The Sci J of Phetchaburi Rajabhat University.
2020.17(1) : 25-31

โครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัลของด้วงขาโต *Sagra femorata* (Drury, 1773) เพศผู้

Photonic Crystal Structure of Male Frog-legged Leaf Beetle, *Sagra femorata* (Drury, 1773)

ฐิติพร เจาะจง[1*], สโรชา โพธิ์อภัย[1], พิสิษฐ์ พูลประเสริฐ[2] , และ กษมะ ดุรงค์ศักดิ์[1]

Titiporn Chorchong[1*], Sarocha Pho-aphai[1], Pisit Poolprasert[2] and Kasama Durongsak[1]

[1]*สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก, 65000*

[2]*สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก 65000*

[1] *Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, 65000*

[2] *Program of Biology, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University*, 65000

***Corresponding author; E-mail:** titiporn_ant@psru.ac.th

Received: 19 March 2020 /Revised: 07 May 2020 /Accepted: 31 May 2020

บทคัดย่อ

การศึกษาโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ของด้วงขาโต *Sagra femorata* (Drury, 1773) เพศผู้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์การดูดกลืนแสงร่วมกับการสะท้อนแสงบนพื้นผิวลำตัวของด้วงด้วยเครื่องตรวจวัดสารที่กำหนดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 1,200 นาโนเมตร พบว่าบริเวณผิวลำตัวด้วงมีสองโทนสีเป็นสีเขียวแกมแดงคล้ายโลหะสะท้อน บริเวณกลางปีกมีลักษณะรูปทรงห้าเหลี่ยมพื้นผิวหยาบและขรุขระซึ่งบางบริเวณมีพื้นผิวเรียบ บริเวณกลางลำตัวมีพื้นผิวคล้ายผลึกอยู่บริเวณรอยต่อของโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูปทรงห้าเหลี่ยม และบริเวณปลายปีกจะมีลักษณะเป็นรูปทรงห้าเหลี่ยมที่มีพื้นผิวซ้อนเรียงติดกัน ผลการวิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสงและค่าการสะท้อนแสง พบว่ามีค่าการสะท้อนแสงเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ในช่วงความยาวคลื่น 560 ถึง 750 นาโนเมตรซึ่งอยู่ในช่วงสีในแถบเส้นสเปกตรัมของแสงที่มองเห็น คือ สีเขียวแกมแดง และมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ 0.8 จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและการสะท้อนแสงตรงตามหลักทฤษฎีคือเมื่อค่าการสะท้อนมากขึ้นค่าการดูดกลืนแสงจะลดลงทำให้เห็นสีตรงตามธรรมชาติของด้วง จากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการเลือกสีและวัสดุที่มีค่าสะท้อนแสงและค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับด้วงเพศผู้และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการเคลือบสี ทำให้ได้สีที่แตกต่างกับสีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นการเพื่อเพิ่มมูลค่าของชิ้นงานให้ตรงตามความต้องการของผู้ที่สนใจได้

คำสำคัญ: ผลึกโฟโตนิกส์ ด้วงขาโต ผิวลำตัวด้วง

Abstract

The study of photonic crystal structure of male frog-legged leaf beetle, *Sagra femorata* (Drury, 1773) was conducted using the light microscope (LM) together with scanning electron microscope (SEM). The effects of light absorption and reflection on beetle body were also detected using the UV-Vis-NIR spectrophotometer within the wavelength ranging from 200-1,200 nanometer. Two-tone-color on the beetle body was observed as metallic reflection (reddish green). With regard to the structure in middle part of its wing, it was somewhat rough and appeared as pentagon crystals but some areas were relatively smooth. The stacking of pentagon crystals was also seen on its wing edge. Based on the light absorption and reflection on beetle body, the highest reflection at 15% and light absorber at 0.8 ranging from 560-750 nanometer of wavelength were divulged. According to theory of absorption and reflection, the absorption will decrease as the reflection will inversely increase, resulting in better occurrence of the natural color in this male. From these results, it could be applied for several purposes including choosing color and materials based on this beetle character. Additionally, it could be practical used for coating different color in order to add value the products in accordance with interested buyers or customer requirements.

Keywords: Photonic crystal, Sagra femorata, Beetle's exoskeleton

บทนำ

ด้วง (Beetles) เป็นแมลงปีกแข็งชนิดหนึ่งในอันดับ Coleoptera จัดเป็นกลุ่มที่มีสมาชิกมากที่สุดถึง 40% ของแมลงที่มีอยู่ทั้งหมด ลักษณะเด่นของด้วงคือ ปีกคู่แรกเป็นแบบหนาแข็ง (Elytra) ส่วนปีกคู่หลังมีลักษณะเป็นแผ่นบาง (Membrane) [1-3] ด้วงมีทั้งจำนวนชนิดและสีสันที่หลากหลาย ซึ่งในบางชนิดมีสีที่สะดุดตาสวยงาม เช่น แมลงทับ ด้วงเสือ และด้วงดินบางชนิด เป็นต้น โดยสีสันที่สวยงามนั้นไม่ได้เกิดจากเม็ดสีของปีกหรือรงควัตถุ (Pigment) แต่เกิดจากสมบัติพิเศษบริเวณผิวของด้วงที่เรียกว่า “โฟโตนิกส์คริสตัล” (Photonic crystal) ซึ่งเป็นลักษณะที่เกี่ยวกับการสร้างและใช้แสงหรือพลังงานที่อยู่ในรูปของโฟตอน (Photon) และเป็นโครงสร้างระดับนาโนที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยสมบัติพิเศษนี้ทำให้สามารถเห็นผิวของด้วงมีสีสันต่าง ๆ ตามกฎการสะท้อนและการหักเหของแสง ซึ่งสามารถพบเห็นตัวอย่างสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในธรรมชาติได้แก่ นกยูงตัวผู้ แมลงทับ ผีเสื้อ และ ต่อบางชนิด เป็นต้น [4-6] ในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมและธุรกิจทั่วโลกเริ่มหันมาสนใจการพัฒนาผลิตภัณฑ์และนวัตกรรมใหม่ ๆ โดยใช้วิธีการเลียนแบบธรรมชาติจากการใช้ความรู้ความเข้าใจในสาขาวิชาฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา และสาขาวิชาอื่น ๆ ซึ่งมีรายละเอียดในการศึกษาที่ลงลึกไปในระดับ

โครงสร้างของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติพิเศษ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยี โดยเฉพาะคุณสมบัติพิเศษที่พบในพืชและสัตว์ชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะในยุคนาโนเทคโนโลยีนี้ มนุษย์สามารถเข้าถึงเกี่ยวกับกระบวนการผลิตและการออกแบบที่พบในธรรมชาติง่ายขึ้นและยังสามารถเลียนแบบธรรมชาติในมิติใหม่ที่ไม่เคยเข้าใจมาก่อน ให้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์และนวัตกรรมใหม่ๆ ได้ ในปัจจุบันมีศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโฟโตนิกส์คริสตัลในแมลงชนิดต่าง ๆ มากมาย เช่น งานวิจัยของ ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร [7], Mouchet et al. [8] และ Kinoshita et al. [9] อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นยังไม่มีการรายงานถึงศึกษาสมบัติโฟโตนิกส์คริสตัลของด้วงตัวผู้ในประเทศไทยที่มีสีสันที่สวยงามแตกต่างออกไปจากแมลงชนิดอื่นๆ และมีหลากหลายสีในตัวเดียว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาสมบัติโฟโตนิกส์คริสตัลของด้วงขาโตชนิด *Sagra femorata* เพศผู้ในประเทศไทย จากการตรวจสอบโครงสร้างสี ลักษณะสัณฐาน การสะท้อนและการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิดการหักเหและการสะท้อนของแสงเป็นสีต่างๆ หลากหลายสีในตัวเดียวได้ โดยผลที่ได้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้

วิธีการวิจัย

1. ขั้นตอนศึกษาโครงสร้างที่มีสีสันบนพื้นผิวแมลงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

1.1 นำตัวอย่างแมลงที่ผ่านการจัดรูปร่างตามมาตรฐานของ Triplehorn and Johnson [3] วางบนฐานของกล้อง

1.2 ปรับปุ่มโฟกัสตั้งแต่ 20-200 nm ตามระดับความเหมาะสมของรูปภาพ

1.3 ได้ภาพที่มีลักษณะคมชัดสวยงามตามความต้องการ

1.4 นำผลไปวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างสี

2. ขั้นตอนเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาทางโครงสร้างลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

2.1 นำแมลงด้วงขาโตเพศผู้ ขนาดความกว้าง x ความยาว เท่ากับ 0.5x1 เซนติเมตร มาตัดเป็นชิ้นส่วนขนาดประมาณ 0.3 เซนติเมตร ออกเป็น 3 ส่วนพอดีกับสตับ (Stub) หรือแท่นวางตัวอย่างและนำเข้าเครื่องเคลือบทองเป็นเวลา 10 นาที

2.2 ติดเทปกาวคาร์บอนชนิด 2 หน้า

2.3 นำตัวอย่างแมลงติดลงบนเทปกาวคาร์บอนโดยอีกด้านติดแท่นวางตัวอย่าง

2.4 ทำการเคลือบทองให้ทั่วชิ้นงานเพื่อให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ก่อนจะนำเข้าเครื่อง SEM

2.5 นำตัวอย่างที่เคลือบทองแล้วเข้ากล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลจากค่าดูดกลืนแสงที่ใช้เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer

นำชิ้นส่วนตัวอย่างแมลงที่เตรียมไว้ข้างต้นมาวิเคราะห์การดูดกลืนในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งในตัวอย่างต้องมีความโปร่งใสเพียงพอ และกำหนดให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นช่วง 200-1,200 นาโนเมตร ผ่านตัวอย่าง เครื่องจะแสดงผลผ่านจอภาพ

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัลของด้วงขาโตเพศผู้ จะแบ่งออกเป็นโครงสร้างสี โครงสร้างลักษณะสัณฐาน ค่าการสะท้อนแสงและค่าดูดกลืนแสงโดยมีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างสีบนพื้นผิวด้วงขาโต *Sagra femorata* เพศผู้

จากการวิเคราะห์โครงสร้างสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Figure 1) แสดงลำตัวด้วงและโครงสร้างสีที่ทดสอบ จากการทดสอบพบว่าบริเวณลำตัวด้วงมีสีเขียวแกมแดงคล้ายสีโลหะสะท้อนสีพื้นผิวมันวาว จาก Figure 1 (A) แสดงบริเวณอกของด้วง จะมีลักษณะผิวมันวาวสะท้อนแสงสีแดงและบริเวณลำคอมีสีระยิบระยับเขียวสลับแดง (B) แสดงบริเวณส่วนกลางปีกของด้วง บริเวณพื้นผิวมีสีแดงและสีเขียวสะท้อนแสงมากกว่าบริเวณอื่น (C) บริเวณช่องว่างระหว่างเกล็ดปีกทั้งสองข้าง มีสีเขียวสะท้อนแสงและมีสีแดงล้อมรอบ พื้นผิวขรุขระและมีรอยหยักมาก (D) บริเวณปลายปีก มีแสงสีเขียวระยิบระยับ มีรูขุมขนรอบ ๆ ปลายปีก

2. ลักษณะโครงสร้างสัณฐานบนพื้นผิวด้วงขาโต *Sagra femorata* เพศผู้

การทดสอบลักษณะสัณฐานบนพื้นผิวด้วงขาโตเพศผู้ ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) พบว่า โครงสร้างเป็นผลึกเกาะกลุ่มกัน (Figure 2) ซึ่งจะเห็นว่าพื้นผิวของด้วงบริเวณกลางปีกมีลักษณะเป็นรูปทรงห้าเหลี่ยม พื้นผิวหยาบและขรุขระ บางบริเวณมีพื้นที่ผิวเรียบ และบริเวณกลางลำตัวมีพื้นที่ผิวคล้ายผลึกอยู่บริเวณรอยต่อของโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูปทรงห้าเหลี่ยม

3. ค่าดูดกลืนแสงบนโครงสร้างพื้นผิวด้วงขาโต *Sagra femorata* เพศผู้

จากลักษณะโครงสร้างด้วงขาโตตามทฤษฎีการสะท้อนแสงจะมีโครงสร้างการสะท้อนแสงที่ไม่เป็นระเบียบ (Figure 3A-3B) มีค่าการสะท้อนแสงอยู่ที่ 15 % ในช่วงความยาวคลื่น 560-750 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงสีในช่วงสเปกตรัมของสีเขียวแกมแดง และมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 0.8 ซึ่งจากทฤษฎีเมื่อมีค่าการสะท้อนแสงมากขึ้นการดูดกลืนแสงจะลดลง

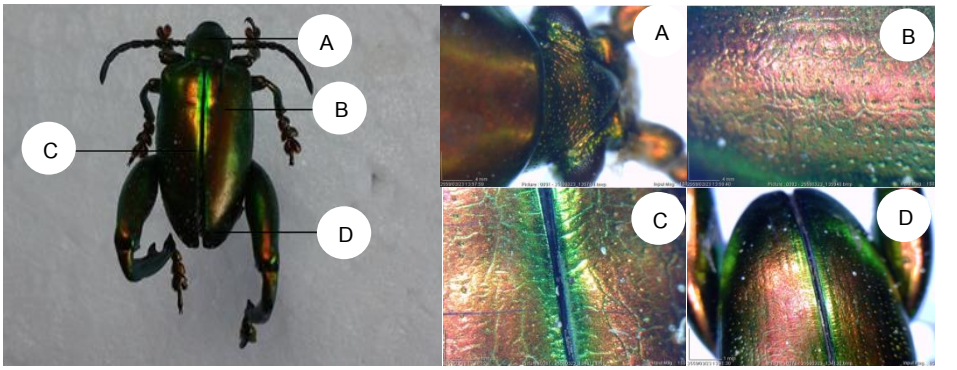

Figure 1. Structure of color on body of male *Sagra femorata* (A) Thorax, (B) Elytron (Anterior wing), (C) Gap between left and right elytra (wings) and (D) Wing tip

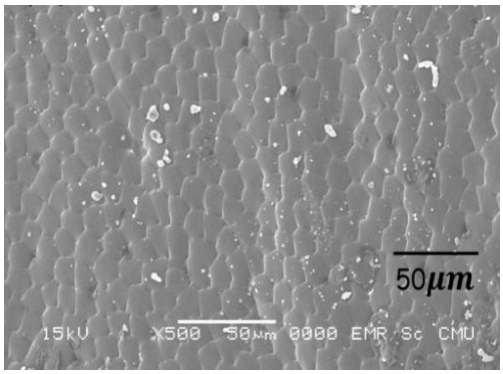

Figure 2. Scanning Electron Micrograph of elytron of male *Sagra femorata*.

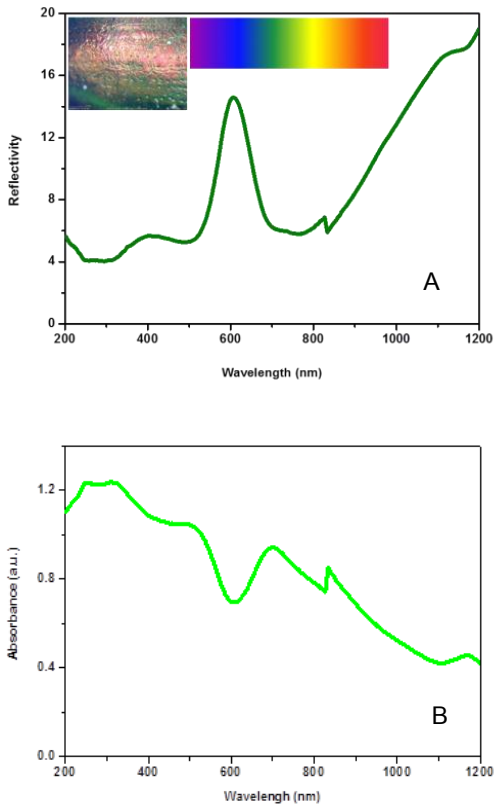

Figure 3. Metallic reflection (Reddish green) (A) and light absorption (Light green) (B) of body of male *Sagra femorata*

อภิปรายผล

ด้วงขาโตชนิด *Sagra femorata* เป็นแมลงปีกแข็งในอันดับ Coleoptera วงศ์ Chrysomelidae จัดเป็นแมลงชนิดเฉพาะถิ่น (Endemic species) ที่มีการกระจายตัวในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และกลายมาเป็นชนิดพันธุ์ต่างถิ่น (Alien species) หรือชนิดรุกราน (Invasive alien species) ในบางประเทศ เช่น ประเทศญี่ปุ่น ด้วงชนิดนี้มี 1 ชั่วอายุขัยต่อปี (Generation) ตัวเต็มวัยพบได้ในช่วงต้นฤดูฝน ขนาดลำตัวยาวประมาณ 20-22 มิลลิเมตร มีหลากหลายสี อาทิ สีน้ำเงิน เขียว เขียวทอง หรือแดงม่วง [10-11]

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างสีด้วงขาโตเพศผู้พบว่ามีเฉดสีเหมือนโลหะ ลักษณะสีมีสองโทนสี ทำให้สะดุดตากว่าด้วงเพศผู้ชนิดอื่น ๆ ที่มีโทนสีเดียว และเมื่อเปรียบเทียบกับด้วงขาโตเพศเมียที่มีสีน้ำเงินเข้มเพียงสีเดียวตามหลักทฤษฎีสีคือแม่สีทำให้เพศผู้มีสีที่ดึงดูดเพศตรงข้ามมากกว่าเพศเมีย ทั้งนี้ด้วงขาโตเพศเมียมีค่าการสะท้อนแสงสูงสุดเพียง 10% และมีค่าดูดกลืนแสง 0.8 ในช่วงความยาวคลื่นช่วง 380-500 นาโนเมตร [12] คุณสมบัติที่พบครั้งนี้ ยังมีรายงานที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้โดยเฉพาะการศึกษาลักษณะคุณสมบัติโครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัลพื้นผิวบริเวณชั้นนอกในกลุ่มด้วงปีกแข็งในอันดับ Coleoptera ชนิดอื่น ๆ เช่น ด้วงดินวงศ์ Carabidae ชนิด *Carabus auronitens* และ *C. auratus* ด้วงดอกไม้วงศ์ Scarabaeidae ชนิด *Cetonia aurata* และ *Dicranorhina oberthuri* และด้วงงวงวงศ์ Curculionidae ชนิด *Entimus imperialis* ซึ่งเมื่อทดสอบการวัดค่าดูดกลืนแสงบนโครงสร้างพื้นผิว

แล้วพบว่ามีการสะท้อนของแสงและให้ผลของช่วงสีในช่วงสเปกตรัมที่มองเห็นได้ (Visible spectrum) ตั้งแต่สีเขียว เหลือง ส้ม แดง ตลอดจนน้ำตาลแดง [13-14] ซึ่งเป็นสเปกตรัมเดียวกับการศึกษาในด้วงขาโตชนิดนี้เช่นกัน ทั้งนี้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องประดับเพชรอัญมณีในโทนแม่สีซึ่งรวมถึงสีเขียวอีกด้วย ซึ่งการศึกษานี้ถือเป็นรายงานฉบับแรกในประเทศไทยที่อธิบายถึงผลจากการศึกษาโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ของด้วงขาโตชนิด *Sagra femorata*

สรุป

จากผลการศึกษาโครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัลในแมลงด้วงขาโต *Sagra femorata* เพศผู้ที่พบในประเทศไทย สามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัลโครงสร้างสีของแมลงด้วงขาโตเพศผู้

โครงสร้างสีของเพศผู้มีความหลากหลายสีและมีโครงสร้างลักษณะสัณฐานรูปทรงห้าเหลี่ยมเรียงตัวติดกันทำให้มีค่าการสะท้อนแสงได้ดี

2. ค่าดูดกลืนของแสงและค่าการสะท้อนแสงของแมลงด้วงขาโตเพศผู้

การดูดกลืนของแสงและการสะท้อนแสงของด้วงเพศผู้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการเลือกสีและวัสดุที่มีค่าการสะท้อนแสงรวมไปถึงการประยุกต์ใช้ในด้านการเคลือบสีทำให้ได้สีที่แตกต่างจากสีที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นต้น อย่างไรก็ตามมีข้อเสนอแนะว่าควรศึกษาเรื่องมุมที่แสงตกกระทบบนพื้นผิวในแต่ละช่วง รวมทั้งความแข็งของปีกผิวและลักษณะสัณฐานในระดับชั้นผิวของตัวด้วงเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Borror, D. J., C.A. Triplehorn. and Johnson, N.F. 1989. *An Introduction to the Study of Insects*. Harcourt Brace College Publishing. New York. USA.
2. Gullan, D. J. and Cranston, P.S. 1994. *The Insect: An Outline of Entomology*. Chapman and Hall. London. UK.
3. Triplehorn, C. A. and Johnson, N.F. 2005. *Borror and Delong's Introduction of the Study of Insect*. 7th ed. Peter Marshall Publishing. Belmont, California. USA
4. บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์ อรวรรณ สัมฤทธิ์เดช ขจร และมาริสา คุณธนวงศ์. 2553. *สิ่งประดิษฐ์ MIMIC ธรรมชาติ*. กรุงเทพฯ. สารคดี.
5. Mika, F., Matejková-Plšková, J., Jiwajinda, S., Dechkrong, P. and Shiojiri, M. 2012. Photonic crystal structure and coloration of wing scales of butterflies exhibiting selective wavelength iridescence. *Materials (Basel, Switzerland)*. 5(5): 754-771.

6. Welch, V. L., and Vigneron, J. P. 2007. Beyond butterflies-the diversity of biological photonic crystals. *Optical and Quantum Electronics*. 39(4): 295-303.
7. ศรัณย์ สัมฤทธิ์เดชขจร. 2549. *โฟโทนิกส์มหัศจรรย์แห่งแสง*, นานมีบุ๊คพับลิเคชัน, กรุงเทพฯ.
8. Mouchet, S., Vigneron, J.-P., Colomer, J.F., Vandenbem, C. and Deparis, O. 2012. Additive photonic colors in the Brazilian diamond weevil, Entimus imperialis. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. 8480(848003): 1-15.
9. Kinoshita, S., Yoshioka, S. and Miyazaki, J. 2008. Physics of structural colors. *Reports on Progress in Physics*. 71(7): 1-30.
10. Kimoto, S. and Gressitt, J. L. 1979. Chrysomelidae (Coleoptera) of Thailand, Cambodia, Laos and Vietnam. I. Sagrinae, Donaciinae, Zeugophorinae, Megalopodinae and Criocerinae. *Pacific Insects*. 20: 191-256.
11. Katsuki, M., Yokoi, T., Funakoshi, K. and Oota. N. 2014. Enlarged hind legs and sexual behavior with male-male interaction in *Sagra femorata* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Entomological News*. 124(3): 211-220.
12. สโรชา โพธิ์อภัย และฐิติพร เจาะจง. 2560. การศึกษาโครงสร้างโฟโตนิกส์คริสตัลในแมลงด้วงขาโต *Carvedon serratus* (Olivier) เพศเมีย.รายงานสืบเนื่องการประชุมสัมมนาวิชาการการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ เครือข่ายบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ ครั้งที่ 17. 2479-2486
13. Wu, X., Erbe, A., Raabe, D. and Fabritius, H.-O. 2013. Extreme optical properties tuned through phase substitution in a structurally optimized biological photonic *polycrystal*. *Advanced Functional Materials*. 23: 3615-3620.
14. Wu, X. 2014. *Structure-property-relations of cuticular photonic crystals evolved by different beetle groups (Insecta, Coleoptera)*. PhD Thesis, RWTH-Aachen, Aachen, Germany.