

การหอดูหาไฟ ไดอิเล็กตริกคริสตัลในธรรมชาติ
A STUDY OF PHOTONIC CRYSTALS IN NATURAL



นางสาววิมลชนันท์ ศศิวิมลพันธ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

การศึกษาโฟโตนิกส์คริสตัลในธรรมชาติ

A STUDY OF PHOTONIC CRYSTALS IN NATURAL



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **คณะวิทยาศาสตร์** นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

A STUDY OF PHOTONIC CRYSTALS IN NATURAL



Miss. Tanyanan

Tatiyawattanachai

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาโฟโตนิกส์คริสตัลในธรรมชาติ
 A STUDY OF PHOTONIC CRYSTALS IN NATURAL

ชื่อนักศึกษา นางสาวธันยนันท์ ตติยวัฒน์ชัย

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.สุรชาติ กมลดิลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
 ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ประธาน บุรณศิริ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง	
ดร.กীরุทธิ์ ศรีนวลจันทร์	
อ.สุรชาติ กมลดิลก	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานลิขสิทธิ์คณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่ต่อสาธารณชนโดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะฯ ทั้งนี้มีการนำไปใช้
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาโฟโตนิกส์คริสตัลในธรรมชาติ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธันยนันท์ ตติยวัฒน์ชัย
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.สุรชาติ กมลคิลก

บทคัดย่อ

การศึกษาโฟโตนิกส์คริสตัลในธรรมชาติ บนพื้นฐานการศึกษาโครงสร้างปีกของผีเสื้อ ที่มีสีส้มที่สวยงามสดใส และเหลือบระยิบ ในช่วงสีที่ตามองเห็น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการศึกษาทดลองชี้ให้เห็นว่า สีส้มที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากเม็ดสีหรือสีหรือสีของธาตุเพียงนั้นๆ เพียงอย่างเดียว แต่เป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับในบางส่วนของแสงขาวเมื่อผ่านโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบตามรูปแบบ โครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัลในมิติต่างๆ

คำสำคัญ : โฟโตนิกส์คริสตัล , SEM , ผีเสื้อปีกไขใหญ่ , ผีเสื้ออุงทอง , ผีเสื้อหนอนกาฝาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	A STUDY OF PHOTONIC CRYSTALS IN NATURAL
Students	Miss.Tanyanan Tatiyawattanachai
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Applied Physics
Academic Year	2012
Advisor	Surachart Kamoldilok

ABSTRACT

Photonic crystals have been studied based on a structure of butterflies have beautiful bright color and Iridescent in the range of visible light by using Scanning Electron Microscope (SEM) equipment. The fair result was obtained to show the color occurs not come from any melanin pigment of element but occurs from structure cause to reflect. when white light source drop to wing structure butterfly. By Photonic crystals have one, two and three dimensions

Keyword : Photonic Crystals , SEM , Great Egg-fly butterfly, The Golden Birdwing butterfly , Painted Jezebel butterfly

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความกรุณาจาก อ.สุรชาติ กมลคิลิก
อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน
และให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมถึงปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน รวมทั้งรุ่นพี่ในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการ
พิเศษนี้ รวมทั้งแนะนำแนวทางในการนำเสนอรายงาน ตลอดจนคำแนะนำทางด้านวิชาการ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและการอบรม สั่งสอน
ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ
อุปการะทุน ในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นางสาวธันยรัตน์ ตติยวัฒน์ชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
คำย่อและสัญลักษณ์	IV
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โฟโตนิกส์ (Photonic)	3
2.1.1 โฟโตนิกส์คริสตัล (Photonic crystals)	4
2.2 โครงสร้างและสีของปีกผีเสื้อ	5
2.2.1 สีของปีกผีเสื้อ	5
2.2.2 โครงสร้างของปีกผีเสื้อ	5
2.2.2.1 แบบที่ 1 RIDGE LAMELLAE	6
2.2.2.2 แบบที่ 2 Body lamellae	7
2.2.2.3 แบบที่ 3 Body Scattering	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังอาจถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การเขียนแบบโครงสร้างของปีกผีเสื้อ	11
2.4 คลื่นแสงในช่วง ที่ตามองเห็น (Visible Light)	12
2.5 สมการของการแทรกสอด	13
2.6 การแทรกสอดของแสงผ่านฟิล์มบาง (Thin film)	13
2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์	16
3.2 วิธีการทดลอง	18
3.2.1. เลือกปีกผีเสื้อที่มีสีเหลือง เปลี่ยนสีได้เมื่อปรับมุม และผีเสื้อที่มีสีสันปกติไม่เหลือง	18
3.2.2 ศึกษาโครงสร้างปีกผีเสื้อโดยการใช้เครื่อง SEM	18
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ผีเสื้อหอนกาฝาก	20
4.1.1 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของปีกผีเสื้อหอนกาฝาก	21
4.2 ผีเสื้ออุงทองเพศผู้	24
4.2.1 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ผีเสื้ออุงทองบริเวณสีเหลือง	24
4.2.2 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ผีเสื้ออุงทองบริเวณสีดำ	26
4.3 ผีเสื้อปีกไข่ใหญ่เพศผู้	27
4.3.1 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ผีเสื้ออุงทองบริเวณสีฟ้า	27
4.3.2 สมการและการคำนวณ การเกิดสีฟ้าที่ได้เมื่อเปลี่ยน มุมของแหล่งกำเนิดแสงขาว	29
4.3.3 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ผีเสื้ออุงทองบริเวณสีขาว	30
4.3.4 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ผีเสื้ออุงทองบริเวณสีน้ำตาล	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 การเกิดลี้ของผีเสื้ออุงทองเพศผู้	32
5.2 การเกิดลี้ของผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้	32
5.3 การเกิดลี้ของผีเสื้อหนอนกาฝาก	33
5.4 ข้อเสนอแนะ	33
เอกสารอ้างอิง	34
ภาคผนวก	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการส่งผ่านของแสงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัตถุชนิดหนึ่ง	3
2.2 รูปแบบโครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัล ใน 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ	4
2.3 รูปแบบโครงสร้างของปีกผีเสื้อ	5
2.4 สีและโครงสร้างของปีกผีเสื้อ Morpho rhetenor	6
2.5 โครงสร้างของปีกผีเสื้อแบบ Ridge Lamellae	6
2.6 สีของผีเสื้อแบบ Body lamellae	7
2.7 โครงสร้างการเกิดสีของผีเสื้อแบบ Body lamellae	8
2.8 โครงสร้างปีกผีเสื้อแบบ Body Scattering ที่พบบนเขาสูง	9
2.9 โครงสร้างปีกผีเสื้อแบบ Body Scattering ที่พบบริเวณที่ราบ	10
2.10. การประยุกต์ใช้โดยการเลียนแบบโครงสร้างปีกผีเสื้อ	11
2.11 ช่วงความยาวคลื่นแสงและความถี่	12
2.12 สีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น	12
2.13 การสะท้อนและการหักเหของแสงที่แผ่นฟิล์มบาง	13
2.14 แสดงการสะท้อนแลหักเหของแสงผ่านฟิล์มบาง และการพิสูจน์สมการ	14
2.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)	15
3.1 ผีเสื้ออุงทองเพศผู้ ด้านหน้า(ซ้าย) ด้านหลัง(ขวา)	16
3.2 ผีเสื้อหนอนกาฝากธรรมชาติเพศผู้ ด้านหน้า (ซ้าย) ด้านหลัง (ขวา)	16
3.3 ผีเสื้อปีกไข่เพศผู้ ด้านหน้า(ซ้าย) ด้านหลัง(ขวา)	17
3.4 เครื่อง coat ทอง (Model 682 Precision Etching Coating System (PECSTM))	17
3.5 เครื่อง SEM และ จอแสดงภาพที่ได้	18
3.6 ปีกผีเสื้อที่ใช้ในการศึกษา	18
3.7 รูปปีกผีเสื้อที่ coat ทองแล้วก่อนนำเข้าเครื่อง SEM นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า	19
4.1 แสดงภาพสีของปีกผีเสื้อหนอนกาฝาก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป	20

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ C1 กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) , 3000 เท่า (ขวา)	21
4.3 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง กำลังขยาย 10000 เท่า บริเวณพื้นที่ C1 (d) สีส้ม	21
4.4 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง กำลังขยาย 10000 เท่า บริเวณพื้นที่ D1(สีส้ม)	22
4.5 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง กำลังขยาย 10000 เท่า และบริเวณพื้นที่ A1(สีขาว)	22
4.6 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ B1 กำลังขยาย 2000 เท่า	23
4.7 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ B1 กำลังขยาย และ 10000 เท่า	23
4.8 แสดงภาพสีของปีกผีเสื้อทองเพศผู้	24
4.9 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ C2 กำลังขยาย 1000 เท่า (บน))	25
4.10 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ C2 กำลังขยาย 10000 เท่า	25
4.11 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ C2 30000 เท่า (ล่างขวา)	25
4.12 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ A2 กำลังขยาย 1000 เท่า	26
4.13 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ A2 กำลังขยาย 10000 เท่า (n)	26
4.14 ผีเสื้อปีกไขว้ใหญ่เพศผู้	27
4.15 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , กล้องอิเล็กตรอนพลังงานสูง บริเวณพื้นที่ A3 กำลังขยาย 500 เท่า	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้ บริเวณพื้นที่ A3 กำลังขยาย 20000 เท่า (บน) และ 40000 เท่า (ล่าง)	28
4.17 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้ บริเวณพื้นที่ A3 กำลังขยาย 20000 เท่า (บน) และ 40000 เท่า (ล่าง)	28
4.18 แบบจำลองโครงสร้างการเกิดสีของสันปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้	29
4.19 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้ บริเวณพื้นที่ C3 กำลังขยาย 20000 เท่า	30
4.20 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้ บริเวณพื้นที่ B3 กำลังขยาย 1000 เท่า (บน) และ 20000 เท่า (ล่าง)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope
PECSTM	เครื่อง coat ทองชนิด Precision Etching Coating System
Coat	การเคลือบให้เกิดการนำไปไฟฟ้า
Mag.	กำลังขยายสูงสุดของเครื่อง SEM
nm	นาโนเมตร
mm	มิลลิเมตร
1.0 KX	หน่วยกำลังขยาย 1000 เท่า
λ	ค่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

แสงมีความสำคัญมาก ในการดำเนินชีวิตมาเป็นเวลานาน ปัจจุบันนี้ ไม่ว่าจะอยู่ที่ไหนก็สามารถพบได้ทั่วไป แสงที่พบเห็นส่วนมากจะมีสีต่างกันไป เนื่องมาจาก การดูดกลืน การโพโรซ์ การสะท้อน และการหักเหของแสง ผ่าน โครงสร้างของสิ่งมีชีวิตหรือสิ่งของต่างๆทำให้แสงสีขาวแยกเป็นสีต่างๆได้ เหมือนกับหลักการของโฟโตนิคส์คริสตัล โดยธรรมชาติแล้วผีเสื้อเป็นสิ่งมีชีวิตที่สวยงาม และน่าหลงใหล สีที่สวยงามของผีเสื้อ ดึงดูดให้ผู้คนจำนวนมากไม่น้อยหลงใหลในตัวมัน ยิ่งไปกว่านั้นในปีกของผีเสื้อยังมีความลับที่ความน่าสนใจมากกว่า คือ โครงสร้างปีกผีเสื้อที่ทำให้มีสีสันสดใส และผีเสื้อบางชนิดสามารถมองเห็นสีที่ต่างไปได้เมื่อเปลี่ยนมุมในการรับแสง โดยที่ไม่มีเม็ดสีที่ทำให้เกิดเป็นสีและไม่ใช่สีของธาตุเหล่านั้น และสำหรับการเรียนแบบ โครงสร้างของปีกผีเสื้อนี้อาจนำไปสู่เทคโนโลยีไฮเทคในอนาคตแบบที่คาดไม่ถึงอีกมากมาย ดังนั้นการเลียนแบบ โครงสร้างของปีกผีเสื้อ หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆที่มีโครงสร้างในรูปแบบเดียวกับหลักการของโฟโตนิคส์คริสตัลจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับการพัฒนาโครงสร้างวัสดุในระดับนาโนให้เกิดสีต่างๆโดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้เม็ดสี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาโฟโตนิคส์คริสตัลที่พบในธรรมชาติ
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างของปีกผีเสื้อที่ส่งผลต่อการเกิดสี
- 1.2.3 ศึกษาหลักการเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
- 1.2.3 สามารถนำความรู้ที่ได้เรียนมาประยุกต์ใช้กับโครงงานพิเศษนี้ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาหลักการของโฟโตนิคส์คริสตัล
- 1.3.2 ศึกษาชนิดของผีเสื้อที่มีโครงสร้างแบบโฟโตนิคส์คริสตัล
- 1.3.3 ศึกษาโครงสร้างการเกิดสีของผีเสื้อที่มีโครงสร้างแบบโฟโตนิคส์คริสตัล

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 1.3.4 ศึกษาหลักการสะท้อนและการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 1.3.5 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนดำเนินงาน
มิถุนายน-กรกฎาคม พ.ศ.2555	ศึกษาการองค์ประกอบและโครงสร้างของโฟโตนิกส์คริสตัลในธรรมชาติ
กรกฎาคม-สิงหาคม พ.ศ.2555	ศึกษาชนิดของผีเสื้อที่มีโครงสร้างแบบโฟโตนิกส์คริสตัล
สิงหาคม-กันยายน พ.ศ.2555	ศึกษาการใช้เครื่องมือในการทดลอง
ตุลาคม-พฤศจิกายน พ.ศ.2555	ทดลองและวิจัย
ธันวาคม พ.ศ.2555 – กุมภาพันธ์ พ.ศ.2556	ศึกษาผลการทดลองที่ได้ และวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจถึงโครงสร้างที่สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ
- 1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องของโฟโตนิกส์คริสตัล
- 1.5.3 ความรู้ความเข้าใจในหลักการของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- 1.5.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โฟโตนิกส์ (Photonic)

โฟโตนิกส์ เป็น เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง และการให้กำเนิดพลังงานในรูปของแสง หรือ โฟตอน (photon) รวมถึงการตรวจจับ และการนำแสงไปประยุกต์ใช้ด้านต่าง ๆ เช่น การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด การเลี้ยวเบน และการโพลาไรซ์ อุปกรณ์ที่ใช้ในทางโฟโตนิกส์ จะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับแสง เช่น กระจก เลนส์ ปริซึม เส้นใยนำแสง แผ่นกรองแสง จอภาพแบบผลึกเหลว เกรตติ้งสำหรับแบ่งแสง หรือสีของแสงออกจากกัน เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แสดงการส่งผ่านของแสงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุชนิดหนึ่ง

คุณสมบัติที่โฟโตนิกส์เหนือกว่าอิเล็กทรอนิกส์ คือ ในด้านการส่งข้อมูล จะพบว่าลำแสงหลายลำสามารถเคลื่อนที่ตัดกันได้โดยไม่สูญเสียข้อมูล ในขณะที่ทางอิเล็กทรอนิกส์ไม่มีทางเป็นไปได้ถ้าให้สายไฟสองเส้นมาตัดกันโดยไม่ให้กระแสไฟฟ้าในสายแต่ละเส้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

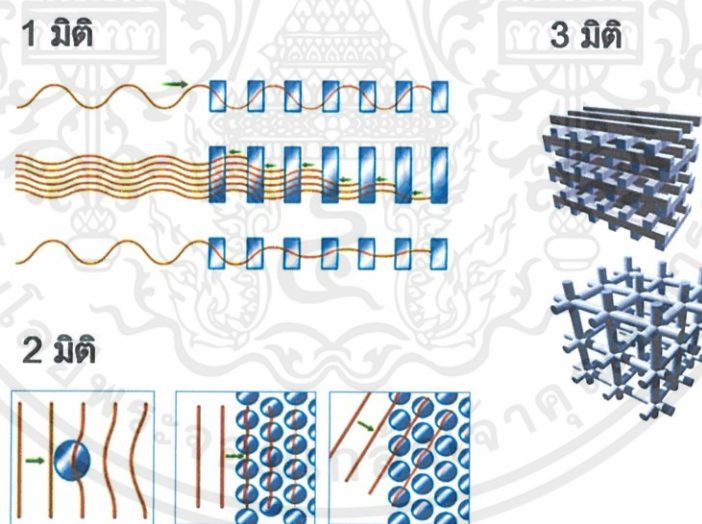
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 โฟโตนิกส์คริสตัล (Photonic crystals)

โฟโตนิกส์คริสตัล เป็น โครงสร้างระดับนาโนแสงในระยะ ที่ได้ออกแบบให้เกิดผลของการเคลื่อนที่ของโฟตอนในลักษณะที่คล้ายกัน ซึ่งระยะของผลึกสารกึ่งตัวนำส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โฟโตนิกส์คริสตัลเกิดขึ้นในได้ธรรมชาติ และได้มีการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ในหลายรูปแบบ มากกว่า 100 ปี

โฟโตนิกส์คริสตัล จะประกอบไปด้วย โครงสร้างระดับนาโนของธาตุที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EM) ในลักษณะเดียวกันโดยที่พลังงานศักย์ ของธาตุในผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยการกำหนดแถบพลังงานหวงห้ามและยอมให้ผ่านได้

หลักของโฟโตนิกส์คริสตัล ประกอบไปด้วยบริเวณภายในซ้ำๆสม่ำเสมอ ที่มีค่าคงไดอิเล็กตริกสูงและต่ำ โฟตอน(ทำตัวเป็นคลื่น)จะแพร่ผ่านโครงสร้างเหล่านี้หรือไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของมัน ประกอบด้วยความแถบยาวคลื่นที่ยอมให้เดินทางผ่านได้ และ แถบของความยาวคลื่นที่ไม่ยอมให้คลื่นผ่านไปได้เรียกว่า photonic band gaps สิ่งนี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางแสงที่แตกต่างกันเช่นการยับยั้งการเกิด spontaneous emission ,กระจกสะท้อนสูงรอบทิศทาง และ แนวทางของคลื่นที่มีการสูญเสียต่ำ และ โครงสร้างของโฟโตนิกส์ประกอบด้วยมิติต่างกันดังรูปที่ 2.1



<http://www.physics.buffalo.edu/phy514/w>

รูปที่ 2.2 รูปแบบโครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัล ใน 1มิติ 2มิติ และ 3มิติ

เนื่องจากปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์พื้นฐานอยู่บนพื้นฐานของการเลี้ยวเบน, ระยะห่างของผลึกนี้คือโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์จะต้องมี ระยะของความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของคลื่น EM คือประมาณ 200 นาโนเมตร (สีฟ้า) ถึง 350 นาโนเมตร (สีแดง) สำหรับโฟโตนิกส์คริสตัลที่ดำเนินงานในช่วงของสเปกตรัมที่ตามองเห็นบริเวณที่ซ้ำๆกันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงและต่ำ ซึ่งต้องมีมิติและสิ่งนี้จะทำให้การประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับโฟโตนิกส์คริสตัลทางแสงยุ่งยากและซับซ้อน

2.3 โครงสร้างและสีของปีกผีเสื้อ

2.2.1 สีของปีกผีเสื้อ สีของปีกผีเสื้อในธรรมชาติที่สามารถจำแนกได้เป็น สองประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. เกิดจากเม็ดสีที่เคลือบอยู่บนปีกผีเสื้อ

2. เกิดจากโครงสร้างของปีกที่มีผลต่อการหักเห และ สะท้อนแสง โดยที่โครงสร้างแบบที่ สองนี้พบได้ในปีกผีเสื้อ และสีที่มีผลต่อการสะท้อนแสงนี้เอง ที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความสำคัญต่อการศึกษาเทคโนโลยีเชิงแสง (Photonic)

2.2.2 โครงสร้างของปีกผีเสื้อ

โครงสร้างของปีกผีเสื้อมีหลากหลายรูปแบบสามารถจำแนกหลัก ๆ ได้ 3 รูปแบบใหญ่ แต่ในรายละเอียดของทั้งสามรูปแบบนี้ก็ยังคงมีความแตกต่างกันอีก ซึ่งตัวอย่าง 3 รูปแบบหลัก ๆ ของปีกผีเสื้อมีดังต่อไปนี้

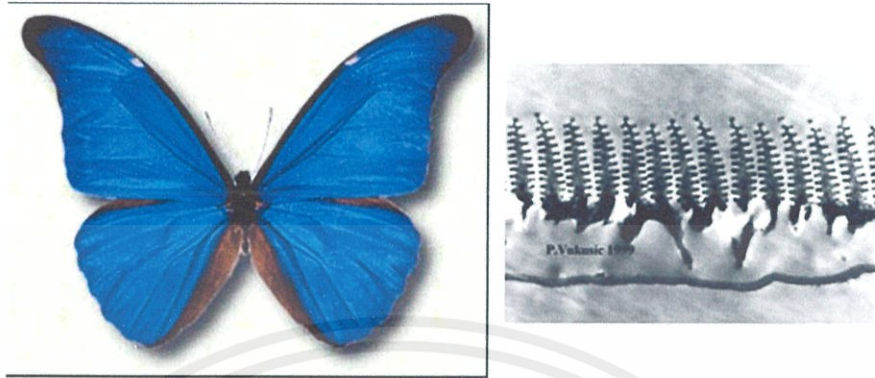


<http://www.learners.in.th/blogs/posts/9937>

รูปที่ 2.3 รูปแบบโครงสร้างของปีกผีเสื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

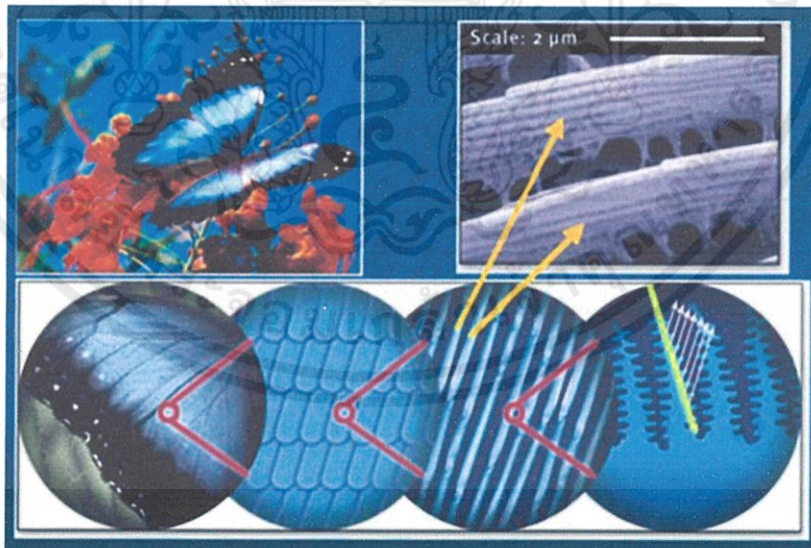
2.2.2.1 แบบที่ 1 RIDGE LAMELLAE



<http://www.learners.in.th/blogs/posts/9937>

รูปที่ 2.4 สีและ โครงสร้างของปีกผีเสื้อ Morpho rhetenor

โครงสร้างแบบนี้ตัวอย่างเช่น โครงสร้างปีกผีเสื้อ Morpho rhetenor เมื่อส่องดูปีกผีเสื้อชนิดนี้ตามขวางพบว่ามีโครงสร้างลักษณะคล้ายกับต้นสนเรียงต่อกัน โดยต้นสนหนึ่งต้นจะประกอบด้วย ก้านประมาณ 10 ก้านมาเชื่อมต่อกับแกนกลาง ทั้งสองด้าน โดยโครงสร้างนี้ แต่ละอันจะมีความหนาประมาณ 90 นาโนเมตร เมื่อแสงตกกระทบโครงสร้างนี้ในมุมที่แตกต่างกันจะเกิดการหักเห ส่งผลให้สีที่มองเห็นเปลี่ยนไป



<http://www.learners.in.th/blogs/posts/9937>

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของปีกผีเสื้อแบบ Ridge Lamellae

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

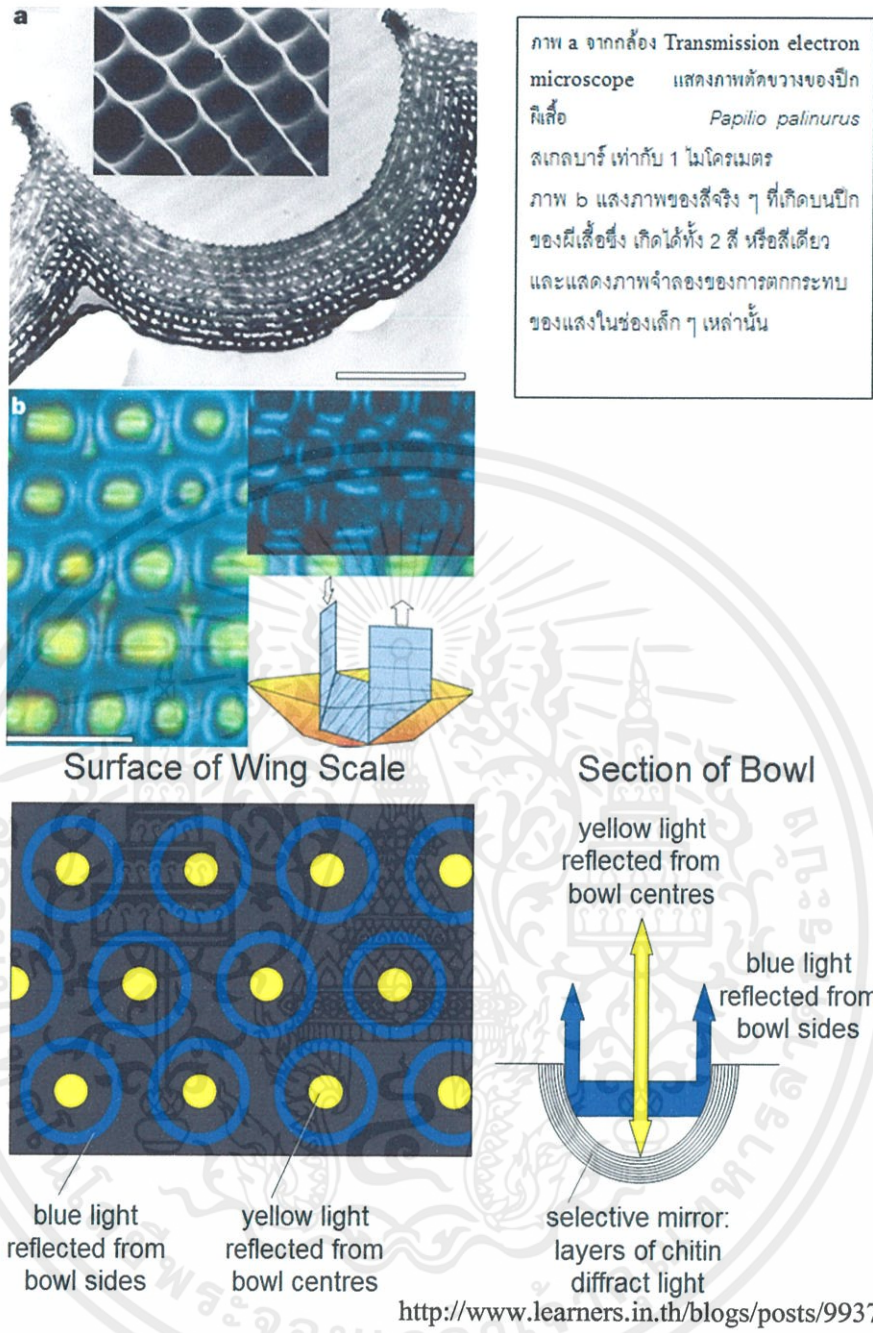
2.2.2.2 แบบที่ 2 Body lamellae



รูปที่ 2.6 สีของผีเสื้อแบบ Body lamellae

โครงสร้างปีกในกลุ่มนี้มีลักษณะเป็นหลายชั้น (multilayer) ตัวอย่างชนิดผีเสื้อที่มีลักษณะปีกแบบนี้เช่น *Papilio palinurus* ซึ่งมีลักษณะเป็นสีเหลืองเขียว สีเหลืองเขียวที่มองเห็นนั้นเกิดจากการสะท้อนแสงใน โครงสร้างปีกที่มีลักษณะเป็น โครงสร้างขนาดเล็กซ้อนกัน อยู่หลาย ๆ ชั้น บางชนิดมีถึง 10 ชั้นซ้อนกัน โดยช่องที่อยู่ในแต่ละชั้นมีสันนูนแบ่งช่อง กระทบลงในช่องแสงด้านบนที่มีลักษณะ โค้งลงคล้ายหน้าต่าง ถ้าหากมุมแสงที่ตกกระทบต่างกันจะ สะท้อนแสงออกมาต่างกัน เช่น ถ้าหากแสงตกลงในช่องและบนสันจะสะท้อนออกมาเป็นสีเขียวซึ่ง เกิดจากการผสมของแสงสีเหลืองกับแสงสีฟ้า ถ้าหากมุมของแสงตกกระทบลงที่สันของช่องเพียง อย่างเดียวจะเห็นเป็นสีฟ้า ดังนั้น มุมของแสงที่ตกกระทบบนปีกจะส่งผลต่อสีที่เรามองเห็น บางครั้งเราจะมองเห็นปีกเป็นสีเขียวแต่บางมุมมองอาจมองเห็นเป็นสีฟ้า และสีที่มองเห็นได้จาก โครงสร้างประเภทนี้จะไม่สโตโตเท่ากับประเภทแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

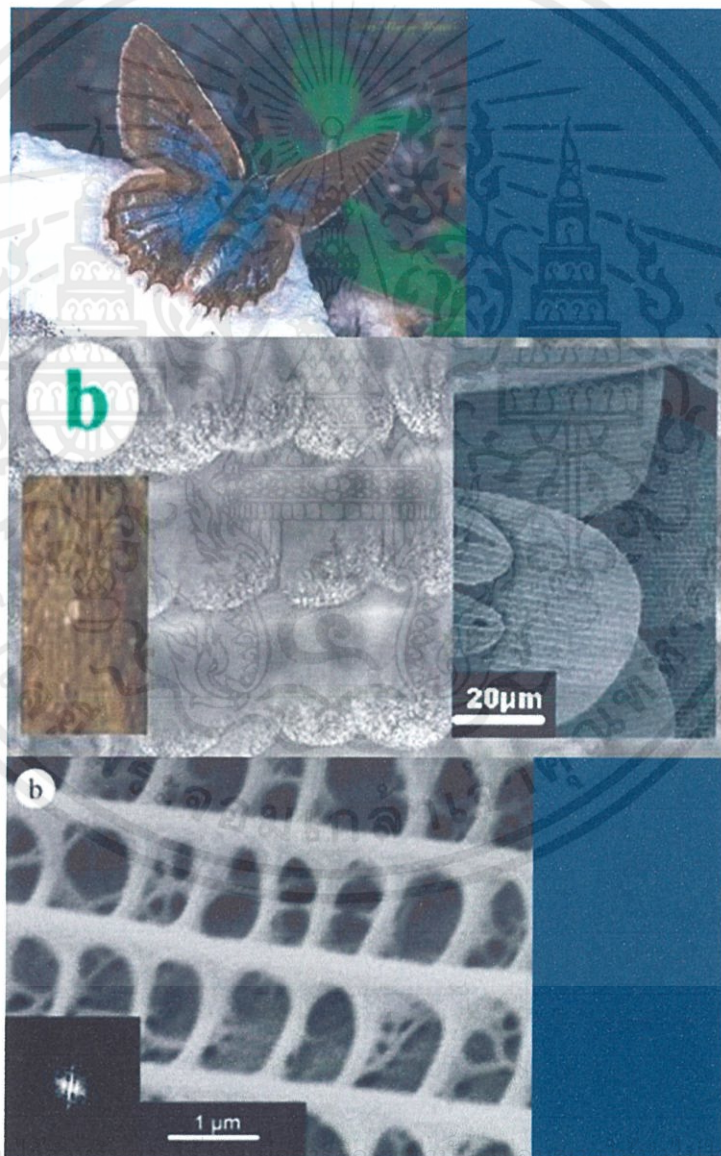


รูปที่ 2.7 โครงสร้างการเกิดสีของผีเสื้อแบบ Body lamellae

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.3 แบบที่ 3 Body Scattering

ผีเสื้อตัวอย่างในกลุ่มนี้คือ Lycaenid butterfly เช่น Polyommatus daphnis หรือ Meleager's blue ถ้าหากผีเสื้อชนิดนี้ที่อยู่บนภูเขาสูงประมาณ 2000-2500 เมตร จะมีปีกเป็นสีน้ำตาล แต่ถ้าหากอยู่ในที่ราบจะมีสีฟ้าสดใส เพราะว่าปีกของผีเสื้อชนิดนี้บริเวณด้านบนของปีกเป็นโครงสร้างสารโคตินที่มีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำคือมีรูพรุนเล็ก ๆ รัศมีนาโนเมตร ซึ่งนักก็วิทยาเรียกโครงสร้างนี้ว่า paper-pot ซึ่งเป็น ช่องว่างโฟโตนิกส์ (Photonic band gap) ที่พบได้ในธรรมชาติ ผีเสื้อที่มีปีกฟ้า จะพบรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ที่สานกันคล้ายตาข่ายที่มีตาถี่ เป็นจำนวนมาก แต่ในกรณีผีเสื้อที่มีปีกสีน้ำตาลจะพบว่าจำนวนรูพรุนของปีกจะลดลง และขนาดของรูพรุนจะใหญ่ขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี <http://www.learners.in.th/blogs/posts/9937> โปรดใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 โครงสร้างปีกผีเสื้อแบบ Body Scattering ที่พบบนภูเขาสูง



<http://www.learners.in.th/blogs/posts/9937>

รูปที่ 2.9 โครงสร้างปีกผีเสื้อแบบ Body Scattering ที่พบบริเวณที่ราบ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างชีวภาพนี้ เนื่องจากผีเสื้อที่อยู่ในที่สูงจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่หนาวเย็น พวกมันจึงปรับโครงสร้างปีกให้มีรูพรุนที่เปลี่ยนไป เพื่อช่วยให้การดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากพวกมันต้องการให้ร่างกายอบอุ่น เช่นเดียวกับคนที่ใส่เสื้อสีเข้มจะรู้สึกร้อนกว่าคนใส่เสื้อสีอ่อนส่วนผีเสื้อในที่ราบมีความอบอุ่นเพียงพอไม่จำเป็นต้องปรับโครงสร้างใด ๆ ก็ยังคง มีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้ปีกเป็นสีฟ้า

2.3 การเลียนแบบโครงสร้างของปีกผีเสื้อ

ผีเสื้อบางชนิด เปลี่ยนสีปีก เช่น จากสีน้ำเงิน ไปเป็นสีน้ำตาล การเปลี่ยนแปลงสีปีกนี้ ไม่ได้ อาศัยสารมีสีชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในปีกผีเสื้อ แต่อาศัยหลักการหักเห และการสะท้อนของแสงแดดที่ มา ตกกระทบลงบนปีก โดยหากมุมที่แสงตกกระทบมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สีที่ปรากฏบนปีก ผีเสื้อจะแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าแสงแดดมาตกกระทบกับ โครงสร้างที่อยู่ในปีกผีเสื้อในมุมใด มุมหนึ่งจะสะท้อนแสงสีน้ำเงินออกมา แต่ในขณะที่เดียวกันก็ดูดซับแสงสีอื่น ๆ ไว้ทั้งหมด ทำให้เรา เห็นผีเสื้อมีปีกสีน้ำเงิน เมื่อเมื่อใช้กล้องขยายกำลังสูงส่องดูปีกผีเสื้อที่ สามารถเปลี่ยนสีก็จะพบรู พูนที่มีขนาดในช่วงนาโนจำนวนมหาศาลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เพื่อทำหน้าที่ เป็นเสมือน ผลึกโฟโตนิกส์ในธรรมชาติ นอกจากนี้ การเปลี่ยนสีของปีกผีเสื้อชนิดนี้ ยังสามารถเปลี่ยนแปลง ไป ตามอุณหภูมิด้วย



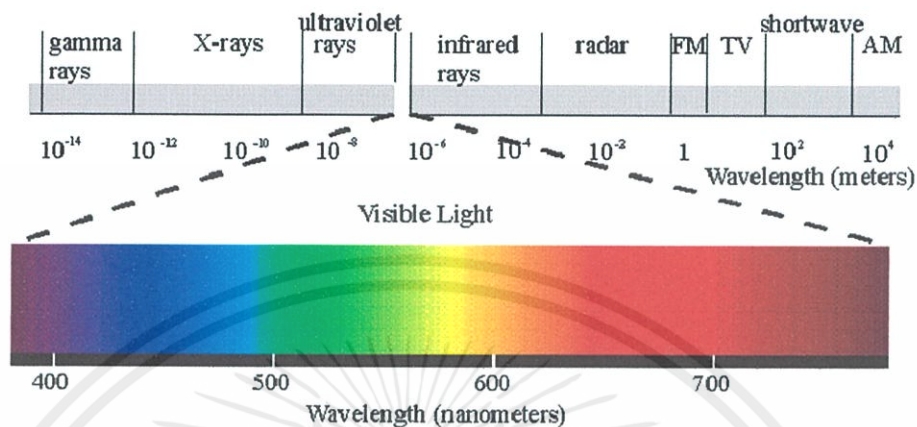
http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/TN213B_p32-36.pdf

รูปที่ 2.10 การประยุกต์ใช้โดยการเลียนแบบ โครงสร้างปีกผีเสื้อ

จากการค้นพบนี้ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างผลึกโฟโตนิกส์สังเคราะห์ (photonic crystal) ที่ยึดหยุ่นได้ดี และสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป สามารถ นำไปใช้ผลิตเสื้อผ้าป้องกันความร้อน และใช้ออกแบบหน้าจอแสดงผลโดยอาศัยคุณสมบัติของการ เปลี่ยนสีโดยไม่ใช้เม็ดสี แต่เป็นสีที่ได้มาจาก การจัดเรียงตัว เพื่อสะท้อนคลื่นแสงในช่วงความถี่ที่ เหมาะสมทำให้ปรากฏเป็นสีขึ้นมา หน้าจอแสดงผลจะใช้สารที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถจัดเรียง โครงสร้างของตัวเองให้สะท้อนแต่สีที่ต้องการออกมา ไม่ใช่การสร้างสีจากตัวเอง ทำให้ใช้ พลังงานน้อยลงอย่างมาก ที่สำคัญยังสามารถนำไปใช้ในที่ ๆ มีแสงสว่างมาก ๆ อย่างกลางแจ้งได้ อีกด้วย นอกจากนี้ ยังมีการใช้รูปแบบการเรียงตัวของเกล็ดปีกผีเสื้อ ที่มีขนาดบางจิ๋วเพื่อพัฒนา รูปแบบของแผงโซลาร์เซลล์ ที่จะสามารถประหยัดพื้นที่การจัดวางและมีประสิทธิภาพในการผลิต ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สูงกว่าแผงโซลาร์ เซลล์รูปแบบเก่าที่ต้องการพื้นที่ในการจัดวางมากกว่า ไปใช้

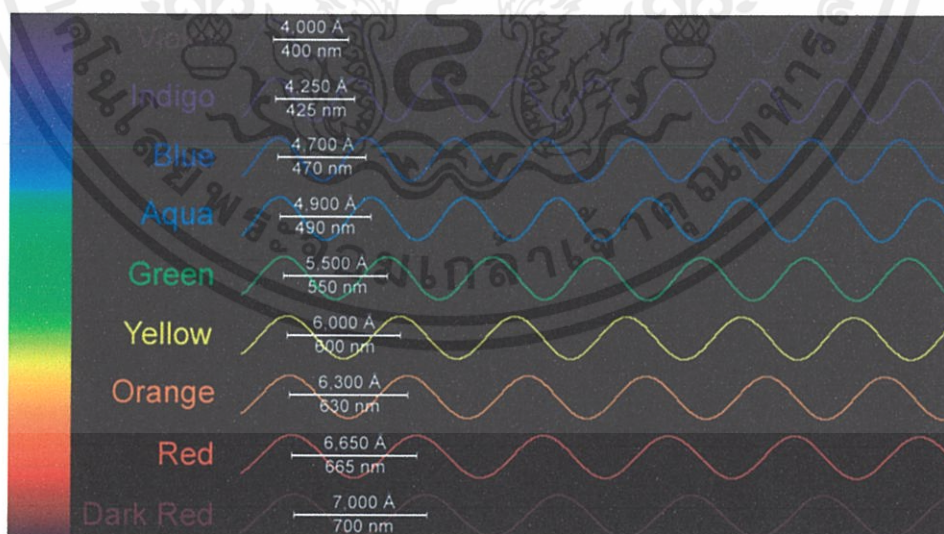
2.4 คลื่นแสงในช่วง ที่ตามองเห็น (Visible Light)

คลื่นแสง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 ช่วงความยาวคลื่นแสงและความถี่

แสงที่ประสาทตาคนรับได้เรียกว่า “แสงที่มองเห็นได้” (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 – 700 nm แสงในช่วงคลื่นนี้ประกอบแสงที่ประสาทตาคนรับได้เรียกว่า “แสงที่มองเห็นได้” (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 – 700 nm แสงในช่วงคลื่นนี้ประกอบด้วยแสงสีต่างกัน ตามปกติประสาทตาของคนสามารถสัมผัสแสงบางช่วงคลื่นที่ส่องมาจากดวงอาทิตย์ได้ แต่ไม่สามารถแยกเป็นสีต่างๆ จึงมองเห็นเป็นสีรวมกันซึ่งเรียกว่า “แสงขาว”



<http://aqua.club.net/forum/lite.php?topic=>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.12 สีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สมการของการแทรกสอด

การแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดขึ้นเมื่อระยะต่างวิถีมีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น หรือ

$$\delta = d \sin \theta_{\text{bright}} = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.1)$$

m คือลำดับของแถบสว่าง $m = 0$ จะเป็นลำดับที่ 0

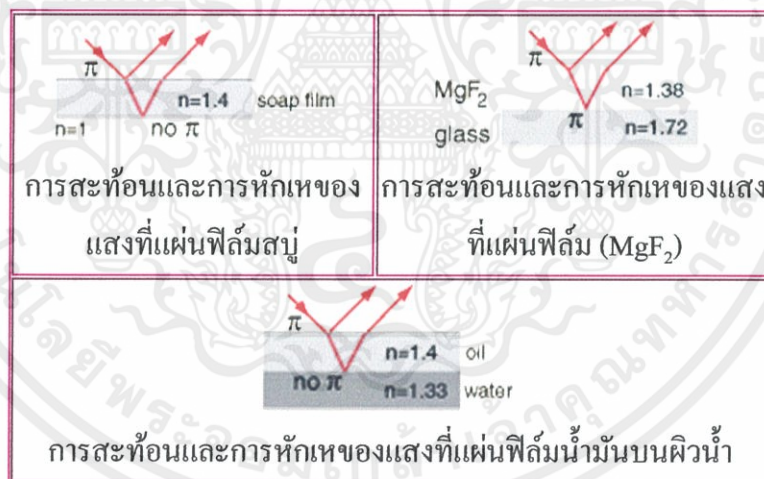
$m = \pm 1$ จะเป็นลำดับที่ 1

การแทรกสอดแบบหักล้างกันจะเกิดขึ้นเมื่อระยะต่างวิถีเป็นจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่น หรือ

$$\delta = d \sin \theta_{\text{dark}} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.2)$$

2.6 การแทรกสอดของแสงผ่านฟิล์มบาง (Thin film)

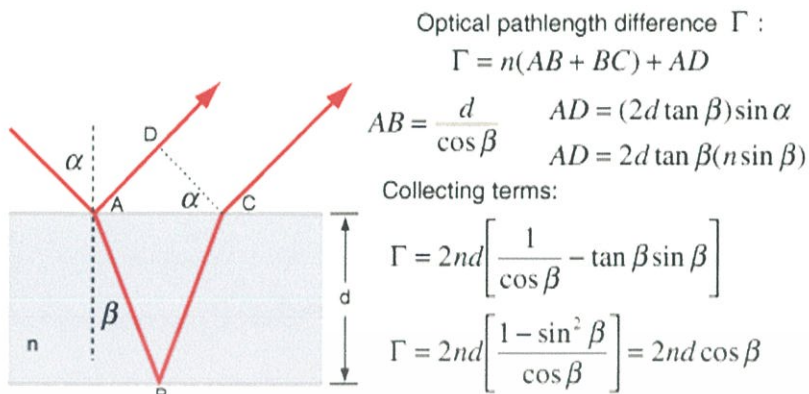
เป็นปรากฏการณ์ ที่ที่เราเห็นลวดลายสีต่างๆ บนแผ่นฟิล์มน้ำมันที่ลอยเหนือน้ำ หรือ ลวดลายสีที่เห็นบนฟองสบู่ การแทรกสอดเกิดขึ้นจากแสงสะท้อนครั้งแรก และแสงหักเหที่เกิดจากการสะท้อนกลับหมดในฟิล์ม(สะท้อนครั้งที่สอง) ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.13 การสะท้อนและการหักเหของแสงที่แผ่นฟิล์มบาง

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 แสงสะท้อนจะมีมุมเปลี่ยนไป 180° ถ้า $n_2 > n_1$ และจะไม่มีมุมเปลี่ยนเฟสถ้า $n_2 < n_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



http://www.sa.ac.th/winyoo/light/light_physics

รูปที่ 2.14 แสดงการสะท้อนเลี้ยวหักเหของแสงผ่านฟิล์มบาง และการพิสูจน์สมการ

จากการพิสูจน์ ในรูปข้างบน แสดงว่า
ถ้าคลื่นที่ A กับ C มีเฟสตรงกัน

การแทรกสอดแบบเสริมกัน(แถบสว่าง) มีสมการเป็น

$$2nd \cos \beta = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.3)$$

การแทรกสอดแบบหักล้างกัน(แถบมืด) มีสมการเป็น

$$2nd \cos \beta = (m - 1/2)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.4)$$

ถ้าคลื่นที่ A กับ C มีเฟสตรงข้ามกัน(ต่างกัน 180°)

การแทรกสอดแบบเสริมกัน(แถบสว่าง) มีสมการเป็น

$$2nd \cos \beta = (m - 1/2)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.5)$$

การแทรกสอดแบบหักล้างกัน(แถบมืด) มีสมการเป็น

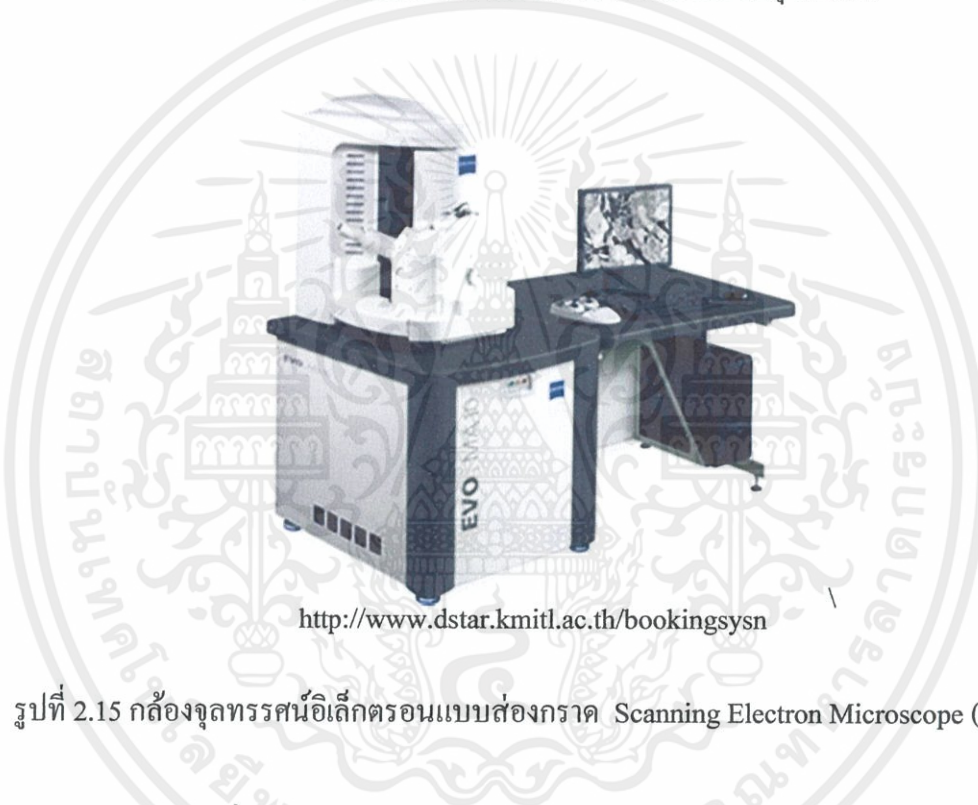
$$2nd \cos \beta = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.6)$$

สมการ (2.1-2.6) มาจาก http://www.sa.ac.th/winyoo/light/light_physical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ การสร้างภาพ ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้ จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 2.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

หลักการการทำงานของเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกรดลงบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยสำหรับการศึกษาโครงสร้างโฟโตนิคส์คริสตัลที่ทำให้เกิดสีในปีกผีเสื้อควรเลือกผีเสื้อที่สามารถพบได้ในประเทศไทยโดยเลือกลักษณะของปีกที่มีหลายสี มีสีสันสดใสและมองเห็นสีเปลี่ยนไปเมื่อขยับปีก สำหรับในการวิจัยนี้ได้เลือกผีเสื้อที่มีลักษณะของสีที่ต่างกันทั้งหมด 3 ชนิด คือ ผีเสื้อดงทอง ผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้ และผีเสื้อหนอนกาฝาก ซึ่งมีลักษณะของสีที่เห็นต่างกัน หลังจากนั้นจึงนำผีเสื้อที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างโดยใช้เครื่อง Coat ทองเพื่อนำไฟฟ้าได้ ก่อนนำไปศึกษาโครงสร้างโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.1 อุปกรณ์

3.1.1. ผีเสื้อดงทองธรรมดาเพศผู้



รูปที่ 3.1 ผีเสื้อดงทองเพศผู้ ด้านหน้า(ซ้าย) ด้านหลัง(ขวา)

3.1.2. ผีเสื้อหนอนกาฝากเพศผู้



รูปที่ 3.2 ผีเสื้อหนอนกาฝากธรรมดาเพศผู้ ด้านหน้า (ซ้าย) ด้านหลัง (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิได้ออกแบบและต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3. ผีเสื้อปีกไข่ใหญ่เพศผู้



รูปที่ 3.3 ผีเสื้อปีกไข่เพศผู้ ด้านหน้า(ซ้าย) ด้านหลัง(ขวา)

3.1.3. เครื่อง coat ทอง



รูปที่ 3.4 เครื่อง coat ทอง (Model 682 Precision Etching Coating System (PECSTM))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

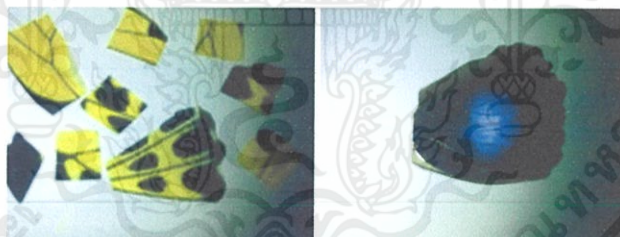


<http://www.dstar.kmitl.ac.th/bookingsysn>

รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
(Carl Zeiss Microscopy : Model EVO® HD) และ จอแสดงภาพที่ได้

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1. เลือกปีกผีเสื้อที่มีสีเหลือง เปลี่ยนสีได้เมื่อปรับมุม และผีเสื้อที่มีสีส้มปกติไม่เหลือง



รูปที่ 3.6 ปีกผีเสื้อที่ใช้ในการศึกษา

3.2.2 ศึกษาโครงสร้างปีกผีเสื้อโดยการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

1. ตัดปีกผีเสื้อบริเวณที่มีสีต่างกัน ให้ได้ขนาดประมาณ 1x1 cm. ไม่เกิน 1.5 cm.
2. นำปีกแต่ละชิ้นที่ตัดไว้ไป coat ทอง โดยที่ได้ทำการ coat ทองให้มีความหนาประมาณ 20 nm เพื่อให้ปีกของผีเสื้อสามารถนำไฟฟ้าได้
3. นำปีกที่ coat ทองไว้แล้วไปส่งคู่มือโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 รูปปึกผีเสื้อที่ coat ทองแล้วก่อนนำเข้าเครื่อง SEM

4. ปรับความดันให้มีขนาดที่เหมาะสม
5. เลือกชิ้นงานที่ต้องการดู โครงสร้างและบริเวณจากจอภาพของเครื่อง SEM ที่ต้องการดู
6. ปรับกำลังขยาย เริ่มที่ 100 เท่า 1000 เท่า และ 10000 เท่า ตามลำดับ เลือกรูปที่ได้ความคมชัดมากที่สุด แล้วบันทึกภาพที่ได้
7. เปลี่ยนชิ้นงานเป็นชิ้นต่อไปแล้วทำซ้ำ ข้อ 6 จนกระทั่งครบทุกชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

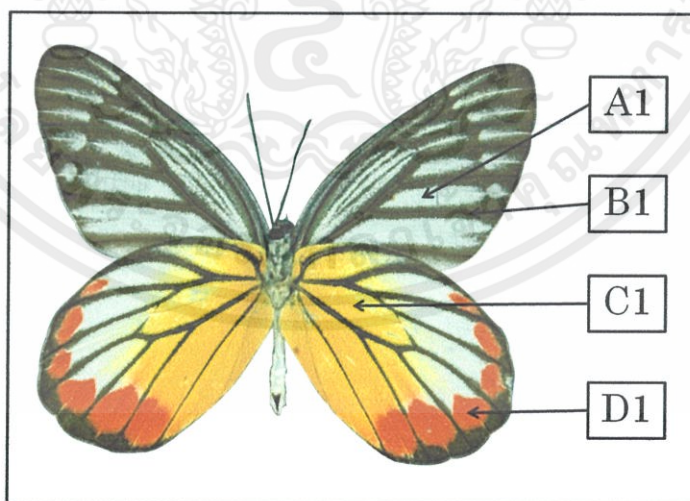
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในการศึกษาโครงสร้างของผีเสื้อทั้งสามชนิดที่ได้เลือกมาศึกษาและทดลอง โดยได้เลือก ลักษณะของสี ที่มีทั้งสี่สสี คือ ผีเสื้ออุงทอง ผีเสื้อที่มีหลายสีแต่ไม่มีลักษณะเหลือบซึ่งก็คือ ผีเสื้อ หนองกาฝาก และ ผีเสื้อที่มีสีเหลือบและเปลี่ยนสีได้เมื่อเปลี่ยนนม คือ ผีเสื้อปีกไขใหญ่ ในการ ทดลองได้นำปีกผีเสื้อทั้งสามชนิดที่มีสีต่างกันมาศึกษา โครงสร้างซึ่งจะทำให้สามารถเข้าใจถึง หลักการการเกิดสี จากโครงสร้างได้มากยิ่งขึ้น และผีเสื้อทั้งสามชนิดที่เลือกมาก็มีโครงสร้างที่ ต่างกันเมื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างโดย เครื่อง SEM ในแต่ละบริเวณและแต่ละสีดังที่แสดงให้ เห็นดังนี้

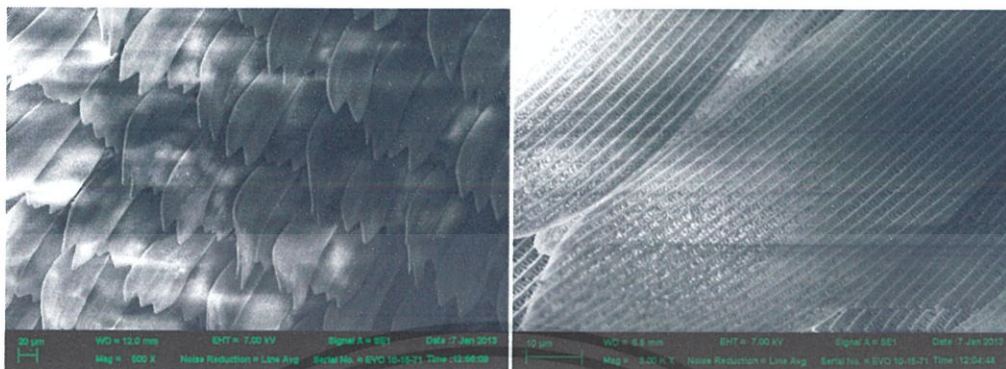
4.1 ผีเสื้อหนองกาฝาก

ประกอบด้วยสีที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 สีด้วยกัน ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้จาก การส่อง โดยกล้อง SEM พบว่า โครงสร้างในการเกิดสีของสี ขาว ส้ม และเหลือง มีลักษณะโครง สร้างภายในที่คล้ายกันมากคือ มีลักษณะเหมือนตารางสี่เหลี่ยม และมีเม็ดเล็กๆหรือเม็ดสีเกาะอยู่ จำนวนมาก แสดงให้เห็นว่าสีทั้ง 3 ที่เกิดขึ้น เกิดจากเม็ดสีที่เกาะอยู่จะภายใน ส่วนสีดำจะมีลักษณะ โครงสร้างเป็น โพรงรูพรุน ไม่มีเม็ดสีจึงเห็นเป็นสีมืดหรือดำ

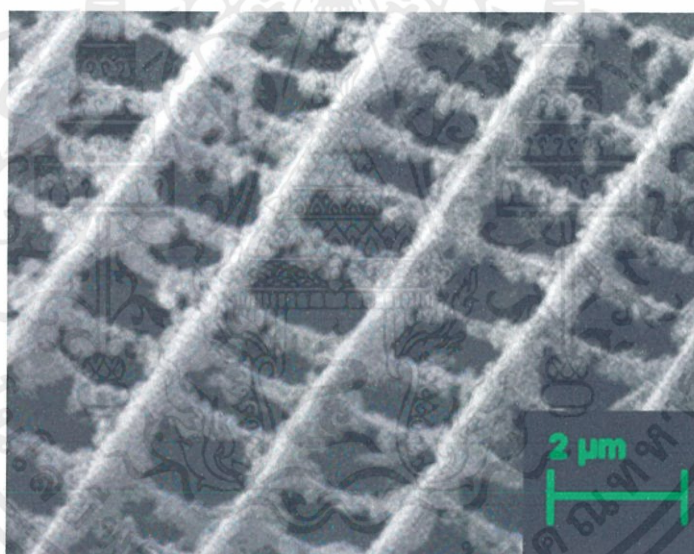


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.1 แสดงภาพสีของปีกผีเสื้อหนองกาฝาก
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของปีกผีเสื้อหนอนกาฝาก

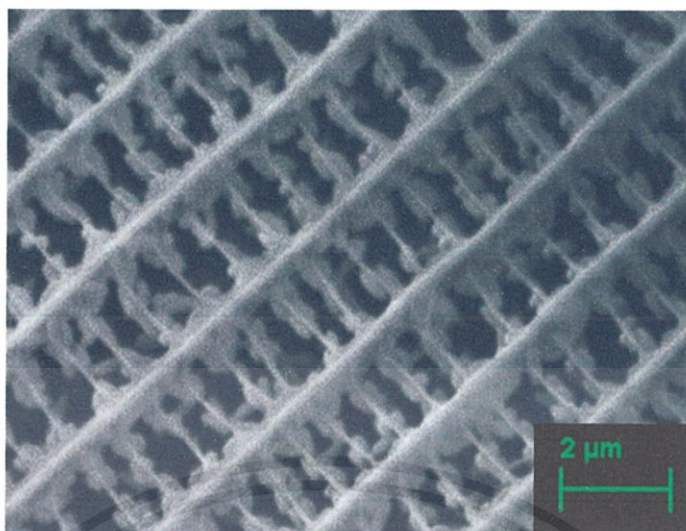


รูปที่ 4.2 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกิดปีกผีเสื้อหนอนกาฝาก บริเวณพื้นที่ C1
กำลังขยาย 500 เท่า (ซ้าย) , 3000 เท่า (ขวา)

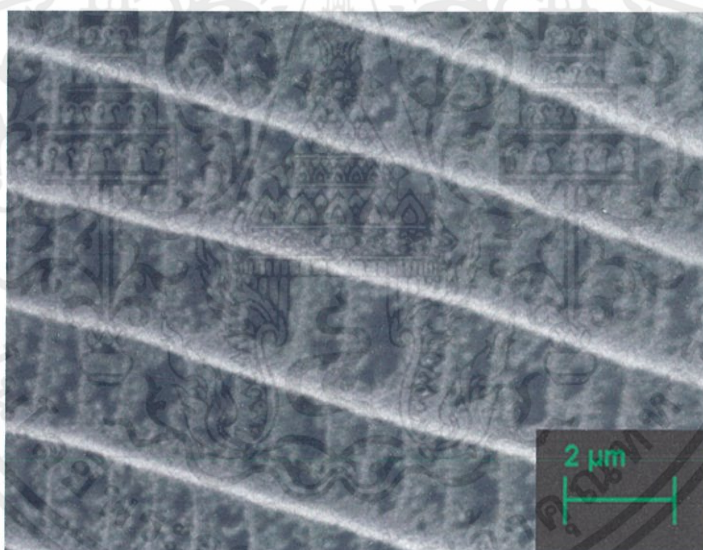


รูปที่ 4.3 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกิดปีกผีเสื้อหนอนกาฝาก
กำลังขยาย 10000 เท่า บริเวณพื้นที่ C1 (d) สีส้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

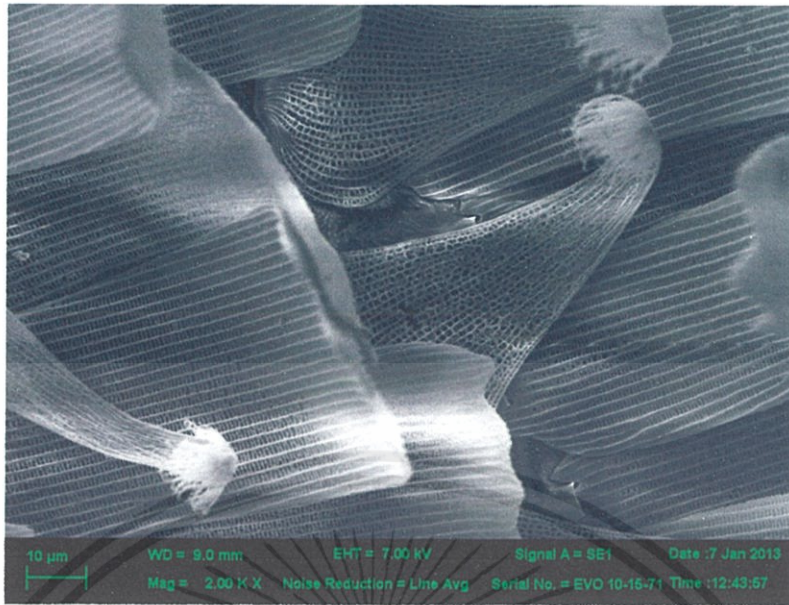


รูปที่ 4.4 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อหนอนกาฝาก
กำลังขยาย 10000 เท่า บริเวณพื้นที่ D1(สีส้ม)

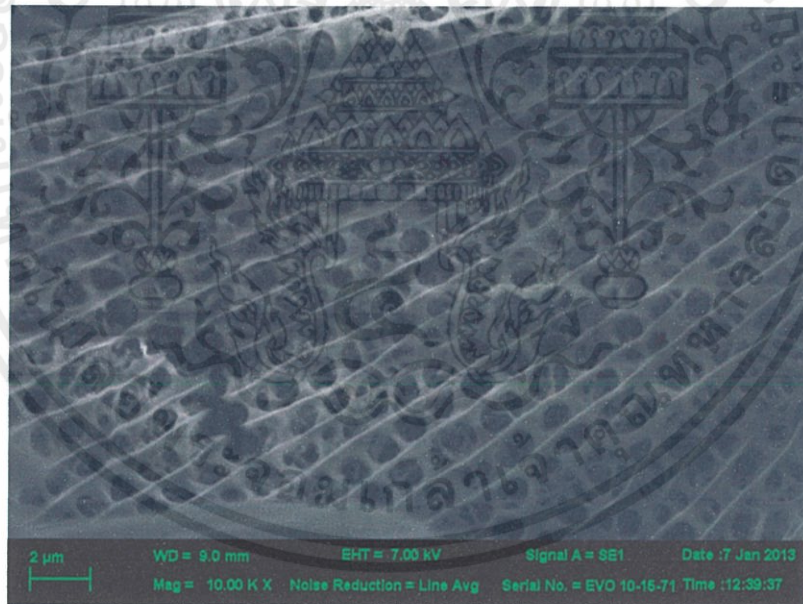


รูปที่ 4.5 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อหนอนกาฝาก
กำลังขยาย 10000 เท่า และบริเวณพื้นที่ A1(สีเขียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อหนอนกาฝาก
บริเวณพื้นที่ B1 กำลังขยาย 2000 เท่า

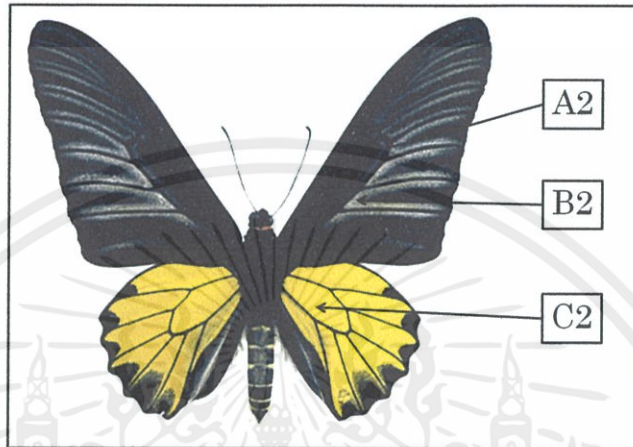


รูปที่ 4.7 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อหนอนกาฝาก
บริเวณพื้นที่ B1 กำลังขยาย และ 10000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

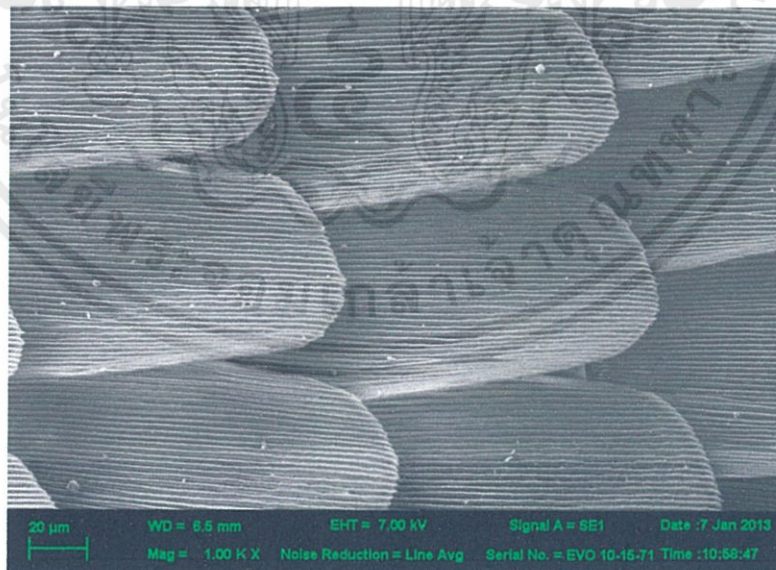
4.2 ผีเสื้ออุงทองเพศผู้

จากภาพจะเห็นว่าปีกของผีเสื้ออุงทองเพศผู้ ประกอบไปด้วยสี ดำมีดสนิท และสีเหลืองสดใส แต่ไม่เหลือบระยับ ไม่ว่าจะเปลี่ยนมุมของแหล่งกำเนิดแสงไปเท่าใด



รูปที่ 4.8 แสดงภาพสีของปีกผีเสื้ออุงทองเพศผู้

4.2.1 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ผีเสื้ออุงทองบริเวณสีเหลือง

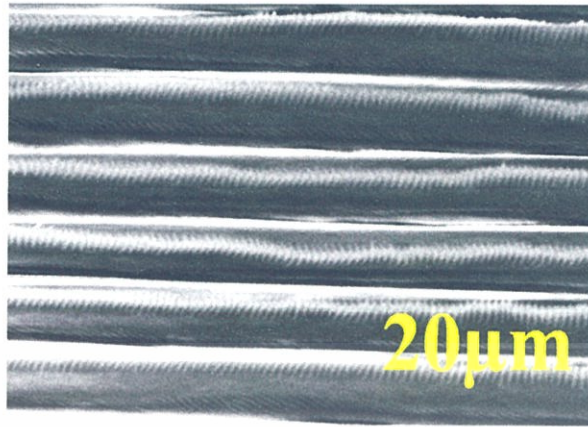


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.9 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกสติกปีกผีเสื้ออุงทอง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกที่ตรงที่มีการนำไปใช้

บริเวณพื้นที่ C2 กำลังขยาย 1000 เท่า (บน)



รูปที่ 4.10 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อของ
บริเวณพื้นที่ C2 กำลังขยาย 10000 เท่า

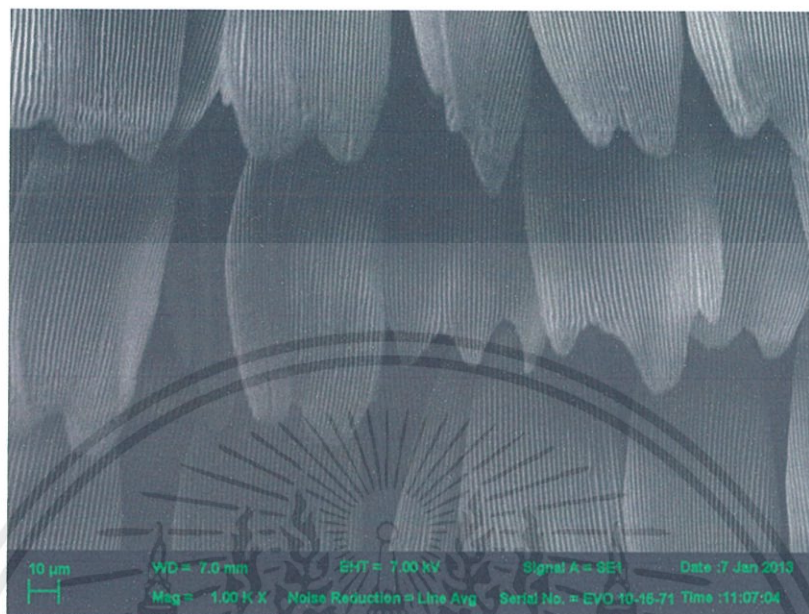


รูปที่ 4.11 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อของ
บริเวณพื้นที่ C2 30000 เท่า (ล่างขวา)

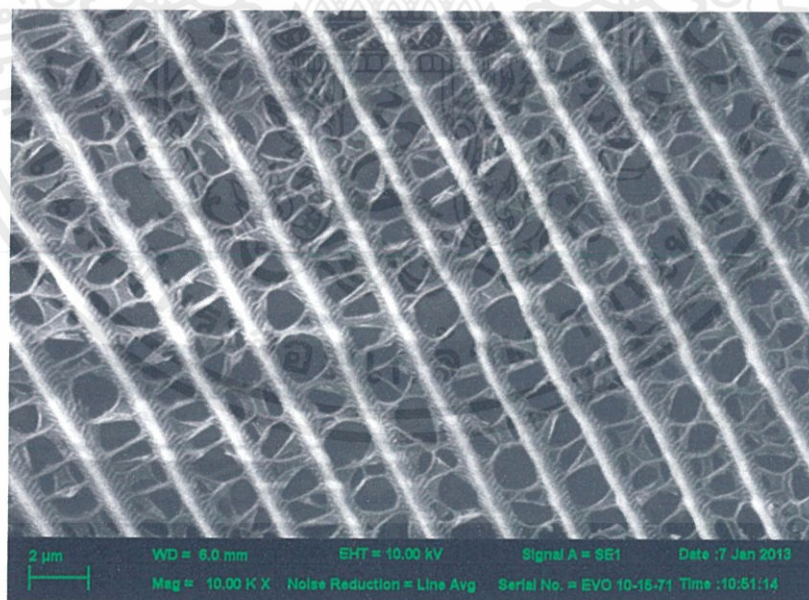
เมื่อดูโครงสร้างของปีกผีเสื้อของบริเวณสี่เหลี่ยมภายใต้กล้อง SEM จากรูปที่ 4.9 พบว่าประกอบด้วยเกล็ดปีกขนาดเล็กๆจำนวนมากเรียงสลับกัน และจากรูปที่ 4.11 พบว่า ประกอบด้วยควิตีเซลล์จำนวนมากที่อยู่บนสันของเกล็ดปีกตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวของเกล็ดปีก ดังนั้นเมื่อแสงมาตกกระทบ จะทำให้เกิดสีเหลืองขึ้นบนเกล็ดปีกของผีเสื้อของและแสงที่เกิดขึ้นนั้นวิเคราะห์ได้ว่าเกิดจากการกระจายของแสงที่ตกกระทบบนสารร่วมกับเม็ดสีสีเหลืองบนปีกที่มีลักษณะ โปร่งแสง เมื่อแสงส่องทะลุผ่านปีกคู่หลังของผีเสื้อของธรรมดาจะเห็นเงาสีเหลืองที่สะท้อนออกมา นอกจากนี้ผีเสื้อของธรรมดาไม่พบการเหลืองขยับบนปีกคู่หลัง เมื่อดูจากมุมมอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ฝี่เส้นอุงทอง บริเวณ สีดำ



รูปที่ 4.12 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกด็คปึกฝี่เส้นอุงทอง บริเวณพื้นที่ A2 กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.13 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกด็คปึกฝี่เส้นอุงทอง บริเวณพื้นที่ A2 กำลังขยาย 10000 เท่า (n)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัท ซึ่งผู้ถือลิขสิทธิ์ขอสงวนไว้ ไม่ให้ผู้ใดเห็นชอบหรือประ โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอยู่ใต้อำนาจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

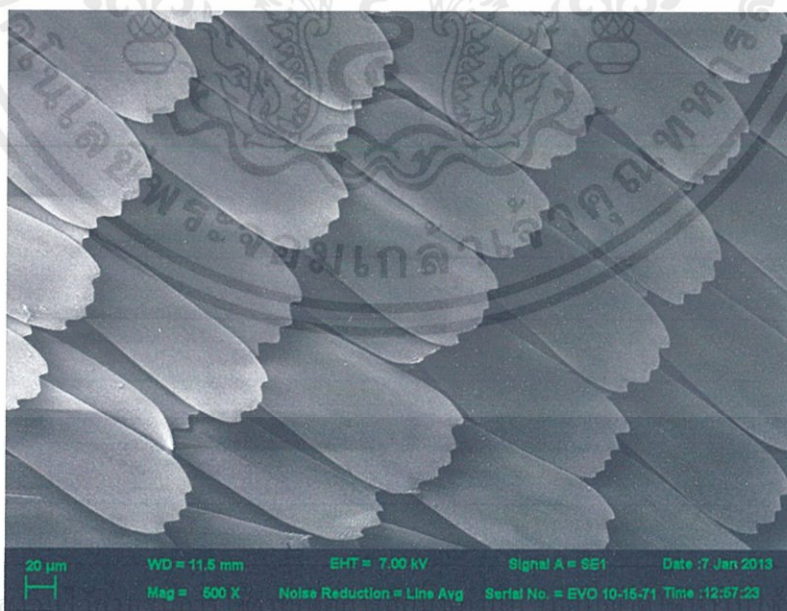
4.3 ผีเสื้อปีกใหญ่เพศผู้

จากรูปที่ 4.8 เป็นภาพผีเสื้อดงทองเพศผู้ที่จะเห็นว่ามีลักษณะเป็นสีน้ำตาล จุกขาว และมีสีฟ้าเหลือบระยิบเป็นบริเวณกว้างขึ้นเมื่อเมื่อปรับมุมของแสงที่ตกกระทบ



รูปที่ 4.14 ผีเสื้อปีกใหญ่เพศผู้

4.3.1 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ผีเสื้อดงทอง บริเวณ ฟา

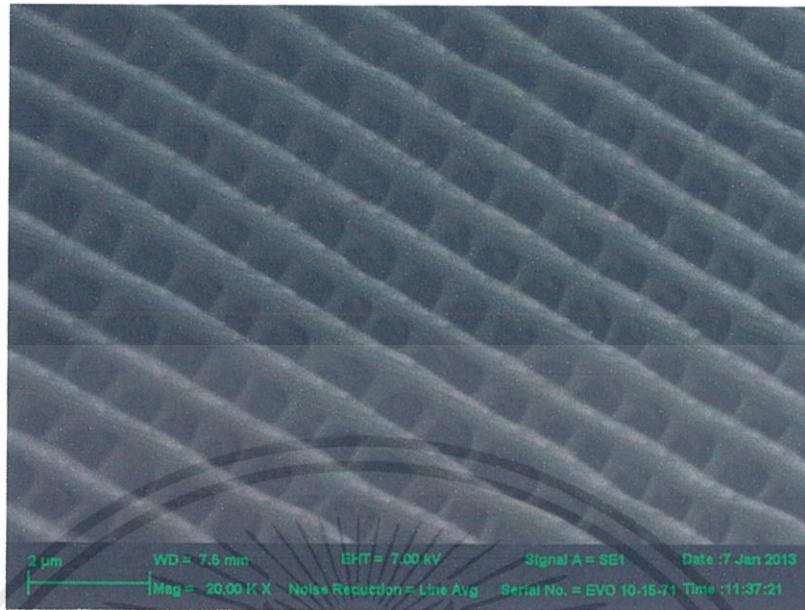


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ระโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อปีกใหญ่เพศผู้

บริเวณพื้นที่ A3 กำลังขยาย 500 เท่า



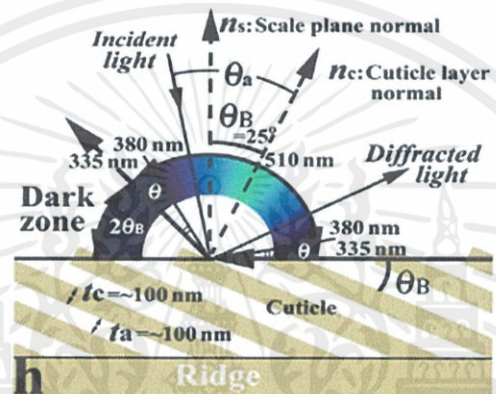
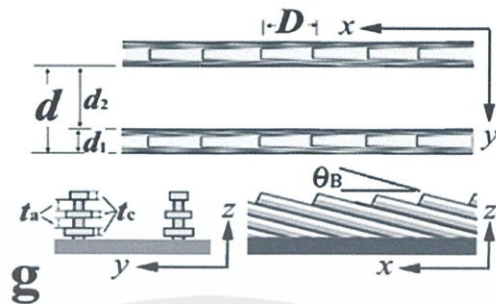
รูปที่ 4.16 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้ บริเวณพื้นที่ A3 กำลังขยาย 20000 เท่า (บน) และ 40000 เท่า (ล่าง)



รูปที่ 4.17 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้ บริเวณพื้นที่ A3 กำลังขยาย 20000 เท่า (บน) และ 40000 เท่า (ล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 สมการและการคำนวณ การเกิดสีฟ้าที่ได้เมื่อเปลี่ยนมุมของแหล่งกำเนิดแสงขาว



<http://gems.chanthaburi.buu.ac.th/documents/research/gems01>

รูปที่ 4.18 แบบจำลองโครงสร้างการเกิดสีของสันปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้

โครงสร้างปีกมีสีน้ำเงินเหลือบระยับ และมีสีขาว และสีน้ำตาล ซึ่งภายในโครงสร้างประกอบด้วยเกล็ดปีกสีน้ำตาลเข้ม ที่เรียงตัวสลับกันไปบนปีก และเมื่อมีแสงมาตกกระทบบนบริเวณพื้นที่ดังกล่าว จะเกิดสีน้ำเงินเหลือบระยับ ซึ่งเกิดจากการสะท้อนแสงของเกล็ด และเมื่อดูโครงสร้างภายใต้กล้อง SEM พบว่า บริเวณพื้นที่ B1 มีโครงสร้างของเกล็ดค่อนข้างเหมือนกัน โดยที่บริเวณสันของเกล็ดปีกประกอบด้วยคิวติเคิล หลายชั้นเรียงซ้อนกันอยู่บนสันและทำมุมเอียงประมาณ 25 องศา

สำหรับสีน้ำตาลบนปีกผีเสื้อชนิดนี้เกิดเนื่องจากโครงสร้างการดูดกลืนแสงที่มีลักษณะเป็นช่องเล็กๆจำนวนมาก ร่วมกับเม็ดสีน้ำตาล ทำให้มองเห็นเป็นสีน้ำตาลออกมืด และส่วนของสีน้ำเงินเหลือบนั้นเกิดจากโครงสร้างที่บริเวณสันของเกล็ดปีกซึ่งประกอบด้วยคิวติเคิล(cuticle) 3 ชั้นที่เรียงซ้อนกันอยู่บนสันและทำมุมเอียง 25 องศา ซึ่ง ภาพที่ได้จาก SEM ที่กำลังขยาย สูงมากๆสามารถประมาณค่าความหนาของ ชั้นคิวติเคิล (t_c) และและค่าความกว้างของชั้นอากาศ (t_a) ได้ว่าทั้งสองมีค่าประมาณ 100 nm และชั้นคิวติเคิลแต่ละชั้นทำมุมเอียงจากแนวระนาบประมาณ 25 องศา (θ_B) คำนีหักเหของอากาศ (t_a) = 1 และกำหนดให้เมื่อ $m = 1$ คำนีหักเหของชั้นคิวติเคิล (t_c) = 1.55

จากสมการการแทรกสอดแบบเสริมในฟิล์มบาง

$$2(n_a t_a \cos\theta_a + n_c t_c \cos\theta_c) = \lambda m \quad (4.1)$$

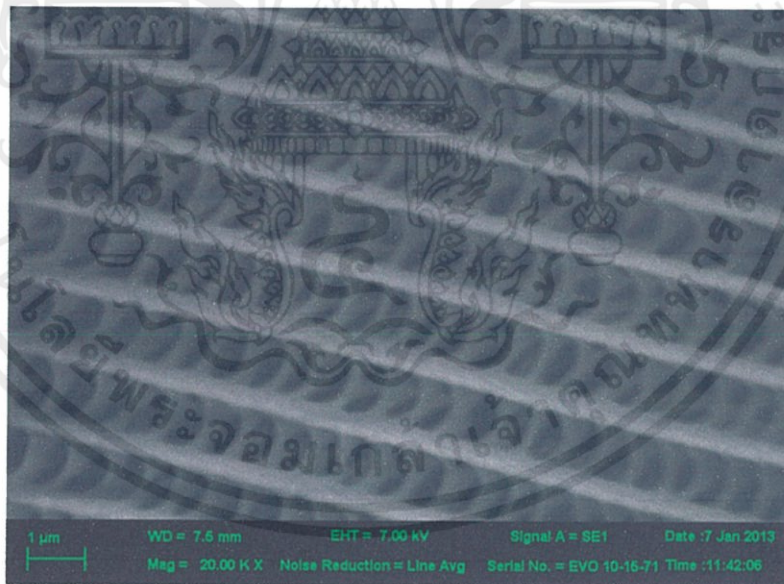
และเมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนค่าลงในสมการ (1)

$$\{2[(1 \times 100 \times 10^{-9} \times \cos\theta_a) + (1.55 \times 100 \times 10^{-9} \times \cos\theta_c)] = \lambda\}$$

จะได้ค่า ความยาวคลื่น (λ) สูงสุดประมาณ 510 nm ที่มุม θ_c และ θ_a ซึ่งมีสีฟ้าอมเขียว และมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อมุมที่แสงตกกระทบเพิ่มมากขึ้น ค่าความยาวคลื่นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่ง λ มีค่าต่ำกว่าในช่วงที่ตาคนเราสามารถมองเห็นได้ โดยที่ความยาวคลื่นในช่วงที่ตาคนเราสามารถมองเห็นได้อยู่ในช่วง 380-780 nm ดังนั้นปีกของผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้จึงสามารถมองเห็นสีได้เพียงสีม่วงฟ้า และฟ้าอมเขียว ที่มีค่า λ ต่ำกว่า 510 nm เท่านั้น

ในกรณีที่มองเห็นเป็นสีน้ำตาลหรือสีขาวนั้นเกิดจากเม็ดสีที่อยู่ในโครงสร้างของปีกซึ่งจะมองเห็นเป็นสีน้ำตาลหรือสีขาวได้เมื่อบริเวณชั้นคิวติเคิลเกิดการสะท้อนแสงออกมาในช่วงที่ตามองเห็นได้เราจึงมองเห็นเป็นสีเดิมของพื้นผิวจริงๆ

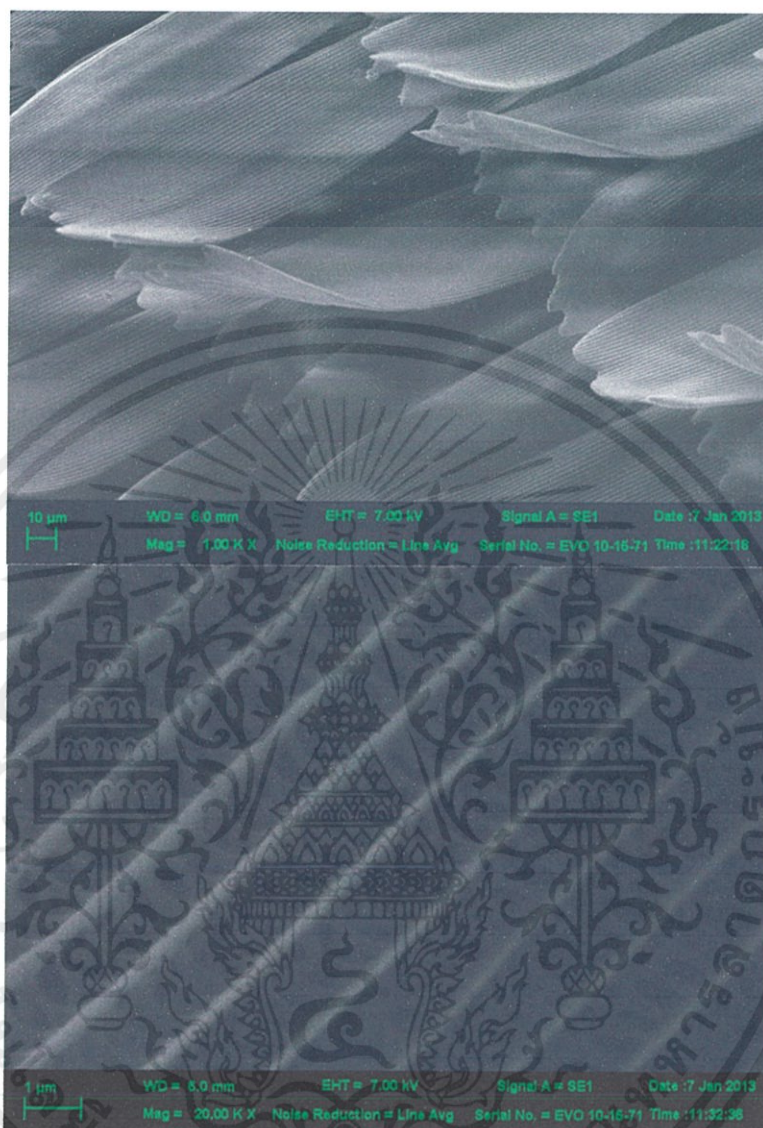
4.3.2 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ผีเสื้ออุงทอง บริเวณ สีขาว



รูปที่ 4.19 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM , เกล็ดปีกผีเสื้อปีกไขใหญ่เพศผู้ บริเวณพื้นที่ C3 กำลังขยาย 20000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ฝีเสื้อถุงทองบริเวณ สีน้าตาล



รูปที่ 4.20 แสดงภาพที่ศึกษาภายใต้กล้อง SEM, เกล็ดปักฝีเสื้อปักไขใหญ่เพศผู้ บริเวณพื้นที่ B3 กำลังขยาย 1000 เท่า (บน) และ 20000 เท่า (ล่าง)

จากโครงสร้างที่ได้ของเกล็ดปักบริเวณพื้นที่ B3 และ C3 ซึ่งมีสีขาและสีน้ำตาลไม่เหลือพบว่าจะมีโครงสร้างที่คล้ายกับบริเวณสีฟ้าแต่ในบริเวณสันของเกล็ดปักไม่มีชั้นของคิวติเคิลจึงทำให้ไม่เห็นแสงสีฟ้าที่สะท้อนออกมา เห็นเป็นเพียงสีน้ำตาลหรือขาวซึ่งเป็นสีเดิมของพื้นผิวจริงๆ ที่เกิดจากโครงสร้างของเม็ดสีเท่านั้น และพบว่าโครงสร้างของสีขาและสีน้ำตาลทั้งสองมีโครงสร้างคล้ายกัน ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.19 (เป็นสีขา) และ 4.20 (สีน้ำตาล)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับ โครงสร้างที่ทำให้เกิดสีบนปีกของผีเสื้อที่ซึ่งเกิดจาก โครงสร้างของเกล็ดปีกผีเสื้อร่วมกับเม็ดสี ผีเสื้อ แต่ละชนิด ในที่นี้ คือ ผีเสื้ออุทงเทศผู้ ผีเสื้อปีก ไขใหญ่เทศผู้ และผีเสื้อหนอนกาฝากธรรมชาติ ซึ่ง ได้ข้อสรุปดังนี้

5.1 การเกิดสีของผีเสื้ออุทงเทศผู้

จากการศึกษาโครงสร้างของการเกิดสีของปีกผีเสื้อชนิดอุทงเทศผู้ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน แบบส่องกราด SEM ที่มีกำลังขยายสูง ได้พบว่า ภายในโครงสร้างของสีเหลือง ประกอบด้วย เกล็ดขนาดเล็กจำนวนมากและในลักษณะ โครงสร้างของมีลักษณะเป็นระนาบเล็กๆ วางต่อกัน สีที่เกิดขึ้นจึงมีลักษณะที่สว่างและเหลืองเล็กน้อย ซึ่งสีที่ได้นั้นเกิดจากการกระเจิงของ แสงที่ตกกระทบลงบนสันขอบที่เรียงชิดกันมากร่วมกับเม็ดสีเหลืองที่มีอยู่บน โครงสร้างเล็กๆ เหล่านั้น

5.2 การเกิดสีของผีเสื้อปีกไขใหญ่เทศผู้

จากการศึกษาโครงสร้างการเกิดสีของปีกผีเสื้อชนิดนี้ โดยใช้เครื่อง SEM พบว่าสีน้ำตาลบน ปีกผีเสื้อชนิดนี้เกิดจาก โครงสร้างการดูดกลืนแสงที่มีลักษณะเป็นช่องเล็กๆจำนวนมาก ร่วมกับเม็ด สีน้ำตาล ทำให้มองเห็นเป็นสีน้ำตาลออกมิด และส่วนของสีน้ำเงินเหลืองนั้นเกิดจาก โครงสร้างที่ บริเวณที่เป็นสันของเกล็ดปีกที่ประกอบด้วยคิวติเคิล (cuticle) บางมากหลายชั้นที่เรียงซ้อนกันอยู่ และทำมุมเอียง 25 องศา ดังนั้นสาเหตุของการเกิดสีเหลืองระดับบนปีกคู่หน้าของผีเสื้อปีกไขใหญ่ เทศผู้ นั้น เกิดมาจากแสงที่ตกกระทบระหว่างชั้นของคิวติเคิลแล้วสะท้อนออกมา เป็นผลให้เราเห็น สีน้ำเงินเหลืองระดับ แต่เมื่อแสงเปลี่ยนมุมที่ตกกระทบ ในบางมุมจะมองไม่เห็นสีฟ้าแต่เห็นเพียงสี น้ำตาลหรือสีขาว เนื่องจากคลื่นแสงที่สะท้อนออกมามีช่วงความยาวคลื่นที่ไม่สามารถมองเห็น ได้ ด้วยตาเปล่าได้ ในการคำนวณค่าความยาวคลื่น (λ) จะมีค่าสูงสุดประมาณ 510 nm ที่มุม θ_0 และ θ_1 เท่ากับศูนย์องศา หรือแสงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระนาบของคิวติเคิล ซึ่งจะมองเห็นเป็นสีฟ้าอม เขียว และมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อมุมที่แสงตกกระทบเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่ง λ มีค่าต่ำกว่าในช่วงที่ตา คนสามารถมองเห็น ได้ ซึ่งความยาวคลื่นในช่วงที่ตาคนมองเห็น ได้จะอยู่ในช่วง ไม่ต่ำกว่า 380 nm ดังนั้นถ้ามุมตกกระทบทำให้ λ ต่ำกว่าย่านที่ตามองเห็นก็จะเห็นแต่สีที่เกิดจากเม็ดสีเท่านั้น

5.3 การเกิดสีของผีเสื้อหอนกาฝาก

จากการศึกษาโครงสร้างของการเกิดสีของปีกผีเสื้อชนิดนี้ โดยการส่องโดย SEM แสดงให้เห็นว่าสีทั้ง 3 ที่แสดงให้เห็นเกิดขึ้นเกิดจากเม็ดสีที่เกาะอยู่จะภายใน ส่วนสีดำจะมีลักษณะโครงสร้างเป็นโพรงรูพรุนไม่มีเม็ดสีจึงเห็นเป็นสีมืดหรือดำเนื่องจากไม่มีการสะท้อนทำให้มองเห็นเป็นสีดำ และสีที่ได้ทั้งหมดไม่ได้เกิดจากการสะท้อนแสงจึงไม่มีลักษณะของสีเหลือบระยิบ

จากการศึกษาการเกิดสีของผีเสื้อทั้ง 3 ชนิดจึงพบว่า สีที่เห็นเกิดขึ้นจากเม็ดสี และ โครงสร้างที่ทำให้เกิดสีเหลือบที่เกิดจากการตกกระทบของแสงผ่าน โครงสร้างที่เรียงเป็นชั้นๆ ของคิวติเคิลที่มีความหนาแต่ละชั้นในระดับนาโนเมตร ทำให้แสงเกิดการหักเหและสะท้อนกลับในช่วงความยาวคลื่นสีที่ตาสามารถมองเห็นได้ ส่วนแสงสีอื่นถูกดูดกลืนไป

5.4 วิจารณ์ผลการทดลอง

- ในการศึกษาไม่ควรเคลือบทองลงบนปีกผีเสื้อให้มีความหนาไม่มากจนเกินไปและไม่น้อยจนเกินไปเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดีและมองเห็น โครงสร้างได้ชัดเจนเมื่อถ่ายด้วยภาพจากกล้อง SEM ที่กำลังขยายสูงมากๆ
- เนื่องจากการศึกษาโครงสร้างในระดับนาโน โครงสร้างที่เห็นอาจไม่ชัดเจนเท่าที่ควรสำหรับวัดขนาด จึงต้องใช้การประมาณค่าขนาดจากรูป
- การส่อง SEM ที่มีกำลังขยายสูงมาก ควรเคลือบทองไม่หนาและไม่บางเกินไปเพื่อให้เห็นโครงสร้างที่ชัดเจน และทนต่อแรงดันสูงของเครื่อง SEM ได้

5.5 ข้อเสนอแนะ

- ควรจะมีการวิเคราะห์โครงสร้างจากสิ่งมีชีวิตอื่นนอกจากผีเสื้อมากขึ้น โดยเลือกที่มีลักษณะสีสดใสและมีลักษณะเหลือบระยิบ
- ควรศึกษาโครงสร้างของสีปีกผีเสื้อให้หลายชนิดมากยิ่งขึ้น
- ควรศึกษาโดยใช้เครื่อง uv-vis spectroscopy เพื่อวัดค่าการดูดกลืนและการสะท้อนแสงที่ชัดเจนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey: Photonic Crystal Theory, Application, and Fabrication

Alessandro Massaro : Photonic Crystals-Introduction, Applications and Theory

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058411008820>

http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic_crystal

http://www.viewsfromscience.com/documents/webpages/natural_photonics_p1.html

http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/TN213B_p32-36.pdf

http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch54/GroupAward/16-Punyavee_Dec/template.html

http://www.coax.co.th/ei/sample_prep.html

<http://www.learners.in.th/blogs/posts/99376>

<http://aqua.club.net/forum/lite.php?topic=17634.0>

http://www.satriwit3.ac.th/external_newsblog.php?links=1246

http://www.dstar.kmitl.ac.th/bookingsys/system.php?page=viewspec&machine_id=17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพนวก

ผีเสื้อปีกไข่ใหญ่



- ชื่อไทย : ผีเสื้อปีกไข่ใหญ่
- ชื่อสามัญ : Great Egg-fly
- ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Hypolimnas bolina* (Linnaeus, 1758)
- วงศ์ : NYMPHALIDAE
- ลักษณะ : เพศเมียมีขนาดใหญ่กว่าเพศผู้ ขอบปีกด้านข้างของปีกคู่หลังหยักเว้า ปีกบนเพศผู้มีพื้นปีกสีดำ กลางปีกคู่หน้าและใกล้มุมปลายปีกหน้ามีแต้มสีขาว กลางปีกคู่หลังมีแต้มสีขาวเป็นวงกลมรูปไข่ เพศเมียมีพื้นปีกสีน้ำตาลเข้ม กลางปีกคู่หน้ามีสีน้ำตาลเงินจางๆ ขอบปีกมีแต้ม จุด และขลิบสีขาว ปีกล่าง พื้นปีกสีน้ำตาล ขอบปีกด้านข้างของปีกทั้ง 2 คู่มีแถบสีขาว ต่อจากแถบเข้ามามีจุดสีขาวเรียงกัน
- สถานภาพ : พบบ่อย แถวบริเวณชุ่มน้ำ
- ถิ่นอาศัย : ป่าโปร่ง ป่าละเมาะ
- การแพร่กระจาย : พบทุกภาคของไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผีเสื้ออุงทองธรรมดา



- ชื่อไทย : ผีเสื้ออุงทองธรรมดา
- ชื่อสามัญ : The Golden Birdwing *Troides aeacus aeacus*
- วงศ์ : ผีเสื้อหางติ่ง
- ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Troides aeacus*
- ขนาด : 150-170 mm.
- สถานะ : พบบ่อยมาก สามารถ พบได้ทั่วไปทุกภาคของประเทศไทย เราจะเห็น ผีเสื้ออุงทอง ได้ง่ายช่วง เดือน พฤษภาคม ถึง เดือนตุลาคม ตัวหนอนชอบ กินใบกระเช้าสีดา กระเช้าฝีมด กระเช้าอุงทอง ซึ่งเป็นไม้เถาที่พบ ตามพื้นที่ป่าทั่วไป
- ลักษณะ : ผีเสื้ออุงทองธรรมดา ลักษณะเด่นคือปีกคู่หลังสีดำ ปีกคู่หน้าสีเหลือง
- สกุลผีเสื้ออุงทอง (Birdwing, Golden Birdwing) ประเทศไทยพบว่ามี 3 ชนิด คือ
1. ผีเสื้ออุงทองธรรมดา (*Troides aeacus*)
 2. ผีเสื้ออุงทองป่าสูง (*T. helena*)
 3. ผีเสื้ออุงทองปีกยี่ใต้ (*T. amphrysus*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผีเสื้อหนอนกาฝากธรรมดา



วงศ์	: วงศ์ผีเสื้อหนอนกะหล่ำ
ชื่อภาษาไทย	: ผีเสื้อหนอนกาฝากธรรมดา
ชื่อภาษาอังกฤษ	: Painted Jezebel
ชื่อวิทยาศาสตร์	: <i>Delias hyparete</i>
ขนาด	: 70-80
สถานที่	: พบได้ตามป่าโปร่งทั่วไป
ลักษณะ	: ปีกบน เพศผู้มีปีกสีขาวครีม เส้นปีกสีน้ำตาลเข้ม เพศเมียมีเส้นปีกสีน้ำตาลเข้มหนากว่าเพศผู้ : ปีกล่าง ปีกคู่หน้าคล้ายปีกบน ปีกคู่หลังมีสีเหลืองตั้งแต่ กลางปีกจนถึงโคนปีก เส้นปีกสีดำ ใกล้เคียงขอบปีกด้านข้างมี แถบสีแดงเรียงกัน ขอบปีกด้านข้างมีสีดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติและการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) (Carl Zeiss Microscopy EVO® HD)



The EVO® HD is the latest innovation in scanning electron microscopy from Carl Zeiss. Delivering a groundbreaking increase in resolution over conventional scanning electron microscopes, the EVO® HD introduces High Definition to electron microscopy. The EVO® HD features a new electron source technology facilitating unmatched low-kV resolution. This makes the EVO® HD the premier choice for challenging specimens, the imaging of surface detail or for beam-sensitive materials. The resolution improvements at higher probe currents provide enhanced analytical accuracy.

This technology demonstrates unchallenged performance in the conventional SEM (C-SEM) arena and as a result the EVO® HD dramatically improves on the imaging resolution currently achievable in C-SEM. With this step-change in resolution, the EVO® HD now advances knowledge in those applications that were previously limited in conventional SEMs such as:

- Nano Materials
- Fracture Mechanics
- Geological Applications
-

Microbiology

Specification

Resolution : 3 nm (2 nm) @ 30 kV SE and W (LaB6)

4.5 nm @ 30 kV BSD (VP mode)

15 nm @ 30 kV 1nA, LaB6

20 nm (15 nm) @ 1 kV SE and W (LaB6) 10 nm @ 3 kV SE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลใดๆและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acceleration Voltage : 0.2 - 30kV

Magnification : < 7 - 1,000,000 x with air or optionally water vapour

Field of View : 6mm at the Analytical Working Distance (AWD)

X-ray Geometry : 8.5mm AWD and 35° take-off angle

OptiBeam®* Modes : Resolution, Depth, Analysis, Large Field

Pressure Range : 10 - 400Pa

Available Detectors : BSD – Multisegment Diode

ETSE – Everhart-Thornley Secondary Electron Detector

VPSE – Variable Pressure Secondary Electron Detector

SCD – Specimen Current Detector

Chamber Dimensions : 310 mm (Ø) x 220mm (h)

5-Axes Motorised : Specimen Stage X = 80 mm

Y = 100 mm Z = 35mm T = 0 - 90° R = 360° (continuous)

Stage control by mouse or optional joysticks and control panel

Future Assured Upgrade Paths : BeamSleeve® Extended pressure (up to 3000 Pa) Water Vapour

EPSE – Extended Pressure Secondary Electron Detector

Image Processing : Resolution: Up to 3072 x 2304 pixel Signal acquisition by integrating and averaging

Image Display : High quality flat panel with SEM image displayed at 1024 x 768 pixel

System Control : SmartSEM®** GUI operated by mouse and keyboard Multilingual CONCISE

GUI Multilingual Windows® XP operating system

Utility requirements : 100 - 230 V, 50 or 60 Hz single phase

No water cooling requirement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้