

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง



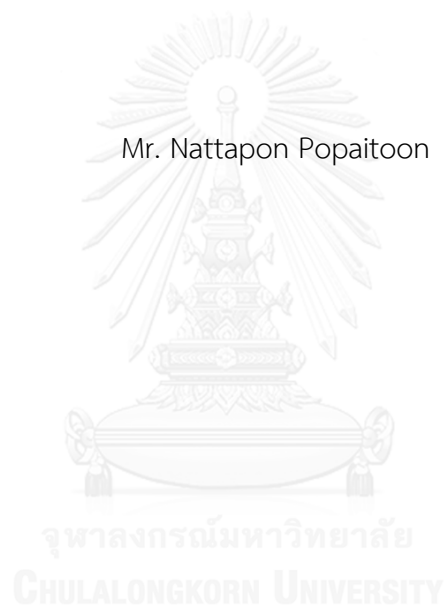
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES IN SKIM NATURAL RUBBER FOR DYE-
SENSITIZED SOLAR CELL

Mr. Nattapon Popaitoon



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำอย่าง

ธรรมชาติสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

โดย

นายณัฐพล โพธิ์ไพฑูรย์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. ณัฐพล ภู่อรรถกุลโชติ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. ณัฐพล ภู่อรรถกุลโชติ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิฎฐิระนันท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรวุฒิ ช่างโชติ)

ณัฐพล โพธิ์ไพฑูรย์ : การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติ สำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES IN SKIM NATURAL RUBBER FOR DYE-SENSITIZED SOLAR CELL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. ณัฐพล ภูตระกูลโชติ, 111 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงโดยการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ารับแสงด้วยการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร อาศัยหลักการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติซึ่งเป็นของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมผลิตยาง ผลการศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคเงินพบว่า อุณหภูมิ (26 – 60 องศาเซลเซียส) น้ำหนักโมเลกุล (200 – 35000) และปริมาณการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก (ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร 0.1 – 2) ไม่มีผลต่อขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรอย่างมีนัยสำคัญ ณ วันสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามกรณีเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอกได้แก่โพลิเอทิลีนไกลคอลมีผลทำให้ขนาดอนุภาคเงินเฉลี่ยคงที่ในช่วง 400 – 800 นาโนเมตรหลังเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์โดยไม่ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลหรือปริมาณที่เติม จากนั้นนำอนุภาคเงินที่เตรียมได้เจือผสมลงในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) บนขั้วไฟฟ้ารับแสง การศึกษาผลของรูปแบบและปริมาณการเจืออนุภาคเงินที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์สุริยะ พบว่าเซลล์ทดสอบที่เจืออนุภาคเงินในตัวทำละลายเอทานอลในอัตราส่วน 1:500 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (สมมูลกับปริมาณการเจือผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร 2.59 × 10⁻³ มิลลิกรัม) และรูปแบบการเจือแบบแทรกระหว่างชั้นของ TiO₂ จำนวน 4 ชั้นให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุด 4.3% เพิ่มขึ้นคิดเป็น 58.9 % เมื่อเทียบกับเซลล์ทดสอบที่ไม่ได้เจืออนุภาคเงิน นอกจากนั้นผลทดสอบสมรรถนะของเซลล์ทดสอบที่เจือด้วยโมเดลอนุภาคเงินบริสุทธิ์ให้ประสิทธิภาพสูงสุด 4.4% ยืนยันได้ว่าอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ดัดเทียมอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในสภาวะควบคุมเลียนแบบทางน้ำยางธรรมชาติ

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5771980723 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: DYE- SENSITIZED SOLAR CELL / PLASMONIC RESONANCE / SURFACE PLASMON RESONANCE / SKIM NATURAL RUBBER LATEX / SILVER NANOPARTICLES / เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง / พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว / ทางน้ำยางธรรมชาติ / อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

NATTAPON POPAITOON: SYNTHESIS OF SILVER NANOPARTICLES IN SKIM NATURAL RUBBER FOR DYE-SENSITIZED SOLAR CELL. ADVISOR: NUTTAPOL POOTRAKULCHOTE, Ph.D., 111 pp.

This research aims to enhance the performance of dye-sensitized solar cell (DSSC) by doping silver nanoparticles (AgNPs) synthesized in the industrial-waste skim natural rubber latex to increase plasmonic resonance effect of the photoanode. Experimental results revealed that reaction temperatures (26 – 60 °C), amounts and molecular weights of external stabilizing agent (0.1 – 2% w/v and Mw = 200 – 35000) have no significant effect to the size of AgNPs during synthesis process. However, it was reported that AgNPs preserved the size in range of 400 – 800 nm within seven consecutive days after synthesis when poly(ethylene glycol) was used as external stabilizing agent regardless of its amount and molecular weight. The performance tests showed that DSSC devices based on the doping of AgNPs-in-ethanol solution with 1:500 w/v ratio (equivalent to the doped amount of AgNPs 2.59×10^{-3} mg) in between each layer of the 4-layer TiO₂ film during screen-printing process give the highest photoconversion efficiency (PCE) value of 4.3%. The number is considered 58.9% greater than that of DSSC devices without AgNPs doping. Furthermore, the DSSC devices based on the doping of trusted model AgNPs used for benchmarking provide the highest PCE value of 4.4%. This suggests that AgNPs simply-synthesized in skim natural rubber latex show a plasmonic resonance quality comparable to that synthesized in trusted conditions.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Fuel Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก อาจารย์ ดร. ณัฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย การติดตามความก้าวหน้า มาโดยตลอด จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

งานวิจัยเรื่อง “ การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติ สำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี เทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือวิเคราะห์ ในการทำวิจัยนี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. นพิตา ทิณชिरะนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ ชวงโชติ กรรมการภายนอก ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็น กรรมการคุมสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย และผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ “ โครงการทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษก สมโภช ” ที่เป็นผู้สนับสนุนทุนการวิจัยที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่บุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวก สำหรับการใช้อุปกรณ์ และการทดสอบวิเคราะห์ต่างๆและการใช้ห้องปฏิบัติการ ขอขอบพระคุณ พี่ๆ เพื่อนๆและน้องๆ นิสิตภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และข้อเสนอแนะความคิดเห็นในการ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษา การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆด้านและเป็นกำลังใจให้ผู้ทำวิจัยเสมอมาจนสำเร็จ การศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology).....	4
2.1.1 นาโนศาสตร์ (nanoscience).....	5
2.1.2 วัสดุระดับนาโน (nanomaterial).....	5
2.1.3 สมบัติของวัสดุระดับนาโน (properties of nanomaterials).....	7
2.1.3.1 สมบัติทางพื้นผิว (Surface properties).....	8
2.1.3.2 สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties).....	10
2.1.3.3 สมบัติทางแสง (Optical properties).....	13
2.1.3.3.1 ปฏิสัมพันธ์ของแสงกับวัตถุ.....	13
2.1.3.3.2 พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว.....	16
2.2. อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร.....	19
2.2.1 อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร.....	19

2.2.2 การเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร	20
2.3. สารให้ความคงตัว (surfactant or stabilizer or stabilizing agent)	21
2.3.1 โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol : PEG).....	21
2.4. ยางธรรมชาติ	22
2.4.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)	22
2.4.2 สมบัติทั่วไปของน้ำยางธรรมชาติ.....	22
2.4.3 กระบวนการผลิต	23
2.5 รังสีอาทิตย์.....	24
2.5.1 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์	26
2.5.2 มวลอากาศ	27
2.6 เซลล์สุริยะ	29
2.6.1 ชนิดของเซลล์สุริยะ	30
2.6.2 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	31
2.6.2.1 สีย้อมไวแสง (Sensitizer)	32
2.6.2.2 อนุภาคของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	33
2.6.2.3 สารอิเล็กโทรไลต์.....	33
2.6.2.4 ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง	33
2.6.2.5 ขั้วไฟฟาร่วม.....	33
2.6.3 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ.....	35
2.6.4 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะ	40
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในน้ำยางธรรมชาติ.....	42

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมประยุกต์ใช้อุณหภูมิระดับนาโนเมตรในเซลล์ สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	44
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	46
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	47
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	49
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	50
3.5 ส่วนการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร	52
3.5.1 หองศ์ประกอบพื้นฐานของทางน้ำยางธรรมชาติ	52
3.5.1.1 การหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC) ของน้ำยาง ธรรมชาติ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1076-02	52
3.5.1.2 การหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) ของน้ำยาง ธรรมชาติ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1076-02	52
3.5.1.3 การหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นด่างหรือปริมาณแอมโมเนีย (% Alkalinity) ของน้ำยางธรรมชาติ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1076-02	53
3.5.1.4 การหาปริมาณกลูโคสในทางน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ Brix refractometer ...	53
3.5.1.5 การหาปริมาณโปรตีนในทางน้ำยางธรรมชาติโดยใช้วิธีเจลดดาห์ล (Kjeldahl method)	54
3.5.2 สังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร	55
3.5.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติที่ อุณหภูมิห้อง [30]	55
3.5.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่อขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโน เมตร	55
3.5.2.3 ศึกษาผลของการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก และน้ำหนักรีดแลกซ์ที่ ต่างกันของสารให้ความคงตัวจากภายนอก	56

3.5.2.4	ศึกษาผลของเวลาหลังการสังเคราะห์ต่อขนาดอนุภาคที่เปลี่ยนไป	57
3.5.2.5	การเตรียมอนุภาคเงินเจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ในขั้นตอนการสังเคราะห์.....	57
3.6	ส่วนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงและขั้วไฟฟ้าร่วมเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	57
3.6.1	การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง	57
3.6.2	การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม.....	59
3.6.3	ศึกษาปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม	60
3.6.4	ศึกษารูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม	60
3.6.5	ศึกษาผลการสังเคราะห์อนุภาคเงินก่อนเจือเปรียบเทียบกับเจือผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์	61
3.7	การเตรียมเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	62
3.7.1	การประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	62
3.8	ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.....	63
3.8.1	วัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะด้วยการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน.....	63
3.8.2	วิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า	63
บทที่ 4	ผลการทดลอง	64
4.1	องค์ประกอบพื้นฐานของทางน้ำยางธรรมชาติ.....	65
4.2	ผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่อขนาดของอนุภาคเงินที่ได้	66
4.3	ผลของการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก และน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันของสารให้ความคงตัวจากภายนอก	67
4.4	ผลของเวลาหลังการสังเคราะห์ต่อขนาดอนุภาคที่เปลี่ยนไป	73
4.5	ปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม.....	85
4.6	รูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม.....	87
4.7	ผลการสังเคราะห์อนุภาคเงินก่อนเจือเปรียบเทียบกับเจือผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์	93

4.8 ผลการวิเคราะห์หาช่วงการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี.....	96
4.9 ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (External quantum efficiency, EQE) โดยเครื่องมือหาประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก	97
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	99
5.1 สรุปผลการทดลอง	99
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
รายการอ้างอิง	103
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก.....	108
ภาคผนวก ข	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	111



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงขนาดเปรียบเทียบระหว่างวัสดุระดับนาโนกับสิ่งต่างๆ	7
รูปที่ 2.2 สีของทองคำขึ้นอยู่กับขนาดของพวกมัน.....	8
รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นพื้นผิวของปริมาตรจะเพิ่มขึ้นอย่างไรเมื่อขนาดลดลง (ภาพไม่เป็นไปตาม มาตราส่วน).....	8
รูปที่ 2.4 อัตราส่วนระหว่างความสูง (h) กับเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) กำหนดว่ารูปร่างเหมือนลวด หรือแผ่นดิสก์: รูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิว	9
รูปที่ 2.5 พลังงานพื้นผิวโดยรวมของสองลูกบาศก์ที่แยกกันจะสูงกว่าพลังงานพื้นผิวของสอง ลูกบาศก์ที่ผสานกัน	10
รูปที่ 2.6 ก) แลပ်พลังงานของฉนวน ข) แลပ်พลังงานของสารกึ่งตัวนำ ค) แลပ်พลังงานของ ตัวนำ.....	11
รูปที่ 2.7 ภาพเปรียบเทียบพลังงานของแถบช่องว่างพลังงาน (ลูกศร) ในผลึกสารกึ่งตัวนำขนาด ใหญ่ขนาดใหญ่ และควอนตัมดอทขนาดต่างๆ	12
รูปที่ 2.8 ก) ฟูลเลอร์รีน ข) ท่อนาโนคาร์บอน.....	13
รูปที่ 2.9 ปรากฏการณ์การกระเจิงแสงของอนุภาค	14
รูปที่ 2.10 การกระเจิงแบบเรย์เล และมีย์.....	16
รูปที่ 2.11 กระบวนการสั่นของพลาสมอน (plasmon oscillation) สำหรับอนุภาคโลหะระดับ นาโนเมตรทรงกลม	17
รูปที่ 2.12 ปฏิกริยาการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร	21
รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene).....	22
รูปที่ 2.14 กระบวนการผลิตน้ำยางข้นแบบคราว	23
รูปที่ 2.15 ชนิดของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก	26
รูปที่ 2.16 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์.....	27
รูปที่ 2.17 มุมซันิธ (Θ_z , Zenith Angle), มุมเดคลิเนชัน (α , Solar Declination Angle หรือ Solar altitude Angle) และมุมมุมาซิมูท (A, Azimuth Angle).....	28

รูปที่ 2.18 ชนิดของเซลล์สุริยะแบ่งตามยุคการพัฒนา	31
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างสี่ขั้วอมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพรี ดิน	32
รูปที่ 2.20 กลไกการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสี่ขั้วอมไวแสง	34
รูปที่ 2.21 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์สุริยะแบบที่ 1	35
รูปที่ 2.22 กราฟ I-V curve ของเซลล์สุริยะจากการต่อวงจรแบบที่ 1.....	36
รูปที่ 2.23 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์สุริยะแบบที่ 2	36
รูปที่ 2.24 กราฟ I-V curve ของเซลล์สุริยะจากการต่อวงจรแบบที่ 2.....	37
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างกราฟประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (IPCE หรือ EQE).....	39
รูปที่ 2.26 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์สุริยะ.....	40
รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ	42
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยใน ส่วนที่ 1 และ 2	50
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยใน ส่วนที่ 3 และ 4	51
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง	59
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม	60
รูปที่ 3.5 รูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (ก) รูปแบบที่ 1 เจือระหว่างชั้นไทเทเนียม ไดออกไซด์ และ (ข) รูปแบบที่ 2 เจือผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์	61
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโน เมตรที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส, 35 องศาเซลเซียส, 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ	66
รูปที่ 4.2 ฮีโตรแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ ก) 26 องศาเซลเซียส, ข) 35 องศาเซลเซียส, ค) 40 องศาเซลเซียส และ ง) 60 องศา เซลเซียส ตามลำดับ	66

- รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.1 %w/v, PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.2 %w/v, , PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.5 %w/v, PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 1 %w/v และ PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 2 %w/v ตามลำดับ 67
- รูปที่ 4.4 อีตโตรแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ ก) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, ข) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.1 %w/v, ค) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.2 %w/v, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.5 %w/v, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 1 %w/v และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 2 %w/v ตามลำดับ 68
- รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.1 %w/v, PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.2 %w/v, PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.5 %w/v, PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 1 %w/v และ เต็ม PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 2 %w/v ตามลำดับ 69
- รูปที่ 4.6 อีตโตรแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร ก) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, ข) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.1 %w/v, ค) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.2 %w/v, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.5 %w/v, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 1 %w/v และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 2 %w/v ตามลำดับ 70
- รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, เต็ม PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.1%w/v, เต็ม PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.2%w/v, เต็ม PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.5%w/v, เต็ม PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 1%w/v และเต็ม PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 2%w/v ตามลำดับ 71
- รูปที่ 4.8 อีตโตรแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร ก) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, ข) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.1 %w/v, ค) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.2 %w/v, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.5 %w/v, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 1 %w/v และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 2 %w/v ตามลำดับ 72
- รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้องโดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ตามลำดับ 73

รูปที่ 4.10 อีตโตรแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่
สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้องโดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก ก) 0 วัน, ข) 1 วัน, ค) 2 วัน,
ง) 3 วัน, จ) 1 สัปดาห์ และฉ) 1 เดือน ตามลำดับ 74

รูปที่ 4.11 อีตโตรแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่
สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้อง) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0 วัน, ข) ไม่มีสารให้ความคง
ตัวจากภายนอก 1 สัปดาห์, ข) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.1 %w/v 1 สัปดาห์, ค) PEG น้ำหนัก
โมเลกุล 200 0.2 %w/v 1 สัปดาห์, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.5 %w/v 1 สัปดาห์, จ) PEG
น้ำหนักโมเลกุล 200 1 %w/v 1 สัปดาห์ และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 2 %w/v 1 สัปดาห์
ตามลำดับ..... 76

รูปที่ 4.12 อีตโตรแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่
สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้อง) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0 วัน, ข) ไม่มีสารให้ความคง
ตัวจากภายนอก 1 สัปดาห์, ข) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.1 %w/v 1 สัปดาห์, ค) PEG
น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.2 %w/v 1 สัปดาห์, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.5 %w/v 1
สัปดาห์, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 1 %w/v 1 สัปดาห์ และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500
2 %w/v 1 สัปดาห์ ตามลำดับ..... 77

รูปที่ 4.13 อีตโตรแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่
สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้อง) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0 วัน, ข) ไม่มีสารให้ความคง
ตัวจากภายนอก 1 สัปดาห์, ข) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.1 %w/v 1 สัปดาห์, ค) PEG
น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.2 %w/v 1 สัปดาห์, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.5 %w/v 1
สัปดาห์, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 1 %w/v 1 สัปดาห์ และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล
35000 2 %w/v 1 สัปดาห์ ตามลำดับ..... 778

รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่
สังเคราะห์ใน PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน
ตามลำดับ..... 80

รูปที่ 4.15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่
สังเคราะห์ใน PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน
ตามลำดับ..... 81

รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ใน PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือนตามลำดับ.....	81
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมจากเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของ (ก) โทเทเนียมไดออกไซด์ และ(ข) อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับโทเทเนียมไดออกไซด์	83
รูปที่ 4.18 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ของ(ก) โทเทเนียมไดออกไซด์ และ(ข) อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับโทเทเนียมไดออกไซด์.....	84
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มโทเทเนียมไดออกไซด์กับจำนวนชั้นการสกรีน	87
รูปที่ 4.20 รูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (ก) รูปแบบที่ 1 เจือระหว่างชั้นโทเทเนียมไดออกไซด์, (ข) รูปแบบที่ 2 เจือผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นโทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ค) รูปแบบที่ 3 เจือผสม และผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นโทเทเนียมไดออกไซด์.....	88
รูปที่ 4.21 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์แบบ Mapping ของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับโทเทเนียมไดออกไซด์โดย (ก) เจือระหว่างชั้น (ข) เจือผสมในชั้น	90
รูปที่ 4.22 ก) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความละเอียด 30,000 เท่า และ ข) - ง) แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์แบบ Mapping ของพื้นผิวของโทเทเนียมไดออกไซด์ในกรณีการเตรียมโทเทเนียมไดออกไซด์เพสพร้อมทั้งสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในขั้นตอนเดียวกัน.....	95
รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโทเทเนียมไดออกไซด์ และโทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร	966
รูปที่ 4.24 ก) แสดงร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%IPCE) และ ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดัน (J-V curve) ของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่เจือด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเปรียบเทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน	97

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 วัสดุระดับนาโนมีการแบ่งประเภทตามมิติข้อมูล.....	6
ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดด้าน จำนวน และพื้นที่ผิวของลูกบาศก์ เมื่อแบ่งลูกบาศก์ 1 ลูกบาศก์ เมตรถูกตัดเป็นก้อนเล็กๆ	9
ตารางที่ 2.3 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อ เทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Petty, 2004 และ ISO, 2007).....	24
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบพื้นฐานของทางน้ำทางธรรมชาติ.....	65
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดอนุภาคของเงินระดับนาโนเมตรจากกรณีต่างๆ 7 วันหลังจากสังเคราะห์... 79	79
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการเจืออนุภาคเงิน ระดับนาโนเมตรบนพื้นผิวของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างชั้น ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm ²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm ²	85
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วย อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรรูปแบบต่างๆ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm ²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm ²	889
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยการ เจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่จำนวนชั้นไทเทเนียมได ออกไซด์ต่างๆ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm ²) และมีพื้นที่ รับแสง 0.25 cm ²	91
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยการ เจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีรูปแบบการกระจาย ต่างๆ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm ²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm ²	92
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยการ เจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับการเจือผสม กับไทเทเนียมไดออกไซด์ในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงิน วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความ เข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm ²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm ²	93



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าถือเป็นสิ่งสำคัญในชีวิตประจำวัน พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ผลิตจากพลังงานฟอสซิลเป็นหลัก และเนื่องด้วยสถานะโลกในปัจจุบันกำลังประสบปัญหาเรื่องปริมาณพลังงานฟอสซิลที่ลดลง ส่งผลต่อความมั่นคงทางพลังงานของโลก ด้วยเหตุนี้จึงมีการคิดค้นหาพลังงานทดแทนรูปแบบต่างๆรวมถึงการพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ เช่น เซลล์สุริยะ เป็นต้น แต่ปัญหาคือเซลล์สุริยะที่ผลิตได้ในปัจจุบันยังมีราคาสูงเมื่อเทียบกับหน่วยของพลังงานที่ได้รับ โดยส่วนใหญ่เซลล์สุริยะที่ผลิตในปัจจุบันเป็นแบบซิลิกอนซึ่งมีราคาแพง และมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยาก ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงให้ความสำคัญกับการวิจัยเซลล์สุริยะให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์สุริยะชนิดซิลิกอน และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาวิจัยเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell, DSSC) ซึ่งอาศัยหลักการทำงานจากกลไกทางปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่คล้ายคลึงกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช แต่เนื่องจาก DSSC ที่พัฒนาได้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ งานวิจัยต่อมาจึงคิดแก้ปัญหาดังกล่าวโดยวิธีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการใช้สีย้อมที่มีช่วงการดูดกลืนแสงกว้าง การประยุกต์ใช้เทคนิคในระดับนาโนเมตร รวมทั้งการใช้อนุภาคโลหะมีสกุลระดับนาโนเมตร เช่น เงิน หรือทองคำ ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษทางแสง คือ พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว (surface plasmon resonance, SPR) [1, 2] หรือปรากฏการณ์เชิงแสงซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิเล็กตรอนที่อยู่ในโลหะระดับนาโนเมตร ซึ่งจะเกิดเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมาตกกระทบโลหะกลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกกะจัดอยู่ในอนุภาคระดับนาโนเมตรจะเกิดการสั่นรวม (collective oscillation) ดังรูปที่ 1 และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่อิเล็กตรอนสั่นในโลหะระดับนาโนเมตรจะทำให้เกิดการกำทอน (resonance) ขึ้น ซึ่งอันตรกิริยาที่แสงกระทำต่อโลหะจะเกิดได้สองแบบคือแสงจะตกกระทบเกิดการดูดกลืนแสงและสะท้อนออกไปด้วยความยาวคลื่นเท่าเดิมทุกทิศทางเรียกว่าการกระเจิง (scattering) และการกระเจิงแสงที่เพิ่มขึ้นนี้จะไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ DSSC ให้สูงขึ้น งานวิจัยนี้มุ่งเพิ่มประสิทธิภาพของ DSSC โดยใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำยาธรรมชาติ ซึ่งเตรียมจากวิธีรีดักชันทางเคมี แบบ green synthesis เพื่อลดการใช้สารเคมีในขั้นตอนการเตรียม และได้เซลล์สุริยะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำอย่างธรรมชาติ
2. เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำอย่างธรรมชาติในรูปแบบ และ ปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงให้เพิ่มขึ้นได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำอย่างธรรมชาติซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมยาง ที่มีการนำเนื้อยางออกไปมาใช้เป็นตัวกลางในการเตรียมอนุภาคเงินจากวิธีรีดักชันทางเคมี แบบ green synthesis โดยอาศัยแอมโมเนีย ที่ถูกใส่เพื่อเสถียรน้ำยางให้คงสภาพ โดยเนื้อยางไม่ตกตะกอนและกลูโคสในน้ำอย่างธรรมชาติ มาเป็นตัวรีดิวซ์ ซิลเวอร์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้น และมีการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอกออกไป จากนั้นนำอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรไปประยุกต์ใส่ในชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ผลิตเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัย
3. ศึกษาการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยวิธีรีดักชันทางเคมีในทางน้ำอย่างธรรมชาติโดยอาศัยแอมโมเนียในน้ำยางเป็นตัวรีดิวซ์ใช้ซิลเวอร์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้น และ สารให้ความคงตัวจากภายนอกเพื่อควบคุมขนาดอนุภาค

4. ศึกษาวิธีการนำอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรไปประยุกต์ใส่ในชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลิตเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงและหาปริมาณของอนุภาคเงินที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงให้สูงขึ้น
5. พิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุเพื่อยืนยันการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว และการมีอยู่ของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร
 - เทคนิค UV-VIS Spectroscopy เพื่อศึกษาผลการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการเติมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรลงไป ในชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์และการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้
 - เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อศึกษาดูการกระจายตัว และขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร
 - เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค
6. วิเคราะห์สมรรถนะสมบัติเชิงไฟฟ้า เชิงเคมีไฟฟ้า และเชิงแสงของเซลล์สุริยะ
 - เทคนิค Photocurrent Density-Voltage Characteristics เพื่อวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่อง IV Tester
 - เทคนิค External Quantum Efficiency (EQE) analysis หรือ เทคนิค Incident Photon to Current Efficiency (IPCE) Analysis เพื่อศึกษาปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เซลล์จะผลิตได้เมื่อมีการฉายรังสีโฟตอนโดยเฉพาะของความยาวคลื่น
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำอย่างธรรมชาติได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่การศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคของกลุ่มอะตอมหรือโมเลกุล รวมทั้งกระบวนการสร้างหรือการสังเคราะห์สาร วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนสเกล (มิติของวัสดุอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 100 นาโนเมตร) ซึ่งจะทำให้สมบัติต่าง ๆ ของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งต้องอาศัยวิทยาการหลากหลายสาขาวิชาทั้งเคมี, ฟิสิกส์, ชีววิทยา, อิเล็กทรอนิกส์ และอื่น ๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การจัดอะตอม และโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษขึ้น ไม่ว่าจะทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ นอกจากนี้ นาโนเทคโนโลยียังเป็นการประยุกต์ใช้นาโนศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวัสดุประสมสังเคราะห์ทางอุตสาหกรรม และการค้า ทุกภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องพึ่งพาวัสดุ และอุปกรณ์ที่ทำจากอะตอม และโมเลกุล ดังนั้นโดยหลักการแล้ว วัสดุทั้งหมดจึงสามารถปรับปรุงได้ด้วยวัสดุนาโน และทุกอุตสาหกรรมจะได้รับประโยชน์จากนาโนเทคโนโลยี [1, 3]

สำหรับนิยามตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4748 (พ.ศ. 2558) กล่าวว่า นาโนเทคโนโลยี หมายถึง การประยุกต์ใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ในการจัดการ และควบคุมสสารในระดับ นาโนสเกล เพื่อใช้ประโยชน์จากสมบัติหรือปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับขนาดหรือโครงสร้างของสสาร โดยสมบัติหรือปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างจากที่พบในอะตอม หรือโมเลกุล หรือวัสดุขนาดใหญ่

ประเภทของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี มี 3 สาขาหลัก ประกอบด้วย นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ (Nanobiotechnology) นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) และวัสดุนาโน (Nanomaterials)

นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านชีวภาพ เช่น การปรับโครงสร้างระดับโมเลกุลของยา ที่สามารถหวังผลการมุ่งทำลายชีวโมเลกุลที่เป็นเป้าหมาย

เฉพาะเจาะจงสำหรับเซลล์มะเร็งหรือการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ด้วยการส่งผ่านสารบำรุงเข้าชั้นใต้ผิวหนังได้ดียิ่งขึ้น

นาโนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านนาโนอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ และประสิทธิภาพสูง เช่น การพัฒนาระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลชีพ การผลิตเซลล์สุริยะ การพัฒนานาโนชิป การทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง

วัสดุนาโน เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีศาสตร์ด้านวัสดุนาโน เช่น การเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมการพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิตที่มีความสามารถในการสกัดกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิด และไอน้ำ เพื่อใช้ทำบรรจุภัณฑ์ที่ยืดอายุความสดของผัก และผลไม้ ส่งผลให้เพิ่มมูลค่าการส่งออก หรือการผลิตผลอนุภาคนาโนมาใช้ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียไวรัส และทำให้ไม่เปียกน้ำ [4]

2.1.1 นาโนศาสตร์ (nanoscience)

นาโนศาสตร์ (Nanoscience) คือ วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาเกี่ยวกับ วัสดุอินทรีย์, อนินทรีย์ และรวมไปถึงสารชีวโมเลกุลที่มีโครงสร้างสามมิติ ที่มีขนาดอย่างน้อยด้านใดด้านหนึ่งอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร โดยวัสดุชนิดใดก็ตาม ถ้ามีมิติทั้งสามเล็กกว่า 100 นาโนเมตร วัสดุชนิดนั้นก็จะถูกเรียกว่า สาม-ดี วัสดุนาโน (3-D nanomaterial) ถ้ามีแค่ สอง หรือ หนึ่งมิติ ที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตร ก็จะถูกเรียกว่าวัสดุ สอง-ดี (2-D) และ หนึ่ง-ดี (1-D) ตามลำดับ คุณสมบัติของวัสดุนาโนจะแตกต่างจากวัสดุขนาดใหญ่ (bulk materials) ไม่ว่าจะเป็คุณสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และชีวภาพ ล้วนแล้วแต่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว ดังนั้น ถ้าพูดถึงนาโนศาสตร์ก็จะเป็นการสร้างหรือศึกษาวัสดุที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเมตร โดยผลลัพธ์ที่ได้ คือ วัสดุชนิดใหม่หรือรู้คุณสมบัติที่แตกต่าง และน่าสนใจ โดยคุณสมบัติเหล่านั้นจะถูกอธิบายด้วยทฤษฎีทางควอนตัม (quantum theory) [5]

2.1.2 วัสดุนาโน (nanomaterial)

วัสดุนาโน คือ วัสดุที่มีโครงสร้างสามมิติ ที่มีขนาดอย่างน้อยด้านใดด้านหนึ่งอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร โดยวัสดุนาโนแบ่งประเภทตามมิติได้ดังที่แสดงในตารางที่ 2.1

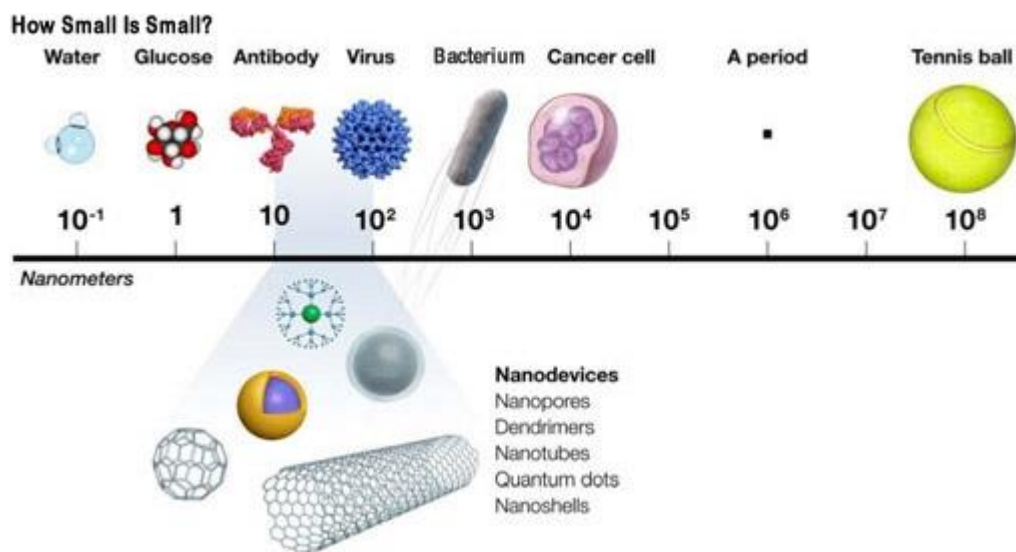
ตารางที่ 2.1 วัสดุระดับนาโนมีการแบ่งประเภทตามมิติข้อมูล [3]

ชนิดของอนุภาคระดับนาโน	ตัวอย่าง
ทั้งสามมิติมีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร	อนุภาคระดับนาโน, ควอนตัมดอท (Quantum dot) , เปลือกนาโน (Nanoshells), วงแหวนนาโนท(nanorings), ไมโครแคปซูล (microcapsules)
สองมิติมีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร	ท่อนาโน (nanotubes), เส้นใยนาโน (nanofibers), ลวดนาโน (nanowires)
หนึ่งมิติมีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร	ฟิล์มบาง, ชั้น และ ผิวนเคลือบ

วัสดุระดับนาโนสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท:

1. วัสดุระดับนาโนที่ไม่ตั้งใจสร้างขึ้น (non-intentionally-made nanomaterials) ซึ่งหมายถึง อนุภาคที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนหรือวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (เช่น โพรตีน, ไวรัส, อนุภาคระดับนาโนที่ผลิตขึ้นในระหว่างการระเบิดของภูเขาไฟ ฯลฯ) หรือที่ผลิตโดยกิจกรรมของมนุษย์โดยไม่มีเจตนา (เช่น อนุภาคระดับนาโนที่ผลิตจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล)
2. วัสดุระดับนาโนที่ตั้งใจสร้างขึ้น (intentionally-made nanomaterials) ซึ่งหมายถึง วัสดุนาโนที่ผลิตโดยจงใจผ่านกระบวนการสังเคราะห์ สร้างสรรค์ หรือประดิษฐ์ที่กำหนดไว้

หากทำการเปรียบเทียบขนาดของวัสดุระดับนาโนกับอุปกรณ์ในชีวิตประจำวัน เช่น ลูกเทนนิส จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงขนาดเปรียบเทียบระหว่างวัสดุระดับนาโนกับสิ่งต่างๆ [6]

2.1.3 สมบัติของวัสดุระดับนาโน (properties of nanomaterials)

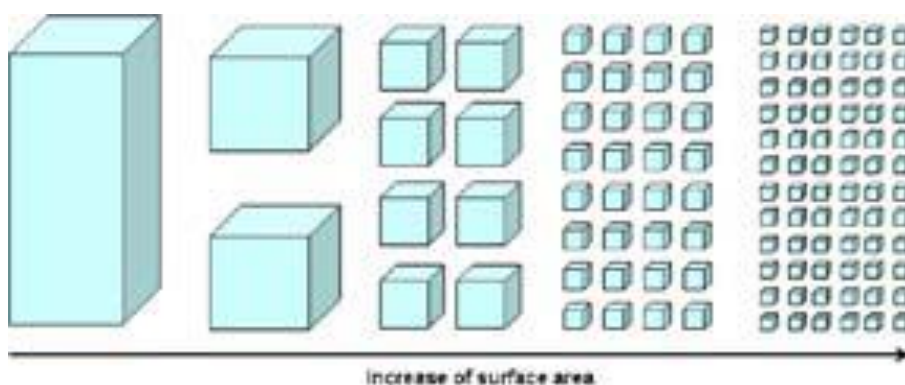
สมบัติทางกายภาพของสาร (จุดหลอมเหลว, จุดเดือด, การนำไฟฟ้า ฯลฯ) จะถูกกำหนดโดยศึกษาตัวอย่างบริสุทธิ์ในปริมาณที่มากพอที่จะวัดได้ภายใต้สภาวะปกติของห้องปฏิบัติการ หนึ่งโมลของวัสดุใด ๆ จะมีจำนวนโมเลกุล 6.022×10^{23} โมเลกุล ตัวอย่างเช่น หนึ่งโมลของน้ำมีน้ำหนัก 18 กรัม ดังนั้นเมื่อพิจารณาจุดเดือดของน้ำหนึ่งโมล ในความเป็นจริงค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของพื้นล้านโมเลกุลของน้ำ โดยเราสมมติว่าผลที่ได้ควรเป็นจริงสำหรับกลุ่มโมเลกุลของน้ำทุกขนาด สิ่งนี้ไม่ถูกต้องสำหรับหลายวัสดุเนื่องจากขนาดของวัสดุลดลง และระดับของนาโนสเกลถูกศึกษา ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่วัสดุชนิดเดียวกันจะแสดงคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง (จุดหลอมเหลว, การนำไฟฟ้า ฯลฯ) เนื่องจากวัสดุในระดับนาโนสเกลไม่ได้ทำตามฟิสิกส์แบบนิวตัน (Newtonian physics) แต่เป็นไปตามกลศาสตร์ควอนตัม กล่าวได้ว่าสมบัติของวัสดุสามารถขึ้นอยู่กับขนาดของตัววัสดุ นี่อาจเป็นแนวคิดใหม่ที่จะนำมาสู่ชั้นเรียนได้อย่างสมเหตุสมผล คุณสมบัติของสาร (ของแข็ง, ของเหลว หรือแก๊ส) เกี่ยวข้องกับอะตอม และโมเลกุลที่สร้างสารและวิธีการเชื่อมต่อกัน (พันธะเคมี) ขนาดไม่ได้ระบุไว้เป็นปัจจัยสำคัญ หลายคนอาจคิดว่า ไม่ว่าจะขนาดใหญ่หรือเล็กก็คือทองจะเป็นสีทอง ซึ่งถูกต้องในระดับแมโคร และระดับไมโครสีของทองคำเป็นสีทอง : แต่ในระดับนาโนนั้น คุณสมบัติต่างๆเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเนื่องจากผลควอนตัม โดยคอลลอยด์ของอนุภาคทองระดับนาโนไม่ได้เป็น 'ทอง' แต่สีแดงทับทิม (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 สีของทองคำขึ้นอยู่กับขนาดของพวกมัน [7, 8]

2.1.3.1 สมบัติทางพื้นผิว (*Surface properties*)

ไม่ว่าเราจะพิจารณาวัสดุแบบก้อนใหญ่ (bulk material) หรือวัสดุระดับนาโนเมตร สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีจะขึ้นอยู่กับสมบัติหลาย ๆ อย่างของพื้นผิว พื้นผิวทำหน้าที่ได้หลายอย่าง ตัวอย่างเช่น กักเก็บสิ่งต่างๆไว้ในหรือนอกพื้นผิว ช่วยให้เกิดการไหลของสารหรือพลังงานในอินเตอร์เฟซ สามารถเป็นตัวเริ่มต้นหรือยุติปฏิกิริยาเคมี เช่น ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยา สาขาวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และทางชีวภาพของพื้นผิวเรียกว่า วิทยาศาสตร์พื้นผิว ในบริบทนี้คำว่า อินเตอร์เฟซ เป็นมากกว่าแค่พื้นผิว โดยในความจริงมันเป็นขอบเขตระหว่างสองเฟส คือ วัสดุ และสภาพแวดล้อม (ของเหลว, ของแข็ง หรือก๊าซ) ถ้าแบ่งวัสดุแบบก้อนใหญ่ ออกเป็นกลุ่มของวัสดุระดับนาโนจำนวนมาก ค่าปริมาตรทั้งหมดยังคงเหมือนเดิม แต่พื้นที่ผิวโดยรวมจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3



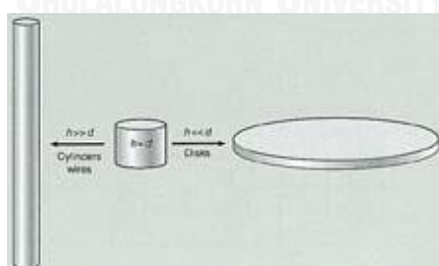
รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นพื้นผิวของปริมาตรจะเพิ่มขึ้นอย่างไรเมื่อขนาดลดลง (ภาพไม่เป็นไปตามมาตราส่วน) [3]

พื้นที่พื้นผิวทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นได้อย่างไร หากลูกบาศก์ 1 ลูกบาศก์เมตรถูกตัดเป็นก้อนเล็ก และเล็กลงจนกลายเป็นก้อนขนาด 1 นาโนเมตร สรุปลงได้ดัง ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดด้าน จำนวน และพื้นที่ผิวของลูกบาศก์ เมื่อแบ่งลูกบาศก์ 1 ลูกบาศก์เมตร ถูกตัดเป็นก้อนเล็กๆ

ขนาดด้านของลูกบาศก์	จำนวนลูกบาศก์	พื้นที่ผิว
1 m	1	6 m ²
0.1 m	1000	60 m ²
0.01 m = 1 cm	10 ⁶ = 1 million	600 m ²
0.001 m = 1 mm	10 ⁹ = 1 billion	6000 m ²
10 ⁻⁹ m = 1 นาโนเมตร	10 ²⁷	6 x 10 ⁹ = 6000 km ²

รูปร่างของวัสดุก็มีความสำคัญ ดังจะเห็นจากถ้าให้วัสดุต่าง ๆ มีปริมาตรเท่ากัน พื้นผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุ ตัวอย่างง่าย ๆ คือ ทรงกลม และลูกบาศก์ที่มีปริมาตรเท่ากัน ลูกบาศก์มีพื้นที่ผิวที่ใหญ่กว่าทรงกลม ด้วยเหตุนี้ในทางนาโนศาสตร์ ขนาดของวัสดุนาโนไม่ใช่ปัจจัยที่มีความสำคัญเพียงอย่างเดียว แต่รูปร่างของมันก็มีความสำคัญด้วยเช่นกัน รูปที่ 2.4 แสดงแนวคิดนี้เกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุระดับนาโนไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดเท่านั้นแต่ขึ้นกับรูปร่างด้วยเช่นกัน

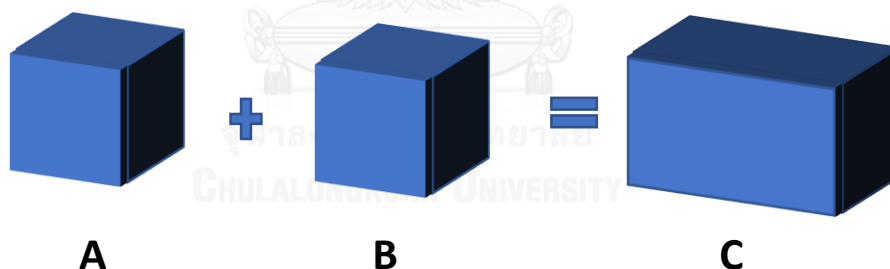


รูปที่ 2.4 อัตราส่วนระหว่างความสูง (h) กับเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) กำหนดว่ารูปร่างเหมือนหลอดหรือแผ่นดิสก์: รูปร่างมีผลต่อพื้นที่ผิว [3]

สำหรับในส่วนของพลังงานพื้นผิวนั้น อะตอม และโมเลกุลที่อยู่บริเวณพื้นผิวหรือผิวหน้าระหว่างสองเฟส มีความแตกต่างจากอะตอมหรือโมเลกุลเดียวกันที่มีอยู่ภายในของวัสดุ ซึ่งเป็นความ

จริงสำหรับวัสดุใด ๆ อะตอม และโมเลกุลที่ผิวหน้าระหว่างสองเฟสมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะรวมตัวเกาะกลุ่มกันมากขึ้นเนื่องด้วยพื้นผิวของอะตอมและโมเลกุลมีความไม่เสถียร และมีพลังงานพื้นผิวสูง

ดังที่ได้กล่าวไว้ในส่วนก่อนหน้านี้ว่า วัสดุระดับนาโนเมตรมีอะตอม และโมเลกุลเป็นจำนวนมากบนพื้นผิว ในทางตรงกันข้ามกับหลักการพื้นฐานทางเคมี คือ ระบบพลังงานสูงจะพยายามกลับสู่สภาวะของพลังงานที่ต่ำลงโดยใช้วิธีใด ๆ ที่เป็นไปได้ วัสดุนาโนมีมากมายในธรรมชาติ (โปรตีน ดีเอ็นเอ ฯลฯ) แต่เนื่องด้วยวัสดุระดับนาโนมีความไม่เสถียรจึงอาศัยวิธีการอื่นๆ เพื่อลดพลังงานพื้นผิวที่มีอยู่ดังกล่าว วิธีหนึ่งในการลดพลังงานพื้นผิวของอนุภาคระดับนาโนคือ การรวมตัวกัน พื้นผิวของ 10 อนุภาคระดับนาโนที่เหมือนกัน มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานพื้นผิวของอนุภาคระดับนาโนแต่ละชิ้น ถ้าวัสดุเหล่านั้นรวมตัวกัน และกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ พลังงานพื้นผิวโดยรวมจะลดลง แนวคิดนี้จะแสดงในรูปที่ 2.5 ถ้าค่าพลังงานพื้นผิวทั่วไป (γ) ของลูกบาศก์ A มีค่าเท่ากับ 6γ เช่นเดียวกับกับลูกบาศก์ B ดังนั้นพลังงานผิวทั้งหมดของทั้งสองก้อน A และ B ที่แยกกันจะเป็น $2 \times 6\gamma = 12\gamma$ แต่ถ้านำลูกบาศก์ A กับ B มารวมกันเป็นลูกบาศก์ C พลังงานพื้นผิวทั้งหมดของ C จะลดลงเหลือเพียง 10γ

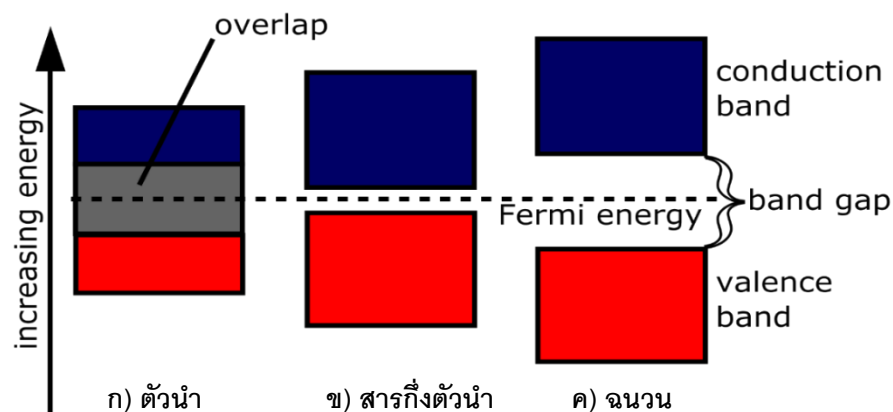


รูปที่ 2.5 พลังงานพื้นผิวโดยรวมของสองลูกบาศก์ที่แยกกันจะสูงกว่าพลังงานพื้นผิวของสองลูกบาศก์ที่ผสมกัน

2.1.3.2 สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ อาจพิจารณาได้จากแบบจำลองระดับพลังงาน เรียกว่า ทฤษฎีของแถบพลังงาน โดยแบ่งแถบพลังงานเป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 เป็นแถบพลังงานต่ำ เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valance band) อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในแถบพลังงานนี้ คือ อิเล็กตรอนยึด

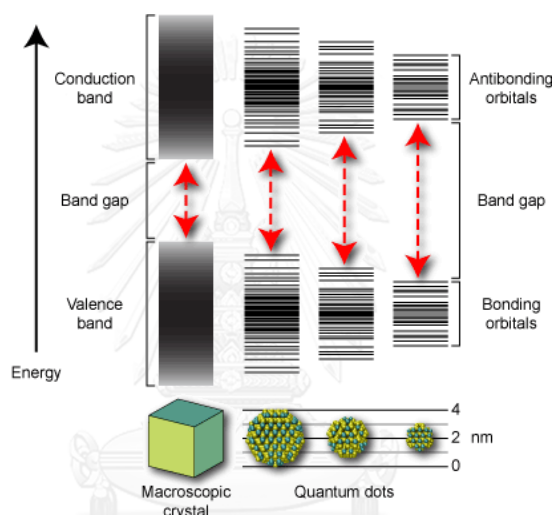
เหนี่ยว ซึ่งถูกยึดไว้โดยอะตอมใด ๆ ดังนั้นอิเล็กตรอน ณ แถบพลังงานนี้จึงมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวสูง แต่มีพลังงานจลน์น้อย ถัดจากแถบวาเลนซ์คือ แถบช่องว่างพลังงาน (energy gap band) ช่องว่างนี้คือ ที่ว่างระหว่างวงโคจรวาเลนซ์กับภายนอกอะตอม เนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งวนรอบอะตอมเป็นวงโคจร และอิเล็กตรอนต้องอยู่ ณ วงโคจรใด ๆ ดังนั้นอิเล็กตรอนใด ๆ จึงไม่สามารถเข้ามาอยู่ภายในแถบช่องว่างพลังงานได้ และแถบพลังงานช่วงที่ 3 เป็นแถบพลังงานสูง เรียกว่า แถบนำกระแส (conduction band) อิเล็กตรอนที่อยู่ ณ แถบพลังงานนี้เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกมาจากการยึดเหนี่ยวของอะตอม และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ดังนั้นอิเล็กตรอน ณ แถบพลังงานนี้จึงมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวต่ำมาก และมีพลังงานจลน์สูง การกระตุ้นด้วยพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ ความสามารถกระตุ้นด้วยพลังงานในการเติมแถบการนำกระแสด้วยอิเล็กตรอน และพลังงานของแถบช่องว่างพลังงานเป็นตัวระบุว่าเป็นตัวนำ สารกึ่งตัวนำ หรือตัวฉนวน ในกรณีวัสดุนำไฟฟ้า เช่น โลหะแถบวาเลนซ์ และแถบนำกระแสทับซ้อนกัน ดังนั้นค่าของช่องว่างพลังงานจึงมีขนาดเล็ก : พลังงานความร้อนก็เพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำกระแส ในสารกึ่งตัวนำ ช่องว่างพลังงานมีไม่ก้อิเล็กตรอนโวลต์ ถ้าใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไปให้เกินพลังงานแถบช่องว่างพลังงาน อิเล็กตรอนจะกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำกระแสได้ เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งเรียกว่า excitons แต่สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนนั้น จะมีช่องว่างพลังงานขนาดใหญ่ที่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าจำนวนมาก ซึ่งอาจทำให้วัสดุเสียหายไปก่อนได้ นี่คือเหตุผลที่วัสดุที่เป็นฉนวนไม่นำไฟฟ้า แถบพลังงานของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ก) แถบพลังงานของฉนวน ข) แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ค) แถบพลังงานของตัวนำ

ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่ถูกกักขังต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ

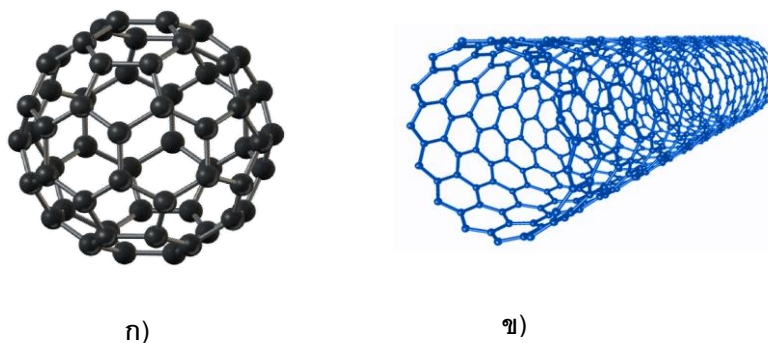
ควอนตัมที่ถูกกักขัง (Quantum confinement) เช่น ในควอนตัมดอท ทำให้พลังงานของแถบช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.7 นอกจากนี้ในมิติที่เล็กมาก ๆ เมื่อเราศึกษาระดับพลังงาน พบว่า แถบที่ทับซ้อนกันอยู่ในโลหะจะหายไป และจะเปลี่ยนเป็นช่องว่างพลังงาน อันเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโครงสร้างระดับนาโนของควอนตัมดอท ถูกจำกัดบริเวณการเคลื่อนที่ทั้งสามมิติไว้ ทำให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะเวลาจำกัด จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเหมือนกับที่เกิดขึ้นในโครงสร้างขนาดใหญ่ สิ่งนี้อธิบายได้ว่า ทำไมโลหะบางชนิดจึงกลายเป็นสารกึ่งตัวเมื่อขนาดของพวกมันเล็กลง [3]



รูปที่ 2.7 ภาพเปรียบเทียบพลังงานของแถบช่องว่างพลังงาน (ลูกศร) ในผลึกสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่ ขนาดใหญ่ และควอนตัมดอทขนาดต่างๆ [10]

การเพิ่มขึ้นของพลังงานแถบช่องว่างพลังงานเนื่องจากควอนตัมที่ถูกกักขัง หมายความว่า จำเป็นต้องใช้พลังงานที่ถูกดูดกลืนมากขึ้น เพราะช่องว่างพลังงานของวัสดุกว้างขึ้น การดูดกลืนพลังงานแสงที่สูงขึ้นหรืออาจหมายถึงความยาวคลื่นที่สั้นลง เรียกว่า hypsochromic shift (blue shift) เช่นเดียวกับความยาวคลื่นของแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยออกมาจากวัสดุที่มีขนาดระดับนาโน ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นด้วยเหตุผลดังกล่าวเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิธีปรับปรุงคุณสมบัติการดูดกลืนแสงและการปลดปล่อยแสงของสารกึ่งตัวนำระดับนาโนโดยการควบคุมขนาดของผลึก สมบัติทางแสงของโลหะ และสารกึ่งตัวนำแบบนาโน (ควอนตัมดอท) ได้อธิบายไว้ในส่วนถัดไปหรือวัสดุระดับนาโนบางชนิดมีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้าที่เฉพาะ ซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่เป็นเอกลักษณ์ ไม่ว่าจะเป็

เลอรีน และท่อนาโนคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ท่อนาโนคาร์บอนอาจเป็นตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำก็ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับนาโนของพวกมัน



รูปที่ 2.8 ก) ฟูลเลอร์รีน [11] ข) ท่อนาโนคาร์บอน [12]

2.1.3.3 สมบัติทางแสง (Optical properties)

2.1.3.3.1 ปฏิสัมพันธ์ของแสงกับวัตถุ

สีของวัสดุคือ ฟังก์ชันของปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงกับวัตถุ ถ้าวัสดุดูดซับแสงที่มีความยาวคลื่นบางส่วน ผู้สังเกตการณ์จะไม่เห็นสีเหล่านั้นในแสงที่สะท้อนจากวัตถุออกมา เฉพาะความยาวคลื่นที่สะท้อนออกมายังดวงตาของเราเท่านั้น ที่ทำให้วัตถุมีสีอื่นต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ใบไม้จะปรากฏเป็นสีเขียวเนื่องจากคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นเม็ดสีดูดซับสีฟ้า และสีแดงของสเปกตรัม และสะท้อนสีเขียวมายังตาเรา [3]

โดยทั่วไปแสงที่ตกกระทบ (incident : I) กับวัตถุจะส่องผ่าน (transmit : T)

ดูดกลืน (absorb : A) หรือสะท้อน (reflect : R) :

$$I = T+A+R$$

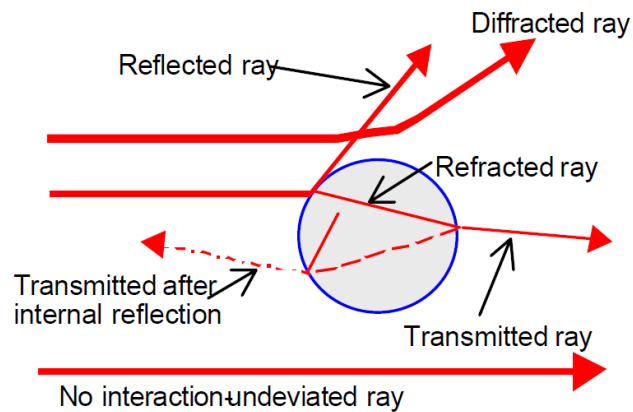
เนื่องจากขนาดของวัสดุลดลง การกระเจิง (scattering : S) ของแสงสามารถส่งผลถึงสีที่ เปลี่ยนไป (หรือความโปร่งใส) ได้ สรุปสั้น ๆ ของแต่ละกระบวนการดังนี้

การสะท้อนของแสง (Reflection : R) เป็นปรากฏการณ์ที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นค่าหนึ่งมายังตัวกลางที่มีความหนาแน่นอีกค่าหนึ่ง ทำให้แสงตกกระทบกับตัวกลางใหม่ แล้วสะท้อนกลับสู่ตัวเดิม โดยคลื่นแสงที่สะท้อนออกมาจะมีโครงสร้างทางเรขาคณิตเหมือนกันกับคลื่นแสงที่ตกกระทบ

การดูดกลืน (A) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ระดับพลังงานของสารจะเป็นตัวกำหนดความยาวคลื่นแสงที่สารสามารถดูดกลืนได้ รวมทั้งเป็นปรากฏการณ์ทางโมเลกุลซึ่งขึ้นอยู่กับเอกลักษณ์ทางเคมี และโครงสร้างของสาร (ไม่ใช่ขนาดของโมเลกุลหรือมวล) และเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนทั้งการสั่นและการหมุน โดยโครโมฟอร์ (chromophore) และฟลูออโรฟอร์ (fluorophore) ซึ่งเป็นตัวอย่างของวัสดุอินทรีย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนอย่างเฉพาะ ถ้ามีหมู่เหล่านี้ในโครงสร้างของสารจะทำให้การดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงไป

การส่องผ่าน (T) คือ ความสามารถของแสงที่จะผ่านวัสดุ : การส่องผ่านของแสงเป็นสิ่งเกิดขึ้นจากแสงที่เหลือหลังจากการสะท้อน, การกระเจิง และการดูดกลืน

การกระเจิง (S) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แสงมากระทบโครงสร้างที่มีมิติใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของคลื่นนั้น จึงเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ ดัชนีหักเหของวัตถุ และดัชนีหักเหของสารตัวกลาง โดยมันเป็นการปฏิสัมพันธ์ทางกายภาพเท่านั้น การถ่ายเทพลังงานจะไม่เกิดขึ้นระหว่างการกระเจิง (ตรงกันข้ามกับการดูดกลืนแสง) พลังงานจะเพียงเปลี่ยนเส้นทางในหลาย ๆ ทิศทาง ความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามาตกกระทบ และของแสงที่กระเจิงออกจะเท่ากัน หลังจากที่แสงตกกระทบกับวัตถุในคอลลอยด์ และเปลี่ยนทิศทางเพียงครั้งแรกอาจพบกลุ่มวัตถุอื่นและเปลี่ยนทิศทางอีกครั้ง ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่าการกระเจิงแสงแบบหลายชั้น (multiple scattering) ในระดับสเกลใหญ่ (Micro) ผลกระทบโดยรวมอาจเป็นได้ว่าแสงจะกระเจิงกลับไปตามทิศทางเดิม (การกระเจิงในทิศทางตรงข้าม : back scattering) หรือเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในทิศทางเดียวกับที่มันเคลื่อนไป (การกระเจิงไปข้างหน้า : front scattering) การกระเจิงสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อแสงมีความยาวคลื่นเป็นสองเท่าของขนาดวัตถุ ดังนั้นหากขนาดอยู่ที่ประมาณ 200 นาโนเมตร การกระเจิงสูงสุดจะอยู่ที่ 400 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของสเปกตรัมที่มองเห็นได้



รูปที่ 2.9 ปรัชญาการกระเจิงแสงของอนุภาค [12]

นอกจากนี้ปรัชญาการกระเจิงแสงยังแบ่งได้เป็นหลายรูปแบบ อันได้แก่ การกระเจิงแบบเรย์เล, มีย์ และการกระเจิงแบบเรขาคณิต โดยมีค่า α เป็นตัวเลือกรูปแบบของการกระเจิงแสง โดยขึ้นกับขนาดของอนุภาค และค่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบเป็นตัวกำหนด ดังสมการ 2.1

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} : D = 2r \quad (2.1)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของอนุภาค หน่วยไมโครเมตร

r คือ รัศมีของอนุภาค หน่วยไมโครเมตร

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ หน่วยไมโครเมตร

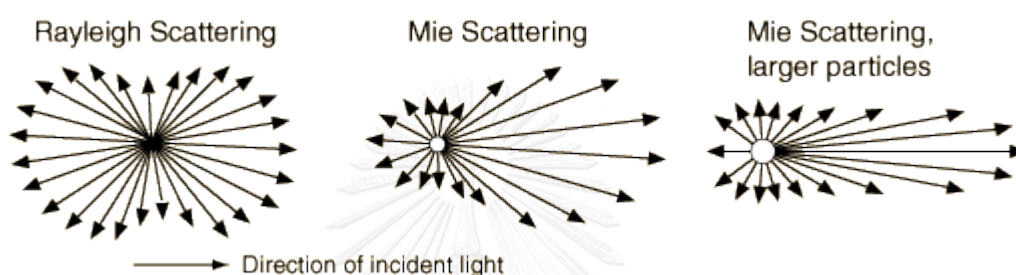
โดยที่ $\alpha \ll 1$ คือ รูปแบบของการกระเจิงแบบเรย์เล (Rayleigh scattering)

$\alpha \sim 0.1-10$ คือ รูปแบบของการกระเจิงแบบมีย์ (Mie Scattering)

$\alpha \gg 1$ คือ รูปแบบของการกระเจิงแบบเรขาคณิต (Geometric scattering)

สำหรับรูปแบบของการกระเจิงแบบเรย์เล (Rayleigh scattering) จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ ส่งผลให้เกิดปรัชญาการกระเจิงแสงทั่วทุกทิศทางที่มีขนาดความเข้มแสงกระเจิงเท่ากัน

สำหรับรูปแบบของการกระเจิงแบบมีย์ (Mie Scattering) จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดประมาณเท่ากับหรือใหญ่กว่าความยาวคลื่นแสงตกกระทบไม่มาก โดยการกระเจิงแบบนี้จะขนาดค่าความเข้มแสงกระเจิงมากในทิศทางตรงข้ามกับแสงที่ตกกระทบประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ แบบมีย์อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และแบบมีย์อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบจะให้ค่าค่าความเข้มแสงกระเจิงมากในทิศทางตรงข้ามกับแสงที่ตกกระทบเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่ค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคขนาดใหญ่จะให้ค่าความเข้มมากกว่าขนาดเล็ก

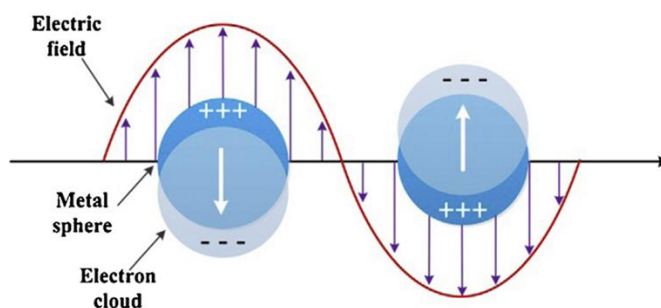


รูปที่ 2.10 การกระเจิงแบบเรย์เล และมีย์ [13]

2.1.3.3.2 พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว

สมบัติทางแสงซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของโลหะ และโลหะออกไซด์ โดยเฉพาะโลหะ เช่น ทองคำจะแสดงสมบัติทางแสงอย่างเด่นชัด อธิบายด้วยพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว (surface plasmon resonance, SPR หรือ localized surface plasmon resonance, LSPR) ซึ่งเป็นคลื่นความหนาแน่นของประจุที่เกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนอิสระ เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเช่น แสง มาตกกระทบ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกมีความยาวคลื่นเดียวกับความยาวคลื่นที่อิเล็กตรอนสั่นในโลหะระดับนาโนเมตรจะทำให้เกิดการกำทอน (resonance) ขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุนั้นเปลี่ยนแปลงไป โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในพื้นที่จำกัดบริเวณพื้นผิวรอยต่อของโลหะกับสารไดอิเล็กทริก เช่น ระหว่างเงินหรือทองคำกับอากาศหรือสารละลาย รวมทั้งรอยผิวต่อของโลหะกับสุญญากาศก็ได้ โดยที่ขนาด, ยอดคลื่น และความกว้างของสเปกตรัมพลาสมอนเรโซแนนซ์ของแต่ละวัสดุขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างประเภทของวัสดุ และสภาพแวดล้อมรอบ ๆ วัสดุนั้น ดังเช่น อนุภาคทองคำระดับนาโนเมตรจะมีสีแดงแทนที่จะเป็นสีเหลืองทองอย่างที่พบทั่วไป โลหะชนิดอื่นนอกเหนือไปจากทองคำก็สามารถแสดง

ปรากฏการณ์เชิงแสงในลักษณะเดียวกันนี้ได้เช่น อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรจะมีสีเหลืองเข้ม แทนที่จะเป็นสีเงิน อย่างไรก็ตาม โลหะ สว่นใหญ่จะมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงใกล้รังสีเหนือม่วง ซึ่งอยู่นอกสเปกตรัมของช่วงแสงที่มองเห็น นอกจากนี้อนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรเกือบทุกชนิดไม่สามารถคงตัวอยู่ในรูปอนุภาคนาโนได้นานในสภาวะแวดล้อมตามปกติ ทำให้เราไม่ค่อยพบปรากฏการณ์นี้ในโลหะชนิดอื่น ๆ พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวหรือสมบัติทางแสงของอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตร เช่น ทองคำหรือเงิน สามารถเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาของแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กับอิเล็กตรอนอิสระที่ผิวของอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตร [1] ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กระบวนการสั่นของพลาสมอน (plasmon oscillation) สำหรับอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรทรงกลม [14]

รูปที่ 2.11 แสดงกระบวนการสั่นของพลาสมอน แสดงให้เห็นการกระจัดของกลุ่มประจุอิเล็กตรอน (conduction electron charge cloud) สัมพันธ์กับนิวเคลียสเมื่อได้รับแสงหรือคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก ดังนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนอิสระจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นพ้อง โดยความถี่ของการสั่นนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอน (electron density), มวลสัมพัทธ์ของกลุ่มอิเล็กตรอน (effective electron mass), ขนาด, รูปร่างของการกระจายของประจุ (charge distribution) สำหรับการสั่นของอิเล็กตรอนของอนุภาคขนาดเล็ก เรียกว่าไดโพลพลาสมอนเรโซแนนซ์ (dipole plasmon resonance) ซึ่งจะแตกต่างจากพลาสมอนเอกซไซเตชัน (plasmon excitation) ของโลหะแบบก้อนใหญ่ (bulk metal) สมบัติทางแสงของอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตร สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการประมาณทางไฟฟ้าสถิต (electrostatics approximation) แสดงดังสมการ 2.2-2.4

$$\text{Particle polarization} \quad P = 4\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} E_0 \quad (2.2)$$

$$\text{Particle dipole moment} \quad p = \epsilon_0 \epsilon P E_0 \quad (2.3)$$

$$\text{Polarizability} \quad \alpha = 4\pi a^3 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} \quad (2.4)$$

โดยที่ P คือ ไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำ

α คือ ความแยกขั้วได้ (polarizability)

a คือ รัศมีของอนุภาค

ϵ คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะ

ϵ_0 คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของตัวกลาง

E_0 คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก

การเกิดอันตรกิริยาของแสงกับอนุภาคระดับนาโนเมตรทรงกลมจะทำให้แสงที่ตกกระทบ เกิดการสูญเสีย (extinction) ในแต่ละความถี่ไม่เท่ากันซึ่งขึ้นกับขนาด รูปร่าง และชนิดของโลหะ รวมทั้งชนิดของตัวกลาง ซึ่งจัดว่าเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่ใช้จำแนกชนิดของอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตร การสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงที่ตกกระทบกับอนุภาคระดับนาโนเมตรทรงกลมมีการกระเจิง (scattering) และดูดกลืน (absorption) โดยอนุภาคตามหลักการประมาณทางไฟฟ้าสถิต สามารถเขียน extinction efficiency ดังสมการ 2.5 - 2.7

$$Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{sca} \quad (2.5)$$

$$Q_{ext} = 4x \text{Im} \left(\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} \right) \quad (2.6)$$

$$Q_{sca} = \frac{8}{3} x^4 \left| \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} \right|^2 \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$x = \frac{2\pi a (\epsilon_0)^{1/2}}{\lambda}$$

Q คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction efficiency)

Q_{sca} คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิง (scattering efficiency)

Q_{abs} คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption efficiency)

จากทฤษฎีของมีเย (Mie's theory) ได้เสนอว่า สมบัติทางแสงของอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรเกิดจากอันตรกิริยาของกลุ่มอิเล็กตรอนที่ผิวของอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับอนุภาคที่ศึกษามีขนาดเล็ก scattering efficiency จะมีค่าน้อยกว่า extinction efficiency มาก ส่งผลให้ค่า Q_{sca} น้อยกว่า Q_{ext} มาก ดังนั้นสามารถลดรูปสมการ (2.5) เป็นสมการ (2.8)

$$Q_{ext} = Q_{abs} \quad (2.8)$$

หรือเขียนในรูป extinction cross-section และ absorption cross-section จะได้สมการดังนี้

$$C_{ext} = C_{abs} \quad (2.9)$$

เมื่อ $Q = C/\pi a^2$

จากสมการ (2.5) – (2.8) สมบัติทางแสงของอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรเป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาของกลุ่มอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวอนุภาคกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด รูปร่างของโลหะ สำหรับอนุภาคโลหะที่มีขนาดเล็กอย่างที่ไดกล่าวข้างต้นว่า การกระเจิงแสงจะเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดใหญ่ โดยจะเห็นค่าการสูญเสีย (extinction) มีค่าใกล้เคียงกับค่าการดูดกลืน (absorption) ดังนั้นค่าการสูญเสีย และการดูดกลืนที่เปลี่ยนไปนี้เอง ส่งผลให้อนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรมีสีที่แตกต่างจากโลหะชนิดนั้นที่ปกติ เช่น อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรมีสีเหลือง แทนที่จะเป็นสีเทาขาว เป็นต้น

2.2. อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

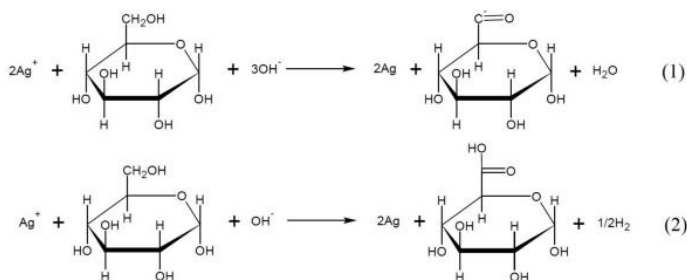
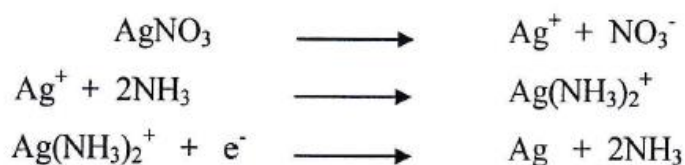
2.2.1 อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นสามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ จึงถูกนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อเพิ่ม คุณสมบัติ และมูลค่าให้กับสินค้า เช่น เสื้อผ้า เครื่องมือทางการแพทย์ ระบบกรองน้ำ สุขภัณฑ์ อุปกรณ์ไฟฟ้า และอื่น ๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีสมบัติเป็นนำไฟฟ้าที่ดีจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีสมบัติพิเศษทางแสง จึงมีการนำไป

ประยุกต์ใช้ในงานไบโอเซ็นเซอร์ รวมทั้งในเซลล์สุริยะชนิด สีย้อมไวแสงด้วยเช่นกัน การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น การสังเคราะห์โดยวิธีการทางเคมีหรือรีดักชันทางเคมี, ปฏิกิริยาเคมีแสง (Photochemical Reaction) ทางไฟฟ้าเคมี ทางกายภาพ และอื่น ๆ รวมทั้งวิธีรีดักชันทางเคมีแบบ green synthesis ซึ่งเป็นการใช้องค์ประกอบทางธรรมชาติก็ได้รับความสนใจอย่างมาก ด้วยการใช้สารจากธรรมชาติ และราคาถูก เช่น ใช้สาร Hyaluronan(HA) เป็นตัวรีดิวซ์ และสารให้ความคงตัวในการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (Xia และคณะ,2011) ใช้สารสกัดจากต้น Sarang Semut มาเป็นตัวรีดิวซ์ (Zues และคณะ, 2014) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรโดยใช้องค์ประกอบในน้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นตัวรีดิวซ์

2.2.2 การเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก ควบคุมขนาดและรูปร่างได้ง่าย ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีการรีดักชันทางเคมีประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ 1) เกลือของซิลเวอร์ (silver salt) ที่นิยมใช้คือ ซิลเวอร์ไนเตรต 2) ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น sodium citrate, ascorbate, sodium borohydride (NaBH_4), elemental hydrogen, polyol process, Tollens reagent, และ N, N-dimethylformamide (DMF) เป็นต้น ซึ่งตัวรีดิวซ์มีหน้าที่รีดิวซ์ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ในสารละลายให้กลายเป็น Ag^0 3) สารให้ความคงตัว (stabilizer) หรือ capping agent โดยส่วนมาก นิยมใช้สารพอลิเมอร์ เช่น poly(vinyl alcohol), poly(vinyl pyrrolidone), poly(ethylene glycol), poly(methacrylic acid), และ poly(methyl methacrylate) เป็นต้น ซึ่งสารให้ความคงตัวมีหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้การเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีโดยมีเกลือของซิลเวอร์ คือ ซิลเวอร์ไนเตรตเป็นสารให้ซิลเวอร์ไอออน และมีแอมโมเนียในหาน้ำยางธรรมชาติซึ่งจะไปรวมตัวกับซิลเวอร์ไอออนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังรูปที่ 2.10 รอทำปฏิกิริยารีดิวซ์ เช่น กลูโคส โดยรับอิเล็กตรอนกับจากตัวรีดิวซ์นั้น ได้เป็นอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในที่สุด [15]



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร [16]

2.3. สารให้ความคงตัว (surfactant or stabilizer or stabilizing agent)

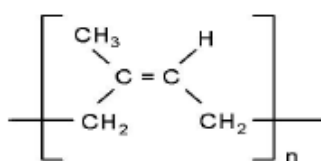
2.3.1 โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol : PEG)

โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ตัวหนึ่ง เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างโพรพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide) กับน้ำ มีสูตรโครงสร้างคือ $\text{C}_2\text{H}_4\text{n}+2\text{O}_\text{n}+1$ มีสมบัติเข้ากับน้ำได้ดี, มีความเข้ากันทางชีวภาพ และมีความเป็นพิษต่ำ การนำมาใช้ในอุตสาหกรรมใช้เป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์กลุ่มยา (Pharmaceutical) และเครื่องสำอาง (Cosmetic) หลากหลายชนิด (2) เช่น ครีมทาหน้า โลชั่นทาตัว แท่งดับกลิ่นใต้้วงแขน ยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก ยานวด ยาในรูปครีมทาผิวหนัง ใช้ผสมในอาหารคน และอาหารสัตว์ เช่น ใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับสารแต่งสี และกลิ่นอาหาร ใช้เป็นสารป้องกันการแข็งตัวเป็นน้ำแข็ง (Anti-freeze) ในระบบทำน้ำดื่ม-น้ำประปาของประเทศเขตนาน และในระบบหม้อน้ำรถยนต์ ใช้เป็นส่วนผสมในของเหลว (E-liquid) ที่ใช้กับบุหรี่ไฟฟ้า (Electronic cigarette) ใช้เป็นสารตัวกลางในอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมีบางอย่าง เช่น พลาสติก เรซิน สี และน้ำยาเคลือบเงา เป็นต้น นอกจากนี้โพลีเอทิลีนไกลคอลยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว มีหน้าที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร [17]

2.4. ยางธรรมชาติ

2.4.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติ (natural Rubber; NR) เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (มากกว่า 1×10^6) และมีโครงสร้างโมเลกุลที่เป็น cis-1,4-polyisoprene ในปริมาณสูง [18] ได้ต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.13 นอกจากโครงสร้างที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนแล้ว ยังมีสารเจือปนอื่นๆ อีกประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ สารโปรตีน เถ้า สารที่สกัดได้ด้วยอะซิโตน (acetone extractables) และความชื้น [19]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene) [19]

จากสูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติจะเห็นว่า ยางธรรมชาติมีโครงสร้างที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด จึงทำให้ไม่มีสภาพความเป็นขั้ว และเนื่องจากแต่ละหน่วยของไอโซพรีนของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) และหมู่แอลฟาเมทิลีน (α -methylene group) จึงทำให้พันธะคู่ของยางธรรมชาติมีความไวต่อปฏิกิริยา ส่งผลให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน แต่ในทางกลับกันก็สามารถออกซิไดซ์ได้ง่ายเช่นกัน ทำให้ยางธรรมชาติไม่ทนต่อการออกซิเดชัน

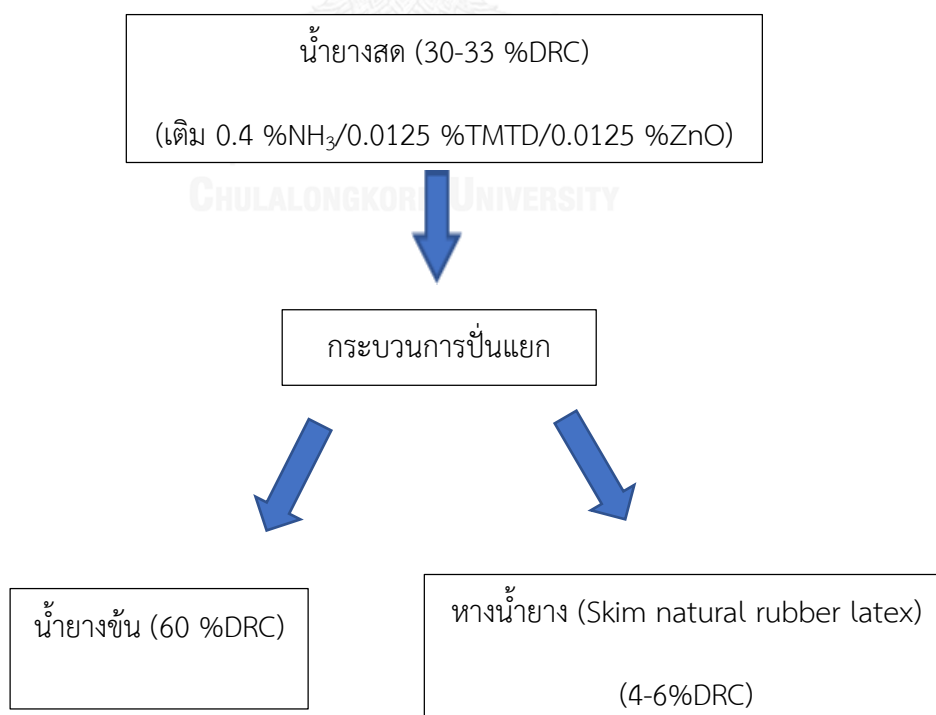
2.4.2 สมบัติทั่วไปของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางสดเป็นส่วนของไซโตพลาสซึมที่อยู่ภายในท่อน้ำยางของต้นยางพารา สามารถทำให้ไหลออกมาจากท่อน้ำยางได้โดยวิธีกรีดหรือเจาะ ซึ่งจะพบนิวเคลียสจำนวนมากติดอยู่ข้าง ๆ ท่อน้ำยางแต่ไม่ค่อยพบปะปนอยู่ในส่วนของน้ำยางหลังกรีด จึงเป็นไปได้ว่านิวเคลียสนี้มีส่วนสำคัญในการควบคุมกระบวนการสร้างน้ำยางขึ้นมา โดยน้ำยางสดที่ได้มาจากการกรีดต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นเหมือนนํ้านม มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรดต่าง 6.5-7.0 ความหนืดของน้ำยางมีค่าประมาณ 12-15 เซนติพอยส์ (น้ำบริสุทธิ์มีความ

หนืด 1 เซนติพอยส์) และอาจมีค่าแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบในน้ำยาง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาลกรีดยาง เป็นต้น [19]

2.4.3 กระบวนการผลิต

น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวข้นคล้ายน้ำนม มีอนุภาคขนาด 0.05-0.5 ไมครอน ในน้ำยางสดมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณร้อยละ 25-45 ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ อายุ ฤดูกาล และกรรมวิธีการกรีดยาง โดยทั่วไปน้ำยางสดประกอบด้วยสารที่เป็นของแข็งทั้งหมดร้อยละ 36 เนื้อยางแห้งร้อยละ 33 โปรตีน และไขมันร้อยละ 1.0-1.2 คาร์โบไฮเดรต และเถ้าร้อยละ 1.0 ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัม/มิลลิลิตร และมีค่าความเป็นกรดต่าง 6.5-7.0 ซึ่งต้องนำมาแปรรูปให้อยู่ในรูปของน้ำยางข้น เพื่อให้เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์และมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่าน้ำยางสด น้ำยางข้น คือ น้ำยางที่มีเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content : DRC) ไม่ต่ำกว่า 60% การผลิตน้ำยางข้นสามารถทำได้ 4 วิธี คือ (1) วิธีระเหยด้วยน้ำ (evaporation) (2) วิธีทำให้เกิดครีม (creaming) (3) วิธีปั่นแยก (centrifuging) และ (4) วิธีแยกด้วยไฟฟ้า (electrodecantation)



รูปที่ 2.14 กระบวนการผลิตน้ำยางข้นแบบคราว [16]

2.5 รังสีอาทิตย์

พลังงานที่กำเนิดจากดวงอาทิตย์จะแผ่ออกสู่อวกาศโดยรอบในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งมีทั้งในรูปรังสี และแสงสว่างจึงเรียกโดยทั่วไปว่า รังสีอาทิตย์ โดยรังสีที่มีความสำคัญในด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อม ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเล็ตแสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด พลังงานรวมของรังสีทั้งหมดที่แผ่จากดวงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ 3.854×10^{26} วัตต์ (Lang, 2001) โดยพลังงานของรังสีแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดตามตารางที่ 2.3 [20, 21]

ตารางที่ 2.3 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Petty, 2004 และ ISO, 2007)

รังสีอาทิตย์	ช่วงความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	สัดส่วนของพลังงาน เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกมา (%)
รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความคลื่นสั้นมาก (extreme ultraviolet, XUV)	0.01-0.1	3×10^{-6}
รังสีอัลตราไวโอเล็ตไกล (far ultraviolet, FUV)	0.1-0.2	0.01
รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (ultraviolet C, UVC)	0.2-0.28	0.5
รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (ultraviolet B, UVB)	0.28-0.32	1.3
รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (ultraviolet A, UVA)	0.32-0.40	6.2
แสงสว่าง	0.40-0.78	39
รังสีอินฟราเรด	0.78-1,000	52.9

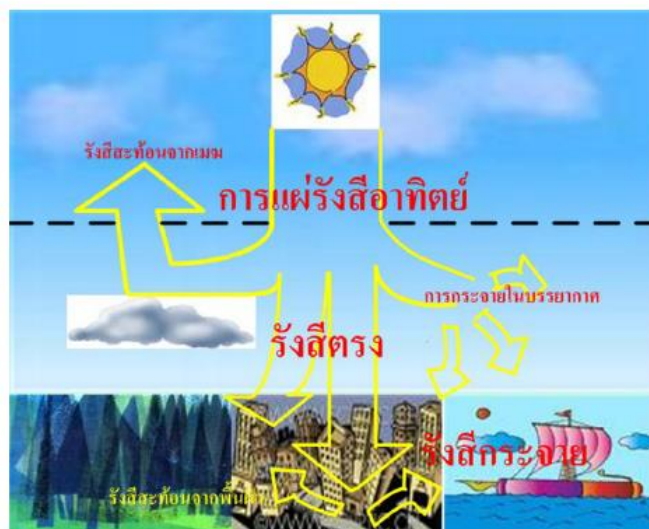
จากตารางที่ 2.3 จะพบว่า รังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด สำหรับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ถึงแม้จะมีสัดส่วนค่อนข้างน้อยแต่มีพลังงานโฟตอน (photon energy) สูง ซึ่งมีผลกระทบต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต นอกจากรังสีต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วดวงอาทิตย์ยังแผ่รังสีเอกซ์ และคลื่นวิทยุอีกเล็กน้อย ซึ่งมีผลในด้านพลังงานน้อยมาก

รังสีอาทิตย์จะเดินทางเป็นเส้นตรงจากดวงอาทิตย์ออกมายังอวกาศรอบ ๆ และสามารถตกกระทบวัตถุต่าง ๆ ในอวกาศ เช่น เซลล์สุริยะ (solar cell) ของดาวเทียม ผิวนอกของยานอวกาศหรือมนุษย์อวกาศที่ออกมานอกยาน เมื่อสังเกตวัตถุเหล่านี้จะเห็นวัตถุดังกล่าวโดยมีพื้นหลังมืด ทั้งนี้เพราะไม่มีบรรยากาศกระเจิงรังสีเมื่อรังสีอาทิตย์เคลื่อนผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก รังสีดังกล่าวจะถูกโมเลกุลอากาศ ฝุ่นละออง และเมฆกระเจิง และดูดกลืน โดยรังสีที่เหลือจะพุ่งตรงมาถึงพื้นผิวโลก แบ่งเป็น 3 ประเภทดังนี้

- รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) เป็นรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และตกบนผิวรับแสงด้านทิศทางที่แน่นอน ณ เวลาหนึ่งเวลาใด ซึ่งทิศของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์ เนื่องจากรังสีตรงมีทิศทางแน่นอน และมีลำแสงขนานจึงสามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีตรงได้

- รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อน และกระจายโดยแก๊สและฝุ่นละอองรวมถึงวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางในท้องฟ้าจึงไม่สามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีกระจายได้

- รังสีรวม (Total or Global Radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรง และรังสีกระจาย ซึ่งจำกัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น (ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร) ไม่รวมพลังงานคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศ โดยกรณีผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง (Incline plane) รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้า และรังสีกระจายจากพื้นโลก อาคารบ้านเรือน ซึ่งเกิดจากส่วนที่สะท้อนกลับจากพื้นโลก ในกรณีนี้เรียกว่า Total Radiation แต่กรณีผิวรับแสงเป็นพื้นแนวราบ (horizontal plane) รังสีรวมบนพื้นราบประกอบด้วยรังสีตรง และรังสีกระจายที่มาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้า ไม่มีรังสีกระจายที่มาจากพื้นโลก เรียกรังสีรวมบนพื้นแนวราบว่า Global Radiation



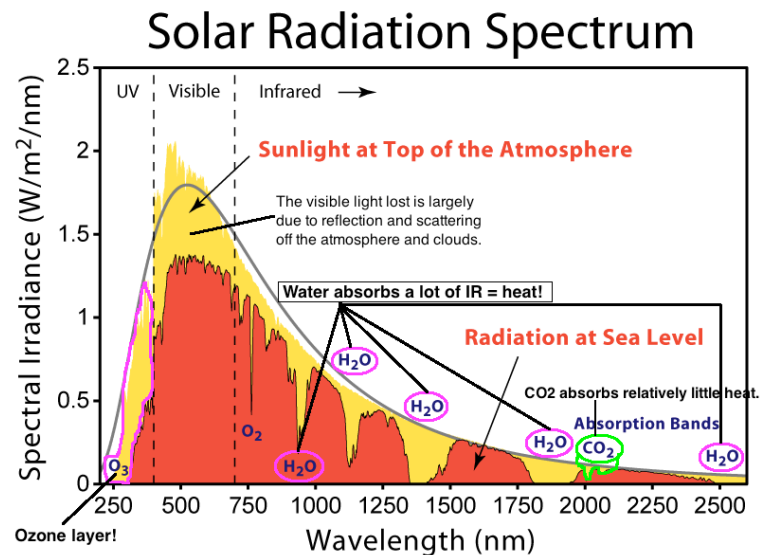
รูปที่ 2.15 ชนิดของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก [21]

2.5.1 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์

สำหรับสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก มีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เพราะในชั้นบรรยากาศเกิดการดูดกลืน การกระจายแสง และสะท้อนแสง สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ประกอบด้วย อัลตราไวโอเลตมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 380 นาโนเมตร แสงขาวหรือแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า มีความยาวคลื่น 380 – 700 นาโนเมตร และอินฟราเรดมีความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตร โดยเมื่อพิจารณาในย่านแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า จะสามารถแยกได้เป็น 7 สี โดยเรียงลำดับความยาวคลื่นจากน้อยไปมากได้ดังนี้ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง ซึ่งการตอบสนองต่อสเปกตรัมของเซลล์สุริยะแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ

สาเหตุที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกดูดกลืนโดยอะตอม และโมเลกุลของแก๊ส โดยช่วงอัลตราไวโอเลตถูกดูดกลืนด้วยอะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน และโมเลกุลของออกซิเจน (O_2), โอโซน (O_3) และโมเลกุลของไนโตรเจน (N_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ ทำให้แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านบรรยากาศจนถึงพื้นโลกแทบจะไม่มีคลื่นช่วงอัลตราไวโอเลต ช่วงแสงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำ (H_2O) และโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดขึ้นในชั้นล่างของบรรยากาศ ภายใต้อุณหภูมิ 50 กิโลเมตร จากพื้นโลก เป็นช่วงชั้นบรรยากาศที่มีน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มาก ดัง

แสดงในรูปที่ 2.15 พลังงานแสงช่วงอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมดทำให้บรรยากาศร้อน หรือทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลอากาศสูงขึ้น และทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น



รูปที่ 2.16 สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ [22]

2.5.2 มวลอากาศ

เมื่อรังสีอาทิตย์เดินทางผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกจะถูกองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศดูดกลืน และกระเจิงทำให้อัตราของรังสีที่พุ่งตรงมาถึงพื้นผิวโลกหรือรังสีตรง มีปริมาณลดลง การลดลงนั้นนอกจากจะขึ้นกับสมบัติการดูดกลืน และการกระเจิงรังสีอาทิตย์ขององค์ประกอบของบรรยากาศแล้ว ยังขึ้นกับมวลของอากาศที่รังสีอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่าน

ซึ่งสามารถหามวลอากาศ (Air mass, AM) ได้จากสมการ ดังนี้

$$AM = 1/\cos\theta_z \quad (2.10)$$

โดยที่ θ_z แทนมุมซีนิต (Zenith Angle) ซึ่งเป็นค่ามุมระหว่างแนวตั้งเหนือศีรษะ และแนวลำแสงอาทิตย์ หรือ ดังแสดงในรูปที่ 2.15

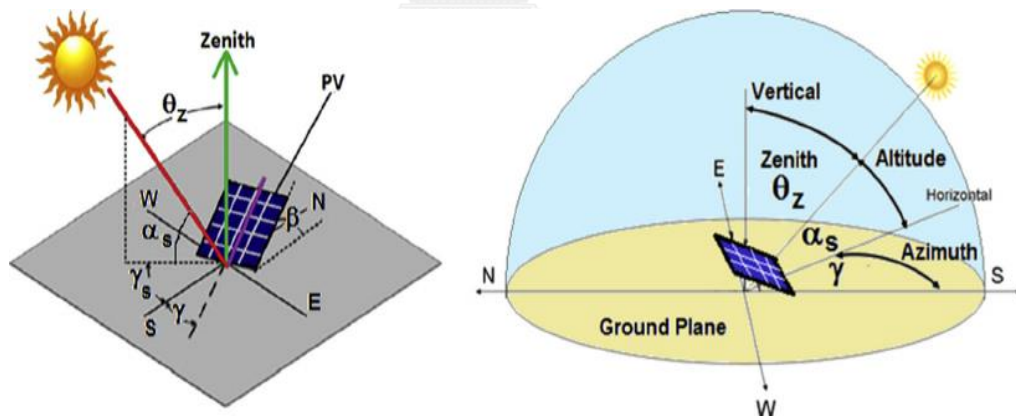
เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะ	$\theta_z = 0^\circ$	AM = 1
เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม 60° กับแนวตั้ง	$\theta_z = 60^\circ$	AM = 2
นอกบรรยากาศกำหนดว่ามวลอากาศมีค่าศูนย์		AM = 0

เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ใกล้ขอบฟ้า หรือมุมซินิธมีค่าสูง ($\theta_z > 70^\circ$, AM > 3) ส่วนโค้งของโลกจะมีผลต่อมวลอากาศ ซึ่งสมการทั่วไปของมวลอากาศแสดงดังสมการที่ 2.11 หรือ 2.12

$$AM = AM_h = [1229 + (614 \sin \alpha)^2]^{1/2} - 614 \sin \alpha \quad (2.11)$$

$$\text{หรือ } AM_h = [\sin \alpha + 0.15(\alpha + 3.9)^{-1.253}]^{-1} \quad (2.12)$$

โดยสมการที่ 2.10, 2.11 และ 2.12 เป็นค่ามวลอากาศที่ระดับน้ำทะเล



รูปที่ 2.17 มุมซินิธ (θ_z , Zenith Angle), มุมเดคลิเนชัน (α , Solar Declination Angle หรือ Solar altitude Angle) และมุมมุมอาซิมุท (A, Azimuth Angle) [23]

เมื่อ α เป็นมุมระหว่างพื้นโลกกับลำแสงหรือมุมเดคลิเนชัน (Solar Declination Angle) และ $\alpha + \theta_z$ เท่ากับ 90 องศา (รูปที่ 2.17) สำหรับสถานที่ซึ่งอยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเล K_1 กิโลเมตร หรือมีความดันบรรยากาศ P มิลลิบาร์ มวลอากาศ ณ ที่นั้นจะเป็นดังสมการที่ 2.13

$$AM = \begin{cases} AM_n (P/1000) \\ AM_n (1-0.1K_1) \end{cases} \quad (2.13)$$

สำหรับค่ามวลอากาศมาตรฐานสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะตาม American Society for Testing and Materials (ASTM) คือ AM 1.5 ที่มุมซิมิธ เท่ากับ 48.2 องศา ซึ่งเทียบได้กับค่าความเข้มรังสีของแสง หรือกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบบนพื้นที่ของเซลล์สุริยะมีค่าประมาณ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร

อีกมุมอ้างอิงที่สำคัญแสดงในรูปที่ 2.17 เช่นกัน ได้แก่ อะซิมูท (Azimuth, A) คือ มุมวัดจากจุดเหนือไปจุดตะวันออกตามระนาบวงกลมมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา บางครั้งค่ามุมอะซิมูทอาจจะวัดจากจุดเหนือไปจุดตะวันออก 180 องศา และวัดจากจุดใต้มาจุดตะวันออก 180 องศาก็ได้

2.6 เซลล์สุริยะ

เซลล์สุริยะ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมี ราคาถูกที่สุด และมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบาง บริสุทธิ์ และหันที่ที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (Atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เซลล์สุริยะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าโดยตรง อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์สุริยะจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และความต่างศักย์ที่ผิวทั้งสองของเซลล์แสงสุริยะ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างผิวทั้งสองของเซลล์สุริยะก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน เพื่อให้เกิดสมดุระหว่างผิวทั้งสองด้านของเซลล์สุริยะ ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์สุริยะ พบว่า เซลล์สุริยะจะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้อง และเหมาะสมในการนำเซลล์สุริยะมาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน [24]

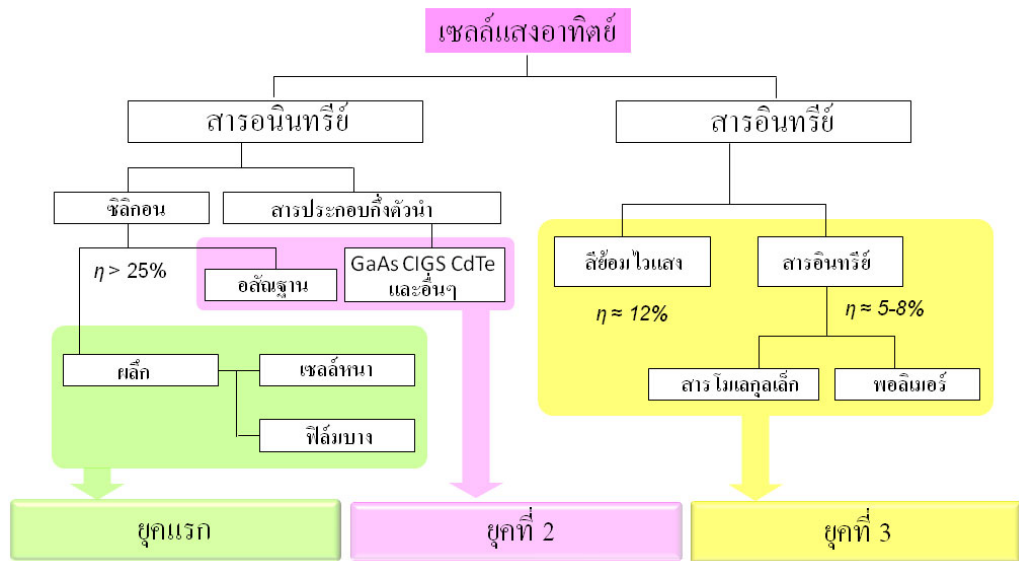
2.6.1 ชนิดของเซลล์สุริยะ

เซลล์สุริยะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มกว้าง ๆ ตามประเภทของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ดูดกลืนแสงและส่งผ่านประจุ คือ เซลล์สุริยะที่สร้างจากสารอินทรีย์ และเซลล์สุริยะที่สร้างจากสารอนินทรีย์ โดยเซลล์ทั้งหมดสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 3 ยุคการพัฒนา

เซลล์สุริยะที่พัฒนาได้ในยุคแรก คือ เซลล์สุริยะจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนแบบผลึกซึ่งให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงกว่า 25% จึงเป็นเซลล์สุริยะที่นิยมใช้ในท้องตลาดมากที่สุด แต่เซลล์สุริยะชนิดนี้ต้องสร้างในห้องสะอาดด้วยกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน จึงมีราคาแพง

ต่อมาในยุคที่ 2 มีการผลิตเซลล์สุริยะจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่ไม่เป็นผลึก (โครงสร้างอสัณฐาน) เป็นเซลล์สุริยะชนิดฟิล์มบางที่ใช้กระบวนการผลิตที่ง่ายขึ้น สร้างบนวัสดุโค้งงอและยืดหยุ่นได้ แต่ประสิทธิภาพก็ลดลง นอกจากนั้นยังมีความสำเร็จในการสร้างเซลล์สุริยะจากสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ เช่น เซลล์สุริยะชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์ (gallium arsenide, GaAs), เซลล์สุริยะชนิด (copper indium gallium selenide, CIGS) และเซลล์สุริยะชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride, CdTe) เป็นต้น เซลล์เหล่านี้สามารถผลิตได้ง่ายกว่าเซลล์จากซิลิกอนแบบผลึก แต่ก็มีราคาค่าถึงสารประกอบกึ่งตัวนำบางตัวที่อาจเป็นอันตราย เช่น สารประกอบแคดเมียม ทำให้ผู้ใช้บางส่วนกังวลในเรื่องดังกล่าว อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการศึกษามากมายระบุนว่าการผลิต และใช้งานเซลล์สุริยะในกลุ่มนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

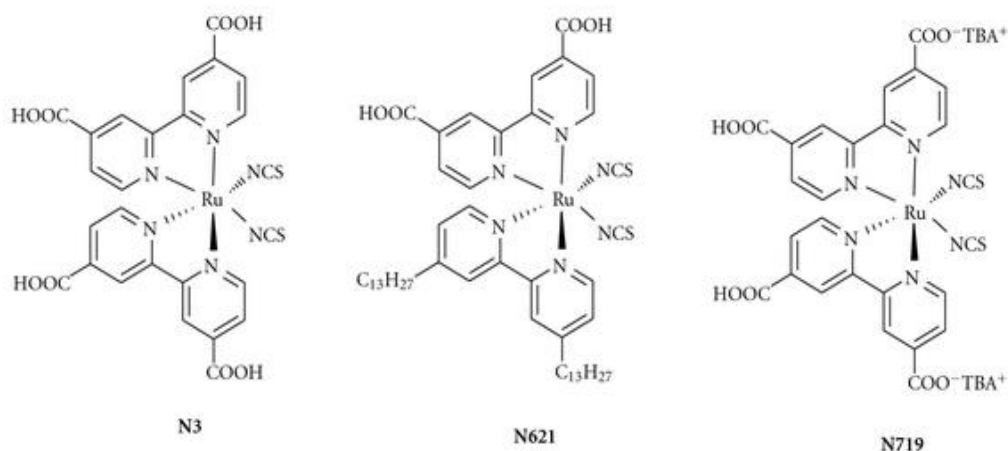
ในยุคหลังสุด มีการใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารอินทรีย์มาใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์สุริยะ เช่น สีในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell, DSSC) และพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในเซลล์สุริยะชนิดสารอินทรีย์ (organic photovoltaic cell, OPV) เป็นต้น การผลิตเซลล์สุริยะกลุ่มหลังนี้ทำได้ง่ายด้วยกระบวนการทางสารละลาย รวมทั้งราคาในการผลิตที่ถูกลง แต่ประสิทธิภาพของเซลล์ก็ยังคงต่ำ คือประมาณ 12% ใน DSSC และ 5 – 8% ใน OPV จึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไป



รูปที่ 2.18 ชนิดของเซลล์สุริยะแบ่งตามยุคการพัฒนา [25]

2.6.2 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

เป็นเซลล์สุริยะที่คิดค้นโดย Prof. Michael Grätzel นักวิจัยสวีตเซอร์แลนด์ ดังนั้น เซลล์สุริยะประเภทนี้จึงถูกเรียกว่า เซลล์กราทเซล (Grätzel cells) เซลล์สุริยะชนิดนี้ต่างไปจากเซลล์สุริยะที่ผลิตจากซิลิคอน คือ เซลล์สุริยะสีย้อมไวแสงใช้สีย้อมไวแสงเป็นตัวรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนให้กระโดดจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่เคลือบอยู่บน ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แนวความคิดนี้เกิดจากการเลียนแบบการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชที่พืชจะใช้คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงาน และเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ไปเป็นน้ำตาล ($\text{C}_2\text{H}_{12}\text{O}_6$) และออกซิเจน ซึ่งจะมีการไหลเวียนของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน

[24]

องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า สีย้อมไวแสง อนุภาคของโลหะออกไซด์ และอิเล็กโทรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ และสมบัติที่สำคัญดังนี้

2.6.2.1 สีย้อมไวแสง (Sensitizer)

สีย้อมไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในย่านแสงที่มองเห็นได้ (visible light) และใกล้อินฟราเรด (near-infrared) เพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการจับแสงที่ตกกระทบ มีสมบัติของสถานะพื้น (ground state) และสถานะกระตุ้น (excited state) ที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสภาวะถูกออกซิไดส์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

สีย้อมไวแสงที่ใช้ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง แบ่งออกได้ 2 ประเภทดังนี้

สีย้อมอินทรีย์ : เป็นสีย้อมที่สังเคราะห์จากสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชชนิดต่าง ๆ เช่น คลอโรฟิลล์จากใบไม้ น้ำคั้นจากกระเจี๊ยบ ดอกอัญชัน ทับทิม บลูเบอร์รี่ และส้ม เป็นต้น ข้อดีของ organic dye คือสังเคราะห์ง่าย และราคาถูก เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาสังเคราะห์มีราคาถูก ซึ่งบางชนิดมีอยู่ในท้องถิ่นและสามารถผลิตเองได้ แต่เป็นสีย้อมที่มีระยะเวลาในการเก็บรักษาได้สั้น และ

มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับ Inorganic dye ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องได้รับการวิจัยเพื่อพัฒนาต่อไปในอนาคต

สีย้อมอินทรีย์ : เป็นสีย้อมมาตรฐานที่สังเคราะห์จากสารเคมีบางชนิด ประสิทธิภาพของสีย้อมขึ้นอยู่กับชนิด และอัตราส่วนของสารเคมีที่นำมาสังเคราะห์เป็นสีย้อม เช่น N3 dye (ruthenium(II), cis-di(isothiocyanato), bis (4,4'-dicarboxy-2,2'-bi-pyridyl), Ru(4, 4'-dicarboxy2, 2'-bipyridine) cis (NCS)), N719 dye (bis(tetrabutylammonium)-cis-di(thiocyanato)-N, N'bis(4-carboxylato-4'-carboxylicacid-2,2'-ipyridine) ruthenium(II), (Ru(dcbpyH)(NCS))(BuN)) เป็นต้น

2.6.2.2 อนุภาคของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงยึดเกาะรวมทั้งรับอิเล็กตรอนจากสีย้อม และส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด จึงควรเป็นอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมาก และนำอิเล็กตรอนได้ดี นิยมใช้อนุภาคของโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และทินออกไซด์ (SnO₂) เป็นต้น

2.6.2.3 สารอิเล็กทรอนิกส์

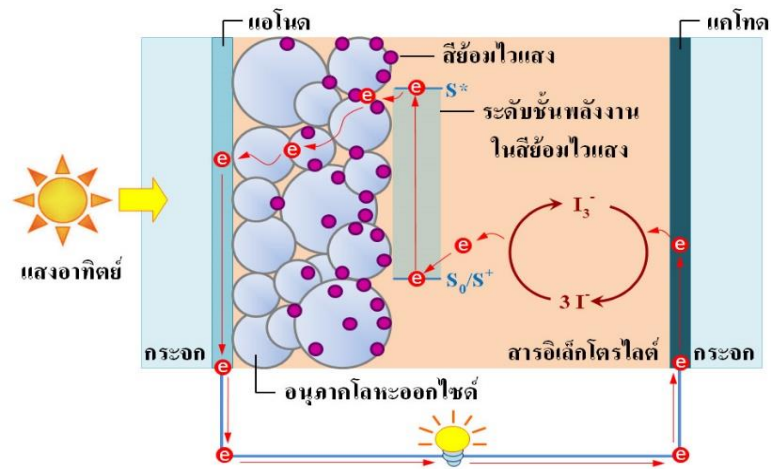
สารอิเล็กทรอนิกส์หรือตัวส่งผ่านประจุ ทำหน้าที่ซัดเซยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าร่วมโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) ไม่ดูดกลืนแสงในช่วงที่สายตามองเห็น และมีอายุการใช้งานยาวนาน สารละลายอิเล็กทรอนิกส์เหลวที่นิยมใช้กันนั้นประกอบด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เกลือไอโอดีน และไอโอดีน

2.6.2.4 ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง

ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง มีลักษณะโปร่งแสง ยอมให้แสงส่องผ่านได้ดี โดยขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้ารับแสงทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอก ซึ่งจะมีสารอาทิ fluorine doped tin oxide (FTO) เคลือบอยู่บนกระจกใสเป็นขั้วไฟฟ้านี้

2.6.2.5 ขั้วไฟฟ้าร่วม

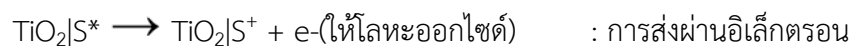
ขั้วไฟฟ้าร่วมทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารประกอบอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นต้องนำไฟฟ้าได้ดี มีพื้นที่ผิวมาก และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของอิเล็กทรอนิกส์ต่ำ นิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์



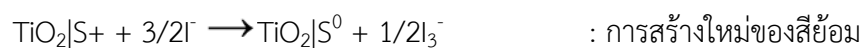
รูปที่ 2.20 กลไกการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง [24]

สำหรับหลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมีกลไกเป็นขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.20 เมื่อแสงตกกระทบเซลล์สุริยะ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะอยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะดูดกลืนแสง เปลี่ยนสภาพจากสถานะพื้น (S^0) เป็นสถานะเร้า (S^*) จากนั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงของโมเลกุลสีย้อมในสถานะเร้า (S^*) ถูกส่งผ่านไปสู่แถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่า แล้วอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในชั้นสารกึ่งตัวนำจะถูกรวบรวมบริเวณหน้าสัมผัส (front contact) จากนั้นจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจร จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์บริเวณขั้วไฟฟ้าร่วมเกิดกระบวนการรีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับโมเลกุลสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S^0) ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วไฟฟ้าร่วม โดยมีปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น คือ

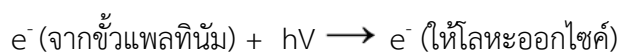
ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ารับแสง



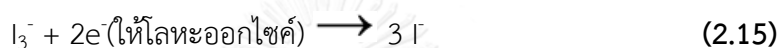
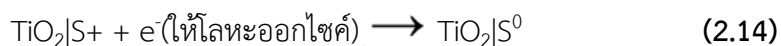
ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าร่วม



ปฏิกิริยารวม

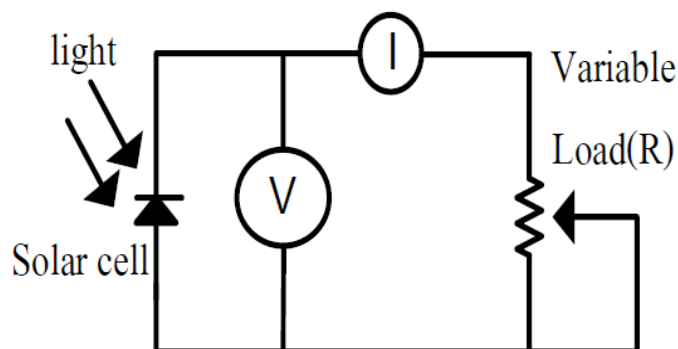


แต่ในกระบวนการก็อาจมีปฏิกิริยาที่ให้ผลเชิงลบประกอบด้วยการรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับโฮล ย่อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้โฮล ย่อมไวแสงกลับสู่สภาวะพื้นโดยไม่มีอิเล็กตรอนออกไปนอกเซลล์ จึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการ (2.14) และการพบกันของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสารอิเล็กโตรไลต์ทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ ดังสมการ (2.15)

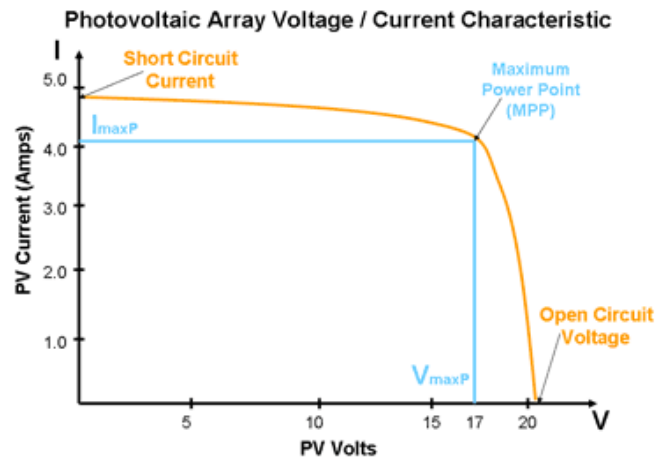


2.6.3 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

การหาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะโดยทั่วไปไปนิยม วัด I-V characteristics หรือ I-V curve เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาฟิลล์แฟกเตอร์ และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลง (energy conversion efficiency, η) ของเซลล์สุริยะ การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve มี 2 แบบ ดังนี้ การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve แบบที่ 1 ดังรูปที่ 2.21 อุปกรณ์ประกอบด้วยเซลล์สุริยะที่จะทำการวัด แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และตัวต้านทานปรับค่าได้ เมื่อต่อวงจรให้สมบูรณ์สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้า (current, I) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage, V) ของเซลล์สุริยะได้เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าไปเขียนกราฟจะได้กราฟ I-V curve ดังรูปที่ 2.22

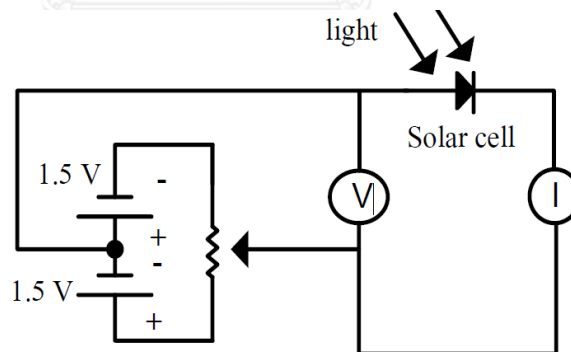


รูปที่ 2.21 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์สุริยะแบบที่ 1 [24]

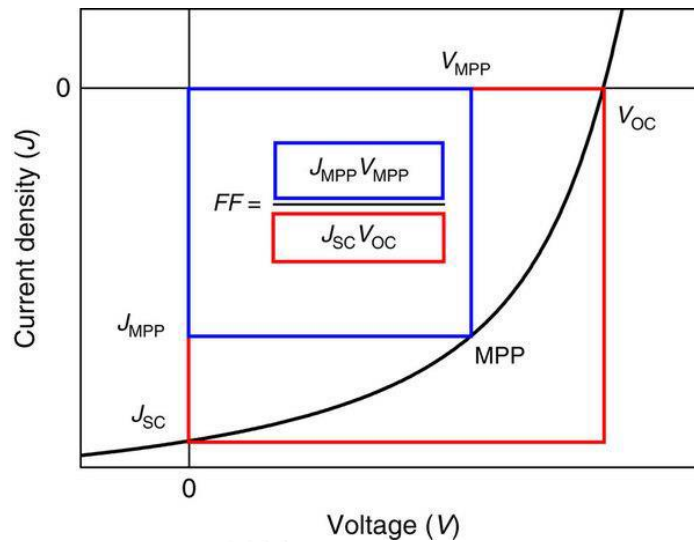


รูปที่ 2.22 กราฟ I-V curve ของเซลล์สุริยะจากการต่อวงจรแบบที่ 1 [24]

การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve แบบที่ 2 ดังรูปที่ 2.23 เป็นวงจรที่ใช้ bias เซลล์เกินกว่ากำลังที่เซลล์สุริยะผลิตได้ เป็นวงจรที่มีอยู่ในเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ และหาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ได้มาตรฐาน เช่น เครื่อง IV – test sun simulator เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไปเขียนกราฟจะได้กราฟ I-V curve ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์สุริยะแบบที่ 2 [24]



รูปที่ 2.24 กราฟ I-V curve ของเซลล์สุริยะจากการต่อวงจรแบบที่ 2 [24]

สำหรับค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ (η) คิดเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ นิยามจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์สุริยะจ่ายให้กับวงจรภายนอก (P_{max}) ต่อกำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะ (P_{in}) คูณด้วย 100 ดังแสดงในสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$\eta (\%) = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.16)$$

หรือ
$$\eta (\%) = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.17)$$

เมื่อ I_{max} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด

V_{max} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

สำหรับการคำนวณจะมีการกำหนดค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor, F.F.) ซึ่งใช้บอกคุณภาพของรอยต่อนิยามจากพื้นที่ใต้กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ ดัง

แสดงในรูปที่ 2.22 และ 2.24 โดยฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สร้างจาก $I_{\max}V_{\max}$ และพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สร้างจาก $I_{sc}V_{oc}$ ดังสมการที่ 2.18

$$F.F. = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.18)$$

เมื่อ I_{sc} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

V_{oc} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage)

จากสมการที่ 2.17 และ 2.18 ค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะสามารถเขียนใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.19

$$\eta (\%) = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times F.F.}{P_{in}} \times 100 \quad (2.19)$$

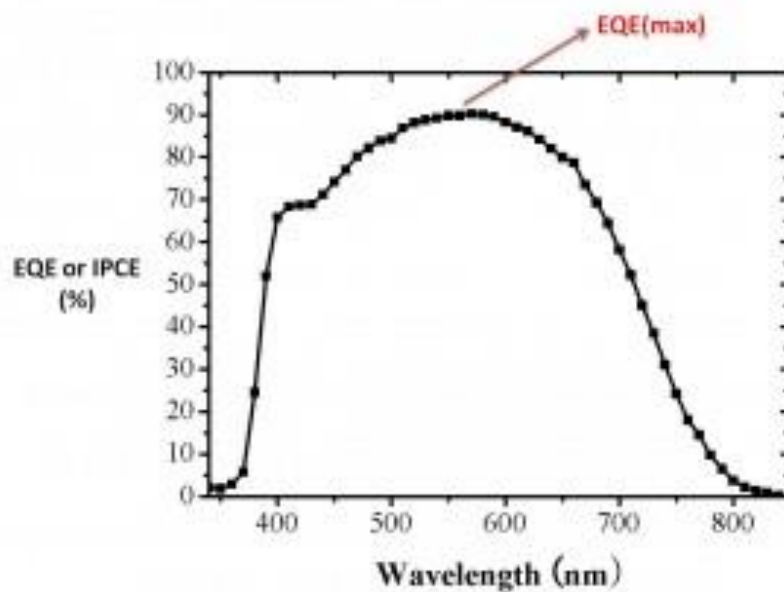
นอกจากนี้ยังมีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ ซึ่งขึ้นกับความยาวคลื่นแสงโดยเป็นการบอกว่าแต่ละความยาวคลื่นแสงที่ฉายลงไปเซลล์สามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เท่าใด เรียกว่า ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident Photon to Current Conversion Efficiency, IPCE) หรือบางครั้งเรียกว่า ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External Quantum Efficiency; EQE) สามารถคำนวณได้จาก

$$IPCE (\%) = \frac{1240 \times j_{sc} (A/cm^2)}{\lambda \times I_{inc} (W/cm^2)} \times 100 \quad (2.20)$$

เมื่อ j_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของ
 ขั้วไฟฟ้ารับแสง (short circuit current density)

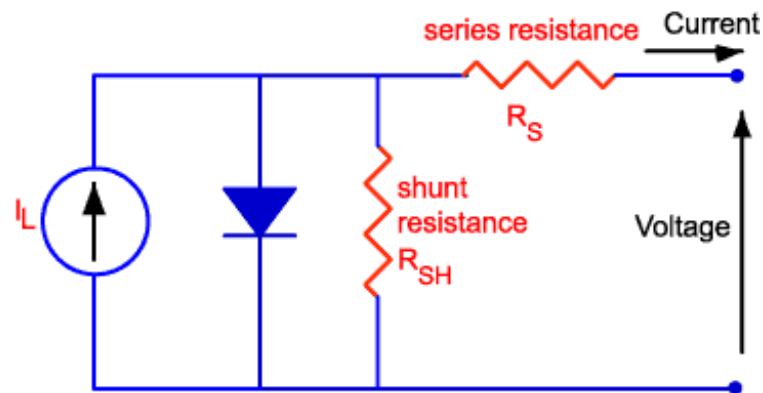
λ คือ ความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ

I_{inc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ารับ
 แสง



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างกราฟประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า
 (IPCE หรือ EQE) [26]

2.6.4 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะ



รูปที่ 2.26 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์สุริยะ [27]

โดยทั่วไปสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้า เริ่มต้นที่วงจรสมมูลของเซลล์สุริยะดังแสดงในรูปที่ 2.26 เป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสงไดโอด (รอยต่อพี-เอ็น) และความต้านทานชัณฑ์ (Shunt) และต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม ตามลำดับ เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.21

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.21)$$

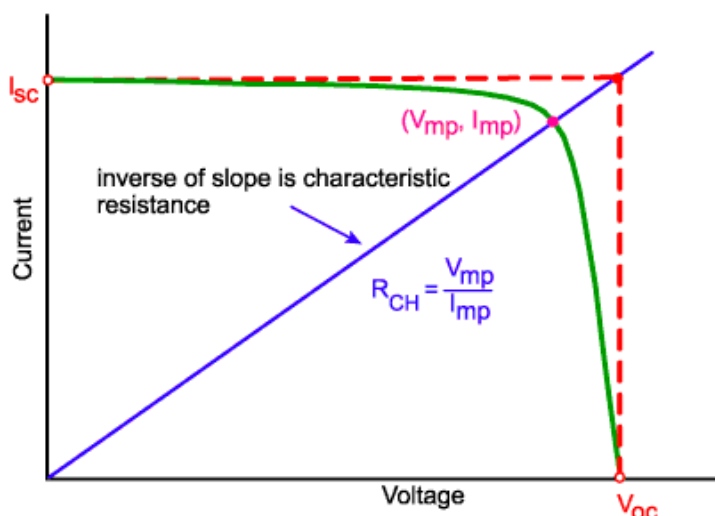
ผลลัพธ์ของกระแสที่ได้จากเซลล์สุริยะเกิดมาจากแหล่งพลังงานแสงหักกลับด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และผ่านความต้านทานชัณฑ์ ขณะกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้น

$$V_J = V + IR_S \quad (2.22)$$

สมการที่ 2.22 แสดงแรงดันไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขาออกบวกด้วย ผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานอนุกรม

โดยที่	I	คือกระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_L	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_D	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_{SH}	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานชั้นที่มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	V	คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นโวลต์
	R_S	คือ ความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็นโอห์ม

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (I_{sc}) ศักย์ไฟฟ้าวงจรถัด (V_{oc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (F.F.) รูปที่ 2.27 แสดงกระแสลัดวงจร และศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะมีค่าเป็นศูนย์เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด และศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดขณะไม่มีกระแสเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดสูงสุด ส่วนฟิลล์แฟกเตอร์ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณศักย์ไฟฟ้ากับกระแสที่จุดทำงานสูงสุด และผลคูณของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์สุริยะที่เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์สุริยะ และการพัฒนาเซลล์สุริยะ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดสูงสุดต่อกระแสที่สูงสุดหรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดต่อกระแสลัดวงจร



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ [27]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในน้ำยาง

ธรรมชาติ

Bakar และคณะ [28] ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในน้ำยางธรรมชาติ โดยผสมซิลเวอร์ไนเตรตในน้ำยางข้น ขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางบนกระจกปิดสไลด์ และอบในตู้อบ จากนั้นนำไปฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อให้เกิดการรีดักชัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามลของความเข้มข้นที่แตกต่างของซิลเวอร์ไนเตรตอยู่ที่ 0.28, 0.84, 1.4, 1.9 และ 2.5×10^{-3} โมลาร์ ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรอยู่ในช่วงประมาณ 425 - 484 นาโนเมตร ศึกษาขนาดอนุภาคเงินบนฟิล์มคอมโพสิตโดยใช้เทคนิคทางยูวี - วิสเปิลสเปกโทรสโกปี และได้กำหนดให้ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรตคงที่ 1.4×10^{-3} โมลาร์ ที่เวลาต่าง ๆ คือ 20, 60 และ 90 นาที พบว่าขนาดอนุภาคเงินที่ได้คือ 7.4, 5.2 และ 4.8 นาโนเมตร ตามลำดับ ที่ขนาดอนุภาคลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เพราะโปรตีนในน้ำยางทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว ควบคุมขนาดของอนุภาคเงิน แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเงินจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต นอกจากนั้น คณะผู้วิจัยยังได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรน้ำยางปลอดโปรตีน (de-proteinized natural rubber latex : DPNR) เพื่อยืนยันว่าโปรตีนในน้ำยางทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว ซึ่งผลการศึกษาพบว่า อนุภาค

เงินในฟิล์มคอมโพสิตที่ได้จากน้ำยางปลอดโปรตีน มีความไม่เสถียร และได้ขนาดอนุภาคใหญ่มาก ดังนั้นโปรตีนมีผลต่อความเสถียรของอนุภาคเงินในน้ำยางธรรมชาติ

Guidelli และคณะ [29] ได้ศึกษาผลของการเตรียมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรโดยวิธีรีดักชันทางเคมี แบบ green method ในน้ำยางธรรมชาติ โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ ซิลเวอร์ไนเตรตที่ 0.5, 2 และ 4 มิลลิโมลต่อลิตร โดยทำการผสมเข้ากับน้ำยางธรรมชาติ 200 ไมโครลิตร และน้ำ 300 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารผสมไปอุ่นในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส และปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา นำ 20 มิลลิลิตรของสารที่ได้ ไปใส่ในถุงไตอะไลซิส แล้วแช่ในน้ำ 800 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พร้อมปั่นกวนตลอดเวลา จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ มีขนาดอนุภาคประมาณ 2 ถึง 100 นาโนเมตร เกาะกลุ่มรวมตัวกันมีช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรอยู่ในช่วงประมาณ 400 - 470 นาโนเมตร โดยจุดยอดพีคอยู่ที่ 435 นาโนเมตร พบว่าขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรตเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 4 มิลลิโมลต่อลิตร อนุภาคของเงินระดับนาโนเมตรมีการกระจายตัวแบบโมนอดิสเพอร์ส (*monodisperse*) และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 290 นาโนเมตร ในขณะที่ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 2 มิลลิโมลต่อลิตร และ 0.5 มิลลิโมลต่อลิตร มีการกระจายตัวเป็นพอลิดีสเพอร์ส (*polydisperse*) ที่กว้างกว่า ตามความเข้มข้นที่น้อยลง และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 250 นาโนเมตร และ 180 นาโนเมตร ตามลำดับ

Suwanvisith [16] ได้ศึกษาผลของปัจจัยการทดลองต่าง ๆ ต่อขนาดของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติ ได้แก่ ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต มวลโมเลกุลของสารให้ความคงตัว PVA และ PEG ปริมาณของ PVA และ PEG ชนิดของสารให้ความคงตัว และสารตั้งต้นของเงินระดับนาโนเมตร โดยศึกษาทั้งผลของอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา รวมทั้งค่า pH ของสารที่เตรียมด้วย จากการทดลองพบว่า ค่าการดูดกลืนแสง และค่าการนำไฟฟ้าของสารเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรตเพิ่มขึ้น แต่ค่า pH ลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่าการเกิดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเพิ่มขึ้น และโตขึ้น นอกจากนี้ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่เติม PVA มวลโมเลกุล 72000 มีค่าต่ำกว่าการใช้ PVA โมเลกุล 145000 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดโมเลกุลที่ต่างกันมีผลต่อขนาดอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ ขณะที่การใช้ปริมาณ PVA เท่ากับ 5 % w/v และการเพิ่มปริมาณ PEG จะส่งผลให้ขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ได้เล็กลง

Suwatthanarak และคณะ [30] ได้ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรตเป็นตัวให้ซิลเวอร์ไอออน โดยอาศัยแอมโมเนียในทางน้ำยางไปสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับซิลเวอร์ไนเตรต แล้วไปทำปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์ในทางน้ำยางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของแอมโมเนีย, ดี - กลูโคส และโปรตีน BSA ต่อการสังเคราะห์ โดยเพิ่มปริมาณแอมโมเนียจาก 0.362% เป็น 0.377% โดยเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 5 ไมโครลิตร, เพิ่มปริมาณดี - กลูโคสโดยเติม ดี - กลูโคสลงไป 100 ppm และเพิ่มปริมาณโปรตีน BSA โดยเติมโปรตีน BSA ลงไป 100 ppm รวมทั้งศึกษาผล ณ วันที่ทำการสังเคราะห์ และ 1 วันหลังจากสังเคราะห์ พบว่า ณ วันสังเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจะสูงขึ้น และการดูดเคลื่อนไปยังความยาวคลื่นสูงขึ้น และค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแอมโมเนีย และดี - กลูโคส ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นหรือขนาดของอนุภาคเงินใหญ่ขึ้น ในขณะที่การเติมโปรตีน BSA ส่งผลตรงกันข้าม ซึ่งเป็นผลจากขนาดของอนุภาคเงินที่เล็กกว่ายืนยันได้จากผลของภาพอนุภาคเงินจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โดยขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ไม่ได้เติมอะไรลงไปจะอยู่ที่ 6 -26 นาโนเมตร สำหรับผลเมื่อผ่านไป 1 วันหลังจากสังเคราะห์ พบว่า ให้ผลเหมือนกัน แต่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นกว่า ณ วันสังเคราะห์ ค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าวันแรก

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมประยุกต์ใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

Dissanayake และคณะ [31] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงโดยการใช้อนุภาคเงิน และทองระดับนาโนเมตรซึ่งเตรียมจากกระบวนการรีดักชันทางเคมี จากผลการศึกษาพบว่า ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทองอยู่ในช่วงประมาณ 500 - 600 นาโนเมตร โดยมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 520 นาโนเมตร ขณะที่ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเงินอยู่ในช่วงประมาณ 350 - 470 นาโนเมตร โดยมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 420 นาโนเมตร เป็นผลจากการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาค จากรูปที่ 5 และตารางที่ 1 พบว่า ค่าประสิทธิภาพของ DSSC กับ TiO_2 , $\text{TiO}_2\text{-AuNP}$, และ $\text{TiO}_2\text{-AgNP}$ มีค่า 5.12 %, 6.23 %, และ 6.51 % ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าทั้งการเติมทองและเงินระดับนาโนเมตร สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของ DSSC ได้ นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นกระแสจล (J_{sc}) ของทั้งทองและเงินมีค่าเพิ่มขึ้น อันเป็นผลจากการปรับปรุงการดูดกลืนแสงโดยอาศัยปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้ทอง และเงิน

ระดับนาโนเมตร พบว่าเงินให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อยคือ 6.51 % ขณะที่ทองอยู่ที่ 6.23 % ที่เป็นเช่นนี้ เพราะเงินมีความสามารถในการดูดกลืนแสง และกระเจิงได้ดีกว่าทอง

Lim และคณะ [32] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงโดยการใช้นาโนอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือ (dope) ด้วยไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (N,S-TiO₂) โดยทำการเปรียบเทียบ 3 กรณี คือ เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ไม่เจือผสมอะไร (TiO₂), เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการเจือด้วยไนโตรเจนกับซัลเฟอร์ (N,S-TiO₂@Ag) และเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการเจือด้วยไนโตรเจนกับซัลเฟอร์ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (N,S-TiO₂@Ag) พบว่า ความหนาแน่นกระแสแสงจรปิด (J_{sc}) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 6.27 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (TiO₂) และ 9.78 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (N,S-TiO₂) เป็น 29.05 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (N,S-TiO₂@Ag) และค่าความหนาแน่นกระแสที่ทำให้มีกำลังสูงสุด (J_{max}) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.25 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (TiO₂) และ 6.69 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (N,S-TiO₂) เป็น 17.88 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (N,S-TiO₂@Ag) ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่ทั้งเจือด้วยไนโตรเจน และซัลเฟอร์ กับอนุภาคเงิน (N,S-TiO₂@Ag) มีค่า 8.22 % สูงขึ้นถึง 231 % เทียบกับกรณีที่ไม่ได้เจือด้วยไนโตรเจน และซัลเฟอร์ กับอนุภาคเงิน (TiO₂) ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ 2.57 % และสูงขึ้น 145 % เทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้นาโนอนุภาคเงิน (N,S-TiO₂) ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ 3.35 % ตามลำดับเป็นผลมาจาก 3 ปัจจัย อันได้แก่

1. การเจือไนโตรเจนลงบน TiO₂ จะไปทำให้ช่องว่างแถบอิเล็กทรอนิกส์ (band gap energy) ลดลง และช่วยขยายช่วงการดูดกลืนแสงของ TiO₂ จากปกติอยู่ในย่านแสงเหนือม่วงมายังช่วงของแสงที่มองเห็นได้
2. การเจือซัลเฟอร์ลงบน TiO₂ จะไปช่วยในการถ่ายเทอิเล็กตรอน รวมทั้งยังช่วยให้ปฏิกิริยารีดักชันทางเคมีไปข้างหน้าได้ดียิ่งขึ้น
3. การใช้นาโนอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร จะไปช่วยในการกระเจิงแสงเข้าไปยังอุปกรณ์ได้มากขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิว

ซึ่งเมื่อเทียบจากประสิทธิภาพของเซลล์จากทั้ง 3 กรณี ดังตารางข้างต้น จะเห็นว่าการใช้นาโนอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะมากที่สุด

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- ที-บิวทิลแอลกอฮอล์ (Tert-Butyl Alcohol), Panreac, Spain.
- ไอโซโพรพานอล (2-Propanol), A.R. Grade, Qrec, New Zealand.
- เอทานอล (Ethanol Absolute), A.R. Grade, Qrec, New Zealand.
- อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile), A.R. Grade, Lab-scan, Thailand.
- วาเลโรไนไตรล์ (valeronitrile), 95%, Sigma Aldrich, USA.
- อะซิโตน (Acetone), Commercial Grade, Lab-scan, Thailand.
- สีย้อมไวแสง [Z907 Hydrophobic Dye ($C_{42}H_{52}N_6O_4RuS_2$)], Dyesol, Switzerland.
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ [Iodolyte HI-30 Electrolyte (I^-/I_3^-)], Solaronix, Switzerland.
- ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ [90-T Transparent Titania Paste (TiO_2)], Dyesol, Switzerland.
- เอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose), Sigma Aldrich, USA.
- แอลฟา-เทอร์พินอล (α -Terpinol), Sigma Aldrich, USA.
- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide), P25, Qrec, New Zealand.
- โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol), M.W.200, Qrec, New Zealand.
- โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol), M.W.8500, Sigma Aldrich, USA.
- โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol), M.W.35000, Sigma Aldrich, USA.
- กรดเฮกซะคลอโรแพลตินิก (IV) [Hexachloroplatinic (IV) Acid], Merck, Germany.
- สีเพนท์เงิน (Silverpaste)

- หางน้ำยางธรรมชาติ (Skim natural rubber latex : SNRL) องค์การสวนยาง จังหวัด นครศรีธรรมราช
- ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate), A.R. Grade, Lab-scan, Thailand.
- Methyl red, Panreac, Spain.
- กลูโคส (D-Glucose anhydrase), A.R. Grade, Ajax Finechem, Australia.
- กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : HCL),A.R. Grade, Lab-scan, Thailand.
- ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (Titanium (IV) chloride : $TiCl_4$), Merck, Germany.
- กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (TEC15 Conductive glass plates), Dyesol, Australia.
- แผ่นเทอร์โมพลาสติก (Surlyn), 60 ไมโครเมตร thickness, Solaronix, Switzerland.
- กระจกปิดสไลด์ (Rectangular Cover Slips), Size 9 x 9 mm. #1, Bellco Brand.
- กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid), A.R. Grade, Lab-scan, Thailand.

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- เต้าเผา ELF11/6, Carbolite, UK.
- ตู้อบความร้อน ED53, Binder, Germany.
- อุปกรณ์สกรีน ซัยบูรณ์, ประเทศไทย
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ P.V.R., Italy.
- เครื่องเป่าลมร้อน (Heat gun) GHG630DCE, Bosch, Germany.
- เต้าให้ความร้อน (Hot plate) Ok Well, ประเทศไทย
- อ่างอัลตราโซนิก 1860 QTD, VGT, China.
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง AB204-S, Mettler Toledo, USA.
- ตู้ประกอบเซลล์
- อุปกรณ์ตัดกระจก

- ดิจิตอล มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)
- เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน (Rotary Evaporator R-124), Büchi, Switzerland.
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2) รุ่น G560E, Scientific Industries, USA.
- เครื่องปั่นเหวี่ยง Mikro 200R, Hettich, Germany.
- เครื่องปั่นเหวี่ยง 5922, KUBOTA, Japan.
- ปีกเกอร์
- กระจกบอทวง
- magnetic bar
- ไมโครปิเปต
- บิวเรตต์
- ขวดวัดปริมาตร
- กระดาษฟอยด์อะลูมิเนียม

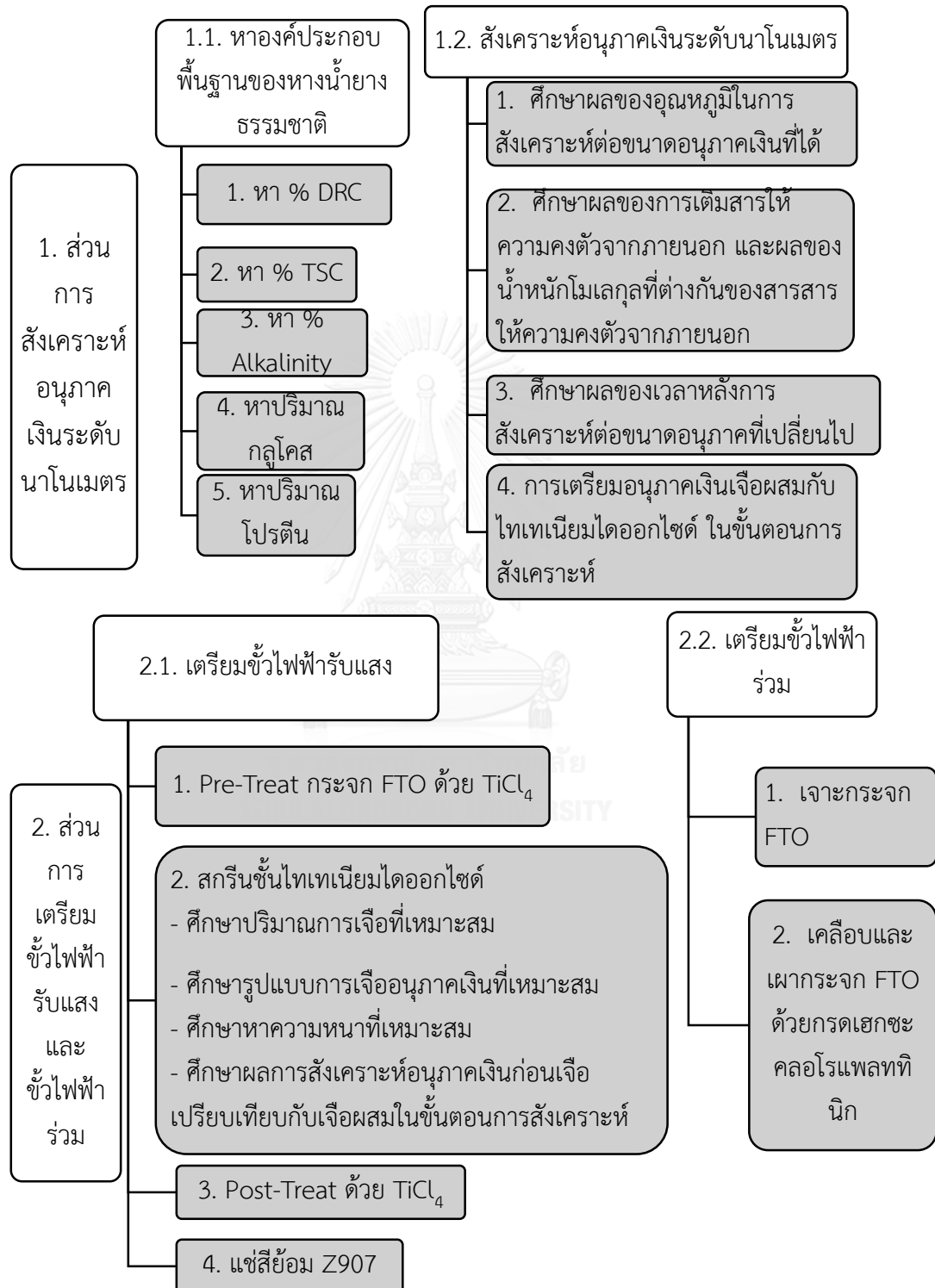


3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

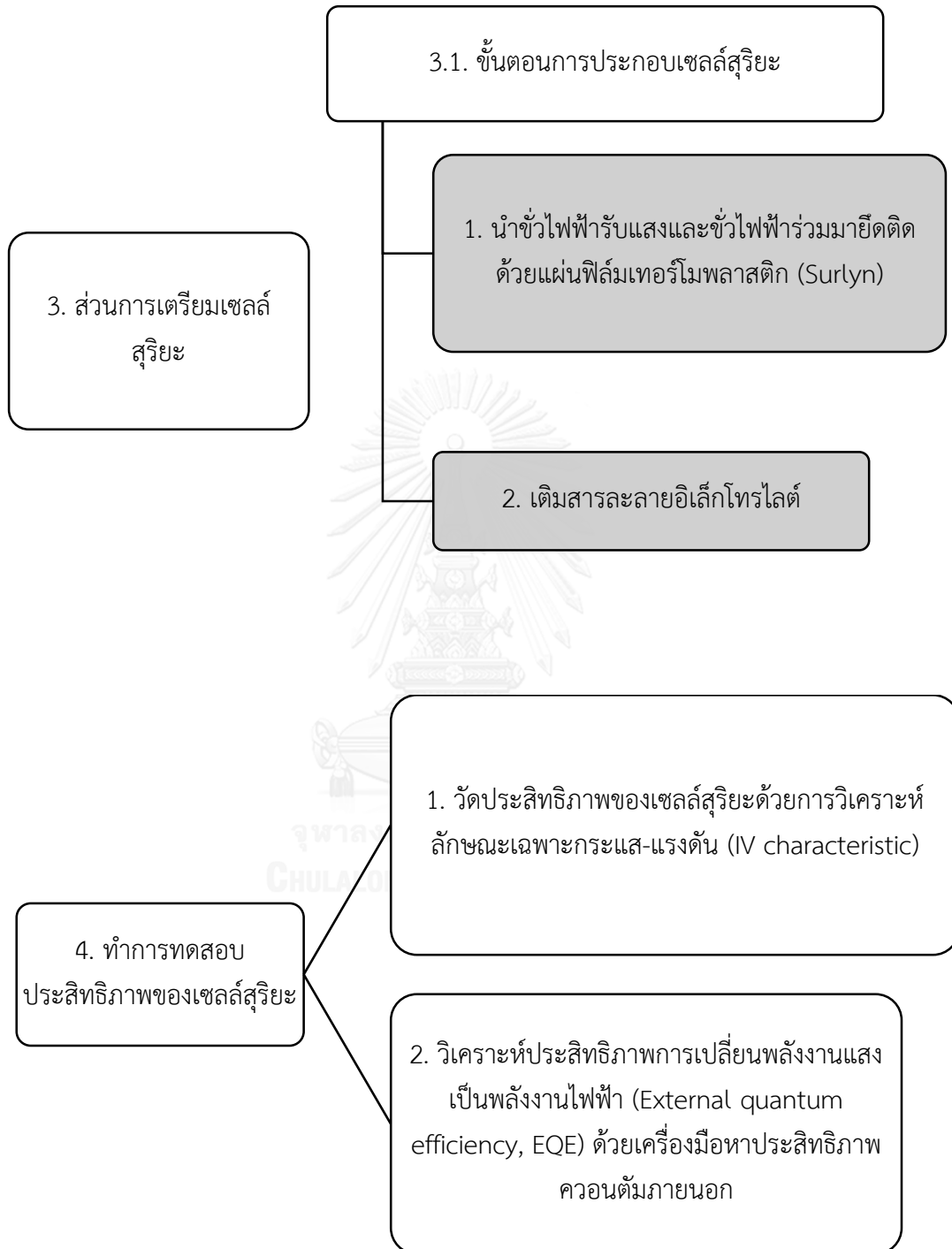
- ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer), Biomate 35, Thermo scientific
- เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic), SMU, Keithley, USA.
- เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction spectrometer), Bruker D8 Advance
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ [Scan Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, SEM-EDS) 6610LV]
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ [Field Emission Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (FESEM-EDS (7610F))]
- เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer), 3ST, Dektak, USA.
- เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size analyzer), Nanotrac NPA252, Microtrac, USA.
- เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer, 3ST, Dektak, USA.)
- เครื่องวัดอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Impedance spectroscopy)

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงเป็นแผนผังการดำเนินงานได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 1 และ 2



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนที่ 3 และ 4

3.5 ส่วนการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

3.5.1 หางค์ประกอบพื้นฐานของหางน้ำยางธรรมชาติ

3.5.1.1 การหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC) ของน้ำยางธรรมชาติ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1076-02

- 1) ชั่งน้ำหนักงานแก้วให้ละเอียดถึงตำแหน่ง 0.1 มิลลิกรัม และน้ำยางธรรมชาติ ปริมาณ 2 ± 0.5 กรัม
- 2) เทน้ำยางลงในงานแก้ว เอียงงานไปมาเพื่อให้น้ำยางกระจายทั่วงาน
- 3) นำน้ำยางอบที่อุณหภูมิ 70 ± 2.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หรืออบที่อุณหภูมิ 100 ± 2.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 6) หลังจากอบแล้วให้ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก (ทำการทดลอง 5 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย)
- 7) คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ TSC ของน้ำยางธรรมชาติจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (\% TSC)} = \frac{\text{น้ำหนักยางแห้งเป็นกรัม}}{\text{น้ำหนักของน้ำยางธรรมชาติเป็นกรัม}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.5.1.2 การหาเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (dry rubber content, DRC) ของน้ำยางธรรมชาติ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1076-02

- 1) ชั่งน้ำยางธรรมชาติปริมาณ 10 ± 5.0 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 mL
- 2) เติม 2% กรดอะซิติก (Acetic acid) หรือ 2% กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) ลงไปปริมาตร 80 มิลลิลิตร ซ้ำ ๆ และให้กวนตลอดเวลาที่เติมกรด (ประมาณ 5 นาที)
- 3) นำน้ำยางที่มีการเติมกรดแล้วไปวางบนอ่างน้ำร้อน (60 องศาเซลเซียส) โดยไม่รบกวนเป็นเวลา 15-30 นาที (ควรได้สารละลายใส)
- 4) ล้างยางที่จับตัวเป็นก้อนแล้วด้วยน้ำที่กำลังไหล แล้วนำยางไปรีดให้มีความหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร
- 5) นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 ± 2.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- 6) หลังจากอบแล้วให้ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก (ทำการทดลอง 5 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ย)
- 7) คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ DRC ของน้ำยางธรรมชาติจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (\% DRC)} = \frac{\text{น้ำหนักยางแห้งเป็นกรัม}}{\text{น้ำหนักของน้ำยางธรรมชาติเป็นกรัม}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.5.1.3 การหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นด่างหรือปริมาณแอมโมเนีย (% Alkalinity) ของน้ำยางธรรมชาติ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1076-02

- 1) ชั่งน้ำยางธรรมชาติปริมาณ 5 ± 5.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
- 2) เติมน้ำกลั่นลงไป 300 มิลลิลิตร
- 3) หยดสารละลายเมธิลเรดลงไป 6 หยด
- 4) ทำการไตเตรทสารละลายที่ได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานจนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู
- 5) คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นด่างของน้ำยางธรรมชาติจากสมการ

$$\text{ปริมาณความเป็นด่าง (\% NH}_3\text{)} = \left(\frac{1.7 \times M \times n}{W} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ M คือ ความเข้มข้นของกรดมาตรฐาน

n คือ ปริมาณของกรดมาตรฐานที่ใช้ (มิลลิลิตร)

W คือ น้ำหนักของน้ำยางที่ใช้ (กรัม)

3.5.1.4 การหาปริมาณกลูโคสในทางน้ำยางธรรมชาติโดยใช้ Brix refractometer

- 1) ทำการเตรียมสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.018, 0.014, 0.024, 0.028, 0.032, 0.038 และ 0.04 กรัมต่อมิลลิลิตร
- 2) นำสารละลายแต่ความเข้มข้นไปหยดใส่ Brix refractometer จะได้ค่า %Brix ออกมา
- 3) นำค่า %Brix มาสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (calibration curve) ระหว่าง %Brix กับกลูโคส (กรัมต่อมิลลิลิตร)
- 4) ปริมาณกลูโคสในทางน้ำยางจะทราบจากการนำน้ำยางมาหยดใส่ Brix refractometer เพื่อจะนำค่า %Brix ที่ได้ไปเทียบกับ กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (calibration curve) ที่ทำไว้ข้างต้น

3.5.1.5 การหาปริมาณโปรตีนในหาน้ำยารวมชาติโดยใช้วิธีเจ

ลดาห์ล (Kjeldahl method)

- 1) ชั่งน้ำยารวมชาติให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 1-2 กรัม ใส่ลงในขวดย่อยโปรตีน
- 2) ทำการเติมสารเร่งปฏิกิริยา 5 กรัม และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร
- 3) ใส่ลูกแก้ว 2 ลูก นำไปย่อยในเตาไฟในตู้ควันจนกระทั่งได้สารละลายใส ปล่อยให้เย็น
- 4) เติมน้ำกลั่นอุณหภูมิสูงลงไปล้างขวดให้ทั่ว และให้ความร้อนต่อไปจนหมดควันของกรดซัลฟูริก ปล่อยให้เย็น
- 5) นำสารมาเทลงในขวดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใช้น้ำกลั่นล้างขวดย่อยโปรตีนให้หมด แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร
- 6) จัดอุปกรณ์กลั่น
- 7) นำขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร มาเติมด้วยกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4 ลงไป 5 มิลลิลิตร ผสมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร และเติมอินดิเคเตอร์เรียวร้อยแล้ว ไปรองรับของเหลวที่จะกลั่น โดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มในสารละลายกรดนี้
- 8) ดูดสารละลายตัวอย่างด้วยปิเปต จำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในช่องใส่ตัวอย่าง แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป 20 มิลลิลิตร
- 9) ทำการกลั่นประมาณ 10 นาที ล้างปลายอุปกรณ์ควบแน่นด้วยน้ำกลั่นลงในขวดรองรับ
- 10) ทำการไตเตรทสารละลายที่กลั่นได้กับสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น 0.02 นอร์มอล จะได้จุดยุติเป็นสีม่วง
- 11) ทำ blank ด้วยวิธีการเดิม ดังข้อที่ 2-10
- 12) คำนวณหาค่าโปรตีนในน้ำยารวมชาติจากสมการ

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\% Protein)} = \frac{(a-b) \times N \times 14}{W} \times \text{Factor} \quad (3.4)$$

- เมื่อ
- a คือ ปริมาณสารละลายกรดเกลือที่ใช้กับตัวอย่างเป็น มิลลิลิตร
 - b คือ ปริมาณสารละลายกรดเกลือที่ใช้กับ Blank เป็น มิลลิลิตร
 - N คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือเข้มข้นเป็นนอร์มอล

W คือ น้ำหนักของน้ำยางที่ใช้ (กรัม)

Factor คือ 6.25 (น้ำหนักสมมูลย์ของไนโตรเจน คือ 14.007)

3.5.2 สังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

3.5.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง [30]

- 1) เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 8 มิลลิโมลต่อลิตร
- 2) นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ที่ได้มาผสมกับทางน้ำยางธรรมชาติ ให้สารผสมมีปริมาณเนื้อยาง 0.05 %DRC และความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 1.2 มิลลิโมลต่อลิตร เจือจางโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)
- 3) กวนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที จนสีเปลี่ยนจากขาวขุ่นเป็นน้ำตาลเหลือง
- 4) นำสารที่ได้ 1.5 มิลลิลิตร ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 14,000 rpm เพื่อแยกอนุภาคเงินออกจากองค์ประกอบอื่น

3.5.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่อขนาดของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

เตรียมเหมือนกับ 3.5.2.1 แต่เพิ่มขึ้นตอนต่างๆดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 8 มิลลิโมลต่อลิตร
- 2) นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ที่ได้มาผสมกับทางน้ำยางธรรมชาติให้สารผสมมีปริมาณเนื้อยาง 0.05 %DRC และความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 1.2 มิลลิโมลต่อลิตร เจือจางโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)
- 3) กวนผสมที่อุณหภูมิห้อง (26 องศาเซลเซียส), 35 องศาเซลเซียส, 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จนสีเปลี่ยนจากขาวขุ่นเป็นน้ำตาลเหลือง
- 4) นำตัวอย่างบางส่วนไปทดสอบด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์
- 5) นำสารที่ได้ 1.5 มิลลิลิตร ไปใส่ในหลอดทดลองชนิดหมุนเหวี่ยง แล้วปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 14,000 rpm เพื่อแยกอนุภาคเงินออก
- 6) นำส่วนของเหลวด้านบนออก เหลือไว้แต่ตะกอนด้านล่าง

7) เติมเอทานอลจำนวน 1.5 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองชนิดหมุนเหวี่ยง และนำไปเขย่าโดยใช้เครื่อง Vertex mixer จนอนุภาคเงินเกิดการกระจายตัว

8) นำไปวิเคราะห์ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

3.5.2.3 ศึกษาผลของการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก และน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันของสารให้ความคงตัวจากภายนอก

เตรียมเหมือนกับ 3.5.2.1 แต่เพิ่มขึ้นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1) เตรียมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 8 มิลลิโมลต่อลิตร

2) นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ที่ได้มาผสมกับหางน้ำยางธรรมชาติให้สารผสมมีปริมาณเนื้อยาง 0.05 %DRC และความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรต 1.2 มิลลิโมลต่อลิตร เจือจางโดยใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)

3) กวนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที จนสีเปลี่ยนจากขาวขุ่นเป็นน้ำตาลเหลือง

4) นำตัวอย่างบางส่วนไปทดสอบด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

5) นำสารที่ได้ 1.5 มิลลิลิตร ไปใส่ในหลอดทดลองชนิดหมุนเหวี่ยง แล้วปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 14000 rpm เพื่อแยกอนุภาคเงินออก

6) นำส่วนของเหลวด้านบนออก เหลือไว้แต่ตะกอนด้านล่าง

7) เติมเอทานอลจำนวน 1.5 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองชนิดหมุนเหวี่ยง และนำไปเขย่าโดยใช้เครื่อง Vertex mixer จนอนุภาคเงินเกิดการกระจายตัว

8) นำไปวิเคราะห์ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

9) ทำเช่นเดียวกับ 1) – 8) แต่ในขั้นตอนที่ 2) เพิ่มการผสมสารให้ความคงตัวจากภายนอกลงไป (โพลีเอทิลีนไกลคอล : PEG) เป็นสัดส่วน ดังนี้

โพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200 : ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร (%w/v) 0.1, 0.2, 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ

โพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 8500 : ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร (%w/v) 0.1, 0.2, 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ

โพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 35000 : ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร (%w/v)
0.1, 0.2, 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ

3.5.2.4 ศึกษาผลของเวลาหลังการสังเคราะห์ต่อขนาดอนุภาคที่เปลี่ยนไป

นำสารตัวอย่างที่สังเคราะห์เสร็จแล้วจาก 3.4.2.3 ทั้ง 16 ตัวอย่าง อันได้แก่ ตัวอย่างที่ไม่เติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก 1 ตัวอย่าง และตัวอย่างที่เติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก 15 ตัวอย่าง มาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเวลา 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ตามลำดับ แล้วจึงนำตัวอย่างที่ครบกำหนดเวลาไปทดสอบด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์เพื่อศึกษาค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป และนำไปวิเคราะห์ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่อไป

3.5.2.5 การเตรียมอนุภาคเงินเจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ในขั้นตอนการสังเคราะห์

- 1) นำไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) 4.75 กรัม มาคนต่อเนื่องในน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร
- 2) เตรียมซิลเวอร์ไนเตรต 0.25 กรัม มาทำละลายในน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร
- 3) เตรียมสารละลายกลูโคส 0.45 กรัม มาทำละลายในน้ำปราศจากไอออน 15 มิลลิลิตร
- 4) นำสารในข้อ 1) – 3) มาผสม และเติมสารละลายแอมโมเนียลงไปในส่วนที่เหมาะสมทำการกวนผสมตลอดเวลาเป็นเวลา 45 นาที
- 5) นำสารผสมที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 rpm เพื่อแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกมา

3.6 ส่วนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงและขั้วไฟฟ้าร่วมเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

3.6.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

- 1) เตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงโดยตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (Fluorene-doped tin oxide : FTO) ขนาด 3 x 15 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดโดยการโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15

นาที่ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และตามด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง

2) ปรับสภาพผิว (Pretreatment) โดยนำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าจาก 1) ไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.04 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและตากให้แห้ง

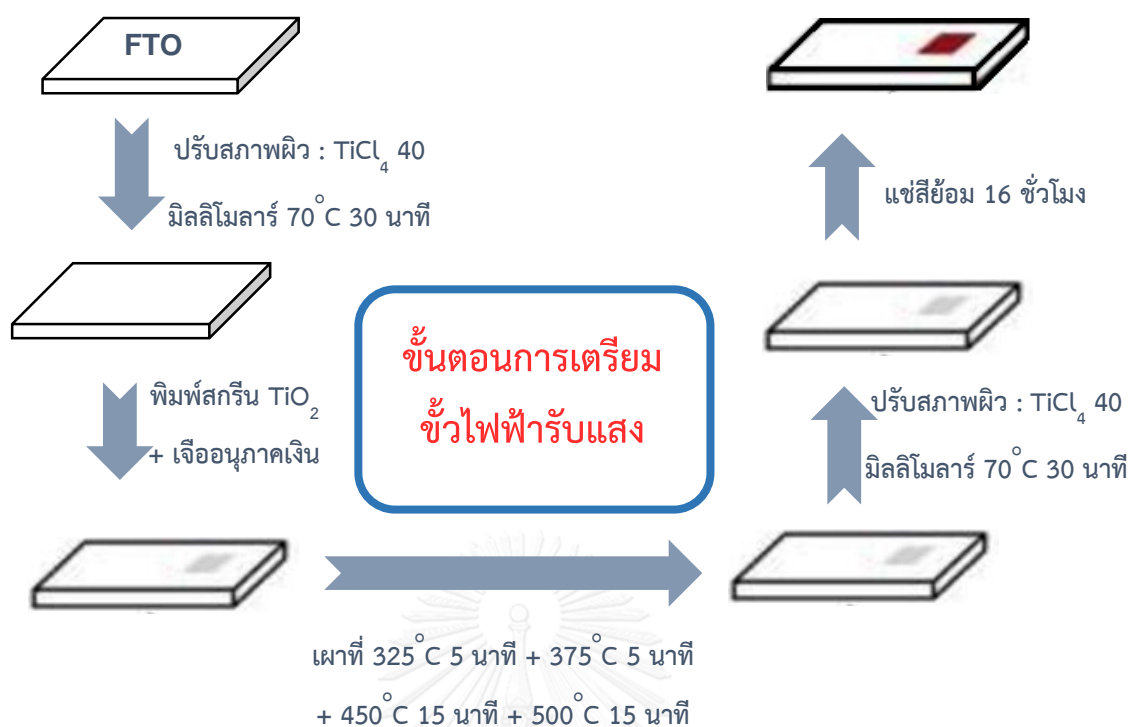
3) นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าจาก 2) ทำการพิมพ์สกรีนชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียม ไดออกไซด์ขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร (Titanium paste, Solaronix) ขนาดพื้นที่ 0.5 X 0.5 ตารางเซนติเมตร โดยใช้บล็อกสกรีนขนาด mesh 90T หลังการสกรีน ทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 นาที และนำไปให้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส 7 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วสกรีนซ้ำตามจำนวนชั้นที่ต้องการ

4) นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่สกรีนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์เสร็จแล้วจาก 3) ไปเผาที่อุณหภูมิแบบไล่ระดับ ดังนี้ 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ตามลำดับ ทิ้งไว้จนเย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง

5) ปรับสภาพผิว (Posttreatment) โดยนำกระจกที่ผ่านการสกรีนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และเผาเสร็จแล้วจาก 4) ไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.04 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตัดแบ่งเป็นเซลล์ขนาด 1.2 x 1.5 ตารางเซนติเมตร วัดความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer, 3ST, Dektak, USA)

6) เตรียมสีย้อมไวแสง Z907 ความเข้มข้น 0.3 มิลลิโมลาร์ ในตัวทำละลายผสมระหว่างอะซิโตนไไตรลกับเตตระบิวทิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 1 : 1 โดยปริมาตร

7) นำกระจกที่ตัดแบ่งไว้ในขั้นที่ 5) ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำไปแช่ในสารละลายสีย้อมไวแสงทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 18 ชั่วโมงในสภาพมืด เมื่อถึงเวลาที่กำหนดจึงนำออกมาล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตนไไตรล เพื่อกำจัดสีย้อมไวแสงส่วนเกินออกมา



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

3.6.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารวม

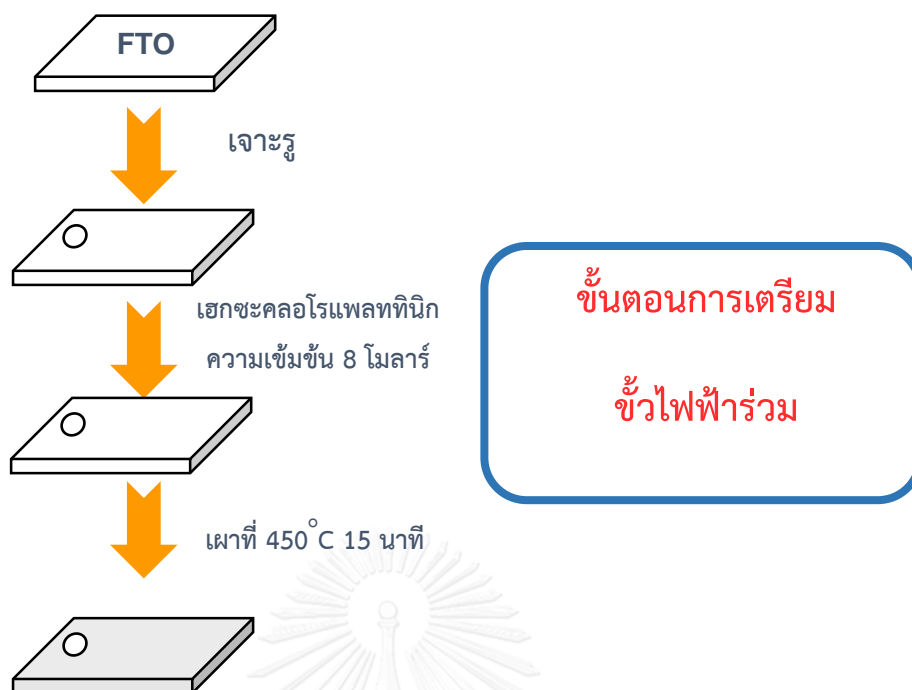
1) เตรียมขั้วไฟฟ้ารวมโดยตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (Fluorene-doped ton oxide : FTO) ขนาด 3×15 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดโดยการโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และตามด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง

2) เจาะรูขนาดเล็กบริเวณมุมของกระจก เพื่อเป็นช่องสำหรับใส่อิเล็กทรอนิกส์

3) ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าออกเป็นขนาด 1.2×1.5 เซนติเมตร

4) แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยการโซนิเคชันในเอทานอลที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดเศษกระจก และคราบฝุ่นต่างๆ แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ตามด้วยเอทานอล จากนั้นตากให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

5) นำกระจกจากข้อ 4) มาเคลือบด้วยสารละลายแพลทินัมที่เตรียมจากกรดเฮกซะคลอโรแพลททินิก ความเข้มข้น 8 โมลลาร์ โดยหยดสารลงไปที่กระจกด้านเคลือบสารนำไฟฟ้า แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นมาที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟาร่วม

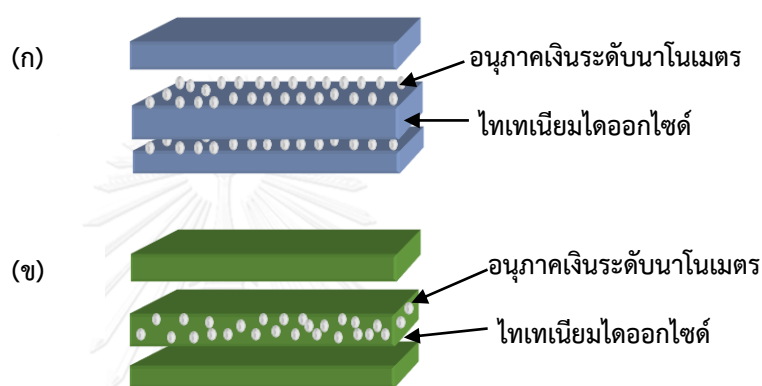
3.6.3 ศึกษาปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม

การศึกษาปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยนำอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับเอทานอลในอัตราส่วน 1:0, 1:100, 1:200, 1:500 และ 1:1000 กรัมของอนุภาคเงินต่อมิลลิลิตรของเอทานอล (ปริมาณการเจืออนุภาคเงิน 0.129 มิลลิกรัม, 1.29×10^{-2} มิลลิกรัม, 6.47×10^{-3} มิลลิกรัม, 2.59×10^{-3} มิลลิกรัม และ 1.29×10^{-3} มิลลิกรัม ตามลำดับ) นำไปเจือบนพื้นผิวระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในขั้นตอนที่ 3) ของขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง (3.6.1) จากนั้นนำไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมได้ เพื่อเปรียบเทียบต่อไป

3.6.4 ศึกษารูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม

ศึกษารูปแบบการเจือที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมได้ มีรูปแบบการเจืออนุภาคเงินในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน 2 รูปแบบ ดังแสดงใน รูปที่ 3.5 รูปแบบแรก (ก) หยดอนุภาคเงินที่ผสมกับเอทานอลในสัดส่วนที่เหมาะสมลงบนผิวของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ รอจนเอทานอลแห้ง จึงทำการพิมพ์สกรีนอีกชั้นทับลงไป รูปแบบที่

สอง (ข) นำอนุภาคเงินที่ผสมกับเอทานอลในสัดส่วนที่เหมาะสมมาผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ยังไม่ทำการพิมพ์สกรีน กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำไปพิมพ์สกรีนเป็นชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์รูปแบบต่างๆ แล้ว ยังศึกษาดูการกระจายตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์และยืนยันการมีอยู่อนุภาคเงินด้วยเทคนิคนี้เช่นกัน รวมทั้งหาความหนาที่เหมาะสมด้วยเครื่องวัดความหนาผิว



รูปที่ 3.5 รูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (ก) รูปแบบที่ 1 เจือระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) รูปแบบที่ 2 เจือผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6.5 ศึกษาผลการสังเคราะห์อนุภาคเงินก่อนเจือเปรียบเทียบกับเจือผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

ศึกษาผลของการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรพร้อมกับการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่จำลองสภาวะเหมือนทางน้ำยางธรรมชาติ เปรียบเทียบกับรูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับ นาโนเมตรที่สังเคราะห์เสร็จแล้ว ในระหว่างการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง โดยมีขั้นตอนการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ ดังนี้

1) นำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปั่นเหวี่ยงเสร็จแล้วจากข้อ 3.5.2.5 มาผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) ในสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเจือที่เหมาะสมในข้อ 3.6.4

2) นำสารในข้อที่ 1) มา 1 มิลลิกรัม มาผสมกับเอทานอล 40 มิลลิลิตร และทำการโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้อง

- 3) นำเอทิลเซลลูโลส 0.75 กรัม มาผสมกับเอทานอล 20 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นกวนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 200 rpm
- 4) นำสารข้อที่ 2) และ 3) นำมาผสมเข้าด้วยกัน
- 5) พอสารผสมเข้ากัน ก็เติมแอลฟา-เทอพินอล 3 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารผสมไปปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง สลับกับโฮโมจิไนซ์สารให้เป็นเนื้อเดียวกันอย่างละ 1 ชั่วโมง
- 6) แล้วนำสารข้อ 5) ไประเหยเอทานอลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่มีลักษณะเป็นเนื้อครีมสีเหลืองอมชมพู
- 7) เตรียมกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่เตรียมไว้ดังข้อที่ 1) และ 2) ของขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง
- 8) ทำการสกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าจากข้อ 7) ตามขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงที่กล่าวไว้ข้างต้น ตั้งแต่ข้อ 3) - 7) สำหรับส่วนของขั้วไฟฟ้าร่วมทำเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้น เช่นกัน

3.7 การเตรียมเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง

3.7.1 การประกอบเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง

ขั้นตอนในการประกอบเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง ดังนี้

- 1) นำขั้วไฟฟ้ารับแสงที่ผ่านการแช่ในสารละลายสียอมไวแสงมาล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตนไนด์โรลเป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสียอมไวแสงส่วนเกินที่ไม่ยึดเกาะบนไทเทเนียมไดออกไซด์ออก
- 2) รองจันตัวทำละลายอะซิโตนไนด์โรลระเหยจนขั้วไฟฟ้ารับแสงแห้ง จึงนำมาประกอบเข้ากับขั้วไฟฟ้าร่วม แล้วจึงวางแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก (Surlyn) ระหว่างสองขั้วไฟฟ้า จากนั้นให้ความร้อนจนแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกเหลวไดยึดติดระหว่างสองขั้วไฟฟ้างกล่าว
- 3) เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผ่านรูทางฝั่งด้านขั้วไฟฟ้าร่วม
- 4) ปิดรูที่ใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้กระจกโคเวออร์สลิบขนาดเล็กเชื่อมติดกันด้วยแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก
- 5) นำเซลล์ที่ได้จากข้อที่ 4) มาทาด้วยสีพื้นท์เงิน (Silver paste) บริเวณปลายขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านเพื่อสร้างหน้าสัมผัสเวลาไปวัดประสิทธิภาพเซลล์

นอกจากนี้การประกอบเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสงจะมีการควบคุมความชื้นในตู้ประกอบเซลล์ไม่ให้เกิน 50 เปอร์เซ็นต์และอุณหภูมิภายในตู้อยู่ที่ประมาณ 30 - 40 องศาเซลเซียส

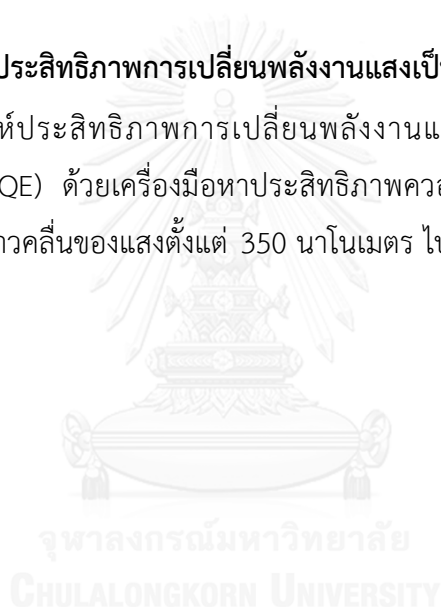
3.8 ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

3.8.1 วัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะด้วยการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน

ทำการวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ (Photoconversion efficiency, PCE) ด้วยเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA) ทดสอบโดยต่อวงจรของเครื่องกับขั้วไฟฟ้ารับแสง และขั้วไฟฟ้าร่วมให้ถูกต้อง จากนั้นฉายแสงที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในทิศตั้งฉากกับระนาบของเซลล์สุริยะ เพื่อให้เซลล์ได้รับแสงอย่างเต็มที่ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยจะได้ค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าออกมา

3.8.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (External quantum efficiency, EQE) ด้วยเครื่องมือหาประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก โดยฉายแสงความเข้มต่ำกราดตรวจความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 350 นาโนเมตร ไปจนถึง 750 นาโนเมตร ไปยังเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง



บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงสุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยในส่วนของ การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรจะศึกษาผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่อขนาดของอนุภาคเงินที่ได้ ผลของการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก และน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันของสารสารให้ความคงตัวจากภายนอก รวมทั้งศึกษาผลของระยะเวลาหลังการสังเคราะห์ต่อขนาดอนุภาคเงินที่เปลี่ยนไป โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีศึกษาช่วงการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป ใช้เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาควิเคราะห์ขนาด และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค สำหรับในส่วนของเตรียมขั้วไฟฟ้าก่อนการประกอบเซลล์ ในงานวิจัยนี้จะปรับปรุงเฉพาะขั้วไฟฟ้ารับแสงเท่านั้น โดยนำอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรจากส่วนการสังเคราะห์มาเจือผสมในรูปแบบต่างๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะให้สูงขึ้น ในขั้นนี้จะศึกษาปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม ศึกษารูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม และศึกษาผลการสังเคราะห์อนุภาคเงินก่อนเจือเปรียบเทียบกับเจือผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์ โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีวิเคราะห์ช่วงการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเจือด้วยอนุภาคเงิน ใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคเงินที่เจือ และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่เปลี่ยนแปลงไปก่อน และหลังการเจือ สำหรับในส่วนของ การประกอบเซลล์ เมื่อเราทำการเจืออนุภาคเงินในขั้วไฟฟ้ารับแสง และประกอบเข้ากับขั้วไฟฟ้าร่วมได้เป็นเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเรียบร้อย ก็นำไปทำการวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะด้วยเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ และค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้า (Photoconversion efficiency, PCE) ในแต่ละรูปแบบของการเจือ และเปรียบเทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐานที่ไม่มีการเจืออนุภาคเงิน รวมทั้งวัดประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกเชิงความยาวคลื่น (External quantum efficiency; EQE) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าในแต่ละความยาวคลื่นของแสงต่อไป

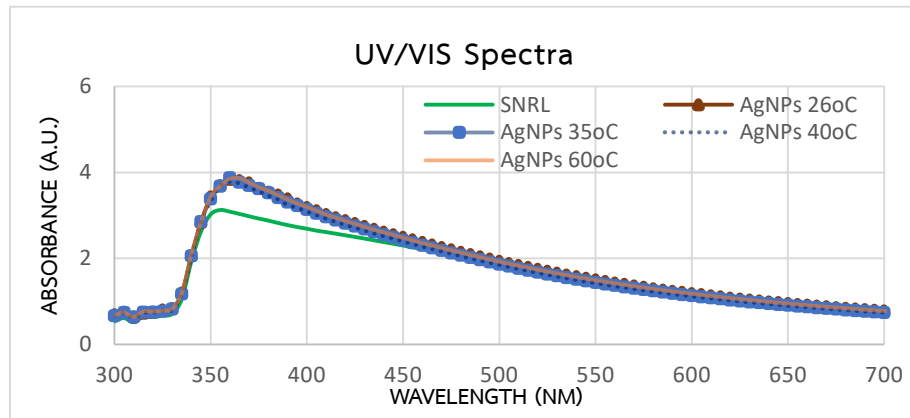
4.1 องค์ประกอบพื้นฐานของหางน้ำยางธรรมชาติ

องค์ประกอบพื้นฐานของหางน้ำยางธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็น %DRC, %Alkalinity, ปริมาณกลูโคส และปริมาณโปรตีน แสดงดังตารางที่ 4.1

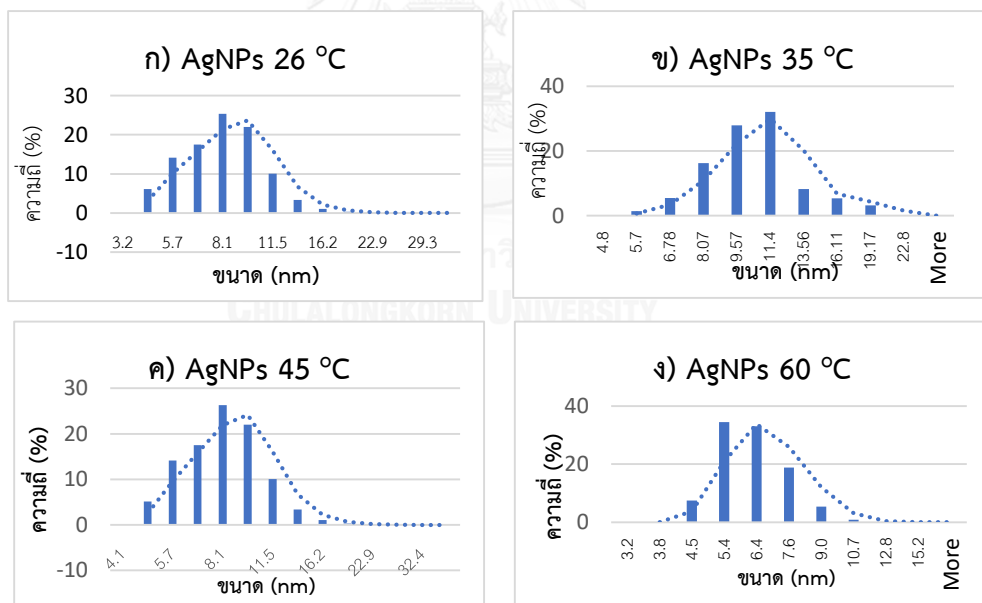
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบพื้นฐานของหางน้ำยางธรรมชาติ

Lot No.	Date	%DRC	%Alkalinity	Glucose content (g/ml)	Protein content (μ g/ml)
1	17/03/16	8.54	0.554	0.095	6.891
	1/04/16	8.54	0.548	0.095	6.789
	12/05/16	8.54	0.436	0.095	6.623
2	14/07/16	8.62	0.308	0.094	7.145
	21/08/16	8.62	0.287	0.094	7.213
3	1/02/17	9.56	0.623	0.095	5.963
	13/02/17	9.56	0.601	0.095	6.012
	21/03/17	9.56	0.577	0.095	5.895
4	19/04/17	7.96	0.489	0.094	7.158
	14/05/17	7.96	0.396	0.094	6.798
	2/06/17	7.96	0.315	0.094	6.956

4.2 ผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่อขนาดของอนุภาคเงินที่ได้



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส, 35 องศาเซลเซียส, 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

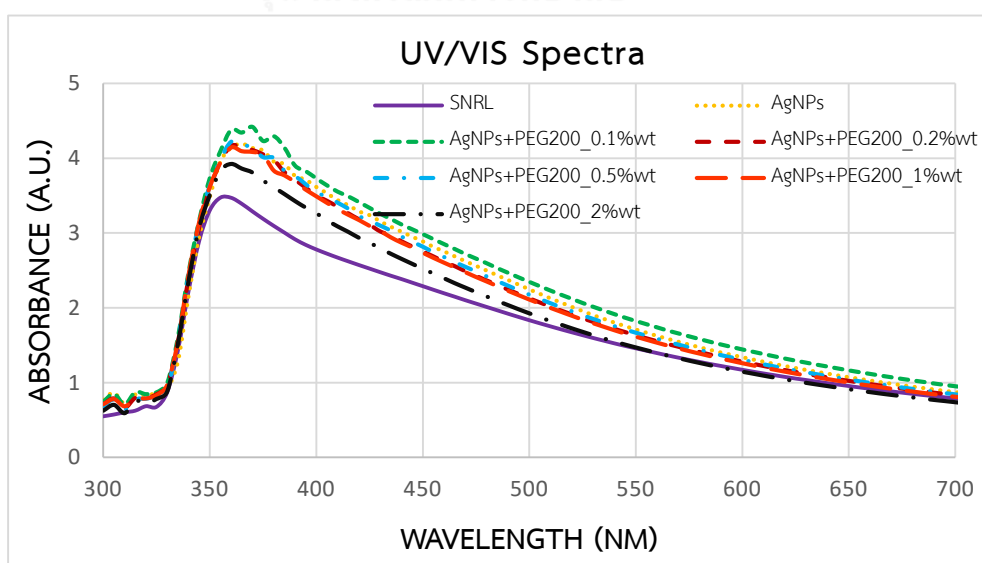


รูปที่ 4.2 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ ก) 26 องศาเซลเซียส, ข) 35 องศาเซลเซียส, ค) 40 องศาเซลเซียส และ ง) 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับระหว่างทางน้ำยางเจือจางสีข้าวชุ่น 0.05% DRC กับสารผสมของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้ในทางน้ำยางเจือจางสีน้ำตาลอ่อน ณ อุณหภูมิการสังเคราะห์

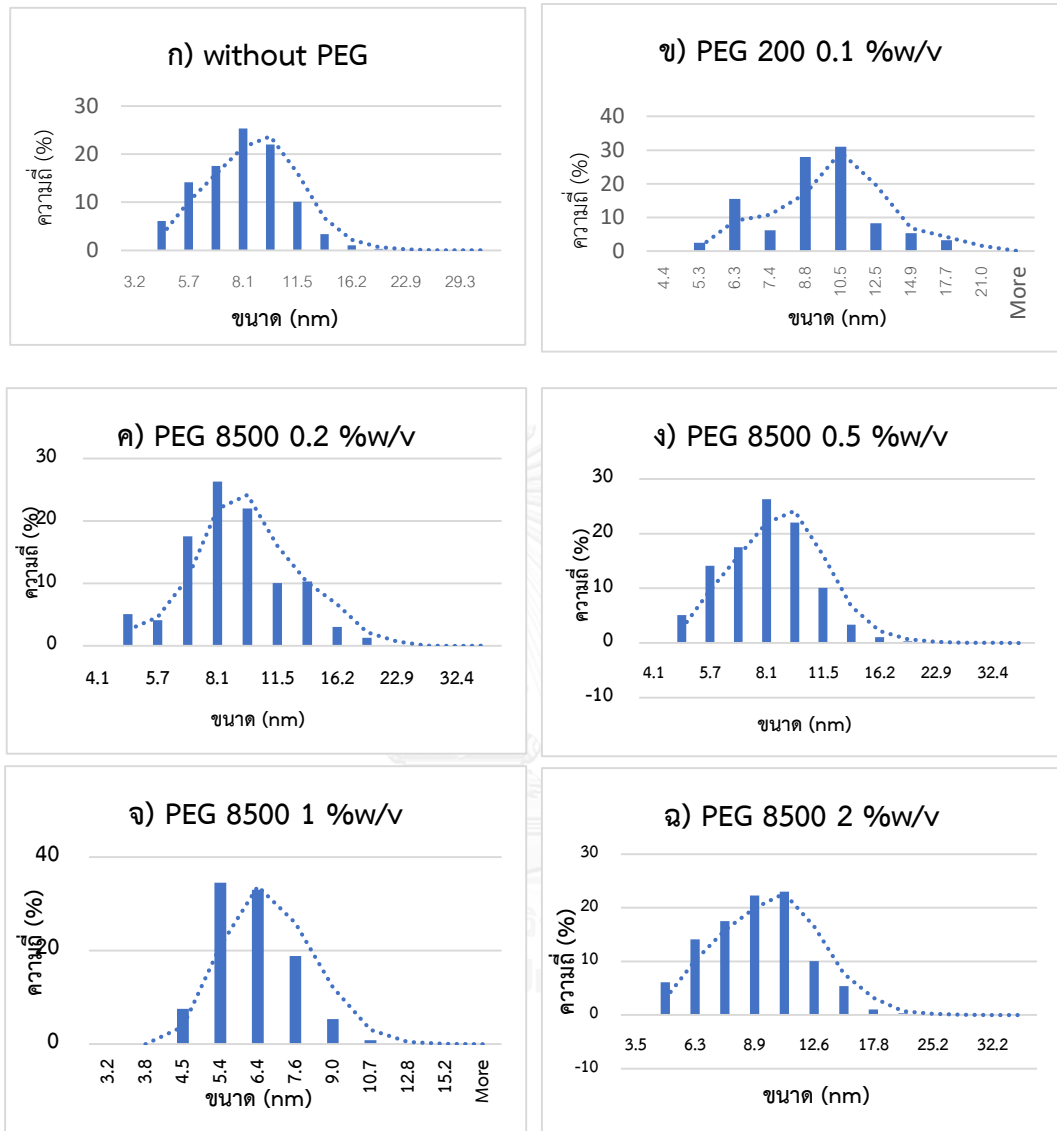
ต่างๆ ได้แก่ อุนทุมิห้อง (26 องศาเซลเซียส), 35 องศาเซลเซียส, 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ -max) มีค่าเพิ่มขึ้นในทางน้ำยาวที่มีอนุภาคเงินผสมอยู่ และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปทางแสงสีแดง (red-shifted) จาก 360 นาโนเมตร (ทางน้ำยาว) เป็น 370 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับทางน้ำยาวเจือจางในทุกกรณี ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของเงินระดับนาโนเมตรที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังจะเห็นจากรูปที่ 4.2 พบว่ากระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรของทั้ง 4 อุนทุมิ มีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 4-16 นาโนเมตร ส่งผลให้พฤติกรรมการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด รวมทั้งสภาวะรอบข้างของอนุภาคระดับนาโนเมตร ใกล้เคียงกัน ดังนั้นอุนทุมิจึงไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดอนุภาค แต่งานวิจัยของ Suwanvisith [16] ได้ศึกษาผลของค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำยาวธรรมชาติที่อุนทุมิ 11 องศาเซลเซียส, 20 องศาเซลเซียส, 26 องศาเซลเซียส, 29 องศาเซลเซียสและ 32 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุนทุมิการสังเคราะห์จาก 11 องศาเซลเซียส ไป 26 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจาก 440 โมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (11 องศาเซลเซียส) เป็น 450 โมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (20 องศาเซลเซียส) และ 590 โมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (26 องศาเซลเซียส) แต่เมื่อเพิ่มอุนทุมิเป็น 29 องศาเซลเซียส และ 32 องศาเซลเซียส ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงมาอยู่ที่ 570 โมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และ 570 โมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อุนทุมิการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรอยู่ที่ 26 องศาเซลเซียส

4.3 ผลของการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก และน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันของสารให้ความคงตัวจากภายนอก



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยาวธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.1 %w/v, PEG

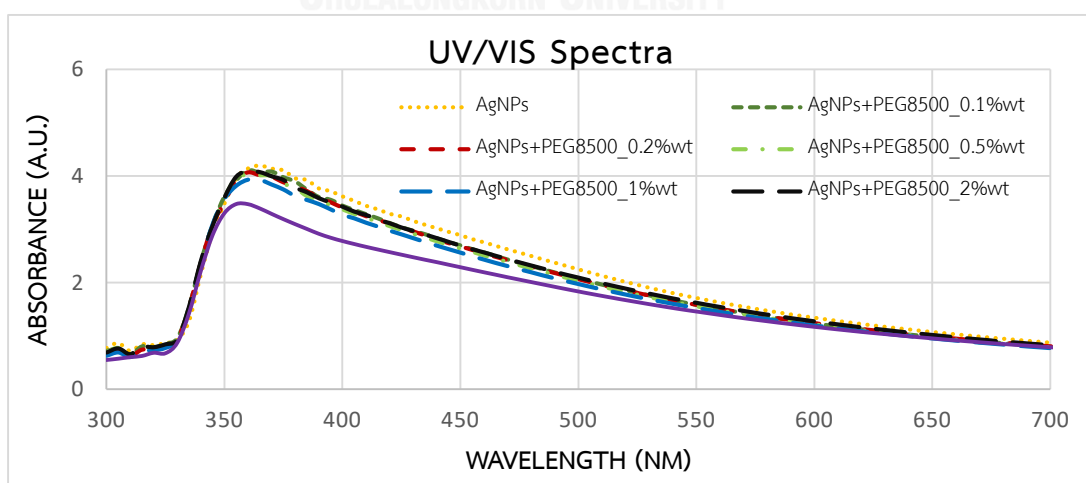
น้ำหนักริมโมเลกุล 200 0.2 %w/v , PEG น้ำหนักริมโมเลกุล 200 0.5 %w/v, PEG น้ำหนักริมโมเลกุล 200 1 %w/v และ PEG น้ำหนักริมโมเลกุล 200 2 %w/v ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ ก) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, ข) PEG น้ำหนักริมโมเลกุล 200 0.1 %w/v, ค) PEG น้ำหนักริมโมเลกุล 200 0.2 %w/v, ง) PEG น้ำหนักริมโมเลกุล 200 0.5 %w/v, จ) PEG น้ำหนักริมโมเลกุล 200 1 %w/v และฉ) PEG น้ำหนักริมโมเลกุล 200 2 %w/v ตามลำดับ

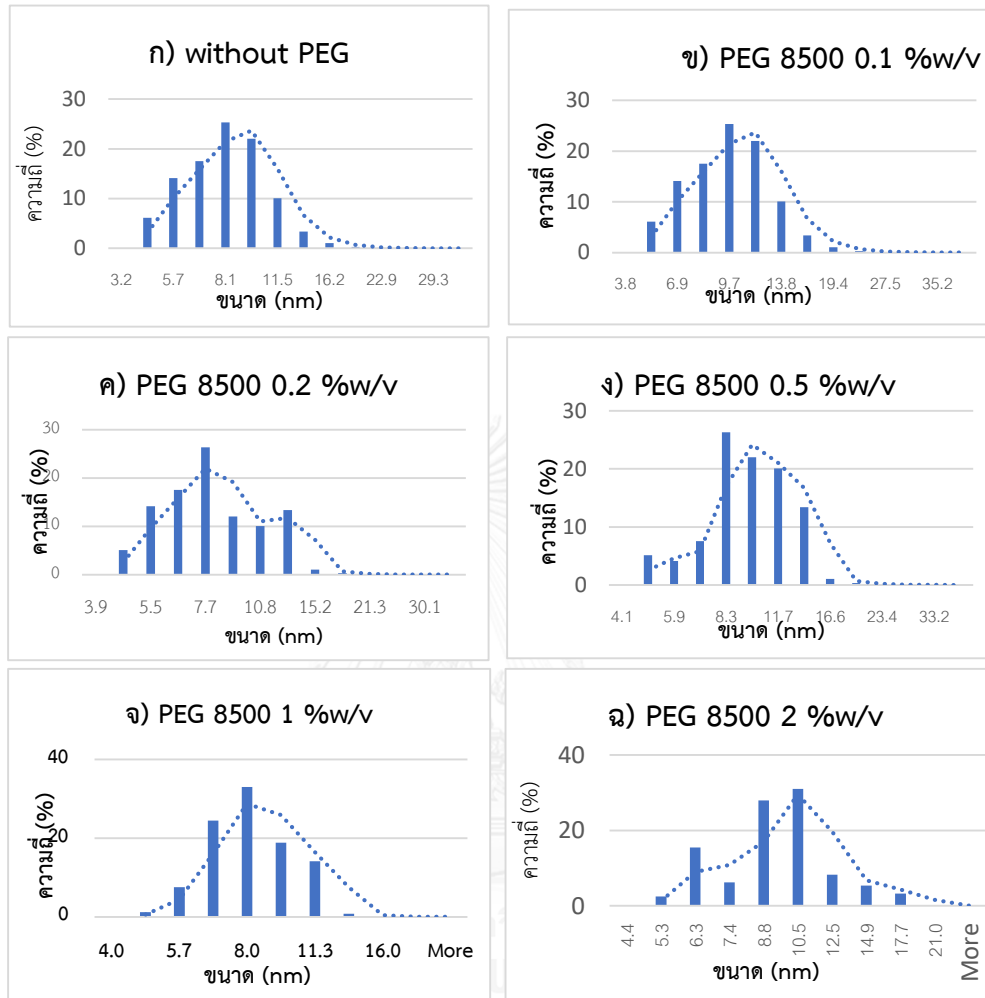
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก คือ โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่น้ำหนักริมโมเลกุล 200, 8500 และ 35000 ตามลำดับ รวมทั้งศึกษาปริมาณการเติมของแต่ละน้ำหนักริมโมเลกุลที่ 0.1 , 0.2, 0.5 , 1 และ 2 %w/v ตามลำดับ ต่อขนาดอนุภาคเงิน

ระดับนาโนเมตร ที่ 26 องศาเซลเซียส ณ วันสังเคราะห์ จากรูปที่ 4.3 พบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก เปรียบเทียบกับการเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200 0.1 %w/v, 0.2 %w/v, 0.5 %w/v, 1 %w/v และ 200 2 %w/v ตามลำดับ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางเจือจางทั้งในกรณีที่ไม่ใส่สารให้ความคงตัวจากภายนอก และเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200 ทุกปริมาณ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับทางน้ำยางเจือจาง แต่มีค่าลดลงเมื่อมีการเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบการความยาวคลื่นที่สารดูดกลืนแสงได้สูงที่สุด (λ -max) ของสารผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรทุกกรณี มีค่าเปลี่ยนแปลงไปทางแสงสีแดง (red-shifted) จาก 360 นาโนเมตร (ทางน้ำยาง) เป็น 370 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับน้ำยางเจือจาง ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของเงินระดับนาโนเมตรที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังจะเห็นจากรูปที่ 4.4 พบว่า กระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรอยู่ที่ ก) 4.8 – 16.2 นาโนเมตรสำหรับกรณีไม่เติมสารให้ความคงตัว, ข) 5.3 – 17.7 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200 0.1 %w/v, ค) 4.8 - 19.3 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200 0.2 %w/v, ง) 4.8 - 16.2 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200 0.5 %w/v, จ) 4.5 – 10.7 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200 1 %w/v และ ฉ) 5.3 – 17.8 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200 2 %w/v ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้พฤติกรรมการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.1 %w/v, PEG

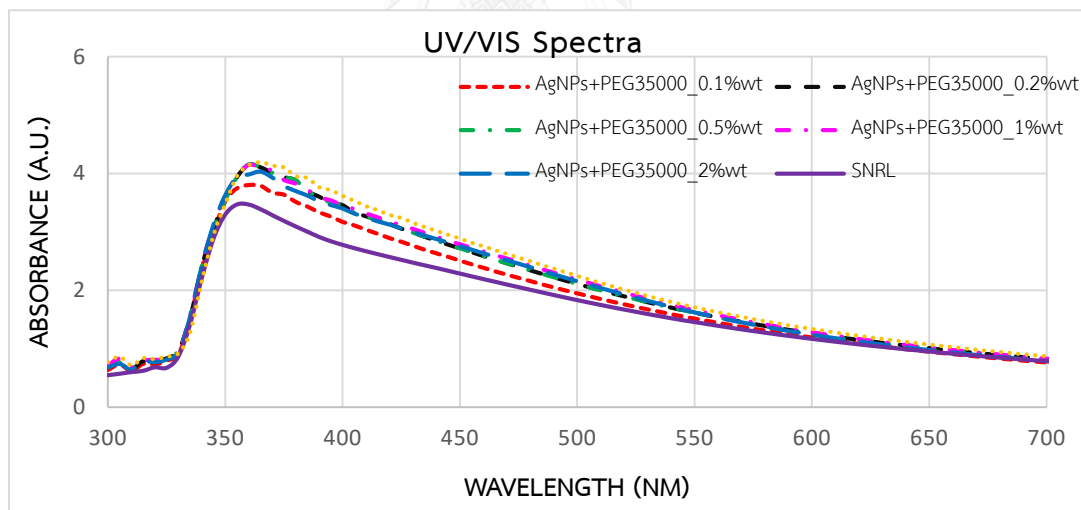
น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 0.2 %w/v, PEG น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 0.5 %w/v, PEG น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 1 %w/v และ เต็ม PEG น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 2 %w/v ตามลำดับ



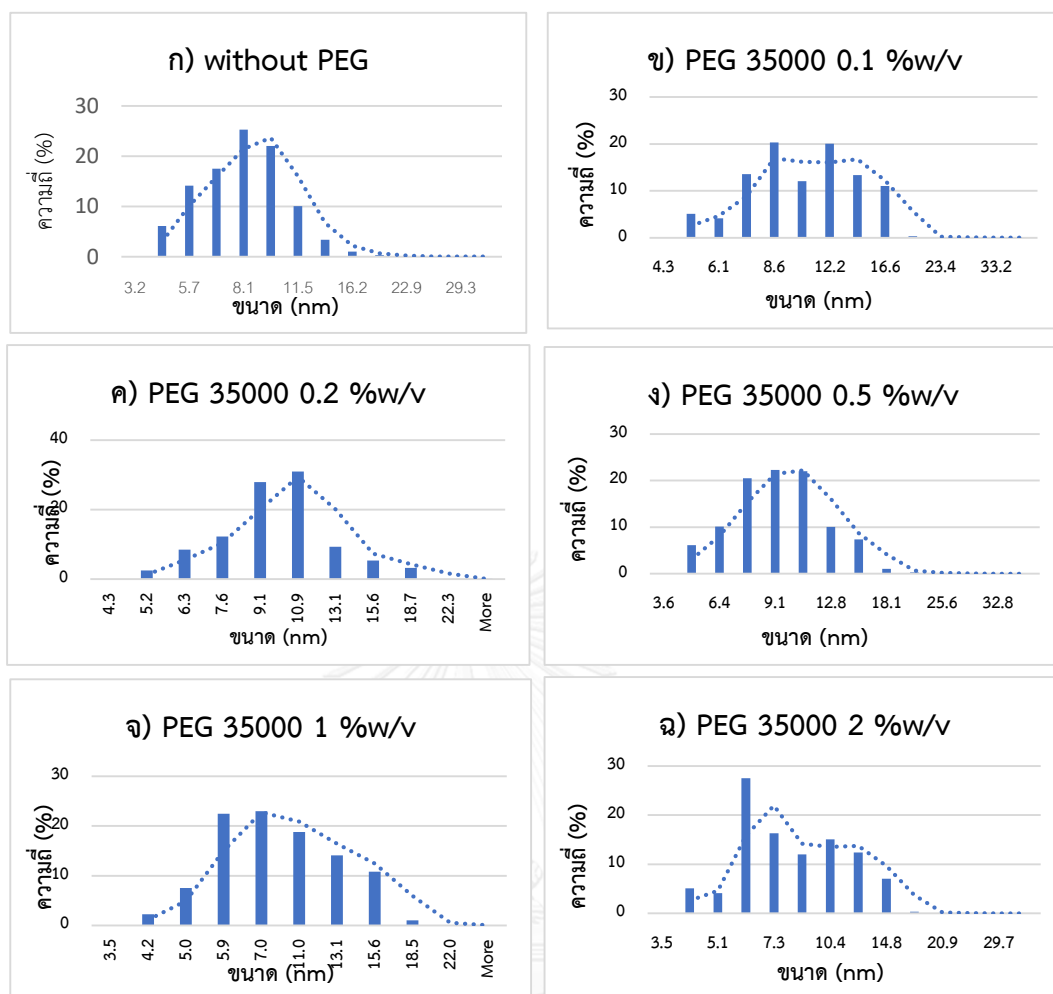
รูปที่ 4.6 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร ก) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, ข) PEG น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 0.1 %w/v, ค) PEG น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 0.2 %w/v, ง) PEG น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 0.5 %w/v, จ) PEG น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 1 %w/v และ ฉ) PEG น้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 2 %w/v ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก เปรียบเทียบกับการเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500 0.1 %w/v, 0.2 %w/v, 0.5 %w/v, 1 %w/v และ 2 %w/v ตามลำดับ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางเจือจางทั้งในกรณีที่ไม่ใส่สารให้ความคงตัวจากภายนอก และเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักรั้วโมเลกุล 8500

มีค่าเพิ่มขึ้นทุกปริมาณ เมื่อเทียบกับทางน้ำอย่างเจือจาง แต่มีค่าลดลงเมื่อมีการเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบการความยาวคลื่นที่สารดูดกลืนแสงได้สูงที่สุด (λ -max) ของสารผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรทุกกรณี มีค่าเปลี่ยนแปลงไปทางแสงสีแดง (red-shifted) จาก 360 นาโนเมตร (ทางน้ำอย่าง) เป็น 370 นาโนเมตร เช่นเดียวกับในกรณีโพลีเอทิลีนไกลคอล น้ำหนักโมเลกุล 200 เมื่อเทียบกับน้ำอย่างเจือจาง ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของเงินระดับนาโนเมตรที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังจะเห็นจากรูปที่ 4.6 พบว่า กระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรอยู่ที่ ก) 4.8 – 16.2 นาโนเมตร สำหรับกรณีไม่เติมสารให้ความคงตัว, ข) 5.8 – 19.4 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 8500 0.1 %w/v, ค) 4.6 - 15.2 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 8500 0.2 %w/v, ง) 4.9 - 16.6 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 8500 0.5 %w/v, จ) 4.8 – 13.4 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 8500 1 %w/v และ ฉ) 5.3 – 17.7 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลีเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 8500 2 %w/v ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้พฤติกรรมดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำอย่างธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร ที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, เติม PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.1%w/v, เติม PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.2%w/v, เติม PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.5%w/v, เติม PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 1%w/v และเติม PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 2%w/v ตามลำดับ



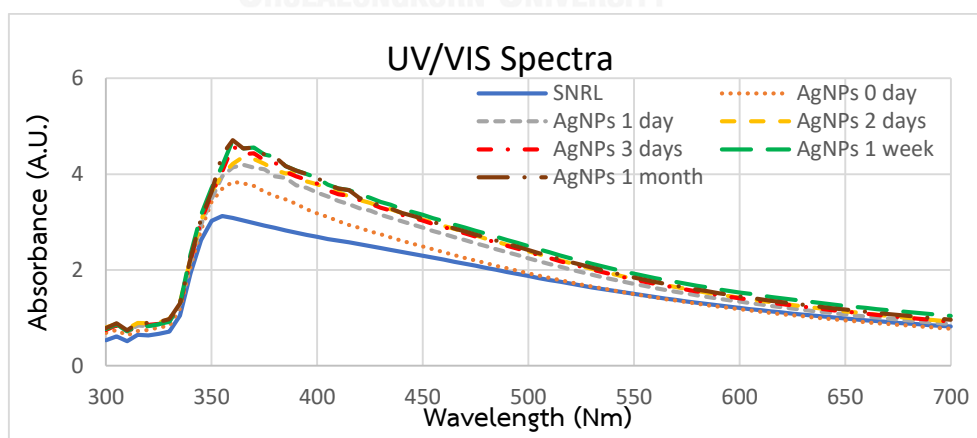
รูปที่ 4.8 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร ก) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก, ข) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.1 %w/v, ค) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.2 %w/v, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.5 %w/v, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 1 %w/v และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 2 %w/v ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ (SNRL) และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก เปรียบเทียบกับการเติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 35000 0.1 %w/v, 0.2 %w/v, 0.5 %w/v, 1 %w/v และ 2 %w/v ตามลำดับ พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของสารผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางเจือจางทั้งในกรณีที่ไม่ใส่สารให้ความคงตัวจากภายนอก และเติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 35000 ทุกปริมาณ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับทางน้ำยางเจือจาง แต่มีค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงลดลงเมื่อมีการเติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลในปริมาณสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบการความยาวคลื่นที่สารดูดกลืนแสงได้สูงสุด (λ -max) ของสารผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรทุกกรณี มีค่า

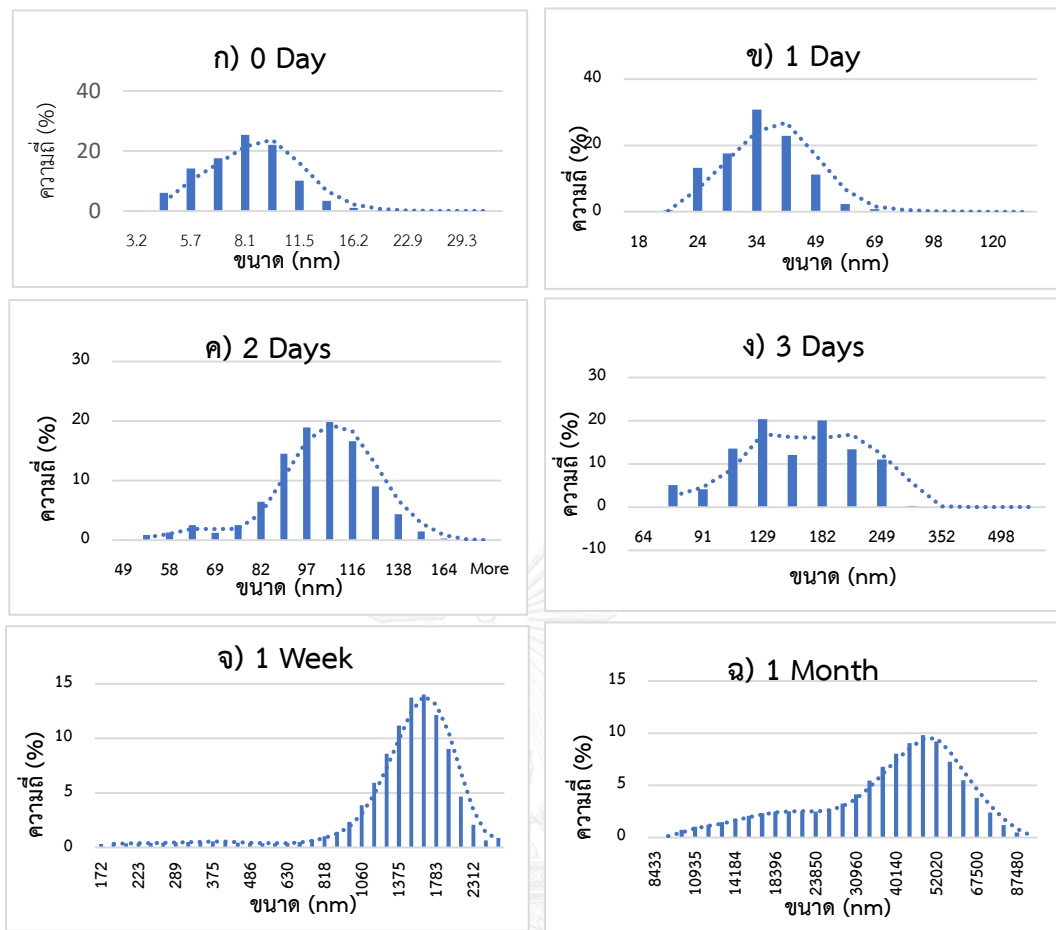
เปลี่ยนแปลงไปทางแสงสีแดง (red-shifted) จาก 360 นาโนเมตร (ทางน้ำยาง) เป็น 370 นาโนเมตร เช่นเดียวกับกรณีน้ำหนักร้อยละ 200 และ 8500 เมื่อเทียบกับน้ำยางเจือจาง ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของเงินระดับนาโนเมตรที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังจะเห็นจากรูปที่ 4.8 พบว่า กระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรอยู่ที่ ก) 4.8 – 16.2 นาโนเมตร สำหรับกรณีไม่เติมสารให้ความคงตัว, ข) 5.1 – 19.7 นาโนเมตรเติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักร้อยละ 35000 0.1 %w/v, ค) 5.2 – 18.7 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักร้อยละ 35000 0.2 %w/v, ง) 5.4 – 18.1 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักร้อยละ 35000 0.5 %w/v, จ) 4.2 – 18.5 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักร้อยละ 35000 1 %w/v และ ฉ) 4.2 – 14.8 นาโนเมตร สำหรับกรณีเติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักร้อยละ 35000 2 %w/v ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้พฤติกรรมการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินมีค่าใกล้เคียงกัน

จากการใส่เติมสารโพลิเอทิลีนไกลคอลทั้ง 3 น้ำหนักร้อยละ ที่ปริมาณต่างๆ ที่ 26 องศาเซลเซียส ณ วันสังเคราะห์ และไม่เติมสารให้ความคงตัว พบว่าค่าการดูดกลืนที่ได้ให้ค่าความยาวคลื่นที่สารดูดกลืนแสงได้สูงที่สุดที่ 370 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากผลของพลาสมอนเรโซแนนซ์พื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นในระบบ ทำให้ค่าการดูดกลืนเปลี่ยนแปลงไป แต่ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น โดยขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์มีขนาดใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 4 -18 นาโนเมตร ดังนั้นจึงพอกกล่าวได้ว่าสารให้ความคงตัวจากภายนอก ซึ่งในที่นี้คือ โพลิเอทิลีนไกลคอลทั้ง 3 น้ำหนักร้อยละ ที่ปริมาณต่างๆ ไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่ได้ ณ วันสังเคราะห์

4.4 ผลของเวลาหลังการสังเคราะห์ต่อขนาดอนุภาคที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทางน้ำยางธรรมชาติ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้องโดยไม่เติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ตามลำดับ

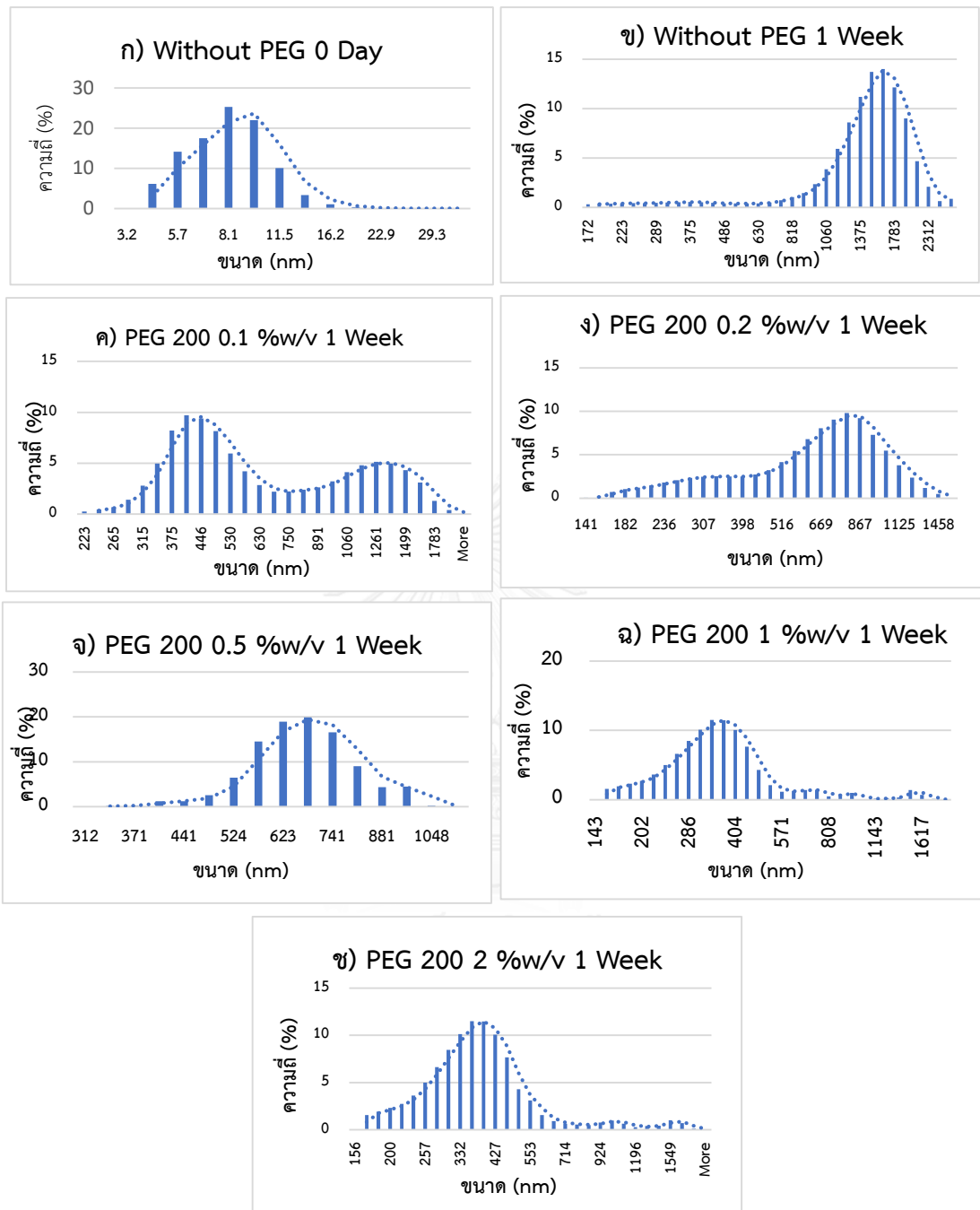


รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก ก) 0 วัน, ข) 1 วัน, ค) 2 วัน, ง) 3 วัน, จ) 1 สัปดาห์ และฉ) 1 เดือน ตามลำดับ

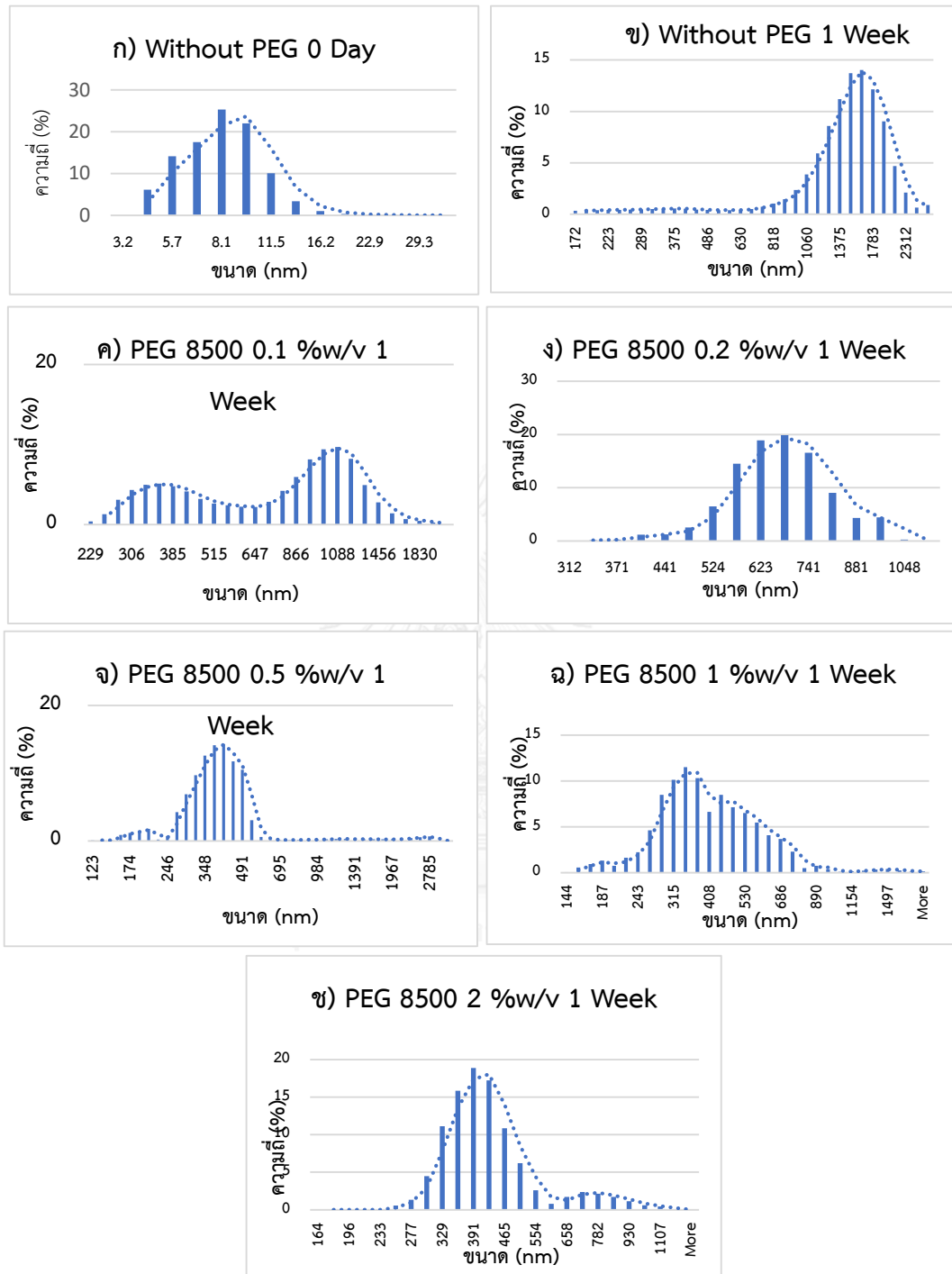
สำหรับกรณีไม่เติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติเปรียบเทียบระหว่างทางน้ำยางเจือจางสีขาวขุ่น กับสารผสมของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้ในทางน้ำยางเจือจางสีน้ำตาลอ่อนโดยไม่เติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก ณ วันที่ 0 หรือวันสังเคราะห์, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน พบว่าค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นในทางน้ำยางที่มีอนุภาคเงินผสมอยู่ และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปทางแสงสีแดง (red-shifted) นอกจากนี้การดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินในทางน้ำยางที่สังเคราะห์ขึ้นทันที เปรียบเทียบกับทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนนำมาวิเคราะห์เป็นเวลา 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน พบว่า ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาจนถึงวันที่ 2 หลังจากนั้นค่าจะเริ่มคงที่หรือลดลงซึ่งเป็นผลจากอนุภาคเงินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามเวลาที่มากขึ้น เนื่องจากอนุภาคเงินมีเวลาในการรวมตัวกันมากขึ้น และจะเห็นว่าค่า

ความเข้มของการดูดกลืนแสง (intensity) มีค่าสูงขึ้น ตามเวลาที่มากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งสัปดาห์ จะพบว่าค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงสูงสุดมีลดลงเล็กน้อย แต่ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเกิดการเกาะกลุ่มรวม และตกตะกอน เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ขนาดของอนุภาคเงินแปรผันตามเวลา อีกทั้งสารให้ความคงตัวในทางน้ำยางธรรมชาติ (โปรตีน) มีความเสถียรต่ำและสลายตัวเมื่อเวลาผ่านไปส่งผลให้อนุภาคเงินจับตัวกันได้มากขึ้น รวมทั้งผลของพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงิน ซึ่งขึ้นกับขนาด และรูปร่างของอนุภาค เมื่อขนาดหรือรูปร่างเปลี่ยนไป จะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสง และการกระเจิงแสงของอนุภาคเงินเปลี่ยนแปลงไป และเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าในระดับนาโนเมตร ผลของปรากฏการณ์นี้จะลดต่ำลง โดยอนุภาคเงินมีกระจายตัวของขนาดอนุภาค ดังนี้ ก) 4.8 – 16.2 นาโนเมตร ณ วันสังเคราะห์, ข) 20 – 69 นาโนเมตรเมื่อผ่านไป 1 วันหลังจากสังเคราะห์, ค) 49 – 164 นาโนเมตร สำหรับ 2 วัน หลังจากสังเคราะห์, ง) 77 - 249 นาโนเมตร สำหรับ 3 วัน หลังจากสังเคราะห์, จ) 172 – 2522 นาโนเมตร สำหรับ 1 สัปดาห์ หลังจากสังเคราะห์ และ ฉ) 8433 – 87480 นาโนเมตร สำหรับ 1 เดือน หลังจากสังเคราะห์ ตามลำดับ

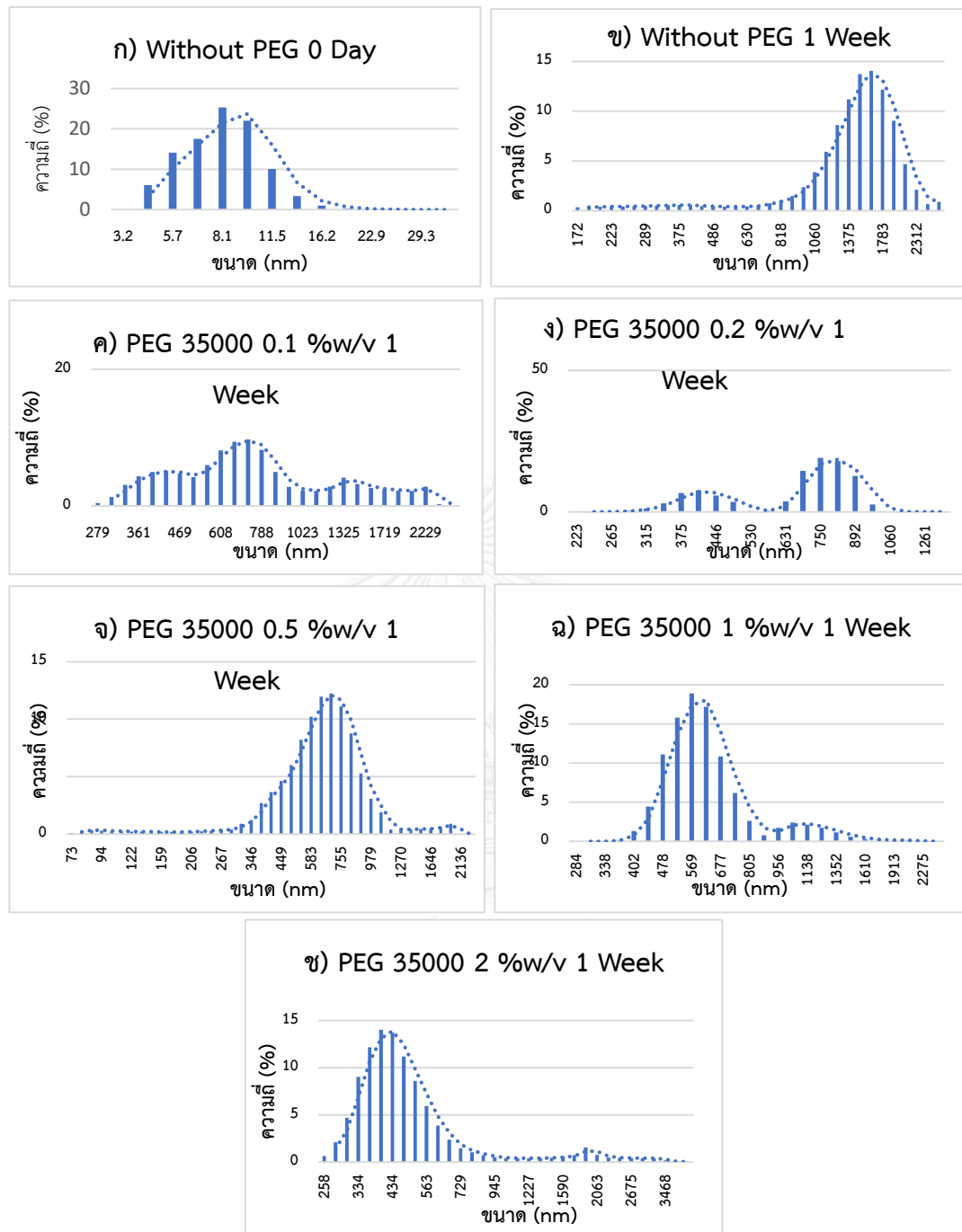
สำหรับกรณีเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก จากรูปที่ 4.11 – 4.13 แสดงฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้อง โดยไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก เปรียบเทียบกับกรณีการเติมโพลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) น้ำหนักโมเลกุล 200, 8500 และ 35000 ณ ปริมาณการเติมของแต่ละน้ำหนักโมเลกุลที่ 0.1 , 0.2, 0.5 , 1 และ 2 %w/v ตามลำดับเมื่อผ่านไป 1 สัปดาห์ หลังจากสังเคราะห์ และสรุปค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และขนาดอนุภาคเฉลี่ยไว้ดังตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อผ่านไป 1 สัปดาห์หลังจากสังเคราะห์ กรณีที่มีการเติมโพลิเอทิลีนไกลคอลทุกน้ำหนักโมเลกุล ทุกปริมาณการเติม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่ำกว่ากรณีที่ไม่เติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก รวมทั้งมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบกว่า ซึ่งเป็นมาจากโพลิเอทิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว เพิ่มความเสถียรให้กับระบบ โดยไปป้องกัน หรือลดการจับกลุ่มรวมตัวของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้น ในขณะที่กรณีไม่เติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก ซึ่งแม้ในระบบจะมีสารให้ความคงตัวในทางน้ำยางธรรมชาติ (โปรตีน) แต่โปรตีนมีความเสถียรต่ำ และสลายตัวได้ง่ายเมื่อเวลาผ่านไป ส่งผลให้อนุภาคมีขนาดใหญ่มากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีสารให้ความคงตัว ดังนั้นจึงพอกกล่าวได้ว่าสารให้ความคงตัวจากภายนอกทั้ง 3 น้ำหนักโมเลกุล ที่ปริมาณต่างๆ มีมีผลต่อขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อมีผลของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 4.11 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้อง) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0 วัน, ข) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 1 สัปดาห์, ค) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.1 %w/v 1 สัปดาห์, ค) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.2 %w/v 1 สัปดาห์, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0.5 %w/v 1 สัปดาห์, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 1 %w/v 1 สัปดาห์ และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 2 %w/v 1 สัปดาห์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้อง ก) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0 วัน, ข) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 1 สัปดาห์, ค) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.1 %w/v 1 สัปดาห์, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.2 %w/v 1 สัปดาห์, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0.5 %w/v 1 สัปดาห์, ฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 1 %w/v 1 สัปดาห์ และช) PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 2 %w/v 1 สัปดาห์ ตามลำดับ



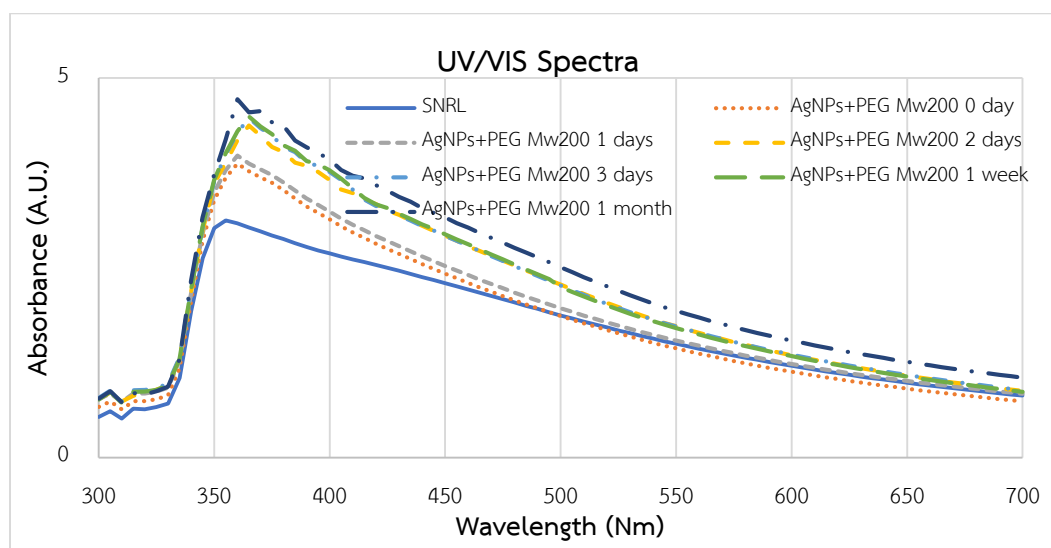
รูปที่ 4.13 ฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ ณ อุณหภูมิห้อง) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0 วัน, ข) ไม่มีสารให้ความคงตัวจากภายนอก 1 สัปดาห์, ข) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.1 %w/v 1 สัปดาห์, ค) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.2 %w/v 1 สัปดาห์, ง) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0.5 %w/v 1 สัปดาห์, จ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 1 %w/v 1 สัปดาห์ และฉ) PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 2 %w/v 1 สัปดาห์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดอนุภาคของเงินระดับนาโนเมตรจากกรณีต่างๆ 7 วันหลังจากสังเคราะห์

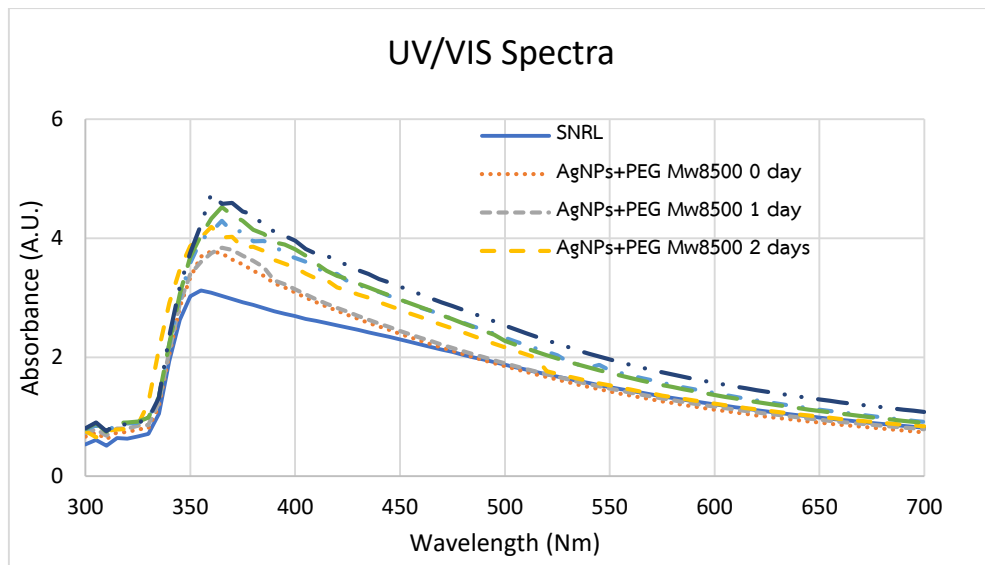
ตัวอย่าง	วัน	ขนาดอนุภาค	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย
No PEG	0	4-16 นาโนเมตร	2-6 นาโนเมตร
No PEG	7	172-2522 นาโนเมตร	1442 นาโนเมตร
PEG200 0.1 %w/v	7	265-1273 นาโนเมตร	745 นาโนเมตร
PEG200 0.2 %w/v	7	160-1350 นาโนเมตร	679 นาโนเมตร
PEG200 0.5 %w/v	7	240-600 นาโนเมตร	404 นาโนเมตร
PEG200 1 %w/v	7	150-1600 นาโนเมตร	395 นาโนเมตร
PEG200 2 %w/v	7	170-1700 นาโนเมตร	417 นาโนเมตร
PEG8500 0.1 %w/v	7	270-1800 นาโนเมตร	801 นาโนเมตร
PEG8500 0.2 %w/v	7	400-1000 นาโนเมตร	674 นาโนเมตร
PEG8500 0.5 %w/v	7	150-2000 นาโนเมตร	451 นาโนเมตร
PEG8500 1 %w/v	7	160-1600 นาโนเมตร	432 นาโนเมตร
PEG8500 2 %w/v	7	240-1100 นาโนเมตร	442 นาโนเมตร
PEG35000 0.1 %w/v	7	279-2430 นาโนเมตร	889 นาโนเมตร
PEG35000 0.2 %w/v	7	223-1060 นาโนเมตร	673 นาโนเมตร
PEG35000 0.5 %w/v	7	73-1958 นาโนเมตร	668 นาโนเมตร
PEG35000 1 %w/v	7	284-2086 นาโนเมตร	648 นาโนเมตร
PEG35000 2 %w/v	7	258-3468 นาโนเมตร	567 นาโนเมตร

สำหรับผลของปริมาณการเติมโพลิเอทิลีนไกลคอล ที่น้ำหนักโมเลกุลคงที่ พบว่า การเพิ่มปริมาณการเติมโพลิเอทิลีนไกลคอล ในกรณีน้ำหนักโมเลกุล 200 เมื่อเพิ่มปริมาณจาก 0.1 เป็น 0.2 และ 0.5 %w/v ตามลำดับ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเงินมีค่าลดลงจาก 745 นาโนเมตร เป็น 679 นาโนเมตร และ 404 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 และจะเริ่มใกล้เคียงกันตั้งแต่ปริมาณการเติม 0.5 %w/v เป็นต้นไป โดยที่ 1 และ 2 %w/v มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเงิน 395 นาโนเมตร และ 417 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับในกรณีน้ำหนักโมเลกุล 8500 และ 350000 ก็ให้ผลในทิศทางเดียวกัน

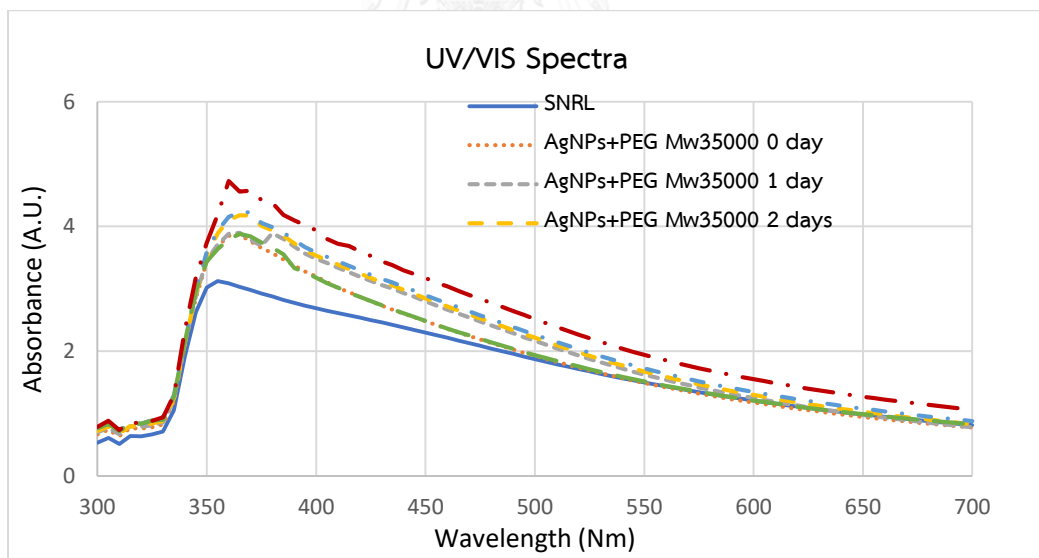
สำหรับผลของน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันของสารให้ความคงตัวจากภายนอก จากตารางที่ 4.2 หลังจากการสังเคราะห์ผ่านไป 7 วัน พบว่า ณ ปริมาณการเติมคงที่ ขนาดอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร จะเล็กลงตามน้ำหนักโมเลกุลของที่ลดลง ดังจะเห็นจาก ณ ปริมาณโพลิเอทิลีนไกลคอล 0.1 %w/v ที่ น้ำหนักโมเลกุล 35000, 8500 และ 200 มีขนาดอนุภาคเงินลดลงจาก 889 นาโนเมตร, 801 นาโนเมตร และ 745 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลยิ่งมาก ขนาดสายโซ่โมเลกุลของโพลิเอทิลีนไกลคอล มีขนาดใหญ่และมีความเกรกระมากกว่า เคลื่อนที่ไปครอบคลุมเพื่อสร้างเป็นไมเซลล์ ล้อมรอบอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรได้ยากกว่า จึงเป็นผลให้เกิดการจับกลุ่มรวมตัวได้เร็วกว่า ขนาดอนุภาคเงินจึงใหญ่มากกว่า



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของหางน้ำยางธรรมชาติ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ใน PEG น้ำหนักโมเลกุล 200 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือนตามลำดับ



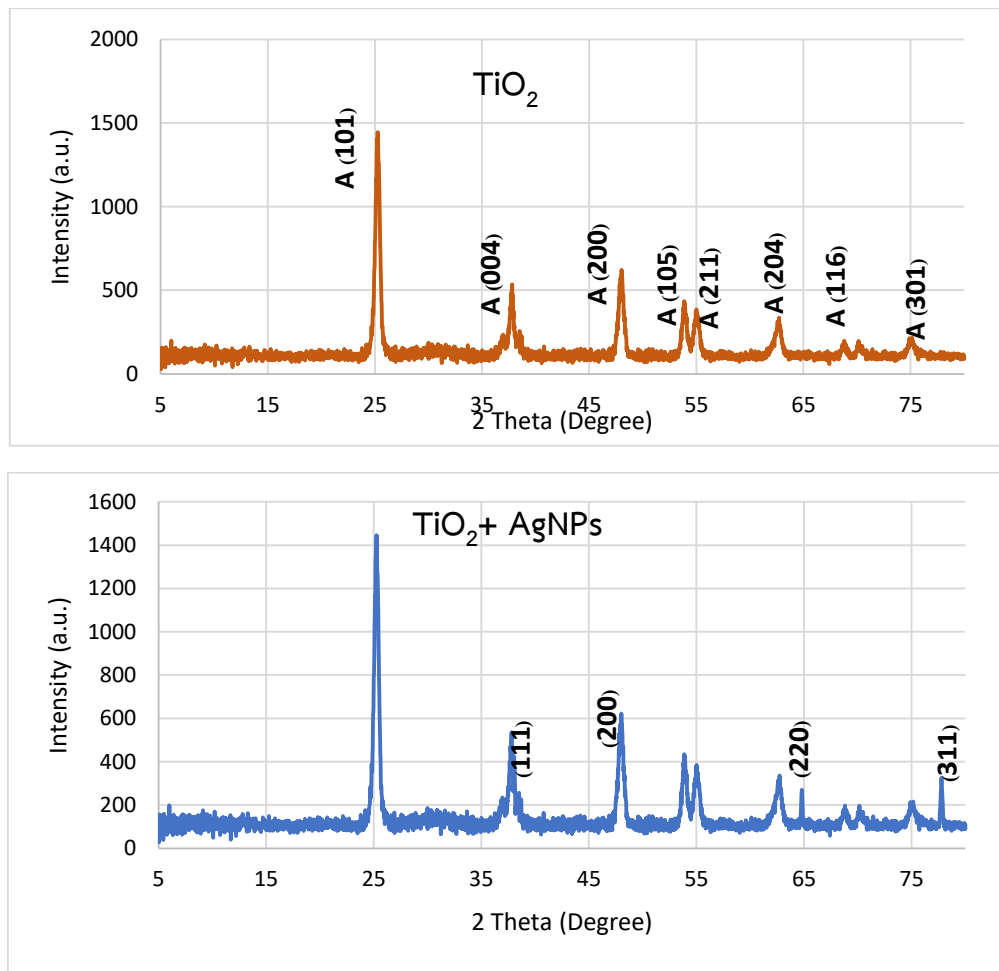
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของหางน้ำยางธรรมชาติ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ใน PEG น้ำหนักโมเลกุล 8500 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของหางน้ำยางธรรมชาติ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ใน PEG น้ำหนักโมเลกุล 35000 0 วัน, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน ตามลำดับ

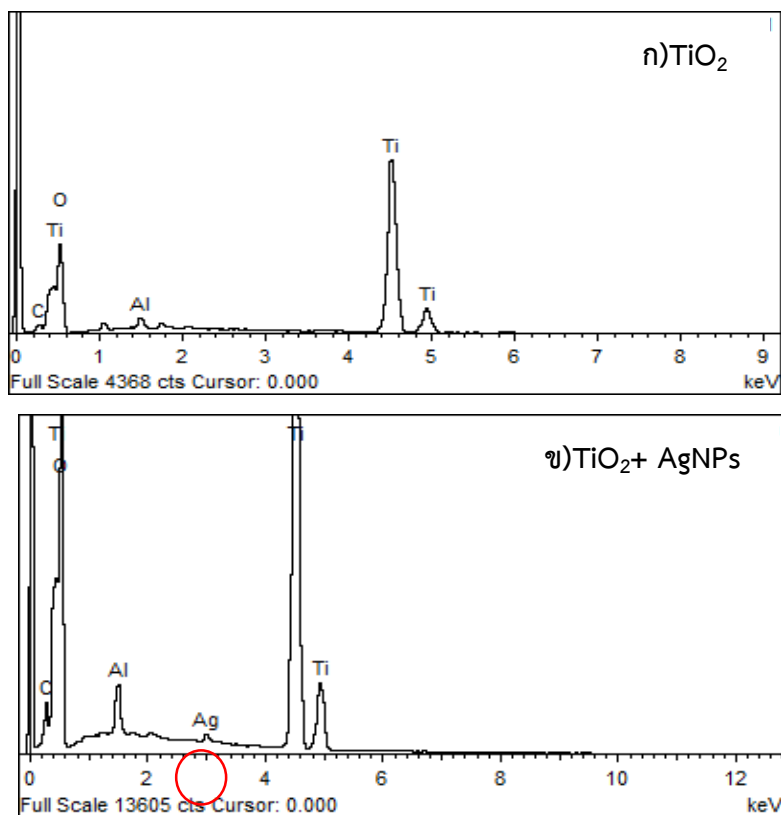
รูปที่ 4.14-4.16 แสดงผลของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับระหว่างทางน้ำยางเจือจางสีขาวขุ่น กับสารผสมของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้ในทางน้ำยางเจือจางสีน้ำตาลอ่อนโดยเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก 0.5 %w/v ที่น้ำหนักโมเลกุล 200, 8500 และ 35000 ตามลำดับ ณ วันที่ 0 หรือวันสังเคราะห์, 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน พบว่า ทั้ง 3 น้ำหนักโมเลกุลให้ผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นในทางน้ำยางที่มีอนุภาคเงินผสมอยู่ และ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปทางแสงสีแดง (red-shifted) เช่นเดียวกับทุกกรณีที่ได้กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินในทางน้ำยางที่สังเคราะห์ขึ้นทันที เปรียบเทียบกับทิ้งไว้ข้ามคืนก่อนนำมาวิเคราะห์เป็นเวลา 1 วัน, 2 วัน, 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือน พบว่า ค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาจนถึงวันที่ 3 หลังจากนั้นค่าจะเริ่มคงที่หรือลดลงซึ่งเป็นผลจากอนุภาคเงินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามเวลาที่มากขึ้น เนื่องจากอนุภาคเงินมีเวลาในการรวมตัวกันมากขึ้น และจะเห็นว่าค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้น ตามเวลาที่มากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้เมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งสัปดาห์ จะพบว่าค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงสูงสุดมีลดลงเล็กน้อยจาก 370 นาโนเมตร มายัง 365 นาโนเมตร แต่ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเกิดการเกาะกลุ่มรวม และตกตะกอน เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ขึ้น เช่นเดียวกับกรณีไม่มีการเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก แต่จะแตกต่างกันตรงอนุภาคเงินขึ้นที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยเล็กตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากสารให้ความคงตัวที่ใส่เข้าไป ดังจะเห็นจากค่าในตารางที่ 4.2 และที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

หลังจากศึกษาขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติเป็นที่เรียบร้อยแล้ว และพบว่า การเติมสารให้ความคงตัวจากภายนอก หรือ โพลีเอทิลีนไกลคอล ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ ณ วันสังเคราะห์ ดังนั้นในขั้นตอนการเจือผสมอนุภาคเงินบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ จะใช้อนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติโดยไม่ใช้สารให้ความคงตัวจากภายนอก ณ วันสังเคราะห์ ต่อไป โดยพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมจากเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ(ข) อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

รูปที่ 4.17 แสดง XRD สเปกตรัมจากเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของไทเทเนียมไดออกไซด์ และอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยจากรูปที่ 4.16 (ก) และ (ข) พบว่า มีไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบ ortonas เป็นองค์ประกอบ โดยมีโครงสร้างผลึกแบบเตตราโกนัล (Tetragonal) นอกจากนี้สำหรับรูปที่ 4.16 (ข) จะพบตรวจพบยอดกราฟที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38, 48, 65 และ 78 ที่ตำแหน่งระนาบ (1,1,1), (2,0,0), (2,2,0) และ (3,1,1) ตามลำดับ ซึ่งเป็นของอนุภาคเงิน แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างมีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบ แต่เนื่องด้วยสารทั้ง 2 ชนิดมีจุดยอดกราฟที่ทับซ้อนกันหลายจุด จึงนำไปวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์เพื่อหาธาตุองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวอีกครั้งหลัง



รูปที่ 4.18 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ของ (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์

รูปที่ 4.18 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ของไทเทเนียมไดออกไซด์และ อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ จากรูปที่ 4.17(ข) จะพบองค์ประกอบของธาตุ Ti, O และ Ag ซึ่งเป็นการยืนยันการมีอยู่ของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในไทเทเนียมไดออกไซด์

4.5 ปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรบนพื้นผิวของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างชั้น ภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm²

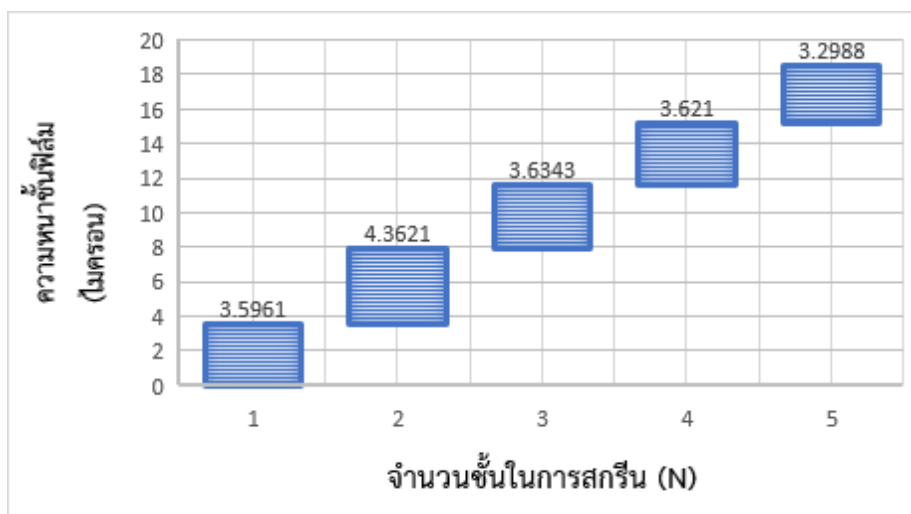
ลำดับที่	Sample	จำนวนชั้นของ TiO ₂	AgNPs : Ethanol	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor	Efficiency (%)
1	SDS_1	2	1 : 10	0.71	3.60	0.64	1.6
2	SDS_2	2	1 : 100	0.72	3.91	0.70	2.0
3	SDS_3	2	1 : 200	0.75	2.08	0.69	1.1
4	SDS_4	2	1 : 500	0.74	5.45	0.70	2.8
5	SDS_5	2	1 : 1000	0.73	4.47	0.58	1.9
6	SDSDS_1	3	1 : 10	0.72	3.96	0.72	2.1
7	SDSDS_2	3	1 : 100	0.72	5.64	0.70	2.8
8	SDSDS_3	3	1 : 200	0.71	6.65	0.68	3.2
9	SDSDS_4	3	1 : 500	0.73	6.62	0.72	3.5
10	SDSDS_5	3	1 : 1000	0.72	5.41	0.71	2.8
11	SDSDSDS_1	4	1 : 10	0.71	4.07	0.72	2.1
12	SDSDSDS_2	4	1 : 100	0.73	8.95	0.63	4.1
13	SDSDSDS_3	4	1 : 200	0.72	9.07	0.64	4.2
14	SDSDSDS_4	4	1 : 500	0.75	8.71	0.66	4.3
15	SDSDSDS_5	4	1 : 1000	0.70	4.31	0.69	2.1

เมื่อ S แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

D แทน การเจืออนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาปริมาณอนุภาคเงินที่เหมาะสมกับการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเจือบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งแบบสกรีนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2, 3 และ 4 ชั้น คือ อนุภาคเงินต่อเอทานอล 1 : 500 ในกรณีของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชั้น ให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) สูงสุดที่ 5.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 2.8 % รองลงมาคือ อัตราส่วน 1 : 100, 1 : 1000, 1 : 0 และ 1 : 200 ตามลำดับ ที่สัดส่วนมีประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากปริมาณกระแสที่เกิดในระดับต่ำที่สุด ดังแสดงจากค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ซึ่งได้ต่ำที่สุด ส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด ส่วนกรณีของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 ชั้น ให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) สูงสุดที่ 6.65 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับอัตราส่วน 1 : 200 แต่มีศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.74 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.67 ที่ต่ำกว่ากรณีอัตราส่วนการเจือ 1 : 500 จึงส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพที่ต่ำกว่ากรณีอัตราส่วนการเจือ 1 : 500 ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 3.5 % รองลงมาคือ อัตราส่วน 1 : 100, 1 : 1000 และ 1 : 10 ตามลำดับ และสุดท้ายกรณีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 ชั้น อัตราส่วนการเจือที่ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด คือ 1 : 500 รองลงมาคือ อัตราส่วน 1 : 200, 1 : 100, 1 : 1000 และ 1 : 10 ตามลำดับ โดยในกรณีจะเห็นว่าที่อัตราส่วน 1 : 500, 1 : 200 และ 1 : 100 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอัตราส่วน 1 : 200 และ 1 : 100 ให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร 9.07 และ 8.95 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าในอัตราส่วน 1 : 500 แต่มีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.72 และ 0.73 โวลต์ ซึ่งน้อยกว่าในอัตราส่วน 1 : 500 รวมทั้งค่าฟิลล์แฟกเตอร์ของทั้งสองอัตราส่วนยังน้อยกว่า จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของอัตราส่วน 1 : 500 มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ดังแสดงในตาราง ดังนั้นจากทั้ง 3 กรณี พบว่าอัตราส่วนการเจือ 1 : 500 (ปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร 2.59×10^{-3} มิลลิกรัม) ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดทั้ง 3 กรณี ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วนนี้ในการเจือปรับปรุงเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงต่อไป

เนื่องด้วยการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง ต้องทำการสกรีนชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์หลายชั้นซ้อนทับกันไปมา ดังนั้นเราควรทราบความหนาของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สกรีนลงบนกระจกนำไฟฟ้า ซึ่งหาได้เครื่องวัดระดับพื้นผิว (profilometer)

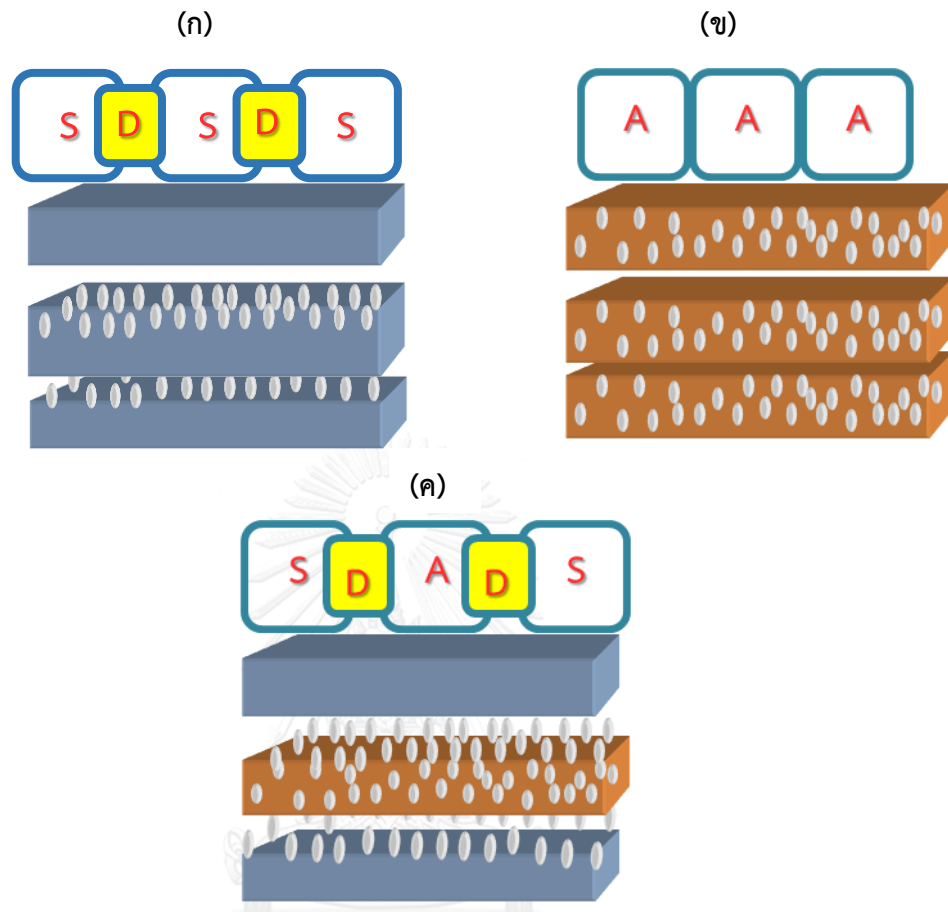


รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์กับจำนวนชั้นการสกรีน

จากรูปที่ 4.19 พบว่าความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกเคลือบสารถนำไฟฟ้าที่เตรียมได้แปรผันตรงกับจำนวนชั้นในการสกรีนซ้ำ คือเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นฟิล์มไทเทเนียมจะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยความหนาที่สกรีนแต่ละจะอยู่ที่ประมาณ 3 – 4 ไมครอน ซึ่งค่าเฉลี่ยความหนาแต่ละชั้นอยู่ที่ 3.7025 ไมครอน

4.6 รูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เหมาะสม

ในงานวิจัยสนใจรูปแบบการเจือผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร 2 รูปแบบหลัก แสดงดังรูปที่ 4.20 ได้แก่ รูปแบบ 1. เจือระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.เจือผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งรูปผสมของทั้ง 2 รูปแบบหลัก ได้เป็นรูปที่ 3 คือทั้งเจือระหว่างชั้นและเจือผสมในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยกำหนดให้ปริมาณการเจืออนุภาคคงที่ตามอัตราส่วนการเจือ 1 : 500 (ปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร 2.59×10^{-3} มิลลิกรัม)



รูปที่ 4.20 รูปแบบการเชื่อมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (ก) รูปแบบที่ 1 เจือระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์, (ข) รูปแบบที่ 2 เจือผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ค) รูปแบบที่ 3 เจือผสม และผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

เมื่อ	S	แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
	D	แทน การเชื่อมอนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
	A	แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เชื่อมผสมอนุภาคเงิน

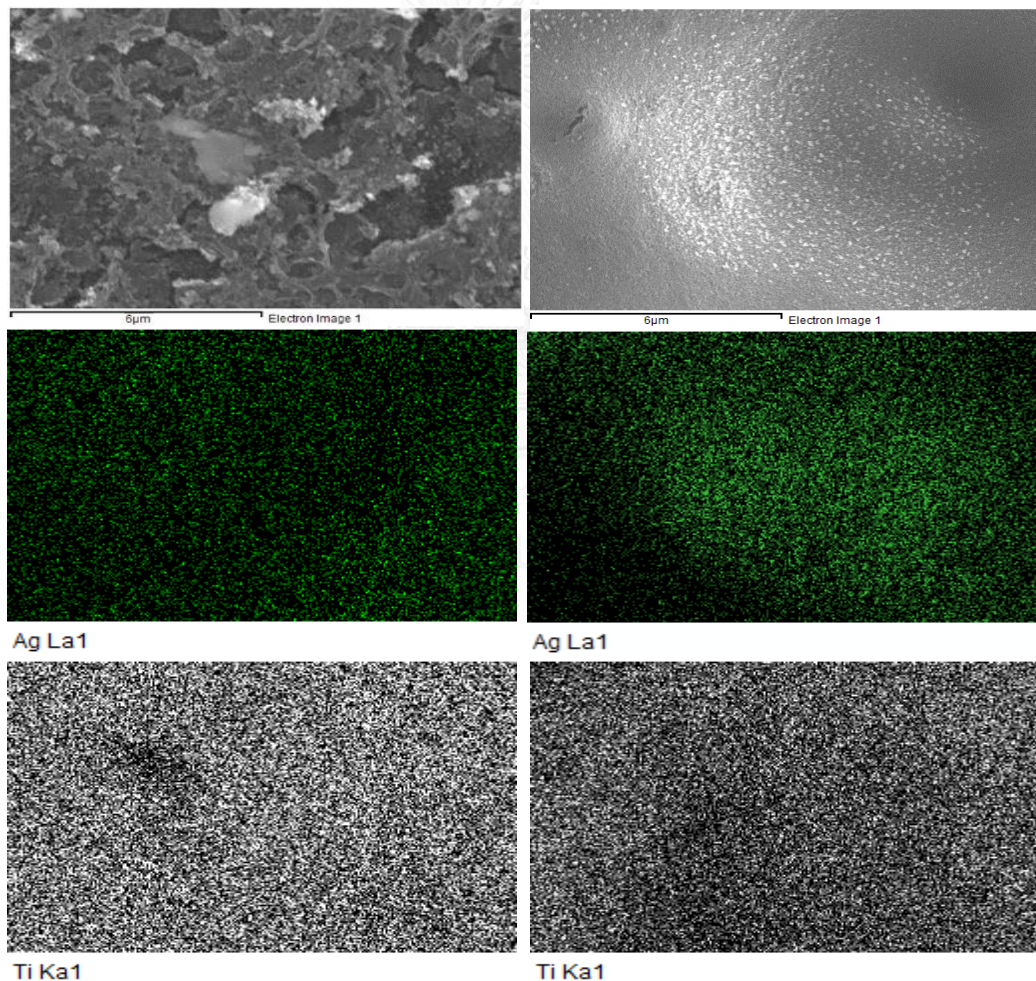
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรรูปแบบต่างๆ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm²

ลำดับที่	Sample	จำนวนชั้นของ TiO ₂	รูปแบบในการเชื่อมต่ออนุภาคเงิน	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor	Efficiency (%)
1	SSS	3	ไม่ผสม	0.75	4.70	0.70	2.5
2	SDSDS	3	1	0.73	6.62	0.72	3.5
3	SDADS	3	1 & 2	0.72	6.45	0.64	2.9
4	SAS	3	2	0.72	6.45	0.67	3.1
5	AAA	3	2	0.73	3.15	0.73	1.7

เมื่อ S แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
 D แทน การเชื่อมต่ออนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
 A แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เชื่อมผสมอนุภาคเงิน

จากตารางที่ 4.4 พบว่า รูปแบบในการเชื่อมต่ออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรทั้ง 2 รูปแบบสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์สุริยะให้สูงขึ้นได้ โดย SDSDS ซึ่งเชื่อมด้วยอนุภาคเงินระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นที่ 1 กับ 2 และ 2 กับ 3 สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้ดีที่สุดคือ 3.5 % ส่วน SAS ซึ่งเชื่อมอนุภาคเงินผสมกับชั้นที่สองของไทเทเนียมไดออกไซด์ และ SDADS ซึ่งมีทั้งเชื่อมระหว่างชั้นและผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ก็สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้รองลงมาที่ 3.1 % และ 2.9 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเซลล์ SSS ซึ่งเป็นเซลล์มาตรฐาน เนื่องจากผลของการกระเจิงแสงเข้าไปยังสีย้อมได้มากขึ้น เพราะการเกิดปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินที่เชื่อมลงไป แต่ในกรณี AAA ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานต่ำกว่าเซลล์มาตรฐาน แม้คาดการณ์ว่ากระจายตัวของอนุภาคเงินจะดีกว่า เพราะการผสมลงไปในทุกส่วนของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งโอกาสการกระเจิงแสงจากปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวจะมากกว่า แต่จากรูปที่ 4.21 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์แบบ Mapping พบว่าการเชื่อมชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการเกาะกลุ่มกันมากกว่าในกรณีการ

เงื่อระหว่างชั้น และการรวมกลุ่มของอนุภาคนี้ จะไปขัดขวางการยึดติดของสีย้อมไวแสงบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งบดบังแสงที่จะส่องไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่ำลง ค่าความหนาแน่นกระแสจึงต่ำลงและส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะต่ำลงไป นอกจากนี้ในรูปที่ 4.21 ยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของทั้ง 2 กรณี โดยพบว่า การเงื่อระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระกว่าในอีกกรณี ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการหยดอนุภาคเงินผสมกับเอทานอลลงบนชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ในขณะเตรียมเซลล์ รอยขรุขระนี้จะถูกแทนที่ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อสกรีนชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ชั้นถัดไป ด้วยเหตุนี้ ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคเงินทำได้มากขึ้น การเงื่ออนุภาคเงินระหว่างชั้นจึงให้ประสิทธิภาพสูงกว่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.21 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์แบบ Mapping ของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เงื่อผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์โดย (ก) เงื่อระหว่างชั้น (ข) เงื่อผสมในชั้น

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่จำนวนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ วัสดุภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm²

ลำดับ ที่	Sample	จำนวนชั้น ของ TiO ₂	จำนวนชั้น ของ AgNPs	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor	Efficiency
1	SDS	2	1	0.74	5.45	0.70	2.8
2	SDSDS	3	2	0.73	6.62	0.72	3.5
3	SDSDSDS	4	3	0.75	8.71	0.66	4.3
4	SDSDSDSDS	5	4	0.67	3.84	0.68	1.8

เมื่อ S แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
D แทน การเจืออนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
A แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือผสมอนุภาคเงิน

จากตารางที่ 4.5 เป็นการศึกษาหาจำนวนชั้นในการสกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับรูปแบบการเจือระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งพบว่า ที่จำนวนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ำ จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำ เพราะเมื่อฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บาง พื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสีย้อมไวแสงมีน้อย แม้จะมีการเจือด้วยอนุภาคเงินระหว่างชั้นก็ช่วยเพิ่มแสงในระบบก็ตาม ถ้ามีสีย้อมไวแสงน้อย กระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นก็จะน้อยไปด้วย ส่งผลให้ที่จำนวนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ชั้น จึงให้ประสิทธิภาพอยู่ที่ 2.8 % แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นเป็น 3 และ 4 ชั้น ตามลำดับ ความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมที่เพิ่ม ส่งผลให้มีพื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสีย้อมไวแสงมากขึ้น ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะจึงเพิ่มขึ้นตามด้วย ทำให้ที่จำนวนชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 ชั้นประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะเท่ากับ 4.3 % โดยมีความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 8.71 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด เท่ากับ 0.75 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.66 แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 5 ชั้น กลับพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงนี้มีค่าลดลงเหลือ

1.8 % ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป ส่งผลให้ชั้นไฟฟ้ารับแสงของเซลล์มีความทึบแสงมากขึ้น แม้จะมีกระจายตัวของอนุภาคเงินที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับจำนวนชั้นที่น้อยกว่า ดังนั้นจำนวนชั้นในการสกรีนที่ดีที่สุดสำหรับรูปแบบการเจือระหว่างชั้นคือ 4 ชั้น

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีรูปแบบการกระจายต่างๆ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm²

ลำดับที่	Sample	จำนวนชั้นของ TiO ₂	จำนวนชั้นของ AgNPs	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor	Efficiency (%)
1	SSSS	4	0	0.73	5.77	0.65	2.7
2	SSDSS	4	1	0.73	5.92	0.68	2.9
3	SDSSDS	4	2	0.71	6.65	0.68	3.2
4	SDSDSDS	4	3	0.75	8.71	0.66	4.3

เมื่อ S แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
D แทน การเจืออนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
A แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือผสมอนุภาคเงิน

จากตารางที่ 4.5 เป็นการศึกษาการเจืออนุภาคเงินลงไประหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โดยมีการกระจายการเจือระหว่างชั้นรูปแบบต่างๆ พบ ยังมีการกระจายตัวในการเจือระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์มาก มีผลทำให้ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นจาก 5.77 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร(1) เป็น 5.92 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร(2) , 6.65 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร(3) และ 8.71 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (4) ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้นจาก 2.7% (1) เป็น 2.9% (2), 3.2% (3) และ 4.3% (4) ตามลำดับ คิด

เป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 7.8% (2), 18.6% (3) และ 58.9% (4) ตามลำดับ เป็นผลมาจากอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเมื่อได้รับแสงตกกระทบเกิดปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวช่วยในการกระเจิงแสงเข้าไปยังสีย้อมได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนชั้นของการเจืออนุภาคเงินพบว่า กรณีเจืออนุภาคเงินระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 3 ครั้งสลับกับชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 ชั้นให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องด้วยผลจากการกระจายตัวของอนุภาคเงินที่กระจายได้ดีขึ้น ในขณะที่ปริมาณการเจือเท่าเดิม

4.7 ผลการสังเคราะห์อนุภาคเงินก่อนเจือเปรียบเทียบกับเจือผสมในขั้นตอนการสังเคราะห์

สำหรับส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพสร่วมกับสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร โดยจำลองสภาพแวดล้อมเลียนแบบการเตรียมในทางน้ำอย่างธรรมชาติ เปรียบเทียบกับรูปแบบการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้อนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้จากทางน้ำอย่างธรรมชาติ กับอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในสภาพแวดล้อมเลียนแบบการเตรียมในทางน้ำอย่างธรรมชาติ

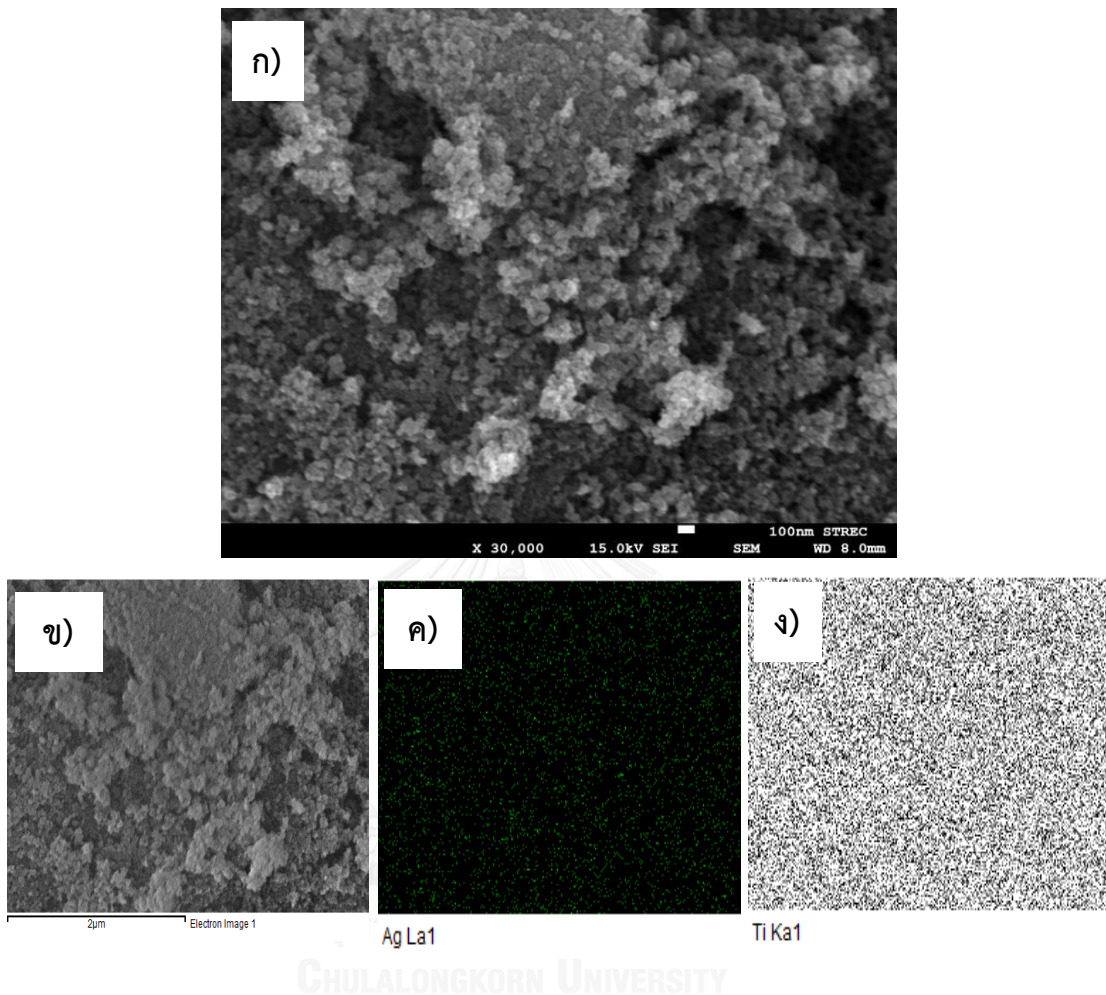
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการปรับปรุงด้วยการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรระหว่างชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับการเจือผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงิน วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~1000 W/cm²) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 cm²

ลำดับ ที่	Sample	จำนวน ชั้นของ TiO ₂	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor	Efficiency (%)
1	SSSS	4	0.66	7.61	0.61	3.1
2	SDSDSDS (Ref)	4	0.67	9.59	0.69	4.4
3	SDSDSDS (ทางน้ำอย่าง ธรรมชาติ)	4	0.75	8.71	0.66	4.3
4	PPPP	4	0.65	7.98	0.55	2.9

เมื่อ S แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

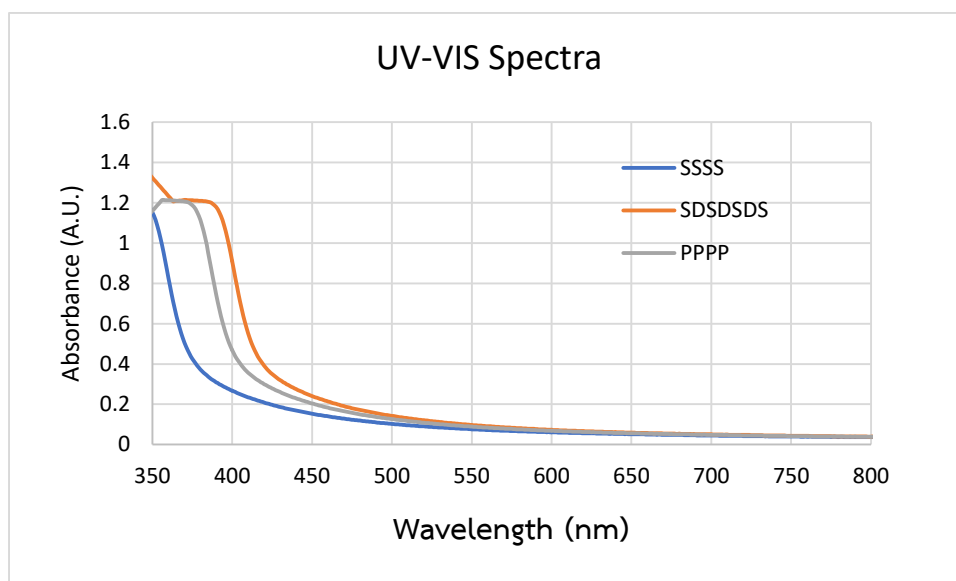
- D แทน การเจือปนอนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
- A แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือผสมอนุภาคเงิน
- P แทน ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือผสมอนุภาคเงินในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงิน

จากตารางที่ 4.7 พบว่า SDSDS (Ref) เป็นรูปการเจือด้วยอนุภาคเงินระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้อนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในสภาพแวดล้อมจำลองเลียนแบบทางน้ำยางธรรมชาติ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้ดีที่สุดคือ 4.4 % ส่วน SDSDS ที่ใช้อนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในทางน้ำยางธรรมชาติก็สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้รองลงมาคือ 4.3 % เมื่อเทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐานซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 3.1 % แสดงให้เห็นว่าการใช้อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้ใกล้เคียงกับแบบสภาวะจำลอง แต่สำหรับกรณีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์พิเศษพร้อมกับสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร พบว่า มีค่าประสิทธิภาพเซลล์ต่ำที่สุด อยู่ที่ 2.9 % โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าฟิลล์แฟกเตอร์ต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.65 โวลต์ และ 0.55 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้ ส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์พิเศษที่ได้ไม่เรียบ อันเนื่องมาจากไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการรวมตัวกัน ดังจะเห็นจากรูปที่ 4.22 เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้พื้นที่ผิวในการยึดเกาะของสีย้อมไวแสงมีน้อยลง ลดโอกาสการกระตุ้นจากแสงให้เกิดอิเล็กตรอนในระบบ รวมทั้งปลดพื้นที่ผิวสัมผัสในการส่งถ่ายกระแสอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสงด้วย แม้จะมีผลของปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินที่กระจายตัวอย่างดี ช่วยในการกระเจิงแสงเข้าไปยังระบบได้มากก็ตาม จึงทำให้ประสิทธิภาพมีค่าต่ำสุดดังกล่าว



รูปที่ 4.22 ก) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความละเอียด 30,000 เท่า และ ข) - ง) แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์แบบ Mapping ของพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในกรณีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสพร้อมกับสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในขั้นตอนเดียวกัน

4.8 ผลการวิเคราะห์หาช่วงการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี

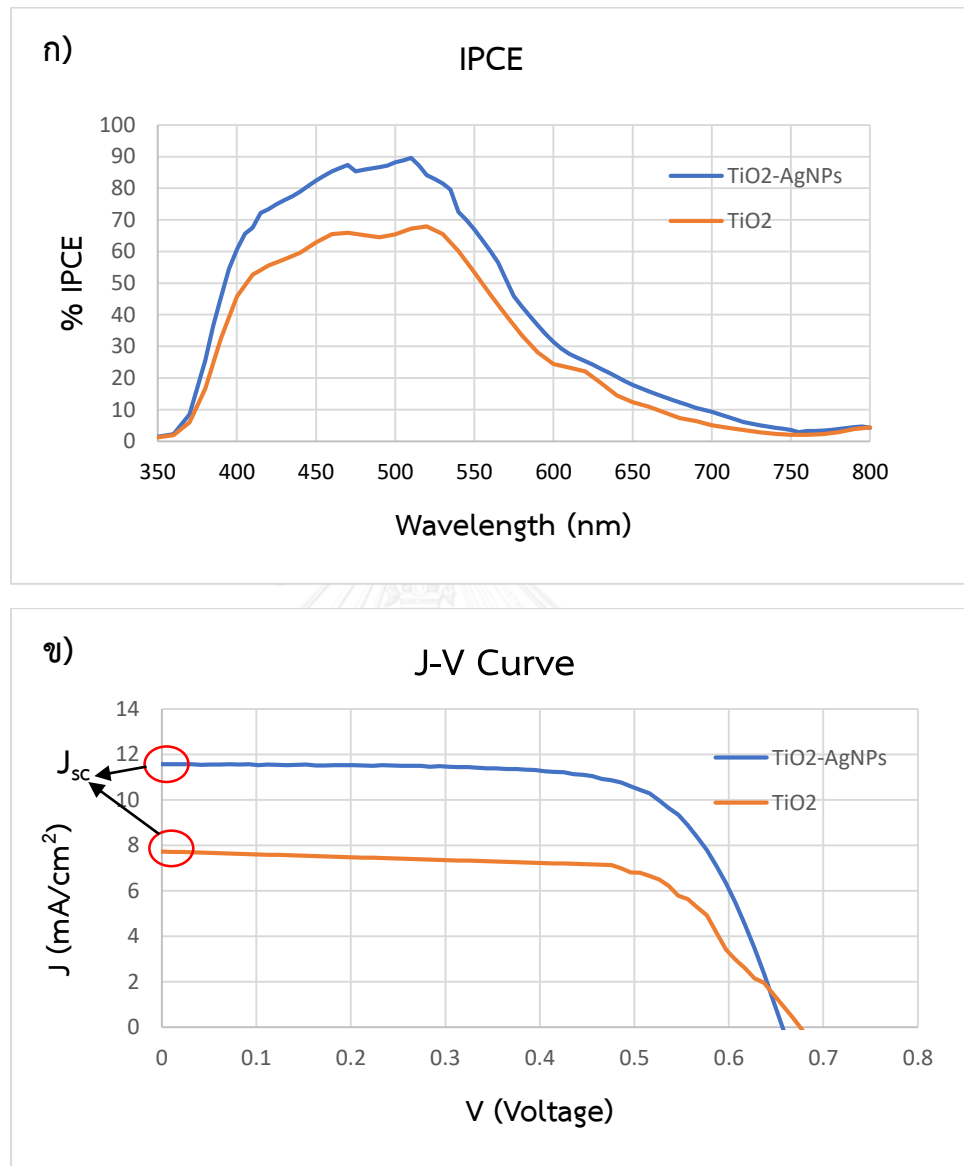


รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

เมื่อ	S	แทน	ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
	D	แทน	การเจืออนุภาคเงินโดยหยดระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์
	P	แทน	ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือผสมอนุภาคเงินในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงิน

จากรูปที่ 4.23 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของของไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ จะมีช่วงการดูดกลืนแสงต่ำกว่า 370 นาโนเมตร (SSSS) แต่เมื่อมีการเจือด้วยอนุภาคเงินทั้งแบบเจือผสมระหว่างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และเจือผสมอนุภาคเงินในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงินพบว่าการดูดกลืนแสงในช่วงระดับพลังงานที่น้อยลง หรือในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้น หรือเคลื่อนไปทางแสงสีแดง (Red shift) เป็นผลมาจากการเกิดการปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินที่เจือลงไป โดยเมื่ออนุภาคเงินในระดับนาโนเมตรได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นการของอิเล็กตรอนบนผิวของอนุภาคเงิน ส่งผลเกิดการก้ำทอน ทำให้ค่าการดูดกลืน และค่าการสะท้อนของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสังเกตได้จากสีที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการสังเคราะห์ หรือแม้กระทั่งเจือผสมในปริมาณมาก

4.9 ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (External quantum efficiency, EQE) โดยเครื่องมือหาประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก



รูปที่ 4.24 ก) แสดงร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%IPCE) และ ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดัน (J-V curve) ของเซลล์สุริยะชนิดสี ย้อมไวแสงที่เจือด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรเปรียบเทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.24 ก) แสดงผลของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%IPCE) หรือประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External Quantum Efficiency; EQE) ของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่เจือด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (TiO₂-AgNPs : SDS) และ เซลล์สุริยะมาตรฐาน

เปรียบเทียบกับเซลล์สุริยะมาตรฐาน (TiO_2 : SSSS) เมื่อฉายแสงความเข้มต่ำตั้งแต่ความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 350 นาโนเมตร ไปจนถึง 800 นาโนเมตร ไปยังเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง พบว่าการเจือด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร มีช่วงรอยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างเด่นชัดตั้งแต่ 380 – 550 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากปริมาณแสงในระบบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงิน ส่งผลให้มีอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากแสงเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูงขึ้น [33] รวมทั้งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ารับแสง (short circuit current density : J_{sc}) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ข) โดยกรณีเจือด้วยอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร (TiO_2 -AgNPs : SDS SDS) อยู่ที่ 11.57 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่กรณีไม่ได้เจือ หรือเซลล์สุริยะมาตรฐาน (TiO_2 : SSSS) อยู่ที่ 7.62 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากสมการที่ 2.20 หน้า 38 พบว่า ค่า %IPCE นี้จะแปรผันตามค่า J_{sc} ที่สูงขึ้น



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงโดยการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ารับแสงด้วยการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร อาศัยหลักการเกิดพลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ขึ้นในทางน้ำยางธรรมชาติ เริ่มต้นด้วยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำหนักโมเลกุล และปริมาณสารให้ความคงตัวจากภายนอก รวมถึงระยะเวลาหลังการสังเคราะห์

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคเงินในน้ำยางธรรมชาติ ทดลองที่อุณหภูมิห้อง 26 องศาเซลเซียส 35 องศาเซลเซียส 40 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 4 – 16 นาโนเมตรใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดอนุภาคเงิน ณ วันสังเคราะห์

การศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณสารให้ความคงตัวจากภายนอกต่อขนาดอนุภาคเงิน ใช้สารโพลีเอททิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 200, 8500 และ 35000 เติมในปริมาณร้อยละ 0.1, 0.2, 0.5, 1 และ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของทางน้ำยางธรรมชาติ ผลการทดลองพบว่าอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้มีขนาด 4 – 16 นาโนเมตรใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณการเติมสารโพลีเอททิลีนไกลคอลไม่มีผลต่อขนาดของอนุภาคเงิน ณ วันสังเคราะห์

การศึกษาผลของระยะเวลาหลังการสังเคราะห์ต่อขนาดอนุภาคเงินที่เปลี่ยนไปแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีไม่เติมสารโพลีเอททิลีนไกลคอล พบว่าอนุภาคเงินมีขนาด ~100 นาโนเมตร, 172 นาโนเมตร – 2.5 ไมโครเมตร และ 8.4 – 87.5 ไมโครเมตร หลังจากเวลาผ่านไป 3 วัน, 1 สัปดาห์ และ 1 เดือนตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเงินเกาะกลุ่มรวมตัวกันและตกตะกอน ผลทดสอบการดูดกลืนแสงพบว่าความเข้มของการดูดกลืนแสงของอนุภาคเงินมีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น

2. กรณีเติมสารโพลิเอททีลีนไกลคอล พบว่าโพลิเอททีลีนไกลคอลที่ใช้ทดลองทุกน้ำหนักโมเลกุลและทุกปริมาณการเติมให้ผลใกล้เคียงกัน นั่นคือช่วยรักษาขนาดอนุภาคเงินให้อยู่ในช่วง 400 – 800 นาโนเมตร หลังจากเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์ เป็นผลเนื่องมาจากโพลิเอททีลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว ลดการจับกลุ่มรวมตัวของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้

ขั้นตอนต่อมาคือการนำอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้ไปเจือในชั้นวัสดุกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เพื่อผลิตเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง (DSSC) โดยศึกษาผลของรูปแบบและปริมาณการเจืออนุภาคเงินที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ทดสอบ DSSC ผลวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มตัวอย่าง TiO_2 ที่เจือด้วยอนุภาคเงินที่เตรียมได้ ตรวจพบยอดกราฟที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38, 48, 65 และ 78 องศา ที่ตำแหน่งระนาบ (1,1,1), (2,0,0), (2,2,0) และ (3,1,1) ตามลำดับ สอดคล้องกับผลสเปกตรัม XRD อ้างอิงของอนุภาคเงิน ยืนยันได้ว่าฟิล์มตัวอย่างประกอบด้วยสาร TiO_2 ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส มีสัณฐานผลึกแบบเตตระโกนัล และมีอนุภาคเงินเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ยืนยันองค์ประกอบของธาตุ Ti, O และ Ag ในเนื้อของฟิล์มตัวอย่างสอดคล้องกับผลสเปกตรัม XRD

การศึกษาผลของปริมาณการเจืออนุภาคเงินที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ทดสอบ DSSC ทดลองเตรียมสารละลายอนุภาคเงินในตัวทำละลายเอทานอลอัตราส่วน 1:10, 1:100, 1:200, 1:500 และ 1:1000 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ปริมาณการเจืออนุภาคเงิน 0.129 มิลลิกรัม, 1.29×10^{-2} มิลลิกรัม, 6.47×10^{-3} มิลลิกรัม, 2.59×10^{-3} มิลลิกรัม และ 1.29×10^{-3} มิลลิกรัม ตามลำดับ) เจือในระหว่างชั้นของ TiO_2 จำนวน 2, 3 และ 4 ชั้น ผลการทดสอบสมรรถนะของเซลล์ทดสอบ DSSC พบว่าเซลล์ที่เจือด้วยอนุภาคเงินในเอทานอลอัตราส่วน 1:500 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรลงในชั้นของ TiO_2 จำนวน 4 ชั้นให้ค่าความต่างศักย์วงจรถัด (V_{oc}), ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) และฟิลแฟกเตอร์ (FF) เท่ากับ 750 มิลลิโวลต์, 8.71 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และ 0.66 ตามลำดับ คิดเป็นค่าประสิทธิภาพ PCE = 4.3 % ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง AM 1.5 G ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นคิดเป็น 58.9 % เมื่อเทียบกับผลของเซลล์ทดสอบที่ไม่ได้เจืออนุภาคเงิน (V_{oc} = 730 มิลลิโวลต์, J_{sc} = 5.77 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร, FF = 0.65 และ PCE = 2.7%)

การศึกษาผลของรูปแบบการเจืออนุภาคเงินที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์ทดสอบ DSSC โดยเลือกทดลองรูปแบบการเจือ 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 เจือระหว่างชั้น TiO_2 , รูปแบบที่ 2 เจือผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้น TiO_2 และรูปแบบที่ 3 ทั้งเจือระหว่างชั้นและผสมเป็นเนื้อเดียวกับชั้น TiO_2 ผลทดสอบสมรรถนะของเซลล์ทดสอบ DSSC พบว่าการเจืออนุภาคเงินลงในชั้น TiO_2 จำนวน 3 ชั้น ในรูปแบบที่ 1, 2 และ 3 ให้ประสิทธิภาพ $\text{PCE} = 3.5\%$, 3.1% และ 2.9% ตามลำดับ สรุปได้ว่าการเจืออนุภาคเงินในรูปแบบแทรกระหว่างชั้น TiO_2 เป็นรูปแบบที่ดีที่สุด และจากผลการศึกษานี้จำนวนชั้นของ TiO_2 ที่เจืออนุภาคเงินแทรกระหว่างชั้น จำนวน 1 – 5 ชั้น โดยควบคุมปริมาณของอนุภาคเงินให้เท่ากันทุกการทดลอง พบว่าอนุภาคเงินที่กระจายแทรกอยู่ระหว่างชั้นของ TiO_2 จำนวน 4 ชั้น (SDSDSDS) ให้ค่าประสิทธิภาพ PCE สูงสุดที่ 4.3%

นอกจากนี้ยังได้ศึกษารูปแบบการเจืออนุภาคเงินแบบพิเศษ โดยทดลองเติมอนุภาค TiO_2 ระดับนาโนเมตร (P25, Degussa) ลงไปในชั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคเงิน เพื่อให้เกิดเป็นอนุภาคผสม Ag-TiO_2 ก่อนนำไปพิมพ์สกรีนเป็นชั้น Ag-TiO_2 บนขั้วไฟฟ้ารับแสงต่อไป ผลการทดสอบเซลล์ DSSC ที่ประกอบด้วยชั้น Ag-TiO_2 จำนวน 4 ชั้นบนขั้วไฟฟ้ารับแสงให้ค่าประสิทธิภาพ $\text{PCE} = 2.9\%$ จะเห็นว่าการเจืออนุภาคเงินในรูปแบบพิเศษให้ประสิทธิภาพต่ำลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากอนุภาค Ag-TiO_2 ที่เตรียมได้มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาค TiO_2 โดยทั่วไปและอนุภาคเงินบดบังพื้นที่ผิวจำเพาะของชั้น TiO_2 จึงเหลือพื้นที่ยึดเกาะสำหรับโมเลกุลสีย้อมน้อยลง ส่งผลให้เซลล์ผลิตกระแสไฟฟ้าได้น้อยลง

การทดลองสังเคราะห์โมเดลอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในสภาพแวดล้อมเลียนแบบทางน้ำยางธรรมชาติโดยใช้สารละลายแอมโมเนีย และสารละลายดี-กลูโคส นำมาเจือในชั้น TiO_2 ผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าพร้อม ประกอบและทดสอบเซลล์ DSSC ในสภาวะควบคุมเหมือนกับอนุภาคเงินจากทางน้ำยางธรรมชาติทุกประการ ทั้งนี้เพื่อยืนยันความบริสุทธิ์ของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์จากของเหลือใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาง ผลการทดสอบเซลล์ DSSC ที่ผลิตจากโมเดลอนุภาคเงินให้ค่า V_{oc} , J_{sc} , และ FF เท่ากับ 670 มิลลิโวลต์, 9.59 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และ 0.69 ตามลำดับ คิดเป็นค่าประสิทธิภาพ $\text{PCE} = 4.4\%$ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเงินที่สังเคราะห์จากทางน้ำยางธรรมชาติ มีสมบัติเชิงพลาสมอนเรโซแนนซ์ที่ดัดเทียมโมเดลอนุภาคเงิน

สุดท้ายผลทดสอบประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency; EQE) ยืนยันว่าเซลล์ทดสอบ DSSC ที่เจืออนุภาคเงินในชั้น TiO_2 สามารถเปลี่ยนแสงตกกระทบในย่านความยาวคลื่น $380 - 550$ นาโนเมตร ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่าเซลล์ที่ไม่ได้เจืออนุภาคเงิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงด้วยการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในชั้นวัสดุกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้ารับแสง โดยเลือกสังเคราะห์อนุภาคเงินในทางน้ำอย่างธรรมชาติเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้จากอุตสาหกรรมผลิตยาง ผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดีมาก อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญที่พบคือทางน้ำจากอุตสาหกรรมผลิตยางมีคุณภาพไม่เหมือนกันทุกครั้ง ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงผลขององค์ประกอบในทางน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกายภาพของอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้ เช่น ขนาด และรูปร่างของอนุภาค ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงอยู่แบบของอนุภาคเงินที่เตรียมได้ว่าอยู่ในรูปแบบใดโดยอาจใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพิ่มเติม รวมทั้งใช้เทคนิคเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ในการระบุสถานะทางเคมี เช่น สถานะทางออกซิเดชัน หรือ พันธะทางเคมีระหว่างอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้ ควรเพิ่มการศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy : TEM) เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และขนาดของอนุภาค รวมทั้งยืนยันการมีอยู่ของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรบนโครงสร้างของชั้น TiO_2 ควรเพิ่มการศึกษาด้วยเทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Analysis Technique) แบบ Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อยืนยันการสลายตัวของเนื้อยาง และองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งอาจมีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะได้ รวมทั้งควรเพิ่มเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ในการศึกษาความต้านทานภายในของเซลล์สุริยะเมื่อมีการเจือผสมอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร นอกจากนี้ควรศึกษาเทคนิคการตรวจวิเคราะห์ปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์บนพื้นผิวของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร เพื่อยืนยันผลประสิทธิภาพของเซลล์ DSSC ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากปรากฏการณ์นี้โดยตรง งานวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุมถึงการตรวจวิเคราะห์ดังกล่าว

รายการอ้างอิง



1. พิชิตชัย ปิมแปง, การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทองคำโดยวิธีการบดและรีดักชันทางเคมี, ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ 2552, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: เชียงใหม่.
2. อภิวัดน์ ชมภูสอ, โครงสร้างระดับนาโนของทอง: การสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556. 41(4): p. 859-872.
3. Filipponi, L. and D. Sutherland, *NANOTECHNOLOGIES: Principles, Applications, Implications and Hands-on Activities*. 2012, Luxembourg.
4. วันเพ็ญ หรุจิตตวิวัฒน์, อุตสาหกรรมนาโน มีสิทธิ์ขอรับส่งเสริมการลงทุนได้. วารสารส่งเสริมการลงทุน, 2555.
5. วิกิพีเดีย. นาโนเทคโนโลยี. 2017 [2017 March 15]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B9%82%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%A2%E0%B8%B5>.
6. *On Air Pollution, Nanoparticles & Why High Efficiency Air Filters Are A Necessity*. 2015 [2017 March 20]; Available from: <http://blog.oransi.com/air-pollution-nanoparticles-high-efficiency-air-filters-necessity/>.
7. IMRA America, I. *Gold nanoparticles*. 2017 [2017 March 16]; Available from: <http://nano.imra.com/products/i-colloids/>.
8. Sanderson, K. *Gold nanoparticles revealed*. 2007 [2017 March 16]; Available from: <http://www.nature.com/news/2007/071018/full/news.2007.178.html>.
9. Wikibooks. *Semiconductors/What is a Semiconductor*. 2017 [2017 March 22]; Available from: https://en.wikibooks.org/wiki/Semiconductors/What_is_a_Semiconductor.
10. Jones, M. *quantum dots*. 2014 [2017 April 24]; Available from: <https://sites.uncc.edu/nano-dynamics/about/>.
11. Tuckerman, M.E. *Fullerenes*. 2011 [2017 April 26]; Available from: https://www.nyu.edu/classes/tuckerman/adv.chem/lectures/lecture_17/node7.html.
12. kumar, C. *Carbon Nanotubes and Energy*. 2015 [23 April 2017]; Available from: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/kumar1/>.

13. R Nave. *Mie Scattering*. 2017 April 26]; Available from:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html>.
14. NANOCOMPOSIX, I. *Plasmonic Nanoparticles*. 2017 April 26]; Available from:
<https://nanocomposix.com/pages/plasmonics>.
15. กานต์พิมล กรไกร และ รินา ภัทรมานนท์, อนุภาคเงินนาโนสังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากพืชและความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2560. 45(1): p. 34-52.
16. Suwanvisith, C., *Effect of experimental factors on the size of silver nanoparticles synthesized in skim natural rubber latex*, in *Chemical Engineering*. 2014, Thammasat University: Pathumthani.
17. ชัยมณี, อ. โพรพิลีนไกลคอล (*Propylene glycol*). 2555 28 เมษายน 2560]; Available from: http://www.summacheeva.org/index_thaitox_propylene_glycol.htm.
18. Phetphaisit, W., *A study of preparation of light colored photosensitive liquid natural rubber*, in *Polymer Science and Technology*. 2003, Mahidol University.
19. โสภภาพรรณ จินดาไพศาล, การเตรียมยางธรรมชาติเหลวควบคุมน้ำหนักโมเลกุล, in *ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ*. 2553, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: สงขลา.
20. เสริม จันทร์ฉาย, *รังสีอาทิตย์ 1ed*. 2557, นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์.
21. กระทรวงพลังงาน, ก. ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์. 18 พฤษภาคม 2560]; Available from:
www.cssckmutt.in.th/cssc/cssc_training/doc/Designer_CH1toCH5.pdf.
22. BALLACHEY, G. *SOLAR IRRADIANCE AND EARTH'S ATMOSPHERE*. 2014 26 พฤษภาคม 2560]; Available from: <http://sustainablebalance.ca/solar-irradiance-and-earths-atmosphere/>.
23. Yilmaz, S., et al., *Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations*. 2015.
24. ภาสภณ มโนสุกฤตกุล, พัชราภรณ์ ปานดี, and ศิริขวัญ สุดวัตแก้ว. การศึกษาสีย้อมไวแสงต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง *Study Dye-sensitizer on Photovoltaic Performance of Dye-Sensitized Solar Cells* 30 พฤษภาคม 2560]; Available from:
http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/177375/ea2056efa5535d2c20e856114b423e?Resolve_DOI=10.14457/KMITL.res.2015.6.

25. สุรวุฒิ ช่างโซติ. มาตรฐานเซลล์แสงอาทิตย์กึ่งถาวร. 2013 30 พฤษภาคม 2560]; Available from:
<http://www.kmutt.ac.th/hyuae/%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B9%8C%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%97%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A2%E0%B9%8C/>.
26. Alessandro Abbotto and Norberto Manfredia, *Electron-rich heteroaromatic conjugated polypyridine ruthenium sensitizers for dye-sensitized solar cells*. Dalton Transactions, 2011(46): p. 12421-12438.
27. Honsberg, C. and S. Bowden. *Photovoltaic Education Network*. 31 พฤษภาคม 2560]; Available from: <http://www.pveducation.org/>.
28. Abu Bakar, N.H.H., J. Ismail, and M. Abu Bakar, *Synthesis and characterization of silver nanoparticles in natural rubber*. Materials Chemistry and Physics, 2007. 104(2-3): p. 276-283.
29. Guidelli, E.J., et al., *Green synthesis of colloidal silver nanoparticles using natural rubber latex extracted from Hevea brasiliensis*. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2011. 82(1): p. 140-5.
30. Suwatthanarak, T., et al., *Synthesis of silver nanoparticles in skim natural rubber latex at room temperature*. Materials Letters, 2016. 168: p. 31-35.
31. Dissanayake, M.A.K.L., et al., *Efficiency enhancement in plasmonic dye-sensitized solar cells with TiO2 photoanodes incorporating gold and silver nanoparticles*. Journal of Applied Electrochemistry, 2015. 46(1): p. 47-58.
32. Lim, S.P., et al., *Boosting Photovoltaic Performance of Dye-Sensitized Solar Cells Using Silver Nanoparticle-Decorated N,S-Co-Doped-TiO2 Photoanode*. Sci Rep, 2015. 5: p. 11922.
33. Dao, V.D. and H.S. Choi, *Highly-Efficient Plasmon-Enhanced Dye-Sensitized Solar Cells Created by Means of Dry Plasma Reduction*. Nanomaterials (Basel), 2016. 6(4).

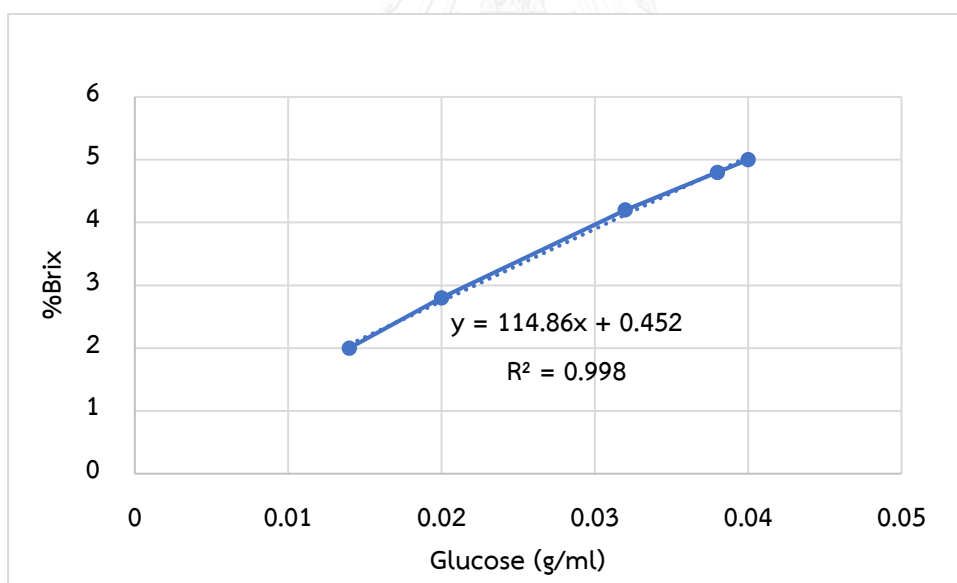


ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างการคำนวณค่าพื้นฐานของหวาน้ำยางธรรมชาติ

1. ตัวอย่างการคำนวณหาการหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสในหวาน้ำยางโดยใช้ %Brix ตารางที่ ก.1 ค่า %Brix ของสารละลายกลูโคส ณ ความเข้มข้นต่างๆ [16]

ความเข้มข้นของกลูโคส (กรัม/มิลลิลิตร)	%Brix
0.014	2
0.020	2.8
0.032	4.2
0.038	4.8
0.040	5



รูปที่ ก.1 Calibration Curve ของกลูโคส

สมการเส้นตรงจาก Calibration Curve ของกลูโคสในแต่ละความเข้มข้นที่ได้คือ $y = 114.86x + 0.452$

เมื่อ y คือ %Brix หาจากเครื่อง Brix Refractometer

X คือ ความเข้มข้นของกลูโคส (g/ml)

เช่น ถ้าอ่านค่า %Brix ได้ 4

แทนค่า $y = \%Brix = 4$

ดังนั้นความเข้มข้นของกลูโคสคือ $X = \left(\frac{4-0.452}{114.86} \right) = 0.03 \text{ g/ml}$ เป็นต้น

2. ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณการเจืออนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

จากปริมาณซิลเวอร์ไนเตรตที่ใช้เริ่มต้นมีความเข้มข้น 1.2 มิลลิโมลต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Ag_{\text{ที่ใช่}} &= 1.2 \frac{\text{มิลลิโมล}}{\text{ลิตร}} \times 10 \text{ มิลลิลิตร} \times \frac{1}{100 \text{ มิลลิลิตร}} \times \frac{1 \text{ โมล}}{1000 \text{ มิลลิโมล}} \times 107.86 \frac{\text{กรัม}}{\text{โมล}} \\ &= 1.294 \times 10^{-3} \text{ กรัม} \end{aligned}$$

สำหรับกรณี อัตราส่วนการเจือ 1:10

ปริมาณเงินที่เจือ คือ 1.294 มิลลิกรัม /10 เท่ากับ 0.1294 มิลลิกรัม

สำหรับกรณี อัตราส่วนการเจือ 1:100

ปริมาณเงินที่เจือ คือ 1.294 มิลลิกรัม /100 เท่ากับ 0.01294 มิลลิกรัม

สำหรับกรณี อัตราส่วนการเจือ 1:200

ปริมาณเงินที่เจือ คือ 1.294 มิลลิกรัม /200 เท่ากับ 0.00647 มิลลิกรัม

สำหรับกรณี อัตราส่วนการเจือ 1:500

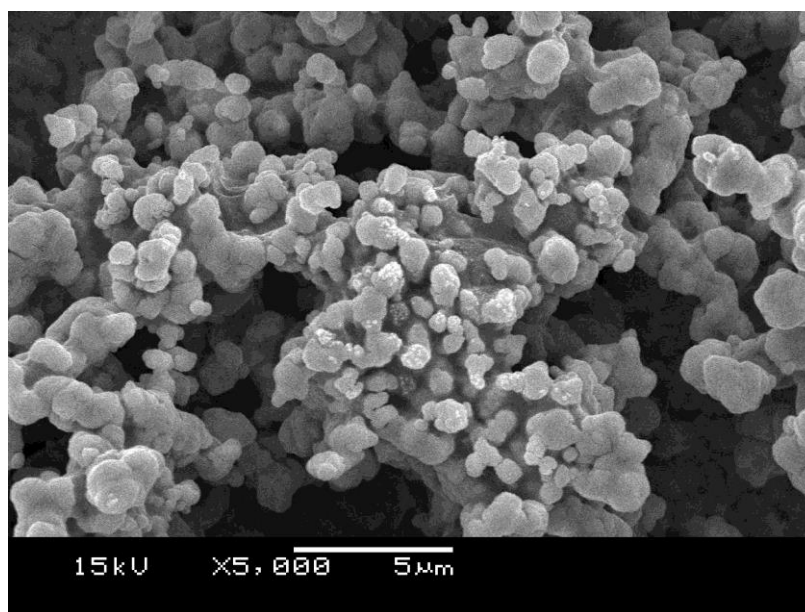
ปริมาณเงินที่เจือ คือ 1.294 มิลลิกรัม /500 เท่ากับ 2.59×10^{-3} มิลลิกรัม

สำหรับกรณี อัตราส่วนการเจือ 1:1000

ปริมาณเงินที่เจือ คือ 1.294 มิลลิกรัม /1000 เท่ากับ 1.29×10^{-3} มิลลิกรัม

ภาคผนวก ข

สัณฐานวิทยาของอนุภาคเงินเมื่อผ่านไปนาน 6 เดือน



รูปที่ ข.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความละเอียด 5000 เท่า อนุภาคเงินที่สังเคราะห์ในสภาวะจำลอง แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 เดือน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพล โพธิ์ไพฑูรย์ เกิดวันจันทร์ที่ 2 ธันวาคม พ.ศ.2534 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์ ในปีการศึกษา 2552 สำเร็จ การศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชา วิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร ในปีการศึกษา 2556 และเข้าร่วมประชุมวิชาการ “Burapha University International Conference 2014” ที่เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี เมื่อวันที่ 3-4 กรกฎาคม พ.ศ.2557 นำเสนอ ผลงานแบบโปสเตอร์ในหัวเรื่อง “Mechanical Properties of Poly(lactic acid) / Epoxidized Liquid Natural Rubber blend” และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และเข้าร่วมประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 'Innovative Technology toward Sustainable Development' ที่กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 26-28 ตุลาคม พ.ศ.2559 นำเสนอผลงานแบบปากเปล่าในหัวเรื่อง “การสังเคราะห์ อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรในทางน้ำยางธรรมชาติสำหรับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง”

