

การผลิตสารสีจากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถัน
และการประยุกต์ในเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง

นางสาวอาทิมา ปุญญา



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
สาขาวิชาจุลชีววิทยาและเทคโนโลยีจุลินทรีย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PIGMENT PRODUCTION FROM PURPLE NON SULFUR PHOTOSYNTHETIC BACTERIA
AND ITS APPLICATION IN DYE SENSITIZED SOLAR CELL

Miss Artima Punyawa



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Microbiology and Microbial Technology

Department of Microbiology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตสารสีจากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่ สะสมกำมะถันและการประยุกต์ในเซลล์สุริยะชนิดสียอม ไวแสง
โดย	นางสาวอาทิมา ปุญญา
สาขาวิชา	จุลชีววิทยาและเทคโนโลยีจุลินทรีย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เอกวัล ลือพร้อมชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. ณิชฐพล ภูตระกูลโชติ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย ภัทรกุลวณิช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกวัล ลือพร้อมชัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. ณิชฐพล ภูตระกูลโชติ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรุทัย ภิญญาคง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุ ตำนวานิชกุล)

5772294023 : MAJOR MICROBIOLOGY AND MICROBIAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: PURPLE NON-SULFUR BACTERIA / DSSC / SOLAR CELLS / PIGMENT / NATURAL DYE

ARTIMA PUNYAWA: PIGMENT PRODUCTION FROM PURPLE NON SULFUR PHOTOSYNTHETIC BACTERIA AND ITS APPLICATION IN DYE SENSITIZED SOLAR CELL. ADVISOR: ASSOC. PROF. EKAWAN LUEPROMCHAI, Ph.D., CO-ADVISOR: NUTTAPOL POOTRAKULCHOTE, Ph.D., 173 pp.

Bacteriochlorophyll (Bchl) and carotenoids (car), the photosynthetic pigment of purple non-sulfur bacteria (PNSB) are trap sun light and transfer of electronic excitation to the reaction center (RC). They work in a similar manner with dye sensitizer in dye sensitized solar cells (DSSCs). This study aims to use these pigments as light harvester in DSSCs. They have many advantages over chemical dyes, non-toxicity, easy to produce and biodegradation. Seven strains of PNSB were isolated from water resources in Bangkok, Thailand. *Rhodospseudomonas faecalis* W1 and *Rhodospseudomonas palustris* W7 showed rapid growth rate and slightly different in absorption spectra. Consequently, they were selected as PNSB's model. For gain high biomass and pigment content, several factors were studied. After cultured with modified RVCB medium which composed 8 g/L malic acid, 4 g/L yeast extract, 20 mg/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and 400 mg/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ under illumination of incandescent lamp at 2000 lux and 120 rpm stirring, highest biomass of strains W1 and W7 were reached at 3.89 ± 0.01 and 3.92 ± 0.03 g/L, respectively. The Bchl and car contents of strain W1 were 3.97 ± 0.13 and 1.69 ± 0.06 mg/ g CDW, respectively. When strain W7 produced Bchl 7.10 ± 0.07 mg/ g CDW and car 1.17 ± 0.04 mg/ g CDW. In order to reduce the cost of culture medium, 40% v/v wastewater from bakery factory was mixed with RVCB medium without adding malic acid. The biomass and pigment contents of both strains when cultured with low-cost medium are in acceptable values comparing with non-adding wastewater. For applying in DSSCs, the pigment was extracted by acetone: methanol (7:2) v/v and soaking photo anode in this pigment extract. Firstly, this test device showed photo-to-current conversion efficiency rather poorly. Hence various techniques were used for improving its efficiency. The highest efficiency cell was gained from using cocktail dye of pigment from strains W1 and W7 with addition of bio-surfactant to inhibit dye formation in multilayer. The bio-DSSCs showed short circuit current density (J_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), photo-to-current conversion efficiency (PCE) and fill factor (FF) at 0.6 mA cm^{-2} , 560 mV, 0.19% and 57%, respectively. The results indicated that PNSB's pigment can be used for conversion of light to current by DSSCs. However, the efficiency can improve by adding dye from other natural sources which adsorb light in different range, increasing of dye loading on semiconductor surface and changing of energy arrangement.

Department: Microbiology

Field of Study: Microbiology and Microbial
Technology

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร. เอกวัล ลือพร้อมชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. ณีฎฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ ความเมตตา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย ภัทรกุลวณิชย์ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการในการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งให้คำแนะนำในการปรับปรุงและแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรุณทัย ภิญญาคง และรองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุ ตำนวานิชกุล ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. สรวีศ เผ่าทองสุข ที่ให้ความรู้ ความเมตตา และคำแนะนำในการทำงานวิจัย ในส่วนของการหาช่วงคลื่นแสง ที่ปล่อยจากหลอดไฟชนิดต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีศักดิ์ สูดยอดสุข ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ ตลอดจนคำแนะนำในการหาประสิทธิภาพควอนตัมภายในของเซลล์สุริยะ

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายค่าเล่าเรียน

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาจุลชีววิทยา และภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการจัดทำเอกสาร ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาจุลชีววิทยา และภาควิชาเคมีเทคนิค โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สมาชิกในห้องปฏิบัติการ 1704/14 อาคารมหาวชิรุณหิศ สำหรับการช่วยเหลือ กำลังใจ และความหวังดีที่มีให้เสมอมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของบัณฑิตวิทยาลัย ที่ช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัว คุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาว ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ รวมถึงให้กำลังใจเป็นอย่างดีในทุกๆ ด้านเสมอมา จนผู้วิจัยสามารถสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฑ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	6
2.1 แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน.....	6
2.2 การใช้ประโยชน์จากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน.....	11
2.2.1 ด้านพลังงาน.....	11
2.2.2 ด้านการเกษตร.....	12
2.2.3 ด้านการแพทย์.....	13
2.2.4 ด้านอุตสาหกรรม.....	14
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน.....	15
2.3.1 แหล่งคาร์บอน.....	15
2.3.2 แหล่งไนโตรเจน.....	16
2.3.3 ปริมาณโลหะไอออน.....	16

2.3.4 ความเข้มแสง.....	17
2.3.5 ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง	18
2.4 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.....	19
2.4.1 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	19
2.4.2 หลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.....	20
2.4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้บ่งชี้คุณสมบัติและประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ	21
2.5 แนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.....	23
2.5.1 การพัฒนาสารกึ่งตัวนำบนซิลิคอน.....	24
2.5.1.1 การปรับเปลี่ยนรูปร่างลักษณะของสารกึ่งตัวนำ.....	24
2.5.1.2 การโด๊ปด้วยไอออนชนิดต่างๆ	26
2.5.1.3 การเจือด้วยโลหะชั้นสูง (noble metals)	26
2.5.1.4 การปรับปรุงโดยการเติมโลหะออกไซด์ชนิดอื่น.....	27
2.5.1.5 การเคลือบด้วยสารที่มีสมบัติในการปรับช่วงการดูดกลืนแสง (up/down conversion material).....	27
2.5.1.6 การปรับสภาพพื้นผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการเกาะของสีย้อม	28
2.5.2 การพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์.....	28
2.5.2.1 อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบของเหลว	28
2.5.2.2 อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว	29
2.5.2.3 อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบของแข็ง	29
2.5.3 การพัฒนาซิลิคอนร่วม.....	30
2.5.3.1 วัสดุประเภทคาร์บอน.....	30
2.5.3.2 สารอินทรีย์.....	31
2.5.3.3 พอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า.....	31

2.5.3.4 สารผสมอื่นๆ.....	32
2.5.4 การพัฒนาสีย้อมไวแสง.....	32
2.5.4.1 สีย้อมของสารประกอบรูเทเนียม-พอลิไพริดีล (Ru (II) polypyridyl dyes)..	33
2.5.4.2 สีย้อมจากสารอินทรีย์ชนิดปราศจากโลหะ (metal-free organic dye).....	33
2.5.4.3 สีย้อมพอร์ไฟริน	34
2.5.4.4 สารดูดกลืนแสงชนิดควอนตัมดอท (Quantum-dot sensitizer).....	35
2.5.4.5 ตัวดูดซับพลังงานแสงชนิดเพอโรฟสไกต์ (Perovskite-based sensitizers)	35
2.6 การนำสีย้อมจากแหล่งธรรมชาติมาประยุกต์ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	36
2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
2.6.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของสีย้อม.....	39
2.6.2.1 ตรวจสอบช่วงการดูดกลืนแสงโดยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์.....	39
2.6.2.2 การตรวจสอบระดับพลังงานของสารสีโดยเทคนิค cyclic voltammetry (CV).....	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	42
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	42
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	45
3.4 การคัดเลือกแบคทีเรียที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี.....	46
3.4.1 จุลินทรีย์.....	46
3.4.2 การเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย.....	46
3.4.3 การระบุชนิดสายพันธุ์ของแบคทีเรีย	47
3.5 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียที่คัดเลือก	47

3.5.1	แปรงฟันปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและผลิตสารสี	47
3.5.2	การขยายขนาดการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย.....	48
3.5.3	การทดสอบเลี้ยงเชื้อในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเบเกอร์รี่	49
3.6	การสกัดแยกสารสีและศึกษาสมบัติของสารสีที่สกัดแยกได้.....	50
3.6.1	ศึกษาชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดแยกสารสี	50
3.6.2	การตรวจสอบปริมาณสารสี.....	50
3.6.3	การวิเคราะห์ระดับพลังงาน HOMO-LUMO และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap energy) ของสารสี	51
3.7	การประยุกต์สารสกัดสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงและการพัฒนาประสิทธิภาพ	51
3.7.1	การประกอบเซลล์สุริยะและวัดประสิทธิภาพ.....	51
3.7.1.1	การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง	51
3.7.1.2	การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม	53
3.7.1.3	การประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง	53
3.7.1.4	การวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า.....	54
3.7.2	การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง	54
3.7.2.1	การแปรงฟันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กทรอนิกส์	55
3.7.2.2	การเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะของสีย้อมบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำโดยการปรับสภาพพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์	55
3.7.2.3	การแปรงฟันความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์.....	55
3.7.2.4	การแปรงฟันตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสารสี.....	56
3.7.2.5	การแปรงฟันความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่เติมลงในสารสี	56
3.7.2.6	การแปรงฟันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ	56

3.7.2.7 การใช้สีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ผสมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7.....	57
3.7.2.7.1 การวัดประสิทธิภาพควอนตัมของเซลล์สุริยะที่ใช้สีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ผสมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7.....	57
3.7.2.7.2 การทดสอบความเสถียรเบื้องต้นของเซลล์สุริยะที่ใช้สีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ผสมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7.....	58
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	59
4.1 การคัดเลือกสายพันธุ์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถันที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี	59
4.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียที่คัดเลือก	63
4.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7.....	63
4.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7.....	66
4.2.3 ผลของการเพิ่มปริมาตรของอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อต่อการเจริญและผลิตสารสี	74
4.2.4 การทดสอบเลี้ยงแบคทีเรียในอาหารที่มีน้ำเสียจากโรงงานเบเกอรี่เป็นองค์ประกอบ	76
4.3 การสกัดแยกสารสีและศึกษาสมบัติของสารสีที่สกัดแยกได้.....	82
4.3.1 ตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการสกัดแยกสารสี	82
4.3.2 ระดับพลังงานและช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารสีโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	84
4.4 การประกอบเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง และการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพ	87
4.4.1 ประสิทธิภาพเบื้องต้นของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง	87
4.4.2 การแปรผันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์.....	89

4.4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะของสีย้อมบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำโดยการปรับสภาพพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์	91
4.4.4 การแปรผันความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	94
4.4.5 การแปรผันตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสีย้อม	96
4.4.6 ผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวชีวภาพในสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1	99
4.4.7 การแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ	100
4.4.8 การใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ผสมกับสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 ..	103
4.4.8.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์สุริยะที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 (1:1)	106
4.4.8.2 การตรวจสอบความคงตัวของเซลล์สุริยะที่ใช้สารสีผสมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7	107
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	110
5.1 สรุปผลการวิจัย	110
5.2 ข้อเสนอแนะ	111
รายการอ้างอิง	113
ภาคผนวก ก อาหารเลี้ยงเชื้อและการคำนวณปริมาณองค์ประกอบในอาหาร	133
ภาคผนวก ข สารเคมี	136
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบต่างๆ สำหรับการคัดเลือกสายพันธุ์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกัมมะถันที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี	138
ภาคผนวก ง ข้อมูลดิบต่างๆ สำหรับการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียที่คัดเลือก	145
ภาคผนวก จ ข้อมูลดิบต่างๆ สำหรับการสกัดแยกสารสีและศึกษาสมบัติของสารสีที่สกัดแยกได้	156
ภาคผนวก ช ข้อมูลดิบต่างๆ สำหรับการประกอบเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง และการศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพ	160

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 173



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 การจำแนกเงินัสของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน	7
ตารางที่ 2.2 การผลิตแก๊สไฮโดเจนโดยด้วยแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน	12
ตารางที่ 2.3 การผลิต PHB โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน	15
ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสงเมื่อใช้สารผสมเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม .	32
ตารางที่ 2.5 การนำสียอมจากธรรมชาติมาประยุกต์ในเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง	38
ตารางที่ 3.1 ลำดับการแปรผันของปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและผลิตสารสี	48
ตารางที่ 3.2 ชุดทดลองที่ใช้ศึกษาความสามารถในการเจริญในน้ำเสียของแบคทีเรียสายพันธุ์ที่คัดเลือก	49
ตารางที่ 4.1 การระบุชนิดของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถันทั้ง 7 สายพันธุ์	62
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบน้ำหนักเซลล์แห้งและปริมาณสารสีของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถันในงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่นๆ	81
ตารางที่ 4.3 ระดับพลังงานและช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7	86
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสียอมไวแสง	88
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสงที่มีสียอมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสียอมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์	89
ตารางที่ 4.6 ปริมาณสียอมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่เกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายหลังจากการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรด ที่ความเข้มข้นต่างๆ	92
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสียอมไวแสง ภายหลังจากการปรับสภาพผิวด้วยกรดซิดริกความเข้มข้น 0.5 M และกรดไนตริก 1 M	93
ตารางที่ 4.8 ปริมาณสียอมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่เกาะบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ภายหลังจากการแปรผันความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์	94

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ 95

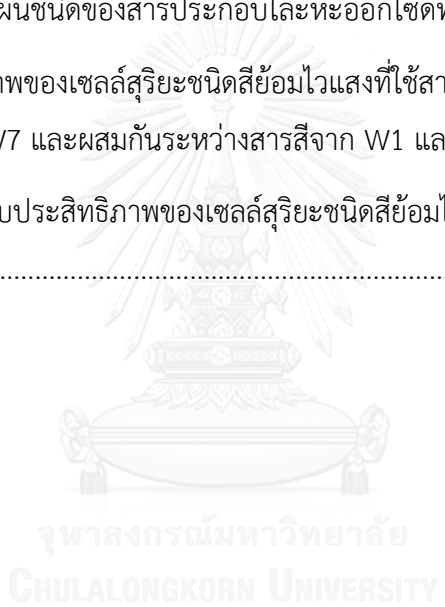
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ที่สกัดแยกด้วยเอทานอล และอะซิโตนผสมเมทานอล ในอัตราส่วน 7:2 ปริมาตรต่อปริมาตร 97

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดแยกด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล เมื่อแปรผันความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิวชีวภาพ 99

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ..... 101

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 แบคทีเรียสายพันธุ์ W7 และผสมกันระหว่างสารสีจาก W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1 103

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากแหล่งธรรมชาติ..... 109



สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 กระบวนการไซคลิกโฟโตฟอสโฟไรเลชันในแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสม กัมมะถัน	8
รูปที่ 2.2 ช่วงการดูดกลืนแสงของเซลล์และโครงสร้างของสารสีในระบบสังเคราะห์แสงของ แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกัมมะถัน	10
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง	21
รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้า (IV curve) และกำลังไฟฟ้าและ ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ	22
รูปที่ 2.5 ปริมาณงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสงที่ถูกตีพิมพ์ในแต่ละปี ระหว่างปี ค.ศ. 2008 ถึง 2016	24
รูปที่ 2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมได ออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิว	26
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสียอมของสารประกอบรูเทเนียม-พอลิไพริดีล	33
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสียอมพอร์ไฟริน ชนิด SM371 และ SM315	34
รูปที่ 2.9 ช่วงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์	39
รูปที่ 2.10 กราฟโวลแทมโมแกรมของสารคอปเปอร์ซัลเฟต 10 มิลลิโมลาร์ ในสารละลาย โซเดียมซัลเฟต 0.3 โมลาร์ เมื่อใช้แท่งแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม แท่งคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า ทำงาน และอัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า 0.02 โวลต์ต่อวินาที	41
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	45
รูปที่ 3.2 การเพาะเลี้ยงแบคทีเรียในขวดไวแอลขนาด 25 มิลลิลิตร	47
รูปที่ 3.3 การขยายขนาดการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย	49
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง	52
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม	53
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการประกอบเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง	53
รูปที่ 3.7 เซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสงที่ประกอบเสร็จแล้ว	54

รูปที่ 3.8 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ	54
รูปที่ 4.1 การเจริญของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน 7 สายพันธุ์ เมื่อเลี้ยงด้วยอาหารเหลว RCVB.....	60
รูปที่ 4.2 ช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดของเซลล์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน 7 สายพันธุ์ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB	61
รูปที่ 4.3 น้ำหนักเซลล์แห้งของแบคทีเรีย สายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันความเข้มข้นกรดมาลิกที่ 4-16 กรัมต่อลิตร	64
รูปที่ 4.4 น้ำหนักเซลล์แห้งของแบคทีเรีย สายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันความเข้มข้นสายสกัดจากยีสต์ที่ 2-8 กรัมต่อลิตร	64
รูปที่ 4.5 น้ำหนักเซลล์แห้งของแบคทีเรีย สายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันความเข้มข้นเฟอร์ริซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 10-40 มิลลิกรัมต่อลิตร	65
รูปที่ 4.6 ก) น้ำหนักเซลล์แห้ง และ ข) ปริมาณการสะสมสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 100 – 400 มิลลิกรัมต่อลิตร	68
รูปที่ 4.7 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันชนิดของหลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง.....	69
รูปที่ 4.8 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันความเข้มของแสง	70
รูปที่ 4.9 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่เปรียบเทียบระหว่างชุดทดลองที่ไม่มีและมีการกวนผสม	71
รูปที่ 4.10 แถบสว่างนี้เกิดจากการแทรกสอดของแสงจากหลอดไฟชนิดต่างๆ ผ่านแผ่นเกรตติง.....	73
รูปที่ 4.11 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันปริมาตรอาหารที่ใช้เลี้ยง.....	75
รูปที่ 4.12 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลวที่มีน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่เป็นองค์ประกอบ	78
รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การลดค่า COD ของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังการเลี้ยงในอาหารเหลวที่มีน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่เป็นองค์ประกอบ	79

รูปที่ 4.14 สารสีจากแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อสกัดด้วยเอทานอล อะซิโตน และอะซิโตนผสมเมทานอล (7: 2).....	82
รูปที่ 4.15 ค่าการดูดกลืนแสงของสารสีจากแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ โดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	83
รูปที่ 4.16 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี ของสารสีของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อสกัดด้วยเอทานอล	85
รูปที่ 4.17 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี ของสารสีของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อสกัดด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล.....	85
รูปที่ 4.18 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์และสายสกัดจากสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7.....	87
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง.....	88
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์	90
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ภายหลังจากการปรับสภาพผิวด้วยกรดซิดริก ความเข้มข้น 0.5 M และกรดไนตริก 1 M.....	94
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	95
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ที่สกัดแยกด้วยเอทานอล และอะซิโตนผสมเมทานอล.....	97
รูปที่ 4.24 ระดับพลังงานของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ สารสีที่สกัดด้วยเอทานอล และสารสีที่สกัดด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล	98

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มี
 สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิว
 จีวภาพ..... 99

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มี
 สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะ
 ออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ..... 101

รูปที่ 4.27 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำเซอริโคเนียมออกไซด์และสายสกัดจากสีจากแบคทีเรีย
 สายพันธุ์ W1..... 102

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่ใช้
 สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 แบคทีเรียสายพันธุ์ W7 และผสมกันระหว่างสารสีจาก W1
 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1 เป็นสีย้อมไวแสง 104

รูปที่ 4.29 ระดับพลังงานของส่วนประกอบต่างๆภายในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสารสีจาก
 แบคทีเรียสายพันธุ์ W1 แบคทีเรียสายพันธุ์ W7 และผสมกันระหว่างสารสีจาก W1 และ W7 ใน
 อัตราส่วน 1:1 104

รูปที่ 4.30 ช่วงการดูดกลืนแสงของสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 สายพันธุ์ W7 และสารสี
 ผสมของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1: 1 ปริมาตรต่อปริมาตร..... 105

รูปที่ 4.31 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจาก
 แบคทีเรียจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 รวมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 เป็นสีย้อมไวแสง 106

รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการดูดกลืนพลังงานแสงของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียจาก
 แบคทีเรียสายพันธุ์ W1 รวมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 เป็นสีย้อมไวแสง..... 107

รูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงของเซลล์สุริยะที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียและสี
 ย้อม N719 เป็นสีย้อมไวแสง เปรียบเทียบก่อนและภายหลังการทดลองความคงตัว 108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถัน เป็นแบคทีเรียแกรมลบในกลุ่มโพรทีโอแบคทีเรีย (proteobacteria) มีรูปแบบการเจริญที่หลากหลายทั้ง โฟโตเฮเทโรทรอพ (photoheterotroph) โฟโตออโตทรอพ (photoautotroph) และคีโมเฮเทโรทรอพ (chemoheterotroph) ขึ้นอยู่กับภาวะแวดล้อมขณะนั้น เช่น ปริมาณออกซิเจน สารอาหาร และการได้รับแสงหรือไม่ได้รับแสง เป็นต้น (Rudolf และ Grammel, 2012) เมื่อเชื้อในกลุ่มนี้เจริญแบบสังเคราะห์ด้วยแสง ภายใต้ภาวะกึ่งไร้ออกซิเจน จะผลิตสารสีเพื่อทำหน้าที่รวบรวมพลังงานแสง โดยสารสีหลักของแบคทีเรียกลุ่มนี้ คือ แบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่เรียกว่า พอร์ไฟริน (porphyrin) ที่มีแมกนีเซียมเป็นแกนกลาง ดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงใกล้อินฟราเรด (near-infrared) ประมาณ 815–960 นาโนเมตร (แบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ เอ) หรือ 1010–1040 นาโนเมตร (แบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ บี) และสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์ ที่ดูดกลืนแสงในช่วง 450-550 นาโนเมตร ซึ่งการปรากฏของสารสีนี้ทำให้แบคทีเรียมีสีน้ำตาล แดง แดงม่วง ส้ม เหลือง เขียว ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแบคทีเรีย (Giraud และคณะ, 2004) แบคทีเรียในกลุ่มนี้มีความสามารถในการผลิตสารที่ทรงคุณค่าหลายชนิด เช่น ยูบิควิโนน โคเอนไซม์คิวเทน วิตามิน และสารสีแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ด้านสิ่งแวดล้อม ผลิตแก๊สไฮโดรเจน ควบคู่กับการบำบัดน้ำเสีย (Cicero และคณะ, 2013) ด้านการแพทย์ ใช้โคเอนไซม์คิวเทน ในการรักษาโรคหัวใจ ความดันโลหิตสูง การบาดเจ็บของหลอดเลือด โรคโลหิตจาง (Sasaki และคณะ, 2005) ด้านอุตสาหกรรม ผลิตพลาสติกชีวภาพ หรือใช้สารสีแคโรทีนอยด์เป็นสารแต่งสีในอาหารและเครื่องสำอาง (Wang และคณะ, 2012) นอกจากนี้ ยังถูกใช้งานด้านปศุสัตว์ ในแง่ของอาหารเสริมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสวยงามในสัตว์ เช่น ปลาแซลมอน และปลาสวยงาม (Brown และคณะ, 2014) ดังนั้นการหาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและการผลิตสารค่างคุณค่าชนิดต่างๆ โดยแบคทีเรียชนิดนี้ จึงควรได้รับการศึกษาค้นคว้าอย่างต่อเนื่อง

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียในกลุ่มนี้ ได้แก่ ชนิดและอายุของแบคทีเรีย องค์ประกอบของอาหาร และปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ เช่น ปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มของแสง เป็นต้น (Sargsyan และคณะ, 2015) โดยมีรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มอัตราการเจริญและสารสีโดยการแปรผันปัจจัยต่างๆ เช่น Saejung และ Apaiwong (2015) พบว่าการใช้กรดมาลิกความเข้มข้น 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็น

แหล่งคาร์บอน และสารสกัดยีสต์ความเข้มข้น 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นแหล่งไนโตรเจน มีผลทำให้เซลล์เจริญได้ดีขึ้นและผลิตสารสีได้ในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมโลหะไอออนบางชนิดมีผลต่อการเจริญและผลิตสารสี เช่น การเติมเหล็กที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้การเจริญของเชื้อดีขึ้น เนื่องจากเหล็กช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส ทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสารอาหารและผลิตเป็นแอดิโนซีนไตรฟอสเฟตได้มากขึ้น ส่งผลให้เจริญเติบโตได้ดีขึ้น (Wu และคณะ, 2012) นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารแมกนีเซียมที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้แบคทีเรียเจริญและผลิตสารสีได้มากขึ้น เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ ส่งผลให้เซลล์มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น ผลิตแอดิโนซีนไตรฟอสเฟตได้มากขึ้น และเจริญได้ดีขึ้นตามลำดับ (Wu และคณะ, 2015) ทางด้านปัจจัยทางกายภาพ Zhou และคณะ (2015) ได้ศึกษาเรื่องชนิดของแหล่งกำเนิดแสงต่อการเจริญและผลิตสารสี พบว่าหลอดแอลอีดีสีแดงช่วยส่งเสริมการเจริญของ *Rhodospseudomonas* sp. ในขณะที่หลอดแอลอีดีสีน้ำเงินมีผลในการเหนี่ยวนำให้เกิดการผลิตสารสี นอกจากนี้ ยังมีรายงานที่ศึกษาในเรื่องเดียวกันโดย Kuo และคณะ (2012) พบว่าหลอดแอลอีดีสีน้ำเงินมีผลส่งเสริมทั้งการเจริญและผลิตสารสีของ *Rhodospseudomonas palustris* นอกจากรูปแบบของแหล่งกำเนิดแสงแล้ว ความเข้มของแสงที่ใช้ยังมีผลต่อการเจริญและผลิตสารสีเช่นกัน โดยความเข้มของแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสี มีค่าอยู่ในช่วง 2,000-4,000 ลักซ์ (Kuo และคณะ, 2012; Wu และคณะ, 2012; Saejung และ Apaiwong, 2015) นอกจากนี้ปัจจัยที่กล่าวข้างต้น การกวนผสมยังส่งผลต่อการเจริญของแบคทีเรีย โดยการกวนด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มโอกาสในการได้รับแสงของเซลล์และลดการรวมกลุ่มของเซลล์ มีผลทำให้แบคทีเรียมีการเจริญที่ดีขึ้น (Alagesan และคณะ, 2013)

สารสีของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกัมมะถัน สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ในหลายช่วงความยาวคลื่น จึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ในงานที่เกี่ยวข้องกับการเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cell: DSSC) เป็นรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจ โดย DSSC มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับกระบวนการสังเคราะห์แสง ถูกพัฒนาโดย O'Regan และ Grätzel (1991) ซึ่งมีข้อดี คือ กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน วัสดุและต้นทุนการผลิตต่ำ สามารถปรับคุณสมบัติเชิงแสงได้ แต่มีข้อเสีย คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้ายังต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์สุริยะที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน (Lee และคณะ, 2013) จึงจำเป็นที่ต้องพัฒนาเซลล์สุริยะชนิดนี้ต่อไป DSSC ประกอบขึ้นจากกระจกใสเคลือบสารนำไฟฟ้า 2 แผ่น ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง (Photo anode) และขั้วไฟฟ้าร่วม (counter electrode) ประกอบกันและเชื่อมโดยแผ่นพลาสติกพอลิเมอร์ ขั้วไฟฟ้ารับแสงเตรียมโดยใช้สีย้อมไวแสงที่ยึดเกาะกับอนุภาคระดับนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ส่วนของ

ขั้วไฟฟ้าร่วมถูกเคลือบด้วยโลหะแพลทินัม ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ช่องว่างระหว่างขั้วทั้งสองบรรจุอิเล็กโทรไลต์ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบขั้วไฟฟ้ารับแสง โมเลกุลของสีย้อมไวแสงจะเกิดการดูดกลืนแสงและเปลี่ยนสภาพจากสถานะพื้น (S_0) เป็นสถานะเร้า (S^*) และอิเล็กตรอนพลังงานสูงในสถานะเร้าจะถูกส่งผ่านไปสู่แถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ซึ่งมีระดับพลังงานที่ต่ำกว่า และถูกรวบรวมบริเวณหน้าสัมผัสของขั้วไฟฟ้ารับแสง จากนั้นจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์และถูกส่งต่อไปยังโมเลกุลของโลหะแพลทินัม ทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในชั้นของอิเล็กโทรไลต์ และชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจร (Grätzel, 2001)

แนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง มี 4 แนวทาง คือ พัฒนาโมเลกุลสีย้อมไวแสง พัฒนาระบบอิเล็กโทรไลต์ พัฒนาขั้วไฟฟ้ารับแสง และพัฒนาขั้วไฟฟ้าร่วม (Wu และคณะ, 2015) การพัฒนาสีย้อมชนิดใหม่ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น จะเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของสีย้อมไวแสงกับพื้นผิวของอนุภาคระดับนาโนของโลหะออกไซด์ และเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมไวแสงกับอนุภาคระดับนาโนของโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสงที่นำมาใช้ในการผลิตเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์มีหลายชนิด เช่น (Nazeeruddin และคณะ, 2001) ใช้ Black dye ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียมที่มีพอลิไพรีดินและไทโอไซยาเนต พบว่ามีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้า (Photoconversion efficiency; PCE) 10.4% ต่อมา Yella และคณะ (2011) ได้พัฒนาสีย้อมที่มีโครงสร้างเป็นพอร์ไพรีนที่มีธาตุสังกะสี (Zn) เป็นแกนกลาง ใช้งานร่วมกับระบบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของสารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์ ให้ค่า PCE 12.3% สีย้อมไวแสงที่กล่าวข้างต้นผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี ซึ่งมีกระบวนการผลิตยุ่งยาก ต้นทุนการผลิตสูง และเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีแนวคิดที่จะใช้สีย้อมไวแสงที่สกัดได้จากธรรมชาติมาใช้ทดแทน อีกทั้งยังมีรายงานการใช้สีย้อมไวแสงที่ได้จากแหล่งธรรมชาติกับ DSSC เช่น Tsui และคณะ (2014) นำสารสกัดแบคทีเรียโอสคลอโรฟิลล์ ซี จากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีเขียวชนิดสะสมก้ำมะถัน มาใช้เป็นสีย้อมไวแสง พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า 0.1% นอกจากนี้ Fu และคณะ (2014) ศึกษาการใช้สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสีและโปรตีน (ระบบแสง II) จากแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงสีม่วงเป็นสีย้อมในเซลล์สุริยะ พบว่าให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.49% ความหนาแน่นของกระแส 1.46 mA/cm² และฟิลแฟคเตอร์ 0.54 ต่อมา Yu และคณะ (2015) ได้นำระบบแสง I ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (*Arthrospira platensis*) และระบบแสง II ของผักโขม เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะพบว่ามีความมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.47% และ 0.52% ตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 คัดเลือกแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถัน ที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี
- 1.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียที่คัดเลือก
- 1.2.3 ศึกษาตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดแยกสารสี
- 1.2.4 ประยุกต์สารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงและพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.3.1 การคัดเลือกแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถัน ที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี
- 1.3.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียที่คัดเลือก
 - 1.3.2.1 แปรผันปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและผลิตสารสี
 - 1.3.2.2 การเพิ่มปริมาตรอาหารที่ใช้ในการเลี้ยง
 - 1.3.2.3 การทดสอบเลี้ยงเชื้อในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเบเกอรี่
- 1.3.3 การสกัดแยกสารสีและศึกษาสมบัติของสารสีที่สกัดแยกได้
 - 1.3.3.1 ศึกษาชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดแยกสารสี
 - 1.3.3.2 การตรวจสอบปริมาณสารสี
 - 1.3.3.3 การวิเคราะห์ระดับพลังงาน HOMO-LUMO และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap energy) ของสี
- 1.3.4 การประยุกต์สารสกัดสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงและการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ
 - 1.3.4.1 การประกอบเซลล์สุริยะและวัดประสิทธิภาพ
 - 1.3.4.2 การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี
- 1.4.2 ได้ภาวะที่เหมาะสมและอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีราคาถูก สำหรับเพาะเลี้ยงแบคทีเรียที่คัดเลือกให้ผลิตสารสีปริมาณมาก
- 1.4.3 ได้ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการสกัดแยกสารสี
- 1.4.4 สามารถนำสารสีที่ผลิตได้ไปประยุกต์เป็นสีย้อมไวแสง ในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงได้



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรม

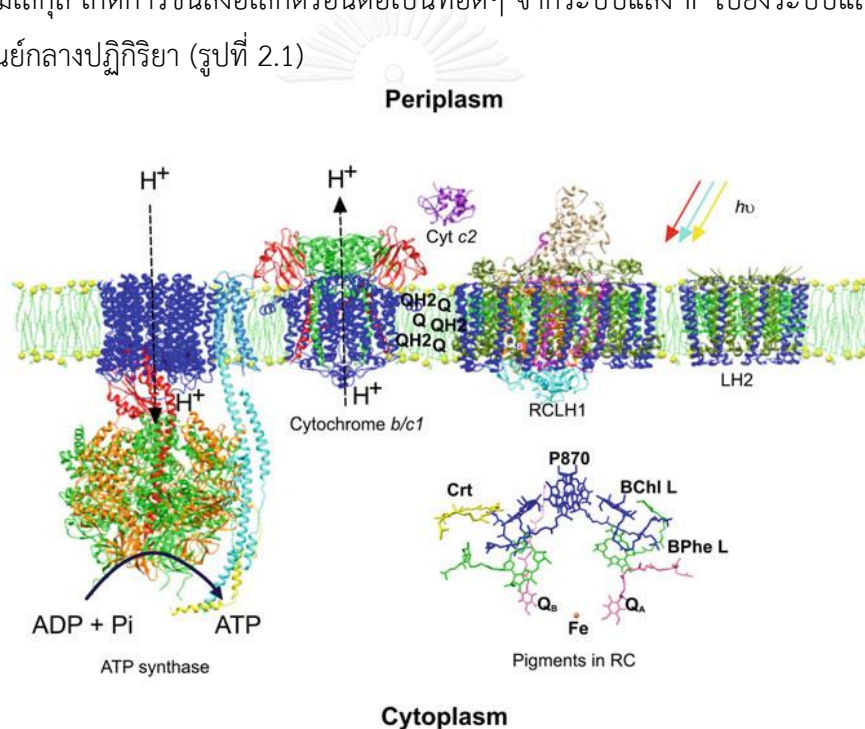
2.1 แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถัน

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถัน เป็นแบคทีเรียแกรมลบในกลุ่มโพรทีโอแบคทีเรีย (proteobacteria) มีรูปแบบการเจริญที่หลากหลายทั้ง โฟโตเฮเทโรทรอพ (Photoheterotroph) โฟโตออโตทรอพ (photoautotroph) และคีโมเฮเทโรทรอพ (chemoheterotroph) ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมขณะนั้น เช่น ปริมาณออกซิเจน สารอาหาร และการได้รับแสงหรือไม่ได้รับแสง เป็นต้น (Rudolf และ Grammel, 2012) เมื่อเจริญแบบโฟโตออโตทรอพ จะใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน และคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านวัฏจักรคัลวิน (Calvin cycle) ในขณะที่ เมื่อเจริญแบบเฮเอโรทรอพ จะใช้สารอินทรีย์ กรดไขมัน หรือคาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งคาร์บอน (Madigan และ Jung, 2009) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า เชื้อ *Rhodobacter capsulatus* สามารถเจริญแบบคีโมออโตทรอพได้ โดยอาศัยพลังงานเคมีแทนพลังงานจากแสง โดยใช้สารอินทรีย์ เช่น แก๊สไฮโดรเจน ไฮโอซัลเฟต และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ที่ความเข้มข้นต่ำ) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Khan และคณะ, 2015) แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถพบได้ตามแหล่งน้ำ หรือพื้นที่ที่มีน้ำขังและแสงแดงส่องถึง เมื่อเชื้อกลุ่มนี้เจริญแบบโฟโตทรอพ ในภาวะกึ่งไร้ออกซิเจน จะมีการผลิตพลังงานจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยมีสารสีภายในระบบสังเคราะห์แสงทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานจากแสงอาทิตย์ สารสีหลักที่พบในระบบสังเคราะห์แสงคือ แบคเทอริโอคลอโรฟิลล์ และสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ การปรากฏของสารสีนี้ ทำให้แบคทีเรียมีสีแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแบคทีเรีย (Giraud และคณะ, 2004) โดยจะพบสีม่วง สีม่วง-แดง สีแดง สีส้ม สีน้ำตาล และสีน้ำตาลเหลือง ในสายพันธุ์ที่มีแบคเทอริโอคลอโรฟิลล์ เอ เป็นสารสีหลักในระบบสังเคราะห์แสง และสีเขียว หรือสีเหลือง ในชนิดที่มีแบคเทอริโอคลอโรฟิลล์ บี เป็นสารสีหลักในระบบสังเคราะห์แสง สามารถจำแนกออกเป็น 21 จีนัส ตามลักษณะสัณฐานทางกายภาพได้ดัง ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกจีโนมของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน (Madigan และ Jung, 2009)

Taxonomy/Phylogeny	จีโนม	อักษรย่อ จีโนม	ลักษณะพื้นฐาน
Alphaproteobacteria	<i>Rhodopseudomonas</i>	<i>Rps.</i>	รูปร่างแท่งที่มีการแตก หน่อ
	<i>Rhodobaca</i>	<i>Rca.</i>	รูปร่างกลม/แท่งขนาด สั้น
	<i>Rhodobacter</i>	<i>Rba.</i>	รูปร่างแท่ง
	<i>Rhodovulum</i>	<i>Rdv.</i>	รูปร่างแท่ง/กลม
	<i>Rhodoblastusc</i>	<i>Rbl.</i>	รูปร่างแท่งที่มีการแตก หน่อ
	<i>Blastochloris</i>	<i>Blc.</i>	รูปร่างแท่งที่มีการแตก หน่อ
	<i>Rhodomicrobium</i>	<i>Rmi.</i>	รูปร่างแท่งที่มีการแตก หน่อ
	<i>Rhodobium</i>	<i>Rbi.</i>	รูปร่างแท่ง
	<i>Rhodoplanes</i>	<i>Rpl.</i>	รูปร่างแท่ง
	<i>Rhodocistac</i>	<i>Rcs.</i>	รูปร่างเกลียว
	<i>Rhodospirillum</i>	<i>Rsp.</i>	รูปร่างเกลียว
	<i>Phaeospirillum</i>	<i>Phs.</i>	รูปร่างเกลียว
	<i>Rhodopilac</i>	<i>Rpi.</i>	รูปร่างเกลียว
	<i>Rhodospira</i>	<i>Rsa.</i>	รูปร่างเกลียว
	<i>Rhodovibrioc</i>	<i>Rhv.</i>	รูปร่างแท่งโค้ง
	<i>Rhodothallasiumc</i>	<i>Rts.</i>	รูปร่างเกลียว
<i>Roseospira</i>	<i>Ros.</i>	รูปร่างเกลียว	
<i>Roseospirillum</i>	<i>Rss.</i>	รูปร่างเกลียว	
Betaproteobacteria	<i>Rhodocyclus</i>	<i>Rcy.</i>	รูปร่างแท่งโค้ง
	<i>Rhodoferaxc</i>	<i>Rfx.</i>	รูปร่างแท่ง/แท่งโค้ง
	<i>Rubrivivax</i>	<i>Rvi.</i>	รูปร่างแท่ง/แท่งโค้ง

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน มีศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) คล้ายกับระบบแสง II ในพืช คือ มีฟีโอไฟติน (pheophytin) เป็นตัวนำอิเล็กตรอน (electron carrier) และมีควิโนนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) โดยสารสีจะเรียงตัวอยู่ในแอนเทนนา คอมเพล็กซ์ (antenna complexes หรือ Light-Harvesting complexes) ที่มีลักษณะเป็นแผงรับพลังงาน ประกอบด้วย 2 คอมเพล็กซ์ คือ ระบบแสงหนึ่ง (Light-Harvesting complexes: LH1) และระบบแสงสอง (Light-Harvesting complexes: LH2) โดยระบบแสงหนึ่งจะล้อมรอบศูนย์กลางปฏิกิริยา เมื่อได้รับแสง สารสีในระบบแสงจะดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลถูกกระตุ้นให้เปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นเข้าสู่สถานะเร้า และหลุดออกจากโมเลกุล เกิดการขนส่งอิเล็กตรอนต่อเป็นทอดๆ จากระบบแสง II ไปยังระบบแสง I และถูกส่งไปยังศูนย์กลางปฏิกิริยา (รูปที่ 2.1)



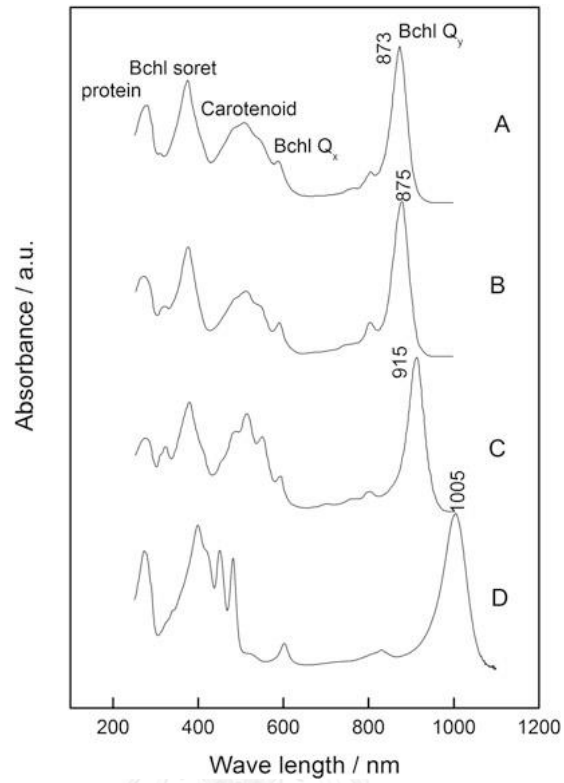
รูปที่ 2.1 กระบวนการไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชันในแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน (Qian, 2017)

สำหรับกระบวนการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาและ ไซโตโครม บีซี 1 คอมเพล็กซ์ (cytochrome bc1 complex) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ฝังตัวอยู่บนเยื่อหุ้มเซลล์ โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ เมื่อโมเลกุลของควิโนนเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะขับโปรตอนออกสู่ภายนอกเยื่อหุ้มเซลล์จำนวน 2 โมเลกุล ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของโปรตอนระหว่างภายนอกและภายในขึ้น จึงเกิดเป็นแรงขับเคลื่อนของโปรตอน (proton motive force) โดยโปรตอนจะถูกนำกลับเข้าสู่เซลล์ผ่านโปรตีนบนเยื่อหุ้มเซลล์ที่เรียกว่า เอทีพีซิน

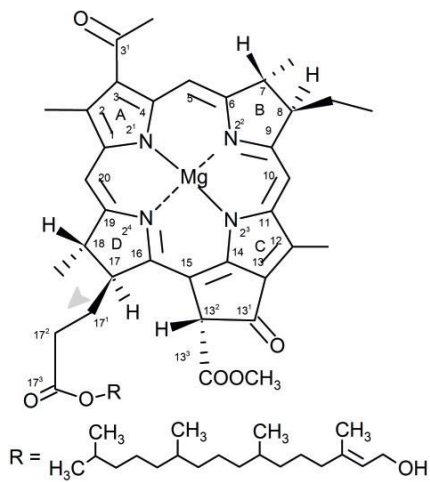
เทส (ATP synthase) และเกิดการผลิตสารพลังงานสูง คือ อะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (adenosine triphosphate: ATP) จาก อะดีโนซีนไดฟอสเฟต (adenosine diphosphate: ADP) และฟอสเฟต ส่วนอิเล็กทรอนิกส์จะถูกส่งกลับไปยังศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยา เรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่า ไซคลิกโฟโตฟอสโฟไรเลชัน (cyclic photophosphorylation) (Fixen และคณะ, 2016)

ระบบแสงแต่ละระบบจะประกอบด้วยสารสีที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับพลังงานแสง 2 ชนิด คือ แบคทีอริโอคลอโรฟิลล์ และสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ โดยแบคทีอริโอคลอโรฟิลล์ (bacteriochlorophyll) เป็นสารสีหลักที่ทำหน้าที่ในระบบแสงและศูนย์กลางปฏิกิริยา สูตรโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัว มีลักษณะโครงสร้างเป็นพอร์ไฟริน (porphyrin) ที่ประกอบด้วยวงแหวนไพโรล (Pyrrole ring) 4 วง โดยมีไนโตรเจน และแมกนีเซียมเชื่อมพันธะเป็นองค์ประกอบอยู่ตรงกลาง และส่วนหางที่มีไฮโดรคาร์บอนสายยาว เรียกว่า ไฟทอล (Phytol) เป็นสารสีที่มีสีเขียว ดูดกลืนแสงทั้งช่วงแสงที่ตามองเห็นและช่วงใกล้รังสีอินฟราเรด แบคทีอริโอคลอโรฟิลล์ที่สามารถพบได้ในแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถันมีอยู่ 2 ชนิด คือ แบคทีอริโอคลอโรฟิลล์ เอ มีช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 360 และ 815–960 นาโนเมตร และแบคทีอริโอคลอโรฟิลล์ บี ซึ่งมีช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 360 และ 1010–1040 นาโนเมตร (Madigan และ Jung, 2009) สำหรับสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) เป็นสารสีที่สีเหลือง ส้ม หรือแดง ดูดกลืนแสงในช่วง 400-500 นาโนเมตร ทำหน้าที่เป็นสารสีช่วย (accessory pigments) ดูดกลืนแสงช่วงที่สารสีหลักไม่สามารถดูดกลืนได้และทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) ป้องกันระบบแสงจากอันตรายจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตและสารอนุมูลอิสระ ตัวอย่างของสารสีในกลุ่มนี้ ได้แก่ โรดอปซิน (rhodopin) ลัยโคปีน (lycopene) สไปริลโลแซนธิน (spirilloxanthin) เป็นต้น (Brotosudarmo และคณะ, 2015)

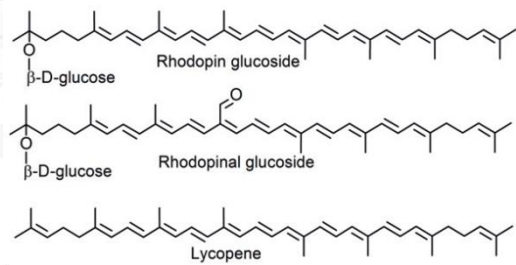
ก)



ข)



ค)



รูปที่ 2.2 ช่วงการดูดกลืนแสงของเซลล์และโครงสร้างของสารสีในระบบสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกำมะถัน

ก) ช่วงการดูดกลืนแสงของเซลล์ ข) แบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ และ ค) สารกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Qian, 2017)

2.2 การใช้ประโยชน์จากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน

เซลล์ของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน เป็นแหล่งสะสมของสารทรงคุณค่าหลากหลายชนิด เช่น สารสี (แบคเทอริโอคลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์) โคเอนไซม์คิวเท็น พลาสติกชีวภาพ เป็นต้น (Sabourin-Provost และ Hallenbeck, 2009) นอกจากนี้การที่เชื้อมีความสามารถใช้แหล่งคาร์บอนที่หลากหลาย จึงมีการนำเชื้อไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ควบคู่ไปกับการผลิตสารทรงคุณค่าชนิดต่างๆ (Nagadomi และคณะ, 2000) ซึ่งจะนำมายกตัวอย่าง โดยกล่าวทีละด้านดังนี้

2.2.1 ด้านพลังงาน

เนื่องจากการเผาฟอสซิลเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิง เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม พลังงานจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความสนใจ โดยการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสง เป็นวิธีที่มีการศึกษาในวงการวิชาการอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ต้นทุนต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถกำจัดของเสียควบคู่ไปกับการผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน (เช่น *Rhodobacter* *Rhodospirillum* และ *Rubrivivax*) สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้เมื่อเจริญแบบโฟโตเฮเทโรโทรฟ โดยใช้แสงเป็นแหล่งพลังงานและกรดอินทรีย์ (อะซิเตท บิวทีเรท และ โพรพิโอเนท) เป็นแหล่งคาร์บอน (Ghosh และคณะ, 2017) งานวิจัยที่ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยแบคทีเรียกลุ่มนี้แสดงใน ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยด้วยแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกัมมะถัน

เชื้อ	แหล่งคาร์บอน	ปริมาณ แก๊ส ไฮโดรเจน (mmol H ₂ /L)	การลดค่า COD (%)	อ้างอิง
<i>Rhodobacter sphaeroides</i> O.U.001	อะซิเตท บิวทีเรท และ โพรพิโอเนท	100	-	(Uyar และคณะ , 2009)
<i>Rhodopseudomonas</i> sp.	อะซิเตท บิวทีเรท โพรพิโอเนท และ เอซิลแอลกอฮอล์	255.4	96.6	(Wu และคณะ, 2010)
<i>Rhodopseudomonas</i> <i>palustris</i> W004	อะซิเตท บิวทีเรท โพรพิโอเนท และ เอซิลแอลกอฮอล์	233.2	93.7	(Wu และคณะ, 2010)

2.2.2 ด้านการเกษตร

แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกัมมะถัน มีสมบัติเป็นจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช หรือ พืชจีพีอาร์ (Plant Growth Promoting Rhizobacteria; PGPR) เนื่องจากมีความสามารถ ผลิตสารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ได้แก่ กรด 5-อะมิโนเลวูลินิก (5-aminolevulinic acid: ALA)

สาร ALA เป็นสารสำคัญที่ใช้ในด้านการเกษตร มีบทบาทเป็นสารกำจัดแมลงและศัตรูพืชทางชีวภาพ และลดภาวะความเครียดจากสิ่งแวดล้อมแก่ต้นพืช เช่น ภาวะความเครียดจากความเค็มในต้นข้าว ใช้โดยการเติมแบคทีเรียลงในแปลงเกษตรในรูปแบบของปุ๋ยชีวภาพ (Nunkaew และคณะ, 2014) นอกจากนี้สาร ALA ยังเป็นสารตั้งต้นในการผลิต สารในตระกูลเทตตระไพโรล ชนิดอื่นๆ เช่น พอร์ไฟริน ฮีม แบคเทอร์ริโอคอลลอโรฟิลล์ และวิตามิน บี 12 จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นได้ (Sasaki และคณะ, 2005) ซึ่งจะขอกกล่าวในลำดับถัดไป

นอกจากสาร ALA แล้วแบคทีเรียกลุ่มนี้ยังมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ไนโตรจีเนสเมื่อเจริญในภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด โดยเอนไซม์ชนิดนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนแก๊สไนโตรเจนให้กลายเป็นแอมโมเนีย ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ ทำให้พืชมีการเจริญดีขึ้น หรือเจริญได้ในพื้นที่ที่มีความสมบูรณ์ต่ำ ตัวอย่างการรายงานความสามารถในการผลิตเอนไซม์ชนิดนี้โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วง

ชนิดไม่สะสมกัมมะถัน ได้แก่ เมื่อเติม *Rhodopseudomonas palustris* สายพันธุ์ PS3 ลงในแปลงเกษตรที่ปลูกต้นกะหล่ำปลีจีน (*Brassica rapa chinensis*) ในรูปปุ๋ยชีวภาพสูตรเหลว พบว่า มีผลทำให้น้ำหนักแห้งของต้นกะหล่ำปลีจีน เพิ่มขึ้น 20-40% และเมื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเอนไซม์ไนโตรจีเนส (ตรวจสอบด้วย acetylene- reduction assay) ที่ผลิตโดยแบคทีเรียสายพันธุ์นี้พบว่ามีค่าอยู่ที่ 8377.3 nmol C₂H₄/h/OD600 (Wong และคณะ, 2014)

2.2.3 ด้านการแพทย์

วิตามิน บี12 (vitamin B₁₂) ถูกใช้ในการรักษาโรคโลหิตจาง และการอักเสบของเยื่อหุ้มเส้นประสาทตา นอกจากนี้ยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสุขภาพ ในรูปแบบอาหารเสริม โดยมีรายงานว่าแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกัมมะถันสามารถผลิตวิตามิน บี12 ได้ ตัวอย่างเช่น เชื้อ *Rhodobacter sphaeroides* สามารถผลิตวิตามิน บี12 ได้ 87 ไมโครกรัมต่อกรัม น้ำหนักเซลล์แห้ง (Sasaki และคณะ, 2005)

โคเอนไซม์คิวเท็น (Coenzyme Q₁₀) ใช้ในการรักษาโรคหัวใจ ความดันโลหิตสูง การบาดเจ็บของหลอดเลือด โรคโลหิตจาง ตัวอย่างของเชื้อที่มีความสามารถในการผลิตโคเอนไซม์-คิวเท็น ได้แก่ *Rhodobacter sphaeroides* ผลิตได้ 1.5 กรัมต่อลิตร *R. gelatinosus* ผลิตได้ 1.6 กรัมต่อลิตร และ *R. sphaeroides* P47 ผลิตได้ 1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยโคเอนไซม์คิวเท็นถูกผลิตในภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ และไม่มีแสง โดยปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการผลิต โคเอนไซม์คิวเท็น คือ ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction potential: ORP) ซึ่งควรมีค่าอยู่ที่ -200 mV (Jianga และ Yua, 2008)

ALA ถูกใช้ในกระบวนการ photodynamic therapy (PDT) ในการรักษาโรคมะเร็งผิวหนัง โดยการทาครีมที่มีส่วนผสมของสาร ALA ยังบริเวณที่มีเซลล์มะเร็ง สาร ALA จะไปสะสมอยู่ในเซลล์มะเร็งและเปลี่ยนเป็นสารโปรโตพอร์ไฟริน IX (protoporphyrin IX: PPIX) หลังจากนั้น 3-4 ชั่วโมง จะรักษาโดยการฉายแสง โดยเซลล์มะเร็งที่มีการสะสมของสาร PPIX จะถูกทำลายโดยออกซิเจนอะตอมเดี่ยว (singlet oxygen) ในขณะที่เซลล์ปกติจะไม่ถูกทำลาย เนื่องจากไม่มีการสะสมของสาร PPIX (de Souza และคณะ, 2016) โดยเชื้อ *Rhodobacter sphaeroides* มีความสามารถในการผลิตสาร ALA ปริมาณสูงสุดที่ 7.40 มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักเซลล์แห้ง (Liu และคณะ, 2016)

พอร์ไฟริน (porphyrin) ใช้ในการรักษาโรคตับ การวินิจฉัยโรคมะเร็ง และการรักษาโรคมะเร็ง โดยปกติสารพอร์ไฟรินจะได้จากสารคัดหลั่งของวุ้นหรือสัตว์อื่นๆ แต่ปัญหาเรื่องโรคติดต่อในวุ้นทำให้สารพอร์ไฟรินที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว ไม่เป็นที่ยอมรับในวงการการแพทย์ ดังนั้นการผลิตสารพอร์ไฟรินด้วยจุลินทรีย์ จึงเป็นที่นิยมมากกว่า โดยเชื้อ *Rhodobacter sphaeroides*

สามารถผลิตสารพอร์ไฟรินได้ประมาณ 10–100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเจริญในภาวะที่มีออกซิเจน และไม่มีแสง (Sasaki และคณะ, 2005)

2.2.4 ด้านอุตสาหกรรม

ปัจจุบันการผลิตสารแคโรทีนอยด์โดยกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี สามารถผลิตได้ในปริมาณน้อย และไม่เป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้กับอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอาง ดังนั้นการผลิตสารแคโรทีนอยด์จากจุลินทรีย์จึงได้รับความสนใจ โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมกัมมะถัน ที่มีความสามารถในการผลิตสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ เช่น *Rhodospirillum rubrum* ผลิตแคโรทีนอยด์ประมาณ 2 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักเซลล์แห้ง (Wang และคณะ, 2012) นอกจากนี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอางแล้ว สารแคโรทีนอยด์ ยังถูกใช้งานด้านการปศุสัตว์ ในแง่ของอาหารเสริมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสวยงามในสัตว์ เช่น ปลาแซลมอน และปลาซวยงาม (Brown และคณะ, 2014)

พลาสติกชีวภาพ เชื้อกลุ่มนี้มีความสามารถในการผลิตสารพอลิบีตาไฮดรอกซีบิวทิเรต (Poly- β -hydroxybutyrate: PHB) :ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติก จึงสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มห่อของ หรือนำมาหลอมเป็นภาชนะต่างๆได้ มีข้อดี คือ สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยจะถูกผลิตเมื่อเชื้อเจริญในอาหารที่คาร์บอนปริมาณมาก แต่ขาดสารอาหารบางอย่างที่จำเป็นต่อการเจริญ เช่น ไนโตรเจนฟอสฟอรัส จึงมีการสะสม PHB ในรูปกรานูลภายในเซลล์เพื่อเป็นแหล่งสะสมอาหาร โดยการผลิต PHB มักจะได้ผลผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจนออกมาด้วย (Corneli และคณะ, 2016) ตัวอย่างการรายงานการผลิต PHB โดยแบคทีเรียในกลุ่มนี้ ดังที่แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การผลิต PHB โดยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน

เชื้อ	แหล่งคาร์บอน	PHB content (%)	การผลิต แก๊ส ไฮโดรเจน	อ้างอิง
<i>Rhodopseudomonas palustris</i> 42OL	กรดอะซิติก	1-4	ไม่ผลิต	(Meng และคณะ, 2017)
	กรดบิวทีริก	18.1	ผลิต	
<i>Rhodospirillum rubrum</i> UR2	กรดมาลิก	40	ผลิต	(Melnicki และคณะ, 2009)
<i>Rhodopseudomonas palustris</i>	กรดบิวทีริก	7	ผลิต	(Padovani และคณะ, 2016)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน

2.3.1 แหล่งคาร์บอน

แบคทีเรียชนิดนี้มีความสามารถในการใช้แหล่งคาร์บอนที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็น กรดไขมัน (Cardena และคณะ, 2017) สารอินทรีย์ เช่น กรดมาลิก (Assawamongkholisiri และคณะ, 2016) อะซีเตท (Wu และคณะ, 2010) และ บิวทีเรท (Uyar และคณะ, 2009) เป็นต้น และคาร์โบไฮเดรต เช่น น้ำตาลซัคคาโรส (Zhou และคณะ, 2014) น้ำตาลกลูโคส (Preston, 2014) เป็นต้น โดยปกติแล้วแหล่งคาร์บอนที่นิยมศึกษาในการเลี้ยงแบคทีเรียชนิดนี้ คือ สารอินทรีย์ประเภทกรดไขมันขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ใช้ง่าย เข้าสู่กระบวนการเมแทบอลิซึมผ่านทางวัฏจักรกรดไตรคาร์บอกซิลิก จึงทำให้เชื้อเจริญเติบโตได้รวดเร็วและให้ผลผลิตเป็นมวลชีวภาพสูง (Ghosh และคณะ, 2017) นอกจากชนิดของแหล่งคาร์บอนจะมีผลต่อการเจริญของเชื้อแล้ว ปริมาณของคาร์บอนที่ได้รับก็มีผลต่อการเจริญของเชื้อเช่นกัน โดย Saejung และ Apaiwong (2015) ได้ศึกษาหาปริมาณแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีสารแคโรทีนอยด์ของเชื้อ *Rhodopseudomonas faecalis* PA2 โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้กรดมาลิกเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่า ความเข้มข้นของกรดมาลิกที่เหมาะสมต่อเชื้อ คือ 0.8% โดยมวลต่อปริมาตร หรือ 8 กรัมต่อลิตร โดยให้มวลชีวภาพและปริมาณสารแคโรทีนอยด์สูงสุดที่ 44 กรัมต่อลิตร และ 285 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยผู้วิจัยให้เหตุผลไว้ว่า กรดมาลิกเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ในวัฏจักรกรดไตรคาร์บอกซิลิก (TCA

cycle) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการเมแทบอลิซึม และผลิตโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์ ดังนั้นการได้รับปริมาณแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมจึงทำให้เชื้อเจริญเติบโตได้ดีและให้มวลชีวภาพสูง นอกจากนี้ ในวัฏจักรกรดไตรคาร์บอกซิลิก ยังเกี่ยวข้องกับการผลิตอนุโมลอิสระ และ ออกซิเจนอะตอมเดี่ยว ซึ่งมีผลกระตุ้นกระบวนการผลิตสารแคโรทีนอยด์ (carotenogenesis) ซึ่งถ้าใช้กรดมาลิกในปริมาณที่มากเกินไป (1.6 และ 3.2% โดยมวลต่อปริมาตร) มีผลเชิงลบต่อแบคทีเรีย สังเกตได้จากมวลชีวภาพและปริมาณสารแคโรทีนอยด์ที่ลดลง

2.3.2 แหล่งไนโตรเจน

สารอาหารที่แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงสามารถใช้เป็นแหล่งไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) (Zhou และคณะ, 2014) สารสกัดจากยีสต์ (Liu และคณะ, 2016) กลูตาเมต (glutamate) (Hakobyan และคณะ, 2012) และ แอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) (Getha และคณะ, 1998) เช่นเดียวกับกรณีของแหล่งคาร์บอน การได้รับแหล่งไนโตรเจนในปริมาณที่จะช่วยสนับสนุนการเจริญของแบคทีเรีย โดย Hakobyan และคณะ (2012) ได้แปรผันปริมาณสารสกัดจากยีสต์และกลูตาเมตที่เหมาะสม ต่อการเจริญและผลิตแก๊สไฮโดรเจนของเชื้อ *Rhodobacter sphaeroides* สายพันธุ์ MDC6521 โดยใช้ซัคซิเนต (30 มิลลิโมลาร์) เป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าปริมาณสารสกัดจากยีสต์และกลูตาเมตที่เหมาะสม คือ 1.03 กรัมต่อลิตร และ 2 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยให้มวลชีวภาพสูงสุดที่ 1.03 กรัมต่อลิตร และปริมาณผลผลิตแก๊สไฮโดรเจน 6.25 มิลลิโมลต่อกรัมน้ำหนักเซลล์แห้ง นอกจากนี้ (Saejung และ Apaiwong, 2015) ได้ศึกษาปริมาณสารสกัดจากยีสต์ที่ใช้เป็นแหล่งไนโตรเจน พบว่าปริมาณที่เหมาะสม คือ 0.4% โดยมวลต่อปริมาตร หรือ 4 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ทั้งมวลชีวภาพและปริมาณสารแคโรทีนอยด์สูงสุดที่ภาวะนี้ โดยสารสกัดจากยีสต์ทำหน้าที่เป็นทั้งแหล่งไนโตรเจน และวิตามิน ที่มีผลช่วยในการเจริญและสร้างส่วนประกอบภายในเซลล์ การเติมในปริมาณที่เหมาะสมจึงส่งผลให้เชื้อผลิตมวลชีวภาพปริมาณมาก

2.3.3 ปริมาณโลหะไอออน

โลหะไอออน ทำหน้าที่ในการเป็นโคแฟกเตอร์ โคเอนไซม์ หรือองค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์ ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณของสารโลหะ ต่อการเจริญและผลิตสารสี ได้แก่ Wu และคณะ (2012) แปรผันหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ Fe^{2+} ต่อการเจริญของเชื้อ *Rhodobacter sphaeroides* Z08 ควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสีย โดยพบว่าการเติม Fe^{2+} ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถผลิตมวลชีวภาพและลดค่า COD ได้สูงที่สุด เมื่อเลี้ยงแบคทีเรียที่ภาวะดังกล่าว พบว่าได้มวลชีวภาพสูงสุด 4800 กรัมต่อลิตร และลดค่า COD ได้ 93.4% การแปรผัน

ความเข้มข้นของ Fe^{2+} มีผลต่อการเจริญของเชื้อ เนื่องจาก Fe^{2+} ทำหน้าที่เป็นบริเวณเร่ง (active site) ของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส จึงทำให้มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ โดยเอนไซม์ชนิดนี้ทำหน้าที่ในการผลิตพลังงาน การเพิ่มปริมาณ Fe^{2+} จึงทำให้มีปริมาณสารเอทีพีเพิ่มมากขึ้น เชื้อสามารถดึงไปใช้สำหรับการเจริญและผลิตองค์ประกอบภายในเซลล์มากขึ้น ส่งผลให้เชื้อเจริญการมากขึ้น จากการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส และการผลิตสารเอทีพี หลังการเลี้ยงภายใต้ภาวะที่เหมาะสม พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นถึง 48.1% และ 42.4% ตามลำดับ

นอกจาก Fe^{2+} แล้ว Wu และคณะ (2015) ยังศึกษาโลหะไอออนชนิดอื่น ได้แก่ Mg^{2+} โดยศึกษาผลของการแปรผันความเข้มข้นของ Mg^{2+} ต่อการเจริญและผลิตสารแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ของเชื้อ *Rhodobacter sphaeroides* Z08 ควบคู่กับการบำบัดน้ำเสียเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า โดยพบว่าความเข้มข้นของ Mg^{2+} ที่เหมาะสม คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลในการเพิ่มปริมาณการผลิตมวลชีวภาพถึง 70% ทำให้ได้มวลชีวภาพสูงสุดที่ 3630 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดค่า COD ได้ 86% และลดเวลาในการกักน้ำเสียในระบบจาก 96 เป็น 72 ชั่วโมง โดยกลไกที่ทำให้ Mg^{2+} มีผลสนับสนุนการเจริญของเชื้อ เนื่องจาก Mg^{2+} เป็นองค์ประกอบหลักของสารแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ ซึ่งเป็นสารสีหลักในระบบสังเคราะห์ด้วยแสงของแบคทีเรีย การเพิ่ม Mg^{2+} จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์สารแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ให้มีปริมาณมากขึ้น (ปริมาณสารแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์เพิ่มขึ้น 60%) ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตฟอสโฟรีเลชันมากขึ้น ผลิตสารเอทีพีได้มากขึ้นตามลำดับ (เพิ่มขึ้น 30%) จึงทำให้เชื้อสามารถดึงสารเอทีพี เพื่อไปใช้ในการเจริญและผลิตเป็นองค์ประกอบต่างๆได้ดียิ่งขึ้น

2.3.4 ความเข้มแสง

Zhou และคณะ (2014) ศึกษาผลของความเข้มแสง ต่อการผลิตมวลชีวภาพ สารแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ และสารแคโรทีนอยด์ ควบคู่กับการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เชื้อ *Rhodospseudomonas* sp. พบว่าเมื่อให้ความเข้มแสง 2000 ลักซ์ เหมาะสมต่อผลิตมวลชีวภาพ ให้มวลชีวภาพสูงสุดที่ 2645 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่า COD ลดลง 94.7% หลังการเลี้ยงเป็นเวลา 120 ชั่วโมง สำหรับการสะสมสารสีทั้งสองชนิด จะให้ผลในทางตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ สารแคโรทีนอยด์จะถูกสะสมมาก เมื่อความเข้มแสงมาก โดยมีการสะสมสูงสุดที่ 1.455 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเลี้ยงด้วยความเข้มแสง 8000 ลักซ์ ในขณะที่สารแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์จะถูกสะสมสูงสุดที่ความเข้มแสงต่ำ ที่ 1000 ลักซ์ โดยมีปริมาณสูงสุดที่ 1.545 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำเสียที่มี น้ำตาลแซคคาโรส กรดมาลิก และ โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งคาร์บอน โดยมีค่า COD เริ่มต้นอยู่ที่ 6000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.5 ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง

Kuo และคณะ (2012) ศึกษาเกี่ยวกับผลของชนิดหลอดไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงต่อการเจริญและผลิต car โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้หลอดไส้ (IL) หลอดไฟฮาโลเจน (HL) หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์(FL) และหลอดไฟแอลอีดี สีต่างๆ (ขาว (LW) เหลือง (LY) แดง (LR) น้ำเงิน (LB) และเขียว (LG)) ที่ความเข้มแสง 2000 ลักซ์ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ให้แสง โดยใช้เชื้อ *Rhodospseudomonas palustris* หลังเลี้ยงเป็นเวลา 144 ชั่วโมง พบว่าลำดับหลอดไฟฟ้าที่มีผลต่อเจริญของแบคทีเรียเรียงลำดับจากมากไปน้อย (LB = IL) > FL > LW = HL = LR = (LG = LY) โดยชนิดหลอดไฟที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ หลอดแอลอีดีสีน้ำเงิน

ถ้าพิจารณาทั้งในแง่การใช้พลังงานและประสิทธิภาพการผลิต พบว่าหลอดไฟแอลอีดี จะให้ผลเหนือกว่าหลอดไฟชนิดอื่นๆ และเมื่อพิจารณาถึงสีของหลอดไฟแอลอีดี ที่ใช้พบว่า หลอดไฟแอลอีดีสีน้ำเงิน (470 nm) และสีขาว (460 นาโนเมตร) ให้ผลดีกว่าหลอดไฟสีอื่น ทั้งนี้เนื่องจาก ช่วงการปล่อยแสงมีความเหมาะสมกับช่วงการดูดกลืนแสงของเซลล์แบคทีเรีย ทำให้แบคทีเรียนำแสงไปใช้สำหรับการเจริญได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงปริมาณการสะสมสารแคโรทีนอยด์ พบว่าหลอดไฟที่มีการปล่อยแสงในช่วงใกล้เคียงกับ 450-550 นาโนเมตร ที่เป็นช่วงการดูดกลืนแสงของสารแคโรทีนอยด์ ซึ่งได้แก่ หลอดไฟแอลอีดีสีเหลือง (595 นาโนเมตร) สีเขียว (520 นาโนเมตร) และสีน้ำเงิน (470 นาโนเมตร) มีปริมาณการสะสมสารแคโรทีนอยด์ มากกว่าหลอดไฟสีแดงที่มีช่วงปล่อยคลื่นแสงช่วง 630 นาโนเมตร

Zhou และคณะ (2015) ศึกษาผลของชนิดหลอดไฟฟ้าที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงต่อการเจริญและผลิตสารสีของเชื้อ *Rhodospseudomonas* sp. พบว่าให้ผลที่แตกต่างกัน โดยชนิดหลอดไฟที่ใช้ในการทดลองงานนี้ ประกอบด้วย หลอดไฟแอลอีดีสีแดง (650 นาโนเมตร) สีเหลือง (595 นาโนเมตร) สีน้ำเงิน (470 นาโนเมตร) สีขาว และหลอดไส้ (400-780 นาโนเมตร) จากผลการทดลองพบว่า การให้แสงจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน มีผลทำให้เชื้อมีการเจริญและผลิตสารสีที่แตกต่างกัน โดยพบว่า เชื้อมีการลดค่า COD และผลิตมวลชีวภาพสูงสุดเมื่อเลี้ยงด้วยหลอดไฟ LED สีแดง โดยให้มวลชีวภาพสูงสุดที่ 2580 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดค่า COD 88.6% โดยใช้เวลากักน้ำในระบบ (hydraulic retention time) เพียง 72 ชั่วโมง ซึ่งค่าที่รายงานนี้มากกว่าค่าที่ได้จากชุดการทดลองที่เลี้ยงด้วยหลอดไส้ โดยคณะผู้วิจัย ได้กล่าวถึงสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการชุดการทดลองที่เลี้ยงด้วยหลอดไฟแอลอีดีสีแดง มีอัตราการผลิตสาร ATP ในปริมาณมากกว่าชุดทดลองที่เลี้ยงโดยหลอดไส้ จึงส่งผลให้เชื้อมีการเจริญที่ดีกว่าตามลำดับ ในแง่ของการสะสมสารสี พบว่าการเลี้ยงเชื้อด้วยหลอดไฟแอลอีดีสีเหลือง มีการผลิตสารแบคทีริโอคลอโรฟิลล์ และแคโรทีนอยด์ปริมาณมากที่สุดที่ 850 และ

950 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยผู้วิจัยได้อธิบายถึงเหตุผลที่มีการผลิตสารแคโรทีนอยด์มากกว่า สารแคโรทีนอยด์คลอโรฟิลล์ไว้ว่า แสงที่ใช้ในการทดลองมีความเหมาะสมกับช่วงการดูดกลืนแสงของ สารแคโรทีนอยด์มากกว่า จึงทำให้ถูกผลิตและสะสมในปริมาณที่มากกว่า (Zhou และคณะ, 2015)

2.4 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเป็นรูปแบบหนึ่งของเซลล์สุริยะ ที่มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสิ่งมีชีวิต ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1991 โดย Oregon และ Grätzel แรกเริ่มมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ 7.1% และ ประสิทธิภาพควอนตัมของเซลล์สุริยะที่ประมาณ 80% (O'Regan และ Grätzel, 1991) จุดเด่นของ เซลล์สุริยะชนิดนี้คือ มีต้นทุนการผลิตต่ำ มีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน น้ำหนักเบา สามารถ ทำงานได้ในภาวะที่หลากหลาย และสามารถปรับคุณสมบัติเชิงแสงได้โดยการเปลี่ยนชนิดของสีย้อม ทำให้ได้รับสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะผลิตเพื่อการค้าได้ไม่ยากและราคา ถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีขายอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน

2.4.1 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ประกอบด้วย 4 หลัก คือ ขั้วไฟฟ้า สารกึ่ง ตัวนำอนุภาคขนาดนาโนเมตร สีย้อมไวแสง และอิเล็กโทรไลต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Grätzel, 2001)

ขั้วไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้ารับแสง (photo anode) และขั้วไฟฟ้า ร่วม (counter electrode) มีลักษณะเป็นกระจกใสที่เคลือบสารนำไฟฟ้า fluorine doped tin oxide (FTO) หรือ indium-doped tin oxide (ITO) โดยขั้วไฟฟ้ารับแสงจะเป็นบริเวณที่มีสารกึ่ง ตัวนำยึดติดอยู่ ทำหน้าที่ในการจ่ายอิเล็กตรอนให้แก่ขั้วตรงข้าม หรือขั้วไฟฟาร่วม ซึ่งจะทำหน้าที่ถ่าย โอนอิเล็กตรอนกลับคืนเข้ามายังเซลล์ โดยที่ผิวของขั้วไฟฟาร่วมจะมีการเคลือบสารโลหะแพลทินัม หรือแกรไฟต์เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

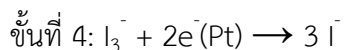
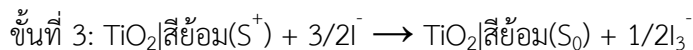
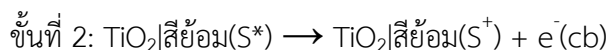
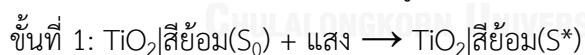
สารกึ่งตัวนำอนุภาคขนาดนาโนเมตร คือ วัสดุที่มีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) อยู่ระหว่างสารนำไฟฟ้า (conductor) กับฉนวน (insulator) ทำหน้าที่เป็นชั้นโมเลกุล ของสีย้อมไวแสงเกาะ รับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสีย้อมและส่งต่อไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสง สารโลหะ ออกไซด์ที่จะนำมาให้เป็นสารกึ่งตัวนำในเซลล์สุริยะชนิดนี้ ควรมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่กว้าง (มากกว่า 3 eV) โดยชนิดของโลหะออกไซด์ที่นิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำมากที่สุด คือ ไทเทเนียมได ออกไซด์ (TiO₂) รองลงมา คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

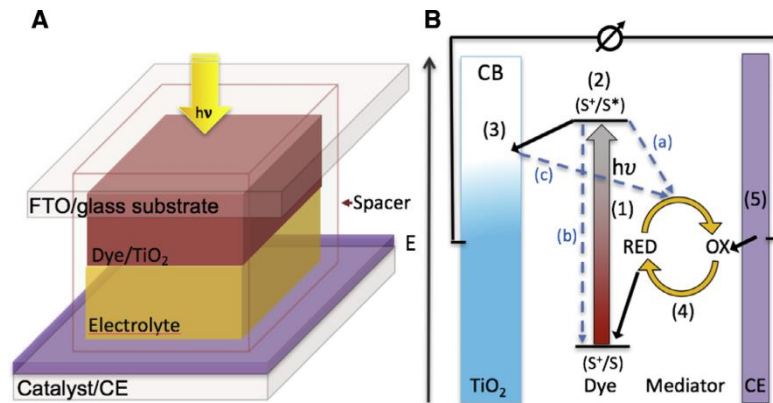
สีย้อมไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ เมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลของสีย้อมจะถูกกระตุ้นและหลุดออก เคลื่อนที่ไปยังอนุภาคของสารกึ่งตัวนำและขั้วไฟฟ้าต่อไป โดยสมบัติของสีย้อมไวแสงที่เหมาะสม คือ สามารถดูดกลืนแสงได้ช่วงกว้างหลายความยาวคลื่น มีความเสถียร และมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้สามารถยึดเกาะบนผิวของสารกึ่งตัวนำได้ดี

อิเล็กโทรไลต์ เป็นตัวกลางในการส่งผ่านประจุ มักอยู่ในรูปของเหลว ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเพื่อนำไปชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox)

2.4.2 หลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

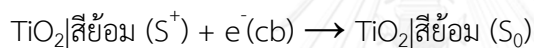
หลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมี 4 ขั้นตอน ขั้นแรก เมื่อแสงตกกระทบขั้วไฟฟ้ารับแสง โมเลกุลของสีย้อมที่ยึดเกาะอยู่บนชั้นฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ จะทำหน้าที่ดูดกลืนแสงโดยอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลของสีย้อม จะถูกกระตุ้นทำให้เปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (ground state, S_0) ไปสู่สถานะเร้า (excited state, S^*) จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction band, cb) ของอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีระดับพลังงานที่ต่ำกว่า (ขั้นที่ 2) และเคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำไปยังขั้วไฟฟ้า ทำงานแล้วออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ และวิ่งกลับเข้าสู่เซลล์ผ่านทางขั้วไฟฟ้าร่วม ถัดมาในขั้นที่ 3 สารอิเล็กโทรไลต์ จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าร่วม และทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้แก่โมเลกุลสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป (S^*) ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) โดยมีโลหะแพลตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ขั้นที่ 4) โดยกระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากวงจรภายในสู่ภายนอกของเซลล์ (Gong และคณะ, 2012)





รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (Freitag และคณะ, 2016)

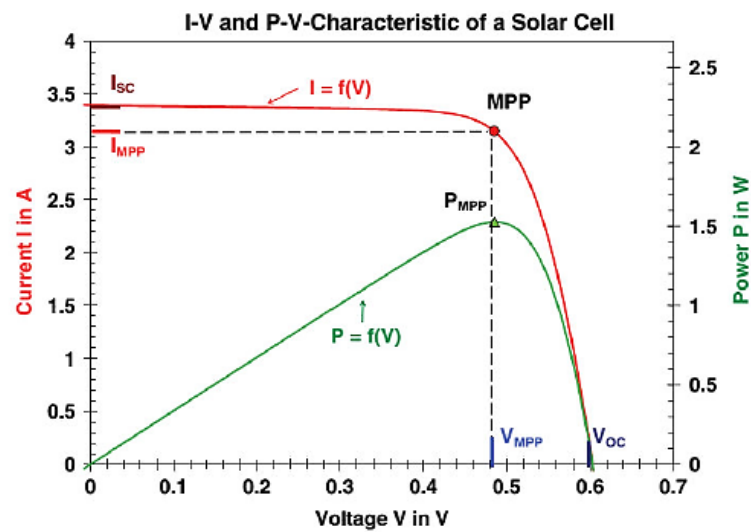
นอกจากนี้อาจจะเกิดปฏิกิริยาที่เป็นผลในเชิงลบ คือ การที่อิเล็กตรอนตกกลับไปยังโมเลกุลของสีย้อม หรือ คูรีด็อกซ์ในระบบอิเล็กโทรไลต์ (electron recombination) ทำให้ไม่ถูกส่งต่อไปยังแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ และไม่เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า ดังสมการ



2.4.3 พารามิเตอร์ที่ใช้บ่งชี้คุณสมบัติและประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

ค่าคุณสมบัติของเซลล์สุริยะ เป็นค่าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์สุริยะ ใช้ในการพิจารณาลักษณะการใช้งาน ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณจำนวนแผงเซลล์สุริยะที่ต้องใช้ต่อหนึ่งพื้นที่ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

Peak power (P_{\max})	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีหน่วยเป็น วัตต์ (W)
Operating voltage (V_{mp})	คือ แรงดันไฟฟ้าในขณะที่ต่อกับโหลด มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
Operating current (I_{mp})	คือ กระแสไฟฟ้าในขณะที่ต่อโหลด มีหน่วยเป็น แอมป์ (A)
Open circuit voltage (V_{oc})	คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
Short circuit current (I_{sc})	คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร มีหน่วยเป็น แอมป์ (A)



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้า (IV curve) และกำลังไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ (Hashim และ A., 2016)

ค่ามาตรฐานที่ใช้บอกประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ คือ ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า (photo-current-conversion efficiency; PCE) ซึ่งจะบอกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเซลล์สุริยะในอุดมคติจะมีค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะประมาณ 33.7% ซึ่งเป็นไปตามค่าขอบเขตทางทฤษฎีของ Shockley-Queisser limit โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ (Gong และคณะ, 2012)

$$PCE (\%) = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100$$

$$PCE (\%) = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in}} \times 100$$

เมื่อ	P_{max}	คือ	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์ผลิต
	P_{in}	คือ	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเซลล์
	I_{max}	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด
	V_{max}	คือ	ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

$$\text{PCE (\%)} = \frac{\text{Isc} \times \text{Voc} \times \text{FF}}{\text{Pin}} \times 100$$

เมื่อ Isc คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร
 Voc คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
 FF คือ ค่าฟิลล์แฟคเตอร์

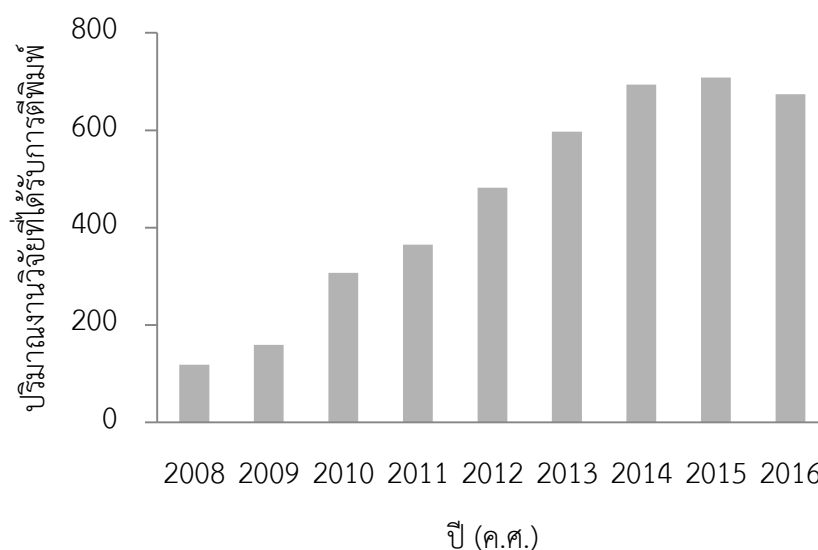
ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ เป็นค่าที่บอกคุณภาพของเซลล์ ซึ่งคำนวณได้จากกราฟกระแสและศักย์ไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ (IV curve) รูปที่ 2.4 โดยนำพื้นที่ใต้กราฟของกระแสไฟฟ้าสูงสุดและค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดหารด้วยพื้นที่ใต้กราฟที่สร้างจาก Isc และ Voc เมื่อทดสอบโดยฉายแสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 100 mW/cm^2 ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของเซลล์สุริยะ ภายใต้อุณหภูมิ 25°C ดังสมการ

$$\text{FF} = \frac{\text{Imax Vmax}}{\text{Isc Voc}}$$

นอกจากนี้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ ยังต้องคิดการสูญเสียพลังงาน จากความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับสีย้อม และการสูญเสียกระแสแก๊วไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้น เราจึงต้องพิจารณาถึง ความต้านทานภายใน ซึ่งก็คือ ความต้านทานอนุกรม (Rseries) และความต้านทานขนัด (Rshunt) โดย Rseries เกิดมาจากการสื่อสารแต่ละชนิดมีสภาพการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะที่บริเวณพื้นผิวของสาร ซึ่งเกิดจากรอยต่อระหว่างอนุภาคของสาร ส่วน Rshunt เกิดจากการสูญเสียอิเล็กตรอนให้แก่แก๊วไฟฟ้าและบริเวณรอยต่อของสารที่มีขั้วต่างกัน ซึ่งค่าความต้านทานทั้งสองจะส่งผลต่อค่า FF ของเซลล์ โดยเซลล์สุริยะที่มีประสิทธิภาพสูง ควรจะมีค่า Rshunt น้อย และค่า Rseries มาก (Bernède, 2008)

2.5 แนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

การศึกษาพัฒนาเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ได้รับความสนใจและมีแนวโน้มที่จะพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีงานวิจัยที่ถูกต้องพิมพ์เกี่ยวกับเรื่องนี้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละปี (รูปที่ 2.5) ที่ผ่านมามีแนวคิดที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดนี้ โดยการปรับปรุงส่วนประกอบต่างๆภายในเซลล์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 แนวทาง คือ พัฒนาสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้ารับแสง พัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์ พัฒนาขั้วไฟฟ้าร่วม และพัฒนาสีย้อมไวแสง



รูปที่ 2.5 ปริมาณงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ถูกตีพิมพ์ในแต่ละปี ระหว่างปี ค.ศ. 2008 ถึง 2016 (แหล่งที่มาของข้อมูล: ISI Web of Science, Thomson Reuters)
หมายเหตุ ผู้วิจัยเริ่มทำงานวิจัยในปี ค.ศ. 2014

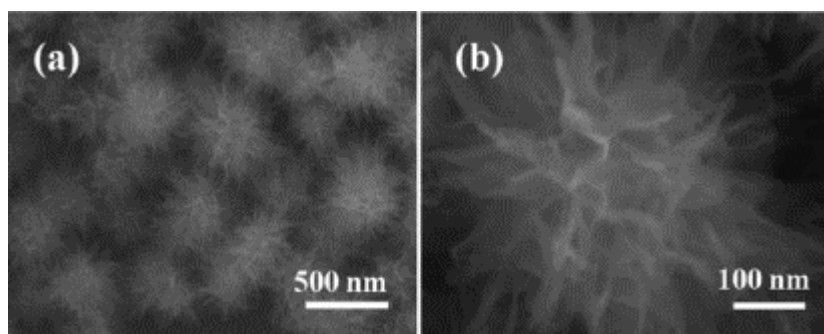
2.5.1 การพัฒนาสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้ารับแสง

สารกึ่งตัวนำ มีหน้าที่หลักๆ 2 ประการ คือ เป็นที่ยึดเกาะของโมเลกุลสีย้อม และส่งต่ออิเล็กตรอนที่ได้รับจากโมเลกุลสีย้อมไปยังวงจรรายนอกเซลล์ โดยปกติสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ในรูปแบบอนุภาคนาโนทรงกลม (spherical TiO_2 nanoparticle) มีพื้นที่ผิวอยู่ที่ประมาณ 50 ตารางเมตรต่อกรัม ปัญหาของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ คือ เมื่อเตรียมเป็นชั้นฟิล์ม จะมีการเรียงตัวของอนุภาคอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้การส่งต่ออิเล็กตรอนเป็นไปได้ยาก และมีประสิทธิภาพต่ำ ส่งต่อไปยังวงจรรายนอกเซลล์ได้ช้า และอัตราการเกิด electron recombination สูง (Maçaira และคณะ, 2013) จึงได้มีความพยายามที่จะพัฒนาสารกึ่งตัวนำ ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม คือ มีพื้นที่ผิวมาก มีความโปร่งแสงและอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนสูง ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

2.5.1.1 การปรับเปลี่ยนรูปร่างลักษณะของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำที่ใช้กับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ต้องมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง มีความหนาในระดับไมโครเมตร ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการเตรียมสารกึ่งตัวนำ มีผลต่อรูปร่างและลักษณะของสารที่เตรียม

ได้ โดยกระบวนการหลักๆที่ใช้ในการเตรียม มีดังนี้ กระบวนการโซลเจล (Amerioun และคณะ, 2015) กระบวนการ hydrothermal/solvothermal (Bao และคณะ, 2008; Wu และคณะ, 2013) กระบวนการ spray pyrolysis (Huo และคณะ, 2013) การเคลือบฟิล์มแบบ atomic layers deposition (Son และคณะ, 2013) และสกรีนโดยเทคนิค doctor blade (Ahmadi และคณะ, 2014) เป็นต้น การเตรียมด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันนี้ ทำให้ได้สารกึ่งตัวนำ (เช่น TiO_2 , ZnO , SnO_2 และ Nb_2O_5 เป็นต้น) ที่มีรูปร่างลักษณะที่ต่างกัน เช่น แท่งนาโน (nanorod) (Ekar และคณะ, 2016) ท่อนาโน (nanotube) (Batmunkh และคณะ, 2017) และรูปทรง 3 มิติอื่นๆ (Lin และคณะ, 2014) โดยส่วนมากการปรับปรุงรูปร่างลักษณะของอนุภาคระดับนาโนของสารกึ่งตัวนำ จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะสูงขึ้น ตัวอย่างเช่น (Ye และคณะ, 2013) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะผิวขรุขระ (รูปที่ 2.6) ซึ่งทำให้อนุภาคมีพื้นที่ผิวมากขึ้น (มากกว่า 100 ตารางเมตรต่อกรัม) และเพิ่มสมบัติการกระจายแสง โดยพบว่าเมื่อนำไปใช้ประกอบเซลล์สุริยะ มีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 28% เมื่อเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบอนุภาคนาโนทรงกลมแบบปกติ (P25) โดยเพิ่มจาก 6.64% เป็น 8.50% เมื่อใช้งานร่วมกับสีย้อมชนิด N719



รูปที่ 2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการปรับพื้นผิว

2.5.1.2 การโดปด้วยไอออนชนิดต่างๆ

การโดปด้วยไอออนของสารต่างชนิดกัน จะมีผลในการปรับเปลี่ยนระดับแถบพลังงานนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ โดยสารที่นิยมใช้ในการโดป ได้แก่ ฟลูออรีน (F) ไอโอดีน (I) แมกนีเซียม (Mg) นีโอเบียม (Nb) และทองแดง (Cu) เป็นต้น โดยมีผลช่วยลดอัตราการเกิด electron recombination และช่วยชะลอให้อิเล็กตรอนอยู่ในช่วงพักรับแสงนานขึ้น (Luo และคณะ, 2011; Pang และคณะ, 2012; Stefik และคณะ, 2013) การโดปด้วยไอออนของสารดังกล่าวไม่ค่อยมีผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์สุริยะ จึงมีการรายงานเกี่ยวกับเรื่องนี้ไม่มากนัก

2.5.1.3 การเจือด้วยโลหะชั้นสูง (noble metals)

เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนของโลหะชั้นสูง เช่น ทองคำ (Au) เงิน (Ag) มีสมบัติเซอ์เฟอเพลซมาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance effect: SPR) การเจือสารกึ่งตัวนำด้วยอนุภาคระดับนาโนของโลหะชั้นสูงดังกล่าว จะมีผลช่วยจำกัดแสงที่ตกกระทบและเพิ่มความยาวของทางเดินแสง (optical path length) (Chen และคณะ, 2013) ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้ เช่น (Mohamed และคณะ, 2016) ได้เจืออนุภาคระดับนาโนผสมระหว่างทองคำและเงิน ในอัตราส่วน 4 ต่อ 1 ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์พลาสมอนของอนุภาคระดับนาโนของโลหะชั้นสูง โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 5.81% ซึ่งมากกว่าชุดควบคุมที่ไม่มี การเจืออนุภาคระดับนาโนของทองคำและเงิน ประมาณ 52.1%

2.5.1.4 การปรับปรุงโดยการเติมโลหะออกไซด์ชนิดอื่น

การปรับปรุงในลักษณะนี้มีทั้งการเติมโลหะออกไซด์ชนิดที่เป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น สตรอนเชียมออกไซด์ (SrCO_3) (Wang และคณะ, 2012) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) (Gao และคณะ, 2013) หรือเติมโลหะออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เช่น สตรอนเทียมไททาเนียมออกไซด์ (SrTiO_3) (Kim และคณะ, 2013) SiO_2 (Wang และคณะ, 2013) (Wang และคณะ, 2013) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SnO_2) (Desai และคณะ, 2013) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) (Kim และ Moon, 2012) เป็นต้น โดยมีผลช่วยลดการตกกลับของอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนถูกส่งออกไปยังวงจรรายนอกของเซลล์มากขึ้น นอกจากนี้ ยังมีการนำสารกึ่งตัวนำไปผสมกับวัสดุคาร์บอนซึ่งเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้า (เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ และแกรฟีน เป็นต้น) (Cheng และคณะ, 2013; Xu และคณะ, 2013) โดยให้ผลเช่นเดียวกับการผสมด้วยโลหะออกไซด์ คือ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่านไออิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสง และทำให้เซลล์สุริยะที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตัวอย่างการนำวัสดุคาร์บอนมาใช้งานร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ โดย Lv และคณะ (2017) ได้ใช้วัสดุคาร์บอน graphitic carbon nitride ($\text{g-C}_3\text{N}_4$) ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เตรียมเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง มีผลทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าดีขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกระแสและประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเตรียมขั้วเพียงอย่างเดียว โดยความหนาแน่นของกระแสเพิ่มจาก 9.75 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็น 11.29 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 3.87% เป็น 4.51% เมื่อใช้งานร่วมกับสีย้อม N719 นอกจากนี้ $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ยังช่วยในเรื่องของการดูดกลืนแสง โดยปรับการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในช่วงของแสงที่ตามองเห็น ส่งผลให้ขั้วไฟฟ้ารับแสงสามารถดูดซับพลังงานจากแสงได้มากขึ้น (Lv และคณะ, 2017)

2.5.1.5 การเคลือบด้วยสารที่มีสมบัติในการปรับช่วงการดูดกลืนแสง

(up/down conversion material)

โดยปกติเซลล์สุริยะสีย้อมไวแสง จะมีสีย้อมที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จะดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็น (visible light) แต่มีสารบางชนิดที่มีสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวใกล้รังสีอินฟราเรด ได้แก่ Yb^{3+} - Tm^{3+} / Yb^{3+} - Ho^{3+} -doped NaYF_4 และ Er^{3+} / Yb^{3+} -doped LaF_3 (Chang และคณะ, 2013; Yu และคณะ, 2013) จึงได้มีแนวคิดที่จะนำสารดังกล่าวมาใช้งานร่วมกับสารกึ่งตัวนำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ ในปี ค.ศ. 2017 Hao และคณะ ได้รายงานถึงการใช้สาร NaYF_4 - Yb - Er doped NaYF_4 - Nd ร่วมกับสีย้อม IR783 ในการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง พบว่า มีผลทำให้ช่วงการดูดกลืนแสงของเซลล์เพิ่มมากขึ้น สามารถดูดกลืนแสง

ได้ทั้งในช่วงแสงที่ตามองเห็นแสงช่วงใกล้รังสีอินฟราเรด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์สุริยะสูงขึ้นจาก 7.573% เป็น 8.568% (Hao และคณะ, 2017)

2.5.1.6 การปรับสภาพพื้นผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการเกาะของสีย้อม

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของสีย้อมและพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ได้มีรายงานเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะดังกล่าว โดยการปรับสภาพผิวของสารกึ่งตัวนำด้วยกรดไนตริก โดย Kim และคณะ (2013) พบว่าเมื่อแช่ขั้วไฟฟ้ารับแสง ในสารละลายกรดไนตริก (pH 1) เป็นเวลา 350 นาที ก่อนนำไปแช่ในสารละลายสีย้อมชนิด N719 และนำไปประกอบเซลล์ตามปกติ พบว่ามีปริมาณสีย้อมที่เกาะบนฟิล์มของสารกึ่งตัวนำเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการปรับสภาพผิว โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.13×10^{-8} เป็น 9.21×10^{-8} โมลต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานยังเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 9.23% โดยการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกช่วยเพิ่มความเป็นประจุของพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ทำให้สีย้อมยึดเกาะได้ดีขึ้น มีปริมาณอิเล็กตรอนที่ส่งไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสงมากขึ้น และประสิทธิภาพของเซลล์สูงขึ้นตามลำดับ

2.5.2 การพัฒนาระบบอิเล็กโทรไลต์

คูรีดอกซ์ในระบบอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการขนส่งอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าร่วมไปยังโมเลกุลของสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป และทำให้กระแสไหลครบวงจร ดังนั้นความสามารถในการละลายและส่งผ่านไอออนของคูรีดอกซ์จึงมีผลต่อการส่งอิเล็กตรอนกลับแก่โมเลกุลสีย้อม (dye regeneration) และความไวในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้าร่วม (Wang และคณะ, 2012) นอกจากนี้ประเภทของอิเล็กโทรไลต์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของเซลล์สุริยะ อิเล็กโทรไลต์สามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพออกเป็น 3 ประเภท คือ อิเล็กโทรไลต์รูปแบบของเหลว อิเล็กโทรไลต์รูปแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว อิเล็กโทรไลต์รูปแบบของแข็ง

2.5.2.1 อิเล็กโทรไลต์รูปแบบของเหลว

อิเล็กโทรไลต์รูปแบบของเหลว เป็นรูปแบบอิเล็กโทรไลต์ที่พัฒนามาก่อนอิเล็กโทรไลต์รูปแบบอื่นๆ โดยคูรีดอกซ์ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ คูโอไอโอดี/ไตรไอโอไอดี (I^-/I_3^-) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายประการ ดังนี้ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไอโอไอดีกับขั้วไฟฟ้าได้เร็ว ทำให้การส่งต่ออิเล็กตรอนกลับไปยังโมเลกุลของสีย้อมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ มีการซึมผ่านที่ดี

ราคาถูก และมีขั้นตอนในการเตรียมไม่ยุ่งยาก (Wang และคณะ, 2012) ปัจจุบันในมีรายงานถึงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ใช้ไอโอดีน/ไตรไอโอดีนเป็นคูรีดอกซ์ในระบบไวสูงที่สุดที่ 11% (Yu และคณะ, 2010) สำหรับข้อเสียของคูรีดอกซ์ไอโอดีน/ไตรไอโอดีน คือ มีช่วงการดูดกลืนแสงซ้อนทับกับการดูดกลืนแสงของสีย้อม (ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 430 นาโนเมตร) มีสมบัติกัดกร่อนโลหะชั้นสูง ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าร่วม มีขีดจำกัดของค่า Voc อยู่ที่ 0.9 โวลต์ (Yen และคณะ, 2012) จึงได้มีการพัฒนาคูรีดอกซ์ชนิดอื่นมาใช้ทดแทน เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์โพลีไพริดีล ($\text{Co}^{(II/III)}$ polypyridyl complex) (Wu และคณะ, 2016) คูรีดอกซ์เฟอร์โรซีนีเนียม/เฟอร์โรซีน ferrocenium/ferrocene (Fc/Fc^+) couple (Bentley และคณะ, 2016) สารประกอบเชิงซ้อนของคอปเปอร์ ($\text{Cu}^{(I/II)}$ complex) (Freitag และคณะ, 2016) และไทโอเลต/ไดซัลไฟด์ (thiolate/disulfide mediator) (Hersant และคณะ, 2017) ข้อเสียของอิเล็กโทรไลต์รูปแบบของเหลว คือ ระเหยง่ายเมื่อใช้ในภาวะที่มีอุณหภูมิสูง จึงทำให้เซลล์สุริยะมีประสิทธิภาพไม่เสถียร

2.5.2.2 อิเล็กโทรไลต์รูปแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว

อิเล็กโทรไลต์รูปแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลวถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาการระเหยง่ายของอิเล็กโทรไลต์รูปแบบของเหลว โดยจะมีการเติมสารพอลิเมอร์ลงในของเหลวไอออนิก เพื่อให้อิเล็กโทรไลต์มีลักษณะที่เป็นของแข็งมากขึ้น สารพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประกอบพอลิเอทิลีนออกไซด์ (polyethylene oxide) สารประกอบพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (poly-vinyl dine fluoride) และสารประกอบพอลิไวนิลแอซีเตต (polyvinyl acetate) (Bai และคณะ, 2013) พบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์สุริยะที่ใช้อิเล็กโทรไลต์รูปแบบนี้อยู่ที่ประมาณ 8-9% ซึ่งต่ำกว่าประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลต์รูปแบบของเหลว เนื่องจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนภายในระบบเกิดขึ้นได้ยากกว่า อีกทั้งยังคงประสบปัญหาเรื่องของการรั่วไหลหลังการปิดผนึกเซลล์ จึงจำเป็นต้อง อาศัยเทคนิคการปิดผนึกที่มีประสิทธิภาพ เมื่อต้องการนำไปใช้ในภาวะที่มีอุณหภูมิสูง (Li และคณะ, 2009) ดังนั้น อิเล็กโทรไลต์รูปแบบของแข็งจึงถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวแทน

2.5.2.3 อิเล็กโทรไลต์รูปแบบของแข็ง

อิเล็กโทรไลต์รูปแบบของแข็งเป็นการใช้วัสดุนำส่งโฮล (hole transporting material; HTMs) เป็นตัวกลางในการขนส่งอิเล็กตรอนแทนของอิเล็กโทรไลต์รูปแบบของเหลว โดยเซลล์สุริยะที่ใช้อิเล็กโทรไลต์รูปแบบนี้ ได้แก่ เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงรูปแบบของแข็ง (solid state dye sensitized solar cell: SS-DSSCs) และเซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์ (perovskite cell) สาร HTMs ที่นิยมเอามาใช้ ได้แก่ สารอนินทรีย์ชนิดพี เช่น สารประกอบคอปเปอร์ (I) ไอโอดีน/คอปเปอร์

ไทโอไซยานेट (CuI/CuSCN) และ สารประกอบซีเซียมทินไอโอไดด์ (CsSnI_3) เป็นต้น (Li และคณะ, 2009) โดยตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์รูปแบบของแข็ง ได้แก่ (Hodes, 2013) ได้ใช้ CsSnI_3 เป็น HTMs ในเซลล์สุริยะ เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนผ่านโฮลได้ดี (high hole mobility) ราคาถูก หาได้ง่าย ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ โดยให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ 10.2% ต่อมา (Burschka และคณะ, 2013) ได้รายงานถึงความสำเร็จในการใช้สาร Spiro-MeOTAD กับ เพอรอฟสไกต์เซลล์ (perovskite-based SS-DSSCs) โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดถึง 15% ถึงแม้ว่าการใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบของแข็ง จะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการระเหยของอิเล็กโทรไลต์เมื่อใช้ในภาวะอุณหภูมิสูงได้ แต่ยังมีจุดด้อยที่ต้องได้รับการพัฒนาต่อไป คือ การถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านโฮลขนส่งมีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้การขนส่งอิเล็กตรอนยังช้าไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ช้า และมีค่าใช้จ่ายในการเตรียมค่อนข้างสูง (Ye และคณะ, 2015)

2.5.3 การพัฒนาชีวไฟฟ้าร่วม

ชีวไฟฟ้าร่วม ทำหน้าที่ในการดึงอิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกเซลล์กลับสู่วงจรภายใน และเร่งปฏิกิริยารีดักชันของคูรีดอกซีในระบบอิเล็กทรอนิกส์หรือโฮลขนส่ง (hole transport) ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงรูปแบบของแข็ง ดังนั้นสารที่นำมาเตรียมชีวไฟฟ้าร่วม ควรมีสสมบัติ มีการนำไฟฟ้าที่ดี สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้เร็ว มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมีความเสถียรสูง (Yen และคณะ, 2012) โดยส่วนใหญ่โลหะชั้นสูงจะถูกนำมาเคลือบบนพื้นผิวของชีวไฟฟ้าร่วม เพื่อให้มีสมบัติดังกล่าว โลหะชั้นสูงที่นิยมใช้ในการเตรียมชีวไฟฟ้าร่วม ได้แก่ แพลตินัม ทองคำ และเงิน เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของคูรีดอกซีในระบบอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี หรือมีอัตราการถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านโฮลขนส่งสูงในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงรูปแบบของแข็ง (Wu และคณะ, 2012) ข้อเสียของการใช้โลหะชั้นสูงในการเตรียมชีวไฟฟ้าร่วม คือ มีราคาแพง และถูกกัดกร่อนโดยคูรีดอกซีบางชนิด (ไอโอไดด์/ไตรไอโอไดด์) เมื่อใช้ร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบของเหลว จึงได้มีการพัฒนาสารตัวอื่นมาใช้ทดแทน ได้แก่ วัสดุประเภทคาร์บอน สารอินทรีย์ พอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า และสารผสมอื่นๆ

2.5.3.1 วัสดุประเภทคาร์บอน

วัสดุประเภทคาร์บอนมีราคาถูก มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนที่ดี นำไฟฟ้าได้ ทนความร้อนและการกัดกร่อน วัสดุประเภทคาร์บอน (เช่น คาร์บอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุน คาร์บอนนาโนทิวบ์ และแกรฟีน เป็นต้น) จึงได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้เตรียมเป็นชีวไฟฟ้าร่วม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตเซลล์ (Fan และคณะ, 2010; Kavan และคณะ, 2011; Wang

และคณะ, 2013) ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วัสดุประเภทคาร์บอนในการเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม เช่น Yang และคณะ ได้ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ร่วมกับแกรไฟต์ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานใกล้เคียงกับการใช้สารแพลตินัม โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 8.23% เมื่อใช้งานร่วมกับสีย้อม N719 (Yang และคณะ, 2013)

2.5.3.2 สารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำมาเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม ได้แก่ สารประกอบของซัลไฟด์ (เช่น โคบอลต์ซัลเฟต (CoS_2) คอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInS_2) เป็นต้น) (Chang และคณะ, 2013; Faber และคณะ, 2013) สารประกอบคาร์ไบด์ (เช่น ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เป็นต้น) (Zhao และคณะ, 2013) สารประกอบไนไตรด์ (เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และซิงค์ไนไตรด์ (ZrN) เป็นต้น) (Wen และคณะ, 2011; Wei และคณะ, 2013) สารประกอบฟอสไฟด์ (เช่น Ni_2P และ Ni_5P_4) (Wu และ Wu, 2013) สารประกอบเทลลูไรด์ (เช่น โคบอลต์เทลลูไรด์ (CoTe) และ นิกเกิลเทลลูไรด์ (NiTe_2) เป็นต้น) (Gao และคณะ, 2013) และโลหะออกไซด์ (เช่น ทังสเตนออกไซด์ (WO_2) และ วาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) เป็นต้น) (Wu และคณะ, 2011) โดยสารอนินทรีย์ดังกล่าวมักถูกใช้ในกรณีที่มีการขยายขนาด เพื่อประกอบเป็นเซลล์ขนาดใหญ่ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต แต่ประสิทธิภาพและความเสถียรยังต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับสารโลหะชั้นสูงในการเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม

2.5.3.3 พอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า

สารพอลิเมอร์บางชนิดมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม เช่น สารพอลิอะนิลีน (polyaniline; PANI) สารพอลิ 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน (poly(3,4-ethylenedioxythiophene; PEDOT) และสารพอลิไพโรล (polypyrrole; PPy) เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี มีความโปร่งแสง และมีความเสถียร จึงมีการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์สุริยะ โดยเฉพาะเซลล์สุริยะที่มีความโปร่งแสงและมีความยืดหยุ่น (flexible DSSCs) (Trevisan และคณะ, 2011; Xia และคณะ, 2011; Sun และคณะ, 2013) โดยสารพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วมมากที่สุด คือ สาร PEDOT ซึ่งจะมีได้ไปด้วยสารบางชนิดที่มีสมบัติในการเพิ่มความสามารถในการละลายของ PEDOT และทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เช่น สารคลอรีนโมโนออกไซด์ (ClO^-) สารพอลิสไตรีนซัลโฟเนต (poly(styrenesulfonate); PSS) และสารพอลิออกโซเมทาเลต (polyoxometalate; POM) (Zhang และคณะ, 2012; Yuan และคณะ, 2013) สำหรับข้อเสียของการใช้พอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าในการเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม คือ ประสิทธิภาพต่ำและราคาสูง จึงต้องการการพัฒนาแก้ไขต่อไป

2.5.3.4 สารผสมอื่นๆ

โดยส่วนใหญ่จะนิยมใช้สารผสมกันตั้งแต่ 2 ชนิด ขึ้นไป เช่น การผสมระหว่างวัสดุคาร์บอนกับสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์อื่นๆ ดังที่แสดงใน ตารางที่ 2.4 ซึ่งพบว่าการเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วมที่ได้จากการผสมกันของสารบางชนิด ให้ค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือสูงกว่าการใช้โลหะชั้นสูง

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเมื่อใช้สารผสมเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

ขั้วไฟฟ้าร่วม	สี ย้อม	ขั้วไฟฟ้า ทำงาน	อิเล็กโทร ไลต์	PCE%	เปรียบเทียบ กับ Pt (%)	อ้างอิง
แกรฟีน-NiO	N719	TiO ₂	I ⁻ /I ₃ ⁻	7.42	8.18	(Dao และคณะ, 2014)
แกรฟีน-NiS ₂	N719	TiO ₂	I ⁻ /I ₃ ⁻	8.55	8.15	(Li และคณะ, 2013)
คาร์บอนนาโน ทิวบ์-แกรฟีน	N719	TiO ₂	I ⁻ /I ₃ ⁻	8.23	7.61	(Jo และคณะ, 2012)
คาร์บอนนาโน ทิวบ์-NiS	N719	TiO ₂	I ⁻ /I ₃ ⁻	7.90	6.36	(Xiao และคณะ, 2013)
PEDOT: PSS- CuInS ₂	N719	TiO ₂	I ⁻ /I ₃ ⁻	6.50	6.51	(Zhang และ คณะ, 2012)
PEDOT:PSS-CoS	N719	TiO ₂	I ⁻ /I ₃ ⁻	5.40	6.10	(Sudhagar และ คณะ, 2011)

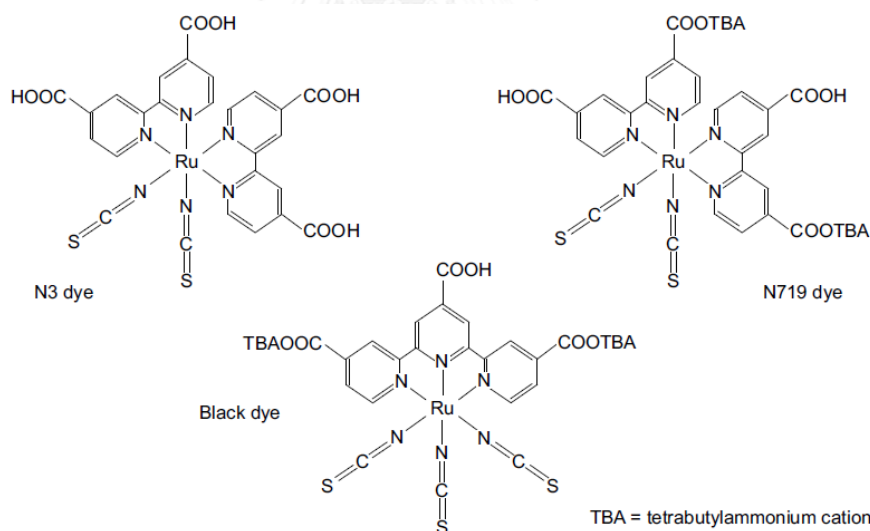
2.5.4 การพัฒนาสีย้อมไวแสง

สีย้อมไวแสง เป็นองค์ประกอบหลักในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานแสงและผลิตอิเล็กตรอนให้แก่สารกึ่งตัวนำ โดยสีย้อมที่ดีควรมีคุณสมบัติ คือ ดูดกลืนแสงได้ในช่วงกว้าง ทั้งในช่วงแสงที่ตามองเห็นและใกล้รังสีอินฟราเรด มีระดับพลังงาน HOMO-LUMO ที่เหมาะสมต่อการส่งอิเล็กตรอนไปยังแถบการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและรับอิเล็กตรอนกลับจากคูรีด็อกซ์ในระบบอิเล็กโทรไลต์ มีหมู่ฟังก์ชันสำหรับการเกาะกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ มีความเสถียร และมีการละลายที่ดี (Yella และคณะ, 2011; Zhang และคณะ, 2013) ที่ผ่านมามีความพยายามที่จะพัฒนาสีย้อมรูปแบบต่างๆหลากหลายชนิด โดยแบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ สีย้อมของ

สารประกอบรูเทเนียม-พอลิไพริดีล สีย้อมจากสารอินทรีย์ สีย้อมพอร์ไฟริน ควอนตัมดอท เพอโรฟสไกต์

2.5.4.1 สีย้อมของสารประกอบรูเทเนียม-พอลิไพริดีล (Ru (II) polypyridyl dyes)

เป็นสีย้อมที่ได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพการทำงานสูง ซึ่งเป็นผลมาจากช่วงการดูดกลืนแสงกว้าง (ตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเล็ตถึงช่วงใกล้รังสีอินฟราเรด) ระดับพลังงานมีความเหมาะสมกับแถบนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ และไอโอดีน/ไตรไอโอดีนที่ใช้เป็นคูรีด็อกซ์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ มีความเสถียรสูง (Hardin และคณะ, 2012) โดยประสิทธิภาพของสีย้อมรูเทเนียม ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ 10.0% ในปี ค.ศ. 1993 (Nazeeruddin และคณะ, 1993) จนมาถึง 11.7% ในปี ค.ศ. 2010 (Yu และคณะ, 2010) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของสีย้อมประเภทนี้คงที่อยู่ประมาณ 10-11% มานานมากกว่า 10 ปี ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก การที่สีย้อมรูเทเนียม มีค่า molar extinction coefficient ต่ำ ($10,000\text{--}20,000\text{ M}^{-1}\text{ cm}^{-1}$) อีกทั้งมีปัญหาเรื่องราคาและความเป็นพิษ จึงทำให้มีการพัฒนาสีย้อมชนิดอื่นขึ้นมาทดแทน ตัวอย่างของสีย้อมชนิดนี้ได้แก่ สีย้อม N3 สีย้อม N719 สีย้อม Black dye เป็นต้น (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของสีย้อมของสารประกอบรูเทเนียม-พอลิไพริดีล (Jin และคณะ, 2009)

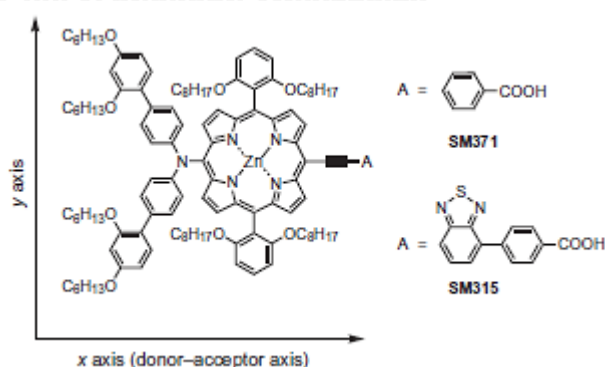
2.5.4.2 สีย้อมจากสารอินทรีย์ชนิดปราศจากโลหะ (metal-free organic dye)

เป็นสีย้อมอีกประเภทที่นิยมใช้ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เนื่องจากมีค่า molar extinction coefficient สูง ($50,000\text{--}200,000\text{ M}^{-1}\text{ cm}^{-1}$) ราคาคุ้มทุนต่อการผลิต มีลักษณะ

โครงสร้างที่หลากหลาย (Yen และคณะ, 2012) มีการออกแบบโครงสร้างให้มีลักษณะเป็น ตัวให้อิเล็กตรอน- π ช่องว่าง-ตัวรับอิเล็กตรอน (donor- π spacer-acceptor: D- π -A) โดยสีย้อมที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ สีย้อมอินทรีย์ชนิด D- π -A โดยมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 10% (Zeng และคณะ, 2010; Yella และคณะ, 2013) ข้อเสียของสีย้อมประเภทนี้ คือ มีช่วงการดูดกลืนแสงแคบ มักพบปัญหาการเกาะกลุ่มกันของโมเลกุลสีย้อม และความไม่เสถียร (Wu และคณะ, 2012)

2.5.4.3 สีย้อมพอร์ไฟริน

สีย้อมพอร์ไฟริน เป็นย้อมอีกหนึ่งชนิดที่นิยมนำมาใช้กับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิด push-pull type dipolar Zn(II) porphyrins เนื่องจากสามารถดูดกลืนแสงได้หลายช่วง ทั้งช่วง 400-500 นาโนเมตร (Soret band) และ 500-700 นาโนเมตร (Q-band) โมเลกุลมีความเสถียร มีระดับพลังงานที่เหมาะสม (Campbell และคณะ, 2007; Li และ Diau, 2013) โดยในปี ค.ศ. 2010 สีย้อมพอร์ไฟรินชนิด YD-2 ให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานที่ 11% (Bessho และคณะ, 2010) และถูกพัฒนาต่อเป็นสีย้อมพอร์ไฟรินชนิด YD-2-o-C8 ในปี ค.ศ. 2011 โดยมีค่าประสิทธิภาพที่ 11.9% ความท้าทายของการพัฒนาสีย้อมชนิดนี้ คือ การปรับปรุงให้สีย้อมสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงกว้างและมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้าทำงานได้ในเวลาเดียวกัน (Kimura และคณะ, 2012) ปัจจุบันสีย้อมพอร์ไฟรินที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ สีย้อมชนิด SM315 ที่ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2014 โดย (Mathew และคณะ, 2014) ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 13% ตัวอย่างโครงสร้างของสีย้อมพอร์ไฟริน ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสีย้อมพอร์ไฟริน ชนิด SM371 และ SM315

2.5.4.4 สารดูดกลืนแสงชนิดควอนตัมดอท (Quantum-dot sensitizer)

สารกึ่งตัวนำประเภทสารอนินทรีย์ที่มีอนุภาคระดับนาโน (Inorganic semiconductor quantum dots: QDs) เป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ถูกใช้กับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เนื่องจากมีขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่หลากหลาย ส่งผลให้มีช่องว่างระดับพลังงานแตกต่างกัน มีค่า optical adsorption coefficient สูง มีไดโพลโมเมนต์มาก และถูกกระตุ้นให้เกิดการส่งอิเล็กตรอนได้หลายครั้ง (multiple exciton generation) โดยสารดูดกลืนแสงชนิดควอนตัมดอท แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ cadmium-chalcogenide QDs (เช่น CdS CdSe CdTe) (Lee และ Lo, 2009) lead-chalcogen-ide QDs (เช่น PbS PbSe) (Plass และคณะ, 2002; Ip และคณะ, 2012) และ antimony sulfide Sb_2S_3 QDs (Rhee และคณะ, 2013) การใช้มักใช้เป็นลักษณะการทำงานร่วมกัน (Co-sensitization) เช่น CdS/CdSe (PCE% เท่ากับ 5.42) (Santra และ Kamat, 2012) CdTe/CdSe (PCE% เท่ากับ 6.76) (Wang และคณะ, 2013) and $CdSe_xTe_{1-x}$ (PCE% เท่ากับ 6.36) QDs โดยประเภทของ QDs ที่มีการศึกษาวิจัยสูงสุด คือ lead-chalcogenide เนื่องจากสามารถดูดกลืนแสงในช่วงใกล้รังสีอินฟราเรดได้ และให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูง (7.4%) (Ip และคณะ, 2012) จนถึงตอนนี้ ปัญหาที่ยังคงพบในสารดูดกลืนแสงชนิดควอนตัมดอท คือ การที่มีค่า Voc และฟิลล์แฟกเตอร์ต่ำ เนื่องจากการมีการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างการส่งจากควอนตัมดอทไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้มีค่าความต้านทานภายในสูง (Ye และคณะ, 2015)

2.5.4.5 ตัวดูดซับพลังงานแสงชนิดเพอโรฟสไกต์ (Perovskite-based sensitizers)

เพอโรฟสไกต์ เป็นวัสดุที่เกิดการผสมระหว่างตะกั่วกับเฮไลด์ มีลักษณะสูตรโครงสร้างเป็น $CH_3NH_3PbX_3$ (X คือ Cl Br หรือ I) ถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับพลังงานแสงในเซลล์สุริยะ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายประการ ได้แก่ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยาก วัสดุที่ใช้หาได้ง่าย ประสิทธิภาพสูง ต้นทุนการผลิตต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์สุริยะที่ทำจากซิลิคอน และสามารถปรับช่องว่างระหว่างระดับพลังงานได้โดยการปรับโครงสร้าง โดยประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากเริ่มต้นที่ 3.81% (Kojima และคณะ, 2009) เป็น 21.2% ในปัจจุบัน (Shin และคณะ, 2017) นอกจากนี้ ยังพบว่า ประจุอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นจากการรับแสงของเพอโรฟสไกต์ มีระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน (diffusion length) ที่สูงกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งสูงกว่าวัสดุไวแสงทั่วไปที่มีค่าประมาณ 100 นาโนเมตร (Xing และคณะ, 2015) แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกได้ในอนาคต

2.6 การนำสีย้อมจากแหล่งธรรมชาติมาประยุกต์ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากรายงานต่างๆ ข้างต้น จะเห็นได้ว่าสีย้อมที่นิยมใช้กับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น สีย้อมของสารประกอบรูเทเนียม-พอลิไพริดีล สีย้อมจากสารอินทรีย์ และสีย้อมพอร์ไฟริน ล้วนได้มาจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยาก มีราคาแพง และเกิดการปล่อยสารพิษสู่สิ่งแวดล้อม (Shanmugam และคณะ, 2015) เนื่องจากเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมีหลักการการทำงานคล้ายกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงมีการนำสีย้อมที่ได้จากแหล่งธรรมชาติมาใช้ทดแทน เช่น คลอโรฟิลล์ (Calogero และคณะ, 2012) แอนโทไซยานิน (Syafinar และคณะ, 2015) แทนนิน (Çakar และคณะ, 2016) และ แคโรทีน (Gómez-Ortiz และคณะ, 2010) เป็นต้น ข้อดีของการใช้สีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ คือ ไม่ก่อให้เกิดสารพิษ มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายเองได้ และกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยาก (Shahid และคณะ, 2013) โดยในงานวิจัยนี้ สนใจที่จะใช้สารสกัดสารสีจากแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงสีม่วงชนิดไม่สะสมสารกัมมันต์ ซึ่งมีสารแบคทีเรียโอคลอโรฟิลล์ เอ ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นพอร์ไฟริน เป็นสารสีหลักในระบบสังเคราะห์แสง และมีสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์เป็นสารสีช่วย ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้สารสกัดจากธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็นพอร์ไฟริน ได้แก่

Tsui และคณะ (2014) นำสารสกัด แบคทีเรียโอคลอโรฟิลล์ ซี จากแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงสีเขียว (ช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 400 และ 680 นาโนเมตร) มาใช้เป็นสีย้อมในเซลล์สุริยะ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบนาโนทิวบ์ในการเตรียมชั้นฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ เตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงโดยการนำไปแช่ในสารสกัดแบคทีเรียโอคลอโรฟิลล์ ซี เป็นเวลา 96 ชั่วโมง และนำไปประกอบเป็นเซลล์สุริยะ พบว่า ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า 0.1% ที่ช่วงความยาวคลื่น 600–800 นาโนเมตร ความหนาแน่นของกระแส (Jsc) 0.54 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และสามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นเวลา 14 นาที (Tsui และคณะ, 2014)

Fu และคณะ (2014) ศึกษาโดยนำสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสีและโปรตีน (ระบบแสง II) จากแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงสีม่วงสายพันธุ์ CQV97 ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิค ammonium-sulfate fractionation (ช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 803 และ 856 นาโนเมตร) มาใช้ในการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง หลังการแช่ในสารสกัดดังกล่าวเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และนำมาประกอบเป็นเซลล์สุริยะ พบว่ามีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.49% ความหนาแน่นของกระแส 1.46 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าฟิลล์แฟคเตอร์ 0.54 (Fu และคณะ, 2014)

Yu และคณะ (2015) ได้นำระบบแสง I ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (*A. platensis*) และระบบแสง II ของผักโขม เมื่อใช้ระบบแสง I ของแบคทีเรีย เป็นสีย้อมไวแสง ยึดเกาะบนชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 12 ไมครอน พบว่าให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่ 0.47% ความหนาแน่นของกระแส 1.31 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่เมื่อใช้ระบบแสง II ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่า โดยให้ค่าอยู่ที่ 0.52% และความหนาแน่นของกระแส 1.51 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ยังได้เพิ่มสาร n-Dodecyl-b-D-maltoside (DDM) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มสารลดแรงตึงผิว ซึ่งจะช่วยให้การกระจายตัวของโมเลกุลสีย้อม โดยลดการเกาะกลุ่มกันระหว่างโมเลกุล ทำให้ลดโอกาสที่จะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนจากการส่งต่อกันระหว่างโมเลกุล และทำให้ถ่ายโอนไปยังชั้นฟิล์มของสารกึ่งตัวนำได้ดียิ่งขึ้น (Yu และคณะ, 2015)

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยที่ใช้สีย้อมในรูปสารสี และสีย้อมในรูปสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสีและโปรตีน (ระบบแสง) จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของสีย้อมในรูปแบบระบบแสงมีค่าสูงกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสามารถในการยึดเกาะของสีย้อมกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ โดยปกติ สีย้อมที่นำมาใช้ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง จะมีหมู่ฟังก์ชัน (เช่น $-COOH$ $-H_2PO_3$ $-SO_3H$ เป็นต้น) ที่ใช้ยึดเกาะกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ โดยส่วนใหญ่นิยมใช้หมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) ในกรณีของการใช้ระบบแสง จะหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะมิโน กรดแอสปาร์ติก หรือ กรดกลูตามิก ซึ่งสามารถใช้ในการยึดเกาะกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ทำให้มีสีย้อมเกาะอยู่ปริมาณมาก ส่งผลให้มีความหนาแน่นของกระแสและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่สนใจนำสีย้อมที่สกัดได้จากแหล่งธรรมชาติมาใช้กับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ดังแสดงใน ตารางที่ 2.5 โดยจะเห็นได้ว่า ปัญหาของการใช้สีย้อมธรรมชาติ คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานค่อนข้างต่ำ จึงจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาต่อไป ไม่ว่าจะเป็นการหาสีย้อมชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเหมาะสม หรือปรับปรุงส่วนประกอบภายในเซลล์สุริยะ

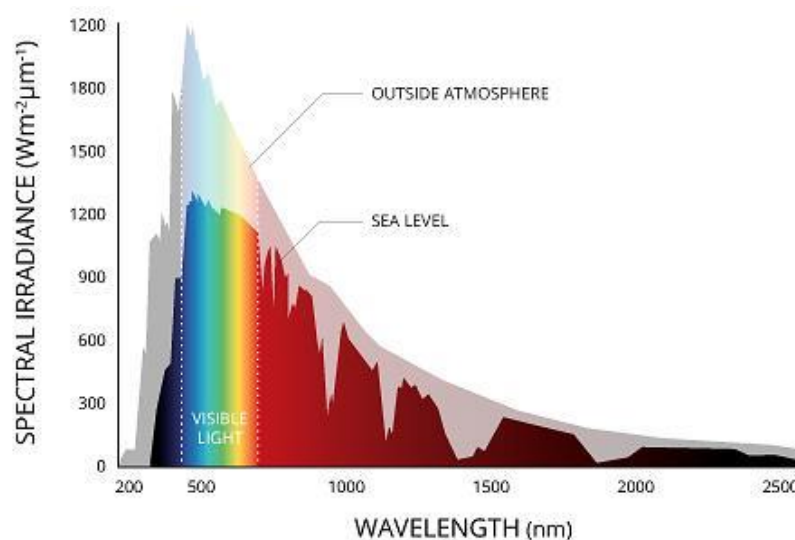
ตารางที่ 2.5 การนำสีย้อมจากธรรมชาติมาประยุกต์ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

สีย้อม	แหล่งที่มา	PCE (%)	Jsc (mA/cm ²)	อ้างอิง
ฟิโอฟิติน เอ	หญ้า	0.46	2.20	(Shanmugam และคณะ, 2015)
ไซยานิดิน	กระเจี๊ยบ	0.006	0.0035	(Reda และ Soliman, 2016)
คลอโรฟิลล์	ใบโหระพา	0.04	0.093	(Eli และคณะ, 2016)
แอนโทไซยานิน	กะหล่ำปลีสีแดง	0.024	0.23	(Syafinar และคณะ, 2015)
เคอร์คูมิน	ขมิ้น	0.11	0.61	(Yoon และคณะ, 2016)
แบคทีอริโอ คลอโรฟิลล์ ซี	แบคทีเรีย สังเคราะห์ด้วย แสง	0.1	0.54	(Tsui และคณะ, 2014)
ระบบแสง II	แบคทีเรีย	0.49	1.46	(Fu และคณะ, 2014)
ระบบแสง I	สาหร่ายสีเขียว แกมน้ำเงิน	0.47	1.31	(Yu และคณะ, 2015)
ระบบแสง II	ผักโขม	0.52	1.51	

ตัวอย่างการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากแหล่งธรรมชาติ เช่น การผสมสีย้อมจากหลายแหล่งเพื่อให้ดูดกลืนแสงได้หลายช่วง เช่น Zolkepli และคณะ (2015) ได้ศึกษาการใช้สีย้อมผสมระหว่างสีย้อมจากว่านกาบหอย (*Tradescantia spathacea*) และสีย้อมจากดอกเข็ม (*Ixora coccinea*) และ ในอัตราส่วน 1:4 ปริมาตรต่อปริมาตร พบว่าให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.8% ซึ่งมากกว่าการใช้สีย้อมจากว่านกาบหอยและดอกเข็มเพียงชนิดเดียวที่ให้ค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 0.21 และ 0.56% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าการใช้สีย้อมร่วม จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะได้ แต่การมองหาสีย้อมชนิดใหม่ ที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ยังคงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้ เมื่อมีการศึกษาสีย้อมชนิดใหม่จำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของสารที่จะนำมาใช้เป็นสีย้อมไวแสง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธี ดังนี้ (Zolkepli และคณะ, 2015)

2.6.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของสีย้อม

สำหรับการนำสีย้อมชนิดใหม่มาใช้งานในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง มีปัจจัยหลักๆ ที่ต้องพิจารณา 2 ปัจจัย ได้แก่ ช่วงการดูดกลืนแสงของสีย้อม โดยสีย้อมที่เหมาะสมควรมีช่วงการดูดกลืนแสงกว้าง และสามารถดูดกลืนแสงได้หลายช่วง เพื่อให้ครอบคลุมกับช่วงสเปกตรัมของแสง (รูปที่ 2.9) และระดับพลังงาน HOMO (highest occupied molecular orbital) และ LUMO (lowest unoccupied lowest unoccupied molecular orbital) ที่เหมาะสมต่อการใช้งานร่วมกับส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์สุริยะ โดยทั้ง 2 ปัจจัย สามารถตรวจวัดได้โดยวิธีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 ช่วงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ (แหล่งที่มาของรูปภาพ: the Fundamentals of Environmental Measurements website)

2.6.2.1 ตรวจสอบช่วงการดูดกลืนแสงโดยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-vis spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบปริมาณและช่วงการดูดกลืนแสงของสาร โดยมีความสามารถในการตรวจวัดในช่วงแสงที่ตามองเห็นและใกล้รังสีอินฟราเรด (300-1000 นาโนเมตร) โดยที่ความยาวคลื่นแสงและค่าการดูดกลืนแสงจะมีความสัมพันธ์กับชนิดและปริมาณของสารที่อยู่ในตัวอย่าง มีหลักการทำงาน คือ เมื่อโมเลกุลของสารในตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสม จะเกิดการดูดกลืนแสง และเมื่อวัดปริมาณแสงที่ส่องผ่าน หรือสะท้อนออกมาจากตัวอย่างเทียบกับแสง

เริ่มต้นจากแหล่งกำเนิด สามารถนำมาเทียบกับเป็นปริมาณสารที่อยู่ในตัวอย่างได้ ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Berg และคณะ, 2017)

$$A = \epsilon bc$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง

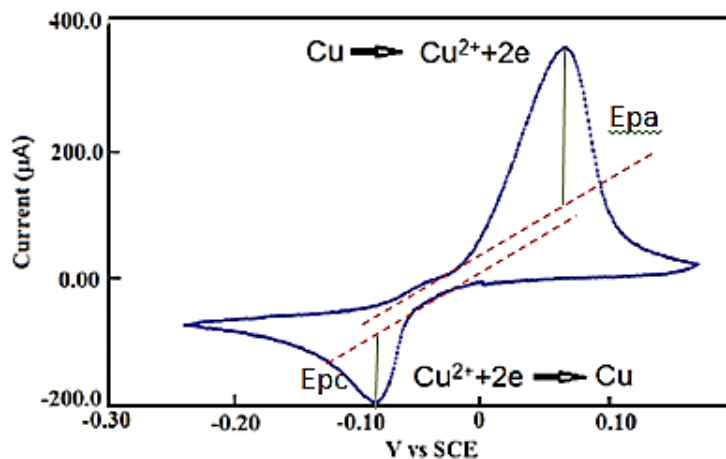
ϵ คือ molar absorptivity มีหน่วยเป็น L/cm/mol

b คือ ความยาวของทางเดินแสง (Optical Path. Length) มีหน่วยเป็น cm

c คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น mol/L

2.6.2.2 การตรวจสอบระดับพลังงานของสารสีโดยเทคนิค cyclic voltammetry (CV)

โดยปกติเมื่อโมเลกุลของสารสีดูดกลืนพลังงานแสง อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจาก occupied orbital ไปยัง unoccupied orbital ซึ่งส่วนใหญ่อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจาก HOMO ไปยัง LUMO โดยการตรวจสอบระดับพลังงานของสารสี สามารถทำได้โดยอาศัยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า โปเทนชิโอสแตต (potentiostat) ซึ่งเป็นเครื่องมือทางไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าเคมี ทำหน้าที่ในการควบคุมการจ่ายความต่างศักย์และวัดกระแสที่เกิดขึ้น โดยจะต่อกับคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ เพื่อควบคุมการทำงานและแสดงผลการวิเคราะห์ เมื่อทำงานวิเคราะห์จะต่อระบบแบบ เคมีไฟฟ้าแบบสามขั้ว (three electrode electrochemical cell) ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าทำงาน ซึ่งขั้วไฟฟ้าปฏิกิริยาของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งเป็นขั้วที่มีค่าความต่างศักย์คงที่ ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อให้รู้ค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงาน และขั้วไฟฟาร่วม เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้ระบบครบวงจร โดยมีหลักการทำงาน คือ โปเทนชิโอสแตต จะป้อนความต่างศักย์จากค่าเริ่มต้นไปทางบวก เมื่อค่าความต่างศักย์เปลี่ยนไปเรื่อยๆ จนถึง สวิตชิงโพอเทนเชียล โพอเทนชิโอสแตตจะเปลี่ยนการจ่ายความต่างศักย์ไปยังทิศทางตรงกันข้ามและกลับมายังจุดเริ่มต้น



รูปที่ 2.10 กราฟโวลแทมโมแกรมของสารคอปเปอร์ซัลเฟต 10 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต 0.3 โมลาร์ เมื่อใช้แท่งแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม แท่งคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน และอัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า 0.02 โวลต์ต่อวินาที (Jaikumar และคณะ, 2015)

จะได้ผลออกมาเป็นกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้ขั้วไฟฟ้าและกระแสที่เกิดขึ้น เรียกกราฟนี้ว่า โวลแทมโมแกรม (รูปที่ 2.10) โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง Epc เป็นค่ากระแสที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน และ Epa เป็นกระแสที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งระดับพลังงาน HOMO และ LUMO สามารถคำนวณได้จากตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าที่เกิดพีค Epa และ Epc ตามลำดับ ดังสมการ (Bernède, 2008)

$$\text{LUMO (eV)} = [(-4.5) - (0.197 - E_{\text{red}})]$$

$$\text{HOMO (eV)} = [(-4.5) - (0.197 - E_{\text{ox}})]$$

เมื่อ Ered คือ ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าที่เกิดพีค Epc

Eox คือ ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าที่เกิดพีค Epa

ขณะที่ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จาก สมการ

$$\text{ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Eg)} = \text{LUMO} - \text{HOMO}$$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer), Biomate 35, Thermo scientific
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและตัววิเคราะห์ (2400 SourceMeter SMU Instruments), Tektronix, A Tektronix company, china
- เครื่องกำเนิดพลังงานแสงอาทิตย์ (Sun 2000 Solar Simulator), ABET technology, USA
- หลอดไฟซีนอน (Xenon short arc lamp), Ushio Inc., Japan
- หลอดไส้ 60 W (Incandescent lamp) Philips, Indonesia
- หลอดแอลอีดี 7 W (LED lamp) Philips, Indonesia
- หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ 15 W(compact fluorescent lamp) Philips, Indonesia
- เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer), 3ST, Dektak, USA
- โปเทนชิโอมิเตอร์ (potentiometer)
- เครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet photoelectron spectroscopy), AXIS-ULTRA DLD-600W
- กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (TEC15 Conductive glass plates), Dyesol, switzerland
- แผ่นเทอร์โมพลาสติก (Surlyn), 25 μm thickness.
- กระจกปิดสไลด์ (Rectangular Cover Slips), Size 9x9 mm #1, Bellco Brand.
- เต้าเผา ELF11/6, Carbolite, UK
- ตู้อบความร้อน (hot air oven) รุ่น UE 600, Memmert, Germany
- อุปกรณ์สกรีน ชัยบูรณ์, ประเทศไทย
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ P.V.R., Italy
- เครื่องเป่าลมร้อน (Heat gun) GHG630DCE, Bosch, Germany
- เครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Elmasonic E Ultrasonic Cleaning รุ่น E30H), Germany
- เครื่องชั่งหยاب รุ่น PG 2002-S, Metler Toledo, Switzerland
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น AG 285, Metler Toledo, Switzerland

- เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker) รุ่น Innova™ 4300, New Brunswick Scientific, UK
- เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน ขนาดกระบอก 250 มิลลิลิตร (Large Capacity Refrigerated Centrifuge รุ่น 5922), Kubota, Japan
- เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนความเร็วสูง (Mikro 200, 200R), Hettich zentrifugen, UK
- เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer GENIE 2 รุ่น G560E), Scientific Industries, USA
- เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter), Metler Toledo, Switzerland
- ตู้ประกอบเซลล์
- เครื่องวัดความเข้มแสง (light meter) model 615, BK precision, USA
- อุปกรณ์ตัดกระดาษ
- ดิจิตอล มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)
- เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

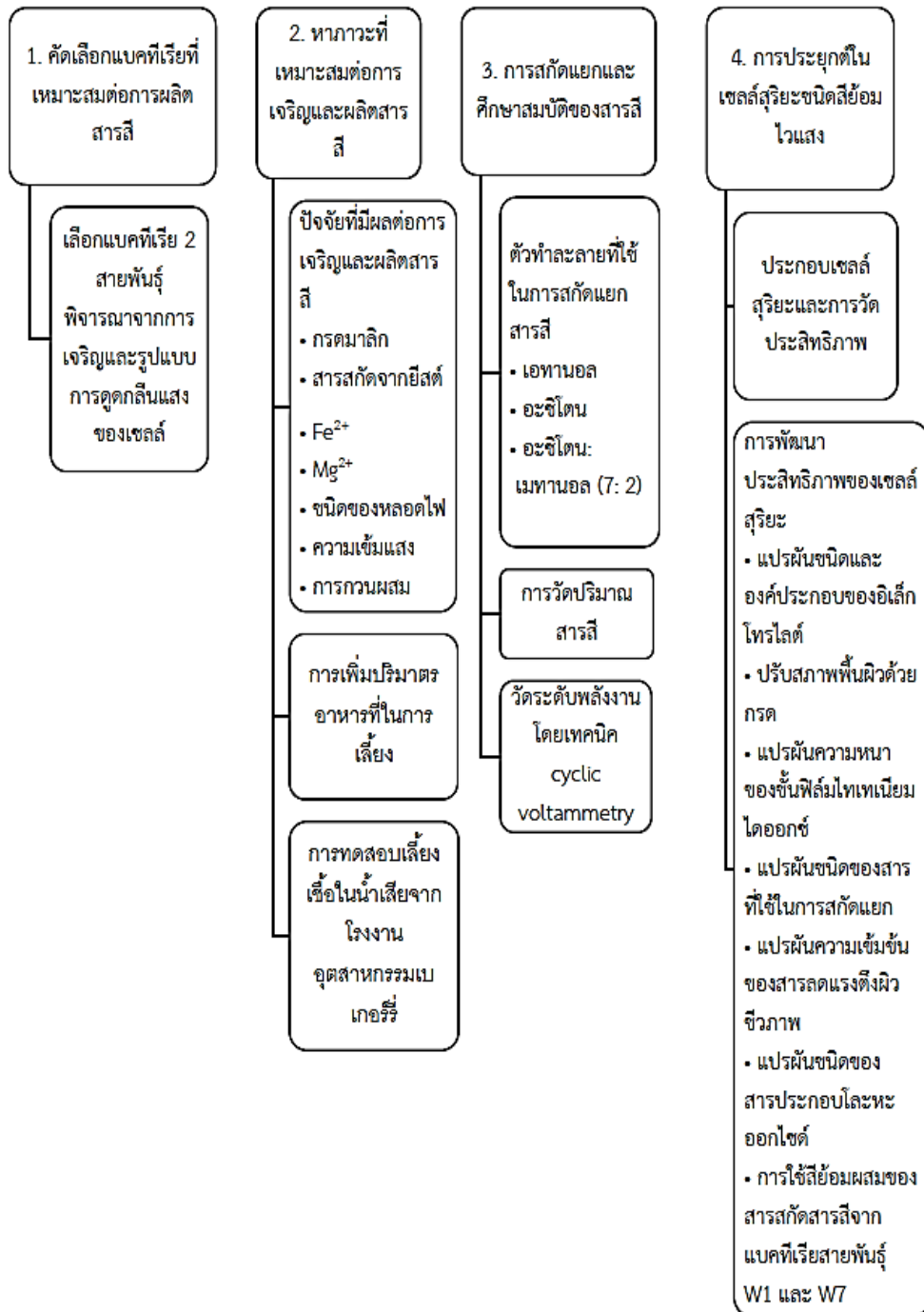
- เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Ajax Finechem Pty Ltd., New Zealand
- กรดบอริก (H_3BO_3) APS Finechem, Australia
- โพแทสเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) VWR chemicals, Belgium
- ไดโพแทสเซียม ไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) Merck, Germany
- อาหารเลี้ยงเชื้อ LB (miller Luria-Bertani) Becton, France
- กรดมาลิก (DL-malic acid) SRL, India
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) Fisher Chemical, Belgium
- แมกนีเซียมซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) Merck, Germany
- แอมโมเนียม คลอไรด์ (NH_4Cl) Merck, Germany
- โซเดียมโมลิบเดตไดไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Carlo erba reagent, Italy
- คอปเปอร์ (II) ไนเตรต ไตรไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), Honeywell Riedel, Germany
- กรดเอเดติก (ethylenediaminetetraacetic acid: EDTA) Merck, Germany
- แคลเซียมคลอไรด์ ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Merck, Germany
- เอทานอล (absolute ethanol) Merck, Germany
- อะซิโตน (acetone) Merck, Germany
- เมทานอล (Methyl alcohol anhydrous), Macron fine chemical™, USA

- สีย้อมไวแสง N719 (N719 Industry Standard Dye), Dyesol , Australia
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Iodolyte HI-30), Solaronix, Switzerland
- โคบอลต์ (II) (FK 102 Co(II) PF6 Salt), dyesol, Australia
- โคบอลต์ (III) (FK 102 Co(III) PF6 Salt), dyesol, Australia
- ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ (90-T Transparent Titania Paste (TiO₂)), Dyesol, Australia
- ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ (TiO₂ paste WER2-O) Dyesol, Australia



3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4 การคัดเลือกแบคทีเรียที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี

3.4.1 จุลินทรีย์

งานวิจัยนี้ศึกษาแบคทีเรียในกลุ่มแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถันจำนวน 7 สายพันธุ์ ได้แก่ W1 (MSCU 0924) W2 (MSCU 0925) W3 (MSCU 0928) W5 (MSCU 0929) W6 (MSCU 0930) W7 (MSCU0931) W8 (MSCU 0932) และ P7 (MSCU 0933) ที่คัดแยกโดยคุณนันทธร เภาราช จากแหล่งน้ำในกรุงเทพมหานคร ด้วยอาหารเหลว RCVB บ่มภายใต้แสงจากหลอดไฟแบบไส้ที่ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน นำเชื้อมาแยกเป็นโคโลนีเดี่ยว และเก็บรักษาในคลังจุลินทรีย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบคทีเรียที่สนใจศึกษาทั้ง 7 สายพันธุ์นี้ มีช่วงการดูดกลืนแสงของเซลล์แตกต่างกัน จึงต้องการเปรียบเทียบการเจริญและคัดเลือกแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ที่มีการเจริญเติบโตรวดเร็ว มีช่วงการดูดกลืนแสงที่หลากหลายและแตกต่างกัน เพื่อนำมาศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสี และนำสารสีที่สกัดแยกได้ไปประยุกต์เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

3.4.2 การเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย

เตรียมหัวเชื้อโดยเลี้ยงแบคทีเรียบนอาหารแข็ง RCVB (Johansson และ Gest, 1997) เป็นเวลา 4 วัน นำโคโลนีใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีการเติมอาหารเหลว LB ที่เจือจางความเข้มข้น 50% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที จนมีปริมาณเซลล์ประมาณ 10^8 CFU/mL เติมหหัวเชื้อปริมาณ 20% โดยปริมาตรต่อปริมาตร ในขวดไวแอลขนาด 25 มิลลิลิตร ที่เติมอาหารเหลวกำหนดสูตร RCVB จนเต็มขวด เพื่อสร้างภาวะกึ่งไร้ออกซิเจน ภายใต้แสงจากหลอดไฟแบบไส้ที่ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 14 วัน เพื่อวิเคราะห์การเจริญ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร นับจำนวนแบคทีเรียด้วยวิธีรอปเพลทปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนอาหารแข็ง LB ที่เจือจางความเข้มข้น 50%



รูปที่ 3.2 การเพาะเลี้ยงแบคทีเรียในขวดไวแอลขนาด 25 มิลลิลิตร

3.4.3 การระบุชนิดสายพันธุ์ของแบคทีเรีย

การระบุชนิดสายพันธุ์ของแบคทีเรียโดยวิธีการทางโมเลกุล โดยเปรียบเทียบความใกล้เคียงของลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16s rDNA กับฐานข้อมูล ส่งตัวอย่างแบคทีเรียเพื่อวิเคราะห์หาลำดับนิวคลีโอไทด์ที่บริษัท Macrogen ประเทศเกาหลีใต้ แล้วนำข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์มาเชื่อมสาย forward และ reverse โดยใช้โปรแกรม Bioedit (version 7.2.5.0) หลังจากนั้นนำลำดับนิวคลีโอไทด์ที่เชื่อมเสร็จแล้วมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล GenBank เพื่อระบุสายพันธุ์ของแบคทีเรีย

3.5 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียที่คัดเลือก

3.5.1 แปรผันปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและผลิตสารสี

ในขั้นตอนนี้จะแบ่งปัจจัยที่ศึกษาเป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญ และปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสารสี ดังนี้

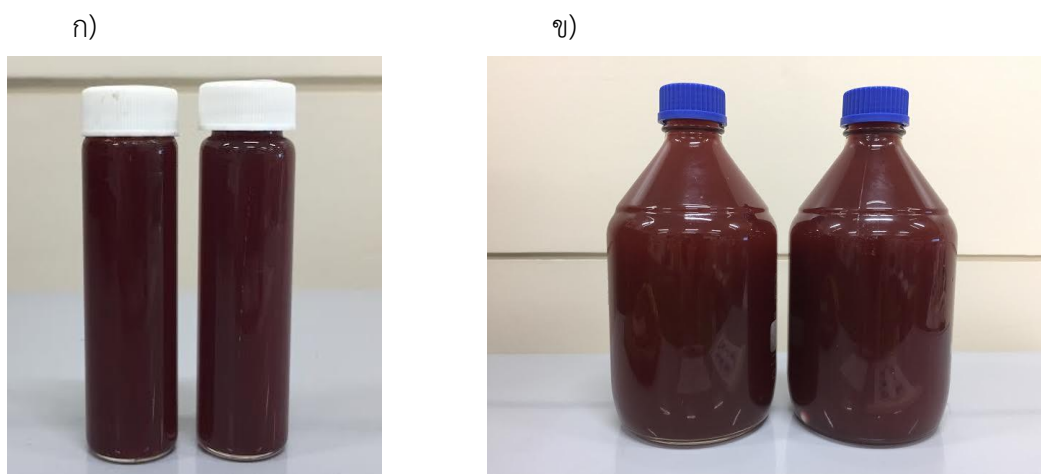
ตารางที่ 3.1 ลำดับการแปรผันของปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและผลิตสารสี

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญ	
3.5.1.1 ความเข้มข้นของกรดมาลิก	ที่ 4 8 และ 16 กรัมต่อลิตร
3.5.1.2 ความเข้มข้นของสารสกัดจากยีสต์	ที่ 2 4 และ 8 กรัมต่อลิตร
3.5.1.3 ความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต	ที่ 10 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสารสี	
3.5.1.4 ความเข้มข้นของแมกนีเซียม ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต	ที่ 100 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร
3.5.1.5 ชนิดของหลอดไฟ	หลอดไส้ หลอดแอลอีดี และหลอด คอมแพคฟลูออเรสเซนต์ (ที่ความเข้ม แสง 2000 ลักซ์)
3.5.1.6 ความเข้มแสง	ที่ 2000 และ 4000 ลักซ์
3.5.1.7 การกวนผสม	ไม่กวนผสม และ 120 รอบต่อนาที

ทำการทดลองในขวดไวแอลขนาด 25 มิลลิตร ภายใต้ภาวะการเลี้ยงตามข้อที่ 3.4.2 เป็นเวลา 8 วัน โดยแปรผันทีละหนึ่งปัจจัย และให้ปัจจัยอื่นให้เป็นปัจจัยคงที่ ตามลำดับ (ตารางที่ 3.1) เปรียบเทียบหาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ โดยวัดจากการเจริญโดยเปรียบเทียบน้ำหนักเซลล์แห้งในชุดปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญ และเปรียบเทียบน้ำหนักเซลล์แห้งและปริมาณสารสี ในชุดปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสารสี

3.5.2 การขยายขนาดการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการขยายขนาดการผลิต ในขั้นตอนนี้ จึงเปรียบเทียบระหว่างการเพาะเลี้ยงในขวดไวแอลขนาด 25 มิลลิตร และขวดคูแรนขนาด 2 ลิตร (ปริมาตรของเหลวรวมที่บรรจุได้ คือ 2230 มิลลิตร) เพาะเลี้ยงด้วยสูตรอาหารและภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสี ตามที่ได้แปรผันไว้ในข้อ 3.5.1.1 – 3.5.1.7 เป็นเวลา 8 วัน วัดน้ำหนักเซลล์แห้งและปริมาณการสะสมสารสี ตามวิธีในข้อ 3.6.2



รูปที่ 3.3 การขยายขนาดการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย ก) การเพาะเลี้ยงแบคทีเรียในขวดไวแอลขนาด 25 มิลลิลิตร และ ข) การเพาะเลี้ยงแบคทีเรียในขวดดูแรนขนาด 2 ลิตร

3.5.3 การทดสอบเลี้ยงเชื้อในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเบเกอร์รี่

เพื่อลดต้นทุนของอาหารเลี้ยงเชื้อ ในขั้นต่อไปจึงจะทดสอบความสามารถในการใช้สารอาหารในน้ำเสียในการเจริญ เนื่องจากมีรายงานว่าแบคทีเรียสังเคราะห์แสงมีความสามารถเจริญในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเบเกอร์รี่ ที่มีค่า COD 3850 ± 71 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกอบด้วยน้ำมันและไขมัน 443 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 2.72 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด <0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผสมกับอาหารเหลว RCVB ที่ไม่มีการเติมกรดมาลิก โดยใช้น้ำเสีย 40% ของปริมาตรทั้งหมด (จักรกราชชัย บัวจันทร์, 2559) ดังนั้นในขั้นนี้ต้องการทดสอบความสามารถในการเจริญในน้ำเสียของแบคทีเรียสายพันธุ์ที่คัดเลือก โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 5 ชุด การทดลอง ได้แก่

ตารางที่ 3.2 ชุดทดลองที่ใช้ศึกษาความสามารถในการเจริญในน้ำเสียของแบคทีเรียสายพันธุ์ที่คัดเลือก

ชุดที่ 1	อาหารเหลว RCVB (ชุดควบคุม)
ชุดที่ 2	น้ำเสีย 40% และอาหารเหลว RCVB ที่ไม่มีการเติมกรดมาลิก 60%
ชุดที่ 3	น้ำเสียปลอดเชื้อ 40% และอาหารเหลว RCVB ที่ไม่มีการเติมกรดมาลิก 60%
ชุดที่ 4	น้ำเสีย 100%
ชุดที่ 5	น้ำเสียปลอดเชื้อ 100%

เลี้ยงแบคทีเรียในขวดขนาด 25 มิลลิลิตร เพาะเลี้ยงภายใต้ภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสี ตามที่ได้แปรผันไว้ในข้อ 3.5.1.5 – 3.5.1.7 เป็นเวลา 8 วัน วิเคราะห์น้ำหมักเซลล์แห้งและปริมาณการสะสมสารสี ตามวิธีในข้อ 3.6.2

การทดลองทั้งหมด จะเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดลองที่ได้จากแต่ละชุดการทดลองโดยการคำนวณทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS (version 20.0.0.0) ด้วยวิธี ANOVA โดยกำหนดสมมติฐาน

H_0 : ค่ากลางของแต่ละระดับของชุดการทดลองไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่ากลางของระดับในชุดการทดลองอย่างน้อย 2 ระดับมีความแตกต่างกัน

แปรผลโดยพิจารณาจากค่า P ของแต่ละคู่การเปรียบเทียบ ถ้าค่า P มากกว่า 0.05 จะยอมรับ H_0 และปฏิเสธ H_1 คือ การแปรผันให้ผลไม่แตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ถ้า P มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าการแปรผันให้ผลแตกต่างกัน (ยอมรับ H_1 ปฏิเสธ H_0) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.6 การสกัดแยกสารสีและศึกษาสมบัติของสารสีที่สกัดแยกได้

3.6.1 ศึกษาชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดแยกสารสี

ปั่นเหวี่ยงเก็บเซลล์ที่ได้รับจากการเลี้ยงด้วยอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญจากข้อ 3.5.1.3 ที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ 2 รอบ สกัดด้วยตัวทำละลายที่สนใจศึกษา ได้แก่ เอทานอล (Oren และคณะ, 2015) อะซิโตน (Shen และคณะ, 2014) และตัวทำละลายผสมของอะซิโตนและเมทานอล ในอัตราส่วน 7:2 โดยปริมาตรต่อปริมาตร (Ruivo และคณะ, 2014) ใช้เซลล์น้ำหมัก 1 กรัม ต่อตัวทำละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร สกัดในที่มืด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเซลล์ออกจากสารสกัดที่ความเร็วรอบ 8,000 นาที เป็นเวลา 15 นาที และตรวจวัดช่วงการดูดกลืนแสงของสารสีที่สกัดได้ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy ที่ช่วงความยาวคลื่น 300-1000 นาโนเมตร

3.6.2 การตรวจสอบปริมาณสารสี

ในขั้นการหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี (ข้อ 3.5.1.4 – 3.5.1.7) เปรียบเทียบปริมาณสารสีที่แบคทีเรียผลิต เมื่อเลี้ยงภายใต้ภาวะที่มีการแปรผันปัจจัยต่างๆ โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างอะซิโตนและเมธิลแอลกอฮอล์ ในอัตราส่วน 7:2 ปริมาตรต่อปริมาตรในการสกัดแยก วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดสารสีที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร (ช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดของ

สารแคโรทีนอยด์) และ 790 นาโนเมตร (ช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแคเทอรีโอคโลโรฟิลล์) จากนั้นคำนวณปริมาณสารสีโดยสมการต่อไปนี้ (Smith และคณะ, 2013)

$$\text{ปริมาณแคโรทีนอยด์ (ไมโครโมล)} = 9.414 \times A_{490} - 0.219$$

$$\text{ปริมาณแคเทอรีโอคโลโรฟิลล์ (ไมโครโมล)} = 14.146 \times A_{790} - 0.204$$

3.6.3 การวิเคราะห์ระดับพลังงาน HOMO-LUMO และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap energy) ของสารสี

วัดระดับพลังงาน HOMO-LUMO โดยนำสารสกัดสารสีหยดลงบนเม็ดแกรไฟต์ ที่ตั้งให้แห้งในอุณหภูมิต่ำ ทำซ้ำจนสังเกตเห็นว่ามีสีติดบนเม็ดแกรไฟต์ นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยแท่งแพลทตินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม กรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกลือหนุน (supporting electrolyte) และ Ag/AgCl (KCl saturated) electrode เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) ตั้งค่าการทำงานไว้ที่แรงดันช่วงก้ำว 1 มิลลิโวลต์ และอัตราเร็วในการสแกน 0.1 โวลต์ต่อนาที ช่วงสแกน -1 ถึง 2 โวลต์ คำนวณระดับพลังงาน HOMO-LUMO ได้จากสมการ (Escobar และ Jaramillo, 2015)

$$\text{HOMO (eV)} = - (4.40 + E_{ox})$$

$$\text{HOMO (eV)} - \text{LUMO (eV)} = \text{ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน}$$

และ ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานคำนวณได้จาก ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารสกัด ดังสมการ

$$\text{ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (eV)} = 1240 / \text{ช่วงดูดกลืนแสงสูงสุดของสารสี (นาโนเมตร)}$$

3.7 การประยุกต์สารสกัดสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงและการพัฒนาประสิทธิภาพ

3.7.1 การประกอบเซลล์สุริยะและวัดประสิทธิภาพ

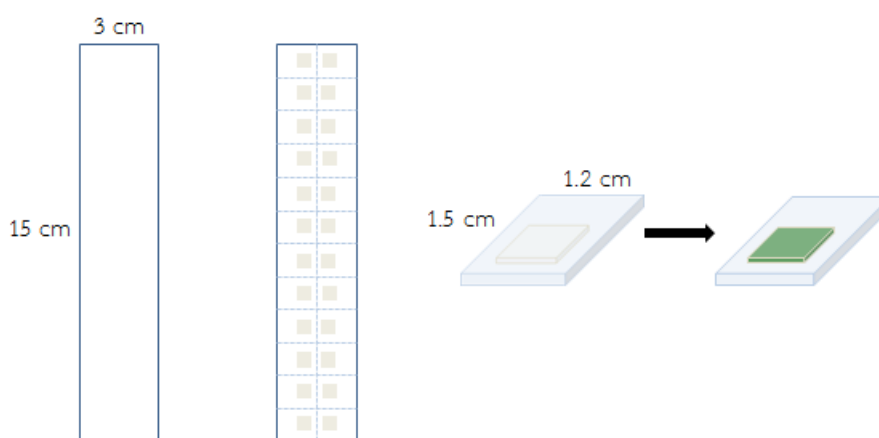
3.7.1.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (Fluorene-doped tin oxide: FTO) ขนาด 3x15 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดโดยการโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที ล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจน และตามด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำไปตากให้แห้ง ปรับสภาพผิวโดยนำกระจกไปแช่ใน

สารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.04 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากอ็อกซิเจนและตากให้แห้ง

นำกระจกที่ผ่านการปรับสภาพผิวมาสกรีนชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร (Titanium paste, Solaronix) ขนาดพื้นที่ 0.5 X 0.5 ตารางเซนติเมตร ใช้บล็อกสกรีนขนาด mesh 90T หลังการสกรีน ทิ้งให้แห้ง 3 นาที และนำไปให้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส 7 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วสกรีนซ้ำตามจำนวนชั้นที่ต้องการ นำกระจกที่สกรีนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์เสร็จแล้ว ไปเผาที่อุณหภูมิแบบไล่ระดับ ดังนี้ 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น ปรับสภาพผิวโดยนำกระจกไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.04 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตัดแบ่งเป็นเซลล์ขนาด 1.2 x 1.5 ตารางเซนติเมตร วัดความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer, 3ST, Dektak, USA)

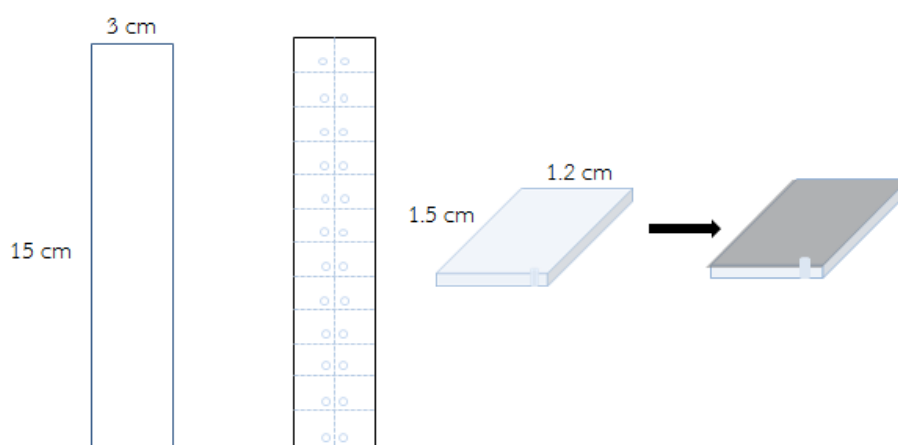
นำกระจกที่มีชั้นฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ ที่เตรียมได้จากขั้นก่อนหน้า มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น จนอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำไปแช่ในสารสีจากแบคทีเรียที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร เท่ากับ 30 ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีแสง เป็นเวลา 96 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

3.7.1.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม

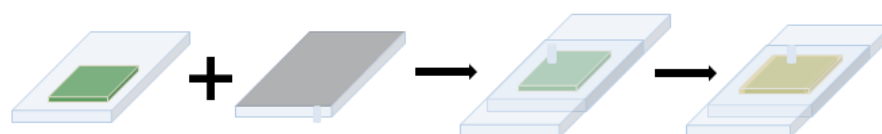
ทำความสะอาดเช่นเดียวกับขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง เจาะรูขนาดเล็ก เพื่อเป็นช่องสำหรับเติมอิเล็กโทรไลต์ ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าขนาด 1.2×1.5 ตารางเซนติเมตร เคลือบสารแพลทินัมบนกระจกด้านนำไฟฟ้า โดยการหยดสารละลายกรดเฮกซะคลอโรแพลททินิก ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ลงบนกระจก และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



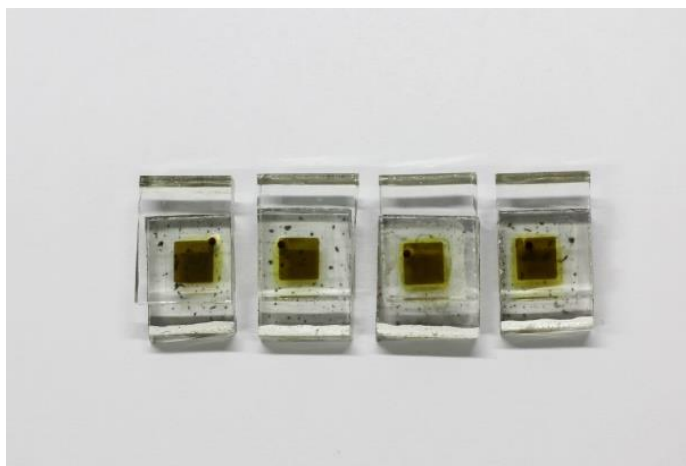
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม

3.7.1.3 การประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

ประกอบเซลล์ในตู้ประกอบที่มีการควบคุมความชื้นไม่เกิน 50% โดยเริ่มจากล้างขั้วไฟฟ้ารับแสง โดยการแช่ลงในตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสารสี เป็นเวลาประมาณ 5 นาที เพื่อกำจัดสารสีส่วนที่ไม่เกาะบนสารกึ่งตัวนำออก รอให้ขั้วไฟฟ้ารับแสงแห้ง นำมาประกอบเข้ากับขั้วไฟฟ้าร่วมโดยใช้แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก (Surlyn) เป็นตัวเชื่อม เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผ่านรูทางฝั่งด้านขั้วไฟฟ้าร่วม ปิดรูด้วยแผ่นกระจกโคลเวอร์สลิปขนาดเล็กโดยใช้แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกเป็นตัวเชื่อม



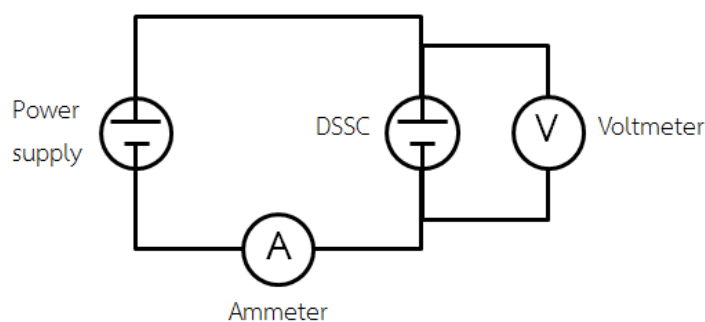
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 3.7 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบเสร็จแล้ว

3.7.1.4 การวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

วัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะโดยใช้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA) ทดสอบโดยการฉายแสงที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของเซลล์สุริยะ ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยต่อวงจรดังแสดงใน รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

3.7.2 การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง

งานวิจัยนี้ จะเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะโดยการศึกษาปัจจัยต่างๆ ทั้งหมด 7 ปัจจัย คือ ชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์ การเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะของสีย้อมบนพื้นผิวของ

สารกึ่งตัวนำโดยการปรับสภาพพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ การแปรผันความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ การแปรผันตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสารสี การแปรผันความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพในสารสี การแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ และการใช้สีย้อมผสมจากแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์

3.7.2.1 การแปรผันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์

ชนิดของคูรีดอกซ์ในระบบอิเล็กโทรไลต์ เป็นตัวกำหนดค่า Voc ของเซลล์ ดังนั้น จึงจะศึกษาผลของการแปรผันชนิดของคูรีดอกซ์ในระบบอิเล็กโทรไลต์ต่อประสิทธิภาพของเซลล์ โดยเปรียบเทียบระหว่างใช้สูตรอิเล็กโทรไลต์ HI-30 ที่มีไอโอดีนและไตรไอโอดีน (I^-/I_3^-) เป็นคูรีดอกซ์ (Solaronix, Switzerland) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากสารประกอบโซเดียมไอโอดีน (NaI) โดยมีไอโอดีน-ไตรไอโอดีน (I^-/I_3^-) เป็นคูรีดอกซ์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ของสารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์ (Co-complex) และเปรียบเทียบชนิดอิเล็กโทรไลต์ระหว่างของเหลวและกึ่งแข็งกึ่งเหลว โดยใช้อิเล็กโทรไลต์แบบเจลที่เตรียมจากสารประกอบโซเดียมไอโอดีน (NaI-gel) โดยมีไอโอดีน/ไตรไอโอดีน (I^-/I_3^-) เป็นคูรีดอกซ์เป็นตัวแทนของอิเล็กโทรไลต์ชนิดกึ่งแข็งกึ่งเหลว ประกอบเป็นเซลล์สุริยะโดยใช้งานร่วมกับสารสีจากแบคทีเรีย และวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะด้วยวิธีในข้อ 3.7.1.5

3.7.2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะของสีย้อมบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำโดยการปรับสภาพพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์

เพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะของสีย้อมบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยอาศัยการปรับสภาพพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความเป็นประจุมากขึ้น เพื่อให้ง่ายต่อการยึดเกาะโดยสีย้อม ในขั้นตอนนี้ จะเลือกใช้กรด 2 มาใช้ในการปรับสภาพ ได้แก่ กรดไนตริก (Kim และคณะ, 2013) และกรดซัลฟิวริก แปรผันความเข้มข้นที่ 0.1 - 2 M เปรียบเทียบปริมาณสารสีที่เกาะบนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค UV-Vis-NIR Spectroscopy เลือกช่วงไฟฟ้าที่มีปริมาณสารสีเยอะที่สุดมาประกอบเป็นเซลล์สุริยะโดยใช้งานร่วมกับสารสีจากแบคทีเรีย และวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

3.7.2.3 การแปรผันความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

ความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ มีผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาณสีย้อมที่เกาะบนไทเทเนียมไดออกไซด์ การทดลองในขั้นนี้ จึงแปรผันความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมได

ออกไซด์ ผ่านการแปรผันจำนวนชั้นที่ใช้สกรีน ตั้งแต่ 3 ถึง 8 ชั้น วัดความหนาโดยเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profilometer, 3ST, Dektak, USA) มาเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง ตามวิธีในข้อ 3.7.1.1 ประกอบเป็นเซลล์สุริยะโดยใช้งานร่วมกับสารสีจากแบคทีเรีย และวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

3.7.2.4 การแปรผันตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสารสี

เนื่องจากสภาพขั้วของสารที่ใช้ในการสกัดแตกต่างกัน จะมีผลทำให้ชนิดและสัดส่วนของสารสีที่สกัดได้แตกต่างกัน ในขั้นนี้จะเปรียบเทียบผลของการใช้สารสีที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน โดยเลือกสารสีที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมจากข้อ 3.6.1 มาใช้ในการเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง ตามวิธีในข้อ 3.7.1.1 ประกอบเป็นเซลล์สุริยะ และตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะด้วยวิธีในข้อ 3.7.1.5

3.7.2.5 การแปรผันความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่เติมลงในสารสี

สารลดแรงตึงผิว มีผลช่วยในเรื่องของการกระจายตัวและลดการเกาะกลุ่มกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งช่วยลดการสูญเสียอิเล็กตรอน ที่เกิดจากการส่งต่อระหว่างโมเลกุลสีย้อม (Faulkner และคณะ, 2008) ในขั้นนี้จะศึกษาผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวลงในสารสี ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์สุริยะ โดยเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ผลิตจาก *Bacillus* sp. GY 19 (Khondee และคณะ, 2015) ผสมลงในสารสีจากแบคทีเรีย โดยจะแปรผันความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ใช้ ตั้งแต่ 0.1-0.4 CMC (สารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ใช้มีค่า CMC เท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร) (Rongsayamanont และคณะ, 2017) จากนั้นนำมาเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง ตามวิธีในข้อ 3.7.1.1 ประกอบเป็นเซลล์สุริยะ และตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

3.7.2.6 การแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

ตัวนำ

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีระดับแถบนำไฟฟ้า และความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานต่างกัน จึงทำให้มีความเหมาะสมกับสีย้อมแตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยขั้นนี้จะเปรียบเทียบชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ ระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน และเซอร์โคเนียมออกไซด์ ที่มีระดับช่องว่างของแถบพลังงานกว้าง มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสง และสมบัติเป็น active photon absorber (Emeline และคณะ, 2000) มาเตรียมเป็นชั้นฟิล์มของสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้ารับแสง ตามวิธีในข้อ 3.7.1.1 ประกอบเป็นเซลล์สุริยะ และ

เปรียบเทียบผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ใช้ชนิดของโลหะออกไซด์แตกต่างกันเป็นสารกึ่งตัวนำ

3.7.2.7 การใช้สีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ผสมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7

เพื่อเพิ่มช่วงการดูดกลืนแสง จึงมีแนวคิดที่จะนำสารสีจากแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด มาผสมกันในอัตราส่วน 1: 1 โดยปริมาตรต่อปริมาตร จากนั้นนำมาเตรียมเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง ตามวิธีในข้อ 3.7.1.1 ประกอบเป็นเซลล์สุริยะ และตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะด้วยวิธีในข้อ 3.7.1.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเซลล์ที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียชนิดเดียวเป็นสีย้อมไวแสง และเซลล์ที่ใช้สารสีผสม

3.7.2.7.1 การวัดประสิทธิภาพควอนตัมของเซลล์สุริยะที่ใช้สีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ผสมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7

วัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident photon-to-current efficiency; IPCE) โดยฉายแสงความเข้มต่ำด้วยหลอดไฟซีนอน (Oriel 150W Xe lamp) กราดตรวจความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 350-750 นาโนเมตร โดยใช้ Cornerstone™ 130 1/8 m monochromator เป็นตัวกรองแสง เพื่อให้ได้แสงสีเดียว เทียบความเข้มแสงโดย Newport 818-UV silicon photodiode และวัดกระแสที่เกิดขึ้นโดยเครื่องพีโคแอมมิเตอร์ สำหรับค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการ (Shen และคณะ, 2016)

$$IPCE\% = \frac{I_{sc}(A)}{P(W)} \times \frac{1240}{\lambda(nm)} \times 100$$

จากนั้นคำนวณกลับเป็นประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงเพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า (absorbed photon-to-current conversion efficiency; APCE) จากค่า IPCE% และค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (Light harvesting efficiency; LHE) ดังสมการ

$$APCE\% = \frac{IPCE\%}{LHE}$$

3.7.2.7.2 การทดสอบความเสถียรเบื้องต้นของเซลล์สุริยะที่ใช้สีย้อม จากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ผสมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7

ทดสอบความเสถียรเบื้องต้นของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อม โดยการฉายแสงจากหลอดไส้ที่ความเข้มแสง 2000 ลักซ์เป็นเวลา 10 วัน วัดประสิทธิภาพตามวิธีในข้อ 3.7.1.5 เปรียบเทียบค่าระหว่างก่อนและหลังการทดลอง และเปรียบเทียบกับเซลล์มาตรฐานที่ใช้สีย้อม N719



บทที่ 4

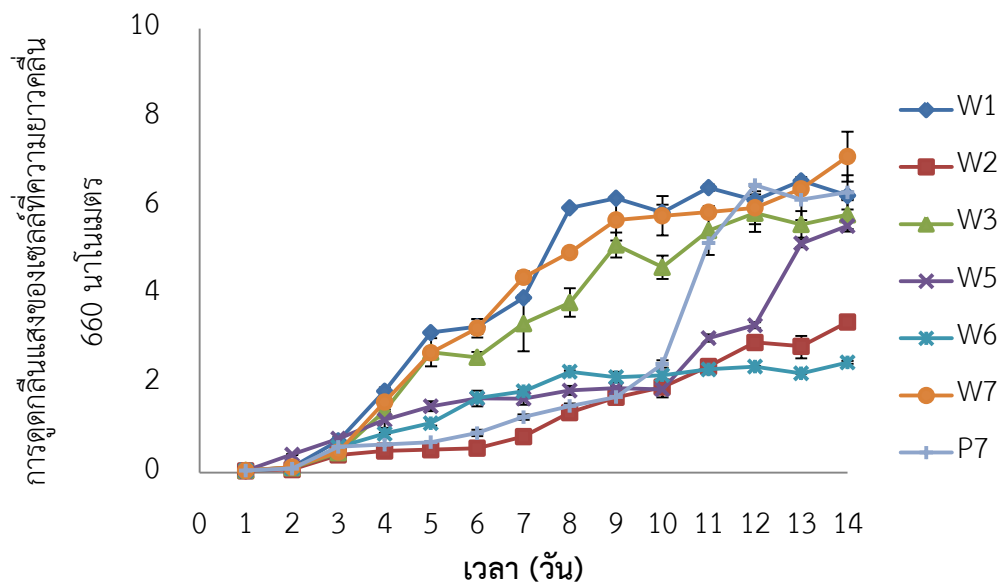
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การคัดเลือกสายพันธุ์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถันที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี

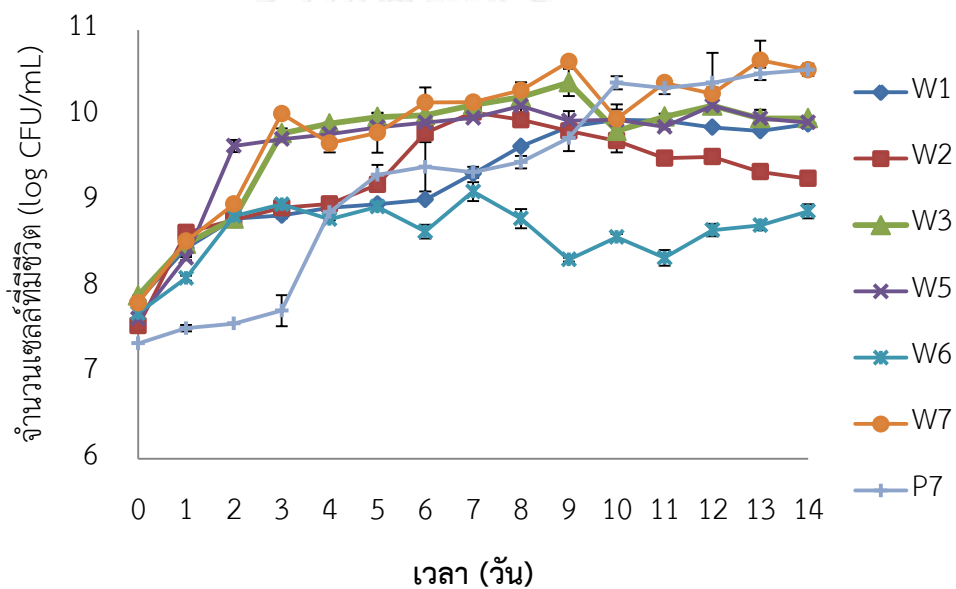
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำสารสีจากแบคทีเรียมาใช้เป็นสีย้อมไวแสง ดังนั้นในขั้นแรกจะคัดเลือกแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ ที่มีอัตราการเจริญเร็วและมีรูปแบบการดูดกลืนแสงของเซลล์แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถดูดกลืนพลังงานแสงได้หลายช่วง เริ่มจากเปรียบเทียบการเจริญและช่วงการดูดกลืนแสงของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถันจำนวน 7 สายพันธุ์ ได้แก่ W1 W2 W3 W5 W6 W7 และ P7 ที่คัดแยกมาจากแหล่งน้ำต่างๆ ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร เลี้ยงด้วยอาหารเหลว RCVB ในขวดไวแอลปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่เติมอาหารเหลวจนเต็มขวด เพื่อสร้างภาวะกึ่งไร้ออกซิเจน บ่มที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้แสงจากหลอดไส้ที่มีความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ ทุก 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 14 วัน จากการศึกษา พบว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 W3 และ W7 มีอัตราการเจริญรวดเร็ว สังเกตได้จากค่าการดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรและจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต ที่มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบคทีเรียสายพันธุ์อื่นอีก 4 สายพันธุ์ (รูปที่ 4.1) โดยเชื้อจะเจริญเข้าสู่ระยะคงจำนวนเซลล์ (stationary phase) เมื่อเวลาผ่านไป 8 วัน เมื่อพิจารณารูปแบบการดูดกลืนแสงสูงสุดของเซลล์ที่ระยะเวลาดังกล่าว พบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงของแบคทีเรียทั้ง 7 สายพันธุ์ มีรูปแบบที่แตกต่างกัน (รูปที่ 4.2)

จากนั้นระบุชนิดของแบคทีเรียด้วยลำดับนิวคลีโอไทด์ในส่วนของ 16s rDNA สามารถระบุชนิดแบคทีเรียทั้ง 7 สายพันธุ์ ได้ดังนี้ *Rhodopseudomonas faecalis* W1 *Rhodopseudomonas* sp.W2 *Rhodopseudomonas palustris* W3 *Rhodobacter johrii* W5 *Rhodopseudomonas palustris* W6 *Rhodopseudomonas palustris* W7 และ *Rhodopseudomonas palustris* P7 (ตารางที่ 4.1) โดยสายพันธุ์ W3 และ W7 เป็นแบคทีเรียสปีชีส์เดียวกัน อาจจะมีกลไกตอบสนองต่อปัจจัยที่สนใจศึกษาคลายคลึงกัน ทำให้ความแตกต่างของรูปแบบการดูดกลืนแสงของเซลล์หายไป ดังนั้นจึงเลือกสายพันธุ์ W1 และ W7 มาศึกษาต่อในขั้นต่อไป

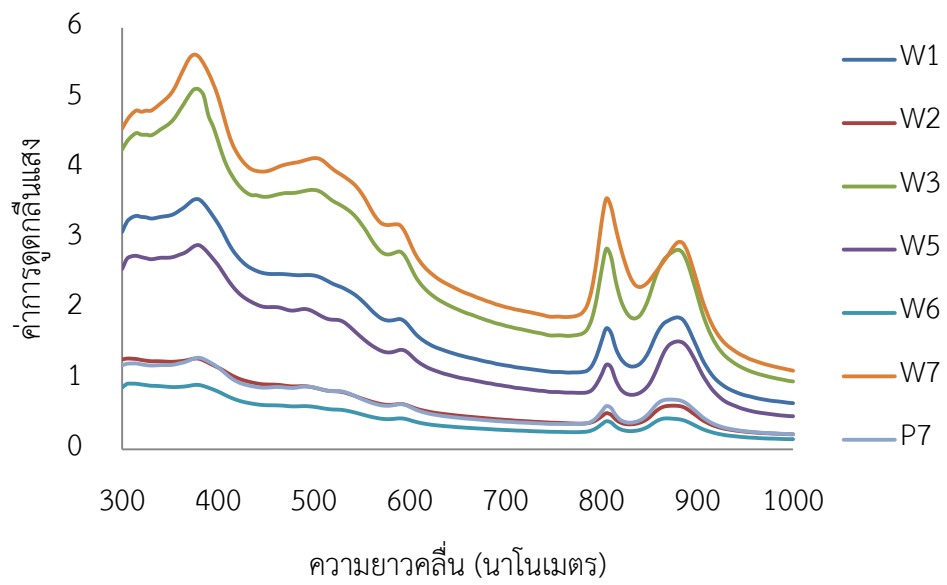
ก)



ข)



รูปที่ 4.1 การเจริญของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน 7 สายพันธุ์ เมื่อเลี้ยงด้วยอาหารเหลว RCVB เป็นเวลา 14 วัน ก) การดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ข) จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (log CFU/mL)



รูปที่ 4.2 ช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดของเซลล์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน 7 สายพันธุ์ภายหลังจากเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB เป็นเวลา 8 วัน



ตารางที่ 4.1 การระบุชนิดของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถันทั้ง 7 สายพันธุ์

สายพันธุ์	สายพันธุ์ของแบคทีเรีย	เปอร์เซ็นต์ความเหมือนของนิวคลีโอไทด์	ความยาวของลำดับ 16s rDNA (คู่เบส)	สายพันธุ์แบคทีเรียที่มีความใกล้เคียงในฐานข้อมูล NCBI	แหล่งที่คัดแยก
W1	<i>Rhodopseudomonas faecalis</i>	99%	1411	<i>Rhodopseudomonas faecalis</i> HR (HQ154127)	คลังจุลินทรีย์ของภาควิชา
W2	<i>Rhodopseudomonas</i> sp.	99%	858	<i>Rhodopseudomonas</i> sp. JA253 (FN995101)	น้ำจากคลองพระโขนง
W3	<i>Rhodopseudomonas palustris</i>	99%	1346	<i>Rhodopseudomonas palustris</i> DX-1 (CP002418)	น้ำจากสระน้ำหน้าพระรูป
W5	<i>Rhodobacter johrii</i>	100%	1421	<i>Rhodobacter johrii</i> strain JA192 (NR_115016)	น้ำจากบ่อน้ำหน้าหอศิลป์
W6	<i>Rhodopseudomonas palustris</i>	100%	1427	<i>Rhodopseudomonas palustris</i> DX-1 (CP002418)	น้ำจากคลองแสนแสบ
W7	<i>Rhodopseudomonas palustris</i>	99%	1452	<i>Rhodopseudomonas palustris</i> TUT3620 (AB250613)	น้ำจากคลองริมทางรถไฟ
P7	<i>Rhodopseudomonas palustris</i>	100%	1427	<i>Rhodopseudomonas palustris</i> ATCC 17003 (AB498816)	น้ำจากบ่อน้ำเสีย

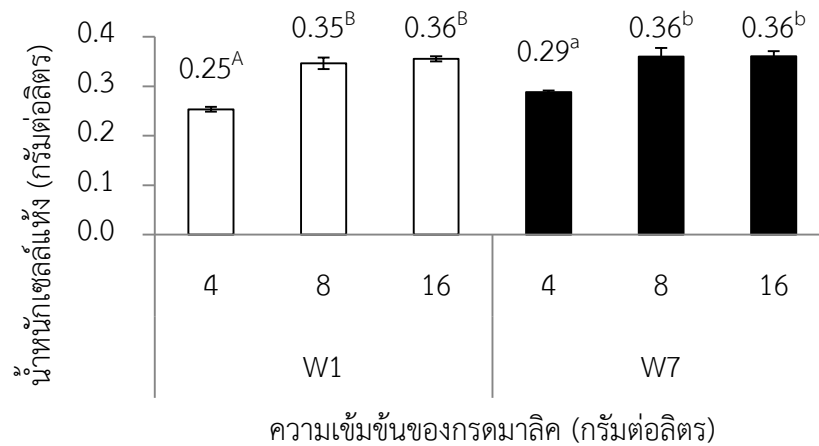
หมายเหตุ ลำดับนิวคลีโอไทด์ของแบคทีเรียสายพันธุ์ W2 มีปัญหา ทำให้เมื่อรวมสายแล้วมีความยาวน้อยกว่าแบคทีเรียสายพันธุ์อื่นๆ

4.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียที่คัดเลือก

ในขั้นตอนนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One factor at a time: OFAT) โดยแปรผันทีละปัจจัย และคงให้ปัจจัยอื่นเป็นปัจจัยคงที่ เมื่อได้ผลออกมาแล้วจะอาศัยการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของผลการทดลอง งานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่าเนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการทดลองที่การแปรผันหลายระดับต่อหนึ่งปัจจัย (Pinela และคณะ, 2016) และเหมาะสำหรับงานวิจัยที่ยังไม่เคยมีรายงานหรือมีรายงานจำนวนน้อยถึงระดับที่เหมาะสม

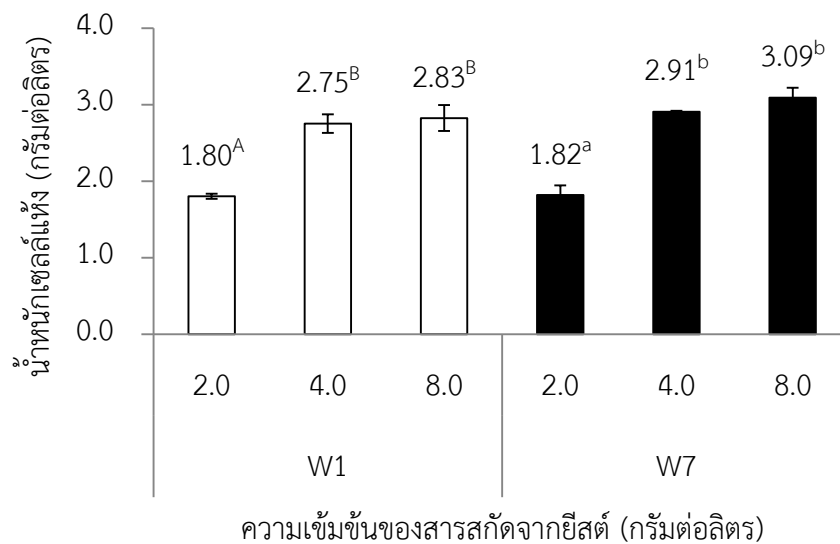
4.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7

เมื่อเลี้ยงแบคทีเรียในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันความเข้มข้นกรดมาลิก สารสกัดจากยีสต์ และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ทีละหนึ่งปัจจัย โดยบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ภายใต้แสงจากหลอดไส้ที่ความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ เป็นเวลา 8 วัน พบว่าแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ให้ผลการเจริญดี เมื่อเลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นกรดมาลิก 8 และ 16 กรัมต่อลิตร แต่ปริมาณน้ำหนักรเซลล์แห้งที่ได้รับจากความเข้มข้นทั้งสองระดับ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของกรดมาลิกที่ 8 กรัมต่อลิตร ในการทดลองขั้นถัดไป การใช้กรดมาลิกที่ความเข้มข้นดังกล่าวทำให้แบคทีเรียสายพันธุ์ W1 มีน้ำหนักรเซลล์แห้งสูงสุดที่ 0.35 ± 0.01 กรัมต่อลิตร และสายพันธุ์ W7 0.36 ± 0.02 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.3) ซึ่งมากกว่าค่าที่ได้รับจากอาหารเหลว RCVB สูตรเดิม ที่ใช้ความเข้มข้นกรดมาลิก 4 กรัมต่อลิตร ประมาณ 0.7 เท่า ต่อมาเลี้ยงแบคทีเรียในอาหารที่มีความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร ที่แปรผันความเข้มข้นของสารสกัดจากยีสต์ที่ 2-8 กรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นของสารสกัดจากยีสต์ที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ คือ 4 และ 8 กรัมต่อลิตร แต่ปริมาณน้ำหนักรเซลล์แห้งที่ได้รับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงเลือกใช้สารสกัดจากยีสต์ที่ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตรมาศึกษาต่อ (รูปที่ 4.4) คิดเป็นอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 2:1 (ภาคผนวก ง) โดยแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ให้น้ำหนักรเซลล์แห้งสูงสุดที่ 2.75 ± 0.12 และ 2.91 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ต่อมาการแปรผันความเข้มข้นเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต พบว่าแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เจริญได้ดีที่สุดในอาหารที่มีการเติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเจริญได้ดีกว่าอาหารสูตรเดิม ที่เติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 11.8 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแบคทีเรีย W1 และ W7 มีน้ำหนักรเซลล์แห้ง 3.29 ± 0.03 และ 3.34 ± 0.15 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.5)



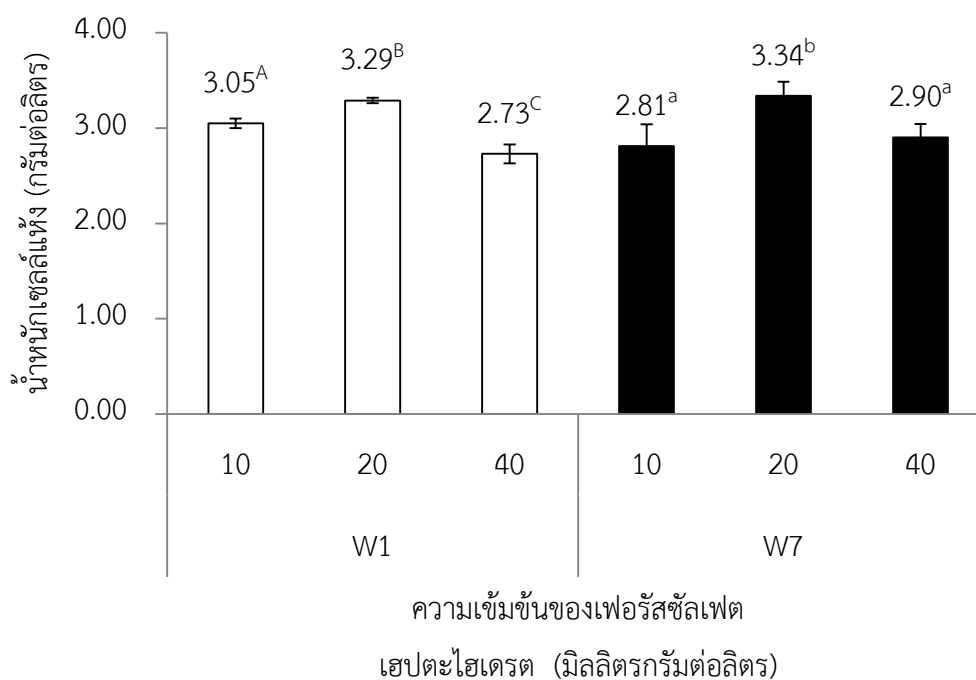
รูปที่ 4.3 น้ำหนักเซลล์แห้งของแบคทีเรีย สายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่แปรผันความเข้มข้นกรดมาลิกที่ 4-16 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 8 วัน

หมายเหตุ ตัวอักษรเหนือตัวเลขที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.4 น้ำหนักเซลล์แห้งของแบคทีเรีย สายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร ที่แปรผันความเข้มข้นสายสกัดจากยีสต์ที่ 2-8 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 8 วัน

หมายเหตุ ตัวอักษรเหนือตัวเลขที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.5 น้ำหนักเซลล์แห้งของแบคทีเรีย สายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สายสกัดจากยีสต์ 4 กรัมต่อลิตร ที่แปรผันความเข้มข้น เพอริสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 10-40 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 8 วัน
 หมายเหตุ ตัวอักษรเหนือตัวเลขที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

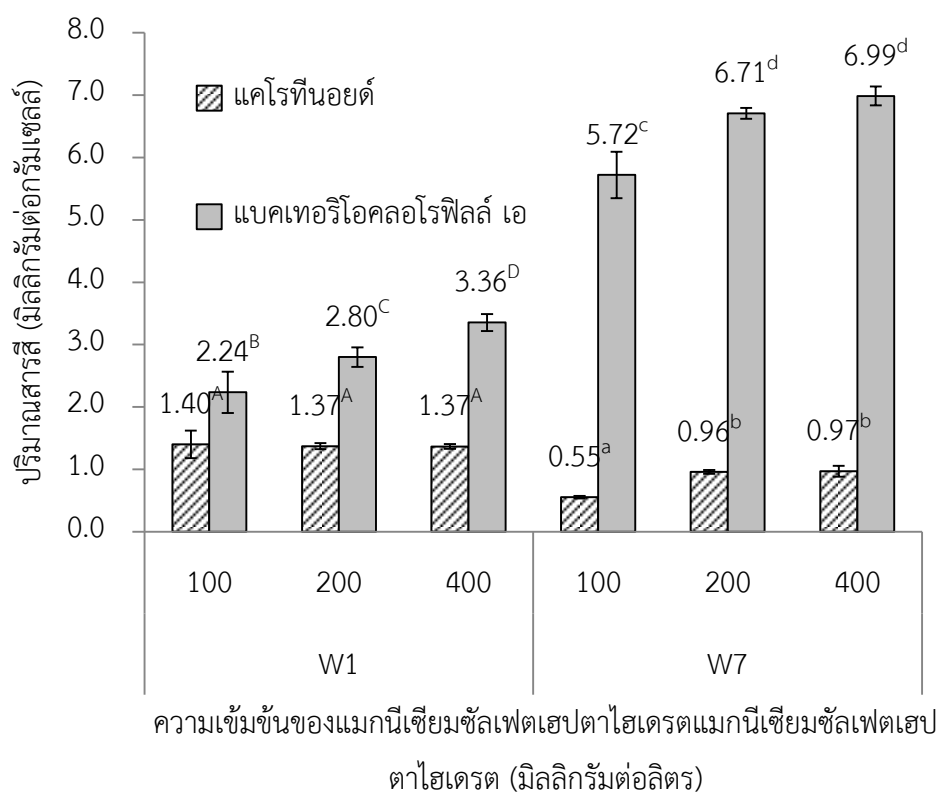
จากผลการทดลอง พบว่าการเลือกใช้ความเข้มข้นของกรดมาลิก สารสกัดจากยีสต์ และเหล็ก ที่เหมาะสมจะช่วยส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์ โดยกรดมาลิก จะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอน การเติมกรดมาลิกในความเข้มข้นที่เหมาะสมจะช่วยให้เชื้อมีอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญ การผลิตพลังงาน ทำให้มีปริมาณของเซลล์เพิ่มมากขึ้น (Saejung และ Apaiwong, 2015) สารสกัดจากยีสต์ นอกจากจะถูกใช้เป็นทั้งแหล่งไนโตรเจนแล้ว สารสกัดจากยีสต์ยังประกอบไปด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด วิตามิน แร่ธาตุ และสารอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการ เจริญของเชื้อ (Hakobyan และคณะ, 2012) ส่วนการแปรผันความเข้มข้นของเหล็กที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของ เอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส เนื่องจากเหล็กเป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ชนิดนี้ ทำให้เชื้อสามารถย่อย สารอาหารและผลิตเป็นแอดิโนซีนไตรฟอสเฟตได้มากขึ้น ส่งผลให้เจริญเติบโตได้ดีขึ้น (Wu และคณะ, 2012)

4.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตสารสี ได้แก่ ความเข้มข้นแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ชนิดของหลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง ความเข้มของแสง และการกวนผสม แปรผันทีละหนึ่ง ปัจจัย เมื่อได้ระดับที่เหมาะสม จึงแปรผันปัจจัยต่อไป เพาะเลี้ยงเชื้อโดยใช้อาหารเหลว RCVB ที่มีการแปรผันความเข้มข้นองค์ประกอบที่ได้จากข้อ 4.2.1 คือ ความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สายสกัดจากยีสต์ 4 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปัจจัยแรก คือ ความเข้มข้นแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต แบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เจริญได้ดีในอาหารที่มีแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมากกว่าอาหารกำหนดสูตร RCVB สูตรเดิมที่มีแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสายพันธุ์ W1 ให้น้ำหนักเซลล์แห้ง 3.24 ± 0.21 กรัมต่อลิตร และสายพันธุ์ W7 ให้น้ำหนักเซลล์แห้ง 3.58 ± 0.13 กรัมต่อลิตร ทั้งนี้พบการสะสมแบคทีเรียโคลิกโคโรฟิลล์ เอ เพิ่มขึ้นด้วย โดยสายพันธุ์ W7 เพิ่มขึ้นจาก 2.92 ± 0.16 เป็น 3.47 ± 0.14 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ ในขณะที่สายพันธุ์ W1 เพิ่มขึ้นจาก 6.81 ± 0.09 เป็น 7.09 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ ซึ่งปริมาณที่เพิ่มขึ้นนี้มีความแตกต่างเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ ขณะที่ปริมาณการสะสมสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 4.6) จึงจะใช้ความเข้มข้นแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต 400 มิลลิกรัมต่อลิตรในการทดลองขั้นต่อไป

ต่อมาแปรผันปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ในการเลี้ยง เริ่มจากการแปรผันชนิดของหลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง ได้แก่ หลอดไส้ หลอดแอลอีดี และหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์สีขาว โดยกำหนดใช้ความเข้มแสงเท่ากันที่ 2000 ลักซ์ และใช้สูตรอาหารที่เหมาะสมจากการทดลองก่อนหน้านี้ พบว่าแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ที่เลี้ยงด้วยหลอดไส้ ให้ผลการเจริญดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหลอดไฟอีก 2 ชนิด โดยแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 มีน้ำหนักเซลล์แห้ง 3.48 ± 0.10 และ 3.77 ± 0.11 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการสะสมสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 พบว่าหลอดไฟทั้ง 3 ชนิดให้ผลไม่แตกต่างกัน ทั้งปริมาณแคโรทีนอยด์และแบคทีเรียโคลิกโคโรฟิลล์ เอ ในขณะที่สายพันธุ์ W7 จะมีการสะสมสารสีปริมาณมากที่สุดเมื่อเลี้ยงด้วยหลอดไส้ (รูปที่ 4.7) ต่อมาเป็นผลของการแปรผันความเข้มของแสงที่ใช้ในการเลี้ยง เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักเซลล์แห้ง พบว่าความเข้มแสงทั้ง 2 ระดับให้ปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งไม่แตกต่างกัน เมื่อวิเคราะห์โดยใช้ค่าทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% แต่จะมีผลต่อการสะสมสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์เมื่อความเข้มแสง 4000 ลักซ์ แบคทีเรียมีการสะสมสารสีในกลุ่มดังกล่าวเพิ่มขึ้น ทั้งในแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ซึ่งแตกต่างจากปริมาณสารสีสะสมในชุดการทดลองที่เลี้ยงภายใต้ความเข้มแสง 2000 ลักซ์ อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อคำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าไฟฟ้าที่ใช้และปริมาณสารสีที่ได้รับ พบว่า ถ้าใช้ความเข้มแสง 4000 ลักซ์ จะมีค่าใช้จ่ายใน

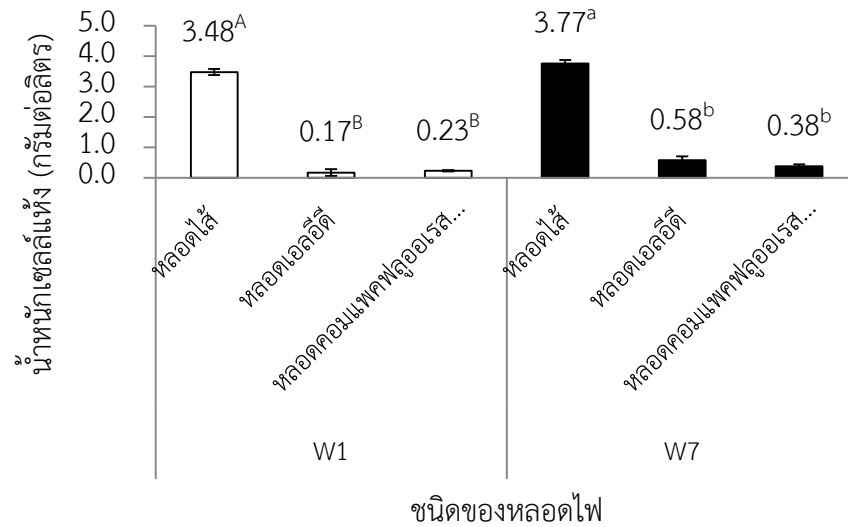
ข)



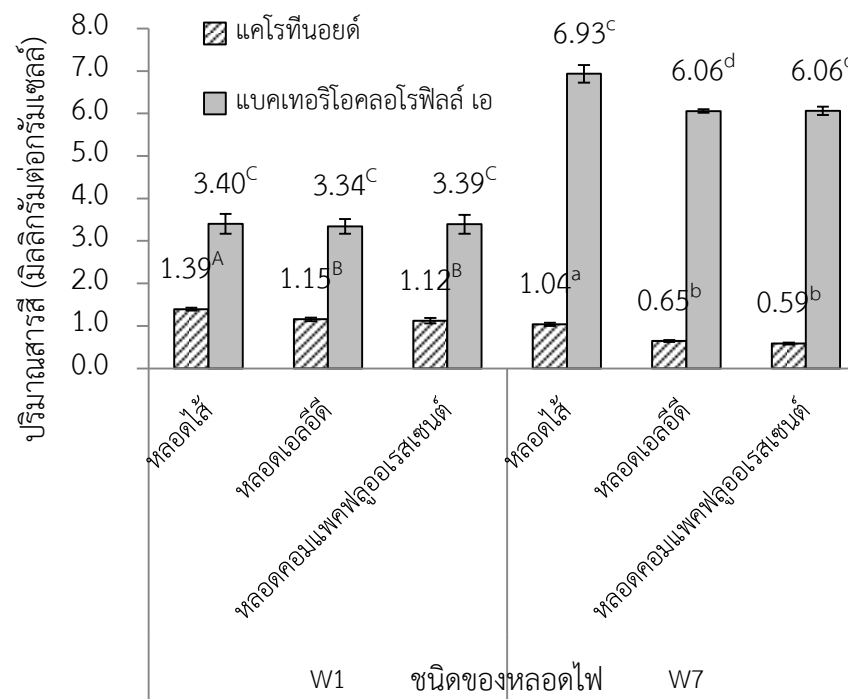
รูปที่ 4.6 ก) น้ำหนักเซลล์แห้ง และ ข) ปริมาณการสะสมสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สายสกัดจากยีสต์ 4 กรัม ต่อลิตร เพอร์ริสซัลเฟตไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่แปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรต 100 – 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

หมายเหตุ ตัวอักษรเหนือตัวเลขที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ก)

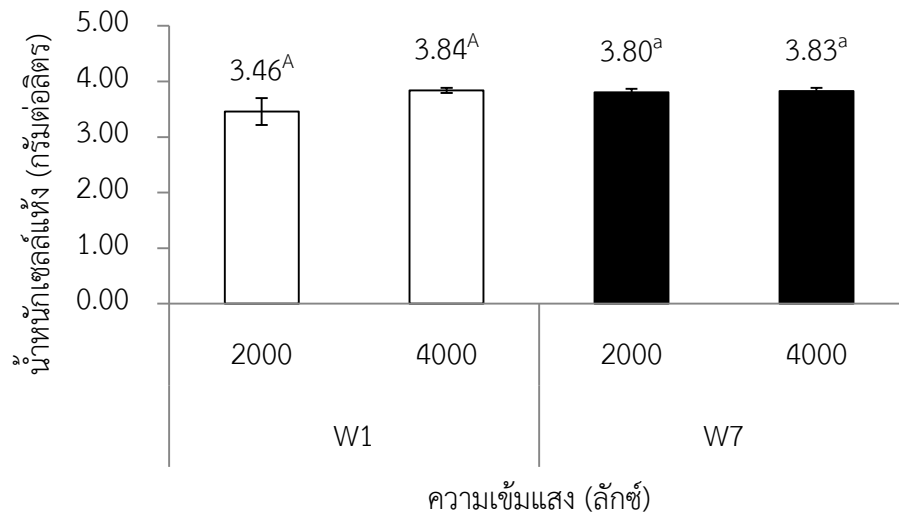


ข)

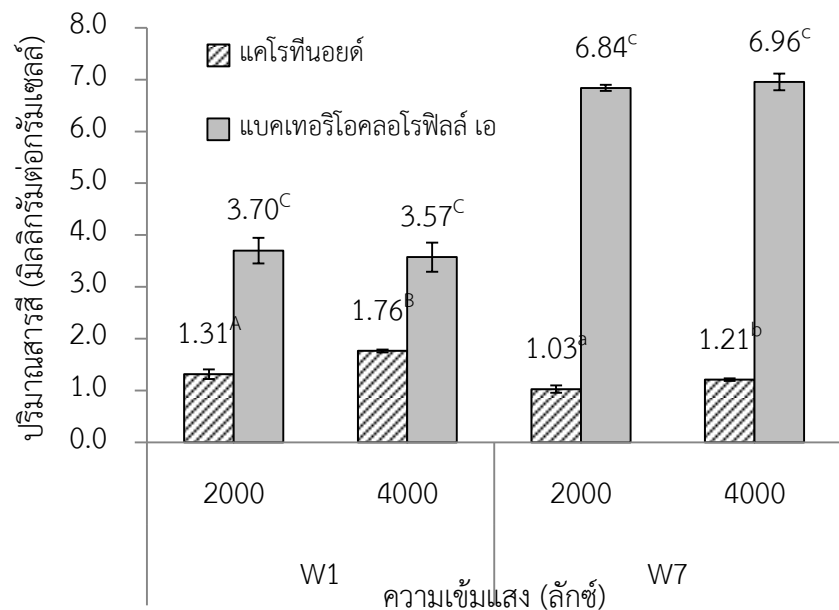


รูปที่ 4.7 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่มีความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สายสกัดจากยีสต์ 4 กรัมต่อลิตร และแปรผันความเข้มข้นเฟอร์ริซัลเฟตไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่แปรผันชนิดของหลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง หมายเหตุ ตัวอักษรเหนือตัวเลขที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ก)



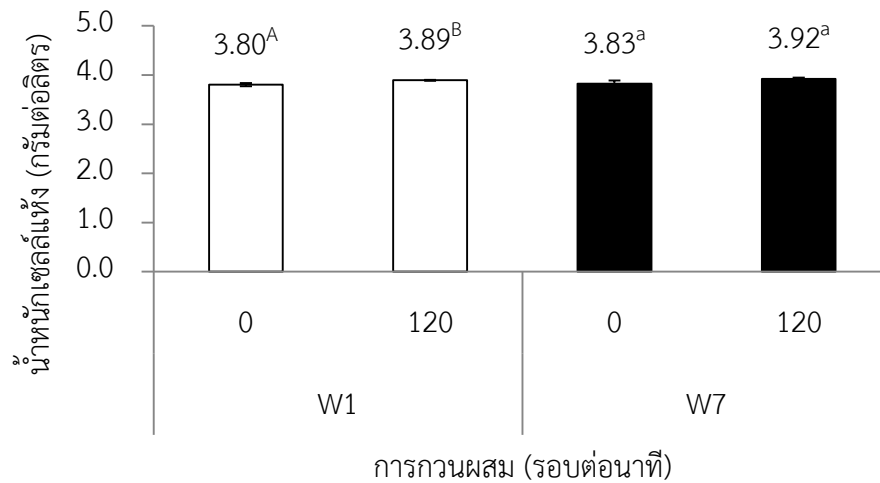
ข)



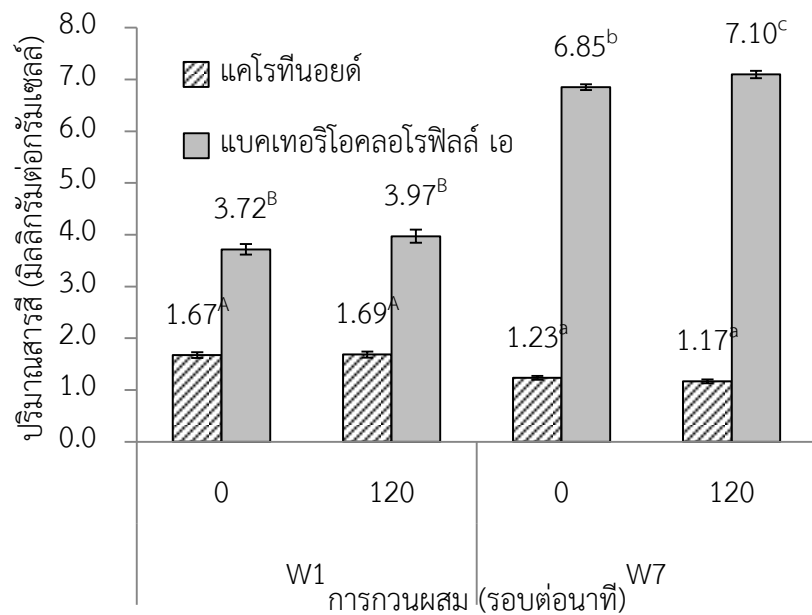
รูปที่ 4.8 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่มีความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สายสกัดจากยีสต์ 4 กรัมต่อลิตร และแปรผันความเข้มข้นเฟอร์ริซัลเฟตไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้การให้แสงจากหลอดไฟไส้ ที่แปรผันความเข้มของแสง

หมายเหตุ ตัวอักษรเหนือตัวเลขที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ก)



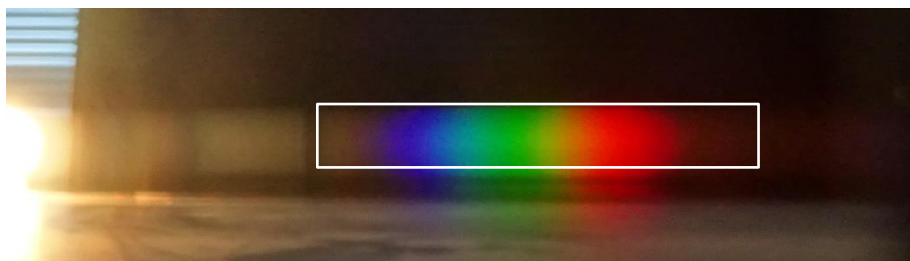
ข)



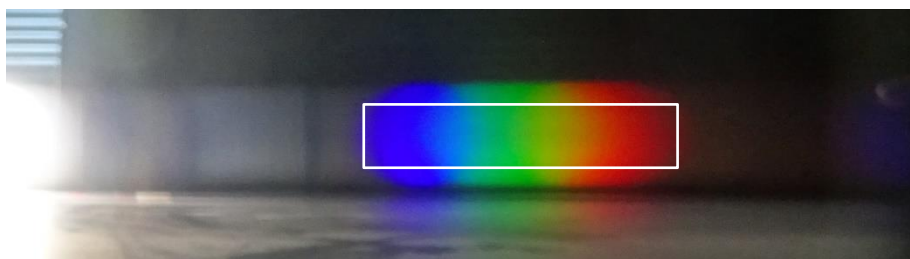
รูปที่ 4.9 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่มีความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สายสกัดจากยีสต์ 4 กรัมต่อลิตร และแปรผันความเข้มข้นเฟอร์รัสซัลเฟตไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่แปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้การให้แสงจากหลอดไฟชนิดไส้ ที่มีความเข้มของแสง 2000 ลักซ์ ที่เปรียบเทียบระหว่างชุดทดลองที่ไม่มีและมีการกวนผสม หมายเหตุ ตัวอักษรเหนือตัวเลขที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากผลการทดลองแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ มีอัตราเจริญและการสะสมสารสีในปริมาณที่แตกต่างกัน เมื่อแปรผันปริมาณหรือชนิดของปัจจัยที่สนใจศึกษา การเติมแมกนีเซียมในปริมาณที่เหมาะสม จะส่วนช่วยสนับสนุนกระบวนการสังเคราะห์แบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ ซึ่งเป็นสารสีหลักในระบบสังเคราะห์แสง เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นส่วนแกนกลางของโครงสร้าง เมื่อเติมแมกนีเซียมเชื้อจะสังเคราะห์แบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้เซลล์มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น ผลิตเอทีเอ็นซินไทรฟอสเฟตได้มากขึ้น และเจริญได้ดีขึ้นตามลำดับ (Zhou และคณะ, 2014) สำหรับการแปรผันชนิดของหลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง เมื่อตรวจสอบสเปกตรัมของแสงโดยอาศัยแผ่นเกรตติง พบว่าหลอดไฟแต่ละชนิดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.10 โดยเมื่อเลี้ยงเชื้อภายใต้การให้แสงจากหลอดไฟชนิดไส้ จะมีอัตราการเจริญสูงกว่าหลอดไฟอีก 2 ชนิด เนื่องจากหลอดไฟชนิดไส้ปล่อยแสงตลอดความยาวคลื่น ตั้งแต่ 300 ถึง 800 นาโนเมตร ในขณะที่หลอดไฟอีก 2 ชนิด ปล่อยคลื่นแสงเป็นช่วงๆ ซึ่งอาจจะไม่ครอบคลุมช่วงการดูดกลืนแสงของเชื้อเท่ากับแสงจากหลอดไส้ จึงทำให้แบคทีเรียเจริญได้น้อยกว่า เมื่อพิจารณาผลของความเข้มของแสงและการเพิ่มการกวนผสม พบว่าการใช้ความเข้มแสงที่ 4000 ลักซ์ มีผลเพิ่มปริมาณการสะสมของสารสีแคโรทีนอยด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou และคณะ (2014) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มแสงจะมีผลต่อการสะสมสารแคโรทีนอยด์ เนื่องจากสารสีในกลุ่มดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันเซลล์จากการถูกทำลายโดยแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มสูง ดังนั้นการเพิ่มความเข้มแสงจึงเป็นการกระตุ้นให้มีการสะสมสารแคโรทีนอยด์มากขึ้น โดยความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสีแคโรทีนอยด์โดยเชื้อ *Rhodospseudomonas* sp. คือ 8000 ลักซ์ สะสมแคโรทีนอยด์สูงสุด 0.6 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ ในขณะที่การกวนผสมมีผลต่อการเจริญของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์แตกต่างกัน โดยมีผลต่อการเจริญของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 มากกว่า W7 ซึ่งการกวนผสมจะช่วยเพิ่มโอกาสในการได้รับแสงของเซลล์และลดการรวมกลุ่มของเซลล์ ทำให้แบคทีเรียมีการเจริญที่ดีขึ้น (Alagesan และคณะ, 2013)

ก)



ข)



ค)



รูปที่ 4.10 แถบสว่างนี้เกิดจากการแทรกสอดของแสงจากหลอดไฟชนิดต่างๆ ผ่านแผ่นเกรตติง ก) หลอดไฟชนิดไส้ ข) หลอดไฟแอลอีดี และ ค) หลอดไฟคอมแพคฟลูออเรสเซนต์สีขาว

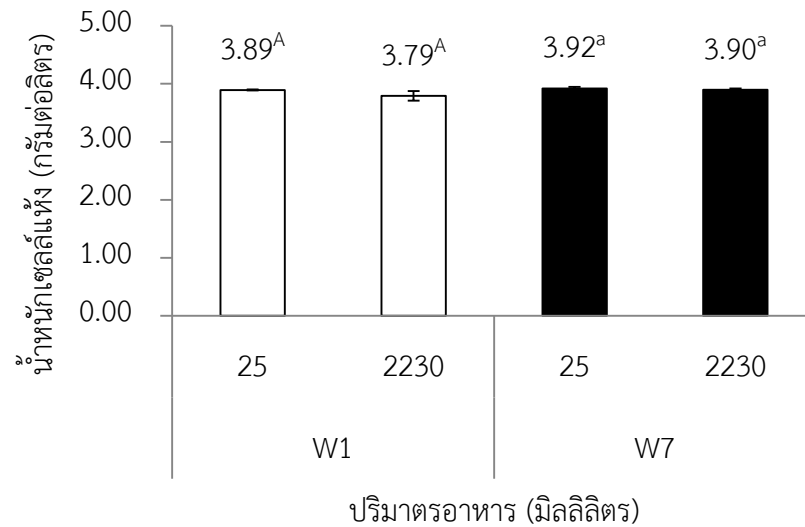
จากการทดลองทั้งหมดพบว่าแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ สามารถเพาะเลี้ยงที่สภาวะเหมาะสมเดียวกัน คืออาหารเหลว RCVB ที่มีกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สารสกัดจากยีสต์ 4 กรัมต่อลิตร เฟอร์รัสซัลเฟตไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้แสงจากหลอดไส้ ที่ความเข้มแสง 2000 ลักซ์ อัตราการกวนผสม 120 รอบต่อนาที โดยพบว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ให้ค่าน้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดที่ 3.89 ± 0.01 กรัมต่อลิตร ปริมาณการสะสมสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์สูงสุด 1.69 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ และแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 ให้ค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง 3.92 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ปริมาณสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ 1.17 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ และแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 ให้ค่าน้ำหนักเซลล์แห้ง 7.10 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรายงานจากงานวิจัยอื่นๆ (ตารางที่ 4.2) เพื่อเพิ่มขนาดการผลิต ในขั้นต่อไป จะศึกษาผลของปริมาณอาหารที่ใช้ต่อการเจริญและผลิตสารสีของแบคทีเรียที่คัดเลือก

4.2.3 ผลของการเพิ่มปริมาณของอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อต่อการเจริญและผลิตสารสี

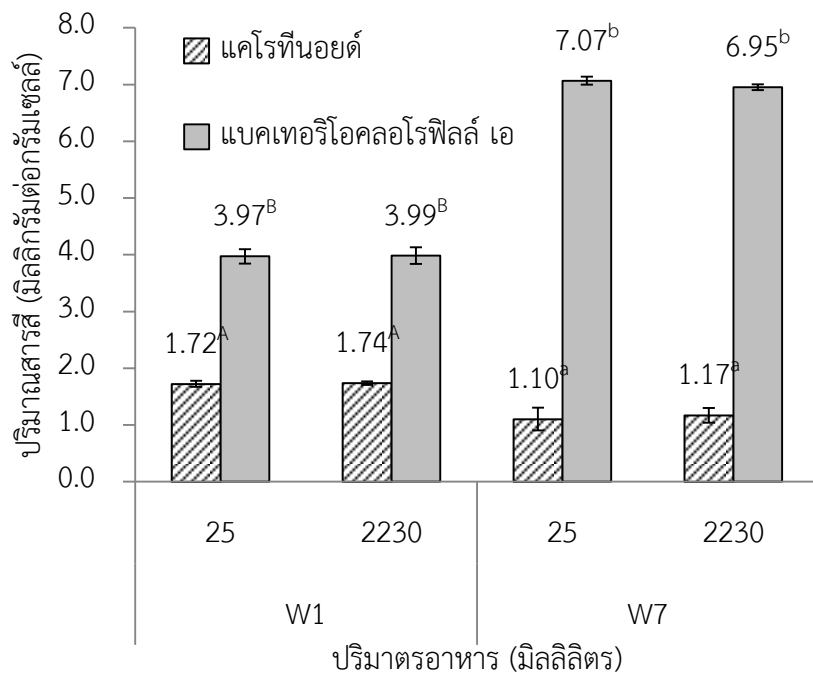
เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการขยายขนาดการผลิต ในขั้นตอนนี้ จึงเปรียบเทียบปริมาณอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ ระหว่างขวดไวแอสขนาด 25 มิลลิลิตรที่ใช้ปกติและขวดดูแรนขนาด 2 ลิตร ใช้อาหารเหลว RCVB ที่แปรผันความเข้มข้นองค์ประกอบจากขั้นตอนก่อนหน้า บ่มภายใต้แสงจากหลอดไส้ ความเข้มแสง 4000 ลักซ์ การกวนผสม 120 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างเพื่อมาวิเคราะห์การเจริญและการผลิตสารสี ภายหลังจากเลี้ยงเป็นเวลา 8 วัน จากผลการทดลอง พบว่าแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่เลี้ยงในภาชนะขนาด 2230 มิลลิลิตร มีการเจริญและการผลิตสารสีไม่แตกต่างจากชุดทดลองที่เลี้ยงในขวดขนาด 25 มิลลิลิตร แสดงถึงความเป็นไปได้ในการขยายขนาดการผลิตโดยที่แบคทีเรียยังคงอัตราการเจริญและปริมาณสารสีไว้เท่าเดิม (รูปที่ 4.11)



ก)



ข)



รูปที่ 4.11 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลว RCVB ที่มีความเข้มข้นกรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สายสกัดจากยีสต์ 4 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใต้การให้แสงจากหลอดไฟชนิดไส้ ที่มีความเข้มของแสง 2000 ลักซ์ อัตราการกวนผสม 120 รอบต่อนาที ที่แปรผันปริมาณอาหารที่ใช้เลี้ยง

นอกจากการคงประสิทธิภาพในการเจริญและผลิตสารสีเมื่อขยายขนาดการผลิตแล้ว อีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง เมื่อขยายขนาดการผลิต คือ ต้นทุนของอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยเมื่อแปรผันองค์ประกอบต่างๆในอาหาร พบว่ามีราคาต้นทุนของอาหารเพิ่มขึ้น จากสูตรดั้งเดิมที่มีราคา 11.12 บาทต่อลิตร เพิ่มขึ้นเป็น 24.52 บาทต่อลิตร (การคำนวณภาคผนวก ง) ซึ่งองค์ประกอบหลักที่ทำให้อาหารมีราคาเพิ่มขึ้น คือ กรดมาลิกที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และสารสกัดจากยีสต์ที่ใช้เป็นแหล่งไนโตรเจน โดยควรมองหาแหล่งอาหารราคาถูก มาใช้ทดแทนสารดังกล่าว เพื่อลดต้นทุนของอาหารเลี้ยงเชื้อ ในขั้นต่อไปจึงจะทดสอบความสามารถในการใช้สารอาหารในน้ำเสียในการเจริญ

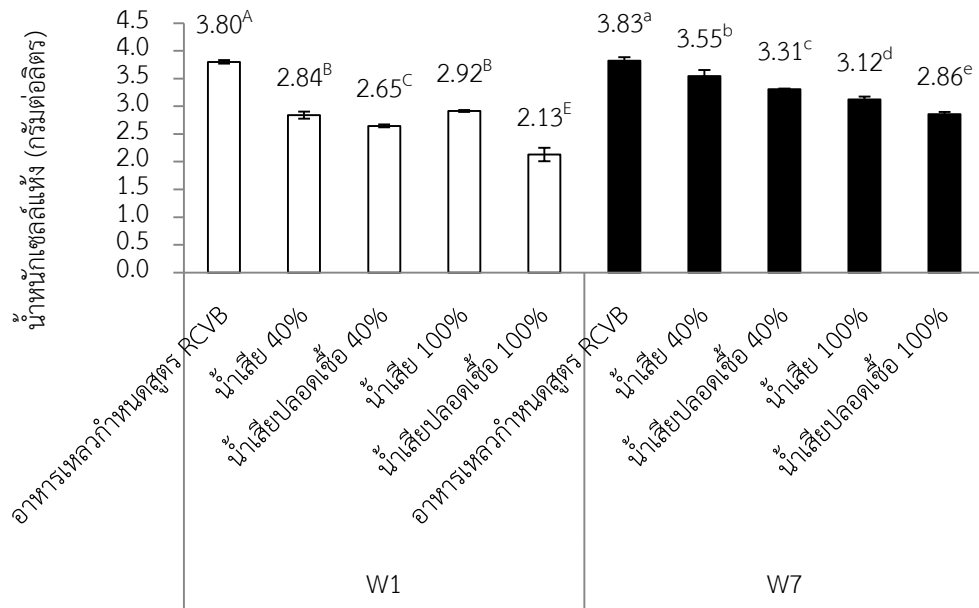
4.2.4 การทดสอบเลี้ยงแบคทีเรียในอาหารที่มีน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่เป็นองค์ประกอบ

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่มาใช้เป็นอาหารในการเลี้ยงแบคทีเรีย เนื่องจากได้มีการศึกษาเบื้องต้น โดยจักรกราชชัย บัวจันทร์ (2016) ที่ทดลองเลี้ยงเชื้อ *Rhodopseudomonas palustris* W3 ในอาหารที่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน (กรดมาลิก) แต่มีน้ำเสียเป็นองค์ประกอบ 40% โดยปริมาตร พบว่าเชื้อสามารถเจริญและผลิตสารสีได้ที่ภาวะดังกล่าว ดังนั้นการทดลองครั้งนี้ ได้แบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดที่ใช้น้ำเสีย 100% น้ำเสีย 100% แบบผ่านการทำให้ปลอดเชื้อ น้ำเสีย 40% และน้ำเสีย 40% แบบผ่านการทำให้ปลอดเชื้อ โดยชุดที่ใช้น้ำเสีย 40% จะเติมอาหารเหลว RCVB กำหนดสูตร ที่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน 60% โดยปริมาตร โดยมีค่า COD เริ่มต้นที่ 1925 ± 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดทดลองที่ประกอบด้วยน้ำเสีย 40% และ COD 3850 ± 71 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดทดลองที่ประกอบด้วยน้ำเสีย 100% จากผลการทดลองพบว่า เชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ สามารถใช้สารอาหารที่เป็นองค์ประกอบในน้ำเสียเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญได้ โดยชุดการทดลองที่มีการเจริญดีที่สุดคือ ชุดที่ใช้น้ำเสีย 40% แบบไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ โดยสายพันธุ์ W1 และ W7 ให้น้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดที่ 2.84 และ 3.55 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.12) เนื่องจากแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำมะถัน มีความสามารถในการใช้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเป็นแหล่งคาร์บอน เช่น บิวทิเรท มาเรท แลคเตท ไพรูเวท ซัคซิเนท เป็นต้น (Pott และคณะ, 2013) การที่มีแบคทีเรียชนิดอื่นอยู่ในระบบ ทำสารอาหารถูกย่อยสลายและมีขนาดโมเลกุล เล็กกลง และแบคทีเรียที่คัดเลือกสามารถนำไปใช้ในการเจริญได้ จึงทำแบคทีเรียในชุดทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ไม่ผ่านการทำให้ปลอดเชื้อ เจริญได้ดีกว่าชุดทดลองที่ใช้น้ำเสียที่ผ่านการทำให้ปลอดเชื้อ ซึ่งสอดคล้องกับค่า COD ของชุดทดลองดังกล่าว ที่สามารถลดได้ประมาณ 75-87% ของปริมาณ COD เริ่มต้น (รูปที่ 4.13) ซึ่งค่า COD ที่ลดลง หมายถึง สารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการสสารมวลชีวภาพ (Wu และคณะ, 2015) โดย

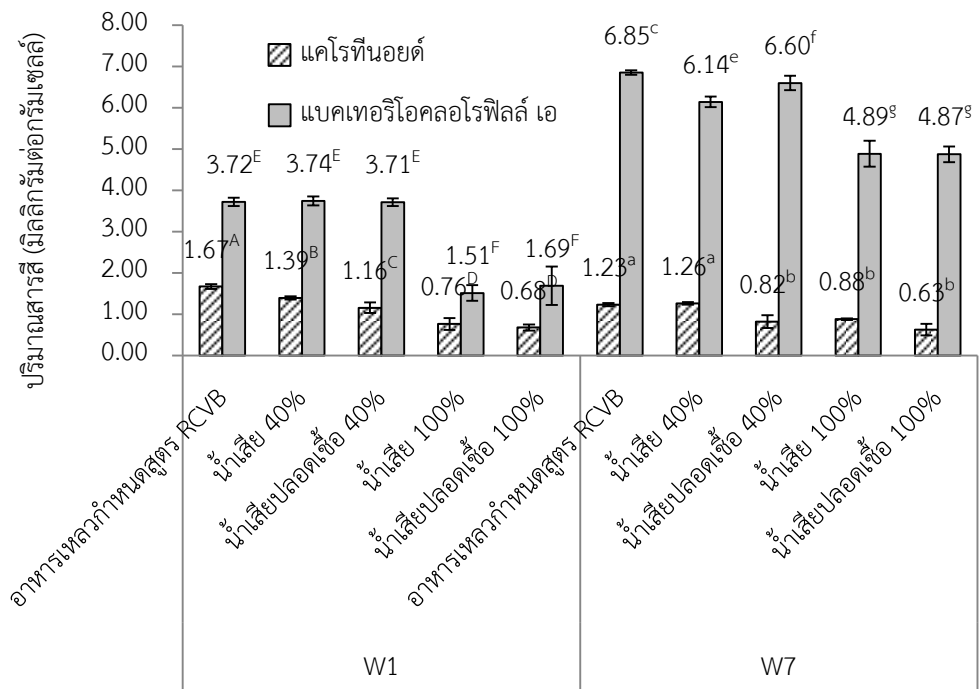
พบว่าหลังการทดลองค่า COD ลดเหลือประมาณ 210-270 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ที่กำหนดค่าไว้ที่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)) กล่าวคือ หลังการเลี้ยงเชื้อสามารถปล่อยน้ำสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ เมื่อพิจารณาปริมาณการสะสมสารสีพบว่า ในชุดการทดลองที่ใช้อาหารเหลว RCVB ผสมกับน้ำเสีย 40% โดยปริมาตร มีปริมาณสารสีใกล้เคียงกับชุดทดลองที่เลี้ยงด้วยอาหารเหลว RCVB เพียงอย่างเดียวและใกล้เคียงกับรายงานจากงานวิจัยอื่นๆ (ตารางที่ 4.2) ขณะที่ชุดทดลองที่ใช้ น้ำเสีย 100% ในการเลี้ยงพบว่าการสะสมสารสีทั้งสองชนิดในปริมาณที่น้อยกว่า ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการขาดสารอาหารบางชนิดที่จำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์สารสี เช่น แมกนีเซียม จึงทำให้มีปริมาณสารสีลดลง



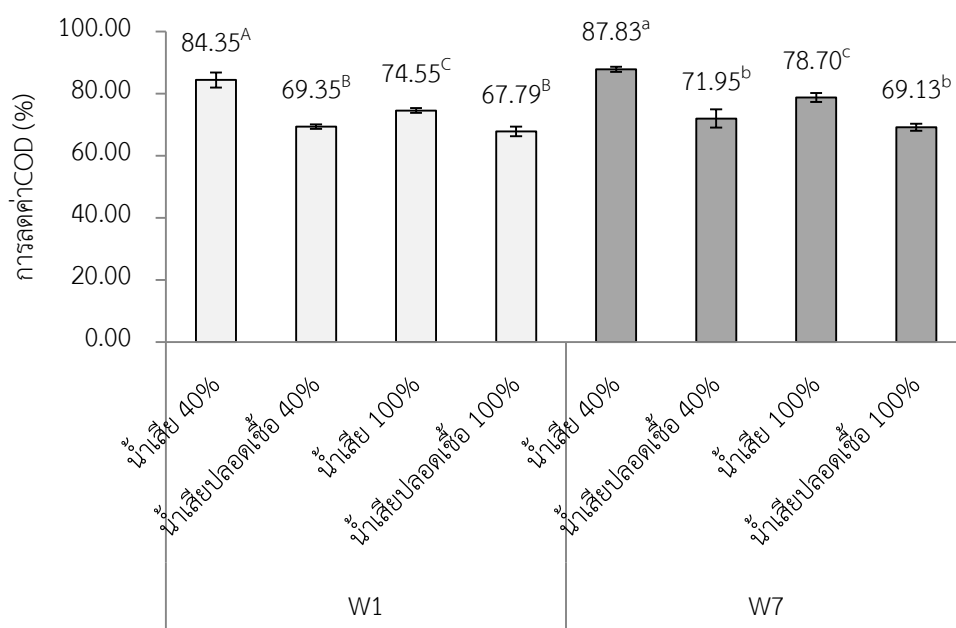
ก)



ข)



รูปที่ 4.12 ก) น้ำหนักเซลล์แห้งและ ข) ปริมาณสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลวที่มีน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่เป็นองค์ประกอบ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (อาหารเหลว RCVB) ภายใต้การให้แสงจากหลอดไฟชนิดไส้ ความเข้มของแสง 2000 ลักซ์ ปริมาตรอาหารที่ใช้เลี้ยง 25 มิลลิลิตร



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การลดค่า COD ของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 หลังการเลี้ยงในอาหารเหลวที่มีน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่เป็นองค์ประกอบ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (อาหารเหลว RCVB) ภายใต้การให้แสงจากหลอดไฟชนิดไส้ ที่มีความเข้มของแสง 2000 ลักซ์ ปริมาณอาหารที่ใช้เลี้ยง 25 มิลลิลิตร

นอกจากนี้ถ้าพิจารณาในส่วนของต้นทุนของอาหารเลี้ยงเชื้อ พบว่า เมื่อเลี้ยงเชื้อด้วยอาหารกำหนดสูตร RCVB ที่ไม่มีแหล่งคาร์บอน ผสมกับน้ำเสีย 40% จะเหลือต้นทุนในส่วนของอาหารเพียง 8.95 บาทต่อลิตร โดยยังคงความสามารถในการเจริญและผลิตสารสีในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการขยายขนาดการผลิตโดยการเลี้ยงเชื้อด้วยอาหารสูตรนี้ ควบคู่กับการลดค่า COD ของน้ำเสียในเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตามสูตรอาหารผสมน้ำเสียที่ใช้ได้ดียังมีค่า COD เริ่มต้นเพียง 1925 ± 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ต่ำ เมื่อเทียบการรายงานของคณะวิจัยอื่น ที่ใช้น้ำเสียที่มีค่า COD เริ่มต้นประมาณ 6,000 – 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Zhou และคณะ, 2014; Wu และคณะ, 2015) แต่มีเปอร์เซ็นต์การลดค่า COD ใกล้เคียงกัน ที่ประมาณ 80–90 % การที่เชื้อไม่สามารถใช้อาหารที่มีค่า COD สูงได้ อาจเนื่องมาจากสารอาหารที่เป็นองค์ประกอบในน้ำเสีย อยู่ในรูปที่เชื้อไม่สามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเลี้ยงร่วมกับแบคทีเรียสายพันธุ์อื่นที่สามารถในการย่อยสารโมเลกุลขนาดใหญ่ หรือเลือกใช้น้ำเสียจากแหล่งอื่นที่มีองค์ประกอบที่เหมาะสมต่อการใช้เลี้ยงแบคทีเรียที่คัดเลือก เช่น น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล (Yetis และคณะ, 2000) น้ำเสียจากโรงงานผลิต

ซอสถั่วเหลือง (Anam และคณะ, 2012) น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอก (Pintucci และคณะ, 2013) และน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำนม (Seifert และคณะ, 2010) เป็นต้น



ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบน้ำหนักเซลล์แห้งและปริมาณสารสีของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมก้ำามะถันในงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่นๆ

เชื้อ	แหล่งคาร์บอน	แหล่งไนโตรเจน	ความเข้มข้นแสง	ปริมาณเหล็ก	ปริมาณแมกนีเซียม	น้ำหนักเซลล์แห้ง	ปริมาณแคโรทีนอยด์ (mg/g CDW)	ปริมาณแคทคลอโรฟิลล์เอ (mg/g CDW)	เวลาในการเลี้ยง	อ้างอิง
<i>Rhodospseudomonas faecalis</i>	กรดมลิก 8 g/L	สารสกัดจากยีสต์ 4 g/L	4000 ลักซ์	Fe ³⁺ 0.5 g/L Fe ²⁺ 0.5 g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.2 g/L	32	13	-	8 วัน	Saejung และ Apaiwong, 2015
<i>Rhodospseudomonas</i> sp.	น้ำเสียสังเคราะห์ (น้ำตาล แฉกคาโรส 5 g/L กรดมลิก 3 g/L โยเดียมไบคาร์บอเนต 1 g/L	แอมโมเนีย ซัลเฟต 2 g/L	8000 ลักซ์	-	MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.2 g/L	2.65	3.00	2.94	5 วัน	Zhou และคณะ, 2014
<i>Rhodospseudomonas palustris</i>	โอดีเอ็มซึกซ์เจน 5 g/L	แอมโมเนียมคลอไรด์ 1 g/L และสารสกัดจากยีสต์ 0.5 g/L	2000 ลักซ์	FeSO ₄ ·7H ₂ O 0.1 g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.2 g/L	1.95	1.2	-	5 วัน	Kuo และคณะ, 2012
<i>Rhodobacter sphaeroides</i> Z08	น้ำเสียจากโรงงานผลิตยีนท์จากถั่วเหลือง	โปรตีน 2300 mg/L	3000 ลักซ์	-	Mg ²⁺ 10 mg/L	3.63	-	11	3 วัน	Wu และคณะ, 2015
<i>Rhodospseudomonas faecalis</i> W1	กรดมลิก 8 g/L	สารสกัดจากยีสต์ 4 g/L	2000 ลักซ์	FeSO ₄ ·7H ₂ O 0.02 g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.4 g/L	3.89	1.69	3.97	8 วัน	งานวิจัยนี้
<i>Rhodospseudomonas palustris</i> W7	กรดมลิก 8 g/L	สารสกัดจากยีสต์ 4 g/L	2000 ลักซ์	FeSO ₄ ·7H ₂ O 0.02 g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.4 g/L	3.92	1.17	7.10	8 วัน	งานวิจัยนี้
<i>Rhodospseudomonas faecalis</i> W1	น้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่	สารสกัดจากยีสต์ 2.4 g/L	2000 ลักซ์	FeSO ₄ ·7H ₂ O 0.012 g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.24 g/L	2.84	1.39	3.74	8 วัน	งานวิจัยนี้
<i>Rhodospseudomonas palustris</i> W7	น้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่	สารสกัดจากยีสต์ 2.4 g/L	2000 ลักซ์	FeSO ₄ ·7H ₂ O 0.012 g/L	MgSO ₄ ·7H ₂ O 0.24 g/L	3.55	1.26	6.14	8 วัน	งานวิจัยนี้

4.3 การสกัดแยกสารสีและศึกษาสมบัติของสารสีที่สกัดแยกได้

4.3.1 ตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการสกัดแยกสารสี

ปั่นเก็บเซลล์ เพื่อนำมาสกัดแยกสารสีที่สะสมอยู่ในเซลล์ โดยใช้เซลล์เปียกน้ำหนัก 1 กรัม ต่อปริมาณตัวทำละลาย 10 มิลลิลิตร เปรียบเทียบหาตัวทำละลายที่มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการสกัดแยกสารสี โดยพิจารณาจากช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงและค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด โดยเปรียบเทียบระหว่าง เอทานอล อะซิโตน และอะซิโตนผสมเมทานอลในอัตราส่วน 7:2 ปริมาตรต่อปริมาตร จากผลการทดลองพบว่าตัวทำละลายแต่ละชนิด สกัดแยกได้ปริมาณและชนิดของสารสีจากแบคทีเรียแตกต่างกันออกไป สำหรับแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เมื่อสกัดสารสีด้วยเอทานอล จะได้สารสกัดสีเขียวเข้ม มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 350 และ 770 นาโนเมตร สกัดด้วยอะซิโตนได้สารสกัดสีส้ม มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 350 440-500 760 นาโนเมตรและสกัดด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 350 440 ถึง 500 และ 760 นาโนเมตร ส่วนสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 เมื่อสกัดด้วยเอทานอล สกัดได้สารสกัดสีเขียวเข้ม มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 360 600 และ 770 นาโนเมตร อะซิโตนสกัดได้สารสกัดสีส้ม มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 355 450-500 565 และ 765 นาโนเมตร และอะซิโตนผสมเมทานอล มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 350 440-500 565 และ 760 นาโนเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15)

ก)

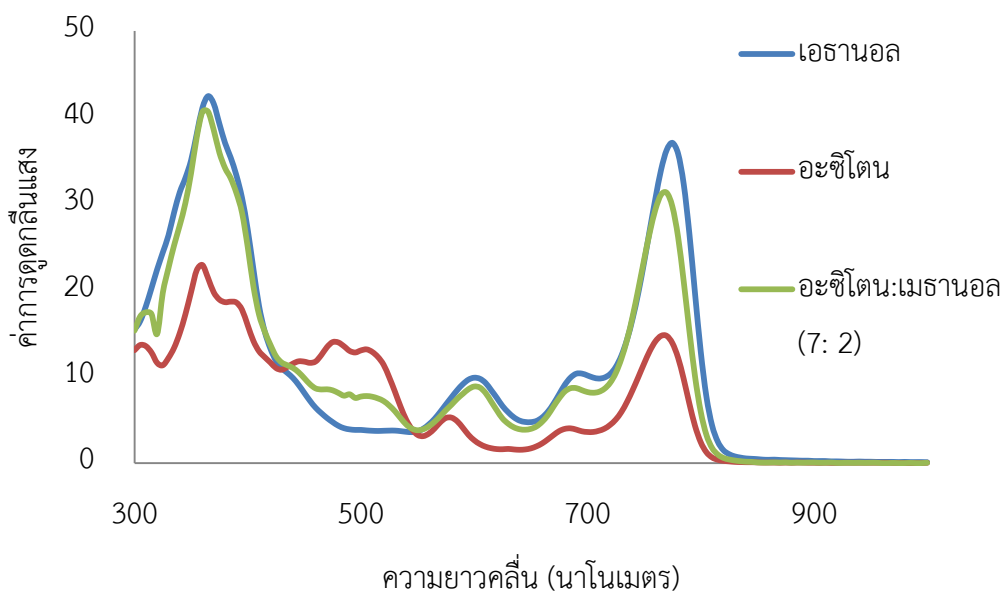
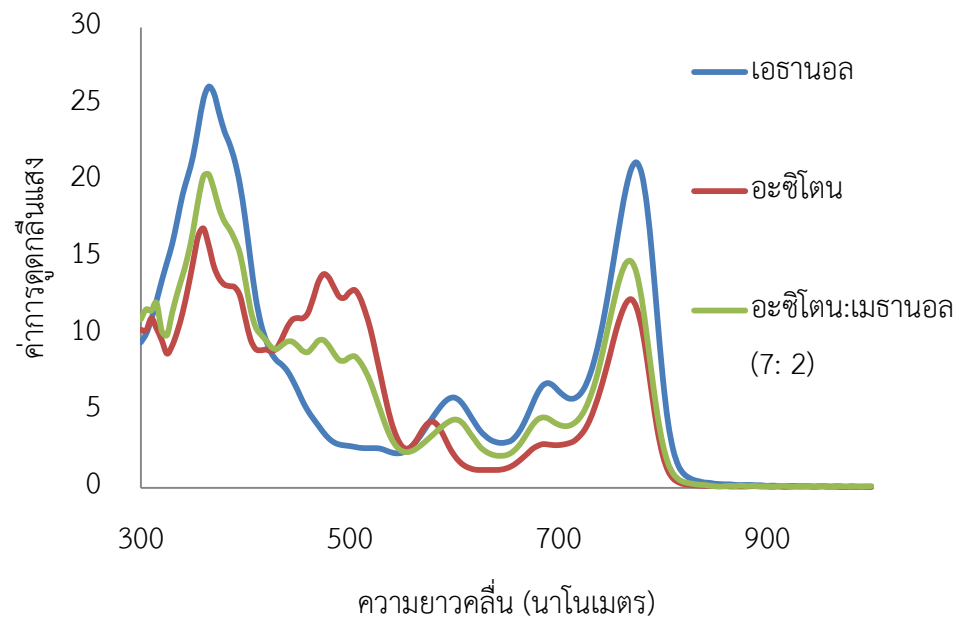


ข)



รูปที่ 4.14 สารสีจากแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อสกัดด้วยเอทานอล อะซิโตน และอะซิโตนผสมเมทานอล (7: 2) ลำดับจากซ้ายไปขวา ก) แบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ข) แบคทีเรียสายพันธุ์ W7

ก)



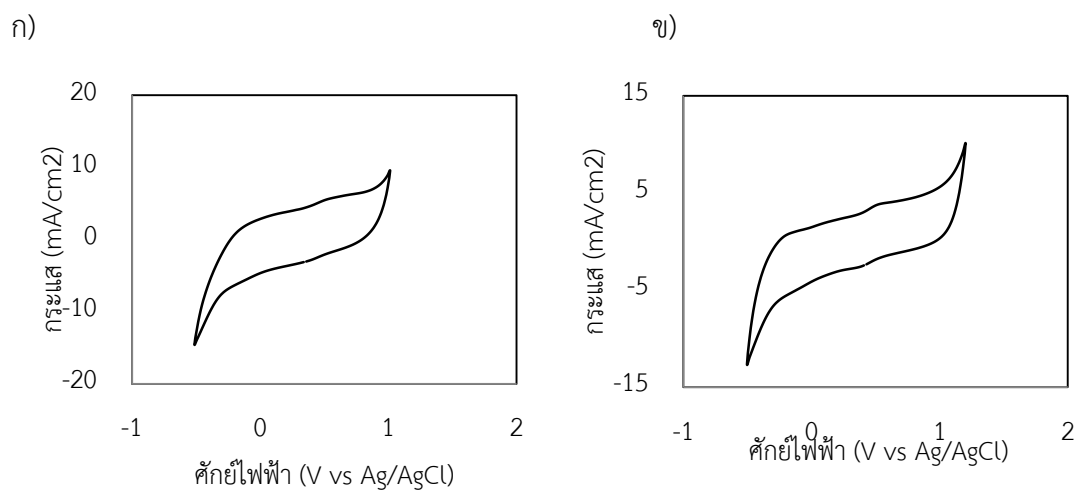
รูปที่ 4.15 ค่าการดูดกลืนแสงของสารสีจากแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ โดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ
 ก) แบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ ข) แบคทีเรียสายพันธุ์ W7

จากผลการทดลองพบว่าตัวทำละลายต่างชนิดกัน จะสกัดได้สารสีปริมาณและสัดส่วนที่แตกต่างกัน เนื่องจากสภาพขั้วของสารต่างกัน โดยเมื่อสกัดแยกสารสีด้วยเอทานอลจะค่าดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 360 และ 770 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับช่วงการดูดกลืนแสงของสารแบคทีเรียโคลอโรฟิลล์ ในขณะที่เมื่อสกัดสารสีด้วยอะซิโตน ซึ่งมักจะละลายสารที่ไม่มีขั้ว หรือสภาพขั้วน้อยได้ดี จึงทำให้สาร

สีที่สกัดด้วยอะซิโตนมีช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 440-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Madigan และ Jung, 2009) และเมื่อสกัดสารสีด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล ซึ่งเป็นการผสมระหว่างตัวทำละลายที่มีขั้วและไม่มีขั้ว จะได้สารสีทั้งประเภทแบคเทอร์ิโอคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ เนื่องจากสารสกัดที่ได้มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดทั้งที่ 350 440 ถึง 500 และ 760 นาโนเมตร แสดงถึงการมีอยู่ของสารสีทั้งสองประเภท โดยในงานวิจัยนี้ สนใจที่จะนำสารสีที่มีช่วงการดูดกลืนกว้างและแตกต่างกันมาใช้ ดังนั้น สารสีที่สกัดด้วยเอทานอล และอะซิโตนผสมเมทานอล จะถูกใช้ในการทดลองขั้นต่อไป เพื่อประเมินระดับพลังงานของสารสี ว่ามีแนวโน้มที่จะนำไปประยุกต์เป็นสีย้อมไวแสงได้หรือไม่ นอกจากนี้ปริมาณและสัดส่วนของสารสีที่ได้รับยังขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแบคทีเรีย โดยสายพันธุ์ W7 มีแนวโน้มที่จะผลิตสารสีในปริมาณมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์ W1 สังเกตได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่มากกว่าเมื่อสกัดจากปริมาณเซลล์และปริมาตรสารที่ใช้สกัดที่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาในแง่สัดส่วนของแบคเทอร์ิโอคลอโรฟิลล์ต่อแคโรทีนอยด์ พบว่า สายพันธุ์ W7 มีสัดส่วนดังกล่าวสูงกว่าสายพันธุ์ W1 กล่าวคือ มีการผลิตสารแบคเทอร์ิโอคลอโรฟิลล์มากกว่าสารแคโรทีนอยด์

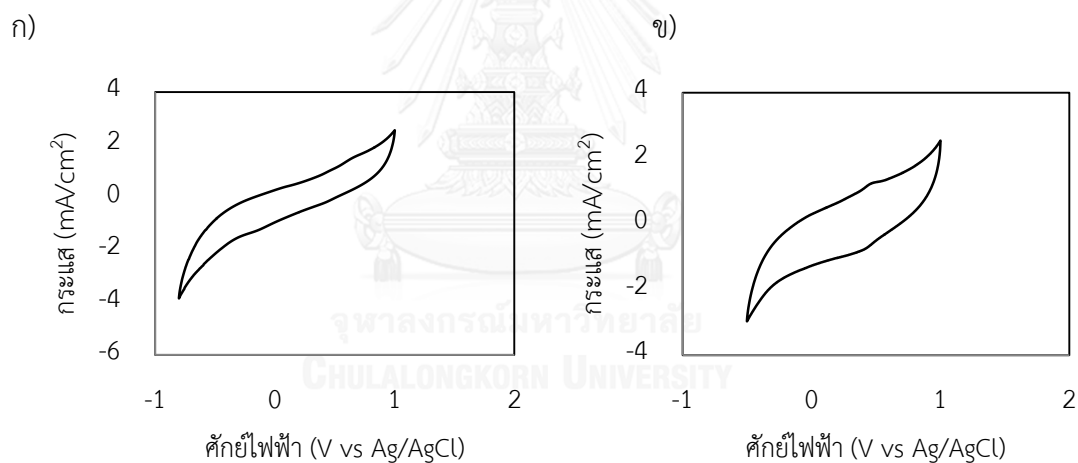
4.3.2 ระดับพลังงานและช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารสีโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

วัดระดับพลังงานของสารสีที่สกัดจากตัวทำละลายที่เหมาะสมจากขั้นก่อนหน้า โดยการสร้างกราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี ซึ่งได้จากการจ่ายกระแสที่มีศักย์ต่างกัน จากค่าเริ่มต้นไปยังค่าสุดท้ายแล้วย้อนกลับมาที่ค่าเริ่มต้นอีกครั้ง ทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะวนเป็นรูป โดยแกนตั้งจะแสดงถึงกระแสและแกนนอนแสดงถึงศักย์ไฟฟ้า สารแต่ละชนิดจะมีตำแหน่งพิกแอโนดิกและแคโทดิกแตกต่างกัน ซึ่งพิกทั้งสองจะแสดงถึงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (สารให้อิเล็กตรอน) และปฏิกิริยารีดักชัน (สารรับอิเล็กตรอน) ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณหาระดับพลังงาน HOMO-LUMO และช่องว่างระหว่างแถบพลังงานได้ จากผลการทดลองพบว่า สารสีที่สกัดแยกโดยใช้เอทานอล ของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 มีตำแหน่งการเกิดพิกแอโนดิกที่ 0.51 และ 0.50 V ตามลำดับ (รูปที่ 4.16) เมื่อพิจารณาสารสีที่สกัดด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล พบว่าสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 มีตำแหน่งการเกิดพิกแอโนดิกที่ศักย์ไฟฟ้าที่สูงที่สุด โดยมีตำแหน่งที่ 0.63 V ขณะที่สายพันธุ์ W7 มีตำแหน่งการเกิดพิกแอโนดิกที่ศักย์ต่ำที่สุดที่ 0.43 V (รูปที่ 4.17)



รูปที่ 4.16 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี ของสารสีของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อสกัดด้วยเอทานอล

ก) สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ ข) สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7



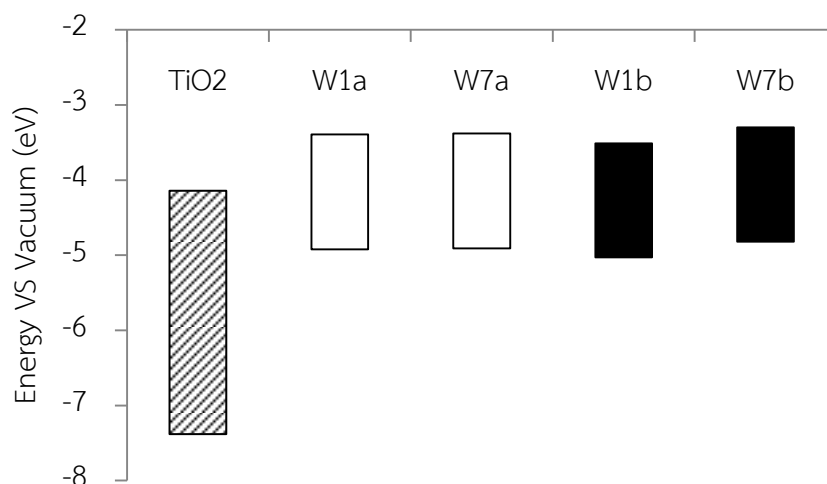
รูปที่ 4.17 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี ของสารสีของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ เมื่อสกัดด้วยอะซิโตน

ผสมเมทานอล ก) สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ ข) สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7

ตารางที่ 4.3 ระดับพลังงานและช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7

ชนิดของสารละลายที่ใช้สกัด	สายพันธุ์แบคทีเรีย	ตำแหน่งพีคแอนโอดิก (V)	ระดับพลังงาน HOMO (eV)	ระดับพลังงาน LUMO (eV)	ช่องว่างระหว่างระดับพลังงาน (eV)
เอทานอล	W1	0.51	-4.91	-3.39	1.52
	W7	0.50	-4.90	-3.38	1.52
อะซิโตน: เมทานอล (7: 2)	W1	0.63	-5.03	-3.51	1.53
	W7	0.43	-4.83	-3.30	1.53

เมื่อคำนวณกลับเป็นระดับพลังงาน HOMO-LUMO และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (ตารางที่ 4.3) (วิธีการคำนวณภาคผนวก จ) พบว่าระดับพลังงาน LUMO ของสารสีของแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์ ที่สกัดด้วยตัวทำละลายทั้งสองชนิด มีค่าสูงกว่าแถบนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งมีค่าอยู่ที่ -4.14 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้น อิเล็กตรอนสามารถถ่ายโอนจากโมเลกุลของสารสีของแบคทีเรียไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ (รูปที่ 4.18) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสารสีจากแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ มาประยุกต์เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 4.18 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์และสายสกัดจากสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 (a คือ สารสีที่สกัดด้วยเอทานอล และ b คือ สารสีที่สกัดด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล)

4.4 การประกอบเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง และการศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพ

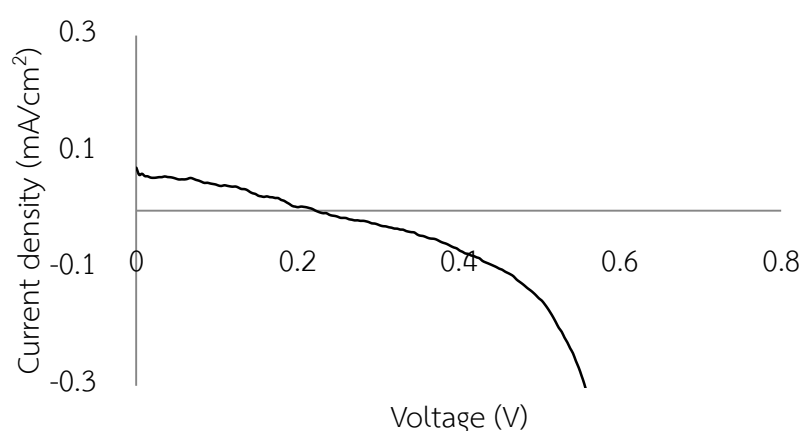
4.4.1 ประสิทธิภาพเบื้องต้นของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง

จากการทดลองขั้นก่อนหน้าพบว่าระดับพลังงานของสารสีของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ มีระดับพลังงานที่เหมาะสมกับสารไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำดังนั้น ในขั้นนี้ จึงจะทดลองโดยเลือกใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดด้วยเอทานอล มาทดลองเบื้องต้นก่อน โดยใช้สารสีดังกล่าว มาแช่ขั้วไฟฟ้ารับแสงที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 7.5 ไมครอนเป็นสารกึ่งตัวนำ เป็นเวลา 96 ชั่วโมง นำไปประกอบเป็นเซลล์สุริยะตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะโดยวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า พบว่าเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าที่ 0.004% (ตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.19)

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง

Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
0.04	396	18196	583663	42	0.004

ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 7.5 ไมครอน เป็นสารกึ่งตัวนำ พื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจมาจากการที่สีย้อมขาดหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ยึดเกาะกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีโมเลกุลสีย้อมเกาะติดอยู่ปริมาณน้อย หรือมีระดับพลังงานที่ไม่เหมาะสมกับองค์ประกอบอื่นๆภายในเซลล์ เช่น สารกึ่งตัวนำ คูรีดอกซ์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้อิเล็กตรอนถ่ายโอนได้ไม่ดี ซึ่งจะแก้ไขพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์ที่ละจุดในขั้นตอนต่อไป ในขั้นแรกจะแก้ไขปัญหา การที่เซลล์มีค่า Voc ต่ำ สิ่งที่เป็นตัวกำหนดค่า Voc ของเซลล์ คือ คูรีดอกซ์ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ และระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ โดยมีรายงานว่าเมื่อใช้สารประกอบโคบอลต์เป็นคูรีดอกซ์ จะทำให้เซลล์มีค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Voc) ที่สูงขึ้น จึงสนใจที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์กับเซลล์ที่ใช้ไอโอดีไตรไอโอดี นอกจากนี้จะเปรียบเทียบลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ โดยเปรียบเทียบระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นของเหลวและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลวต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

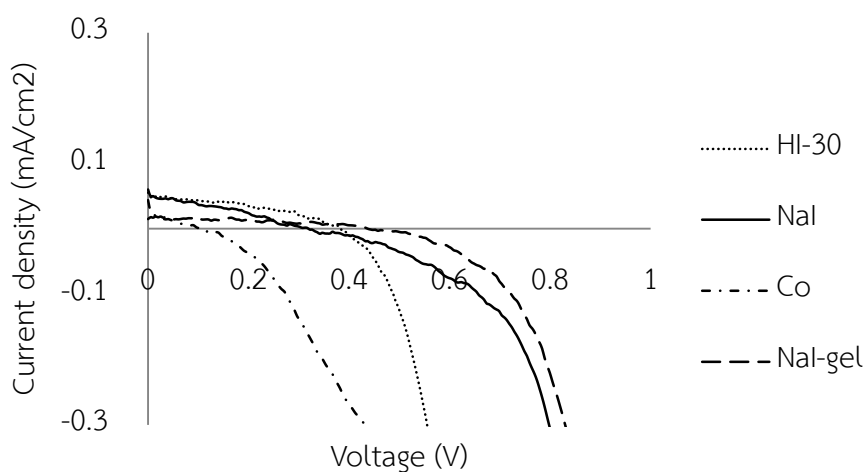
4.4.2 การแปรผันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์

เตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงโดยการแช่ในสารสีเช่นเดียวกับข้อ 4.4.1 โดยเปรียบเทียบระหว่างใช้สูตรอิเล็กโทรไลต์ HI-30 ที่มีไอโอดีนและไตรไอโอดีน (I^-/I_3^-) เป็นคูรีดอกซ์ (Solaronix, Switzerland) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอโอดีนและไตรไอโอดีน (I^-/I_3^-) เป็นคูรีดอกซ์ เตรียมจากสารประกอบโซเดียมไอโอดีน (NaI) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ของสารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์ (Co-complex) และเปรียบเทียบชนิดอิเล็กโทรไลต์ระหว่างของเหลวและกึ่งแข็งกึ่งเหลว โดยใช้อิเล็กโทรไลต์แบบเจลของสารประกอบโซเดียมไอโอดีน (NaI-gel)

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์

Samples	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
NaI	0.05	380	36360	1114635	39	0.008
HI-30	0.05	222	13408	4345338	32	0.004
Co- complex	0.04	95	3483	479529	31	0.001
NaI-gel	0.02	308	60289	2193055	46	0.004

ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 75 ไมครอน เป็นสารกึ่งตัวนำ พื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์

จากผลการทดลองพบว่า ระบบอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอโอดีน ไตรไอโอดีนเป็นคูรีดอกซ์ ซึ่งได้แก่ HI-30 NaI และ NaI-gel ให้ประสิทธิภาพและค่า Voc สูงกว่าเซลล์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์เป็นคูรีดอกซ์ (ตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.20) ซึ่งขัดแย้งกับการรายงานของ Molla และคณะ (2016) ที่พบว่าเมื่อใช้สารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์ร่วมกับสีย้อมที่มีโครงสร้างพอร์ไฟริน จะทำให้ Voc มีค่าสูงขึ้น ทำให้เซลล์สุริยะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีค่า Voc เพิ่มขึ้นจาก 0.74 mV เมื่อใช้ไอโอดีน ไตรไอโอดีนเป็นคูรีดอกซ์ เป็น 0.83 mV เมื่อใช้สารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์เป็นคูรีดอกซ์ (Molla และคณะ, 2016) แต่อย่างไรก็ตาม Kono และคณะ (2016) ได้รายงานถึงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ใช้สารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์กับสีย้อมประเภทเทเนียม (สีย้อม T5 T7 TF-1 และ N749) ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ไอโอดีน/ไตรไอโอดีนเป็นคูรีดอกซ์ โดยคณะผู้วิจัยให้เหตุผลว่า สารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ทำให้ความสามารถในการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้น้อย เกิดการส่งคืนอิเล็กตรอนคืนสู่มอเลกุลสีย้อมได้ลำบาก จึงทำให้เซลล์มีอัตราการตกกลับของอิเล็กตรอนสู่มอเลกุลของสีย้อมสูง และมีปริมาณอิเล็กตรอนที่ส่งไปยังสารไทเทเนียมไดออกไซด์น้อย เกิดกระแสต่ำ และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าต่ำ ตามลำดับ (Kono และคณะ, 2016) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโทรไลต์ที่มีลักษณะของเหลว (NaI) และกึ่งแข็งกึ่งเหลว (NaI-gel) พบว่าค่า Voc ที่ได้รับจากเซลล์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว มีค่าสูงกว่า แต่มีประสิทธิภาพการเปลี่ยน

รูปพลังงานต่ำกว่าสูตรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเป็นของเหลว ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Tao และคณะ (2015) ที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะของเหลวกับกึ่งแข็งกึ่งเหลว (โดยการเติม N,N'-1,5-pentanediybis-dodecanamide ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่าอิเล็กทรอนิกส์แบบกึ่งแข็งกึ่งเหลวมีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่ผ่านของอิเล็กตรอนจากคูรีตอกซ์ผ่านสารที่มีสถานะกึ่งแข็งเป็นไปได้ยากกว่าสารที่มีสถานะของเหลว เป็นผลให้เกิดการตกกลับของอิเล็กตรอนสู่ไตรโอไอโอดีในระบบอิเล็กทรอนิกส์ จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำลง ตามลำดับ (Tao และคณะ, 2015) ดังนั้นในขั้นถัดไปจะเลือกใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบเหลว ที่มีคูไอโอดีและไตรโอไอโอดี (I_1/I_3) ของสารประกอบโซเดียมไอโอดี (NaI) สำหรับปัญหาถัดมาที่จะแก้ไข คือ การที่มีปริมาณสารสีเกาะอยู่บนขั้วไฟฟ้าทำงานน้อย โดยอาศัยการปรับสภาพพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำให้มีความเป็นประจุมากขึ้น เพื่อให้ง่ายต่อการยึดเกาะ

4.4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะของสีย้อมบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำโดยการปรับสภาพพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์

ทดสอบโดยการนำขั้วไฟฟ้ารับแสงไปแช่ในกรดไนตริก และกรดซัลฟูริก ที่แปรผันความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาพพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำให้เหมาะสมต่อการเกาะของสีย้อมจากแบคทีเรีย จากนั้นนำไปแช่สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เช่นเดียวกับข้อ 4.4.1 จากผลการทดลองพบว่า การปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ ช่วยเพิ่มความสามารถในการเกาะของสีย้อมจากแบคทีเรียกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเห็นได้จากค่าการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้ารับแสงที่เพิ่มขึ้น และปริมาณสีย้อมที่เกาะ (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณสีที่ย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่เกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายหลังจากปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรด ที่ความเข้มข้นต่างๆ

	ค่าการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 425 nm	ปริมาณสารสีที่เกาะบนพื้นผิวของ สารกึ่งตัวนำ ($\times 10^{-6}$ mg/cm ²)
ไม่ปรับสภาพพื้นผิว	0.19 \pm 0.01	8.18
กรดไนตริก 0.1 M	0.23 \pm 0.01	10.00
กรดไนตริก 0.5 M	0.18 \pm 0.01	8.18
กรดไนตริก 1 M	0.25 \pm 0.01	11.36
กรดไนตริก 2 M	0.23 \pm 0.01	10.00
กรดซัลฟูริก 0.1 M	0.22 \pm 0.00	10.00
กรดซัลฟูริก 0.5 M	0.25 \pm 0.01	10.90
กรดซัลฟูริก 1 M	0.22 \pm 0.01	10.00
กรดซัลฟูริก 2 M	0.20 \pm 0.01	9.09

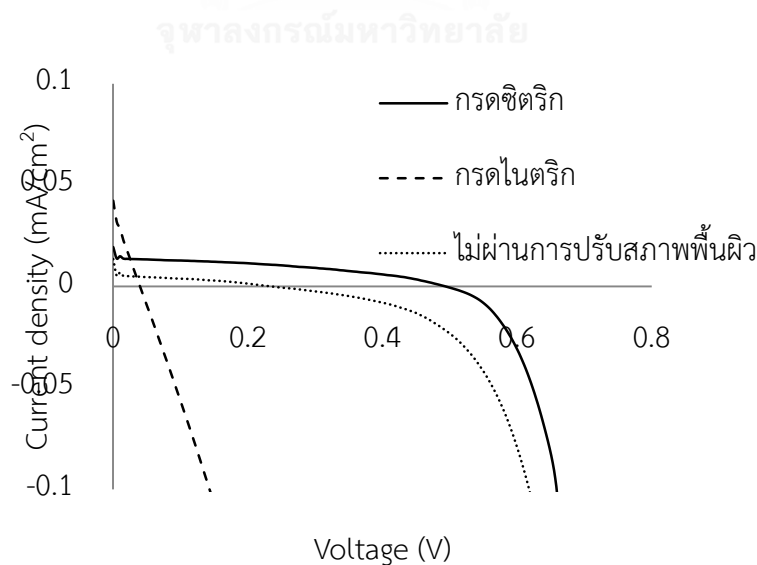
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อคำนวณปริมาณสารสีกลับจากค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุดของของสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดด้วยเอทานอล บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (วิธีการคำนวณภาคผนวก จ) พบว่าการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ให้ค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณสีที่ย้อมที่เกาะสูงที่สุด รองลงมาคือกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ดังนั้นทั้งสองสภาวะนี้จะถูกใช้ในการปรับสภาพผิวและประกอบเซลล์สุริยะ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพต่อไป ซึ่งผลการเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะของสีย้อมบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์นี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim และคณะ (2013) ที่ปรับสภาพพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการนำขั้วไฟฟ้าทำงานไปแช่ในกรดไนตริก (pH 1) ก่อนนำไปแช่ในสารละลายสีย้อม พบว่า การปรับสภาพด้วยกรดไนตริกมีผลในการเพิ่มประจุบวกทำให้สีย้อมเกาะกับไทเทเนียมได้ง่ายขึ้น จึงมีผลทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการแช่สีย้อมสั้นลงจาก 6 ชั่วโมง ในชุดควบคุม เหลือ 20 นาที ในชุดทดลอง (Kim และคณะ, 2013) นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับสภาพผิว มีผลในการเพิ่มปริมาณสีที่ย้อมที่เกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ จึงทำให้มีอิเล็กตรอนที่ส่งจากสีย้อมไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์และออกสู่วงจรภายนอกมากขึ้น เป็นผลให้เซลล์มีความสามารถในการผลิตกระแสมากขึ้น (ค่า J_{sc} สูงขึ้น) และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ เมื่อวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าของเซลล์ที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์และกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (ตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.21) พบว่า

เซลล์ที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.14% ดังนั้นสภาวะนี้จะถูกใช้ในการทดลองขั้นถัดไป ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงปริมาณสีย้อมที่เกาะบนพื้นผิวกับประสิทธิภาพของเซลล์ ตามทฤษฎี ชุดทดลองที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกควรจะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่ให้ผลในทางตรงกันข้าม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหมู่ NO_3^- ที่แตกตัวมาจากกรดไนตริก ไปแย่งพื้นที่ในการเกาะของสีย้อม (Jung และคณะ, 2008) จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนไม่สามารถส่งจากโมเลกุลสีย้อมไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ และเพิ่มโอกาสการตกกลับของอิเล็กตรอนสู่โมเลกุลของสีย้อมและคูรีดอกซ์ จึงทำให้มีค่า Voc และประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน ต่ำกว่าชุดทดลองที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริก

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ภายหลังจากการปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 M และกรดไนตริก 1 M

Samples	Jsc (mA/cm^2)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm^2)	Rseries (Ohm/cm^2)	FF (%)	PCE (%)
กรดซัลฟิวริก	0.06	498	37905	953564	43	0.014
กรดไนตริก	0.17	40	471	0	21	0.001
ไม่ปรับสภาพผิว	0.05	380	36360	1114635	39	0.008

ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นหนา 7.5 ไมครอนเป็นสารกึ่งตัวนำ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) พื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ภายหลังจากการปรับสภาพผิวด้วยกรดซिटริกความเข้มข้น 0.5 M และกรดไนตริก 1 M

4.4.4 การแปรผันความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อการเกาะของสีย้อม การทดลองนี้จึงแปรผันความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ตั้งแต่ 3-8 ชั้น วัดความหนาโดยเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profilometer, 3ST, Dektak, USA) นำหัวไฟฟ้าทำงานที่เตรียมได้ ไปแช่ในสารสกัดจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 (ค่าการดูดกลืนแสงที่ 770 นาโนเมตร เท่ากับ 30) เป็นเวลา 96 ชั่วโมง นำมาประกอบเป็นเซลล์สุริยะและวัดประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงผลการวัดประสิทธิภาพ

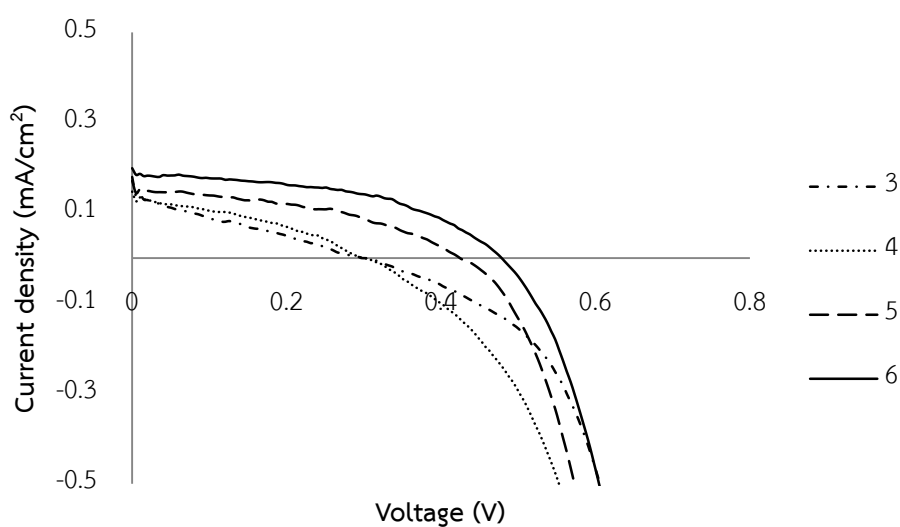
ตารางที่ 4.8 ปริมาณสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่เกาะบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ภายหลังจากการแปรผันความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์

จำนวนชั้น	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 nm	ปริมาณสารสีที่เกาะบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ($\times 10^{-6}$ mg/cm ²)
3	0.24 \pm 0.02	10.90
4	0.25 \pm 0.03	11.35
5	0.34 \pm 0.03	15.44
6	0.35 \pm 0.01	15.90

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ

จำนวน ชั้นที่ สกรีน	ความ หนา ฟิล์ม (μm)	Rep.	Jsc (mA/cm^2)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm^2)	Rseries (Ohm/cm^2)	FF (%)	PCE (%)
3	7.5	1	0.14	362	6190	2472996	22	0.011
4	10	1	0.15	414	5685	2112721	24	0.014
5	12.5	1	0.15	426	23000	596552	43	0.028
6	15	1	0.19	478	44616	277367	49	0.044

ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) พื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรความหนาของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นที่สกรีนมากกว่า 6 ชั้น พบการแตกลายงาของชั้นฟิล์ม การทดลองจึงที่ความหนาสูงสุดที่ 6 ชั้น หรือ 15 ไมโครเมตร เนื่องจากการแตกจะทำให้ประสิทธิภาพการส่งอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ำ (Fan และคณะ, 2012) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้เซลล์สุริยะมีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปแสงเป็นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.9 และ รูปที่ 4.22) เนื่องจากการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์ม ทำให้มีพื้นที่ผิวให้สีย้อมเกาะมากขึ้น (ตารางที่ 4.8) มีอิเล็กตรอนที่ถูกส่งจากโมเลกุลสีย้อมไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น มีความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumari และคณะ (2016) ที่ศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ ตั้งแต่ 5.57 ถึง 20.65 ไมครอน โดยพบว่าความหนาฟิล์มให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่า 12.73 ไมครอน ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดกลืนแสงในปริมาณที่เหมาะสม อิเล็กตรอนถูกส่งจากโมเลกุลสีย้อมไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ และออกสู่วงจรภายนอกได้มาก ทำให้มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit photocurrent) สูง และความต้านทานการแลกเปลี่ยนประจุ (charge transfer resistance) ต่ำ ระยะเวลาที่อิเล็กตรอนคงสภาพก่อนการตกกลับนาน โดยเมื่อเพิ่มความหนาชั้นมากกว่านี้ จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำลง เนื่องจากแสงส่องผ่านชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้น้อย ทำให้มีปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบโมเลกุลของสีย้อมน้อย และผลออกมาเป็นกระแสได้ต่ำ (Kumari และคณะ, 2016) นอกจากนี้ความหนาของชั้นฟิล์มยังทำให้ระยะทางการวิ่งของอิเล็กตรอนจากชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ไปยังชั้นสารนำไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้ารับแสงยาวขึ้น ทำให้เพิ่มโอกาสการไหลย้อนกลับของอิเล็กตรอนไปสู่ไตรโอไอไดต์ ซึ่งเป็นคูรีดอกซ์ในระบบอิเล็กโทรไลต์ (Zhang และคณะ, 2014) นอกจากปริมาณสารสีที่เกาะจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แล้ว ชนิดและสัดส่วนของสารสียังมีผลในแง่ของการช่วงดูดกลืนแสงของเซลล์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานแสงและแปลงเป็นกระแสไฟฟ้า จากการศึกษาในชั้น 4.3.1 พบว่าชนิดของสารสีกักมีผลต่อชนิดและสัดส่วนของสารสีที่สกัดได้ จึงเลือกปัจจัยนี้มาศึกษาในลำดับถัดไป

4.4.5 การแปรผันตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสีย้อม

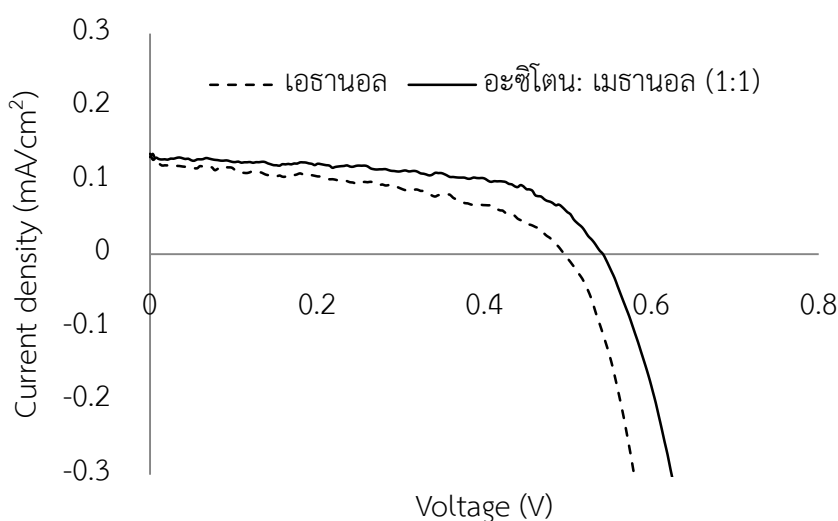
ในการศึกษาขั้นต้นได้เลือกเอทานอล มาใช้เนื่องจากสามารถสกัดได้สารแบบเทอร์โมคลอโรฟิลล์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งในช่วงแสงที่ตามองเห็นและช่วงใกล้รังสีอินฟราเรด แต่อะซิโตนผสมเมทานอล อัตราส่วน 7:2 ปริมาตรต่อปริมาตร ก็สามารถสกัดสารสีที่มีช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงกว้างเช่นกัน จึงคัดเลือกมาศึกษาในขั้นตอนนี้ จากผลการทดลองพบว่าสารสีที่สกัด

ด้วยอะซีไตนผสมเมทานอล มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าสูงกว่าสารสีที่ใช้เอทานอลในการสกัด โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 0.054% (ตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.23)

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ที่สกัดแยกด้วยเอทานอล และอะซีไตนผสมเมทานอล ในอัตราส่วน 7:2 ปริมาตรต่อปริมาตร

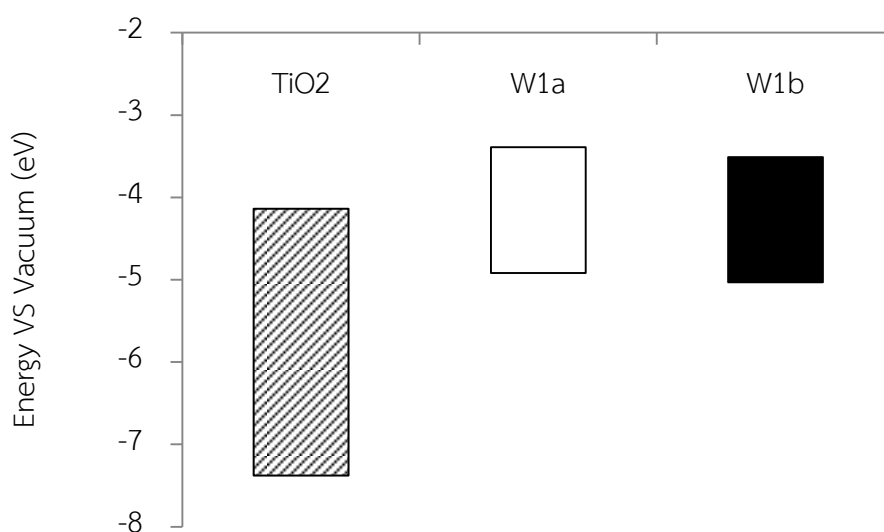
	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
เอทานอล	0.19	478	44616	277367	49	0.044
อะซีไตน:เมทานอล (7:2)	0.16	542	54058	57643	61	0.054

ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 15 ไมครอนเป็นสารกึ่งตัวนำ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) พื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ที่สกัดแยกด้วยเอทานอล และอะซีไตนผสมเมทานอล

จากผลการทดลองพบว่าชนิดของตัวทำละลายที่ใช้สกัดสารสี มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในเซลล์โดยเมื่อใช้เอทานอลในการสกัดจะให้ค่ากระแสที่สูงกว่า แต่ให้ค่า V_{oc} ที่ต่ำกว่าการใช้อะซิโตนผสมเมทานอล ทั้งนี้ชุดการทดลองที่ใช้อะซิโตนผสมเมทานอลในการสกัดจะมีค่าฟิลแฟคเตอร์ที่สูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ขนส่งของอิเล็กตรอนจากสีย้อมไปยังขั้วไฟฟ้าจนถึงจากคูรีตอกซ์กลับมายังโมเลกุลสีย้อมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่า (Bartelt และคณะ, 2014) นอกจากนี้ยังพบว่ามีระดับพลังงานที่ใกล้กับแถบนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่า ทำให้มีระยะทางการส่งอิเล็กตรอนจากสีย้อมมาสู่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สั้นกว่า ช่วยลดโอกาสการสูญเสียอิเล็กตรอนระหว่างการส่ง จึงทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า (Cicero และคณะ, 2013) นอกจากนี้เรื่องปริมาณและชนิดของสารสีแล้ว รูปแบบการเกาะยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการขนส่งอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยหลักการแล้วสีย้อมที่ยึดเกาะ ควรเกาะแบบระนาบชั้นเดียว (monolayer) เพื่อลดการสูญเสียอิเล็กตรอนจากการส่งต่อระหว่างโมเลกุลสีย้อมด้วยกันเอง ดังนั้น ในขั้นถัดมาจึงจะนำสารลดแรงดึงผิวมาใช้งานร่วมกับสีย้อม เพื่อให้เกิดการยึดเกาะในลักษณะดังกล่าว



รูปที่ 4.24 ระดับพลังงานของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ สารสีที่สกัดด้วยเอทานอล (a) และสารสีที่สกัดด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล (b)

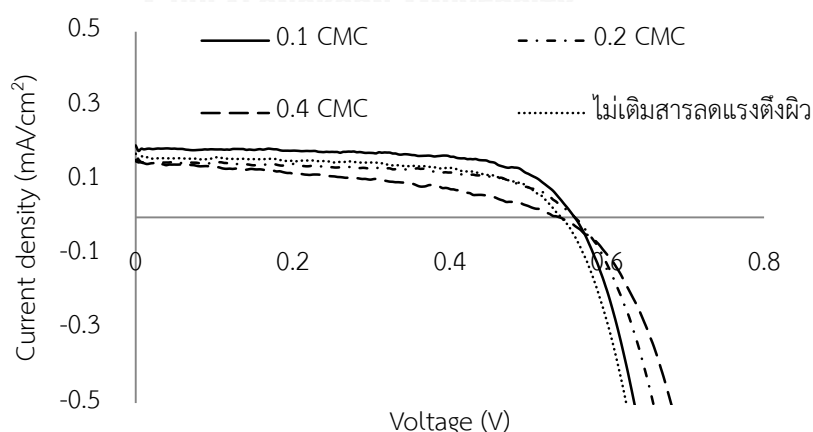
4.4.6 ผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวชีวภาพในสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1

มีรายงานการใช้ถึงสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสีย้อมในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อช่วยในเรื่องของการกระจายตัวและลดการเกาะกลุ่มกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อม (Yu และคณะ, 2015) การทดลองในขั้นนี้จึงสนใจที่จะนำสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ผลิตจาก *Bacillus* sp. GY 19 (Khondee และคณะ, 2015) ผสมลงสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดแยกด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล โดยจะแปรผันความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่ใช้ ตั้งแต่ 0.1-0.4 CMC (สารลดแรงตึงผิวชีวภาพที่มีค่า CMC เท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร) (Rongsayamanont และคณะ, 2017)

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดแยกด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล เมื่อแปรผันความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ

	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
0.1 CMC	0.19	558	78179	28438	66	0.069
0.2 CMC	0.15	551	46041	113279	59	0.048
0.4 CMC	0.15	538	30488	592606	41	0.033
ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว	0.16	542	54058	57643	61	0.054

ใช้ไทเนียมไดออกไซด์หนา 15 ไมครอนเป็นสารกึ่งตัวนำ วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) พื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ

จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม คือ 0.1 CMC โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว จะทำให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสลดลง (ตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.25) จากเนื่องมาจากการเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่มากเกินไป จะไปพื้นที่ในการจับบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้มีอิเล็กตรอนที่ส่งจากสีย้อมไปสู่ไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ทำให้เกิดกระแสต่ำกว่าชุดทดลองที่เติมสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Faulkner และคณะ (2014) ที่พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยเรื่องการกระจายตัวของโมเลกุลสีย้อมลดการเกาะกลุ่มกันเมื่อเกาะบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมกับสารกึ่งนำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยในลักษณะเดียวกันโดย Yu และคณะ (2015) ที่การเติมสารลดแรงตึงผิวดีดีเอ็ม (n-Dodecyl-b-D-maltoside: DDM) ที่ความเข้มข้น 1.0 mM ในสารละลายที่ประกอบไปด้วยระบบแสง I ของสสารสีเขียวแกมน้ำเงิน ก่อนนำมาเตรียมเป็นเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิว มีผลช่วยในเรื่องการกระจายตัวของระบบแสง ซึ่งปกติอยู่ในรูปแบบ trimer ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ monomer เมื่อเวลาผ่านไป 96 ชั่วโมง ซึ่งสามารถยืนยันได้โดยดูจากช่วงการดูดแสงของสารสกัดของระบบแสง I ที่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 720 นาโนเมตรลดลง เหลือเพียงช่วงการดูดกลืนแสงที่ 670 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของระบบแสงเมื่ออยู่ในรูปแบบ monomer นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบช่วงการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้าทำงานภายหลังการแช่ในสารละลายที่ประกอบไปด้วยระบบแสง I ยังพบการดูดกลืนแสงในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบแสง I ที่นำมาใช้เป็นสีย้อมที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปของ monomer ในขั้นถัดมาจะศึกษาในส่วนของชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีระดับแถบนำไฟฟ้าและความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานต่างกัน จึงทำให้มีความเหมาะสมกับสีย้อมแตกต่างกัน

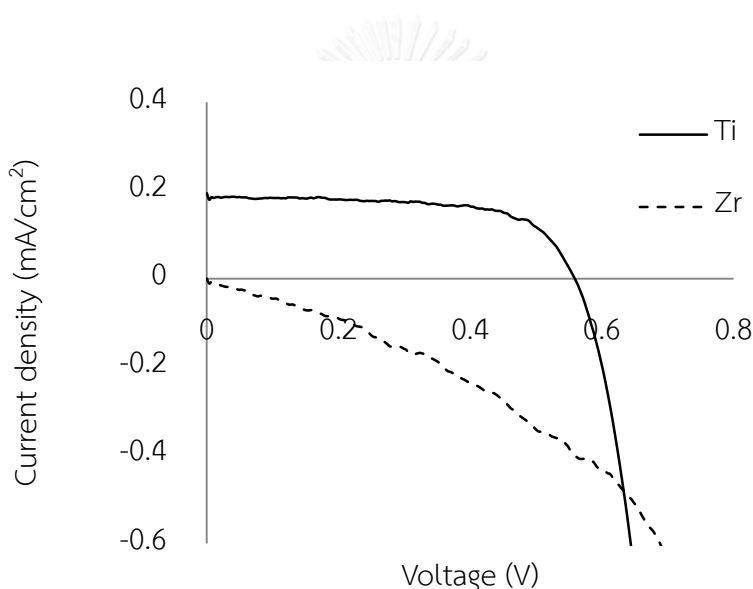
4.4.7 การแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

ในขั้นนี้จะเปรียบเทียบชนิดของสารที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด คือ เซอร์โคเนียมออกไซด์ ที่มีระดับช่องว่างของแถบพลังงานกว้าง มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสง และสมบัติเป็น active photon absorber (Emeline และคณะ, 2000) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในขั้นก่อนหน้า (ตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.26)

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ

Samples	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
TiO ₂	0.19	558	78179	28438	66	0.069
ZrO ₂	0.0004	0.27	1x10 ⁸	0	51	5.78x 10 ⁻⁸

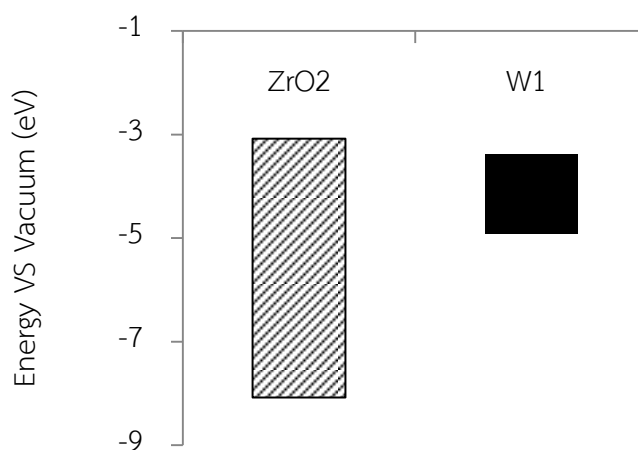
สกรีนสารกึ่งตัวนำหนา 15 ไมครอน วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) พื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่มีสารสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสงที่ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำสูงกว่าการใช้สารเซอร์โคเนียมออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากระดับแถบนำไฟฟ้าของเซอร์โคเนียมออกไซด์สูงกว่าระดับพลังงาน LUMO ของสีย้อมจากแบคทีเรียที่ใช้เป็นสีย้อมไวแสง (รูปที่ 4.27) ทำให้ไม่สามารถส่งต่ออิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมไปยังเซอร์โคเนียมออกไซด์ได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าต่ำ

ตามลำดับ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Waghmare และคณะ, 2017) ที่ใช้สารเซอร์โคเนียมออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ ร่วมกับการใช้สีย้อมโรสเบงกอล เป็นสีย้อมไวแสง พบว่าเซลล์สุริยะที่ประกอบขึ้นมีค่า J_{sc} V_{oc} และฟิลแฟคเตอร์ต่ำ โดยมีค่าอยู่ที่ 0.01 mA/cm^2 258 mV และ 34% ตามลำดับ โดยการที่มีค่า J_{sc} ต่ำ เนื่องจากจากระดับพลังงาน LUMO ของสีย้อมโรสเบงกอล มีค่า -3.7 eV ซึ่งต่ำกว่าระดับแถบนำไฟฟ้าของสารเซอร์โคเนียมออกไซด์ซึ่งมีค่าอยู่ที่ -3.41 eV จึงทำให้สีย้อมไม่สามารถส่งอิเล็กตรอนไปยังสารเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งจากผลพบว่าการเกิดกระแสขึ้นเล็กน้อย ซึ่งน่าจะมาจากการที่อิเล็กตรอนกระเจิงแล้วตกสู่แถบนำไฟฟ้าของเซอร์โคเนียมออกไซด์พอดี ต่อมาการที่ค่า V_{oc} ต่ำ สามารถเกิดได้จากการที่อิเล็กตรอนที่ส่งมาจากสีย้อมเข้าสู่สารเซอร์โคเนียมออกไซด์เกิดการส่งย้อนกลับไปยังคูรีตอกซีในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ระยะเวลาที่คงสภาพของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ และระยะแพร่ของอิเล็กตรอนลดลง จึงเป็นผลทำให้ค่า V_{oc} ต่ำลง และสุดท้ายค่าฟิลแฟคเตอร์ เป็นผลมาจากการที่การขนส่งอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟาร่วมและระบบอิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพต่ำ ส่งผลให้ค่า R_{series} ต่ำ และค่าฟิลแฟคเตอร์ต่ำ ตามลำดับ (Park และคณะ, 2011) จากผลข้างต้น พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเหมาะสมที่จะใช้งานร่วมกับสารสีจากแบคทีเรียมากกว่า จึงเลือกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการศึกษาขั้นต่อไป โดยมีรายงานถึงการใช้อยู่ร่วมกันระหว่างสีย้อม 2 ชนิด สามารถเพิ่มช่วงการดูดกลืนแสง และประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะได้ (Nasution และคณะ, 2015) ดังนั้นในขั้นถัดไปจะศึกษาสีย้อมในรูปแบบของสีย้อมผสม



รูปที่ 4.27 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำเซอร์โคเนียมออกไซด์และสายสกัดจากสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1

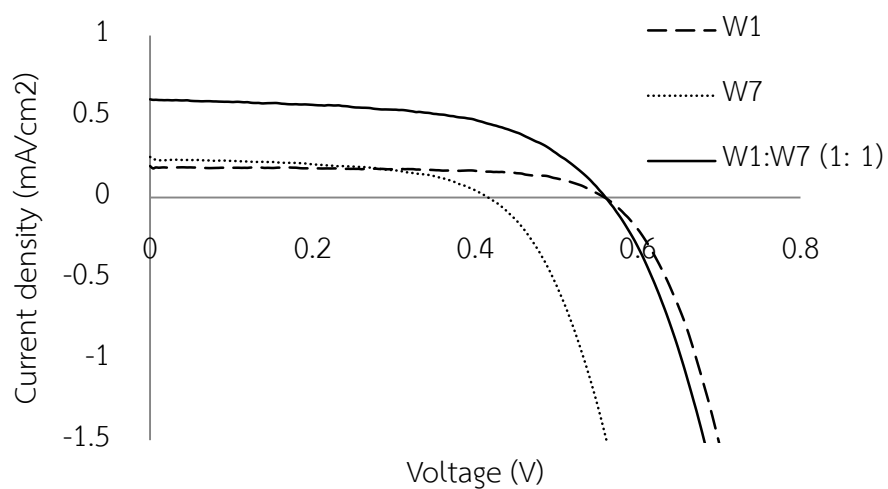
4.4.8 การใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ผสมกับสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7

เพื่อเพิ่มช่วงการดูดกลืนแสงจึงมีแนวคิดที่จะนำสารสีที่สกัดแยกด้วยอะซิโตนผสมเมทานอลจากแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ มาผสมกัน โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารสีจากแบคทีเรียเพียงชนิดเดียว และการใช้สารสีจากแบคทีเรีย 2 ชนิด

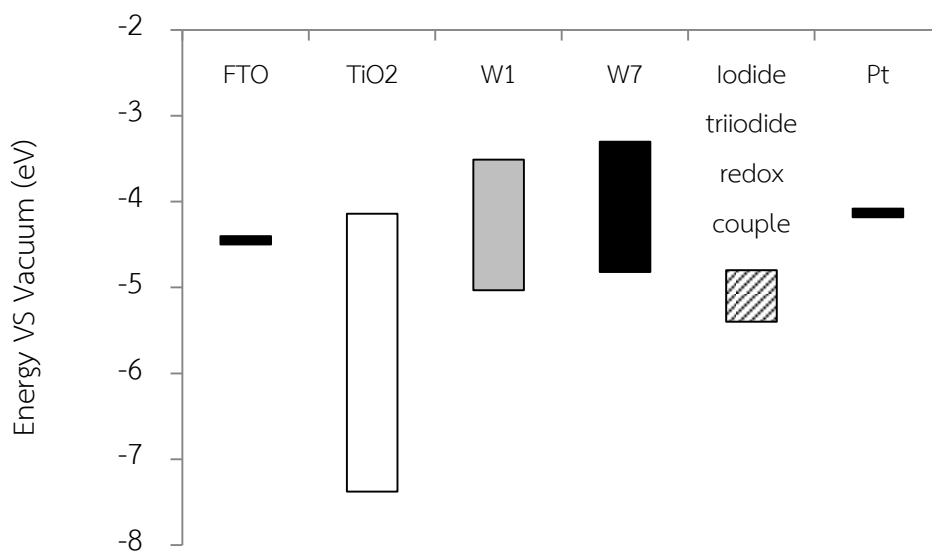
ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 แบคทีเรียสายพันธุ์ W7 และผสมกันระหว่างสารสีจาก W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1

	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
W1	0.19	558	78179	28438	66	0.069
W7	0.24	593	47363	227758	51	0.072
W1:W7(1:1)	0.60	560	28064	70069	57	0.192

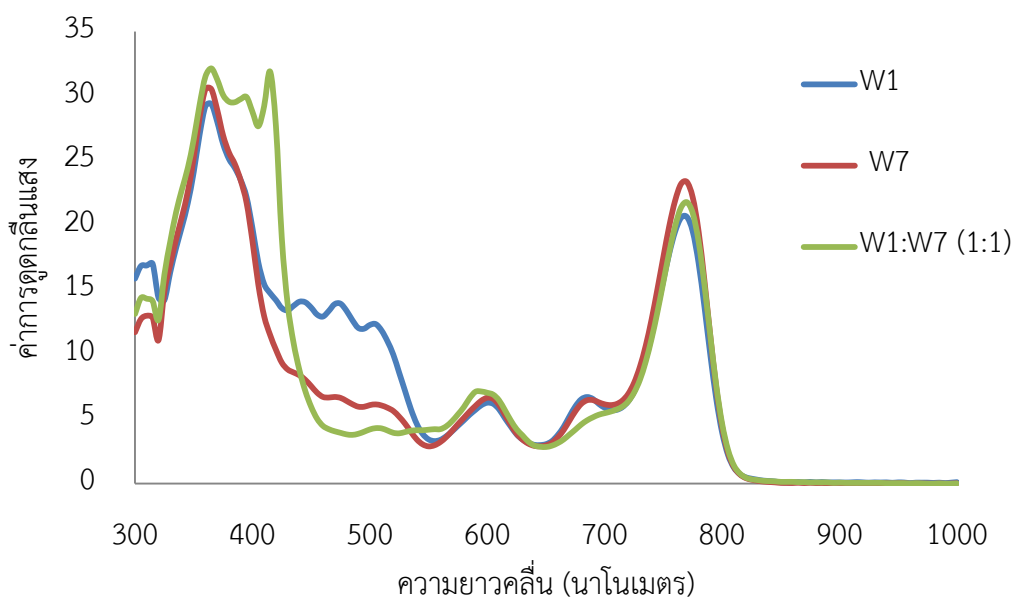
ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 15 ไมครอน วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) พื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristics) ของเซลล์สุริยะที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 แบคทีเรียสายพันธุ์ W7 และผสมกันระหว่างสารสีจาก W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1 เป็นสีย้อมไวแสง



รูปที่ 4.29 ระดับพลังงานของส่วนประกอบต่างๆภายในเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 แบคทีเรียสายพันธุ์ W7 และผสมกันระหว่างสารสีจาก W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1



รูปที่ 4.30 ช่วงการดูดกลืนแสงของสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 สายพันธุ์ W7 และสารสีผสมของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1: 1 ปริมาตรต่อปริมาตร

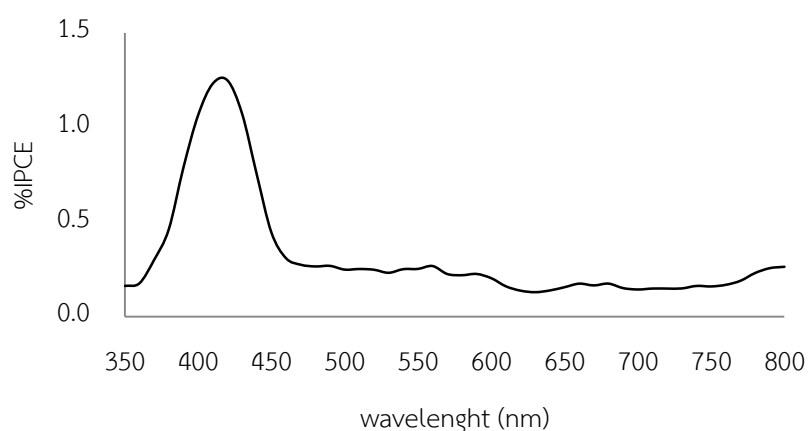
จากผลการทดลองพบว่าชุดทดลองที่ใช้สีย้อมผสมของสีสกัดสารสีที่สกัดได้จากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตรต่อปริมาตร มีค่าความหนาแน่นของกระแส (J_{sc}) และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สูงกว่า การใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์เดี่ยว (ตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.28) และเมื่อพิจารณาถึงช่วงการดูดกลืนแสงของสารสี (รูปที่ 4.30) พบว่าการดูดกลืนแสงของสารสีผสมของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 มีช่วงการดูดกลืนแสงที่กว้างกว่า สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์เดี่ยว โดยมีช่วงการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นในช่วง 375–420 นาโนเมตร การที่มีช่วงของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นนี้ มีผลทำให้ขั้วไฟฟ้ารับแสงดูดกลืนพลังงานแสงได้มากขึ้น มีอิเล็กตรอนที่ถูกส่งจากสีย้อมไปยังขั้วไฟฟ้าทำงานมากขึ้น จึงทำให้มีค่ากระแสมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Molla และคณะ (2016) ใช้สีย้อมผสมระหว่างสีย้อม D-205 และ D-131 ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาตรต่อปริมาตร พบว่ามีผลทำให้ช่วงการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สีย้อมเพียงชนิดเดียว (D-205 ดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 543 นาโนเมตร D-131 ดูดกลืนแสงที่ 400-500 นาโนเมตร โดยดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 453 นาโนเมตร และสีย้อมผสมดูดกลืนแสงที่ 390-520 นาโนเมตร) ซึ่งทำให้เซลล์ที่ใช้สีย้อมผสมมีค่ากระแสและประสิทธิภาพของเซลล์สูงกว่าเซลล์ที่ใช้สีย้อมชนิดเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 3.59% (V_{oc} : 0.74 V, J_{sc} : 7.36 mA/cm² and FF: 0.66) ในขณะที่สีย้อม D-205 และ D-131 ประสิทธิภาพอยู่ที่ 3.03 (V_{oc} : 0.70 V, J_{sc} : 6.67 mA/cm² and FF: 0.65) และ 1.03% (V_{oc} : 0.60 V, J_{sc} : 2.56 mA/cm² and FF: 0.67) ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบระดับพลังงานขององค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์ พบว่ามีระดับพลังงานที่เหมาะสม ดังที่แสดงใน รูปที่ 4.29

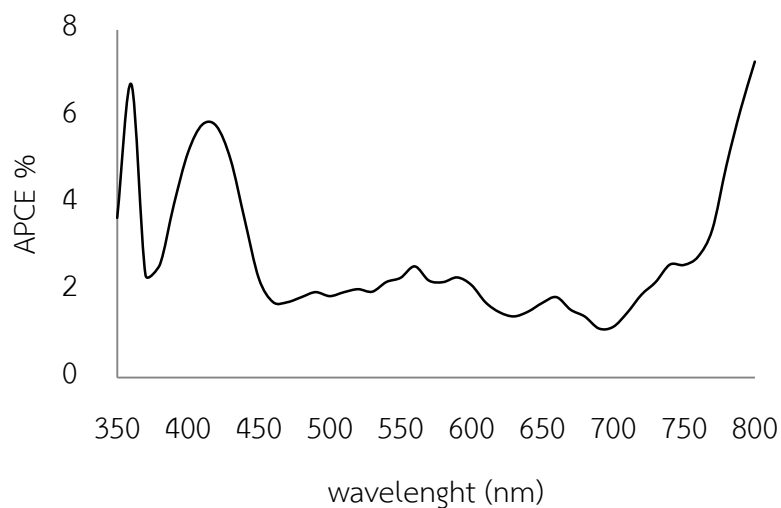
4.4.8.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของเซลล์สุริยะที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 (1:1)

การวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (incident photon-to-current efficiency) เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยน โฟตอนจากแสงตกกระทบ (incident photon) ไปเป็นกระแสไฟฟ้าที่แต่ละความยาวคลื่น จากรูปที่ 4.31 แสดงว่า เซลล์สุริยะที่มีสารสีที่สกัดแยกด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล (7:2) จากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 เป็นสีย้อมไวแสง สามารถเปลี่ยน incident photon ในช่วง 400-450 นาโนเมตร เปลี่ยนเป็นกระแสได้ดี

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพดูดกลืนพลังงานแสงของเซลล์สุริยะ (absorbed photon conversion efficiency) เซลล์สุริยะสามารถดูดกลืนแสงได้หลากหลายช่วงมากกว่า ซึ่งพบการดูดกลืนสูงสุด ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-450 นาโนเมตร และมากกว่า 800 นาโนเมตร (รูปที่ 4.32) การที่พลังงานแสงช่วงมากกว่า 800 ดังกล่าว ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นกระแสไฟฟ้า อาจเป็นผลมาจากการสะท้อน การกระจาย การทะลุผ่าน หรือถูกดูดกลืนด้วยส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์ นอกจากนี้อาจเกิดจากอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลของสีไม่สามารถส่งต่อมายังสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ทำให้เกิดการตกกลับสู่โมเลกุลของสีย้อม จึงไม่เกิดกระแสขึ้น (Shen และคณะ, 2016) ทั้งนี้ในอนาคตอาจจะแก้ไขโดยเติมหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมต่อการเกาะและส่งอิเล็กตรอนให้แก่โมเลกุลสีย้อม โดยกระบวนการทางเคมี ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลิก หมู่ฟอสโฟนิก หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่แอมไนด์ เป็นต้น (Ambrosio และคณะ, 2012) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ช่วยในเรื่องของการเกาะและส่งอิเล็กตรอน



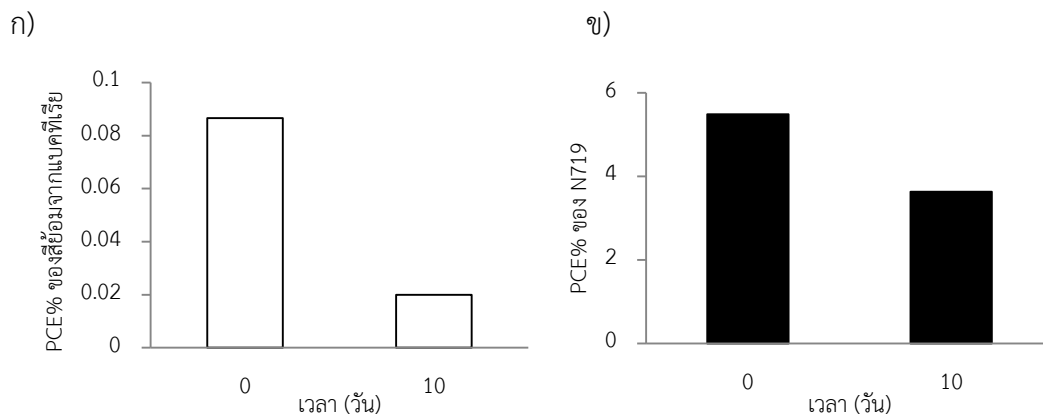
รูปที่ 4.31 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 รวมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 เป็นสีย้อมไวแสง



รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการดูดกลืนพลังงานแสงของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 รวมกับสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 เป็นสีย้อมไวแสง

4.4.8.2 การตรวจสอบความคงตัวของเซลล์สุริยะที่ใช้สารสีผสมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7

ทดสอบความคงตัวของเซลล์สุริยะ โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์เริ่มต้น กับเซลล์ที่ได้รับการฉายแสงด้วยหลอดไส้ ความเข้มแสง 2000 ลักซ์ เป็นเวลา 10 วัน โดยมีสีย้อม N719 เป็นสีย้อมมาตรฐาน จากผลการทดสอบพบว่า เซลล์สุริยะที่ใช้สีย้อมจากแบคทีเรียและ N719 ไม่คงตัว เมื่อระยะเวลาผ่านไป 10 วัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงลดลง 78% และ 34% ตามลำดับ (รูปที่ 4.33)



รูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงของเซลล์สุริยะที่มีสีข้อมจากแบคทีเรีย (ก) และสีข้อม N719 (ข) เป็นสีข้อมไวแสง เปรียบเทียบก่อนและภายหลังการทดลองความคงตัวเป็นเวลา 10 วัน

ปัญหาความไม่คงตัวของเซลล์สุริยะนี้อาจจะมาจากการเกิดกระบวนการที่แตกตัวให้โปรตอน (deprotonation) บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากระยะเวลา (aging) ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิต์ต่ำลง หรือเกิดจากการระเหยของอิเล็กโทรไลต์ชนิดของเหลวที่เลือกใช้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนรูปแบบของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ให้อยู่ในรูปแบบของแข็งหรือกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Yang และคณะ, 2008) หรือแม้แต่เกิดจากความไม่เสถียรของตัวสีข้อมเอง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเคลือบชั้นฟิล์มโพลีเมอร์ที่มีความสามารถในการกรองรังสี UV ที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สารสีไม่คงตัว (Han และคณะ, 2015)

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียเป็นสีข้อม กับรายงานจากงานวิจัยอื่นๆ (ตารางที่ 4.14) พบว่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์สุริยะที่ใช้สีข้อมบางชนิด เช่น เคอร์คูมิน และแบคทีเรียโอบิโอบาลิฟิลล์ ซี เป็นต้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์สุริยะที่มีระบบแสงเป็นสีข้อมยังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ จึงจำเป็นต้องพัฒนาประสิทธิภาพต่อไป

ในแง่ของการผลิตกระแสและแรงดันไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (microbial fuel cell) พบว่า เซลล์สุริยะยังผลิตกระแสและแรงดันได้ต่ำกว่า โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน (ใช้แพลตินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าร่วม) พบว่ามีความหนาแน่นของกระแส 4.69 mA/m^2 และแรงดันไฟฟ้า 644 mV (Deng และคณะ, 2010) ในขณะที่เซลล์สุริยะในงานวิจัยนี้ มีค่าความหนาแน่นของกระแส 0.6 mA/m^2 และแรงดันไฟฟ้า 560 mV จึงจำเป็นต้องพัฒนาประสิทธิภาพต่อไป

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากแหล่งธรรมชาติ

สีย้อม	แหล่งที่มา	PCE (%)	Jsc (mA/cm ²)	อ้างอิง
แบคเทอร์ริโอ คลอโรฟิลล์ ซี	แบคทีเรียสังเคราะห์ ด้วยแสง	0.1	0.54	Tsui และคณะ (2014)
ระบบแสง II	แบคทีเรีย	0.49	1.46	Fu และคณะ (2014)
ระบบแสง I	สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำ เงิน	0.47	1.31	Yu และคณะ (2015)
ระบบแสง II	ผักโขม	0.52	1.51	
แบคเทอร์ริโอ คลอโรฟิลล์ เอ และแคโรที นอยด์	แบคทีเรียสังเคราะห์ ด้วยแสง	0.19	0.60	งานวิจัยนี้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มจากคัดเลือกแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่สะสมสารกัมมะถันที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี โดยศึกษาการเจริญและรูปแบบการดูดกลืนแสงของเซลล์ของแบคทีเรีย 7 สายพันธุ์ ที่คัดแยกได้จากแหล่งน้ำต่างๆ ในกรุงเทพมหานคร ได้แก่ *Rhodopseudomonas faecalis* W1, *Rhodopseudomonas* sp. W2, *Rhodopseudomonas palustris* W3, *Rhodobacter johrii* W5, *Rhodopseudomonas palustris* W6, *Rhodopseudomonas palustris* W7 และ *Rhodopseudomonas palustris* P7 พบว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 W3 และ W7 มีการเจริญรวดเร็วกว่าแบคทีเรียสายพันธุ์อื่นๆ และมีรูปแบบการดูดกลืนแสงที่น่าสนใจ คือ ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน แต่จากผลการระบุสายพันธุ์แบคทีเรียด้วยวิธีทางโมเลกุล พบว่า แบคทีเรียสายพันธุ์ W3 และ W7 เป็นแบคทีเรียสปีชีส์เดียวกัน จึงเลือกเฉพาะแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 มาศึกษาในขั้นตอนต่อไป

การทดลองต่อมาพบว่าภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ คือ ใช้อาหารเหลว RCVB ที่ประกอบด้วย กรดมาลิก 8 กรัมต่อลิตร สารสกัดจากยีสต์ 4 กรัมต่อลิตร (คิดเป็นสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 2: 1) เพอร์ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเลี้ยงโดยการให้แสงจากหลอดไส้ ที่ความเข้มแสง 2000 ลักซ์ พร้อมกับการกวนผสม 120 รอบต่อนาที โดยแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ให้ค่านำหนักเซลล์แห้งสูงสุดที่ 3.89 ± 0.01 และ 3.92 ± 0.03 ตามลำดับ แบคทีเรียสายพันธุ์ W1 มีปริมาณการสะสมสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์สูงสุดที่ 1.74 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ และแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 มีปริมาณการสะสมสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์สูงสุดที่ 1.17 ± 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ และแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 มีปริมาณการสะสมแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ 3.99 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ ขณะที่แบคทีเรียสายพันธุ์ W7 มีปริมาณการสะสมแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ 6.95 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์ จะเห็นได้ว่าสายพันธุ์ของแบคทีเรียมีผลต่อปริมาณและชนิดของสารสี โดยแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 มีปริมาณการสะสมแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์มากกว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ขณะเดียวกันแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ก็มีการสะสมสารสีในกลุ่มแคโรทีนอยด์สูงกว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 เพื่อลดต้นทุนในการผลิตสารสี ผู้วิจัยได้ทดสอบความสามารถในการใช้น้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่เป็นแหล่งคาร์บอนแทนการใช้กรดมาลิก โดยเลี้ยงเชื้อในอาหารเหลวที่ไม่เติมกรดมาลิกผสมกับน้ำเสีย พบว่าแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ สามารถใช้สารอาหารในน้ำเสียเจริญได้ พร้อมทั้งลดค่า COD ได้ประมาณ 75-87% ของปริมาณ COD เริ่มต้นในชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสีย

ปริมาณ 40% ของปริมาณทั้งหมด แสดงถึงความเป็นไปได้ในขยายขนาดการผลิต ด้วยสูตรอาหารที่มีราคาถูก ควบคุมไปกับการบำบัดน้ำเสีย

เมื่อนำสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดด้วยสารละลายเอทานอล มาประกอบเป็นเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเบื้องต้น พบว่าเซลล์สุริยะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.004% ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก จึงได้พยายามที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะโดยการแปรผันปัจจัยต่างๆ พบว่าภาวะที่ทำให้เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ พิล์มสารไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 15 ไมครอน ปรับสภาพผิวด้วยกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ก่อนการนำไปแช่ในสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ที่สกัดด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล ทั้งนี้เติมสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ ความเข้มข้น 0.1 CMC ลงในสารสี เพื่อช่วยในเรื่องการกระจายตัวของสารสี และใช้ไอเล็กโทรไลต์แบบเหลวที่มีคูรีดอกซ์ไอโอดีนและไตรไอโอดีน (I/I_3^-) ของสารประกอบโซเดียมไอโอดีน (NaI) เป็นคูรีดอกซ์ โดยเซลล์สุริยะนี้ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 0.192% ความหนาแน่นของกระแส 0.6 mA/cm² และค่าฟิลแฟคเตอร์ 57% ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ได้รับภายหลังการแปรผันปัจจัยต่างๆนี้ สูงกว่าค่าแรกเริ่มประมาณ 48 เท่า อย่างไรก็ตามเซลล์สุริยะที่ประกอบขึ้นนี้ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์มาตรฐาน ซึ่งจะต้องพัฒนาต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One factor at a time: OFAT) ซึ่งระดับเหมาะสมที่รับมาจากแต่ละปัจจัยที่ศึกษา ไม่ใช่ระดับที่เหมาะสมที่สุดของทุกๆ ปัจจัย ดังนั้นจึงควรมาค่าที่ได้รับไปศึกษาต่อด้วยการออกแบบการทดลองวิธีอื่น เช่น การวิเคราะห์ตอบสนองเชิงพื้นผิว (response surface methodology) เพื่อระบุระดับปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตที่เหมาะสมที่สุด และอธิบายถึงความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่เลือกมาศึกษาได้ (Zhou และคณะ, 2015) นอกจากนี้ พบว่าค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยของแบคทีเรียที่คัดเลือกทั้ง 2 สายพันธุ์ มีค่าอยู่ในระดับเดียวกัน ดังนั้นคาดว่าจะสามารถนำข้อมูลนี้ไปประยุกต์ใช้ในแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงชนิดไม่สะสมกัมมันตภาพอื่น ๆ ได้ หรือเลือกประยุกต์เฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญไปศึกษาในระยะแรก เพื่อเพิ่มปริมาณมวลชีวภาพก่อนที่จะปรับภาวะการเลี้ยงให้สอดคล้องกับสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (two-step cultivation) ต่อไป

เพื่อลดต้นทุนของอาหารเลี้ยงเชื้อ งานวิจัยนี้พบว่าสามารถเลี้ยงเชื้อในอาหารเหลวที่ผสมน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่ในสัดส่วน 40% ของปริมาณทั้งหมด แต่รายงานของคณะวิจัยอื่นสามารถใช้น้ำเสียมาเพาะเลี้ยงแบคทีเรียได้โดยตรง (100%) (Zhou และคณะ, 2014; Wu และคณะ 2015)

จึงควรเลือกใช้น้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล (Yetis และคณะ, 2000) น้ำเสียจากโรงงานผลิตซอสถั่วเหลือง (Anam และคณะ, 2012) น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอก (Pintucci และคณะ, 2015) และน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมัน (Seifert และคณะ, 2010) เป็นต้น นอกจากนี้ สารสกัดจากยีสต์ที่ใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนในอาหาร ยังเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ต้นทุนของอาหารเลี้ยงเชื้อสูง ดังนั้นควรมองแหล่งไนโตรเจนราคาถูกอื่นมาใช้ทดแทน เช่น ยูเรีย (Connelly และคณะ, 2014) โซเดียมกลูตาเมท (Assawamongkolsiri และคณะ, 2016) เป็นต้น

การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อม อาจจะเริ่มจากการแปรผันสารสี เนื่องจากสารสีจากแบคทีเรียที่นำมาใช้ มีช่วงดูดแสงยังไม่ครบทั้งความยาวคลื่น ดังนั้นควรหาสารสีจากแบคทีเรียชนิดอื่นหรือสารสีจากแหล่งธรรมชาติชนิดอื่น มาใช้เป็นสีย้อมร่วม เพื่อชดเชยช่วงการดูดกลืนแสงที่หายไป และเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานแสงของเซลล์สุริยะ อีกหนึ่งปัญหาที่พบในงานวิจัยนี้ คือ สีย้อมเกาะบนพื้นผิวแต่ไม่เกิดการส่งอิเล็กตรอนสู่สารกึ่งตัวนำ ทำให้ผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้น้อย และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำ ซึ่งนำมาจากหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ในการเกาะไม่เหมาะสม ส่งผลให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่จากโมเลกุลสีย้อมไปยังสารกึ่งตัวนำได้ สามารถแก้ไขได้โดยการเติมหมู่ฟังก์ชันแกมโมเลกุลสีย้อม เช่น หมู่คาร์บอซิลิก หมู่ฟอสโฟนิคหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่แอมไนด์ เป็นต้น โดยอาศัยกระบวนการทางเคมี (Ambrosio และคณะ, 2012) นอกจากนี้อาจจะเปลี่ยนรูปแบบของสีย้อมเป็นสารเชิงซ้อนของแบคทีเรียโคลิกโอฟิลล์และโปรตีน เพื่อให้มีลำดับการขนส่งที่เหมือนกับกระบวนการสังเคราะห์แสงในธรรมชาติของแบคทีเรีย ซึ่งจะช่วยให้เซลล์สุริยะมีการผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณที่สูงขึ้น (Fu และคณะ, 2014; Yu และคณะ, 2015) สำหรับการปรับการจัดเรียงระดับพลังงานของส่วนประกอบต่างๆ ภายในเซลล์ สามารถทำได้โดยเติมโลหะออกไซด์ชนิดอื่นเพื่อปรับระดับแถบนำไฟฟ้าให้เหมาะสม และเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่านไออิเล็กตรอนไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสง เช่น การใช้โลหะผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (Nwe และคณะ, 2012)

รายการอ้างอิง

- Ahmadi F, Zarrin L, Sharifnia S and Hosseini SN (2014) Analyzed and proposed mechanism of photocatalytic degradation of furfural at TiO₂ nano-Particles by HPLC-UV and LC-mass methods. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies* **37**: 1750-1762.
- Alagesan S, Gaudana SB, Krishnakumar S and Wangikar PP (2013) Model based optimization of high cell density cultivation of nitrogen-fixing cyanobacteria. *Bioresour Technol* **148**: 228-233.
- Ambrosio F, Martsinovich N and Troisi A (2012) What is the best anchoring group for a dye in a dye-sensitized solar cell? *Journal of Physical Chemistry Letters* **3**: 1531-1535.
- Amerioun MH, Ghazi ME, Izadifard M and Bahramian B (2015) Fabrication of CuInS₂/CNTs absorber layers by sol-gel method. *Materials Science in Semiconductor Processing* **38**: 149-156.
- Anam K, Habibi MS, Harwati TU and Susilaningih D (2012) Photofermentative hydrogen production using *Rhodobium marinum* from bagasse and soy sauce wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy* **37**: 15436-15442.
- Assawamongkholisiri T, Plangklang P and Reungsang A (2016) Photofermentation and lipid accumulation by *Rhodobacter* sp. KCU-PS1 using malic acid as a substrate. *International Journal of Hydrogen Energy* **41**: 6259-6270.
- Bai S, Bu C, Tai Q, Liang L, Liu Y, You S, Yu Z, Guo S and Zhao X (2013) Effects of bis(imidazolium) molten salts with different substituents of imidazolium cations on the performance of efficient dye-sensitized solar cells. *ACS Appl Mater Interfaces* **5**: 3356-3361.
- Bao S-J, Li CM, Zang J-F, Cui X-Q, Qiao Y and Guo J (2008) New nanostructured TiO₂ for direct electrochemistry and glucose sensor applications. *Advanced Functional Materials* **18**: 591-599.
- Bartelt AF, Schütz R, Strothkämper C, *et al.* (2014) Efficient electron injection from acyloin-anchored semisquarylium dyes into colloidal TiO₂ films for organic

- dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C* **118**: 6612-6623.
- Batmunkh M, Macdonald TJ, Shearer CJ, Bat-Erdene M, Wang Y, Biggs MJ, Parkin IP, Nann T and Shapter JG (2017) Carbon nanotubes in TiO₂ nanofiber photoelectrodes for high-performance perovskite solar cells. *Advanced Science* **4**: 1600504.
- Bentley CL, Bond AM, Hollenkamp AF, Mahon PJ and Zhang J (2016) Electrochemistry of iodide, iodine, and iodine monochloride in chloride containing nonhaloaluminate ionic liquids. *Analytical Chemistry* **88**: 1915-1921.
- Berg THA, Ottosen N, van den Berg F and Ipsen R (2017) Inline UV-Vis spectroscopy to monitor and optimize cleaning-in-place (CIP) of whey filtration plants. *LWT - Food Science and Technology* **75**: 164-170.
- Bernède JC (2008) Organic photovoltaic cells: History, principle and techniques. *Journal of the Chilean Chemical Society* **53**: 1551-1564.
- Bessho T, Zakeeruddin SM, Yeh CY, Diau EW and Gratzel M (2010) Highly efficient mesoscopic dye-sensitized solar cells based on donor-acceptor-substituted porphyrins. *Angew Chem Int Ed Engl* **49**: 6646-6649.
- Brotosudarmo THP, Limantara L, Heriyanto and Prihastyanti MNU (2015) Adaptation of the photosynthetic unit of purple bacteria to changes of light illumination intensities. *Procedia Chemistry* **14**: 414-421.
- Brown AC, Leonard HM, McGraw KJ, Clotfelter ED and Lewis S (2014) Maternal effects of carotenoid supplementation in an ornamented cichlid fish. *Functional Ecology* **28**: 612-620.
- Burschka J, Pellet N, Moon SJ, Humphry-Baker R, Gao P, Nazeeruddin MK and Gratzel M (2013) Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. *Nature* **499**: 316-319.
- Çakar S, Güy N, Özacar M and Findik F (2016) Investigation of vegetable tannins and their iron complex dyes for dye sensitized solar cell applications. *Electrochimica Acta* **209**: 407-422.

- Calogero G, Yum J-H, Sinopoli A, Di Marco G, Grätzel M and Nazeeruddin MK (2012) Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy* **86**: 1563-1575.
- Campbell WM, Jolley KW, Wagner P, *et al.* (2007) Highly efficient porphyrin sensitizers for dye-sensitized solar cells. *American Chemical Society* **111**: 11760-11762.
- Cardena R, Valdez-Vazquez I and Buitron G (2017) Effect of volatile fatty acids mixtures on the simultaneous photofermentative production of hydrogen and polyhydroxybutyrate. *Bioprocess Biosyst Eng* **40**: 231-239.
- Chang J, Ning Y, Wu S, Niu W and Zhang S (2013) Effectively utilizing NIR light using direct electron injection from up-conversion nanoparticles to the TiO₂ photoanode in dye-sensitized solar cells. *Advanced Functional Materials* **23**: 5910-5915.
- Chen P, Dang X, Klug MT, Qi J, Courchesne ND, Burpo FJ, Fang N, Hammond PT and Belcher AM (2013) Versatile three-dimensional virus-based template for dye-sensitized solar cells with improved electron transport and light harvesting. *ACS Nano* **7**: 6563-6574.
- Cheng G, Akhtar MS, Yang OB and Stadler FJ (2013) Novel preparation of anatase TiO₂@reduced graphene oxide hybrids for high-performance dye-sensitized solar cells. *ACS Appl Mater Interfaces* **5**: 6635-6642.
- Cicero G, Musso G, Lamberti A, *et al.* (2013) Combined experimental and theoretical investigation of the hemi-squaraine/TiO₂ interface for dye sensitized solar cells. *Phys Chem Chem Phys* **15**: 7198-7203.
- Corneli E, Adessi A, Dragoni F, Ragolini G, Bonari E and De Philippis R (2016) Agroindustrial residues and energy crops for the production of hydrogen and poly-beta-hydroxybutyrate via photofermentation. *Bioresour Technol* **216**: 941-947.
- Dao VD, Larina LL, Jung KD, Lee JK and Choi HS (2014) Graphene-NiO nanohybrid prepared by dry plasma reduction as a low-cost counter electrode material for dye-sensitized solar cells. *Nanoscale* **6**: 477-482.
- de Souza AL, Marra K, Gunn J, Samkoe KS, Kanick SC, Davis SC, Chapman MS, Maytin EV, Hasan T and Pogue BW (2016) Comparing desferrioxamine and light

- fractionation enhancement of ALA-PpIX photodynamic therapy in skin cancer. *British Journal of Cancer* **115**: 805-813.
- Deng Q, Li X, Zuo J, Ling A and Logan BE (2010) Power generation using an activated carbon fiber felt cathode in an upflow microbial fuel cell. *Journal of Power Sources* **195**: 1130-1135.
- Desai UV, Xu C, Wu J and Gao D (2013) Hybrid TiO₂-SnO₂ nanotube arrays for dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C* **117**: 3232-3239.
- Ekar SU, Shekhar G, Kholam YB, *et al.* (2016) Green synthesis and dye-sensitized solar cell application of rutile and anatase TiO₂ nanorods. *Journal of Solid State Electrochemistry*.
- Eli D, Jonathan E, Ahmad M, Ezra D, Sarki S, Iliyasa I and Gyuk P (2016) Photoelectrochemical performance of dye-sensitized organic photovoltaic cells based on natural pigments and wide-bandgap nanostructured semiconductor. *Physical Science International Journal* **10**: 1-7.
- Emeline AV, Kuzmin GN, Purevdorj D, Ryabchuk VK and Serpone N (2000) Spectral dependencies of the quantum yield of photochemical processes on the surface of wide band gap solids. 3. gas/solid systems. *The Journal of Physical Chemistry B* **104**: 2989-2999.
- Escobar MAM and Jaramillo F (2015) Natural dyes extraction, stability and application to dye-sensitized solar cells. *Journal of Renewable Materials* **3**: 281-291.
- Faber MS, Park K, Caban-Acevedo M, Santra PK and Jin S (2013) Earth-abundant cobalt pyrite (CoS₂) thin film on glass as a robust, high-performance counter electrode for quantum dot-sensitized solar cells. *Journal of Physical Chemistry Letters* **4**: 1843-1849.
- Fan J, Liu S and Yu J (2012) Enhanced photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells based on TiO₂ nanosheets/graphene composite films. *Journal of Materials Chemistry* **22**: 17027.
- Fan SQ, Fang B, Kim JH, Jeong B, Kim C, Yu JS and Ko J (2010) Ordered multimodal porous carbon as highly efficient counter electrodes in dye-sensitized and quantum-dot solar cells. *Langmuir* **26**: 13644-13649.

- Faulkner CJ, Lees S, Ciesielski PN, Cliffel DE and Jennings GK (2008) Rapid assembly of photosystem I monolayers on gold electrodes. *American Chemical Society* **24**: 8409-8412.
- Fixen KR, Zheng Y, Harris DF, Shaw S, Yang ZY, Dean DR, Seefeldt LC and Harwood CS (2016) Light-driven carbon dioxide reduction to methane by nitrogenase in a photosynthetic bacterium. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **113**: 10163-10167.
- Freitag M, Giordano F, Yang W, Pazoki M, Hao Y, Zietz B, Grätzel M, Hagfeldt A and Boschloo G (2016) Copper phenanthroline as a fast and high-performance redox mediator for dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C* **120**: 9595-9603.
- Fu Q, Zhao C, Yang S and Wu J (2014) The photoelectric performance of dye-sensitized solar cells fabricated by assembling pigment-protein complexes of purple bacteria on nanocrystalline photoelectrode. *Materials Letters* **129**: 195-197.
- Gao X, Guan D, Huo J, Chen J and Yuan C (2013) Free standing TiO₂ nanotube array electrodes with an ultra-thin Al₂O₃ barrier layer and TiCl₄ surface modification for highly efficient dye sensitized solar cells. *Nanoscale* **5**: 10438-10446.
- Getha K, Vikineswary S and Chong VC (1998) Isolation and growth of the phototrophic bacterium *Rhodopseudomonas palustris* strain B1 in sago-starch-processing wastewater. *World Journal of Microbiology & Biotechnology* **14**: 505-511.
- Ghosh S, Dairkee UK, Chowdhury R and Bhattacharya P (2017) Hydrogen from food processing wastes via photofermentation using purple non-sulfur bacteria (PNSB) – A review. *Energy Conversion and Management* **141**: 299-314.
- Giraud E, Zappa S, Jaubert M, Hannibal L, Fardoux J, Adriano J, Bouyer P, Genty B, Pignol D and Verméglio A (2004) Bacteriophytochrome and regulation of the synthesis of the photosynthetic apparatus in *Rhodopseudomonas palustris*: pitfalls of using laboratory strains. *Photochemical and Photobiological Sciences* **3**: 587-591.
- Gómez-Ortiz NM, Vázquez-Maldonado IA, Pérez-Espadas AR, Mena-Rejón GJ, Azamar-Barrios JA and Oskam G (2010) Dye-sensitized solar cells with natural dyes

- extracted from achiote seeds. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **94**: 40-44.
- Gong J, Liang J and Sumathy K (2012) Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Fundamental concepts and novel materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**: 5848-5860.
- Grätzel M (2001) Photoelectrochemical cells. *Nature* **414**: 338-344.
- Hakobyan L, Gabrielyan L and Trchounian A (2012) Yeast extract as an effective nitrogen source stimulating cell growth and enhancing hydrogen photoproduction by *Rhodobacter sphaeroides* strains from mineral springs. *International Journal of Hydrogen Energy* **37**: 6519-6526.
- Han DM, Song H-J, Han C-H and Kim YS (2015) Enhancement of the outdoor stability of dye-sensitized solar cells by a spectrum conversion layer with 1,8-naphthalimide derivatives. *RSC Advances* **5**: 32588-32593.
- Hao S, Shang Y, Li D, Agren H, Yang C and Chen G (2017) Enhancing dye-sensitized solar cell efficiency through broadband near-infrared upconverting nanoparticles. *Nanoscale* **9**: 6711-6715.
- Hardin BE, Snaith HJ and McGehee MD (2012) The renaissance of dye-sensitized solar cells. *Nature Photonics* **6**: 162-169.
- Hashim ET and A. AA (2016) Temperature effect on power drop of different photovoltaic modules. *Journal of Engineering* **22**: 129-143.
- Hersant G, Hammami A, Armand M and Marsan B (2017) Synthesis and electrochemical properties of potassium 5-trifluoromethyl-1,3,4-thiadiazole-2-thiolate/disulfide redox couple. *Journal of Electroanalytical Chemistry* **787**: 36-45.
- Hodes G (2013) Perovskite-Based Solar Cells. *SCIENCE* **342**: 317-318.
- Huo J, Hu Y, Jiang H, Huang W, Li Y, Shao W and Li C (2013) Mixed solvents assisted flame spray pyrolysis synthesis of TiO₂ hierarchically porous hollow spheres for dye-sensitized solar cells. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **52**: 11029-11035.
- Ip AH, Thon SM, Hoogland S, *et al.* (2012) Hybrid passivated colloidal quantum dot solids. *Nat Nanotechnol* **7**: 577-582.

- Jaikumar A, Santhanam KSV, Kandlikar SG, Raya IBP and Raghupathi P (2015) Electrochemical deposition of copper on graphene with high heat transfer coefficient. *ECS Transactions* **66**: 55-64.
- Jianga S and Yua L (2008) Increasing CoQ₁₀ production by *Rhodopseudomonas palustris* J001 using a two-stage fermentation process. *Verlag der Zeitschrift für Naturforschung* 884-888.
- Jin Z, Masuda H, Yamanaka N, Minami M, Nakamura T and Nishikitani Y (2009) Efficient electron transfer ruthenium sensitizers for dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C* **113**: 2618–2623.
- Jo Y, Cheon JY, Yu J, Jeong HY, Han CH, Jun Y and Joo SH (2012) Highly interconnected ordered mesoporous carbon-carbon nanotube nanocomposites: Pt-free, highly efficient, and durable counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Chem Commun (Camb)* **48**: 8057-8059.
- Johansson BC and Gest H (1997) Adenylylation/deadenylylation control of the glutamine synthetase of *Rhodopseudomonas capsulata*. *European Journal of Biochemistry* **81**: 365-371.
- Jung HS, Lee J, Lee S, Hong KS and Shin H (2008) Acid adsorption on TiO₂ nanoparticless an electrochemical properties study. *The Journal of Physical Chemistry C* **112**: 8476–8480.
- Kavan L, Yum JH and Gratzel M (2011) Graphene nanoplatelets outperforming platinum as the electrocatalyst in co-bipyridine-mediated dye-sensitized solar cells. *Nano Letters* **11**: 5501-5506.
- Khan NE, Nybo SE, Chappell J and Curtis WR (2015) Triterpene hydrocarbon production engineered into a metabolically versatile host-*Rhodobacter capsulatus*. *Biotechnol Bioeng* **112**: 1523-1532.
- Khondee N, Tathong S, Pinyakong O, Müller R, Soonglerdsongpha S, Ruangchainikom C, Tongcumpou C and Luepromchai E (2015) Lipopeptide biosurfactant production by chitosan-immobilized *Bacillus* sp. GY19 and their recovery by foam fractionation. *Biochemical Engineering Journal* **93**: 47-54.

- Kim B, Park SW, Kim JY, *et al.* (2013) Rapid dye adsorption via surface modification of TiO₂ photoanodes for dye-sensitized solar cells. *ACS Appl Mater Interfaces* **5**: 5201-5207.
- Kim CW, Suh SP, Choi MJ, Kang YS and Kang YS (2013) Fabrication of SrTiO₃-TiO₂ heterojunction photoanode with enlarged pore diameter for dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry A* **1**: 11820.
- Kim HN and Moon JH (2012) Enhanced photovoltaic properties of Nb₂O₅-coated TiO₂ 3D ordered porous electrodes in dye-sensitized solar cells. *ACS Applied Material & Interfaces* **4**: 5821-5825.
- Kimura M, Nomoto H, Masaki N and Mori S (2012) Dye molecules for simple co-sensitization process: fabrication of mixed-dye-sensitized solar cells. *Angew Chem Int Ed Engl* **51**: 4371-4374.
- Kojima A, Teshima K, Shirai Y and Miyasaka T (2009) Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society* **131**: 6050-6051.
- Kono T, Masaki N, Nishikawa M, Tamura R, Matsuzaki H, Kimura M and Mori S (2016) Interfacial charge transfer in dye-sensitized solar cells using SCN-free terpyridine-coordinated Ru complex dye and Co complex redox couples. *ACS Appl Mater Interfaces* **8**: 16677-16683.
- Kumari JMKW, Sanjeevadarshini N, Dissanayake MAKL, Senadeera GKR and Thotawatthage CA (2016) The effect of TiO₂ photo anode film thickness on photovoltaic properties of dye-sensitized solar cells. *Ceylon Journal of Science* **45**: 33.
- Kuo FS, Chien YH and Chen CJ (2012) Effects of light sources on growth and carotenoid content of photosynthetic bacteria *Rhodospseudomonas palustris*. *Bioresour Technol* **113**: 315-318.
- Lee M-E, Kang M-S and Cho K-H (2013) A density functional theory study of additives in electrolytes of a dye sensitized solar cell. *Bulletin of the Korean Chemical Society* **34**: 2491-2494.
- Lee Y-L and Lo Y-S (2009) Highly efficient quantum-dot-sensitized solar cell based on co-sensitization of CdS/CdSe. *Advanced Functional Materials* **19**: 604-609.

- Li D, Qin D, Deng M, Luo Y and Meng Q (2009) Optimization the solid-state electrolytes for dye-sensitized solar cells. *Energy Environ Sci* **2**: 283-291.
- Li LL and Diao EW (2013) Porphyrin-sensitized solar cells. *Chemical Society Reviews* **42**: 291-304.
- Li Z, Gong F, Zhou G and Wang Z-S (2013) NiS₂/Reduced graphene oxide nanocomposites for efficient dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C* **117**: 6561-6566.
- Lin J, Heo YU, Nattestad A, Sun Z, Wang L, Kim JH and Dou SX (2014) 3D hierarchical rutile TiO₂ and metal-free organic sensitizer producing dye-sensitized solar cells 8.6% conversion efficiency. *Scientific Reports* **4**: 5769.
- Liu S, Zhang G, Li J, Li X and Zhang J (2016) optimization of biomass and 5-aminolevulinic acid production by *Rhodobacter sphaeroides* ATCC17023 via response surface Methodology. *Appl Biochem Biotechnol* **179**: 444-458.
- Luo L, Tao W, Hu X, *et al.* (2011) Mesoporous F-doped ZnO prism arrays with significantly enhanced photovoltaic performance for dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources* **196**: 10518-10525.
- Lv H, Yuan X and Cui C (2017) Enhancing the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells by modifying TiO₂ photoanodes with layered structure g-C₃N₄. *Advances in Materials* **1808**: 040010.
- Maçaira J, Andrade L and Mendes A (2013) Review on nanostructured photoelectrodes for next generation dye-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **27**: 334-349.
- Madigan MT and Jung DO (2009) An overview of purple bacteria: Systematics, physiology, and habitats. *Springer Science+Business Media* 1-15.
- Mathew S, Yella A, Gao P, Humphry-Baker R, Curchod BF, Ashari-Astani N, Tavernelli I, Rothlisberger U, Nazeeruddin MK and Gratzel M (2014) Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers. *Nature Chemistry* **6**: 242-247.
- Melnicki MR, Eroglu E and Melis A (2009) Changes in hydrogen production and polymer accumulation upon sulfur-deprivation in purple photosynthetic bacteria. *International Journal of Hydrogen Energy* **34**: 6157-6170.

- Meng F, Yang A, Zhang G and Wang H (2017) Effects of dissolved oxygen concentration on photosynthetic bacteria wastewater treatment: Pollutants removal, cell growth and pigments production. *Bioresource Technology*.
- Mohamed IM, Dao VD, Barakat NA, Yasin AS, Yousef A and Choi HS (2016) Efficiency enhancement of dye-sensitized solar cells by use of ZrO₂-doped TiO₂ nanofibers photoanode. *Journal of Colloid and Interface Science* **476**: 9-19.
- Molla M, Baranwal AK, Pandey SS, Ma T and Hayase S (2016) Transparent conductive oxide-less dye-sensitized solar cells consisting of dye-cocktail and cobalt based redox electrolyte. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **16**: 1-7.
- Nagadomi H, Kitamura T, Watanabe M and Sasaki K (2000) Simultaneous removal of chemical oxygen demand (COD), phosphate, nitrate and H₂S in the synthetic sewage wastewater using porous ceramic immobilized photosynthetic bacteria. *Biotechnology Letters* **22**: 1369-1374.
- Nasution A, Amelia R, Sawitri D and Risanti DD (2015) Co-sensitized natural dyes potentially used to enhance light harvesting capability. *The International Society for Optical Engineering* **9444**: 1-7.
- Nazeeruddin MK, Kay A, Rodicio I, Humphry-Baker R, Müller E, Liska P, Vlachopoulos N and Grätzel M (1993) Conversion of light to electricity by cis-X₂Bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate) ruthenium(II) charge-transfer sensitizers (X = Cl-, Br-, I-, CN-, and SCN-) on nanocrystalline TiO₂ electrodes. *Journal of the American Chemical Society* **115**: 6382-6390.
- Nazeeruddin MK, Péchy P, Renouard T, *et al.* (2001) Engineering of efficient panchromatic sensitizers for nanocrystalline TiO₂-based solar cells. *American Chemical Society* **123**: 1613-1624.
- Nunkaew T, Kantachote D, Kanzaki H, Nitoda T and Ritchie RJ (2014) Effects of 5-aminolevulinic acid (ALA)-containing supernatants from selected *Rhodospseudomonas palustris* strains on rice growth under NaCl stress, with mediating effects on chlorophyll, photosynthetic electron transport and antioxidative enzymes. *Electronic Journal of Biotechnology* **17**: 19-26.

- Nwe H, Maung Y, Win T and Soe K (2012) Photovoltaic properties of mesoporous TiO₂-ZrO₂ binary oxide electrode with sawdust organic dye for dye-sensitized solar cell application. *Journal of Science* **3**: 197-200.
- O'Regan B and Grätzel M (1991) A low cost, high efficiency solar cell based on dye sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature* **353**: 739-743.
- Oren A, Mana L and Jehlicka J (2015) Probing single cells of purple sulfur bacteria with raman spectroscopy: carotenoids and elemental sulfur. *FEMS Microbiology Letters* **362**.
- Padovani G, Vaičiulytė S and Carozzi P (2016) Bio H₂ photoproduction by means of *Rhodospirillum rubrum* sp. cultured in a lab-scale photobioreactor operated in batch, fed-batch and semi-continuous modes. *Fuel* **166**: 203-210.
- Pang H, Yang H, Guo CX and Li CM (2012) Functionalization of SnO₂ photoanode through Mg-doping and TiO₂-coating to synergistically boost dye-sensitized solar cell performance. *Applied Materials & Interfaces* **4**: 6261-6265.
- Park K, Zhang Q, Garcia BB and Cao G (2011) Effect of annealing temperature on TiO₂-ZnO core-shell aggregate photoelectrodes of dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C* **115**: 4927-4934.
- Pinela J, Prieto MA, Barreiro MF, Carvalho AM, Oliveira MBPP, Vázquez JA and Ferreira ICFR (2016) Optimization of microwave-assisted extraction of hydrophilic and lipophilic antioxidants from a surplus tomato crop by response surface methodology. *Food and Bioprocess Technology* **98**: 283-298.
- Pintucci C, Giovannelli A, Traversi ML, Ena A, Padovani G and Carozzi P (2013) Fresh olive mill waste deprived of polyphenols as feedstock for hydrogen photoproduction by means of *Rhodospirillum rubrum* 420L. *Renewable Energy* **51**: 358-363.
- Plass B, Pelet S, Krueger J and Grätzel M (2002) Quantum dot sensitization of organic-inorganic hybrid solar cells. *The Journal of Physical Chemistry B* **106**: 7578-7580.
- Pott RW, Howe CJ and Dennis JS (2013) Photofermentation of crude glycerol from biodiesel using *Rhodospirillum rubrum*: comparison with organic acids

- and the identification of inhibitory compounds. *Bioresour Technol* **130**: 725-730.
- Preston M (2014) A metabolic study of biohydrogen-producing photosynthetic bacteria: the effects on growth rates of *Rhodobacter capsulatus* JP91 Hup- and *Rhodospseudomonas palustris* when acetate is replaced by glucose as the primary carbon source. *Canadian Young Scientist Journal* **2014**: 30-34.
- Qian P (2017) Structure and function of the reaction centre – light harvesting 1 core complexes from purple photosynthetic bacteria. *Photosynthesis: Structures* 11-31.
- Reda SM and Soliman KA (2016) Natural dye extracted from karkadah and its application in dye-sensitized solar cells: experimental and density functional theory study. *Applied Optics* **55**: 838-845.
- Rhee JH, Chung C-C and Diao EW-G (2013) A perspective of mesoscopic solar cells based on metal chalcogenide quantum dots and organometal-halide perovskites. *NPG Asia Materials* **5**: e68.
- Rongsayamanont W, Soonglerdsongpha S, Khondee N, Pinyakong O, Tongcumpou C, Sabatini DA and Luepromchai E (2017) Formulation of crude oil spill dispersants based on the HLD concept and using a lipopeptide biosurfactant. *Journal of Hazardous Materials* **334**: 168-177.
- Rudolf C and Grammel H (2012) Fructose metabolism of the purple non-sulfur bacterium *Rhodospirillum rubrum*: effect of carbon dioxide on growth, and production of bacteriochlorophyll and organic acids. *Enzyme and Microbial Technology* **50**: 238-246.
- Ruivo M, Cartaxana P, Cardoso MI, Tenreiro A, Tenreiro R and Jesus B (2014) Extraction and quantification of pigments in aerobic anoxygenic phototrophic bacteria. *Limnology and Oceanography: Methods* **12**: 338-350.
- Sabourin-Provost G and Hallenbeck PC (2009) High yield conversion of a crude glycerol fraction from biodiesel production to hydrogen by photofermentation. *Bioresour Technol* **100**: 3513-3517.

- Saejung C and Apaiwong P (2015) Enhancement of carotenoid production in the new carotenoid-producing photosynthetic bacterium *Rhodopseudomonas faecalis* PA2. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* **20**: 701-707.
- Santra PK and Kamat PV (2012) Mn-doped quantum dot sensitized solar cells: a strategy to boost efficiency over 5%. *Journal of the American Chemical Society* **134**: 2508-2511.
- Sargsyan H, Gabrielyan L, Hakobyan L and Trchounian A (2015) Light–dark duration alternation effects on *Rhodobacter sphaeroides* growth, membrane properties and bio-hydrogen production in batch culture. *International Journal of Hydrogen Energy* **40**: 4084-4091.
- Sasaki K, Watanabe M, Suda Y, Ishizuka A and Noparatnaraporn N (2005) Applications of photosynthetic bacteria for medical fields. *Journal of Bioscience and Bioengineering* **100**: 481-488.
- Seifert K, Waligorska M and Laniecki M (2010) Hydrogen generation in photobiological process from dairy wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy* **35**: 9624-9629.
- Shahid M, Shahid ul I and Mohammad F (2013) Recent advancements in natural dye applications: a review. *Journal of Cleaner Production* **53**: 310-331.
- Shanmugam V, Manoharan S, Sharafali A, Anandan S and Murugan R (2015) Green grasses as light harvesters in dye sensitized solar cells. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc* **135**: 947-952.
- Shen T, Tian J, Lv L, Fei C, Wang Y, Pullerits T and Cao G (2016) Investigation of the role of Mn dopant in CdS quantum dot sensitized solar cell. *Electrochimica Acta* **191**: 62-69.
- Shen Y, Zhang X, Prinyawiwatkul W and Xu Z (2014) Simultaneous determination of red and yellow artificial food colourants and carotenoid pigments in food products. *Food Chemistry* **157**: 553-558.
- Shin SS, Yeom EJ, Yang WS, Hur S, Kim MG, Im J, Seo J, Noh JH and Seok SI (2017) Colloidally prepared La-doped BaSnO₃ electrodes for efficient, photostable perovskite solar cells. *Science* **356**: 167-171.

- Smith D, Scott J, Steele A, Cody G, Ohara S and Fogel M (2013) Effects of metabolism and physiology on the production of okenone and bacteriochlorophylla in purple sulfur bacteria. *Geomicrobiology Journal* **31**: 128-137.
- Son S, Hwang SH, Kim C, Yun JY and Jang J (2013) Designed synthesis of SiO₂/TiO₂ core/shell structure as light scattering material for highly efficient dye-sensitized solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces* **5**: 4815-4820.
- Stefik M, Heiligtag FJ, Niederberger M and Grätzel M (2013) Improved nonaqueous synthesis of TiO₂ for dye-sensitized solar cells. *ACS Nano* **7**: 8981–8989.
- Sudhagar P, Nagarajan S, Lee YG, Song D, Son T, Cho W, Heo M, Lee K, Won J and Kang YS (2011) Synergistic catalytic effect of a composite (CoS/PEDOT:PSS) counter electrode on triiodide reduction in dye-sensitized solar cells. *ACS Appl Mater Interfaces* **3**: 1838-1843.
- Sun W, Peng T, Liu Y, Xu S, Yuan J, Guo S and Zhao X-Z (2013) Hierarchically porous hybrids of polyaniline nanoparticles anchored on reduced graphene oxide sheets as counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry A* **1**: 2762.
- Syafinar R, Gomesh N, Irwanto M, Fareq M and Irwan YM (2015) Chlorophyll pigments as nature based dye for dye-sensitized solar cell (DSSC). *Energy Procedia* **79**: 896-902.
- Tao L, Huo Z, Ding Y, *et al.* (2015) High-efficiency and stable quasi-solid-state dye-sensitized solar cell based on low molecular mass organogelator electrolyte. *Journal of Materials Chemistry A* **3**: 2344-2352.
- Trevisan R, Döbbelin M, Boix PP, Barea EM, Tena-Zaera R, Mora-Seró I and Bisquert J (2011) PEDOT nanotube arrays as high performing counter electrodes for dye sensitized solar cells. Study of the interactions among electrolytes and counter electrodes. *Advanced Energy Materials* **1**: 781-784.
- Tsui L-k, Huang J, Sabat M and Zangari G (2014) Visible light sensitization of TiO₂ nanotubes by bacteriochlorophyll-c dyes for photoelectrochemical solar cells. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2**: 2097-2101.

- Uyar B, Eroglu I, Yücel M and Gündüz U (2009) Photofermentative hydrogen production from volatile fatty acids present in dark fermentation effluents. *International Journal of Hydrogen Energy* **34**: 4517-4523.
- Waghmare MA, Naushad M, Pathan HM and Ubale AU (2017) Rose bengal-sensitized ZrO_2 photoanode for dye-sensitized solar cell. *Journal of Solid State Electrochemistry*.
- Wang GS, Grammel H, Abou-Aisha K, Sagesser R and Ghosh R (2012) High-level production of the industrial product lycopene by the photosynthetic bacterium *Rhodospirillum rubrum*. *Appl Environ Microbiol* **78**: 7205-7215.
- Wang H, Sun K, Tao F, Stacchiola DJ and Hu YH (2013) 3D honeycomb-like structured graphene and its high efficiency as a counter-electrode catalyst for dye-sensitized solar cells. *Angew Chem Int Ed Engl* **52**: 9210-9214.
- Wang J, Mora-Sero I, Pan Z, Zhao K, Zhang H, Feng Y, Yang G, Zhong X and Bisquert J (2013) Core/shell colloidal quantum dot exciplex states for the development of highly efficient quantum-dot-sensitized solar cells. *Journal of the American Chemical Society* **135**: 15913-15922.
- Wang Q, Butburee T, Wu X, Chen H, Liu G and Wang L (2013) Enhanced performance of dye-sensitized solar cells by doping Au nanoparticles into photoanodes: a size effect study. *Journal of Materials Chemistry A* **1**: 13524.
- Wang S, Zhang X, Zhou G and Wang ZS (2012) Double-layer coating of $SrCO_3/TiO_2$ on nanoporous TiO_2 for efficient dye-sensitized solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics* **14**: 816-822.
- Wei W, Wang H and Hu YH (2013) Unusual particle-size-induced promoter-to-poison transition of ZrN in counter electrodes for dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry A* **1**: 14350.
- Wen Z, Cui S, Pu H, Mao S, Yu K, Feng X and Chen J (2011) Metal nitride/graphene nanohybrids: general synthesis and multifunctional titanium nitride/graphene electrocatalyst. *Advanced Materials* **23**: 5445-5450.
- Wong W-T, Tseng C-H, Hsu S-H, Lur H-S, Mo C-W, Huang C-N, Hsu S-C, Lee K-T and Liu C-T (2014) Promoting effects of a single *Rhodospseudomonas palustris*

- inoculant on plant growth by *Brassica rapa chinensis* under low fertilizer input. *Microbes and Environments* **29**: 303-313.
- Wu J, Lan Z, Lin J, Huang M, Huang Y, Fan L and Luo G (2015) Electrolytes in dye-sensitized solar cells. *Chemical Reviews* **115**: 2136-2173.
- Wu KL, Huckaba AJ, Clifford JN, Yang YW, Yella A, Palomares E, Gratzel M, Chi Y and Nazeeruddin MK (2016) Molecularly engineered Ru(II) sensitizers compatible with cobalt(II/III) redox mediators for dye-sensitized solar cells. *Inorganic Chemistry* **55**: 7388-7395.
- Wu M, Lin X, Hagfeldt A and Ma T (2011) A novel catalyst of WO₂ nanorod for the counter electrode of dye-sensitized solar cells. *Chemical Communications* **47**: 4535-4537.
- Wu MS and Wu JF (2013) Pulse-reverse electrodeposition of transparent nickel phosphide film with porous nanospheres as a cost-effective counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Chemical communications* **49**: 10971-10973.
- Wu P, Zhang G and Li J (2015) Mg²⁺ improves biomass production from soybean wastewater using purple non-sulfur bacteria. *Journal of environmental sciences (China)* **28**: 43-46.
- Wu P, Zhang G, Li J, Lu H and Zhao W (2012) Effects of Fe²⁺ concentration on biomass accumulation and energy metabolism in photosynthetic bacteria wastewater treatment. *Bioresour Technol* **119**: 55-59.
- Wu WQ, Lei BX, Rao HS, Xu YF, Wang YF, Su CY and Kuang DB (2013) Hydrothermal fabrication of hierarchically anatase TiO₂ nanowire arrays on FTO glass for dye-sensitized solar cells. *Scientific Reports* **3**: 1352.
- Wu X, Wang X, Yang H and Guo L (2010) A comparison of hydrogen production among three photosynthetic bacterial strains. *International Journal of Hydrogen Energy* **35**: 7194-7199.
- Wu Y, Marszalek M, Zakeeruddin SM, Zhang Q, Tian H, Grätzel M and Zhu W (2012) High-conversion-efficiency organic dye-sensitized solar cells: molecular engineering on D-A- π -A featured organic indoline dyes. *Energy & Environmental Science* **5**: 8261.

- Xia J, Chen L and Yanagida S (2011) Application of polypyrrole as a counter electrode for a dye-sensitized solar cell. *Journal of Materials Chemistry* **21**: 4644.
- Xiao Y, Wu J, Lin J, Yue G, Lin J, Huang M, Huang Y, Lan Z and Fan L (2013) A high performance Pt-free counter electrode of nickel sulfide/multi-wall carbon nanotube/titanium used in dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry A* **1**: 13885.
- Xing J, Liu XF, Zhang Q, Ha ST, Yuan YW, Shen C, Sum TC and Xiong Q (2015) Vapor phase synthesis of organometal halide perovskite nanowires for tunable room-temperature nanolasers. *Nano Letters* **15**: 4571-4577.
- Xu F, Chen J, Wu X, Zhang Y, Wang Y, Sun J, Bi H, Lei W, Ni Y and Sun L (2013) Graphene scaffolds enhanced photogenerated electron transport in ZnO photoanodes for high-efficiency dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C* **117**: 8619-8627.
- Yang H, Huang M, Wu J, Lan Z, Hao S and Lin J (2008) The polymer gel electrolyte based on poly(methyl methacrylate) and its application in quasi-solid-state dye-sensitized solar cells. *Materials Chemistry and Physics* **110**: 38-42.
- Yang Z, Liu M, Zhang C, Tjiu WW, Liu T and Peng H (2013) Carbon nanotubes bridged with graphene nanoribbons and their use in high-efficiency dye-sensitized solar cells. *Angewandte Chemie International Edition* **52**: 3996-3999.
- Ye M, Chen C, Lv M, Zheng D, Guo W and Lin C (2013) Facile and effective synthesis of hierarchical TiO₂ spheres for efficient dye-sensitized solar cells. *Nanoscale* **5**: 6577-6583.
- Ye M, Wen X, Wang M, Iocozzia J, Zhang N, Lin C and Lin Z (2015) Recent advances in dye-sensitized solar cells: from photoanodes, sensitizers and electrolytes to counter electrodes. *Materials Today* **18**: 155-162.
- Yella A, Lee H, Tsao H, Yi C, Chandiran AK, Nazeeruddin M, Diao EW, Yeh CY, Zakeeruddin SM and Grätzel M (2011) Porphyrin-Sensitized Solar Cells with Cobalt (II/III)-Based Redox Electrolyte Exceed 12 Percent Efficiency. *SCIENCE* **334**: 629-634.

- Yella A, Humphry-Baker R, Curchod BFE, *et al.* (2013) Molecular engineering of a fluorene donor for dye-sensitized solar cells. *Chemistry of Materials* **25**: 2733-2739.
- Yen Y-S, Chou H-H, Chen Y-C, Hsu C-Y and Lin JT (2012) Recent developments in molecule-based organic materials for dye-sensitized solar cells. *Journal of Materials Chemistry* **22**: 8734.
- Yetis M, Gündüza U, Eroglu I, Yücel M and Türker L (2000) Photoproduction of hydrogen from sugar refinery wastewater by *Rhodobacter sphaeroides* O.U. 001. *International Journal of Hydrogen Energy* **25**: 1035-1041.
- Yoon SJ, Lim I, Kim JH, Adhikari S, Lee WY, Lee JK, Shrestha NK, Ahn H, Han JW and Han SH (2016) Deprotonated curcumin as a simple and quick available natural dye for dye sensitized solar cells. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* **38**: 183-189.
- Yu D, Wang M, Zhu G, Ge B, Liu S and Huang F (2015) Enhanced photocurrent production by bio-dyes of photosynthetic macromolecules on designed TiO₂ film. *Scientific Reports* **5**: 9375.
- Yu J, Yang Y, Fan R, Zhang H, Li L, Wei L, Shi Y, Pan K and Fu H (2013) Er³⁺ and Yb³⁺ co-doped TiO_{2-x}F_x up-conversion luminescence powder as a light scattering layer with enhanced performance in dye sensitized solar cells. *Journal of Power Sources* **243**: 436-443.
- Yu Q, Wang Y, Yi Z, Zu N, Zhang J, Zhang M and Wang P (2010) High-efficiency dye-sensitized solar cells: The influence of lithium ions on exciton dissociation, charge recombination, and surface states. *ACS Nano* **4**: 6032-6038.
- Yuan C, Guo S, Wang S, Liu L, Chen W and Wang E (2013) Electropolymerization polyoxometalate (POM)-Doped PEDOT film electrodes with mastoid microstructure and its application in dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Industrial & Engineering Chemistry Research* **52**: 6694-6703.
- Zeng W, Cao Y, Bai Y, Wang Y, Shi Y, Zhang M, Wang F, Pan C and Wang P (2010) Efficient dye-sensitized solar cells with an organic photosensitizer featuring orderly conjugated ethylenedioxythiophene and dithienosilole blocks. *Chemistry of Materials* **22**: 1915-1925.

- Zhang H, Wang W, Liu H, Wang R, Chen Y and Wang Z (2014) Effects of TiO₂ film thickness on photovoltaic properties of dye-sensitized solar cell and its enhanced performance by graphene combination. *Materials Research Bulletin* **49**: 126-131.
- Zhang S, Yang X, Numata Y and Han L (2013) Highly efficient dye-sensitized solar cells: progress and future challenges. *Energy & Environmental Science* **6**: 1443.
- Zhang Z, Zhang X, Xu H, Liu Z, Pang S, Zhou X, Dong S, Chen X and Cui G (2012) CuInS₂ nanocrystals/PEDOT:PSS composite counter electrode for dye-sensitized solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces* **4**: 6242-6246.
- Zhao Y, Thapa A, Feng Q, Xi M, Qiao Q and Fong H (2013) Electrospun TiC/C nano-felt surface-decorated with Pt nanoparticles as highly efficient and cost-effective counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Nanoscale* **5**: 11742-11747.
- Zhou Q, Zhang P and Zhang G (2014) Biomass and carotenoid production in photosynthetic bacteria wastewater treatment: effects of light intensity. *Bioresour Technol* **171**: 330-335.
- Zhou Q, Zhang P and Zhang G (2015) Biomass and pigments production in photosynthetic bacteria wastewater treatment: effects of light sources. *Bioresour Technol* **179**: 505-509. มหาวิทยาลัย
- Zolkepli Z, Lim A, Ekanayake P and Tennakoon K (2015) Efficiency enhancement of cocktail dye of *Ixora coccinea* and *Tradescantia spathacea* in dssc. *Biophysical Journal* **2015**: 582091.
- จักรกราชชัย บัวจันทร์ (2559) การใช้น้ำเสียปนเปื้อนไขมันจากโรงงานอาหารเพื่อผลิตสารรงควัตถุด้วย *Rhodospseudomonas palustris* W3. ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

อาหารเลี้ยงเชื้อและการคำนวณปริมาณองค์ประกอบในอาหาร

อาหารเหลว RCVB

มีองค์ประกอบต่อปริมาตรอาหาร 1 ลิตร ดังนี้

ส่วนที่ 1 : สารอาหารหลัก

แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.20	กรัม
ไดโปตัสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)	0.75	กรัม
โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)	0.85	กรัม
กรดมาลิก	4.00	กรัม
แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)	1.00	กรัม
สารสกัดจากยีสต์	0.10	กรัม

ส่วนที่ 2: Trace element

กรดบอริก (H_3BO_3)	2.8	มิลลิกรัม
โซเดียมโมลิบเดตไดไฮเดรต ($Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$)	0.75	มิลลิกรัม
ซิงค์ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)	0.24	มิลลิกรัม
แมงกานีสซัลเฟตเตตระไฮเดรต ($MnSO_4 \cdot 4H_2O$)	2.10	มิลลิกรัม
คอปเปอร์ (II) ไนเตรตไตรไฮเดรต ($Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$)	0.04	มิลลิกรัม
กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะซีติก (EDTA)	2.00	มิลลิกรัม
เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)	11.8	มิลลิกรัม
แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$)	0.75	มิลลิกรัม

ปรับ pH เป็น 7.0 ± 0.2 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ก่อนทำให้ปลอดเชื้อด้วย autoclave

อาหารเลี้ยงเชื้อ Luria-Bertani (LB) เจือจาง 50%

มีองค์ประกอบต่อปริมาตรอาหาร 1 ลิตร ดังนี้

ทริปโตน (tryptone)	10	กรัม
สารสกัดจากยีสต์ (yeast extract)	5	กรัม
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	5	กรัม

เจือจางเป็น 50% โดยผสมอาหารเหลว LB ปริมาตร 500 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่นปริมาตร 500

มิลลิลิตร ปรับ pH เป็น 7. ก่อนทำให้ปลอดเชื้อด้วย autoclave กรณีเตรียมเป็นอาหารแข็ง เตรียม

โดยละลายผงวุ้น 18 กรัม ลงในอาหารเหลวปริมาตร 1 ลิตร ก่อนทำให้ปลอดเชื้อ

คำนวณปริมาณคาร์บอน

กรดมาลิก มีน้ำหนักโมเลกุล 134.09 กรัมต่อโมล ใช้กรดมาลิก 4 กรัม คิดเป็น 0.0298 โมล

กรดมาลิกมีคาร์บอน 4 อะตอม ดังนั้น มีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ $0.0298 \times 12 \times 4 = 1.4304$ กรัม

คำนวณปริมาณไนโตรเจน

อาหารเหลว RCVB ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีแหล่งคาร์บอน 2 ส่วน คือ จากแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) และสารสกัดจากยีสต์

- ปริมาณไนโตรเจนจากแอมโมเนียมคลอไรด์

แอมโมเนียมคลอไรด์ มีน้ำหนักโมเลกุล 53.491 กรัมต่อโมล ใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ 1 กรัม คิดเป็น 0.0187 โมล

แอมโมเนียมคลอไรด์มีไนโตรเจน 1 อะตอม ดังนั้น มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ $0.0187 \times 14 = 0.2618$ กรัม

- ปริมาณไนโตรเจนจากสารสกัดจากยีสต์

สารสกัดจากยีสต์มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 10% หากใช้ปริมาณ 4 กรัม มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 0.4 กรัม

รวมมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในอาหารเท่ากับ $0.26 + 0.4 = 0.66$ กรัม

สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดต่อปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 2:1

คำนวณปริมาณเหล็ก

เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต มีน้ำหนักโมเลกุล 278.01 กรัมต่อโมล ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮ

เดรต 0.02 กรัม คิดเป็น 0.00007 โมล เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมีไอออน 1 อะตอม ดังนั้น มี

ปริมาณไอออนเท่ากับ $0.00007 \times 55.85 = 0.0039$ กรัม

คำนวณปริมาณแมกนีเซียม

แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต มีน้ำหนักมวลโมเลกุล 246.47 กรัมต่อโมล ใช้แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.4 กรัม คิดเป็น 0.0016 โมล แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมีแมกนีเซียม 1 อะตอม ดังนั้น มีปริมาณแมกนีเซียมเท่ากับ $0.0016 \times 24.31 = 0.039$ กรัม



ภาคผนวก ข

สารเคมี

ตัวทำละลายอะซิโตน: เมทานอล (7:2) โดยปริมาตรต่อปริมาตร

อะซิโตน 70 มิลลิลิตร

เมทานอล 20 มิลลิลิตร

ตัวทำละลายอะซิโตน: วาสิโรไนโตร (85: 15) โดยปริมาตรต่อปริมาตร

อะซิโตน 85 มิลลิลิตร

วาสิโรไนโตร 15 มิลลิลิตร

สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมไอโอดัด (NaI)

โซเดียมไอโอดัด (NaI) 0.1499 กรัม

กวานิดีนไทโอไซยาเนต (GNCS) 0.1182 กรัม

ไอโอดัด (I_2) 0.0761 กรัม

เทอร์ท-บิวทิลเพริดีน (TBP) 0.7324 มิลลิลิตร

ละลายในตัวทำละลายอะซิโตน: วาสิโรไนโตร (85: 15) โดยปริมาตรต่อปริมาตร 10 มิลลิลิตร

สารละลายอิเล็กโทรไลต์สารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์ (Co-complex)

$[\text{Co}(\text{bpy-pz})_2]^{2+}$	1.726 กรัม
$[\text{Co}(\text{bpy-pz})_2]^{3+}$	0.465 กรัม
ลิเทียมเปอร์คลอเรท (LiClO_4)	0.106 กรัม
เทอร์ท-บิวทิลไพรีดีน (TBP)	0.367 มิลลิลิตร

ละลายในตัวทำละลายอะซิโตนปริมาตร 10 มิลลิลิตร

เตรียมการเจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์

ผสม Poly(Ethylene oxide) 0.53 กรัม กับ Acetonitrile และ Propylene carbonate (20:1 v/v) กวนผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารคูรีดอกซ์ไอโอดีน/ไตรไอโอดีนเตรียมจาก NaI 0.224 กรัม I_2 0.04 กรัม และเติมสาร Acetamide 8% รีฟลักซ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนสังเกตเห็นสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นกวนผสมทิ้งไว้ข้ามคืน แล้วระเหย Acetonitrile ด้วยเครื่องระเหยสารแบบลดความดันที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส 8 ชั่วโมง

สีย้อม N719 (0.3 mM)

สีย้อม N719	0.357 กรัม
-------------	------------

ละลายในตัวทำละลายอะซิโตน: เทอร์ท-บิวทานอล (1:1) โดยปริมาตรต่อปริมาตร 100 มิลลิลิตร

ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบต่างๆ สำหรับการคัดเลือกสายพันธุ์แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงชนิดไม่
สะสมกำมะถันที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสี

ตารางที่ ค1 การศึกษาการเจริญของ *Rhodospseudomonas faecalis* W1

วันที่	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต log CFU/mL					ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660นาโนเมตร				
	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.80	7.88	7.85	7.84	0.04	0.024	0.02	0.021	0.02	0.00
1	8.43	8.56	8.37	8.45	0.10	0.062	0.058	0.064	0.06	0.00
2	8.80	8.78	8.82	8.80	0.02	0.363	0.4	0.32	0.36	0.04
3	8.87	8.85	8.80	8.84	0.03	0.927	0.93	0.899	0.92	0.02
4	8.92	8.95	8.90	8.93	0.03	1.55	1.672	1.514	1.58	0.08
5	8.95	8.99	8.97	8.97	0.02	1.662	1.659	1.609	1.64	0.03
6	9.03	9.03	9.01	9.02	0.01	1.974	1.962	1.971	1.97	0.01
7	9.37	9.30	9.30	9.32	0.04	2.987	2.98	2.979	2.98	0.00
8	9.63	9.65	9.65	9.64	0.01	3.172	3.098	2.998	3.09	0.09
9	9.86	9.87	9.88	9.87	0.01	2.969	2.922	2.899	2.93	0.04
10	9.95	9.95	9.95	9.95	0.00	3.206	3.21	3.211	3.21	0.00
11	9.94	9.95	9.94	9.94	0.00	3.064	3.109	3.029	3.07	0.04
12	9.85	9.87	9.88	9.86	0.02	3.275	3.25	3.336	3.29	0.04
13	9.82	9.85	9.80	9.82	0.02	3.133	3.121	3.109	3.12	0.01
14	9.90	9.92	9.88	9.90	0.02	2.975	3.006	3.12	3.03	0.08

ตารางที่ ค2 การศึกษาการเจริญของ *Rhodopseudomonas* sp.W2

วันที่	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต log CFU/mL					ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660นาโนเมตร				
	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.56	7.52	7.56	7.55	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
1	8.67	8.64	8.60	8.64	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.00
2	8.78	8.82	8.75	8.79	0.04	0.18	0.20	0.22	0.20	0.02
3	8.94	8.94	8.90	8.93	0.02	0.25	0.24	0.24	0.25	0.00
4	8.95	8.97	8.99	8.97	0.02	0.27	0.22	0.28	0.26	0.03
5	9.18	9.23	9.18	9.20	0.03	0.27	0.27	0.29	0.28	0.01
6	9.78	9.82	9.80	9.80	0.02	0.40	0.40	0.42	0.41	0.01
7	10.00	10.12	10.00	10.04	0.07	0.69	0.66	0.69	0.68	0.02
8	9.90	10.00	9.95	9.95	0.05	0.85	0.81	0.89	0.85	0.04
9	9.82	9.80	9.84	9.82	0.02	0.96	0.93	1.01	0.96	0.04
10	9.70	9.70	9.73	9.71	0.02	1.27	1.14	1.19	1.20	0.07
11	9.56	9.43	9.52	9.50	0.07	1.38	1.42	1.60	1.47	0.12
12	9.48	9.54	9.55	9.52	0.04	1.46	1.39	1.42	1.42	0.04
13	9.37	9.30	9.37	9.35	0.04	1.77	1.69	1.62	1.69	0.07
14	9.94	8.92	8.94	9.27	0.59	1.78	1.97	1.70	1.82	0.14

ตารางที่ ค3 การศึกษาการเจริญของ *Rhodopseudomonas palustris* W3

วันที่	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต log CFU/mL					ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660นาโนเมตร				
	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.92	7.90	7.88	7.90	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00
1	8.43	8.56	8.52	8.50	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06	0.01
2	8.87	8.78	8.75	8.80	0.06	0.22	0.24	0.22	0.23	0.01
3	9.80	9.78	9.80	9.79	0.01	0.61	0.88	0.60	0.70	0.16
4	9.87	9.90	9.95	9.91	0.04	1.29	1.40	1.38	1.36	0.06
5	9.90	9.94	10.11	9.99	0.11	1.48	0.94	1.49	1.30	0.31
6	10.03	10.03	9.97	10.01	0.03	1.86	1.62	1.56	1.68	0.16
7	10.12	9.95	10.30	10.13	0.17	2.07	1.79	1.88	1.92	0.14
8	10.10	10.16	10.40	10.22	0.16	2.69	2.43	2.57	2.56	0.13
9	10.10	10.54	10.52	10.39	0.25	2.63	2.14	2.17	2.31	0.28
10	9.85	9.85	9.78	9.82	0.04	2.94	2.52	2.71	2.73	0.21
11	9.98	9.99	9.99	9.99	0.00	3.07	2.93	2.77	2.92	0.15
12	10.00	10.16	10.18	10.12	0.10	2.61	2.85	2.92	2.80	0.16
13	9.99	9.95	9.97	9.97	0.02	2.95	3.00	2.77	2.91	0.12
14	9.95	9.97	9.99	9.97	0.02	3.36	3.00	3.00	3.12	0.21

ตารางที่ ค4 การศึกษาการเจริญของ *Rhodobacter johrii* W5

วันที่	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต log CFU/mL					ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660นาโนเมตร				
	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.64	7.66	7.60	7.63	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
1	8.43	8.30	8.30	8.34	0.07	0.23	0.20	0.19	0.21	0.02
2	9.64	9.64	9.67	9.65	0.02	0.30	0.38	0.48	0.38	0.09
3	9.73	9.73	9.73	9.73	0.00	0.64	0.53	0.61	0.60	0.06
4	9.78	9.80	9.78	9.79	0.01	0.70	0.69	0.85	0.75	0.09
5	9.85	9.88	9.87	9.86	0.02	0.76	0.90	0.85	0.84	0.07
6	9.92	9.92	9.92	9.92	0.00	0.81	0.80	0.89	0.83	0.05
7	9.99	9.95	9.99	9.98	0.02	0.90	0.92	0.95	0.93	0.03
8	10.22	10.00	10.12	10.12	0.11	0.92	0.94	0.99	0.95	0.04
9	9.90	9.97	9.95	9.94	0.03	0.94	0.90	0.98	0.94	0.04
10	9.97	9.97	9.92	9.95	0.03	1.55	1.49	1.51	1.52	0.03
11	9.78	9.97	9.87	9.87	0.10	1.68	1.61	1.69	1.66	0.04
12	10.00	10.16	10.18	10.12	0.10	2.61	2.51	2.63	2.58	0.07
13	9.95	9.97	9.99	9.97	0.02	2.96	2.82	2.56	2.78	0.20
14	9.94	9.90	9.92	9.92	0.02	3.01	3.01	3.00	3.01	0.00

ตารางที่ ค5 การศึกษาการเจริญของ *Rhodopseudomonas palustris* W6

วันที่	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต log CFU/mL					ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660นาโนเมตร				
	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.73	7.70	7.67	7.70	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00
1	8.05	8.08	8.18	8.11	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00
2	8.80	8.85	8.85	8.83	0.03	0.30	0.29	0.28	0.29	0.01
3	8.95	8.96	8.98	8.97	0.01	0.47	0.42	0.43	0.44	0.03
4	8.80	8.80	8.78	8.79	0.01	0.53	0.55	0.60	0.56	0.04
5	8.99	8.85	8.99	8.94	0.08	0.85	0.84	0.83	0.84	0.01
6	8.52	8.70	8.73	8.65	0.11	0.90	0.92	0.93	0.92	0.01
7	9.12	9.00	9.22	9.12	0.11	1.18	1.07	1.16	1.14	0.06
8	8.82	8.78	8.80	8.80	0.02	1.05	1.04	1.14	1.08	0.05
9	8.30	8.37	8.30	8.32	0.04	1.13	1.13	1.04	1.10	0.05
10	8.64	8.64	8.48	8.58	0.09	1.16	1.16	1.17	1.16	0.00
11	8.30	8.30	8.43	8.34	0.07	1.19	1.20	1.20	1.19	0.01
12	8.70	8.70	8.60	8.67	0.06	1.12	1.13	1.10	1.12	0.02
13	8.64	8.80	8.73	8.72	0.08	1.26	1.27	1.20	1.24	0.03
14	8.95	8.90	8.80	8.89	0.08	1.39	1.29	1.36	1.35	0.05

ตารางที่ ค6 การศึกษาการเจริญของ *Rhodopseudomonas palustris* W7

วันที่	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต log CFU/mL					ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660นาโนเมตร				
	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.78	7.75	7.92	7.82	0.09	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00
1	8.52	8.52	8.56	8.54	0.02	0.05	0.06	0.07	0.06	0.01
2	9.00	8.94	8.97	8.97	0.03	0.21	0.25	0.24	0.23	0.02
3	9.95	10.15	9.97	10.02	0.11	0.83	0.77	0.79	0.80	0.03
4	9.88	9.43	9.73	9.68	0.23	1.42	1.23	1.41	1.35	0.11
5	9.60	9.94	9.87	9.80	0.18	1.70	1.58	1.60	1.63	0.07
6	10.16	10.18	10.12	10.15	0.03	2.23	2.17	2.20	2.20	0.03
7	10.16	10.16	10.15	10.16	0.01	2.72	2.27	2.44	2.48	0.23
8	10.28	10.31	10.30	10.30	0.02	2.59	2.96	2.99	2.85	0.22
9	10.54	10.52	10.82	10.63	0.17	2.86	2.91	2.90	2.89	0.03
10	9.94	9.99	9.97	9.96	0.02	3.13	2.77	2.90	2.93	0.18
11	10.43	10.30	10.43	10.38	0.07	2.99	2.99	2.97	2.98	0.01
12	10.52	10.12	10.12	10.26	0.23	3.52	3.07	3.00	3.20	0.28
13	10.67	10.67	10.60	10.65	0.04	3.62	3.55	3.51	3.56	0.05
14	10.67	10.64	10.30	10.54	0.20	3.53	3.58	3.42	3.51	0.08

ตารางที่ ค6 การศึกษาการเจริญของ *Rhodopseudomonas palustris* P7

วันที่	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต log CFU/mL					ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660นาโนเมตร				
	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD	I	II	III	ค่าเฉลี่ย	SD
0	7.30	7.37	7.37	7.35	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.00
1	7.52	7.52	7.52	7.52	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00
2	7.52	7.43	7.78	7.58	0.18	0.30	0.29	0.29	0.29	0.00
3	7.73	7.75	7.70	7.73	0.03	0.30	0.33	0.32	0.32	0.02
4	8.75	8.88	8.99	8.87	0.12	0.31	0.38	0.34	0.34	0.04
5	9.00	9.37	9.56	9.31	0.29	0.42	0.45	0.48	0.45	0.03
6	9.37	9.48	9.37	9.40	0.06	0.65	0.60	0.64	0.63	0.03
7	9.30	9.30	9.43	9.34	0.07	0.75	0.77	0.74	0.75	0.02
8	9.48	9.60	9.30	9.46	0.15	0.90	0.81	0.85	0.85	0.04
9	9.67	9.82	9.73	9.74	0.08	1.22	1.23	1.23	1.22	0.00
10	10.43	10.43	10.30	10.38	0.07	2.60	2.58	2.58	2.59	0.01
11	10.73	10.12	10.12	10.32	0.35	3.13	3.08	3.50	3.24	0.23
12	10.43	10.30	10.43	10.38	0.07	3.29	2.96	2.96	3.07	0.19
13	10.43	10.56	10.48	10.49	0.07	3.22	3.06	3.19	3.16	0.09
14	10.67	10.64	10.30	10.54	0.20	2.91	2.96	3.28	3.05	0.20

ภาคผนวก ง

ข้อมูลดิบต่างๆ สำหรับการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญและผลิตสารสีของ
แบคทีเรียที่คัดเลือก

ตารางที่ ง1 เปรียบเทียบราคาของอาหารเลี้ยงเชื้อสูตรดั้งเดิม สูตรที่ได้รับการแปรผัน และสูตรที่ผสมกับน้ำเสีย 40% โดยปริมาตร

สาร	ราคาสาร (บาท/กรัม)	อาหารก่อนการ แปรผัน (บาท)	อาหารหลังการ แปรผัน (บาท)	ผสมด้วยน้ำเสีย 40% โดย ปริมาตร (บาท)
กรดมาลิก	1.2	5	10	0
สารสกัดจากยีสต์	2.8	3	11	6.72
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.95	0.2	0.4	0.23
K ₂ HPO ₄	1.63	1.2	1.2	0.73
KH ₂ PO ₄	1.63	1.4	1.4	0.83
NH ₄ Cl	0.68	0.7	0.7	0.41
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	10.2	0.01	0.01	0.0046
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	1.09	0.0003	0.0003	0.00016
EDTA	2	0.004	0.004	0.0024
กรดบอริก	2	0.006	0.006	0.0033
MnSO ₄ ·4H ₂ O	1.36	0.003	0.003	0.0017
CuCl ₂ ·2H ₂ O	2.72	0.002	0.002	0.0012
FeSO ₄ ·7H ₂ O	1.43	0.017	0.029	0.017
Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	5	0.0002	0.0002	0.00012
รวม		11.12	24.52	8.95

การคำนวณค่าไฟ

สามารถคำนวณได้จากการนำปริมาณยูนิตไฟที่ใช้คูณกับราคาไฟฟ้าต่อหน่วย ซึ่ง ไฟฟ้า 1 ยูนิต มีค่าเท่ากับ ปริมาณไฟที่เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาด 1000 วัตต์ ใช้งานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

จำนวนยูนิต = (กำลังไฟ (วัตต์) × จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า / 1000) × จำนวนชั่วโมงที่ใช้ใน 1 วัน
 ถ้าใช้ความเข้มแสง 2000 ลักซ์ ในการเลี้ยงเชื้อ ต้องใช้หลอดไส้ กำลังไฟ 60 วัตต์ จำนวน 2 หลอดต่อพื้นที่ 30 × 30 ตารางเซนติเมตร จะใช้จำนวนหน่วยไฟเท่ากับ $(60 \times 2 / 1000) \times 24 = 2.88$ หน่วย หรือเดือนละ $30 \times 2.88 = 86.4$ หน่วย

ขณะที่ ใช้ความเข้มแสง 4000 ลักซ์ ในการเลี้ยง ต้องใช้หลอดไส้ กำลังไฟ 60 วัตต์ จำนวน 3 หลอดต่อพื้นที่ 30 × 30 ตารางเซนติเมตร จะใช้จำนวนหน่วยไฟเท่ากับ $(60 \times 3 / 1000) \times 24 = 4.32$ หน่วย หรือเดือนละ $30 \times 4.32 = 129.6$ หน่วย

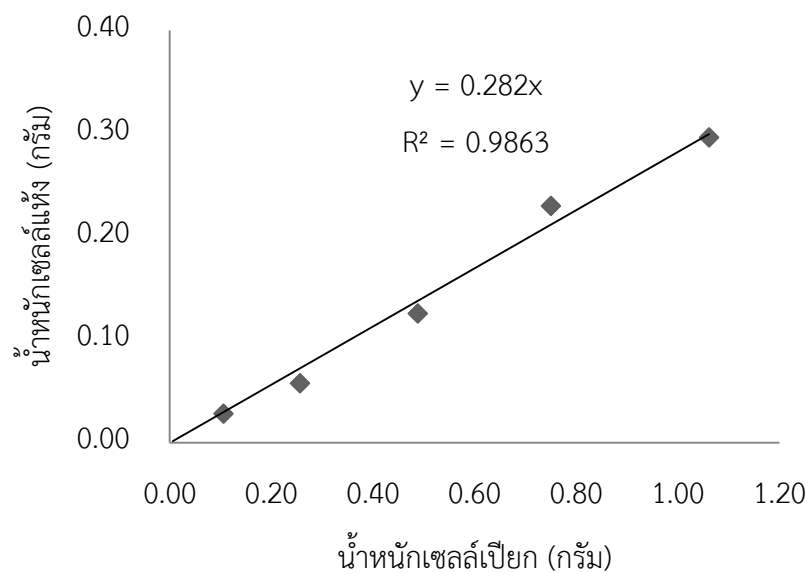
เมื่อทราบจำนวนยูนิตแล้วสามารถคำนวณค่าไฟฟ้าได้โดยเปรียบเทียบกับอัตราค่าไฟฟ้าได้ดังนี้ ตารางที่ ๓2 ประเภท1.1 การใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วยต่อเดือน (ข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง)

จำนวนหน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)
5 หน่วย (หน่วยที่ 1-5)	0.00
10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 6-15)	1.3576
10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่16-25)	1.5445
10 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 26-35)	1.7968
65 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 36-100)	2.1800
50 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 101-150)	2.2734
250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151-400)	2.7781
เกินกว่า 400 หน่วย (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป)	2.9780

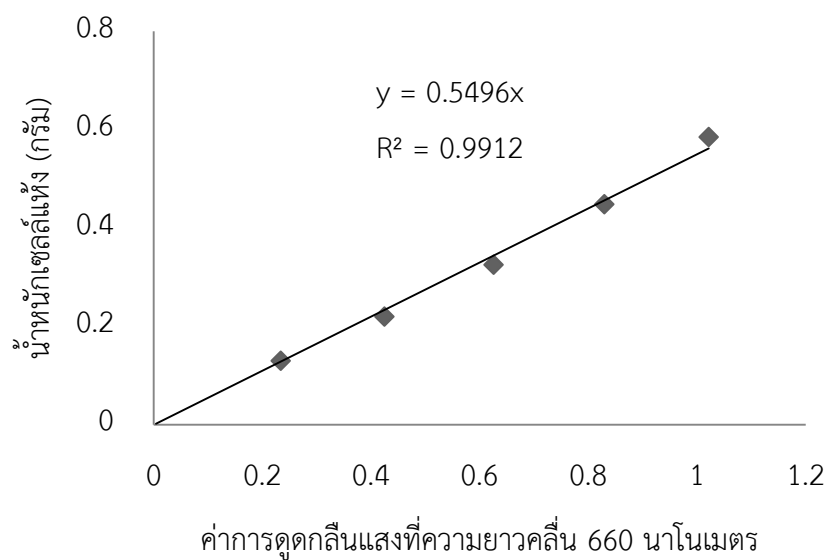
ดังนั้น การใช้ความเข้มแสง 2000 ลักซ์ ต้องจ่ายค่าไฟเท่ากับ $2.18 \times 86.4 = 188.35$ บาทต่อเดือน ในขณะที่ การใช้ความเข้มแสง 4000 ลักซ์ ต้องจ่ายค่าไฟสูงถึง $2.2734 \times 129.6 = 294.63$ บาทต่อเดือน ซึ่งมากกว่าประมาณ 0.78 เท่า

กราฟมาตรฐาน

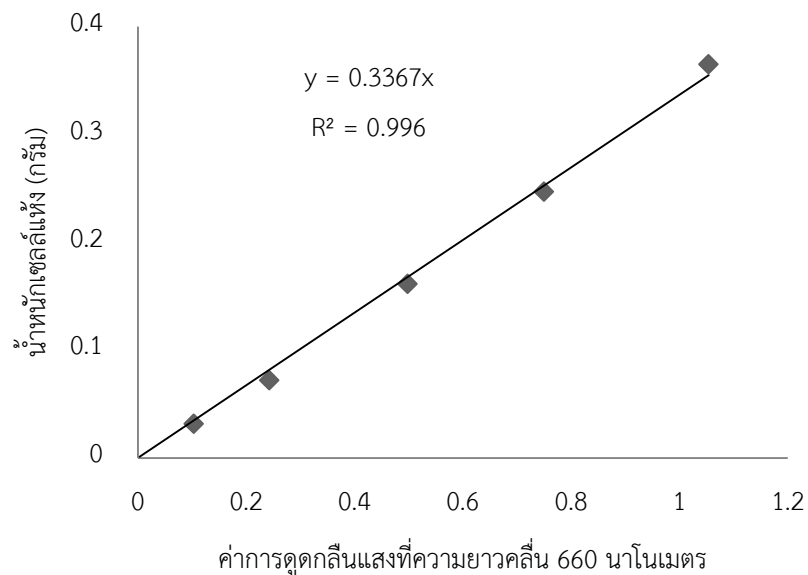
รูปที่ ง1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์เปียกและน้ำหนักเซลล์แห้งของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1



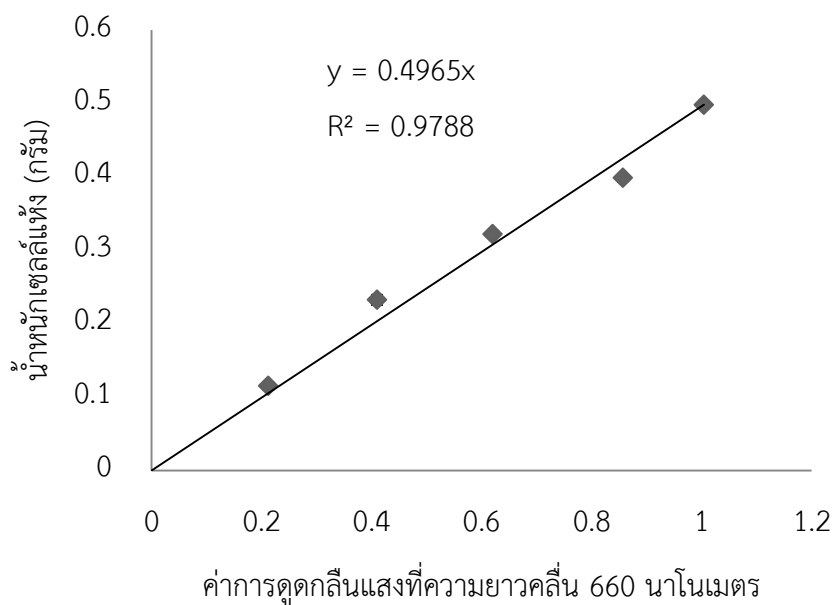
รูปที่ ง2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์เปียกและน้ำหนักเซลล์แห้งของแบคทีเรียสายพันธุ์ W7



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเซลล์แห้งและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรของแบคทีเรียสายพันธุ์ W7



ตารางที่ 3 การแปรผันปริมาตรกรดมาลิก สารสกัดจากยีสต์ และเกลือในอาหารเหลว RCVB ของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ภายหลังจากเลี้ยงเป็นเวลา 8 วัน

ปัจจัยที่แปรผัน	ปริมาณที่แปรผัน (โดยนำหนักต่อปริมาตร)	น้ำหนักเซลล์แห้ง (กรัมต่อลิตร)	การดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (log CFU/mL)
กรดมาลิก	4 g/L	0.25±0.00	0.44±0.03	8.49±0.03
	8 g/L	0.35±0.01	0.64±0.03	8.65±0.20
	16 g/L	0.36±0.01	0.68±0.03	8.81±0.10
สารสกัดจากยีสต์	2 g/L	1.80±0.03	3.45±0.04	9.50±0.18
	4 g/L	2.75±0.12	4.56±0.33	9.19±0.02
	8 g/L	2.83±0.17	4.63±0.27	9.86±0.14
เกลือ	10 mg/L	3.05±0.05	5.47±0.31	9.60±0.00
	20 mg/L	3.29±0.03	6.53±0.06	9.36±0.10
	40 mg/L	2.73±0.10	5.37±0.43	9.30±0.00

ตารางที่ 4 การแปรผันปริมาตรกรดมาลิก สารสกัดจากยีสต์ และเกลือในอาหารเหลว RCVB ของแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 ภายหลังจากเลี้ยงเป็นเวลา 8 วัน

ปัจจัยที่แปรผัน	ปริมาณที่แปรผัน	น้ำหนักเซลล์แห้ง	การดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (log CFU/mL)
กรดมาลิก	4 g/L	0.29±0.00	0.55±0.03	8.73±0.13
	8 g/L	0.36±0.02	0.68±0.03	8.97±0.06
	16 g/L	0.36±0.01	0.73±0.06	8.75±0.11
สารสกัดจากยีสต์	2 g/L	1.82±0.12	3.64±0.09	9.56±0.04
	4 g/L	2.37±0.12	5.00±0.46	9.22±0.09
	8 g/L	3.09±0.13	6.96±0.18	8.91±0.16
เกลือ	10 mg/L	2.81±0.23	5.64±0.15	9.46±0.15
	20 mg/L	3.34±0.15	6.53±0.50	9.75±0.05
	40 mg/L	2.90±0.14	5.88±0.56	9.67±0.06

ตารางที่ ๓5 การแปรผันปริมาณแมกนีเซียมในอาหารเหลว RCVB ชนิดของหลอดไฟ ความเข้มของแสง และการกวนผสม ต่อการเจริญและการผลิตสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ภายหลังการเลี้ยงเป็นเวลา 8 วัน

ปัจจัยที่แปรผัน	ปริมาณ/ชนิดที่แปรผัน	น้ำหนักเซลล์แห้ง	การดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (log CFU/mL)	ปริมาณสารสี	
					แคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์)	แบคทีอโรคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์)
แมกนีเซียม	100 mg/L	1.30±0.16	2.12±0.28	8.56±0.11	1.40±0.22	2.24±0.33
	200 mg/L	3.03±0.07	6.96±0.32	9.49±0.07	1.37±0.05	2.80±0.16
	400 mg/L	3.24±0.21	7.43±0.38	9.52±0.04	1.37±0.04	3.36±0.14
ชนิดของหลอดไฟ	หลอดไส้	3.48±0.10	6.74±0.23	9.63±0.17	1.39±0.03	3.40±0.23
	LED	0.17±0.11	0.34±0.03	6.60±0.15	1.15±0.04	3.34±0.17
	CFL	0.23±0.02	0.43±0.03	6.40±0.11	1.12±0.06	3.39±0.22
ความเข้มแสง	2000 ลักซ์	3.46±0.24	6.83±0.60	7.97±0.06	1.31±0.09	3.70±0.25
	4000 ลักซ์	3.84±0.05	7.60±0.01	8.08±0.11	1.76±0.03	3.57±0.28
การกวนผสม	ไม่มี	3.80±0.03	7.57±0.06	8.86±0.07	1.67±0.06	3.72±0.10
	มี	3.89±0.01	8.32±0.37	8.69±0.09	1.69±0.06	3.97±0.13

ตารางที่ ๖ การแปรผันปริมาณแมกนีเซียมในอาหารเหลว RCVB ชนิดของหลอดไฟ ความเข้มของแสง และการกวนผสม ต่อการเจริญและการผลิตสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 ภายหลังจากเลี้ยงเป็นเวลา 8 วัน

ปัจจัยที่แปรผัน	ปริมาณ/ชนิดที่แปรผัน	น้ำหนักเซลล์แห้ง	การดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (log CFU/mL)	ปริมาณสารสี	
					แคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์)	แบคเทอริโอคลอโรฟิลล์ (มิลลิกรัมต่อกรัมเซลล์)
แมกนีเซียม	100 mg/L	2.99±0.14	6.40±0.10	8.66±0.15	0.55±0.02	5.72±0.37
	200 mg/L	3.32±0.05	6.66±0.12	9.48±0.05	0.96±0.03	6.71±0.09
	400 mg/L	3.58±0.13	6.87±0.06	9.56±0.07	0.97±0.09	6.99±0.15
ชนิดของหลอดไฟ	หลอดไส้	3.77±0.11	7.16±0.01	9.26±0.00	1.04±0.04	6.93±0.21
	LED	0.58±0.13	1.18±0.02	8.75±0.13	0.65±0.02	6.06±0.04
	CFL	0.38±0.06	0.73±0.03	7.64±0.10	0.59±0.02	6.06±0.10
ความเข้มแสง	2000 ลักซ์	3.80±0.06	7.45±0.19	9.76±0.03	1.03±0.07	6.84±0.06
	4000 ลักซ์	3.83±0.06	7.62±0.14	9.69±0.07	1.21±0.02	6.96±0.16
การกวนผสม	ไม่มี	3.83±0.06	8.14±0.62	9.69±0.18	1.23±0.04	6.85±0.05
	มี	3.92±0.03	8.60±0.15	9.69±0.07	1.17±0.04	7.10±0.07

ตารางที่ ๗7 การเพิ่มปริมาณอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงต่อการเจริญและการผลิตสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ภายหลังจากเลี้ยงเป็นเวลา 8 วัน

สายพันธุ์	ปริมาตรอาหาร (มิลลิลิตร)	น้ำหนักเซลล์แห้ง	การดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร	จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (log CFU/mL)	ปริมาณสารสี	
					แคโรทีนอยด์ (mg/g CDW)	แบคเทอริโอคลอโรฟิลล์ (mg/g CDW)
W1	25	3.89±0.01	8.14±0.62	8.86±0.07	1.72 ±0.05	3.97 ±0.13
	2230	3.79±0.08	8.60±0.15	8.56±0.31	1.74 ±0.03	3.99 ±0.15
W7	25	3.83±0.06	8.14±0.62	9.69±0.18	1.10 ±0.20	7.07 ±0.07
	2230	3.92±0.03	8.60±0.15	9.69±0.07	1.17 ±0.13	6.95 ±0.05

ตารางที่ ๘ การเจริญและการผลิตสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เมื่อทดลองเลี้ยงในอาหารที่มีน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่เป็นองค์ประกอบ เป็นเวลา 8 วัน

	น้ำหนัก เซลล์แห้ง	จำนวนเซลล์ ที่มีชีวิต (log CFU/mL)	การลดค่า COD (%)	ปริมาณสารสี	
				แคโรที นอยด์(mg/g CDW)	แบคทีเรียโ คลอโรฟิลล์ (mg/g CDW)
RCVB	3.80 ±0.03	8.86 ±0.07	-	1.67 ±0.06	3.72 ±0.10
40% WW	2.84 ±0.06	7.05 ±0.06	84.35 ±2.46	1.39 ±0.04	3.74 ±0.11
40% SWW	2.65 ±0.03	8.02 ±0.06	69.35 ±0.73	1.16 ±0.13	3.71 ±0.09
100% WW	2.92 ±0.02	7.13 ±0.04	74.55 ±0.73	1.02 ±0.14	2.85 ±0.27
100% SWW	2.13 ±0.12	8.00 ±0.07	67.79 ±1.52	0.74 ±0.06	2.30 ±0.18

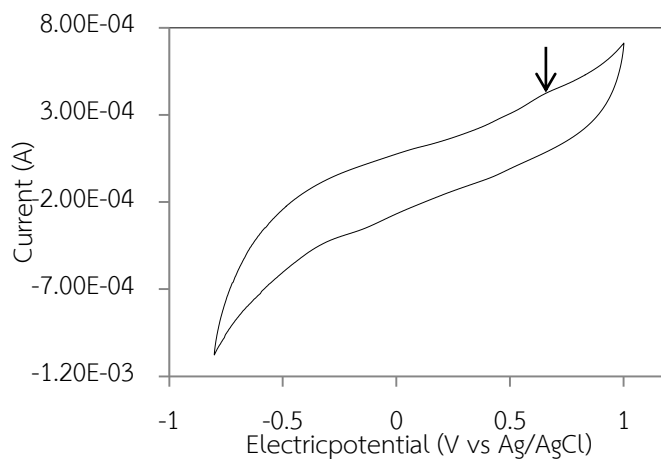
ตารางที่ 9 การเจริญและการผลิตสารสีของแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 เมื่อทดลองเลี้ยงในอาหารที่มีน้ำเสียจากโรงงานเบเกอร์รี่เป็นองค์ประกอบ เป็นเวลา 8 วัน

	น้ำหนักเซลล์ แห้ง	จำนวนเซลล์ ที่มีชีวิต (log CFU/mL)	การลดค่า COD (%)	ปริมาณสารสี	
				แคโรที นอยด์ (mg/g CDW)	แบคเทอริโอ คลอโรฟิลล์ (mg/g CDW)
RCVB	3.83 ±0.06	9.69±0.18	-	1.23±0.04	6.85±0.05
40% WW	3.55 ±0.11	7.17 ±0.06	87.83 ±0.82	1.17 ±0.13	6.95 ±0.05
40% SWW	3.31 ±0.01	8.70 ±0.17	71.95 ±2.94	1.17 ±0.13	6.95 ±0.05
100% WW	3.12 ±0.05	7.44 ±0.03	78.70 ±1.47	1.17 ±0.13	6.95 ±0.05
100% SWW	2.86 ±0.04	8.40 ±0.17	69.13 ±1.14	1.17 ±0.13	6.95 ±0.05

ภาคผนวก จ

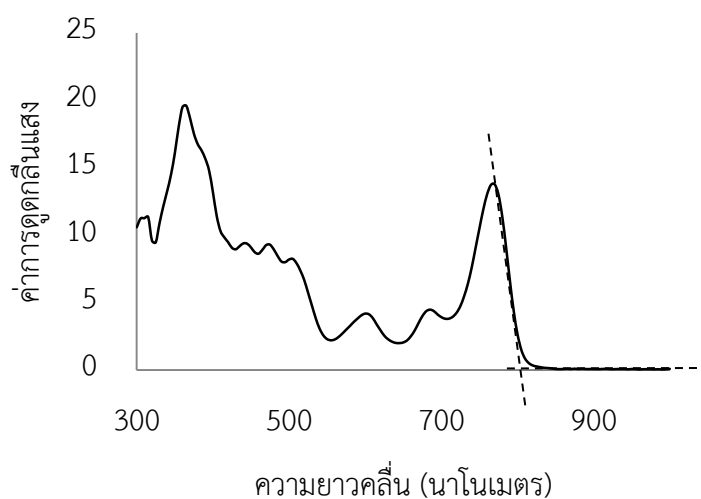
ข้อมูลดิบต่างๆ สำหรับการสกัดแยกสารสีและศึกษาสมบัติของสารสีที่สกัดแยกได้

การคำนวณระดับพลังงาน HOMO-LUMO และช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารสีจาก
แคโทดรีดิวสายพันธุ์ W1



สารสีจากแคโทดรีดิวสายพันธุ์ W1 มีตำแหน่งพีคการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 0.63 โวลต์ นำมาเข้าสู่
สูตรคำนวณจะได้ระดับพลังงานดังนี้ $\text{HOMO} = -(4.40 + 0.63) = -5.03 \text{ eV}$
ระดับพลังงาน LUMO สามารถประมาณได้จากสมการ $\text{HOMO-LUMO} = \text{ช่องว่างระหว่าง}$
แถบพลังงาน (E_g)

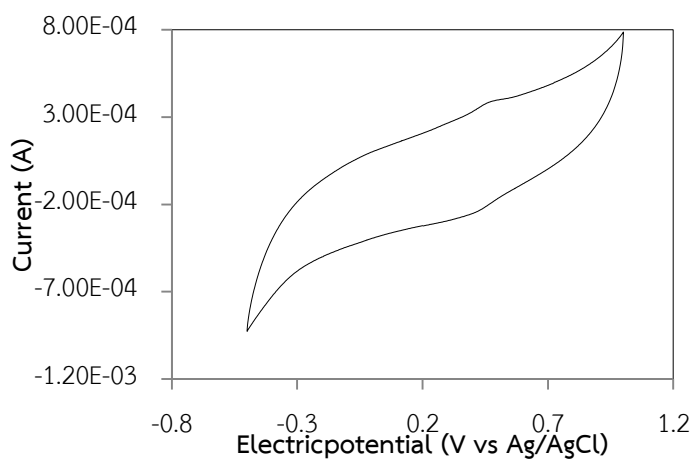
ซึ่งค่า E_g สามารถหาได้จากสูตร $E_g (\text{eV}) = 1240/$



$$E_g = 1240/815 = 1.52$$

$$\text{LUMO} = -3.51$$

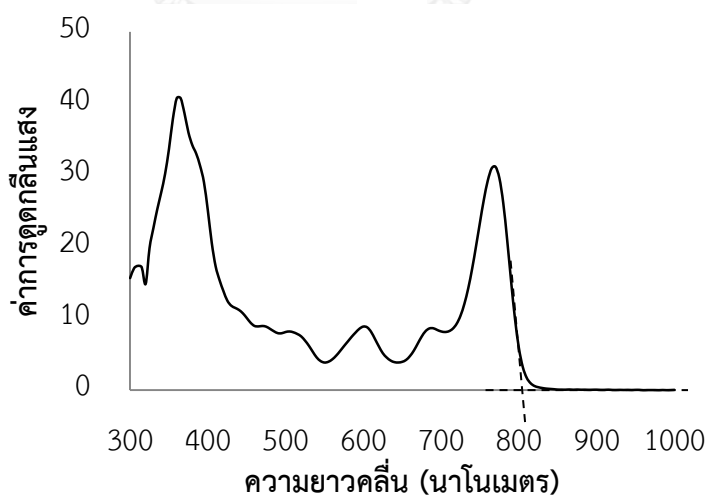
การคำนวณระดับพลังงาน HOMO-LUMO และช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารสีจาก
 แบคทีเรียสายพันธุ์ W7



สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W7 มีตำแหน่งพีคการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ 0.42 โวลต์ นำมาเข้า
 สูตรคำนวณจะได้ระดับพลังงานดังนี้ $\text{HOMO} = -(4.40 + 0.63) = -4.82 \text{ eV}$

ระดับพลังงาน LUMO สามารถประมาณได้จากสมการ $\text{HOMO-LUMO} = \text{ช่องว่างระหว่าง}$
 แถบพลังงาน (E_g)

ซึ่งค่า E_g สามารถหาได้จากสูตร $E_g (\text{eV}) = 1240/\lambda(\text{nm})$



$$E_g = 1240/815 = 1.52$$

$$\text{LUMO} = -3.30$$

ตารางที่ ๑1 ปริมาณสารสีแคโรทีนอยด์ที่ได้จากชุดทดลองต่างๆ ในงานวิจัย

	ชุดทดลอง	ชุดทดลอง			แคโรทีนอยด์(mg/g CDW)
		I	II	III	
แมกนีเซียม	20 mg/L	0.56	0.53	0.57	0.55 ±0.02
	100 mg/L	0.93	0.99	0.96	0.96 ±0.03
	200 mg/L	0.99	1.05	0.87	0.97 ±0.09
ชนิดของหลอดไฟ	หลอดไส้	1.01	1.08	1.03	1.04 ±0.04
	LED	0.65	0.67	0.62	0.65 ±0.02
	CFL	0.61	0.58	0.57	0.59 ±0.02
ความเข้มแสง	2000 ลักซ์	1.05	1.08	0.94	1.03 ±0.07
	4000 ลักซ์	1.23	1.22	1.18	1.21 ±0.02
การกวนผสม	0	1.26	1.25	1.19	1.23 ±0.04
	120	1.19	1.12	1.18	1.17 ±0.04
ปริมาตร	25	0.87	1.22	1.22	1.10 ±0.20
	2230	1.22	1.26	1.02	1.17 ±0.13
น้ำเสีย	W1 40%	1.30	1.23	1.26	1.17 ±0.13
	W1 40% sterile	0.65	0.95	0.86	1.17 ±0.13
	W1 100%	0.88	0.86	0.90	1.17 ±0.13
	W1 100% sterile	0.55	0.87	0.79	1.17 ±0.13

ตารางที่ ๑1 ปริมาณสารสีแบคทีเรียโคลโรฟิลล์ที่ได้จากชุดทดลองต่างๆ ในงานวิจัย

	ชุดทดลอง	ชุดทดลอง			แบคทีเรีย โคลโรฟิลล์ (mg/g CDW)
		I	II	III	
แมกนีเซียม	20 mg/L	6.08	5.75	5.34	5.72 ±0.37
	100 mg/L	6.61	6.79	6.72	6.71 ±0.09
	200 mg/L	7.15	6.96	6.85	6.99 ±0.15
ชนิดของ หลอดไฟ	หลอดไส้	6.76	6.87	7.17	6.93 ±0.21
	LED	6.07	6.01	6.09	6.06 ±0.04
	CFL	6.00	6.18	6.01	6.06 ±0.10
ความเข้ม แสง	2000 ลักซ์	6.78	6.85	6.89	6.84 ±0.06
	4000 ลักซ์	7.14	6.86	6.87	6.96 ±0.16
การกวน ผสม	0	6.79	6.87	6.89	6.85 ±0.05
	120	7.03	7.09	7.17	7.10 ±0.07
ปริมาตร	25	6.99	7.13	7.08	7.07 ±0.07
	2230	7.01	6.94	6.91	6.95 ±0.05
น้ำเสีย	W1 40%	6.28	6.04	6.10	6.95 ±0.05
	W1 40% sterile	6.78	6.60	6.42	6.95 ±0.05
	W1 100%	4.56	5.19	4.91	6.95 ±0.05
	W1 100% sterile	4.71	4.82	5.08	6.95 ±0.05

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบต่างๆ สำหรับการประกอบเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง
และการศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพ

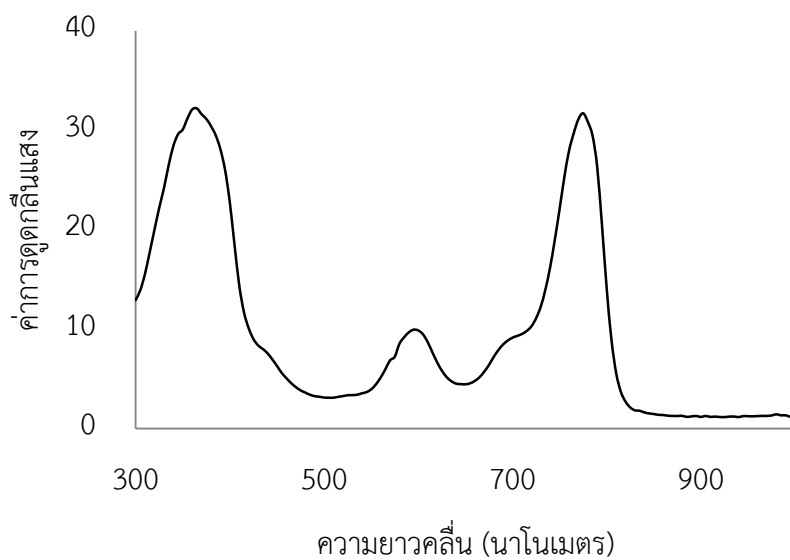
ตารางที่ ข1 ประสิทธิภาพเบื้องต้นของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียเป็นสีย้อมไวแสง

ชุดทดลอง.	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
I	0.04	396	18196	583663	42	0.004
II	0.07	162	5257	941163	35	0.004
III	0.04	366	26190	6263497	38	0.004

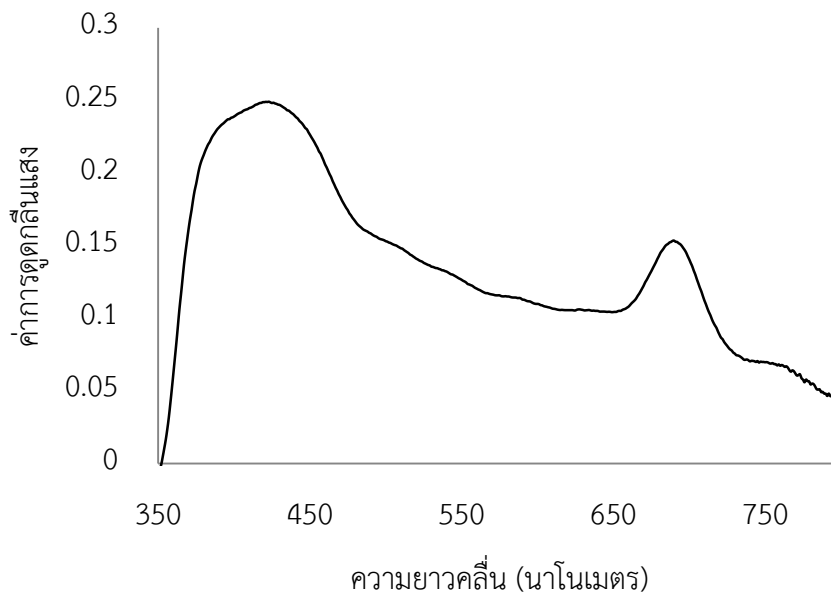
ตารางที่ ข2 การแปรผันชนิดและองค์ประกอบของอิเล็กโทรไลต์

ชุดทดลอง	ชุด	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
NaI	I	0.05	380	36360	1114635	39	0.008
	II	0.07	222	10736	2241509	35	0.005
	III	0.07	162	5257	941163	35	0.004
HI-30	I	0.05	222	13408	4345338	32	0.004
	II	0.07	162	5257	941163	35	0.004
	III	0.05	222	13408	4345338	32	0.004
Co-complex	I	0.04	95	3483	479529	31	0.001
	II	0.05	91	6737	479103	32	0.001
	III	0.026	98	3366	3468706	16	0.000
NaI-gel	I	0.02	308	60289	2193055	46	0.004
	II	0.02	314	12528	4928713	44	0.004
	III	0.04	73	7180	2524732	26	0.001

หาปริมาณหาสีจากค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้ค่า Extinction coefficients

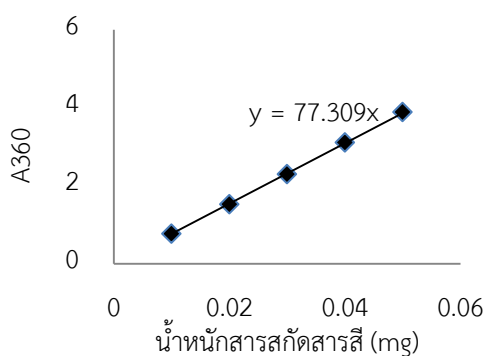


ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 360 และ 770 นาโนเมตร

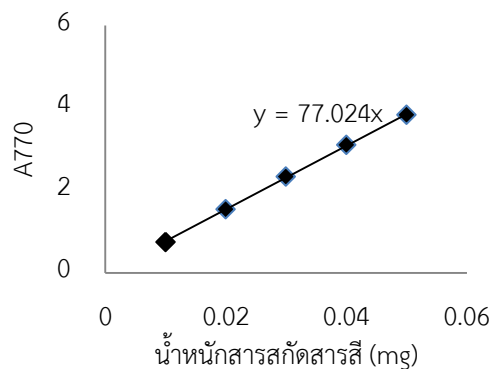


ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดด้วยสารละลายเอทานอล บนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์หนา 7.5 ไมครอน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 425 และ 690 นาโนเมตร

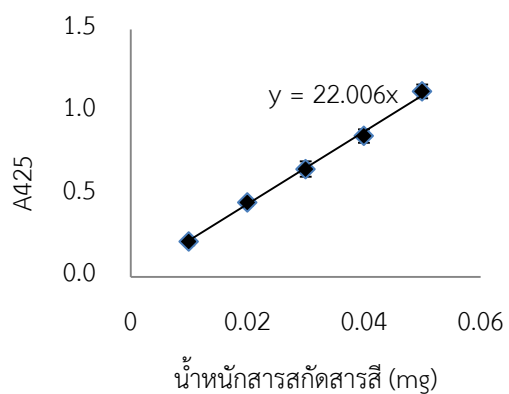
ก)



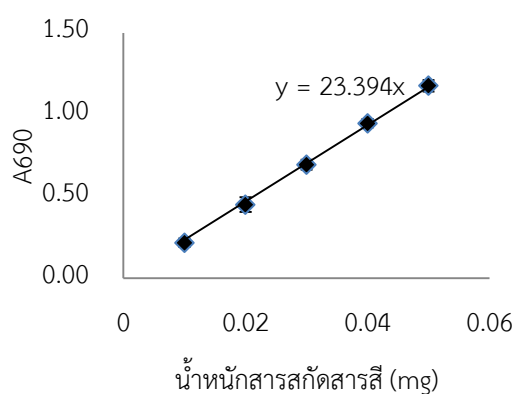
ข)



ค)



ง)



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรสสกัดของสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ก) ความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร ข) ความยาวคลื่น 770 นาโนเมตร

จากกราฟ จะได้ค่า Extinction coefficients ของสารสกัดสารสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยคำนวณได้จากความชันของกราฟ ดังนี้

$$\mathcal{E}_{360} = 77.31 \text{ l mg}^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

$$\mathcal{E}_{770} = 77.02 \text{ l mg}^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

$$\mathcal{E}_{425} = 22.01 \text{ l mg}^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

$$\mathcal{E}_{690} = 23.39 \text{ l mg}^{-1} \text{ cm}^{-1}$$

จากสมการ $A_\lambda = \mathcal{E} c L = \mathcal{E} c$

เมื่อ L คือ ความกว้างของคิวเวทที่ใช้ในการวัด (1 cm)

จะได้ $A / \mathcal{E} = \text{molar concentration}$

การคำนวณปริมาณสี้อมที่เกาะบนผิวสารกึ่งตัวนำ

ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หนา $7.5 \mu\text{m}$ ($15 \times 10^{-3} \text{ cm}$) เป็นสารกึ่งตัวนำ พื้นที่รับแสง $1 \times 1 \text{ cm}$

ความเป็นพรุนของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบอะมอร์ฟัส เท่ากับ 0.69

ดังนั้นปริมาตรทั้งหมดของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ $4.42 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$

ขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 อนุภาค มีขนาด 20 นาโนเมตร พื้นที่ผิว $6.28 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$
ปริมาตร $3.14 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$

ดังนั้น พื้นที่ผิวทั้งหมดของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ 1000 cm^2

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณสารสีจากค่าการดูดกลืนแสง:

วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 nm ได้ 0.18

ดังนั้นมีปริมาณสารสี $0.18/22.01 = 8.18 \times 10^{-3} \text{ mg}$ ต่อพื้นที่ 1000 cm^2 หรือ $8.18 \times 10^{-6} \text{ mg/cm}^2$



ตารางที่ ข3.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร ของสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดด้วยเอทานอลที่เกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายหลังจากปรับสภาพพื้นผิว ด้วยกรด ที่ความเข้มข้นต่างๆ

	ชุดทดลอง		ค่าเฉลี่ย	ปริมาณสารสีที่เกาะบน พื้นผิวของ สารกึ่งตัวนำ ($\times 10^{-6}$ mg/cm ²)
	I	II		
ไม่ปรับสภาพผิว	0.18	0.19	0.19 \pm 0.01	8.18
กรดไนตริก 0.1 M	0.22	0.23	0.23 \pm 0.01	10.00
กรดไนตริก 0.5 M	0.18	0.17	0.18 \pm 0.01	8.18
กรดไนตริก 1 M	0.25	0.24	0.25 \pm 0.01	11.36
กรดไนตริก 2 M	0.22	0.23	0.23 \pm 0.01	10.00
กรดซัลฟูริก 0.1 M	0.22	0.22	0.22 \pm 0.00	10.00
กรดซัลฟูริก 0.5 M	0.24	0.25	0.25 \pm 0.01	10.90
กรดซัลฟูริก 1 M	0.22	0.21	0.22 \pm 0.01	10.00
กรดซัลฟูริก 2 M	0.2	0.19	0.20 \pm 0.01	9.09

ตารางที่ ช3.2 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่มีสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ภายหลังจากการปรับสภาพผิวด้วยกรดซิตริกความเข้มข้น 0.5 M และกรดไนตริก 1 M

	ชุด	Jsc	Voc	Rshunt	Rseries	FF (%)	PCE
	ทดลอง	(mA/cm ²)	(mV)	(Ohm/cm ²)	(Ohm/cm ²)		(%)
กรดซิตริก 0.5 M	I	0.06	498	37905	953564	43	0.014
	II	0.07	499	36267	1092700	35	0.011
	III	0.07	503	34990	0	40	0.013
กรดไนตริก 1 M	I	0.17	40	471	0	21	0.001
	II	0.17	40	467	0	21	0.001
	III	0.16	41	556	0	22	0.001
CT	I	0.05	380	36360	1114635	39	0.008
	II	0.07	222	10736	2241509	35	0.005
	III	0.07	162	5257	941163	35	0.004

ตารางที่ ข4.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร ของสารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดด้วยเอทานอลที่เกาะบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายหลังจากแปรผันความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์

จำนวน ชั้น	ความ หนาฟิล์ม (μm)	ชุด ทดลอง	Jsc (mA/cm^2)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm^2)	Rseries (Ohm/cm^2)	FF (%)	PCE (%)
3	7.5	I	0.14	362	6190	2472996	22	0.011
		II	0.16	297	3582	1728456	23	0.011
		III	0.05	245	10902	1382651	44	0.010
4	10	I	0.15	414	5685	2112721	24	0.014
		II	0.14	301	8788	1231035	35	0.014
		III	0.04	355	10558	5705740	34	0.004
5	13	I	0.15	426	23000	596552	43	0.028
		II	0.16	462	8731	1056793	29	0.022
		III	0.12	415	14692	1039028	34	0.020
6	15	I	0.19	478	44616	277367	49	0.044
		II	0.15	515	32329	118358	55	0.042
		III	0.16	447	17537	581344	42	0.030

ตารางที่ ๕5 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง ที่สกัดแยกด้วยเอทานอล และอะซิโตนผสมเมทานอล ในอัตราส่วน 7:2 ปริมาตรต่อปริมาตร

ชุดทดลอง	จุด	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
เอทานอล	I	0.19	478	44616	277367	49	0.044
	II	0.15	515	32329	118358	55	0.042
	III	0.16	447	17537	581344	42	0.030
อะซิโตน: เมทานอล	I	0.16	542	54058	57643	61	0.054
	II	0.13	541	133275	124586	59	0.042
	III	0.148	559	208363	103864	61	0.051

ตารางที่ ช6 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 ที่สกัดแยกด้วยอะซิโตนผสมเมทานอล เมื่อแปรผันความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิวชีวภาพ

	Rep.	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	(%)
0.1 CMC	I	0.19	558	78179	28438	66	0.069
	II	0.15	559	208363	103864	61	0.051
	III	0.15	515	32329	118358	55	0.040
0.2 CMC	I	0.19	478	44616	277367	49	0.044
	II	0.15	551	46041	113279	59	0.048
	III	0.11	504	377094	79877	59	0.030
0.4 CMC	I	0.15	538	30488	592606	41	0.033
	II	0.11	504	377094	79877	59	0.031
	III	0.13	496	25350	150856	46	0.030
ไม่เติมสาร ลดแรงดึง ผิว	I	0.16	542	54058	57643	61	0.054
	II	0.06	493	23306	4000000	43	0.054
	III	0.16	447	17537	581344	42	0.030

ตารางที่ ๗7 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีสีย้อมจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 เป็นสีย้อมไวแสง เมื่อแปรผันชนิดของสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ

	ชุดทดลอง	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
TiO ₂	I	0.19	558	78179	28438	66	0.069
	II	0.15	559	208363	103864	61	0.051
	III	0.15	515	32329	118358	55	0.040
ZrO ₂	I	0.0004	0.27	1E+08	0	51	5.78E-08
	II	0.0034	1.47	1E+08	0	9	4.37E-07
	III	0.0004	0.27	1E+08	0	51	5.78E-08

ตารางที่ ช8 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1
แบคทีเรียสายพันธุ์ W7 และผสมกันระหว่างสารสีจาก W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1

	ชุดทดลอง	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
W1	I	0.19	558	78179	28438	66	0.069
	II	0.15	559	208363	103864	61	0.051
	III	0.15	515	32329	118358	55	0.040
W7	I	0.24	593	47363	227758	51	0.072
	II	0.26	586	35779	376619	45	0.069
	III	0.19	548	96582	33827	66	0.067
W1:W7(1:1)	I	0.60	560	28064	70069	57	0.192
	II	0.35	537	56323	82346	54	0.101
	III	0.55	568	63355	54506	61	0.191
	IV	0.39	572	39751	7648	64	0.144
	V	0.41	572	56922	8326	67	0.158

ตารางที่ ข9.1 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1 ก่อนการทดสอบความคงตัว

ชุดทดลอง	จุด	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
สารสีจาก แบคทีเรีย	I	0.24	540	112948	1441	66	0.09
	II	0.30	536	67374	1632	54	0.09
	III	0.09	479	452603	4723	68	0.03
N719	I	12.71	710	3576	61	59	5.29
	II	12.53	719	8651	58	61	5.49
	III	11.45	717	5907	60	63.00	5.15

ตารางที่ ข9.2 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารสีจากแบคทีเรียสายพันธุ์ W1 และ W7 ในอัตราส่วน 1:1 หลังการทดสอบความคงตัว

Samples	Rep.	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	Rshunt (Ohm/cm ²)	Rseries (Ohm/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
สารสีจาก แบคทีเรีย	I	0.00	0	100000000	0	Infinity	0.01
	II	0.10	482	26874	553000	43	0.02
	III	0.04	7	100000000	0	4	0.00
N719	I	8.56	678	4135	15201	56	3.26
	II	9.29	676	4611	11566	58	3.63
	III	9.25	681	3886	19229	50	3.18

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอาทิมา บุญญา เกิดวันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญา มหาบัณฑิต ที่ภาควิชาจุลชีววิทยา สาขาวิชาจุลชีววิทยาและเทคโนโลยีจุลินทรีย์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานการตีพิมพ์เผยแพร่

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้เข้าร่วมเสนอผลงานในการประชุมวิชาการประจำปีครั้งที่ 28 ของสมาคมเทคโนโลยีชีวภาพแห่งประเทศไทย (The 28th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International Conference) ระหว่างวันที่ 28-30 พฤศจิกายน 2559 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่ ในหัวข้อ Photocurrent production by photosynthesis pigments from *Rhodopseudomonas faecalis* W1 on nanoporous TiO₂ for dye-sensitized solar cells

เข้าร่วมเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ International Union Of Microbiological Societies 2017 Singapore ระหว่างวันที่ 17-21 กรกฎาคม 2560 ณ Sands Expo & Convention Centre ประเทศสิงคโปร์ ในหัวข้อ Optimization of carotenoid and bacteriochlorophyll production by *Rhodopseudomonas faecalis* W1 and *Rhodopseudomonas palustris* W7