



บทความวิจัย

บทความจากงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 (TChE2016)

## การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

ณัฐพล โพธิ์ไพฑูริย์ และ ณัฏฐพล ภูตระกูลโชติ\*

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

\*ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2218-7521 อีเมล : nuttapol.p@chula.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.006

รับเมื่อ 1 มิถุนายน 2560 ตอรับเมื่อ 30 สิงหาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 12 มกราคม 2561

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติ และศึกษารูปแบบที่เหมาะสมในการเจืออนุภาคเงินระหว่างชั้นของวัสดุกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized Solar Cell; DSSC) โดยอาศัยหลักการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในเซลล์ให้สูงขึ้น ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (Photoconversion Efficiency; PCE) พบว่าอัตราส่วนอนุภาคเงินต่อเอทานอลและรูปแบบการเจืออนุภาคเงินระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (Short Circuit Current Density;  $J_{sc}$ ) อย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราส่วนอนุภาคเงินต่อเอทานอลที่ 1 : 500 และการเจืออนุภาคเงินระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ชั้น ให้ประสิทธิภาพ PCE สูงสุด 4.3% เพิ่มขึ้นคิดเป็น 58.9% เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์ทดสอบ DSSC ที่ไม่ได้เจือด้วยอนุภาคเงิน

**คำสำคัญ:** เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง, พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว, ทางน้ำยางธรรมชาติ, อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

การอ้างอิงบทความ: ณัฐพล โพธิ์ไพฑูริย์ และ ณัฏฐพล ภูตระกูลโชติ, “การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 183–190, ม.ค.-มี.ค. 2561.

## Synthesis of Silver Nanoparticles in Skim Natural Rubber for Dye-sensitized Solar Cell

Nattapon Popaitoon and Nuttapol Pootrakulchote\*

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok Thailand

\*Corresponding Author, Tel. 0-2218-7521, E-mail: nuttapol.p@Chula.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.006

Received 1 June 2017; Accepted 30 August 2017; Published online: 12 January 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research focuses on synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) in the skim natural rubber latex and study the doping pattern of AgNPs onto mesoporous nanocrystalline layers of TiO<sub>2</sub> to improve the efficiency of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). By the surface plasmon resonance effect of silver nanoparticles, the photocurrent of DSSC test devices can be increased. The result shows that the ratio of AgNPs to ethanol and the doping pattern in TiO<sub>2</sub> film significantly affect the photocurrent density. DSSC test devices employing the ratio of AgNPs to ethanol 1 : 500 and the AgNPs doped between three layers of TiO<sub>2</sub> film yield the best photoconversion efficiency of 4.3%, increased by 58.9% in comparison with those without AgNPs doping.

**Keywords:** Dye-Sensitized Solar Cell, Surface Plasmon Resonance, Skim Natural Rubber Latex, Silver Nanoparticles

Please cite this article as: N. Popaitoon and N. Pootrakulchote, "Synthesis of silver nanoparticles in skim natural rubber for dye-sensitized solar cell," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 183–190, Jan.–Mar. 2018 (in Thai).



## 1. บทนำ

ปัจจุบันเซลล์สุริยะมีบทบาทสำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทน ไม่ว่าจะเป็นการทำฟาร์มเซลล์สุริยะ หรือระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop) ซึ่งได้รับการส่งเสริมจากทางภาครัฐ แต่มีข้อจำกัดคือเซลล์สุริยะที่ใช้ส่วนใหญ่ผลิตด้วยเทคโนโลยีซิลิคอนซึ่งมีราคาสูงเมื่อเทียบกับหน่วยของพลังงานที่ได้รับ และมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยาก จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาวิจัยเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell; DSSC) ที่ผลิตได้ง่าย และมีต้นทุนที่ต่ำลง แต่เนื่องจากเซลล์สุริยะ DSSC ที่พัฒนาได้ยังมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ งานวิจัยในทศวรรษที่ผ่านมาจึงเน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ DSSC ได้แก่ การใช้สีย้อมที่มีช่วงการดูดกลืนแสงกว้าง การประยุกต์เทคนิคในระดับนาโนเมตรในการปรับปรุงพื้นผิว หรือรูปร่างของชั้นไทเทเนียม รวมถึงการเจือชั้นไทเทเนียมด้วยอนุภาคระดับนาโนเมตรของโลหะมีตระกูล เช่น เงิน หรือทองคำ ซึ่งมีสมบัติพิเศษเชิงแสง นั่นคือพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว (Surface Plasmon Resonance; SPR) หรือปรากฏการณ์เชิงแสงซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบลงบนโลหะ และอิเล็กตรอนที่อยู่ในอนุภาคของโลหะ ทำให้เกิดการสั่นรวม (Collective Oscillation) ส่งผลให้เกิดการกระเจิง (Scattering) ของแสงที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะไปทุกทิศทาง แรงกระตุ้นที่ของอิเล็กตรอนพลังงานสูง และเพิ่มกระแสไฟฟ้าในระบบให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจึงสูงขึ้น ดังเช่นในงานวิจัยของ Dissanayake *et al.* [1] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยการใช้อุณหภูมิและทองระดับนาโนเมตร ซึ่งเตรียมจากกระบวนการรีดักชันทางเคมี พบว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้เป็น 6.23% และ 6.51% ตามลำดับ เทียบกับประสิทธิภาพของเซลล์มาตรฐาน 5.12% หรือในงานวิจัยของ Lim *et al.* [2] ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้อุณหภูมิระดับนาโนเมตรบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือ (Dope) ด้วยไนโตรเจนและซิลเฟอร์ (N,S-TiO<sub>2</sub>)

พบว่าการใช้อุณหภูมิระดับนาโนเมตรช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากกรณีที่เจือด้วยไนโตรเจนและซิลเฟอร์เพียงอย่างเดียวจาก 3.35% เป็น 8.22% หรือเพิ่มขึ้น 145% งานวิจัยนี้จึงมุ่งเพิ่มประสิทธิภาพของ DSSC โดยเจือด้วยอุณหภูมิระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำยาธรรมชาติซึ่งเป็นของเหลือจากอุตสาหกรรมยาง มีราคาถูก ด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีแบบ Green Synthesis [3] เพื่อให้ได้เซลล์สุริยะประสิทธิภาพสูงที่มีกระบวนการผลิตเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

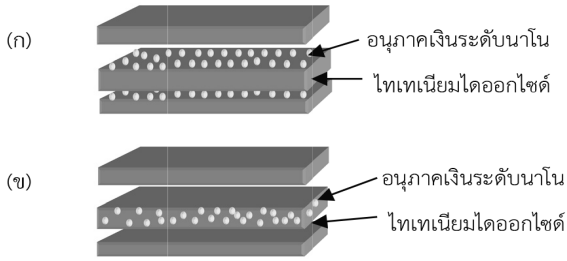
## 2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยาธรรมชาติ

ผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 8 mmol/L กับทางน้ำยาธรรมชาติ จากองค์การสวนยาง จังหวัดนครศรีธรรมราช ให้สารผสมมีปริมาณเนื้อยาง 0.05% DRC และความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 1.2 mmol/L เจือจางโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water) กวนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที จนสีเปลี่ยนจากขาวขุ่นเป็นสีน้ำตาล [4] นำสารที่ได้ 1.5 ml ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 14000 rpm เพื่อแยกอนุภาคเงินออกจากองค์ประกอบอื่น ยืนยันการเกิดขึ้นของอนุภาคเงินโดยเทคนิค XRD และ FE-SEM-EDS ศึกษาผลการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงโดยเทคนิค UV-VIS Spectroscopy วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเงินด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer และศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคเงินในไทเทเนียมไดออกไซด์โดย FE-SEM-EDS แบบ Mapping

### 2.2 การเตรียมเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

เตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงโดยตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (Fluorine-doped Tin Oxide; FTO) ขนาด 3 x 14.5 เซนติเมตร แช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ 40 mM ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นพิมพ์สกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์จำนวน 3 และ 4 ชั้น โดยใช้บล็อกสกรีนขนาด Mesh 90T จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 325°C เป็นเวลา 5 นาที 375°C, 15 นาที



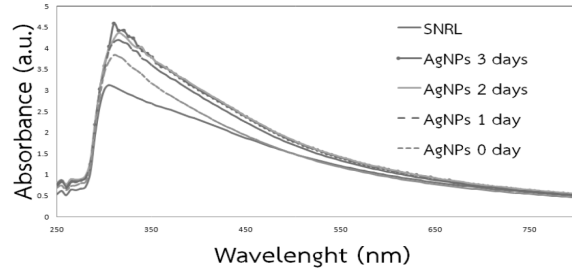
**รูปที่ 1** รูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (ก) รูปแบบที่ 1 เจือระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) รูปแบบที่ 2 เจือผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

450°C, 15 นาที และ 500°C, 15 นาที ตามลำดับ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ 40 mM ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 30 นาที ตัดกระจกให้ได้ขนาด 1.2x1.5 เซนติเมตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C, 30 นาที ทิ้งให้เย็นนำไปแช่ในสารละลายสีย้อมไวแสงมาตรฐาน (รหัสสีย้อม Z907) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นประกอบเข้ากับกระจกนำไฟฟ้าอีกแผ่นหนึ่งที่เคลือบด้วยแพลททินัม เชื่อมกันด้วยวงแหวนพอลิเมอร์ บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในเซลล์ จากนั้นปิดผนึกเซลล์ให้เรียบร้อยนำไปวัดประสิทธิภาพด้วยเครื่อง I-V tester ต่อไป

### 2.3 การเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำอย่างธรรมชาติ

การศึกษาปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสมใน DSSC นำอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับเอทานอลในอัตราส่วน 1 : 10, 1 : 100, 1 : 200, 1 : 500 และ 1 : 1000 กรัมของอนุภาคเงินต่อมิลลิกรัมของเอทานอลนำไปเจือบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ระหว่างการพิมพ์สกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นที่ 1 กับ 2 นำไปประกอบเซลล์ทดสอบ DSSC และวัดประสิทธิภาพเพื่อการเปรียบเทียบในขั้นตอนต่อไป

การศึกษารูปแบบการเจือที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ทดสอบ DSSC ที่มีรูปแบบการเจืออนุภาคเงินในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน 2 รูปแบบ



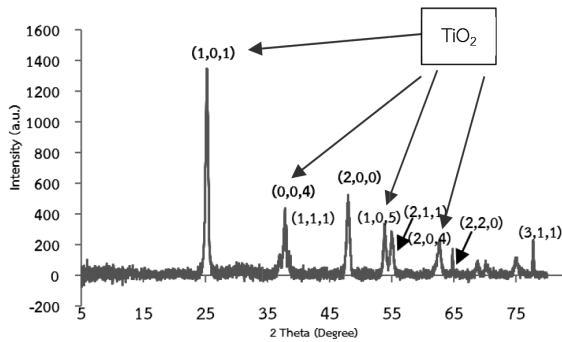
**รูปที่ 2** สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำอย่างธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ที่ 0 วัน 1 วัน 2 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 1 รูปแบบแรก หยดอนุภาคเงินที่ผสมกับเอทานอลในสัดส่วนที่เหมาะสมลงบนผิวของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ รองนเอทานอลแห้ง จึงทำการพิมพ์สกรีนอีกชั้นทับลงไป รูปแบบที่สอง นำอนุภาคเงินที่ผสมกับเอทานอลในสัดส่วนที่เหมาะสมมาผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ยังไม่ทำการพิมพ์สกรีน กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำไปพิมพ์สกรีนเป็นชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

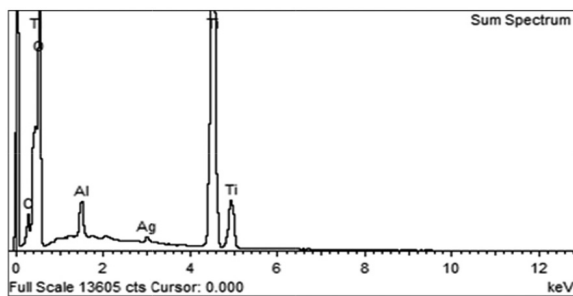
### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในทางน้ำอย่างธรรมชาติพบปริมาณเนื้อยาง 8.745%DRC ปริมาณแอมโมเนีย 0.554% ปริมาณกลูโคส 0.095 g/ml และปริมาณโปรตีน 7.687 µg/ml

รูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำอย่างธรรมชาติเปรียบเทียบระหว่างทางน้ำอย่างเจือจางสีขาวขุ่นกับสารผสมของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้ในทางน้ำอย่างเจือจางสีน้ำตาลอ่อน ผลการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นในทางน้ำอย่างที่มีอนุภาคเงินผสมอยู่ และความยาวคลื่นที่สารดูดกลืนแสงได้สูงที่สุด (Lambda-max) มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปทางแสงสีแดง (Red-shifted) นอกจากนั้นการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินในทางน้ำอย่างที่สังเคราะห์ขึ้นทันที เปรียบเทียบกับทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนนำมาวิเคราะห์เป็นเวลา 1, 2 และ 3 วัน พบว่า ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาจนถึงวันที่ 2



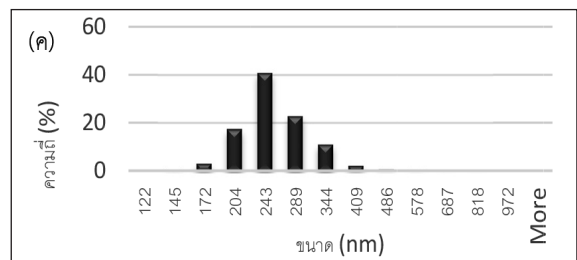
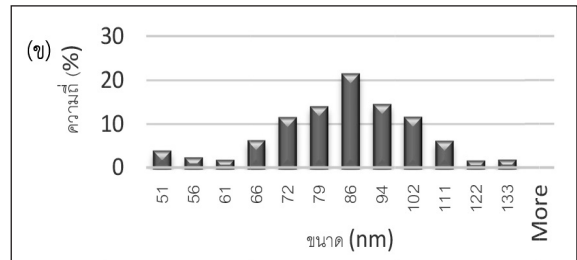
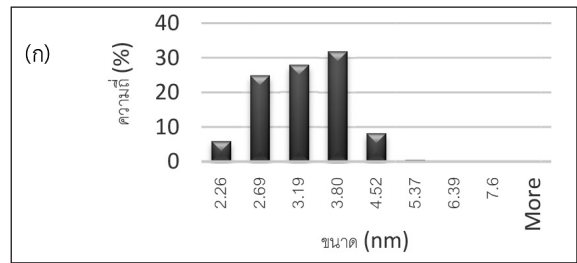
รูปที่ 3 XRD สเปกตรัมของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

หลังจากนั้นค่าจะเริ่มคงที่หรือลดลงซึ่งเป็นผลจากอนุภาคเงินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามเวลาที่มากขึ้น เนื่องจากอนุภาคเงินมีเวลาในการรวมตัวกันมากขึ้น ดังจะเห็นจากรูปที่ 4 ยิ่งวันมากขึ้น ขนาดของอนุภาคเงินก็จะใหญ่ขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งสารให้ความคงตัวในทางน้ำยางธรรมชาติ (โปรตีน) มีความเสถียรต่ำและสลายตัวเมื่อเวลาผ่านไปส่งผลให้อนุภาคเงินจับตัวกันได้มากขึ้น รวมทั้งผลของพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงิน ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของอนุภาค เมื่อขนาดหรือรูปร่างเปลี่ยนไป ก็จะส่งผลให้การดูดกลืนแสงและการกระเจิงแสงของอนุภาคเงินเปลี่ยนแปลงไปด้วย และเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าในระดับนาโนเมตร ผลของปรากฏการณ์นี้จะลดต่ำลง

รูปที่ 3 แสดง XRD สเปกตรัมของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (เจือรูปแบบที่



รูปที่ 5 ฮิสโทแกรมของขนาดอนุภาค ณ (ก) วันที่ 0 (ข) วันที่ 1 และ (ค) วันที่ 3 ตามลำดับ

ที่ 2) พบจุดยอดกราฟที่ตำแหน่ง (1,1,1), (2,0,0), (2,2,0) และ (3,1,1) แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างมีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบ นอกจากนั้นยังตรวจพบจุดยอดกราฟอื่นที่ยืนยันการมีอยู่ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอะนาเทส

รูปที่ 4 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์สเปกตรัมของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (เจือรูปแบบที่ 2) ซึ่งจะพบองค์ประกอบของธาตุ Ti, O, Ag และ Al ซึ่งเป็นการยืนยันการมีอยู่ของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในวินาที 0, 1 และ 3 มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 2-5 nm, 50-120 nm และ 170-410 nm ตามลำดับ จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

**ตารางที่ 1** สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรบนพื้นผิวของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างชั้นที่ 1 กับ 2 วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (1000 W/cm<sup>2</sup>) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm<sup>2</sup>

No.	# of TiO <sub>2</sub> layers	AgNPs : Ethanol ratio	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE (%)
1	2	1 : 10	0.71	3.60	0.64	1.6
2	2	1 : 100	0.72	3.91	0.70	2.0
3	2	1 : 200	0.75	2.08	0.69	1.1
4	2	1 : 500	0.74	5.45	0.70	2.8
5	2	1 : 1000	0.73	4.47	0.58	1.9

จากตารางที่ 1 แสดงผลการศึกษาปริมาณอนุภาคเงินที่เหมาะสมกับการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ อนุภาคเงินต่อเอทานอล 1 : 500 ให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J<sub>sc</sub>) สูงสุดที่ 5.5 mA/cm<sup>2</sup> ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 2.8% รองลงมาคือ อัตราส่วน 1 : 100, 1 : 1000, 1 : 10 และ 1 : 200 ตามลำดับ ที่สัดส่วน 1 : 200 ให้ประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J<sub>sc</sub>) ต่ำที่สุด ส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วน 1 : 500 ในการเจือปรับปรุงเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

จากตารางที่ 2 พบว่า รูปแบบในการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรทั้ง 2 รูปแบบสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์สุริยะให้สูงขึ้นได้ โดย SDSDS ซึ่งเจือด้วยอนุภาคเงินระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นที่ 1 กับ 2 และ 2 กับ 3 สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้ดีที่สุดคือ 3.1% ส่วน SDADS ซึ่งมีทั้งเจือระหว่างชั้นและผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และ SAS ซึ่งเจืออนุภาคเงินผสมกับชั้นที่สองของไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ก็สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้เท่ากับ 2.9% สูงกว่าประสิทธิภาพของเซลล์ SSS ซึ่งเป็นเซลล์มาตรฐาน เนื่องจากผลของ

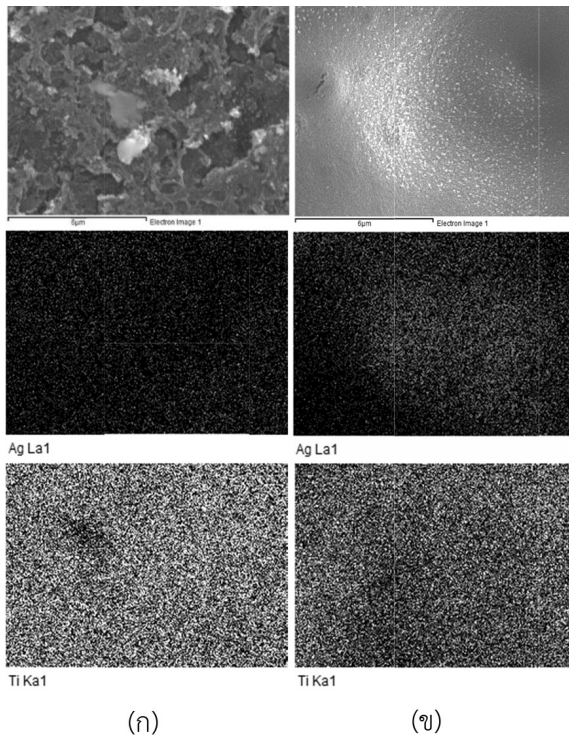
การกระเจิงแสงเข้าไปยังสีย้อมได้มากขึ้น เพราะการเกิดปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินที่เจือลงไป แต่ในกรณี AAA ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานต่ำกว่าเซลล์มาตรฐาน แม้ว่ากระจายตัวของอนุภาคเงินจะดีกว่า เพราะการผสมลงไปในทุกส่วนของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งโอกาสการกระเจิงแสงจากปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวจะมากกว่า

**ตารางที่ 2** สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรรูปแบบต่างๆ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (1000 W/cm<sup>2</sup>) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm<sup>2</sup>

Sample	# of TiO <sub>2</sub> layers	รูปแบบการเจือ AgNPs	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE (%)
SSS	3	ไม่ผสม	0.75	4.70	0.70	2.5
SDSDS	3	1	0.72	6.45	0.67	3.1
SDADS	3	1 & 2	0.72	6.45	0.64	2.9
SAS	3	2	0.73	6.42	0.62	2.9
AAA	3	2	0.73	3.15	0.73	1.7

S แทนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์  
D แทนการเจืออนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นของ TiO<sub>2</sub>  
A แทนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือผสมอนุภาคเงิน

แต่จากรูปที่ 6 พบว่าการเจือผสมในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคเงินจะเกาะกลุ่มกันมากกว่าในกรณีการเจือระหว่างชั้น และการรวมกลุ่มของอนุภาคนี้อาจจะไปขัดขวางการยึดติดของสีย้อมไวแสงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งบดบังแสงที่จะส่องไปยังชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่ำลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะต่ำลงด้วย นอกจากนั้นในรูปที่ 6 ยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของทั้ง 2 กรณี โดยพบว่าการเจือระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระกว่าในอีกกรณี ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการหยดอนุภาคเงินผสมกับ



**รูปที่ 6** ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์แบบ Mapping ของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เชื่อมกับไทเทเนียมไดออกไซด์โดย (ก) เจือระหว่างชั้น (ข) เจือผสมในชั้น

เอทานอลลงบนชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในขณะเตรียมเซลล์ รอยขรุขระนี้จะถูกแทนที่ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อพิมพ์สกรีนชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นถัดไป อาจด้วยเหตุนี้อนุภาคเงินจึงกระจายตัวได้ดีขึ้น การเจืออนุภาคเงินระหว่างชั้นจึงให้ประสิทธิภาพสูงกว่า

จากตารางที่ 3 พบว่า การเติมอนุภาคเงินลงไประหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลทำให้ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.77 mA/cm<sup>2</sup> (1) เป็น 5.92 mA/cm<sup>2</sup> (2), 6.65 mA/cm<sup>2</sup> (3) และ 8.71 mA/cm<sup>2</sup> (4) ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 2.7% (1) เป็น 2.9% (2), 3.2% (3) และ 4.3% (4) ตามลำดับ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 7.8% (2), 18.6% (3) และ 58.9% (4) ตามลำดับ เป็นผลมาจากอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเมื่อได้รับแสงตกกระทบเกิดปรากฏการณ์

พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว ช่วยในการกระเจิงแสงเข้าไปยังสีย้อมได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนชั้นของการเจืออนุภาคเงินพบว่า กรณีเจืออนุภาคเงินระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 3 ครั้งสลับกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 ชั้นให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องด้วยผลจากการกระจายตัวของอนุภาคเงินที่กระจายได้ดีขึ้น ในขณะที่ปริมาณการเจือเท่าเดิม

**ตารางที่ 3** สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (1000 W/cm<sup>2</sup>) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm<sup>2</sup>

Sample	# of TiO <sub>2</sub> layers	# of AgNPs layers	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE (%)
SSSS	4	0	0.73	5.77	0.65	2.7
SSDSS	4	1	0.73	5.92	0.68	2.9
SDSSDS	4	2	0.71	6.65	0.68	3.2
SDSDSDS	4	3	0.75	8.71	0.66	4.3

โดย S แทนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

D แทนการเจืออนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นของ TiO<sub>2</sub>

#### 4. สรุป

อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ขึ้นในทางนี้ข้างธรรมชาติ สามารถนำมาประยุกต์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงได้ ปริมาณในการเจืออนุภาคเงินที่เหมาะสมคืออัตราส่วนอนุภาคเงินต่อเอทานอล 1 : 500 รูปแบบการเจือที่เหมาะสมคือเจืออนุภาคเงินระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และจำนวนเจือระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ชั้น ให้ประสิทธิภาพมากที่สุดโดยประสิทธิภาพของเซลล์ทดสอบ DSSC ที่เจือด้วยอนุภาคเงินระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นคิดเป็น 58.9% เปรียบเทียบกับเซลล์มาตรฐานที่ไม่ผ่านการเจืออนุภาคเงิน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ผู้สนับสนุนงบประมาณทำวิจัย ขอบุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เอื้อเฟื้อพื้นที่และสาธารณูปโภคในการทำวิจัย ขอบุณองค์การสวนยาง จังหวัดนครศรีธรรมราช เอื้อเฟื้อ ทางการเงินอย่างธรรมชาติเพื่อทำวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. A. K. L. Dissanayake, J. M. K. W. Kumari, G. K. R. Senadeera, and C. A. Thotawatthage “Efficiency enhancement in plasmonic dye-sensitized solar cells with TiO<sub>2</sub> photoanodes incorporating gold and silver nanoparticles,” *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 46, no. 1, pp. 47–58, 2016.
- [2] S. P. Lim, A. Pandikumar, H. N. Lim, R. Ramaraj,

and N. M. Huang, “Boosting photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells using silver nanoparticle-decorated N,S-Co-doped-TiO<sub>2</sub> photoanode,” *Scientific Reports*, Article number: 11922, 2015.

- [3] E. J. Guidelli, A. P. Ramos, M. E. D. Zaniquelli, and O. Baffa, “Green synthesis of colloidal silver nanoparticles using natural rubber latex extracted from *Hevea brasiliensis*,” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 82, no. 1, pp. 140–145, 2011.
- [4] T. Suwatthanarak, B. Than-ardna, D. Danwanichakul, and P. Danwanichakul, “Synthesis of silver nanoparticles in skim natural rubber latex at room temperature,” *Materials Letters*, vol. 168, pp. 31–35, 2016.