แท่งสี่เหลี่ยม, วงรี) ที่ระยะห่าง 10 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ช่วงความยาวคลื่น 550-750 นาโนเมตร ในกรณี (ฐานรอง BK-7)
4. จากการวิเคราะห์ผล รูปทรงไม่สมมาตร (วงรี) ขนาด (แกนตั้ง 10 นาโนเมตร และแกนนอน 40 นาโนเมตร) ที่ระยะห่าง 5 นาโนเมตร พบว่าเกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ดังนั้น ค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ คือ 8.50×10^6 V/m ในกรณี (ฐานรอง BK-7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากโครงการพิเศษนี้เราทำการศึกษาการใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองที่อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวกับเซอร์เฟสพลาสมอนได้ โดยวิเคราะห์ขนาดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ โดยอนุภาคทองนาโนมีขนาดและรูปร่างต่างๆกัน เช่น รูปร่างแบบทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยมรูปบาศก์ ทรงแท่งสี่เหลี่ยม และทรงวงรี โดยขอบเขตงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดระยะห่างแต่ละอนุภาค การเปลี่ยนฐานรองของอนุภาค และการเปรียบเทียบรูปทรงของแต่ละอนุภาค โดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศที่ได้จากกราฟ ซึ่งได้ข้อสรุปดังนี้

กรณีแรก คือ การเปรียบเทียบระหว่างระยะห่างของแต่ละอนุภาคที่ 5 นาโนเมตร และ 10 นาโนเมตร

- ทรงกลม ขนาด 10 นาโนเมตร ที่มีระยะห่างระหว่างอนุภาค 5 นาโนเมตร กรณีฐานรองซิลิคอน มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศสูงกว่า ทรงกลม ขนาดเดียวกัน ที่ระยะห่างอนุภาค 10 นาโนเมตร
- ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด(10x10x10) นาโนเมตร ที่มีระยะห่างระหว่างอนุภาค 5 นาโนเมตร กรณีฐานรองซิลิคอน มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศสูงกว่า ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาดเดียวกัน ที่ระยะห่างอนุภาค 10 นาโนเมตร
- ทรงแท่งสี่เหลี่ยม ขนาด(10x10x40) นาโนเมตร ที่มีระยะห่างระหว่างอนุภาค 5 นาโนเมตร กรณีฐานรองซิลิคอน มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศสูงกว่า ทรงแท่งสี่เหลี่ยมที่มีเหลี่ยมขนาดเดียวกัน ที่ระยะห่างอนุภาค 10 นาโนเมตร
- ทรงวงรี (แกนตั้ง 10 นาโนเมตร, แกนนอน 40 นาโนเมตร) ที่มีระยะห่างระหว่างอนุภาค 5 นาโนเมตร กรณีฐานรองซิลิคอน มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศน้อยกว่า ทรงวงรีที่มีขนาดเดียวกัน ที่ระยะห่างอนุภาค 10 นาโนเมตร

กรณีที่สอง คือ การเปรียบเทียบระหว่างฐานรองซิลิคอน และฐานรองแก้ว (BK-7) ที่ระยะห่าง 5 และ 10 นาโนเมตร

- ทรงกลม กรณีฐานรอง BK-7 มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศสูงกว่า กรณีฐานรอง ซิลิคอน
- ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ กรณีฐานรอง BK-7 มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศสูงกว่า กรณีฐานรอง ซิลิคอน
- ทรงแท่งสี่เหลี่ยม กรณีฐานรอง BK-7 มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศสูงกว่า กรณีฐานรอง ซิลิคอน

▪ ทรงวงรี กรณีฐานรอง BK-7 มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศน้อยกว่า กรณีฐานรอง ซิลิคอน

กรณีสาม คือ การเปรียบเทียบระหว่างรูปทรงสมมาตรและรูปทรงไม่สมมาตร รูปทรงไม่สมมาตรที่ระยะห่าง 5 และ 10 นาโนเมตร จะมีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศมีค่าสูงกว่ารูปทรงสมมาตร และช่วงค่าความยาวคลื่นแสงที่ตอบสนองต่อการเกิดปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อดังกล่าว พบว่าอยู่ระหว่างช่วงความยาวคลื่น 650–750 นาโนเมตร ในขณะที่อนุภาครูปทรงสมมาตรพบว่าความยาวคลื่นแสงที่ตอบสนองต่อการเกิดปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนอยู่ในช่วง 500–600 นาโนเมตร จากที่กล่าวมานี้เกิดขึ้นที่อนุภาคทองคำนาโนรูปทรงวงรี ส่วนรูปทรงสมมาตร ทรงกลมและทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทรงกลม ขนาด 10 นาโนเมตร มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ 5.70×10^5 V/m ซึ่งสูงกว่าทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และรูปทรงไม่สมมาตร ทรงวงรีและทรงแท่งสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทรงวงรี ขนาดอนุภาค (แกนตั้ง 10 , แกนนอน 40 นาโนเมตร) มีค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทองคำนาโนและไดอิเล็กตริกที่เป็นอากาศ 6.30×10^5 V/m ซึ่งสูงกว่าทรงแท่งสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาโปรแกรมที่สนับสนุนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะเป็นแนวคิดที่จะต่อยอดนำไปสร้างชุดทดลองและพัฒนาให้เป็นประโยชน์ทางการแพทย์ ดังต่อไปนี้

1. นำไปพัฒนาให้เป็นไบโอเซนเซอร์ (bio - sensor) ตรวจจับเชื้อโรคในเซลล์ร่างกายของมนุษย์ที่ต้องอาศัยหลักการของ Surface Plasmon Resonance
2. นำไปพัฒนาให้เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของสารชีวโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kelly KL, Coronado E, Zhao L, Schatz GC. 2003. The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment. *J. Phys. Chem. B* 107:668–77
- [2] <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Pge/Unit1-3.html>
- [3] Bohren, CF.; Huffman, DR. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles.* WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; Weinheim: 1983.
- [4] Nie S, Emory SR. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced. *Science.* 1997;275:1102. doi: 10.1126/science.275.5303.1102
- [5] K. M. Mayer and J. H. Hafner, “Localized surface plasmon resonance sensors,” *Chemical Reviews*, vol. 111, no. 6, pp. 3828–3857, 2011.
- [6] K. Kneipp, H. Kneipp, I. Itzkan, R. R. Dasari, and M. S. Feld. *J. Phys.: Condens. Matter* 2002;14:R597–R624.
- [7] Y.M.W.Zhou, H.Yang, Y.Ding, and X.Luo, “A label-free biosensor based on silver nanoparticles array for clinical detection of serum p53 in head and neck squamous cell carcinoma,” *International Journal of Nanomedicine*, vol.6, no.1, pp.381–386, 2011.
- [8] สุตตะนนท์ โสวินิตย์. 2553. “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [9] คลังความรู้ SciMath (ฟิสิกส์) การหักเหของแสง <http://www.scimath.org/lesson-physics/item>
- [10] Vincenzo Amendola^{1,2}, Roberto Pilot^{1,2}, Marco Frasconi¹, Onofrio M Maragò³ and Maria Antonia Iati³ Published 20 April 2017 • © 2017 IOP Publishing Ltd
- [11] M.A. El-Sayed Small is different: Shape-, size- and composition-dependent properties of some colloidal semiconductor nanocrystals *Acc Chem Res*, 37(5) (2004), pp. 326-333
- [12] Bohren CF, Huffman DR. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles.* New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1998.
- [13] Saha K, Agasti S S, Kim C, Li X and Rotello V M 2012 *Chem. Rev.* 112 2739–79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้