



การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ  
ในท้องถิ่นภาคใต้ของประเทศไทย

The Study of Dye – Sensitized Solar Cells from Natural  
Products in Southern Thailand

โดย ชลธิรา แสงสุบัน  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจาก  
งบประมาณเงินแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2556  
มหาวิทยาลัยทักษิณ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย  
ขอนแก่น อาจารย์ ดร. วิเชียร แสงอรุณ และคุณสมาน แซ่โค้ว ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการ  
ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงรวมทั้งคำแนะนำที่ดียิ่งในเรื่องการศึกษาและการทำ  
วิจัย ขอขอบคุณศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับการเอื้อเพื่อ  
อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์รวมให้ความอนุเคราะห์ทางด้านสถานที่ในการศึกษาวิจัย  
ขอขอบคุณคณะที่ปฏิบัติงานผู้ช่วยในการทำวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววงศ์ดี นางสาว  
ปราณี หนูทองแก้ว และ นางสาวกาญจนาทิมา กุลหมวก และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยทักษิณและคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ  
และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยทักษิณที่ให้การสนับสนุนเงินทุน  
วิจัยในโครงการวิจัยนี้

ชลธิรา แสงสุบัน  
หัวหน้าโครงการวิจัย

## บทคัดย่อ

**ชื่อโครงการวิจัย :** การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ  
ในท้องถิ่นภาคใต้ของประเทศไทย

**ผู้วิจัย :** นางสาวกาญจนา กุลหมวก นางสาวปราณี หนูทองแก้ว  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จอมภพ แววงศ์ดี และ ดร.ชลธิรา แสงสุบัน  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ  
อ. ปาพะยอม จ. พัทลุง 93110 โทรศัพท์ 074-693996

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติในท้องถิ่นภาคใต้ของประเทศไทยทั้งหมด 4 ประเภท จาก ใบไม้ เนื้อไม้ ผลไม้ และ ลัต์ร์ จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ ไม้จันทน์แดง ครั่ง เปลือกมังคุด ใบยอ ขมิ้น ลูกหว้า และใบสับปะรด ซึ่งเน้นถึงความหลากหลายของสีย้อมที่ใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ในการทดลองได้แบ่ง ออกเป็น 2 ตอนด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย ตอนที่ 1 ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจาก ครั่ง ไม้จันทน์แดง เปลือกมังคุด ด้วยวิธีการสกัดที่เหมาะสมสำหรับสีย้อมแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดง ซึ่งให้สารสีแดง เมื่อทำการสกัดสารโดยใช้ Acetone เป็นตัวทำละลาย ทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether และพบว่าค่าประสิทธิภาพที่วัด ได้มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 1.471 มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $7.832 \text{ mA/cm}^2$  ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.39 V และค่าฟิลแฟกเตอร์เท่ากับ 0.477 ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานและพัฒนาต่อไป การทดลองตอนที่ 2 ได้ทำการสกัดสีย้อมจาก ใบยอ ขมิ้น ลูกหว้า และใบสับปะรด อย่างละชนิด เพื่อนำไปพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมของใบยอ ขมิ้น ลูกหว้า และใบสับปะรด มีค่า

เท่ากับร้อยละ 0.238 0.206 0.522 และ 0.174 ตามลำดับ และพบว่าสีส้มที่ได้จากลูกหว่ามีค่าประสิทธิภาพสูงสุด เป็นผลเนื่องมาจากลูกหว่าให้สารสีม่วงที่ประกอบด้วยรงควัตถุแอนโทไซยานิน ในขณะที่สีส้มจากไม้จันทน์แดงที่ผสมกับสีส้ม ไบยอ ขมิ้น ลูกหว่า และใบสับปะรดอย่างละชนิด พบว่าเมื่อนำสีส้มจากไม้จันทน์แดงมาผสมกับใบสับปะรด ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีค่าสูงกว่าเดิม ซึ่งจากเดิมที่ไม่ผสมไม้จันทน์แดงให้ค่าประสิทธิภาพร้อยละ 0.174 เพิ่มเป็นร้อยละ 0.914

**คำสำคัญ** ครั่ง เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีส้มไวแสง ไบยอ เปลือกมังคุด ไม้จันทน์แดง ลูกหว่า

## Abstract

**Title:** The Study of Dye – Sensitized Solar Cells from Natural Products in Southern Thailand

**Author:** Miss Kantima Kunmuak Miss Pranee Nutongkaew Dr. Chontira Sangsubun Asst. Prof. Dr. Jompob Waewsak  
Department of Physics Faculty of Science Thaksin University  
Phatthalung 93110 Tel. 074693996

.....

The objective of this research is to study the dye sensitized solar cells (DSSC) from 4 different types of natural product in southern Thailand, i.e., wood, leaf, fruits and animal. The 7 selected products are of follows; Red Sandalwood, Lac Dye, Mangosteen Peel, Great Morinda, Tumeric, Jambolan Plum, and Pineapple Leaves. This research is classified into 2 parts. The first part is to study the preparation of dye sensitized solar cells from Red Sandalwood, Lac Dye, Mangosteen Peel using the optimum extraction method for each dye in order to maximize efficiency of solar cells. Results showed that DSSC from Red Sandalwood with extraction using acetone as solvent and was purified using dichloromethane and petroleum ether resulting red dye with maximum efficiency of 1.471%, current density of  $7.832 \text{ mA/cm}^2$ , voltage of 0.39 V, fill factor of 0.477. This kind of DSSC is suitable for further development. The second part is the extraction of dye from

Great Morinda, Turmeric, Jambolan Plum, and Pineapple Leaves. The efficiency of DSSC for Great Morinda, Turmeric, Jambolan Plum, and Pineapple Leaves was 0.238, 0.206, 0.522, and 0.174 respectively. The efficiency of DSSC from Jambolan Plum is the highest due to the anthocyanin pigment. The efficiency of mixed DSSC from Red Sandalwood and Great Morinda, Turmeric, Jambolan Plum, and Pineapple Leaves revealed that the DSSC prepared from the mixed Red Sandalwood and Pineapple Leaves could increase the maximum efficiency from 0.174% to 0.914%.

**Keywords:** Dye Sensitized Solar Cells; Red Sandalwood; Lac Dye; Mangosteen Peel; Great Morinda; Jambolan Plum

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	๒
บทคัดย่อภาษาไทย	๓
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๔
สารบัญ	๕
สารบัญภาพ	๖
สารบัญตาราง	๗
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	4
2.1.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	4
2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไว	9
2.2 ผลกระทบจากธรรมชาติที่ใช้เป็นตัวรับแสง	11
2.2.1 ครึ่ง	11
2.2.2 ไม้จันแดง	11
2.2.3 มังคุด	12
2.2.4 ใบยอ	12
2.2.5 สับปะรด	13
2.2.6 ลูกหว้า	13
2.2.7 ขมิ้น	14
2.3 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	15

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	23
3.1 สารเคมีและผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ	23
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	23
3.3 วิธีการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	24
3.3.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า	24
3.3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าลบ	25
3.3.3 เตรียมสีย้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ	27
3.3.4 เม็ดสีจากสีสังเคราะห์ (N 719)	34
3.3.5 การย้อมสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	35
3.3.6 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	38
3.4 ขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	39
3.4.1 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	40
3.5 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม	41
3.5.1 UV-visible spectroscopy	41
3.6 การหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากสีย้อมแบบคทีเรีย	42
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล</b>	43
4.1 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม	43
4.2 ค่าของการวัด ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อม	49
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	53
4.4 การวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์	61
4.5 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมครึ่ง และจันแดง	62
<b>บทที่ 5 อภิปรายผล สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	64
5.1 สรุปผลการทดลอง	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	67

	หน้า
ภาคผนวก ก ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรม UV Visible (บางตัวอย่าง)	70
ภาคผนวก ข ข้อมูลจากการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสี่ข้อมโนแสง จากเครื่อง Solar Simulator	75
ผลงานวิจัย	93

## สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียม : (a) อนุภาค, (b) รูโพลี และ (c) บรูคไคท์	6
2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	8
2.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	10
2.4 ครึ่ง	11
2.5 ไม้จันแดง	11
2.6 มังคุด	12
2.7 ใบยอ	12
2.8 ใบลับประรด	13
2.9 ลูกหว่า	13
2.10 ขมิ้น	14
3.1 กระจกนำไฟฟ้า	24
3.2 ขนาดของกระจกนำไฟฟ้า	25
3.3 อ่างน้ำความถี่สูง (Ultrasonic cleaner)	25
3.4 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้า	25
3.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ฟิล์ม	26
3.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าลบ	27
3.7 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 1	28
3.8 แสดงขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ (Purified)	29
3.9 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 2	29
3.10 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 3	30
3.11 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 4	32
3.12 สีย้อมจันแดงที่ทำการปรับค่า pH	33
3.13 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 5	34
3.14 เครื่อง Spin coating	35

รูป	หน้า
3.15 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าบวก (Counter electrode) วิธีที่ 1	36
3.16 Sucrose หลังการเผาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	37
3.17 กระจกน้ำไฟฟ้าสำหรับทำขั้วบวกหลังจากเผาที่บรรยากาศของ Ar	37
3.18 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าบวก (Counter Electrode) วิธีที่ 2	38
3.19 แสดงขั้นตอนการประกอบเซลล์	39
3.20 ส่วนประกอบของเครื่อง Spectrophotometer	42
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี้อมจากครั้งที่สกัดจาก Ethyl alcohol และ Acetone	45
4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี้อมจากครั้งที่สกัดจากอะซิโตนที่ pH 1.7 pH 3.0 pH 4.72 pH 7.0 และ pH 9.0 ตามลำดับ	45
4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี้อมจากไม้จันแดงที่สกัดจาก Ethyl alcohol acetone และ Acetonitrile	46
4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี้อมจากไม้จันแดงที่สกัดจาก Acetone ที่ค่า pH 1.3 pH 2.6 pH 4.8 pH 7.2 และ pH 9.8 ตามลำดับ	46
4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี้อมจากลูกหว่า ใบสับปะรด และใบยอ ที่สกัดจาก Ethyl alcohol	47
4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี้อมจากเปลือกมังคุดที่สกัดจาก Acetone	48
4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี้อมสังเคราะห์ Dye N 719	48
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสี้อมจาก ครั้งที่สกัดด้วย Acetone ethyl alcohol และ Acetonitrile	53
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสี้อมจาก ครั้งที่ค่า pH 1.7 pH 3.0 pH 4.72 pH 7.0 และ pH 9.0	54
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสี้อมจาก ไม้จันแดง ที่สกัดด้วย Acetone ethyl alcohol และ Acetonitrile	55
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสี้อมจาก ไม้จันแดง ที่ค่า pH 1.3 pH 2.6 pH 4.8 pH 7.2 และ pH 9.8	56
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสี้อมจาก ไม้จันแดง ครั้งที่ และเปลือกมังคุด ด้วยวิธีสกัดแบบบริสุทธิ์	57

รูป	หน้า
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดง โดยผสมกับ ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น	58
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจาก ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น	59
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยขี้วัวไฟฟ้าบวก จากการสังเคราะห์จากซูโครสที่อุณหภูมิต่าง ๆ และจากแพลทตินัม	60
4.16 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททานเนียมไดออกไซด์	61
4.17 โครงสร้างทางเคมีของ Laccic acids จากครั่ง	62
4.18 โครงสร้างทางเคมีของ (a) แซนทาลิน (b) แซนทารูบิน จากจันทน์แดง	63

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่ผ่านการวิจัยสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	20
4.1 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมแต่ละชนิด	43
4.2 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมจากไม้จันทน์แดง และครั้งที่ค่า pH ต่างๆ	44
4.3 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดง	49
4.4 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากครั้ง	49
4.5 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากเปลือกมังคุด สกัดด้วยวิธีทำบริสุทธิ์โดยใช้ Acetone และ Dichloromethane	50
4.6 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดง ปรับค่า pH สกัดจาก Acetone ด้วยวิธีทำบริสุทธิ์	50
4.7 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากครั้ง ปรับค่า pH สกัดจาก Acetone	51
4.8 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจาก ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น สกัดจาก Ethyl Alcohol	52
4.9 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดงโดยผสมกับ ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น ตามลำดับ	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานจากดวงอาทิตย์นับว่าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญซึ่งสามารถนำพลังงานมาประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เนื่องจากว่าพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมสามารถนำมาใช้งานได้ง่าย และมีจำนวนมากมายมหาศาล พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีอยู่โดยทั่วไปโดยเฉพาะในประเทศที่อยู่ในเขตร้อนเช่นเดียวกับประเทศไทย โดยทั่วไปการใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์อาจจำแนกได้สองด้านหลักๆ คือ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นหลักการสำคัญของเซลล์สุริยะหรือโซลาร์เซลล์ ซึ่งอาศัยวัสดุสารกึ่งตัวนำ อาทิเช่น ซิลิกอน และใช้ในการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

ในปี พ.ศ. 2497 แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียร์สัน (Pearson) ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาครั้งแรก โดยทั้ง 3 ท่าน ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อ พี – เอ็น (P – N) แบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา โดยมีประสิทธิภาพร้อยละ 6 ในปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาจนมีประสิทธิภาพสูงกว่าร้อยละ 15 เซลล์แสงอาทิตย์หรือโซลาร์เซลล์เป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ยังใช้สนองความต้องการของสังคมได้น้อย เพราะปัญหาหลักคือค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการผลิต มีความสงสัยในความไม่คุ้มทุน พลังงานที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สิ้นเปลืองมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตได้ รวมทั้งข้อจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำ ด้วยเหตุนี้ทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจที่จะพัฒนาอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye – sensitized solar cell) ซึ่งมีต้นทุนถูกกว่า ผลิตง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม อีกทั้งกระบวนการผลิตที่ง่าย อุปกรณ์และสารตั้งต้นที่ใช้ราคาไม่แพง อีกทั้งไม่ต้องใช้ก๊าซที่เป็นมลพิษ เช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่อาศัยรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำโดยสร้างรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับของเหลว ถูกคิดค้นโดย ดร.ไมเคิล เกรทเชล (Dr.

Michael Graetzel) ซึ่งค้นพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีประสิทธิภาพ ราคาถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช แต่เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมที่ใช้มีส่วนประกอบของโลหะ ที่มีชื่อว่ารูเทเนียม (Ru) เป็นธาตุที่มีน้อย และหาได้ยาก ทำให้สีย้อมที่ใช้มีราคาแพงมาก ส่งผลให้ราคาต้นทุนเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ยังมีความเสถียรไม่สูงมากนัก ทำให้มีอายุการใช้งานสั้น เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ซึ่งสามารถใช้งานได้ยาวนานถึง 20 ปี ดังนั้นการพัฒนาโดยหลีกเลี่ยงการใช้โลหะรูเทเนียม ในการสังเคราะห์สีย้อม โดยหันมาใช้สีย้อมที่หาได้จากพืช ธรรมชาติแทนจะทำให้ต้นทุนการผลิตมีราคาต่ำลง และการทดสอบความคงทน หรือความเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ก็เป็นเรื่องที่สำคัญ และจำเป็นอย่างมากต่อการพัฒนาให้มีการนำไปใช้ได้จริงในอนาคต [1]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติในท้องถิ่นภาคใต้ของประเทศไทย จากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติจำนวน 4 ประเภท ได้แก่ ลำไย ใบบัว ผลไม้ และเนื้อไม้ ทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ จันทน์แดง ขมิ้น ครั่ง เปลือกมังคุด ลูกหว้า ใบยอ และใบสับปะรด เพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการสร้างพลังงานทดแทนขึ้น อีกทั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงนี้ ใช้กระบวนการในการผลิตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนจนเกินไป เหมาะสำหรับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ ที่เทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน จึงได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีนี้ เพื่อพัฒนาและนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด ค่ากระแสลัดวงจร ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง พลิกของ  $TiO_2$  และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.2.4 เพื่อเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ 4 ประเภท จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ จันทน์แดง ขมิ้น ครั่ง เปลือกมังคุด ลูกหว้า ใบยอ และใบสับปะรด ชนิดละ 4 เซลล์ และเตรียมเซลล์จากสีย้อมสังเคราะห์ชนิด N719 จำนวน 1 เซลล์

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง
- 1.3.2 ศึกษาวิธีการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ 7 ชนิด ชนิดละ 4 เซลล์ และเตรียมเซลล์จากสีย้อมสังเคราะห์ชนิด N719 จำนวน 1 เซลล์
- 1.3.3 ศึกษาค่าความต่างศักย์วงจรเปิด ค่ากระแสลัดวงจร ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง พลิกของ  $\text{TiO}_2$  และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เตรียมได้
- 1.3.5 วิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกของ  $\text{TiO}_2$  โดยใช้ XRD

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 เข้าใจองค์ประกอบ และหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ
- 1.4.2 เข้าใจวิธีการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ
- 1.4.3 สามารถเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ 4 ประเภท จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ จันแดง ขมิ้น ครั่ง เปลือกมังคุด ลูกหว้า ใบยอ และใบสับปะรด ชนิดละ 4 เซลล์ และเตรียมเซลล์จากสีย้อมสังเคราะห์ชนิด N719 จำนวน 1 เซลล์ และสามารถหาค่าความต่างศักย์วงจรเปิด ค่ากระแสลัดวงจร ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานได้ โดยอาจต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด เช่น นาฬิกา พัดลม ฯลฯ หลักการทำงานคล้ายคลึงกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช สีย้อมทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสงจากธรรมชาติ (Natural dye sensitized solar cell)

ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง คือ สารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์มีเสถียรภาพสูง ในช่วงการพัฒนาแรกๆ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังมีประสิทธิภาพต่ำ และได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ โดยเฉพาะ Grätzel และคณะ [2] เป็นกลุ่มวิจัยที่ประสบความสำเร็จ ในการศึกษาเรื่องนี้ โดยในปี ค.ศ. 1991 กลุ่มวิจัยนี้ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ให้มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 7 และในปี ค.ศ. 1993 สูงถึงร้อยละ 10 ในปัจจุบัน ทีมของ Grätzel ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 11.18 โดยใช้สารกึ่งตัวนำเป็นผลึกนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และสีย้อมไวแสงเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียม และลิแกนด์กลุ่มไพริดีน (Ru-pyridine complex) และเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้อีกชื่อหนึ่งว่า “เซลล์แกรทเซล” (Grätzel cells)

##### 2.1.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยแสดงดังรูปที่ 2.2

2.1.1.1 **ขั้วไฟฟ้าใน DSSC มี 2 ขั้ว** ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นส่วนประกอบที่ให้แสงผ่าน และทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกนอกเซลล์ ซึ่งนิยมใช้สารพวก Fluorine doped tin oxide (FTO) ที่เคลือบอยู่บนกระจก และแก้วเคลือบด้วยสารตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent conducting oxide glass, TCO glass) เช่น สารกลุ่ม ITO (Indium doped tin oxide) หรือ FTO (Fluorine doped tin oxide) ส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทด หรือเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode) ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่มาจากภายนอกให้กลับเข้าสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) โดยที่แคโทดอิเล็กโทรดต้องมีสมบัติดังนี้คือ มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี มีความเป็นรูพรุนสูง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา และจะต้องเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีด้วย โดยทั่วไปวัสดุที่นิยมใช้ทำเป็น

แคโทดหรืออิเล็กโทรดคือ โลหะแพลทินัม (Pt) แต่เนื่องจากโลหะแพลทินัมมีราคาแพง อาจใช้วัสดุอื่นแทนได้เช่น ผงคาร์บอน ท่อคาร์บอนนาโน หรือโพลีเมอร์นำไฟฟ้า (Conducting polymer) เช่น PEDOT หรือ Polypyrrole เป็นต้น

**2.1.1.2 อนุภาคโลหะออกไซด์** เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้น ให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงยึดเกาะ รวมทั้งรับอิเล็กตรอนจากสีย้อม และส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด จึงควรเป็นอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมาก และนำอิเล็กตรอนได้ดี นิยมใช้อนุภาคของโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นต้น

**ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )** จัดเป็นสารประกอบออกไซด์ ของโลหะไททาเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไททาเนียมได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษ ราคาไม่แพงมาก และมีคุณสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์อีกหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้าน การเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมี ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ มีค่าการหักเหของสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบ ป้องกันการสะท้อนของแสง ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye – sensitized solar cells) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) หลายชนิด ไททาเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้า เปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซ ที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น [4]

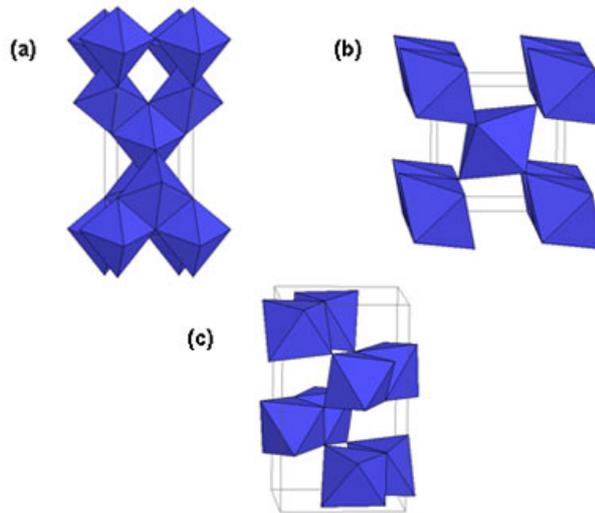
### 1. สมบัติเฉพาะของสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์

สารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบที่เกิดขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะทรานซิชันกับออกซิเจน โดยสถานะออกซิเดชันของไททาเนียมได้แก่ +2, +3 และ +4 ซึ่งไททาเนียมที่มีสถานะออกซิเดชัน +4 เป็นสถานะเสถียรที่สุด ภายใต้สภาวะต่างๆ โดยสารประกอบไททาเนียมที่มีสถานะออกซิเดชัน +4 ก็คือไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

### 2. โครงสร้างและคุณสมบัติของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่พบตามธรรมชาติมีโครงสร้างผลึก 4 ชนิด คือ และแสดงดังรูป 2.1

- อนาเทส (Anatase) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเททระโกนอล (Tetragonal)
- บรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)
- รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเททระโกนอล (Tetragonal)
- ไททาเนียม (TiO<sub>2</sub> (B)) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิค (Monoclinic)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียม : (a) อนาเทส, (b) รูไทล์ และ (c) บรูคไคท์ [4]

### 3. คุณสมบัติทางด้านสารกึ่งตัวนำของไททาเนียมสำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) มีตำแหน่งที่ว่าง ของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) จึงจัดได้ว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ มีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้น ในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิด ไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน (Oxidation and reduction reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอน ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าพลังงานแถบว่าง (Band gap energy) ความสามารถของสารกึ่งตัวนำ ที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้น ในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้ นั้น ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพลังงานแถบว่างของสารกึ่งตัวนำ และตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำ (Conduction band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงาน ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited electron) ในทางกลับกันระดับของพลังงานที่สูงที่สุด ของวาเลนซ์แบนด์

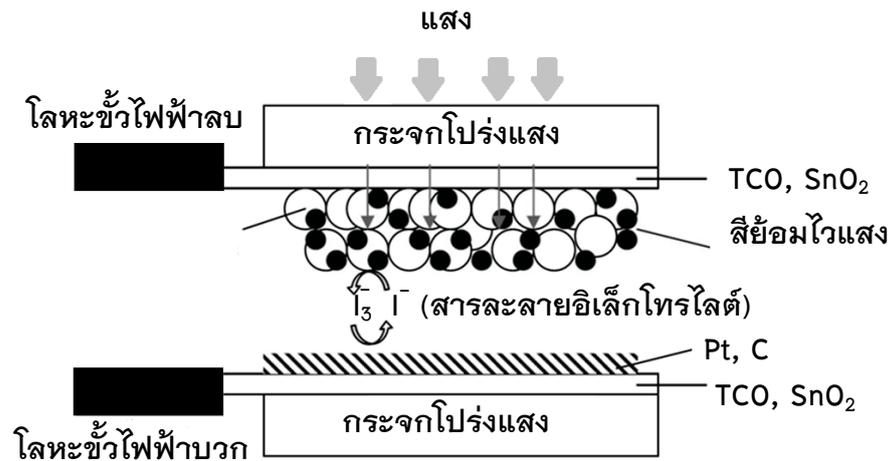
(Valence band) จะเป็นระดับศักยภาพพลังงาน ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว

สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะ คือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงาน ส่งผลให้เกิดการแยกของอิเล็กตรอน และโฮลหลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล มีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของไททาเนียมชนิคอนาเทส และรูไทล์ ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่น และโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้มีค่าพลังงานแบนด์แกป (Band gap energy) แตกต่างกันคือ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับโครงสร้างผลึกอนาเทส และ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับโครงสร้างผลึกรูไทล์ ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสง เริ่มเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นของแสง ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม

**2.1.1.3 สีย้อมไวแสง (Dye-sensitizer)** โมเลกุลของเม็ดสีจะเคลือบอยู่บนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ และทำหน้าที่ในการดูดกลืนแสงอาทิตย์โดยเฉพาะช่วงที่ตาเรามองเห็น โดยเม็ดสีย้อมจะต้องมีคุณสมบัติ คือ มีความเสถียรเมื่ออยู่ในสถานะที่ถูกออกซิไดซ์ สถานะพื้น และสถานะถูกกระตุ้น มีค่าการดูดกลืนแสงที่สูง มีราคาถูก และไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งปกติมักใช้โมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียม (Ru) กับลิแกนด์ในกลุ่มของโพลีไพริดีน (Polypyridine) เนื่องจากว่าสารดังกล่าวมีราคาแพง อันเนื่องมาจากการมีอยู่น้อยมากของโลหะ Ru ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมที่สกัดได้จากพืช เช่น สารคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) หรืออื่นๆ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีราคาถูกลง

**2.1.1.4 สารละลายอิเล็กโตรไลต์** ทำหน้าที่ในการส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transfer) จากขั้วไฟฟ้าแคโทดหรืออิเล็กโตรดในฝั่งที่เป็นฟิล์มบางของโลหะแพลทินัม ไปยังโมเลกุลของเม็ดสี ที่เสียอิเล็กตรอนไปในตอนแรก จากการถูกกระตุ้นด้วยแสงในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ จะอาศัยกระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ซึ่งคุณสมบัติของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ดีมีดังนี้ จะต้องไม่มีการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงที่ตามองเห็น มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน – ออกซิเดชันได้ง่าย เพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้แก่เม็ดสีย้อมที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็ว และจะต้องมีความคงตัวสูง ไม่ก่อให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ที่ไม

ต้องการขึ้นภายในเซลล์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่นิยมใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบที่ได้จากการแตกตัวของสารไอโอดีน ( $I_2$ ) โดยจะมีประสิทธิภาพในการให้อิเล็กตรอนกับเม็ดสีย้อมที่อยู่ในรูปของตัวออกซิไดซ์ที่สถานะพื้นได้เป็นอย่างดี

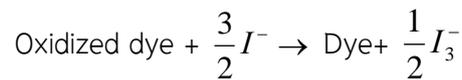
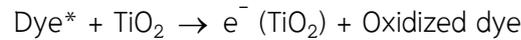


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง [3]

### 2.1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

หลักการของการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง มีขั้นตอนดังนี้ และแสดงดังรูป 2.3

- 1) เมื่อโมเลกุลสีย้อมดูดกลืนแสงจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้น
- 2) อิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นมีพลังงานสูงกว่าแถบนำ (Conduction band, CB) ของสารกึ่งตัวนำจะย้ายไปอยู่บน CB ของสารกึ่งตัวนำ
- 3) อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำออกไปสู่วงจรภายนอกผ่านโฟโตอิเล็กโทรด
- 4) อิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานจากวงจรภายนอก กลับคืนสู่เซลล์ผ่านทางเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (กระจกนำไฟฟ้าเคลือบด้วย Pt)
- 5) อิเล็กตรอนกลับคืนสู่โมเลกุลสีย้อม ผ่านปฏิกิริยา Redox ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถแสดงปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนในแต่ละขั้นตอน ดังนี้



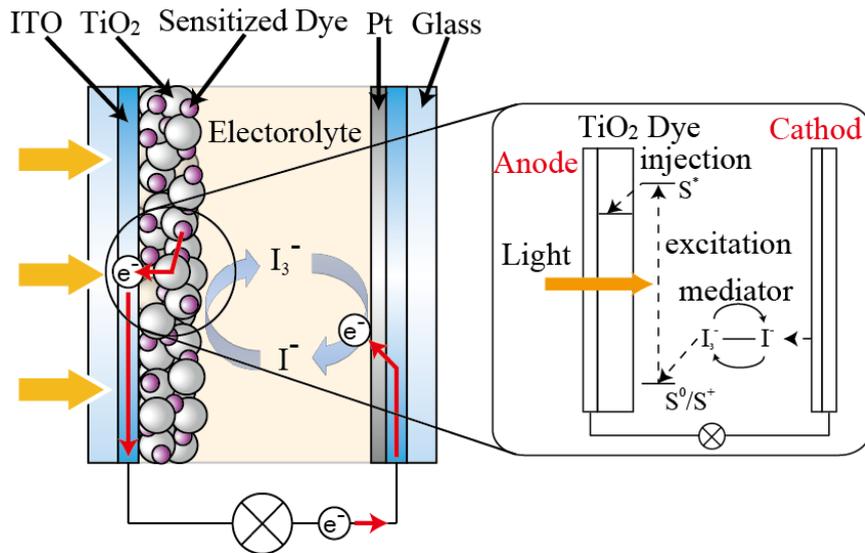
### ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

**ปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน** (Oxidation – reduction reaction) หรือเรียกรวมว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากสารหนึ่ง (ตัวรีดิวซ์) ไปยังอีกสารหนึ่ง (ตัวออกซิไดซ์) หลักสำคัญของปฏิกิริยารีดอกซ์ คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ตัวออกซิไดซ์ได้รับ จะต้องเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่ตัวรีดิวซ์สูญเสียไปเสมอ ดังนั้นการสมดุลสมการรีดอกซ์ จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการศึกษาเรื่องปฏิกิริยารีดอกซ์ ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับสมดุลรีดอกซ์ หรือการทำปริมาตรวิเคราะห์ โดยปฏิกิริยารีดอกซ์ประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือ

**ปฏิกิริยาออกซิเดชัน** (Oxidation reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาที่สารเสียอิเล็กตรอน หรือหมายถึง ปฏิกิริยาที่สารมีการเพิ่มเลขออกซิเดชัน เช่น



**ปฏิกิริยารีดักชัน** (Reduction reaction) หมายถึง ปฏิกิริยาที่สารรับอิเล็กตรอน หรือหมายถึง ปฏิกิริยาที่สารมีการลดเลขออกซิเดชัน เช่น



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง [5]

2.2 ผลิตรภัณฑ์จากธรรมชาติที่ใช้เป็นตัวรับแสง

2.2.1 ครั่ง ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Laccifer lacca Kerr.* คือ ยางหรือชั้นชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นสารที่ขับถ่ายออกจากตัวแมลงครั่ง แมลงครั่งจะอาศัยอยู่ตามกิ่งไม้ที่ใช้เลี้ยงครั่ง และใช้ปากซึ่งมีลักษณะเป็นปากดูดเจาะเข้าไปในกิ่งของต้นไม้เพื่อดูดน้ำเลี้ยงมาเป็นอาหารและขับถ่ายครั่งออกมาจากภายในตัวครั่งตลอดเวลาเพื่อห่อหุ้มตัวเป็นเกราะป้องกันอันตรายจากสิ่งภายนอก มีลักษณะนิ่มเหนียวสีเหลืองทอง เมื่อถูกอากาศนานเข้าจะแข็งและมีสีน้ำตาล ครั่งที่เก็บได้จากต้นไม้เรียกว่าครั่งดิบ ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เรซิน ขี้ผึ้ง สี ซาก ตัวครั่ง และสารอื่นๆ ส่วนที่ใช้เป็นประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมคือ สีครั่ง และเนื้อครั่ง แสดงดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ครั่ง

2.2.2 ไม้จันทน์แดง ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Dracaena lourieri* Gagnep. ไม้จันทน์แดงเป็นไม้ที่ได้จากต้นจันทน์แดงซึ่งลักษณะต้นคล้ายต้นประดู่ป่า แต่ขนาดเล็กกว่า ใบรูปรีปลายใบมน ลำต้นแตกเป็นร่องระแหง สีน้ำตาลดำ ดอกสีเหลืองเหมือนประดู่ชนิดอื่นๆ มีกลิ่นหอม



รูปที่ 2.5 ไม้จันทน์แดง

2.2.3 มังคุด ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Garcinia mangostana* L. เปลือกมังคุดที่ใช้ในการทดลองมาจากมังคุดที่สุกงอม มังคุดเป็นไม้ยืนต้น ทุกส่วนมียางสีเหลือง ใบ เดี่ยว เรียงตรงข้าม รูปไข่หรือรูปวงรีแกมขอบขนาน เนื้อใบหนาและค่อนข้างเหนียวคล้ายหนัง หลังใบสีเขียวเข้มเป็นมัน ท้องใบสีอ่อนกว่า ดอก เดี่ยวหรือเป็นคู่ ออกที่ซอกใบใกล้ปลายกิ่ง สมบูรณ์เพศหรือแยกเพศ กลีบเลี้ยงสีเขียวอมเหลือง กลีบดอกสีแดง ฉ่ำน้ำ ผล เป็นผลสด ค่อนข้างกลม



รูปที่ 2.6 มังคุด

2.2.4 **ใบยอ** ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Morinda citrifolia* L. ยอเป็นไม้ต้น สูง 2-6 เมตร เปลือกต้นสีน้ำตาล กิ่งอ่อนเป็นสีเหลี่ยม ใบ เป็นใบเดี่ยว ออกตรงข้าม รูปรี ขอบใบเรียบ แผ่นใบเรียบ สีเขียวเข้มเป็นมัน ดอก ออกเป็นช่อกลมตามซอกใบ ดอกสีขาว กลีบดอกโคนเชื่อมติดกันเป็นหลอด ปลายแยกเป็น 5 แฉก มีกลิ่นหอม ผล เป็นผลรวม ผิวขรุขระเป็นตุ่ม ผลสุกมีกลิ่นเหม็นเอียน เมล็ดสีน้ำตาลมีหลายเมล็ด



รูปที่ 2.7 ใบยอ

2.2.5 **สับปะรด** ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Ananas Comosus* Merr. ในการทดลองจะใช้ในส่วนขอใบสับปะรด ซึ่งใบสับปะรดเป็นไม้ล้มลุก ลำต้นใต้ดิน ปล้องสั้น ไม่แตกกิ่งก้านมีแต่กาบใบห่อหุ้มลำ

ต้น ใบ เป็นใบเดี่ยว ออกเรียงเวียนถี่ ไม่มีก้านใบ ใบเรียวยาว โคนใบเป็นกาบหุ้มลำต้น ปลายแหลม ขอบใบมีหนาม ด้านล่างมีนวลแป้งสีขาว ดอก



รูปที่ 2.8 ใบสับปะรด

2.2.6 ลูกหว้า ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Syzygium cumini* (L.) ลูกหว้าเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งเป็นไม้ยืนต้นสูง เปลือกต้นค่อนข้างเรียบ สีน้ำตาล ใบเดี่ยว ออกตรงข้าม รูปไข่หรือรูปรี มีจุดน้ำมันที่บริเวณขอบใบ ดอกช่อ สีขาวหรือสีเหลืองอ่อน ออกที่ซอกใบหรือปลายยอด ออกดอกและติดผลราวเดือน ธันวาคม – มิถุนายน ผลเป็นผลสด รูปรีแกมรูปไข่ ฉ่ำน้ำ มีสีม่วงดำ ผิวเรียบมัน ผลแก่ราวเดือนพฤษภาคม



รูปที่ 2.9 ลูกหว้า

2.2.7 **ขมิ้น** ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Curcuma longa* L. ขมิ้นเป็นพืชที่มีลำต้นใต้ดิน ใบมีขนาดยาวมน สีเขียว ดอกมีสีขาวแกมเหลือง มักจะขึ้นรวมกันอยู่เป็นกอๆ ส่วนเหง้าจะมีเนื้อ สีเหลืองจัด ถ้าเจริญในดินปนทรายจะให้เหง้ามากกว่าปลูกในดินธรรมดา เจริญได้ดีในฤดูฝน



รูปที่ 2.10 ขมิ้น

### 2.3 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

กิตติศักดิ์ อ่ำมา [6] ได้ศึกษาการเตรียมและหาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างนาโน  $Mg_xZn_{1-x}O$  สำหรับใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้เส้นลวดนาโน  $Mg_xZn_{1-x}O$  ( $0 \leq x \leq 0.30$ ) ด้วยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศปกติ ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางแสง พบว่าเส้นลวดนาโน  $Mg_xZn_{1-x}O$  มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 60 – 700 นาโนเมตร โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของอุณหภูมิในการเผา และพบว่าอะตอมของแมกนีเซียมเข้าไปอยู่ในสารซิงค์ออกไซด์ เกิดเป็นสารอัลลอยด์  $Mg_xZn_{1-x}O$  เมื่อทดสอบคุณสมบัติทางแสง พบว่ามีช่องว่างแถบพลังงาน อยู่ในช่วง 3.35 ถึง 3.56 eV เมื่อนำสาร  $Mg_xZn_{1-x}O$  เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.64

ชัยวัฒน์ ศรีสมานวัตร [7] ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้ไททาเนียมอิเล็กโตรดแบบพ่นเคลือบ เตรียมด้วยวิธีโซลเจล เมื่อนำไททาเนียมมาเคลือบลงบนกระจกด้วยเครื่องพ่นอัลตราโซนิก และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผา และศึกษาความหนาของชั้นฟิล์มที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าไททาเนียมฟิล์มแบบชั้นเดียวให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด ณ อุณหภูมิของการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส วัด

ความหนาได้ 11.1 ไมโครเมตร เมื่อนำไทเทเนียมแบบสองชั้น มาใช้เป็นอิเล็กโทรด พบว่าค่าประสิทธิภาพจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับไททาเนียมอิเล็กโทรดแบบชั้นเดียว เนื่องจากไทเทเนียมแบบสองชั้น จะทำให้เกิดการกระเจิงของแสงดีขึ้น

ชวนพิศ คณะพัฒน์ [8] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้สีย้อมจากเปลือกไม้ 5 ชนิด อันได้แก่ เปลือกกระโดน เปลือกเขลง เปลือกสะเดา เปลือกมะม่วง และเปลือกประดู่ เป็นตัวเซนซิไทเซอร์ (Sensitizers) และใช้นาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นอิเล็กโทรด ซึ่งผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล พบว่า ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่สร้างขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.46 0.45 0.32 0.33 และ 0.40 ตามลำดับ สำหรับค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency) มีค่าเท่ากับ ร้อยละ  $0.5 \times 10^{-3}$  ร้อยละ  $2.5 \times 10^{-3}$  ร้อยละ  $1.4 \times 10^{-3}$  ร้อยละ  $1.8 \times 10^{-3}$  และ ร้อยละ  $2.5 \times 10^{-3}$  ตามลำดับ

พิชเนศ อุปชัย [9] ได้ทำการศึกษาผลของตัวกระตุ้นคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยผลของอัตราการผสมคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีน และความหนาที่ต่างกันของชั้นฟิล์มบนซึ่งคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีน โดยเตรียมซึ่งคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนสองแบบ แบบที่หนึ่งนำซึ่งคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีน ในอัตรา 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยโมล แบบที่สองเตรียมชั้นฟิล์มคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนทับบนชั้นซึ่งคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนด้วยปริมาณสาร 1 3 5 10 20 และ 30 มิลลิกรัม จากผลการทดลองพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ไม่มีคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนเป็นตัวกระตุ้น มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสจลเปิด 2.69 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์วงจลเปิด 0.45 โวลต์ และค่าประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 0.69 นอกจากนี้ยังพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนผสมอยู่ มีค่าความหนาแน่นกระแสจลเปิด ความต่างศักย์วงจลเปิด และค่าประสิทธิภาพลดลง เมื่ออัตราการผสมคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนเพิ่มขึ้น สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีชั้นฟิล์มคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนอยู่บนชั้นซึ่งคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนพบว่า เมื่อฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสจลเปิด ความต่างศักย์วงจลเปิด และค่าประสิทธิภาพจะมีค่าเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ไม่มีคอปเปอร์ฟทาโลไซยานีนเป็นตัวกระตุ้น

ทวนทอง ธนนิมิตร [10] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมจากคลอโรฟิลล์ โดยการเตรียมกระจกนำไฟฟ้า เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ Tin (IV) Chloride Pentahydrate ( $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) และใช้คลอโรฟิลล์ที่ได้จากใบมะนาวเป็นตัวเซนซิไทเซอร์ ซึ่งได้สร้างขึ้นมา 3 ชนิด แต่ละชนิดแตกต่างกันที่อิเล็กโทรไลต์ ชนิดที่ 1 ใช้อิเล็กโทร

ไลท์ KI/I<sub>2</sub> ชนิดที่ 2 ใช้ I<sub>2</sub> ชนิดที่ 3 ใช้อิเล็กโทรไลท์ FeCl<sub>3</sub> เมื่อทำการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าส่องสว่าง 1,000 Lux และ 0 Lux พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นทั้ง 3 ชนิด มีค่าแรงดันวงจรวจรไฟฟ้า แรงเปิดที่ต่างกัน พบว่าชนิดที่ 2 ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวจรเปิดสูงสุด มีค่าเท่ากับ 93.5 มิลลิโวลต์

ทวนทอง ธนนิมิตร และคณะ [11] ศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากพืช พบว่าการทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใช้สารอินทรีย์ (Organic solar cell) ประกอบด้วยวัสดุที่สำคัญ อาทิเช่น เซนซีไทเซอร์ ให้ค่าการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์อยู่ในช่วง 431.97 นาโนเมตร และ 662.46 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นตัวเซนซีไทเซอร์

วิทยา อมรกิจบำรุง และคณะ [1] ได้ทำการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูก จากผลึกนาโน ที่สกัดจากพืชสีเขียว (Chlorophyll dyes) โดยใช้สีย้อมจากสาหร่ายสไปรูลีนา ที่มีลักษณะสีเขียวเป็นตัวดูดกลืนแสง พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดที่ได้ มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.016 โดยใช้เวลาในการย้อมสี 24 ชั่วโมง ความหนาแน่นกระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการย้อมสี และค่าของการดูดกลืนแสง ในการทดลองพบว่าเมื่อใช้สีย้อมจากสาหร่ายสไปรูลีนา เป็นตัวดูดกลืนแสง ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมมาตรฐาน N719 เป็นตัวดูดกลืนแสง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจาก ความไม่เสถียรของสีย้อมจากธรรมชาติ ในการศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร J<sub>sc</sub> และประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความหนาของฟิล์ม

วิรัช พรหมอารักษ์ และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ จากลวดนาโนชนิดสีย้อมไวแสง โดยมีพอร์ไพรีนชนิดใหม่เป็นสีย้อมไวแสง พบว่าประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ อาทิเช่น โมเลกุลของสีย้อมไวแสง ที่ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ และให้กระแสอิเล็กตรอนกับอนุภาคโลหะออกไซด์ รวมทั้งต้องมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงวิสิเบิลจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด เพื่อทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงาน และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง มีสมบัติของสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้นที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในภาวะถูกออกซิไดซ์ได้ดี และสามารถยึดเกาะผิวสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ได้ดี ส่วนโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่รับกระแสอิเล็กตรอน และเป็นพื้นผิวสำหรับการยึดเกาะของโมเลกุลสีย้อม จะต้องมีความหนาของว่างพลังงานที่กว้าง (มากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์) และมีพื้นที่ผิวมาก ในขณะเดียวกันสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวอิเล็กโทรไลท์ จะต้องทำหน้าที่ในการชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลของสีย้อม หรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด และทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ง่าย และ

เป็นสารที่ไม่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงแสงที่ตามองเห็น รวมทั้งเป็นสารที่มีอายุการใช้งานได้ยาวนานด้วย

สุทธิพจน์ สุทชนะ [13] ได้ศึกษาซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม สำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม โดยใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล (AZO) เพื่อทำเป็นฟิล์มบางโปร่งแสง นำไฟฟ้าบนแผ่นรองรับกระจก ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง และแทรกด้วยชั้นของฟิล์มบางของอนุภาคเงินนาโน เมื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยการวัดฮอลล์ ตามรูปแบบของ Van der Pauw และศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยวิธีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบาง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และประเมินคุณภาพของฟิล์มบางจากค่า Figure of merit ( $F_{TC}$ ) พบว่าฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีที่สุด คือฟิล์มบาง AZO/Ag/AZO ที่สปัตเตอริงด้วย Ag เป็นเวลา 10 วินาที ให้ค่า  $F_{TC}$  ที่ดีที่สุดเท่ากับ  $6.9 \times 10^{-4}$  ต่อโอห์ม เมื่อนำฟิล์มบางไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม ซึ่งโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม ประกอบด้วยซิงก์ออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำรับอิเล็กตรอน อีโอซินวาย ทำหน้าที่เป็นสีย้อม ไอโอดีนทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ และแพลตตินัม ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น  $0.47 \pm 0.01$  โวลต์ ค่าความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่เป็น  $2.19 \pm 0.07$  มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าประสิทธิภาพเป็น  $0.59 \pm 0.01$  และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ  $0.60 \pm 0.02$  เปอร์เซ็นต์

สุเมธ ศิริวจณ์ [14] ได้ทำการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง บนกระจกนำไฟฟ้า โดยใช้ฟิล์มคาร์บอน และฟิล์มคาร์บอนผสมอนุภาคแพลตตินัม ที่เตรียมจากกลูโคส และกลูโคสผสมอนุภาคแพลตตินัม ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เป็นขั้วแคโทด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ กับวิธีการหยดกลูโคสลงบนกระจกนำไฟฟ้าโดยตรง พบว่าการหยดกลูโคสลงบนกระจกโดยตรง จะให้ประสิทธิภาพน้อยกว่าวิธีไฮโดรเทอร์มอล และค่าประสิทธิภาพจะมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเพิ่มมากขึ้น ฟิล์มคาร์บอนจากกลูโคสที่เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ให้ค่าประสิทธิภาพร้อยละ 0.03 แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของ Ar พบว่าค่าประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น โยมีค่าประสิทธิภาพร้อยละ 4.16 จากการศึกษากการผสมอนุภาคแพลตตินัมในกลูโคส พบว่าไม่ช่วยให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากฟิล์มคาร์บอนจากกลูโคส ที่เคลือบบนผิวอนุภาคแพลตตินัมทำให้อนุภาคแพลตตินัมสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ได้น้อย

สรพรเพชญ์ นิลผาย [15] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม โดยใช้ผงซิงก์ออกไซด์ เส้นเชื่อมซิงก์ออกไซด์ และซิงก์ออกไซด์นาโนเดตรระพอด เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ เตรียมด้วยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชัน ขั้วไฟฟ้าทางแสงซิงก์ออกไซด์ ถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาผลของตัวผสมตัวทำละลายสีย้อม ตัวทำละลายอิเล็กโทรไลต์ ความหนา และเวลาในการแช่สีย้อม ทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้หลอดทั้งสแตน ที่ปรับเทียบกับเครื่องจำลองแสงดวงอาทิตย์ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม ที่ใช้ผงซิงก์ออกไซด์จะมีค่าความหนาแน่นกระแส ความต่างศักย์ และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เส้นเชื่อมซิงก์ออกไซด์นาโน และซิงก์ออกไซด์นาโนเดตรระพอด โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสวงจรถัดเท่ากับ 1.25 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความต่างศักย์วงจรถัดเท่ากับ 0.45 โวลต์ ค่าฟิลแฟกเตอร์ 0.65 และค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ 0.68 เปอร์เซ็นต์

ศุภชัย จันทรงาม [16] ได้ศึกษาผลของตัวกระตุ้นซิงก์ฟทาโลไซยานิน ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้สารซิงก์ฟทาโลไซยานินเป็นตัวกระตุ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม ที่มีสารกึ่งตัวนำซิงก์ออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโดยอิเล็กโทรด โดยมีไอโซอินวายเป็นสีย้อม ทำการเปลี่ยนความหนาซิงก์ฟทาโลไซยานิน ที่อยู่บนขั้วไฟฟ้าโดยอิเล็กโทรดด้วยวิธีระเหยสาร ทำการศึกษาลักษณะของขั้วไฟฟ้าโดยอิเล็กโทรด โดยการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี วิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) ศักดิ์ไฟฟ้าวงจรถัด ( $V_{oc}$ ) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้า ( $\eta$ ) ภายใต้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากการศึกษาพบว่า ซิงก์ฟทาโลไซยานินจะให้ค่ากระแสสูงสุด มีค่าเท่ากับ 3.28 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 0.85 เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมที่ไม่มีซิงก์ฟทาโลไซยานินจะได้ค่ากระแสสูงสุด 2.77 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 0.79

Zhou, H. *et al.* [17] ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้สีย้อมจากธรรมชาติ 20 ตัวอย่าง เป็นตัวรับแสง ได้แก่ ดอกไม้ ใบ ผลไม้ ยาจีนโบราณ และเครื่องดื่ม ถูกนำมาใช้เป็นตัวรับแสง เพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ซึ่งแสดงผลการทดลองในตารางที่ 1.1 ผลของปฏิกิริยาจาก DSSC จะขึ้นอยู่กับสีย้อมที่ใช้เป็นตัวรับแสง และพบว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ( $V_{oc}$ ) มีความแตกต่างระหว่าง 0.337 – 0.689 โวลต์ และความหนาแน่น

ของแสงในวงจรไฟฟ้า ( $J_{SC}$ ) ตั้งแต่ 0.14 – 2.69 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยเฉพาะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) 0.68 โวลต์ สามารถเตรียมได้จากสีย้อมเปลือกมังคุด ในการแปลงไฟฟ้าของ DSSC โดยผสมเอทานอลกับสารสกัดจากเปลือกมังคุดโดยไม่บริสุทธิ์ที่มีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 1.17 นอกจากนี้องค์ประกอบต่างๆ ของเอทานอล และสารสกัดที่สกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่แตกต่างกัน ประสิทธิภาพทางปฏิกิริยาทางเคมีของสารสกัดเหล่านี้ แสดงให้เห็นว่า รูตินเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและใช้เป็นเซนซิไทเซอร์สำหรับการเตรียม DSSC

Calogero, G. and Marco, G.D. [18] ได้ทำการศึกษาการใช้สีย้อมสีแดงจากส้มชิลีและมะเขือส้มม่วง ซึ่งใช้เป็นตัวรับแสงสำหรับการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยประกอบด้วยน้ำส้มชิลี (*Citrus sinensis*) และสารสกัดสีม่วงของเปลือกมะเขือ (*Solanum melongena*, L.) และใช้ฟิล์ม  $TiO_2$  เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ พบว่าผลจากการใช้สีแดงของน้ำส้ม สามารถให้ค่าประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) = 0.66% ภายใต้ความส่องสว่าง 1.5 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $J_{SC}$ ) = 3.40 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความต่างศักย์ ( $V_{OC}$ ) = 0.350 โวลต์ และค่า fill factor (FF) = 0.40 ตามลำดับ

Wongcharee, K. *et al.* [19] ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยใช้สีย้อมธรรมชาติที่สกัดจากดอกกระเจี๊ยบ และดอกอัญชัน การดูดกลืนแสงของสารสกัดผสมกับ  $TiO_2$  ไม่สามารถดูดกลืนแสงเมื่อเทียบกับสารสกัดจากแต่ละเซลล์ที่ไวแสง แต่พบว่าสีที่สกัดจากดอกกระเจี๊ยบเพียงอย่างเดียว มีความไวที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการไวแสงเกี่ยวข้องกับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวสี และ  $TiO_2$  รวมทั้งโครงสร้างของสีย้อม ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสกัด การสกัดตัวทำละลาย และ ค่า pH ของการสกัดสารละลาย มีผลต่อประสิทธิภาพของดอกกระเจี๊ยบ สารสกัดจากสีย้อมไวแสงที่ดี คือ ร้อยละ 0.37 ร้อยละ 0.70 เมื่อสกัดสีย้อมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 1.1 ผลิตรัณที่จากธรรมชาติที่ผ่านการวิจัยสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง [17]

ผลิตรัณที่	$\lambda_{\max}$ (nm)	$j_{sc}$ (mAcm <sup>-2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF(%)	$\eta$ (%)
ดอกบิโกเนีย	540	0.63	0.537	72.2	0.24
เปลือกส้ม	446	0.74	0.592	63.1	0.28
กุหลาบพันปี	540	1.61	0.585	60.9	0.57
สมุนไพรจีน	447 425	0.53	0.689	46.6	0.17
ยาสมุนไพร	669	1.03	0.484	68.2	0.34
กุหลาบเหลือง	487	0.74	0.609	57.1	0.26
ดอกผักไผ่น้ำ	435	0.60	0.554	62.7	0.21
ต้นชงโค	665	0.96	0.572	66.0	0.36
พืชมุข	665	0.85	0.616	60.5	0.32
มูราซากิ	520	0.14	0.337	58.5	0.03
สีม่วง	546	1.02	0.498	64.5	0.33
กุหลาบจีน	516	0.90	0.483	61.9	0.27
เปลือกมังคุด	/	2.69	0.686	63.3	1.17
ดอกกุหลาบ	/	0.97	0.595	65.9	0.38
ดอกลิลลี่	/	0.51	0.498	66.7	0.17
กาแฟ	/	0.85	0.559	68.7	0.33
ยาสามัญประจำบ้าน	/	1.19	0.607	65.4	0.47
Dye N-719	515	13.74	0.773	57.6	6.11
ส้มสีชิลลี่	/	3.40	0.35	0.66	0.40
บลูเบอร์รี่	/	4.92	0.360	0.34	/
ดอกอัญชัน	/	2.72	0.408	0.63	/
ข้าวเหนียวดำ	/	1.14	0.551	0.52	/

Hao, S. H *et al.* [20] ศึกษาสีย้อมธรรมชาติที่เป็นโฟโตเซนซิไทเซอร์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยใช้สีย้อมธรรมชาติที่สกัดจากข้าวเหนียวดำ พริกชี้ฟ้า ดอกไม้ และสาหร่ายทะเล ผลที่ได้คือ กระแสไฟฟ้าจาก 0.225 – 1.142 มิลลิแอมต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์ จาก 0.412 – 0.551 โวลต์ ปัจจัยที่เต็มสารละลาย 0.52 – 0.63 และกำลังไฟฟ้าสูงสุด 58 – 327 ไมโครวัตต์ จากการทดลองพบว่า ข้าวเหนียวดำเป็นสารสกัดที่ดีที่สุด โดยเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารคาร์บอนิลและสารไฮดรอกซิลของกลุ่มโมเลกุลของสารสกัดแอนโทไซยานิน ในข้าวเหนียวดำ

Matsui, M. *et al.* [21] ได้ทำการศึกษาการใช้สารอินโดลีนเป็นสีย้อมซิงค์ออกไซด์ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง พบว่าผลกระทบจากปฏิกิริยาของตำแหน่ง และประเภทของกลุ่ม Carboxyl ในพันธะคู่ของ Rhodanine ชนิดสีย้อม Indoline มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของซิงค์ออกไซด์ ที่ได้จากการทดลองเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

Yamazaki, E. *et al.* [22] ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์แคโรทีนอยด์จากธรรมชาติใช้เป็นตัวโฟโตเซนซิไทเซอร์ โดยใช้สารแคโรทีนอยด์จาก Crocetin และ Crocin (Crocetin – di – gentiobioside) เป็นเซนซิไทเซอร์ และตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีในโมเลกุลของสีย้อม การพิจารณา Carotenoids crocetin ที่มีกลุ่ม Carboxylic ในโมเลกุลที่สามารถติดได้อย่างมีประสิทธิภาพกับพื้นผิวของฟิล์ม TiO<sub>2</sub> จากการทดลองพบว่า ผลของกระแสไฟฟ้าในวงจรมีค่าเท่ากับ 2.84 มิลลิแอมป์ ภายใต้การฉายรังสีจาก 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เป็นไปได้ที่จะนำแคโรทีนอยด์ไปใช้เป็นตัวรับแสง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

Kim, S.S. *et al.* [23] ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยใช้ TiO<sub>2</sub> ZnO และ Eosin Y เป็นชั้นไฟฟ้า พบว่าฟิล์ม TiO<sub>2</sub> ZnO และ Eosin Y ที่เตรียมโดยวิธีการสร้างเหล็กไฟฟ้า และใช้เป็นโฟโตแอโนดในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง การย่อยสลายของเซลล์กับเวลาที่ลดลง และ I<sub>sc</sub>, V<sub>oc</sub> และปัจจัยการเติมที่เพิ่มขึ้นของจำนวนชั้น ZnO ส่งผลให้เกิดการกักตัวของพลังงาน ที่อินเตอร์เฟสบริเวณชั้นไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดอัตราการรวมกัน และช่วยในการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพของเซลล์

Tennakone, K. *et al.* [24] ได้ศึกษาการใช้รงควัตถุชนิด Santalin ที่แยกจากไม้จันทน์แดง ในเซลล์แบบของแข็ง และ Santalin ที่เคลือบบนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่ามีความเสถียรสูง เนื่องจากเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแรงกับไททาเนียมไดออกไซด์

Oka, H. *et al.* [25] ได้ทำการศึกษาการแยกส่วนประกอบของครั่ง ด้วยวิธี hsc (High-speed counter-current chromatography) พบว่าสามารถแยกครั้งได้ในปริมาณ 25 มิลลิกรัม จากปริมาณตัวอย่างทั้งหมด โดยการแยกตัวอย่างแบบสองเฟส ซึ่งประกอบด้วย Tert-butyl

methyl ether–nbutanol–acetonitrile–water (2:2:1:5) โดยการวิเคราะห์ HPLC และ ES–MS–MS ผลจากการแยกได้ครั้ง 2.6 มิลลิกรัม จากร้อยละ 97.2 ที่สกัดด้วย Laccic acid C ได้ 9.5 มิลลิกรัม จากร้อยละ 98.1 ที่สกัดด้วย Laccic acid A ได้ 3.6 มิลลิกรัม จากร้อยละ 98.2 ที่สกัดด้วย Laccic acid B, และเตรียมได้ 0.5 มิลลิกรัม จากร้อยละ 95.0 ที่สกัดด้วย Anthraquinonedicarboxylic acid

Lai Xie, Z. *et al.* [26] ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอน ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้สารตั้งต้น จากน้ำตาลชนิดต่างๆ พบว่าเม็ดอนุภาคที่ได้ มีลักษณะกลมเรียบ และสังเคราะห์ได้ในปริมาณที่มาก ถึงร้อยละ 50 ของน้ำหนักของสารตั้งต้น วัดขนาดอนุภาคได้มีค่าเท่ากับ 40 นาโนเมตร

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการที่ใช้ในการเตรียมสารต่างๆเพื่อใช้ในการทดลองการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติในท้องถิ่นภาคใต้ของประเทศไทย รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 สารเคมีและผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ

- 3.1.1 เอทานอล (Ethyl Alcohol)
- 3.1.2 อะซิโตน (Acetone)
- 3.1.3 อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile)
- 3.1.4 สีย้อมที่สกัดจากธรรมชาติ
- 3.1.5 สีย้อมสังเคราะห์ (Eosin Y)
- 3.1.6 ไบยอ
- 3.1.7 ลูกหว้า
- 3.1.8 ใบลับประด
- 3.1.9 เปลือกมังคุด
- 3.1.10 ครั่ง
- 3.1.11 ขมิ้น
- 3.1.12 จันทน์แดง

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 กระจกนำไฟฟ้า
- 3.2.2 อุปกรณ์การตัดกระจก (มีดและคีม)
- 3.2.3 กระจกกรอง
- 3.2.4 ปีกเกอร์ขนาดต่าง ๆ
- 3.2.5 กรวยกรอง

- 3.2.6 Hot plate
- 3.2.7 ซ้อนตักสารทำด้วยเตนเลส
- 3.2.8 เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 3.2.9 Ultrasonic cleaner
- 3.2.10 เครื่องชั่งดิจิตอล
- 3.2.11 มัลติมิเตอร์
- 3.2.12 เครื่องปั่น
- 3.2.13 เครื่องเป่าลมร้อน
- 3.2.14 เครื่องเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบแบบสปิน (Spin coating)
- 3.2.15 เครื่องทำขั้วไฟฟ้า
- 3.2.16 เครื่องวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar simulator)

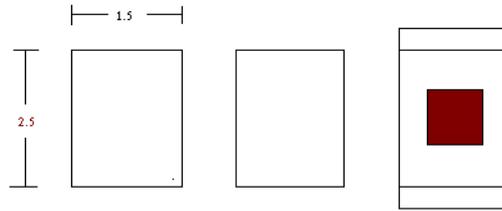
### 3.3 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

#### 3.3.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.1, 3.2, 3.3 และ 3.4

1. เตรียมกระจกนำไฟฟ้าขนาด 1.5×8 เซนติเมตร
2. นำกระจกนำไฟฟ้า ตัดให้มีขนาดเป็น 1.5×2.5 เซนติเมตร
3. นำกระจกไฟฟ้าที่ตัดแล้วแล้วเจาะรู เพื่อใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าบวกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร เพื่อให้หยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในขั้นตอนการประกอบเซลล์



รูปที่ 3.1 กระจกนำไฟฟ้า



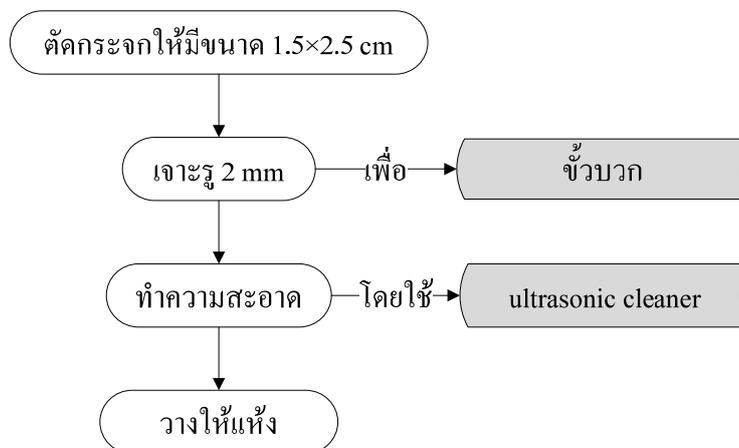
รูปที่ 3.2 ขนาดของกระจกนำไฟฟ้า

4. นำกระจกนำไฟฟ้าไปทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultrasonic cleaner



รูปที่ 3.3 อ่างน้ำความถี่สูง (Ultrasonic cleaner)

5. นำกระจกนำไฟฟ้าที่ล้างเสร็จแล้ววางให้แห้งและเก็บไว้



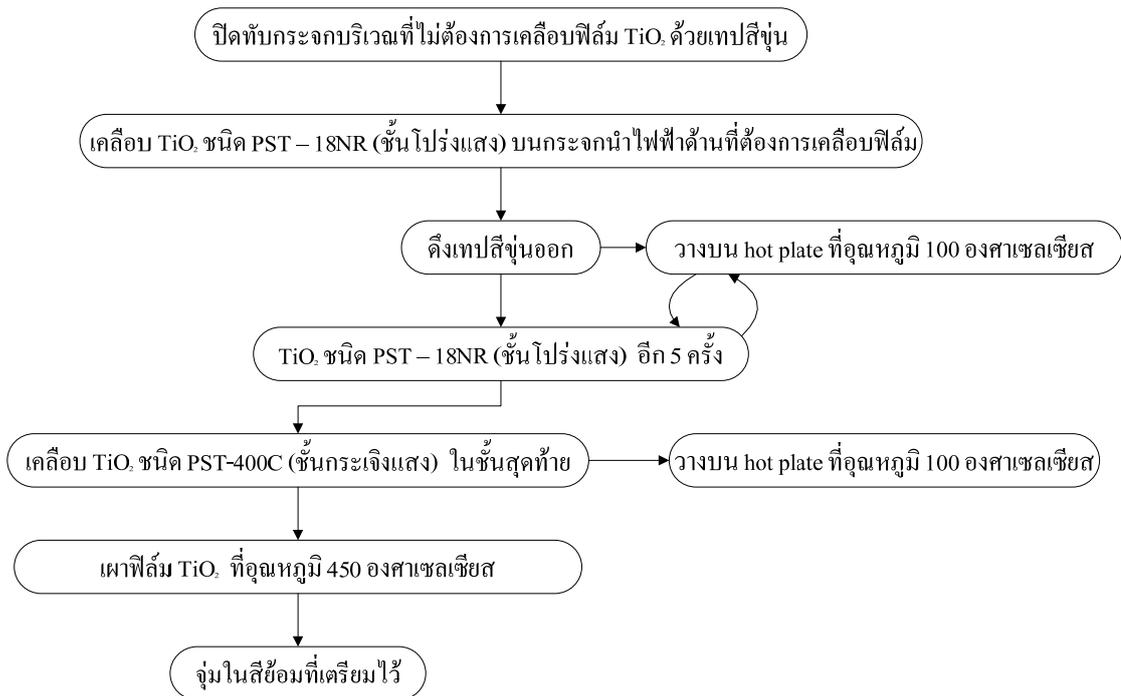
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้า

### 3.3.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าลบบ (Working electrode) แสดงไว้ดังรูปที่ 3.6

1. เตรียมกระจกนำไฟฟ้าขนาด 2.5×8 ตารางเซนติเมตร ที่ล้างไว้ในตอนแรก วางบนภาชนะที่เตรียมไว้
2. ปิดทับบริเวณที่ไม่ต้องการเคลือบฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเทปสีชุน
3. นำไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิด PST – 18NR (ชั้นโปร่งแสง) ตักลงบนกระจกนำไฟฟ้าด้านที่ต้องการเคลือบฟิล์ม
4. เมื่อเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิด PST-18NR เรียบร้อยแล้ว ดึงเทปสีชุนออก และนำไปวางบน Hot plate ณ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไททาเนียมไดออกไซด์ชนิด PST-18NR แห้ง
5. ทำการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิด PST-18NR ซ้ำอีกครั้ง และนำไปวางบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิด PST-18NR แห้ง
6. นำไททาเนียมไดออกไซด์แห้งที่ได้จากข้อ 6 มาเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิด PST-400C (ชั้นกระจเงแสง) และนำไปวางบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิด PST-400C แห้ง จะได้ไททาเนียมไดออกไซด์ฟิล์ม
7. ทำการเผาไททาเนียมไดออกไซด์ ฟิล์มทั้งหมดที่เคลือบเสร็จ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เพื่อไล่สารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออก
8. จุ่มในสีย้อมที่เตรียมไว้ จะได้ไททาเนียมไดออกไซด์ฟิล์ม ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ไททาเนียมไดออกไซด์ฟิล์ม



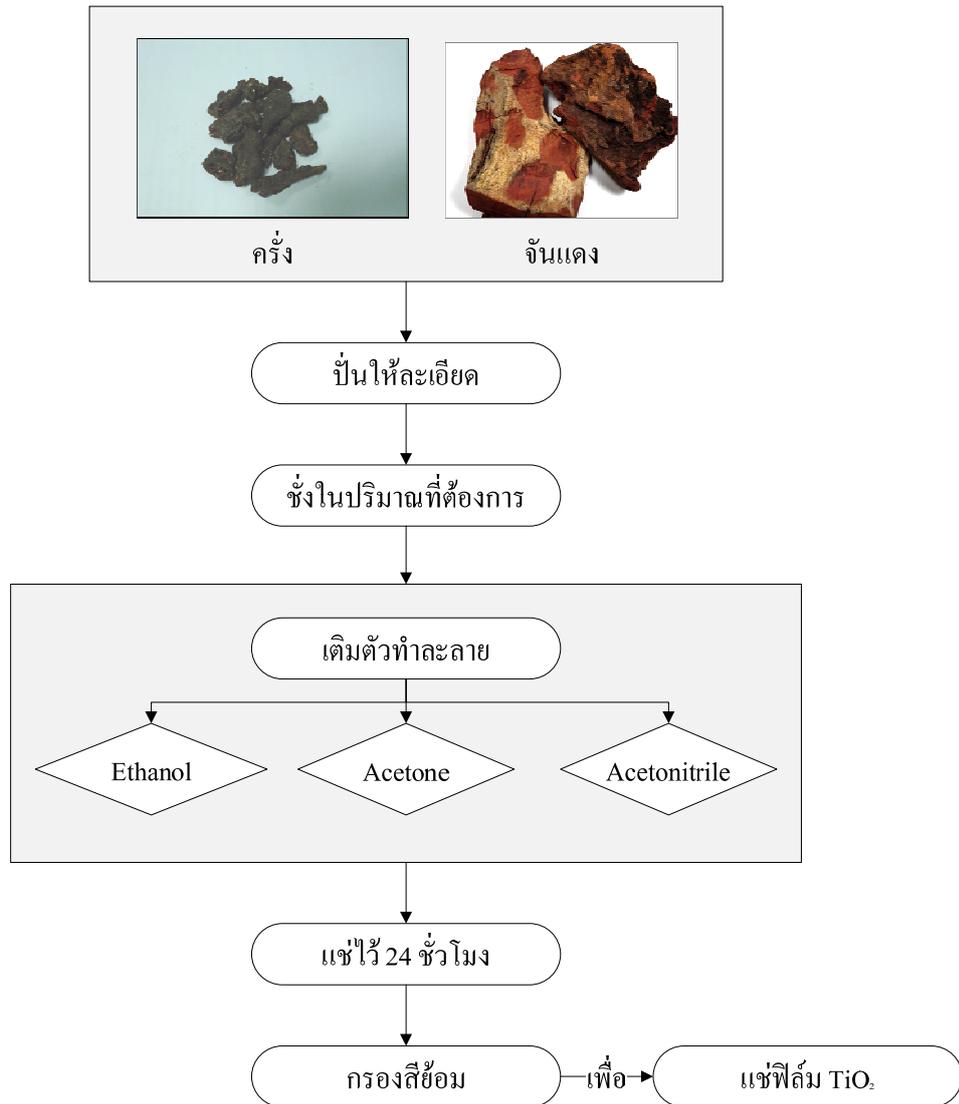
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าลบ

### 3.3.3 เตรียมสีข้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ

เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่ใช้มีความแตกต่างกันทั้งสี และโครงสร้างทางเคมี ดังนั้นจึงมีวิธีในการสกัดเม็ดสีจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติแต่ละชนิด ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดลองในครั้งนี้ใช้วิธีการสกัดทั้งหมด 5 แบบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

#### วิธีที่ 1 แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7

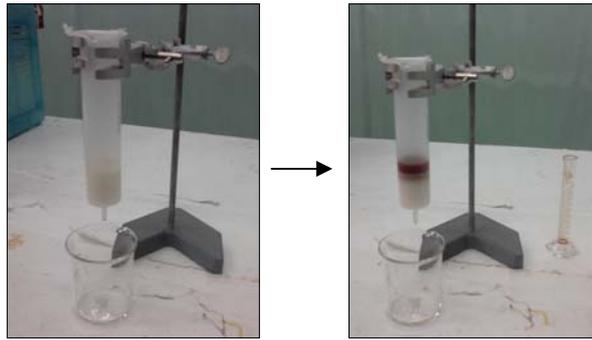
1. นำผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ ได้แก่ ครั่ง จันทน์แดง ปั่นให้ละเอียด
2. ชั่งในปริมาณที่ต้องการ
3. ใส่ครั่ง และจันทน์แดงในบีกเกอร์ อย่างละ 3 บีกเกอร์เพื่อเติมตัวทำละลาย Ethanol Acetone และ Acetonitrile อย่างละชนิด ปิดด้วย แผ่นพาราฟิล์มแช่ไว้ 24 ชั่วโมง
4. กรองสีข้อมที่ได้เพื่อทำการแช่ฟิล์ม  $\text{TiO}_2$



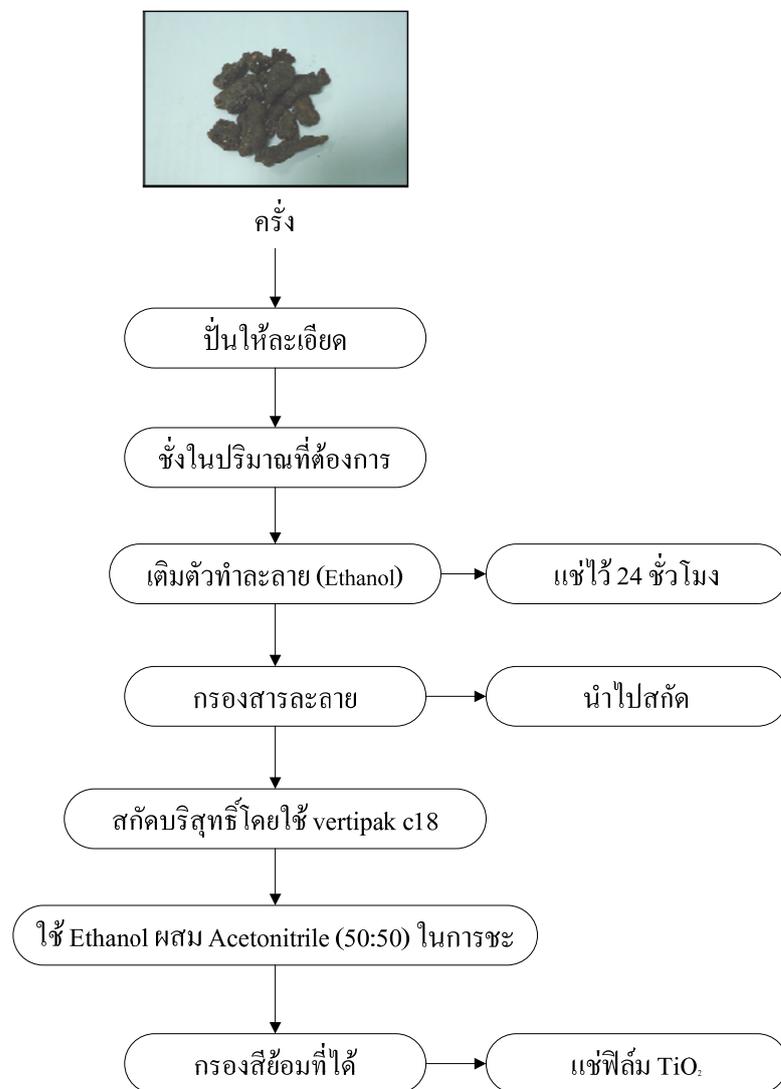
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมสีข้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 1

วิธีที่ 2 แสดงไว้ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9

1. นำผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ ได้แก่ ครั่ง ป่นให้ละเอียด
2. ซั่งในปริมาณที่ต้องการ
3. ใส่ครั่งในบีกเกอร์ เติมตัวทำละลาย Ethanol ปิดด้วย แผ่นพาราฟิล์มแช่ไว้ 24 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายเพื่อนำไปสกัด
5. ทำการสกัดบริสุทธิ์โดยใช้ Vertipak c18 (ดังรูปที่ 3.8) โดยใช้สีข้อมครั้งละ 5 มิลลิลิตร และใช้สาร Ethanol ผสม acetonitrile ในการชะ ครั่งละ 10 มิลลิลิตร
6. กรองสีข้อมที่ได้เพื่อทำการแชนฟิล์ม  $\text{TiO}_2$



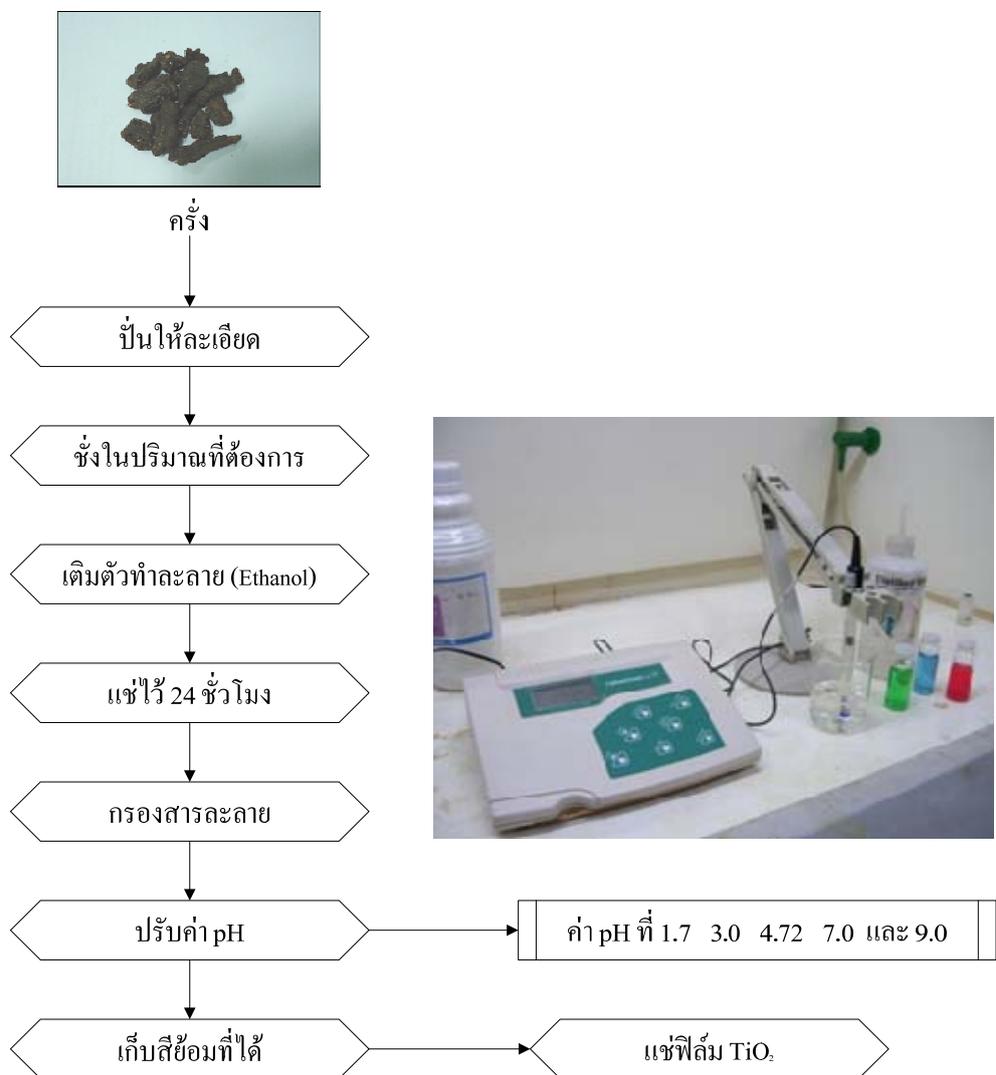
รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ (Purified)



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมสี้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 2

### วิธีที่ 3 แสดงไว้ดังรูปที่ 3.10

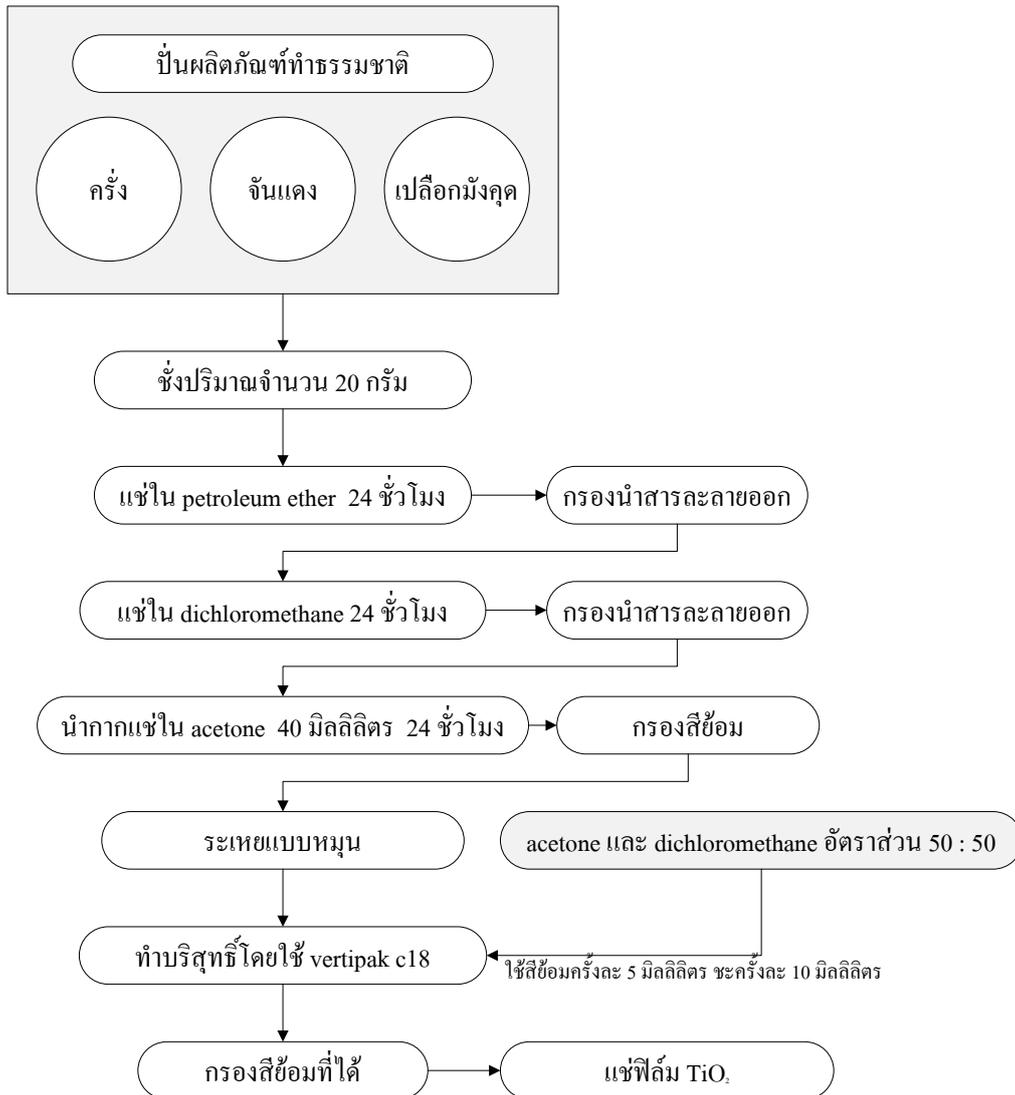
1. นำผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ ได้แก่ ครั่ง ปั่นให้ละเอียด
2. ชั่งในปริมาณที่ต้องการ
3. ใส่ครั่งในบีกเกอร์ เติมตัวทำละลาย Acetone ปิดด้วย แผ่นพาราฟิล์มแช่ไว้ 24 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายเพื่อปรับค่า pH
5. ทำการปรับค่า pH ที่ 1.7 3.0 4.72 7.0 และ 9.0 (4.72 คือค่า pH เดิม)
6. เก็บสีย้อมที่ได้เพื่อทำการแช่ฟิล์ม  $\text{TiO}_2$



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 3

**วิธีที่ 4** แสดงไว้ดังรูปที่ 3.11

1. ปั่นผลิตภัณฑ์ทำธรรมชาติ ได้แก่ ครั่ง จันแดง และเปลือกมังคุด
2. ชั่งปริมาณในอัตราส่วน 1 : 2 จำนวน 20 กรัม
3. แช่ใน Petroleum ether เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. กรองเพื่อนำสารละลายออก นำกากที่ได้แช่ใน Dichloromethane เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. กรองสี้อมเพื่อนำสารละลายออก
6. นำกากแช่ใน Acetone จำนวน 40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. กรองสี้อมเก็บไว้เพื่อทำการสกัดบริสุทธิ์
8. นำสี้อมที่ได้ทำการระเหยแบบหมุน
9. เตรียม Acetone และ Dichloromethane ผสมกันในอัตราส่วน 50 : 50 (จำนวน 50 มิลลิลิตร) เพื่อใช้ในการชะ ทำบริสุทธิ์โดยใช้ Vertipak c18
10. ใช้สี้อมครั้งละ 5 มิลลิลิตร สารที่ใช้ชะครั้งละ 10 มิลลิลิตร
11. กรองสี้อมที่ได้เพื่อทำการแช่ฟิล์ม  $\text{TiO}_2$

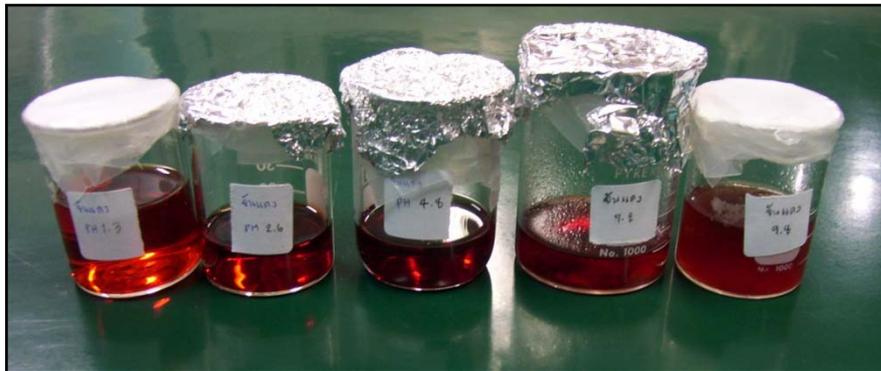


รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเตรียมสีข้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 4

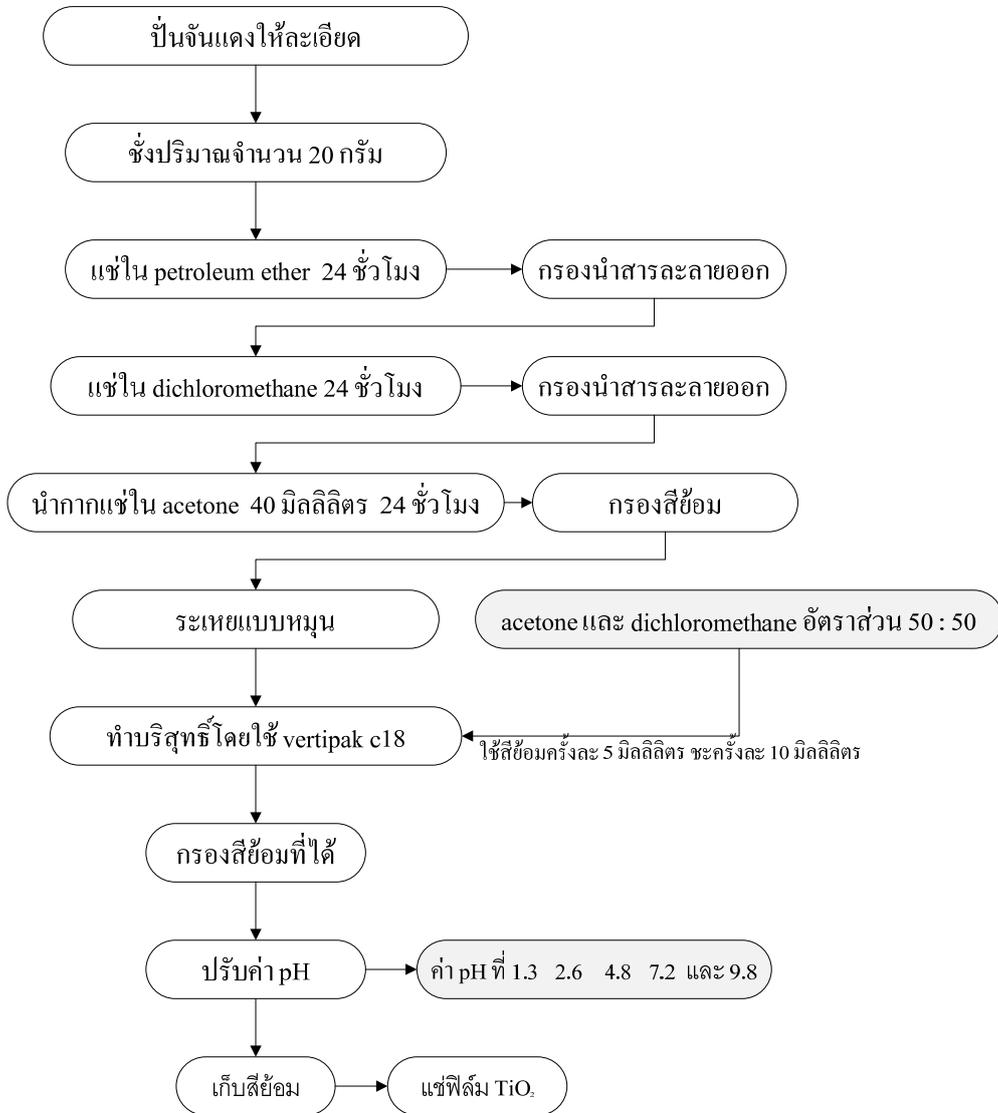
วิธีที่ 5 แสดงไว้ดังรูปที่ 3.12 และ 3.13

1. บดผลิตภัณฑ์ทำธรรมชาติ ได้แก่ จันแดง
2. ชั่งปริมาณในอัตราส่วน 1 : 2 จำนวน 20 กรัม
3. แช่ใน Petroleum ether เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. กรองเพื่อนำสารละลายออก นำกากที่ได้แช่ใน Dichloromethane เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. กรองสีข้อมเพื่อนำสารละลายออก
6. นำกากแช่ใน Acetone จำนวน 40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. กรองสีข้อมเก็บไว้เพื่อทำการสกัดบริสุทธิ์

8. นำสีข้อมที่ได้ทำการระเหยแบบหมุน
9. เตรียม Acetone และ Dichloromethane ผสมกันในอัตราส่วน 50 : 50 (จำนวน 50 มิลลิลิตร) เพื่อใช้ในการชะ ทำบริสุทธิ์โดยใช้ Vertipak c18
10. ใช้สีข้อมครั้งละ 5 มิลลิลิตร สารที่ใช้ชะครั้งละ 10 มิลลิลิตร
11. ทำการปรับค่า pH ที่ 1.3 2.6 4.8 7.2 และ 9.8 (4.8 คือค่า pH เดิม)
12. เก็บสีข้อมที่ได้เพื่อทำการแช่ฟิล์ม  $\text{TiO}_2$



รูปที่ 3.12 สีข้อมจันแดงที่ทำการปรับค่า pH



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการเตรียมสี้อมจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติวิธีที่ 5

### 3.3.4 เม็ดสีจากสีสังเคราะห์ (N 719)

นำสีสังเคราะห์ผสมกับ Ethanol เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับสี้อมที่ได้จากธรรมชาติ

### 3.3.5 การย้อมสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

1. สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ที่ถูกเตรียมไว้ในฟิล์มบาง จุ่มลงในสีย้อมที่ได้เตรียมไว้
2. นำสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ล้างด้วยสารละลาย Ethanol เพื่อเอาเม็ดสีส่วนที่ไม่ติดออกไป
3. ปลอ่ยให้แห้ง นำสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ไปตั้งบน Hot plate เพื่อไล่ความชื้น รอการประกอบเซลล์ต่อไป

#### 1. เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution)

เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วย NaI ความเข้มข้น 0.5 M สารละลาย  $I_2$  ความเข้มข้น 0.05 M  $Li_2CO_3$  ความเข้มข้น 0.5 M ใช้สารละลาย Acetonitrile 10 มิลลิลิตร เป็นตัวทำละลาย สารละลายที่ได้มีสีน้ำตาลเข้ม

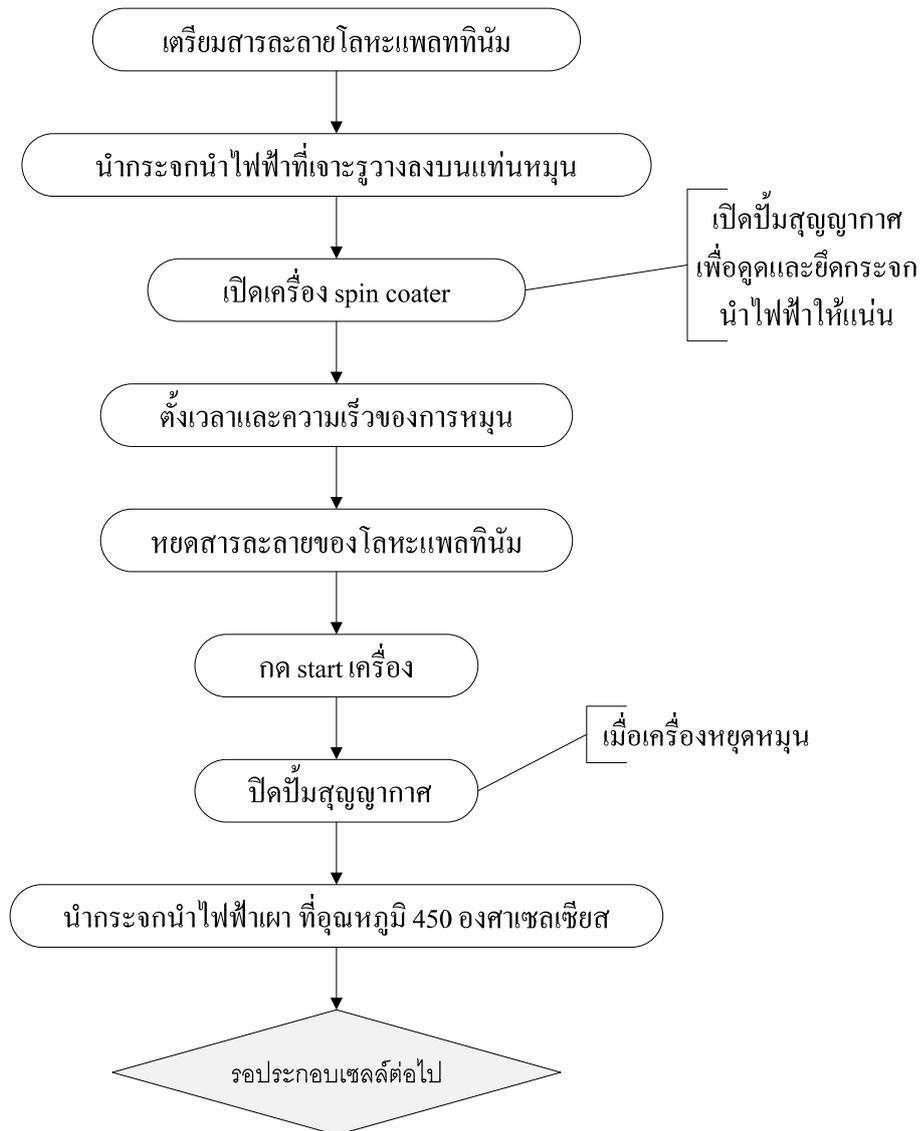
#### 2. การเตรียมขั้วไฟฟ้าบวก (Counter electrode)

วิธีที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15

1. เตรียมสารละลายโลหะ Pt ที่สามารถนำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยการเคลือบแบบวิธีสปิน
2. นำกระจกนำไฟฟ้าที่เจาะรูไว้วางลงบนแท่นหมุน ให้ด้านที่นำไฟฟ้าอยู่ด้านบน
3. เปิดเครื่อง Spin coater และเปิดปั๊มสุญญากาศ เพื่อดูดและยึดกระจกนำไฟฟ้าให้แน่น
4. ตั้งเวลาและความเร็วของการหมุนที่จะใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยขั้นแรก
5. หยดสารละลายของโลหะแพลทินัมที่เตรียมไว้ ลงบนผิวของกระจกนำไฟฟ้า
6. กด Start เครื่อง เมื่อเครื่องหยุดหมุน ปิดปั๊มสุญญากาศ และนำกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบออกมา
7. นำกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบเข้าเตาเผา ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เพื่อไล่สารอินทรีย์ ที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งจะได้ขั้วไฟฟ้าบวก (Counter electrode) และรอนำมาประกอบเป็นเซลล์ต่อไป



รูปที่ 3.14 เครื่อง Spin coating



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าบวก (Counter electrode) วิธีที่ 1

วิธีที่ 2 ขั้วคาร์บอนจากน้ำตาล แสดงดังรูปที่ 3.16, 3.17 และ 3.18

1. การเตรียมสารละลายทำการเตรียมสารละลายโดยผสม Sucrose ในน้ำ DI 50 มิลลิลิตร นำไปสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที
2. นำกระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมสำหรับทำขั้วบวกใส่ในกระบอกลูกไฮโดรเทอร์มอล เทสารละลายที่เตรียมไว้ลงไปและทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

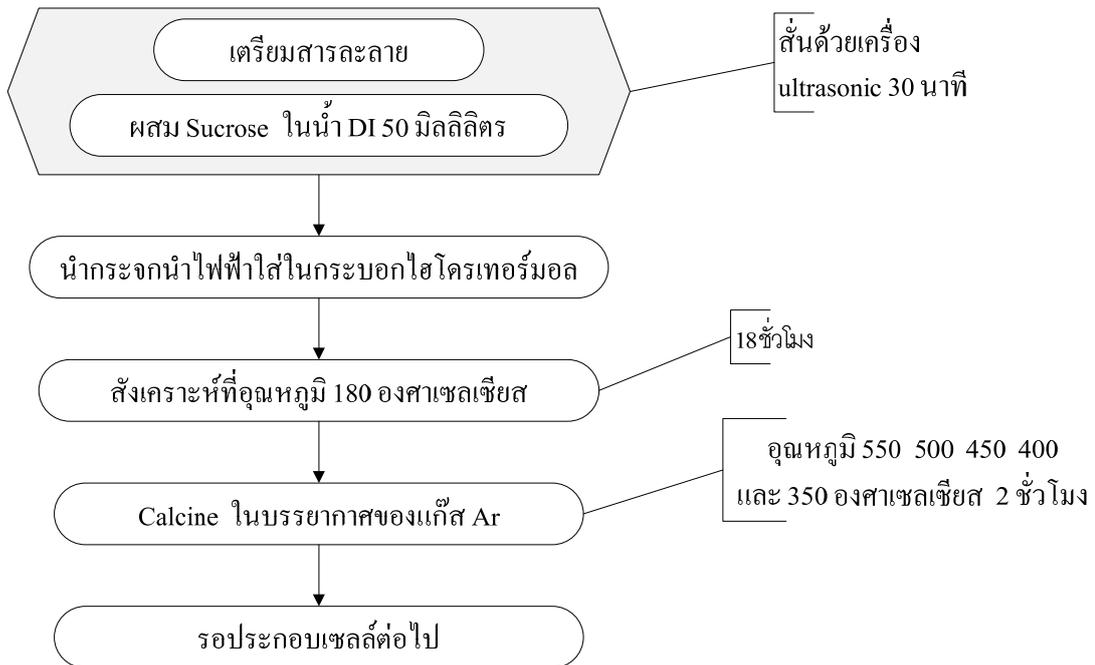
3. นำกระจกที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไป Calcine ในบรรยากาศของแก๊ส Ar ที่อุณหภูมิ 550 500 450 400 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่สารที่ไม่จำเป็นออก



รูปที่ 3.16 Sucrose หลังการเผาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.17 กระจกนำไฟฟ้าสำหรับทำขั้วบวกหลังจากเผาที่บรรยากาศของ Ar

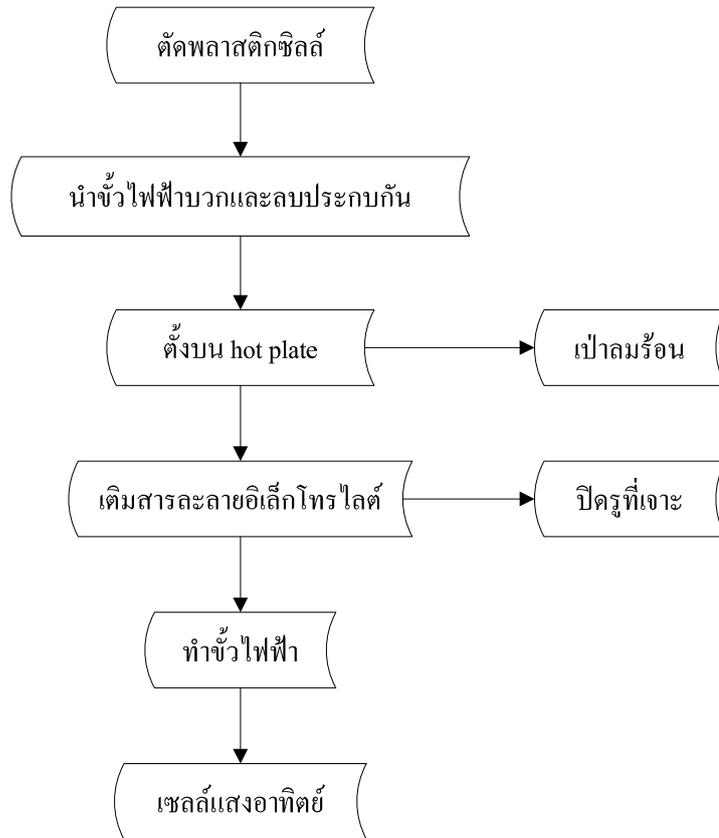


รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าบวก (Counter Electrode) วิธีที่ 2

### 3.3.6 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีขั้นตอนดังนี้ และแสดงไว้ดังแผนผังที่ 3.19

1. นำแผ่นพลาสติกซิลิโคนมาตัดโดยเว้นสี่เหลี่ยมช่องตรงกลางไว้
2. นำขั้วไฟฟ้าลบ (Working electrode) หรือขั้วอาร์โนด และขั้วไฟฟ้าบวก (Counter electrode) หรือขั้วคาร์โทด มาประกอบให้ยึดติดกัน
3. นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มาตั้งบน Hot plate และใช้เครื่องเป่าลมร้อนเป่าให้แผ่นพลาสติกซิลิโคนละลายติดกับกระจก
4. การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำโดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกแล้วให้สารละลายเข้าไปแทนที่อากาศ
5. ปิดรูที่เจาะไว้ด้วยแผ่นพลาสติกซิลิโคน และใช้เศษกระจกธรรมดาติด แล้วให้ความร้อนเพื่อให้แผ่นพลาสติกละลาย
6. ทำขั้วไฟฟ้าให้เซลล์แสงอาทิตย์
7. นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปวัดประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 3.19 แสดงขั้นตอนการประกอบเซลล์

### 3.4 ขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1. นำขั้วสำหรับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเข้ากับเซลล์ที่ประกอบเสร็จแล้ว
2. นำเซลล์เข้าในเครื่องทดสอบประสิทธิภาพ (Solar simulator)
3. เปิดเครื่องวัดประสิทธิภาพ วัดความต่างศักย์วงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์
4. บันทึกข้อมูลและคำนวณหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 3.4.1 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ในที่นี้ถูกสร้างขึ้นโดย ศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีแหล่งกำเนิดแสงซึ่งได้จากหลอดฮาโลเจน (Halogen) ขนาดกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ จำนวน 6

หลอด ทำการวัดที่ความเข้มแสง 500 เวเบอร์ต่อตารางเมตร (วัดโดยใช้ Lux meter ที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร) ส่วนระบบวัดความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า (J – V) ใช้ระบบที่ติดตั้งขึ้นเอง โดยวัดผ่านการวัดอินเทอร์เฟซของบริษัท Instrument (Lab view) โดยเขียน Software เพื่อควบคุมโดยใช้โปรแกรม Visual basic 6.0 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และตัวแปรต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงความสัมพันธ์ ต่อไปนี้

$$\eta = \frac{P_m}{P_s} = \frac{J_m V_m}{P_s} \times 100 \dots\dots\dots(3.1)$$

- เมื่อ  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (ร้อยละ)
- $P_m$  คือ กำลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (วัตต์)
- $P_s$  คือ กำลังงานของแสงที่ตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ (วัตต์)
- $J_m$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (มิลลิแอมป์)
- $V_m$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (โวลต์)

เราสามารถนิยามค่า Fill Factor ได้ตามสมการ

$$FF = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} \dots\dots\dots(3.2)$$

- โดยที่ FF คือ ค่า Fill Factor
- $J_{sc}$  คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current density) (มิลลิแอมป์)
- $V_{oc}$  คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรมเปิด (Open circuit voltage) (โวลต์)

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) จะสามารถเขียนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ในเทอมของค่า Fill Factor ได้ดังสมการที่ (3.3)

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_s} \dots\dots\dots(3.3)$$

ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open – circuit voltage ( $V_{oc}$ )) เป็นความต่างศักย์คร่อมขั้วของเซลล์สุริยะเมื่อวงจรภายนอกเปิด นั่นคือเมื่อไม่มีอะไรมาต่อคร่อมขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเหมือนกับมีความต้านทานอนันต์ต่อคร่อมขั้ว เรียก  $V_{oc}$  ว่าความต่างศักย์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic voltage)

### 3.5 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม

การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่สกัดได้ ทำได้โดยใช้เครื่อง UV-visible spectroscopy (SHIMADZU, UV-160A) โดยทำการปิเปตสารละลายแต่ละสีมา 25 ไมโครลิตร เจือจางด้วยตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด 10 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใส่สารละลายที่เจือจางลงในคิวเวทมาตรฐาน (Standard cuvette) ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 800 นาโนเมตรตามลำดับ

#### 3.5.1 UV-visible spectroscopy

ส่วนประกอบของเครื่อง Spectrophotometer แสดงดังรูปที่ 3.20 เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม ค่า Transmission ที่วัดได้สามารถเป็นตัวบ่งบอกความหนาของฟิล์ม อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์หาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) ได้ด้วย ในการวัด Transmission จะวัดโดยใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 – 900 nm โดยใช้เครื่อง UV-visible spectroscope เมื่อความเข้ม  $I_0$  ผ่านแผ่นฟิล์มที่มีความหนา  $t$  และความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาจากฟิล์มวัดได้เป็น  $I$  ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \dots\dots\dots(3.4)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ Absorption coefficient

$t$  คือ ความหนาของฟิล์ม

$I$  คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาจากฟิล์ม

$I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ผ่านแผ่นฟิล์ม

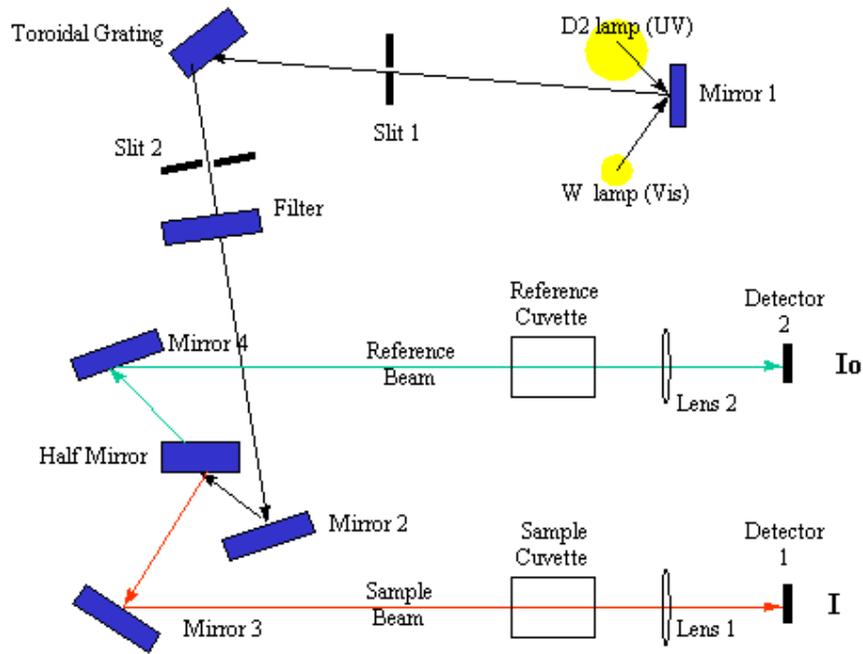
และจะสามารถหาค่า % Transmission จากนิยาม

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha t} \dots\dots\dots(3.5)$$

เมื่อ  $T$  คือ การส่งผ่านของแสงผ่านสารละลาย

และ

$$\alpha = \left( \frac{-\ln T}{t} \right) \dots\dots\dots(3.6)$$



รูปที่ 3.20 ส่วนประกอบของเครื่อง Spectrophotometer [13]

### 3.6 การหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากสีย้อมแบคทีเรีย

การหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน จากสีย้อมของแบคทีเรีย โดยการสร้างแบบจำลองโครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรีย แต่ละชนิดเพื่อ Run โปรแกรมบนลินุกซ์ แล้วนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแบคทีเรียแต่ละชนิด

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

บทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับผลการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ 4 ประเภท จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ จันแดง ขมิ้น ครั่ง เปลือกมังคุด ลูกหว่า ไบยอ และใบสบประรด ชนิดละ 4 เซลล์ และเตรียมเซลล์จากสีย้อมสังเคราะห์ชนิด N719 จำนวน 1 เซลล์ และวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด ค่ากระแสลัดวงจร ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้ ตลอดจนผลการวิเคราะห์ผลการทดลองที่จะกล่าวในรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม

จากการสกัดสีย้อมจากธรรมชาติจำนวน 4 ประเภท สามารถสรุปผลการสกัด และค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมแต่ละชนิดดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

##### ตารางที่ 4.1 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมแต่ละชนิด

ชนิดที่	สีย้อม	สกัดด้วย	สีที่ได้	ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด
1	จันแดง	Acetone (Pure)*	แดงอ่อน	450 nm
		Ethyl alcohol	แดง	500 nm
		Acetone	แดง	500 nm
		Acetonitrile	แดง	450 nm
2	ครั่ง	Ethyl alcohol	แดง	445 nm
		Acetone	แดง	440 nm
3	เปลือกมังคุด	Acetone (Pure)*	เหลืองอ่อน	น้อยกว่า 400 nm
4	ลูกหว่า	Ethyl Alcohol	ม่วงเข้ม	550 nm
5	ใบสบประรด	Ethyl Alcohol	เขียวอ่อน	420 nm 440 nm
6	ไบยอ	Ethyl Alcohol	เขียวเข้ม	420 nm 670 nm
7	ขมิ้น	Ethyl Alcohol	เหลือง	450 nm

\* ใช้ Acetone เป็นตัวทำละลายทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนของสีย้อมจากไม้จันทน์แดง และครั้งที่ค่า pH ต่างๆ

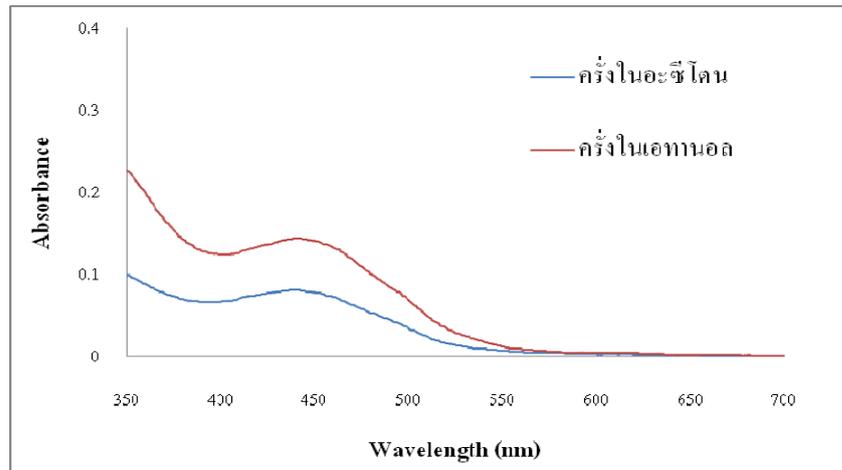
ชนิดของสีย้อม	สกัดด้วย	ค่า pH	ค่าการดูดกลืนแสง สูงสุด
จันทน์แดง	Acetone (Pure)*	1.3	450 nm 465 nm
		2.6	460 nm
		4.8	450 nm 460 nm
		7.2	450 nm
		9.8	450 nm
ครั่ง	Acetone	1.7	450 nm
		3.0	450 nm
		4.72	450 nm
		7.0	450 nm
		9.0	465 nm 550 nm

\* ใช้ Acetone เป็นตัวทำละลายทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether

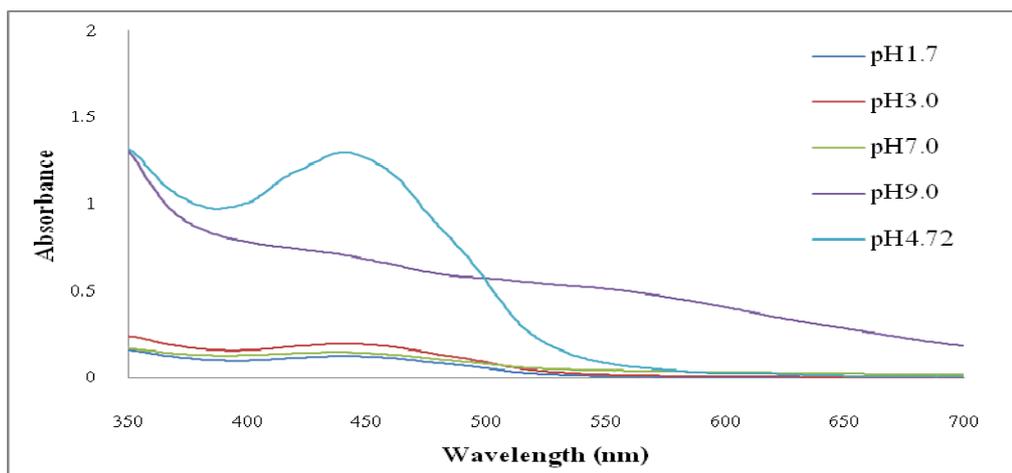
จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมในช่วง UV Visible พบว่าส่วนใหญ่จะดูดกลืนสูงสุดที่ 450 นาโนเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสีย้อมแต่ละชนิดสามารถแสดงในรูปกราฟดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 4.1 กราฟการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากครั่งที่สกัดจาก Ethyl alcohol และ Acetone ได้เป็นสีแดงพบว่าครั่งที่สกัดด้วย Ethyl alcohol มีค่าการดูดกลืนมากกว่าสีย้อมจากครั่งที่สกัดด้วย Acetone ที่ความยาวคลื่น 445 นาโนเมตร และ 440 นาโนเมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 กราฟการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากครั่งที่สกัดจากอะซีโตนที่ pH 1.7 pH 3.0 pH 4.72 pH 7.0 และ pH 9.0 พบว่าสีย้อมจากครั่งที่สกัดด้วย Acetone ที่ค่า pH 4.72 จะดูดกลืนมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร แต่เมื่อปรับค่า pH ให้เพิ่มขึ้นและลดลงความสามารถในการดูดกลืนแสงของสีย้อมจะลดลงเนื่องจากมีสีที่จางลงกว่าเดิมทั้งปรับและลดค่า pH



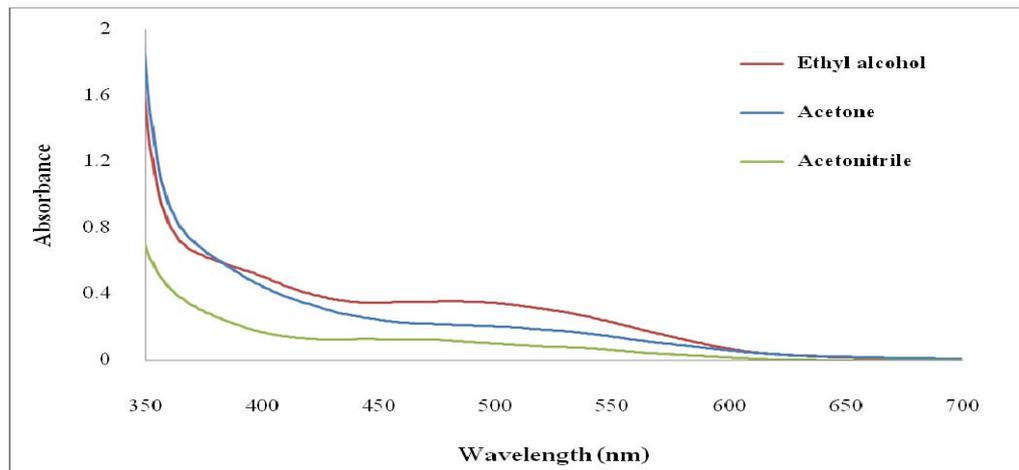
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากครั้งที่สกัดจาก Ethyl alcohol และ Acetone



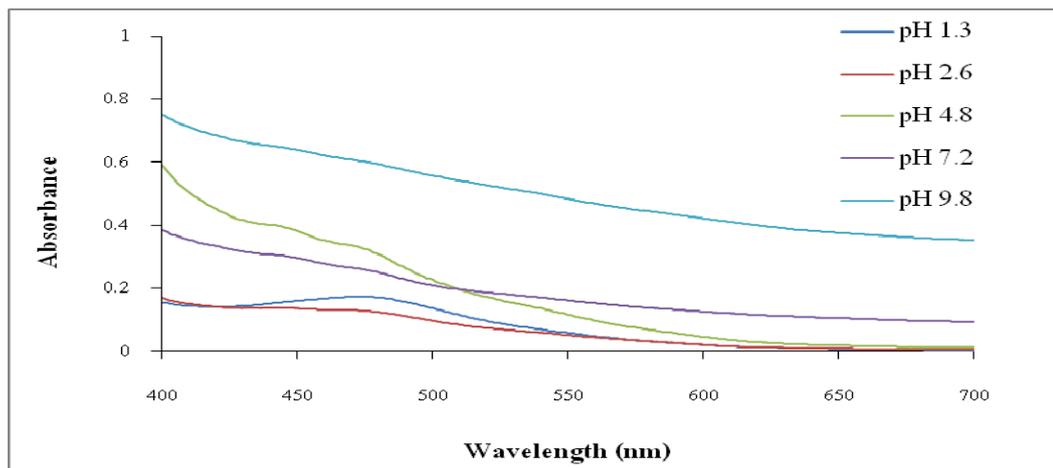
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากครั้งที่สกัดจากอะซิโตนที่ pH 1.7 pH 3.0 pH 4.72 pH 7.0 และ pH 9.0 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.3 กราฟการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากไม้จันทน์แดงที่สกัดจาก Ethyl alcohol Acetone และ Acetonitrile พบว่าสีย้อมจากไม้จันทน์แดงที่สกัดด้วย Ethyl alcohol มีค่าการดูดกลืนมากกว่าสีย้อมที่ถูกล้างด้วย Acetone และ Acetonitrile ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร จากรูปที่ 4.4 กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากไม้จันทน์แดงที่สกัดจาก Acetone สกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether ที่ pH 1.3 pH 2.6 pH 4.8 pH 7.2 และ pH 9.8 เมื่อเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากไม้จันทน์แดงพบว่าที่ค่า pH 4.8

จะดูดกลืนมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร แต่เมื่อปรับค่า pH ให้เพิ่มขึ้นและลดลง ความสามารถในการดูดกลืนแสงของสีย้อมจะลดลงเนื่องจากความแตกต่างของสีย้อมที่ได้เมื่อทำการปรับค่า pH คือ ปรับค่า pH ลดลงสีที่ได้จะจางกว่าเดิม แต่เมื่อทำการเพิ่มค่า pH จะส่งผลให้สีย้อมที่ได้เป็นไขมันใสๆ ปะปนอยู่ในสีย้อมด้วย

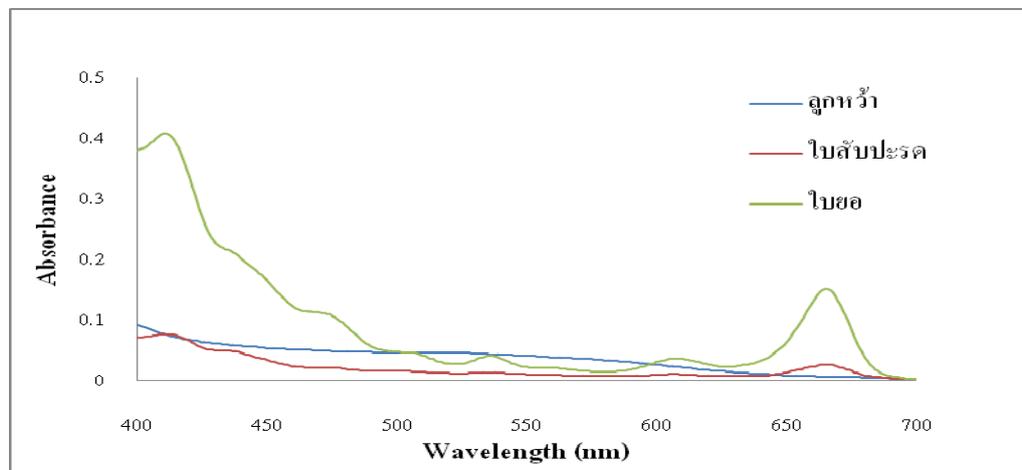


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากไม้จันทน์แดงที่สกัดจาก Ethyl alcohol acetone และ Acetonitrile



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากไม้จันทน์แดงที่สกัดจาก Acetone ที่ค่า pH 1.3 pH 2.6 pH 4.8 pH 7.2 และ pH 9.8 ตามลำดับ

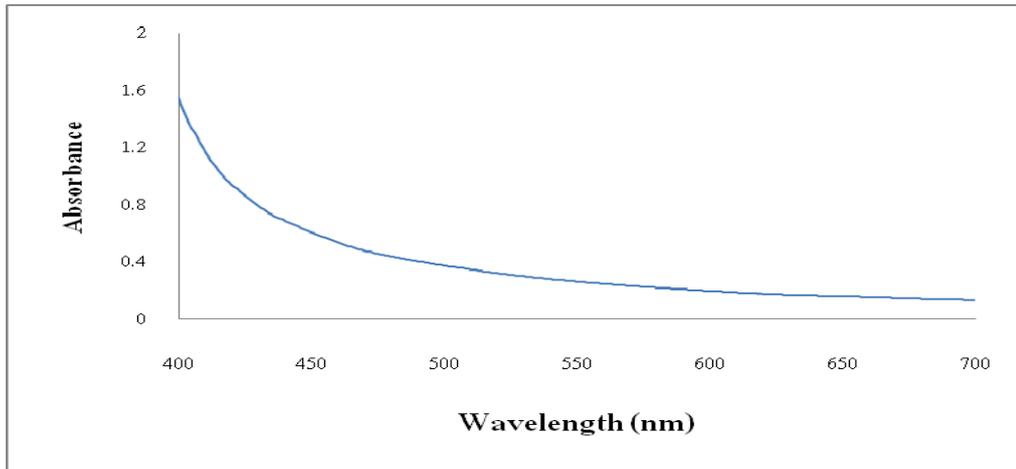
จากรูปที่ 4.5 สเปกตรัมกราฟการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากลูกหว่า ไบลับประรด และ ไบยอ ที่สกัดจาก Ethyl alcohol พบว่าสีย้อมจากลูกหว่าซึ่งมีสีม่วงเข้ม จะประกอบด้วยสารแอนโทไซยานิน มีค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 540 นาโนเมตร สำหรับไบยอจะมีการดูดกลืนที่ทุกๆ ความยาวคลื่นเนื่องจากมีสีเขียวเข้ม ซึ่งมาจากปริมาณของคลอโรฟิลล์ ในพืชสีเขียว แต่สีย้อมจากไบลับประรดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร เนื่องจากปริมาณคลอโรฟิลล์ที่พบน้อยเพราะมีสีเขียวอ่อน



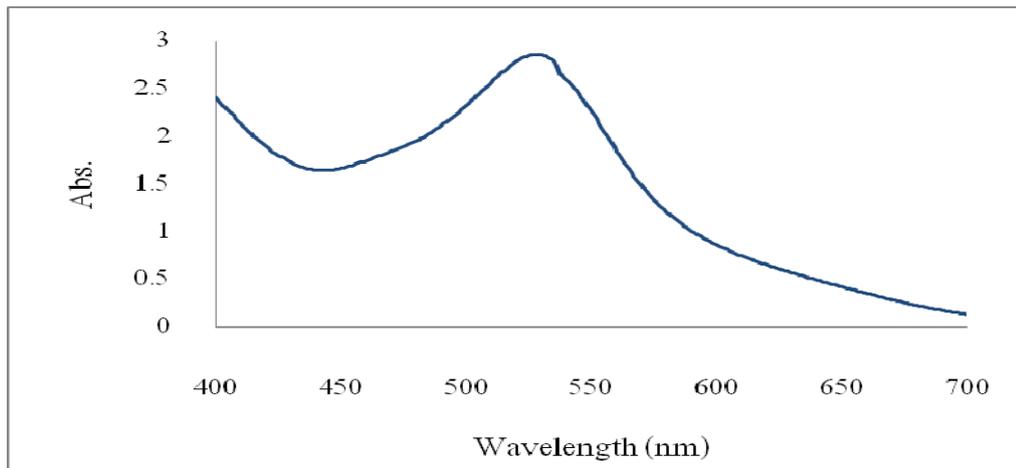
**รูปที่ 4.5** สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากลูกหว่า ไบลับประรด และไบยอ ที่สกัดจาก Ethyl Alcohol

จากรูปที่ 4.6 สเปกตรัมกราฟการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากเปลือกมังคุดที่สกัดจาก Acetone สกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether พบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตร ซึ่งน้อยกว่าสเปกตรัมที่ต้องการสำหรับประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

จากรูปที่ 4.7 สเปกตรัมกราฟการดูดกลืนแสงของสีย้อมสังเคราะห์ Dye N 719 พบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 530 นาโนเมตร



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีข้อมจากเปลือกมังคุดที่สกัดจาก Acetone



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีข้อมสังเคราะห์ Dye N 719

#### 4.2 แสดงผลของค่าของการวัด ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อม

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดง เมื่อพิจารณาพบว่าสีย้อมจากไม้จันทน์แดง ควรใช้วิธีการสกัดโดยใช้ Acetone เป็นตัวทำละลายทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether เพราะจะให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดร้อยละ 1.471

#### ตารางที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดง

สารที่ใช้	$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	$V_{oc} / \text{V}$	Fill Factor	Efficiency (%)
Acetone	2.387	0.434	0.633	0.655
Ethyl Alcohol	2.360	0.418	0.592	0.583
Acetonitrile	2.209	0.400	0.599	0.525
Acetone (Pure)*	7.832	0.392	0.477	1.471

\* ใช้ Acetone เป็นตัวทำละลายทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากครึ่ง เมื่อพิจารณาพบว่าสีย้อมจากครึ่งควรใช้วิธีการสกัดโดยใช้ Acetone แบบไม่ต้องสกัด เพราะจะให้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุดร้อยละ 0.627

#### ตารางที่ 4.4 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากครึ่ง

สารที่ใช้	$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	$V_{oc} / \text{V}$	Fill Factor	Efficiency (%)
Acetone	2.385	0.423	0.628	0.627
Ethyl Alcohol	0.375	0.522	0.702	0.137
Acetone (Pure)*	1.090	0.395	0.637	0.267

\* ใช้ Acetone เป็นตัวทำละลายทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากเปลือกมังคุด เมื่อพิจารณาพบว่าประสิทธิภาพที่ได้ยังมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดง ที่ร้อยละ 0.799

**ตารางที่ 4.5** ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากเปลือกมังคุด สกัดด้วยวิธีทำบริสุทธิ์โดยใช้ Acetone และ Dichloromethane

ประเภทของสีย้อม	$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	$V_{oc} / \text{V}$	Fill Factor	Efficiency (%)
เปลือกมังคุด	2.649	0.463	0.625	0.769

จากตารางที่ 4.6 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากจันทน์แดง ปรับค่า pH สกัดจาก Acetone ด้วยวิธีทำบริสุทธิ์ (Pure) พบว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดงจะมีค่าสูงสุดที่ค่า pH 4.8 ซึ่งเป็นค่า pH เดิมของสีย้อมไม้จันทน์แดง โดยใช้ Acetone เป็นตัวทำละลายทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum ether หากมีการลดหรือเพิ่มค่า pH จะส่งผลให้ค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดง ปรับค่า pH สกัดจาก Acetone ด้วยวิธีทำบริสุทธิ์

ค่า pH	$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	$V_{oc} / \text{V}$	Fill Factor	Efficiency (%)
1.3	2.514	0.398	0.598	0.602
2.6	1.671	0.417	0.628	0.442
4.8*	3.457	0.449	0.603	0.935
7.2	0.629	0.451	0.532	0.148
9.8	0.347	0.458	0.604	0.094

\* ค่า ph เดิม

จากตารางที่ 4.7 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากครั่ง ปรับค่า pH สกัดจาก Acetone พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากครั่งจะมีค่าสูงสุดที่ค่า pH 4.72 ซึ่งเป็นค่า pH เดิมของสีย้อมจากครั่ง โดยใช้ Acetone หากมีการลดหรือเพิ่มค่า pH จะส่งผลให้ค่าของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง

**ตารางที่ 4.7** ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากครั่ง ปรับค่า pH สกัดจาก Acetone

ค่า pH	$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	$V_{oc} / \text{V}$	Fill Factor	Efficiency (%)
1.7	1.108	0.319	0.631	0.224
3.0	1.335	0.344	0.611	0.278
4.72*	3.279	0.423	0.590	0.821
7.0	0.821	1.143	0.433	0.622
9.0	0.367	0.352	0.555	0.077

\* ค่า pH เดิม

จากตารางที่ 4.8 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจาก ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น สกัดจาก Ethyl Alcohol พบว่าสีย้อมจากลูกหว้าที่ประกอบด้วยสารแอนโทไซยานินสามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพร้อยละ 0.522 ใบยอร้อยละ 0.238 ขมิ้นร้อยละ 0.206 ใบสับปะรดร้อยละ 0.174 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.9 ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดงโดยผสมกับ ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น ตามลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมไม้จันทน์แดง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมไม้จันทน์แดงที่ผสมกับสีย้อมจากใบสับปะรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุดจากร้อยละ 0.174 เป็นร้อยละ 0.914

**ตารางที่ 4.8** ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจาก ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น สกัดจาก Ethyl alcohol

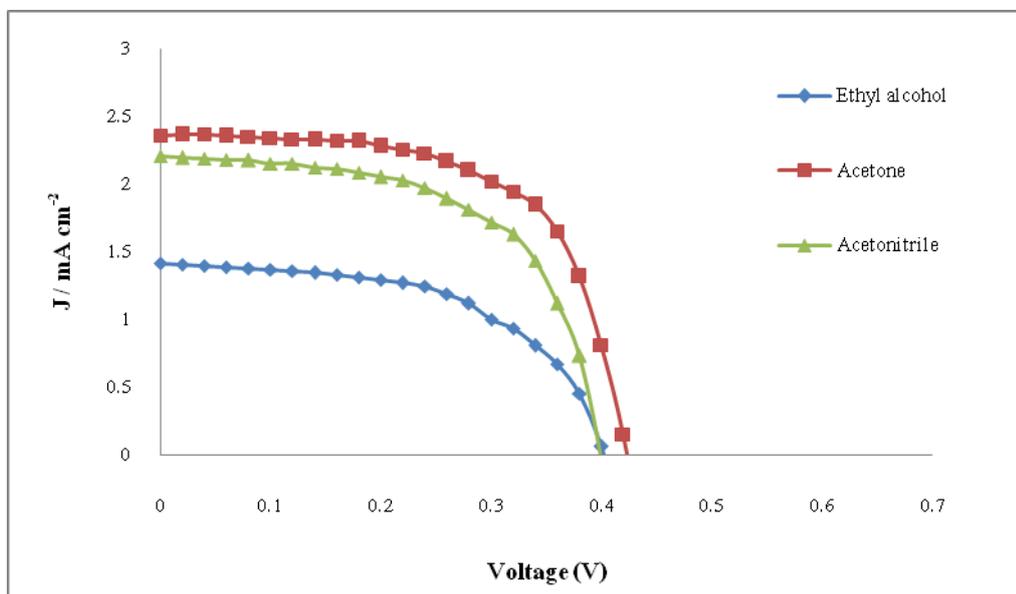
ประเภทสีย้อม	$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	$V_{oc} / \text{V}$	Fill Factor	Efficiency (%)
ลูกหว้า	1.643	0.465	0.683	0.522
ใบยอ	0.651	0.495	0.739	0.238
ใบสับปะรด	0.572	0.487	0.623	0.174
ขมิ้น	0.637	0.501	0.646	0.206

**ตารางที่ 4.9** ค่าความต่างศักย์ ค่ากระแส ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดงโดยผสมกับ ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น ตามลำดับ

ประเภทสีย้อม	$J_{sc} / \text{mA cm}^{-2}$	$V_{oc} / \text{V}$	Fill Factor	Efficiency (%)
ไม้จันทน์แดง	1.886	0.465	0.668	0.586
ไม้จันทน์แดงกับลูกหว้า	2.972	0.480	0.594	0.848
ไม้จันทน์แดงกับใบยอ	0.697	0.509	0.734	0.261
ไม้จันทน์แดงกับใบสับปะรด	2.937	0.482	0.645	0.914
ไม้จันทน์แดงกับขมิ้น	2.480	0.464	0.654	0.757

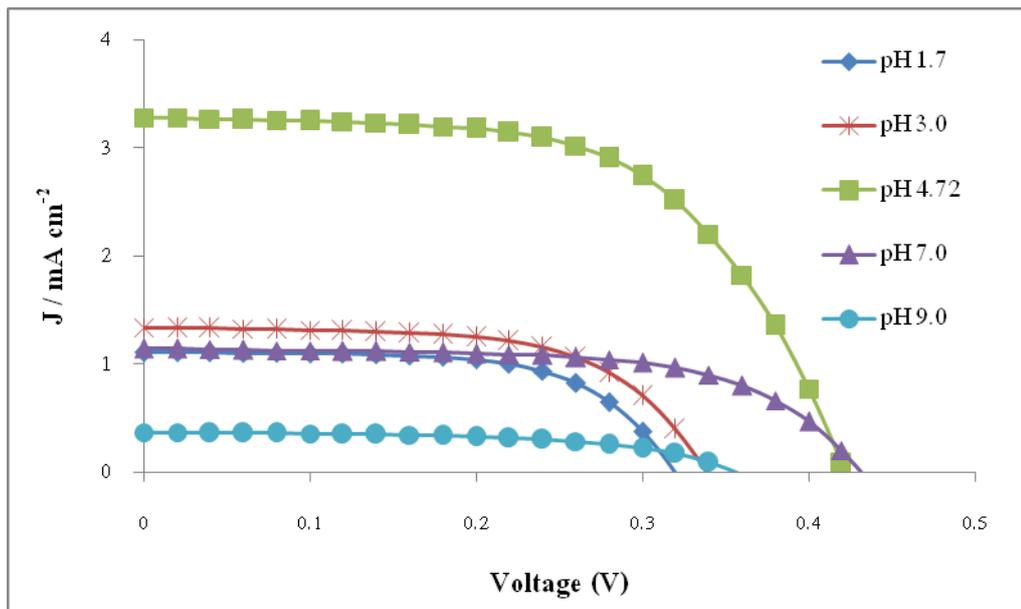
#### 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของสีย้อมจากครั้งที่สกัดด้วย Acetone ethyl alcohol และ Acetonitrile พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมครั้งที่สกัดด้วย Acetone มีค่าสูงสุดร้อยละ 0.627 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 2.385 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์ 0.423 โวลต์ ฟิลแฟกเตอร์ 0.628 ซึ่งเป็นวิธีที่สกัดเหมาะสำหรับครั้งเพื่อนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากครั้ง



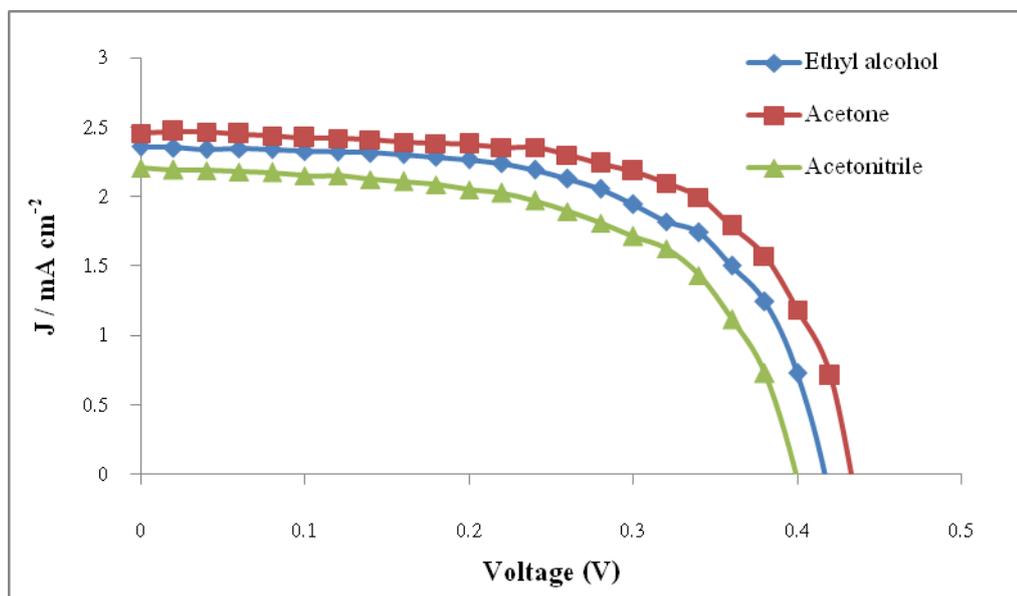
**รูปที่ 4.8** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสีย้อมจากครั้งที่สกัดด้วย Acetone ethyl alcohol และ Acetonitrile

จากรูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของสีย้อมจากครั้งที่ ค่า pH 1.7 pH 3.0 pH 4.72 pH 7.0 และ pH 9.0 ตามลำดับ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากสีย้อมครั้งจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่า pH 4.72 แต่เมื่อทำการเพิ่มหรือลดค่า pH ของสีย้อมจะส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง



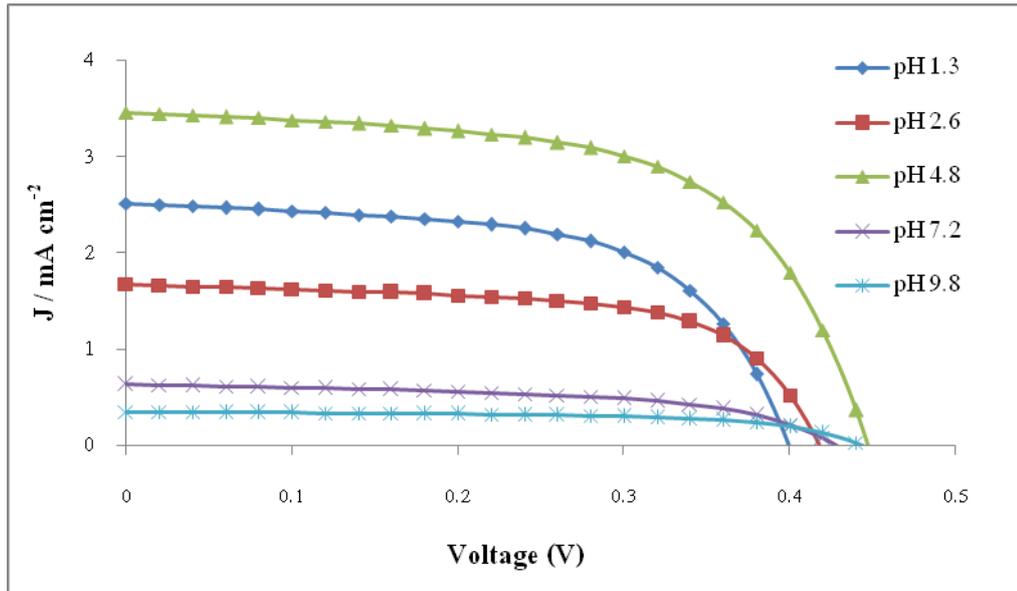
**รูปที่ 4.9** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสีย้อมจากครั้งที่ ค่า pH 1.7 pH 3.0 pH 4.72 pH 7.0 และ pH 9.0

จากรูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของสีย้อมจากไม้จันทน์แดงที่สกัดด้วย Acetone ethyl alcohol และ Acetonitrile พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมไม้จันทน์แดงที่สกัดด้วย Acetone มีค่าสูงสุดร้อยละ 0.655 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 2.387 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความต่างศักย์ 0.434 โวลต์ ฟิลแฟกเตอร์ 0.633 ซึ่งเป็นวิธีที่สกัดเหมาะสมสำหรับไม้จันทน์แดงเพื่อนำไปพัฒนาเพื่อประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดงต่อไป



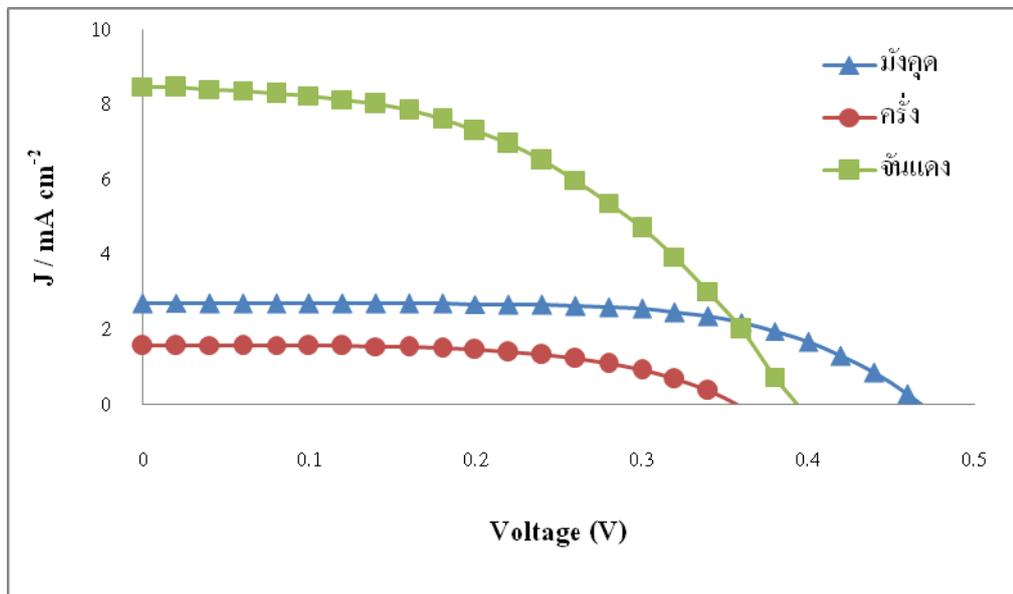
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสีย้อมจากไม้จันทน์แดงที่สกัดด้วย Acetone ethyl alcohol และ Acetonitrile

จากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของสีย้อมจากครั้งที่ ค่า pH 1.3 pH 2.6 pH 4.8 pH 7.2 และ pH 9.8 ตามลำดับ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากสีย้อมไม้จันทน์แดงจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่า pH 4.8 แต่เมื่อทำการเพิ่มหรือลดค่า pH ของสีย้อมจะส่งผลให้ประสิทธิภาพพลดลง



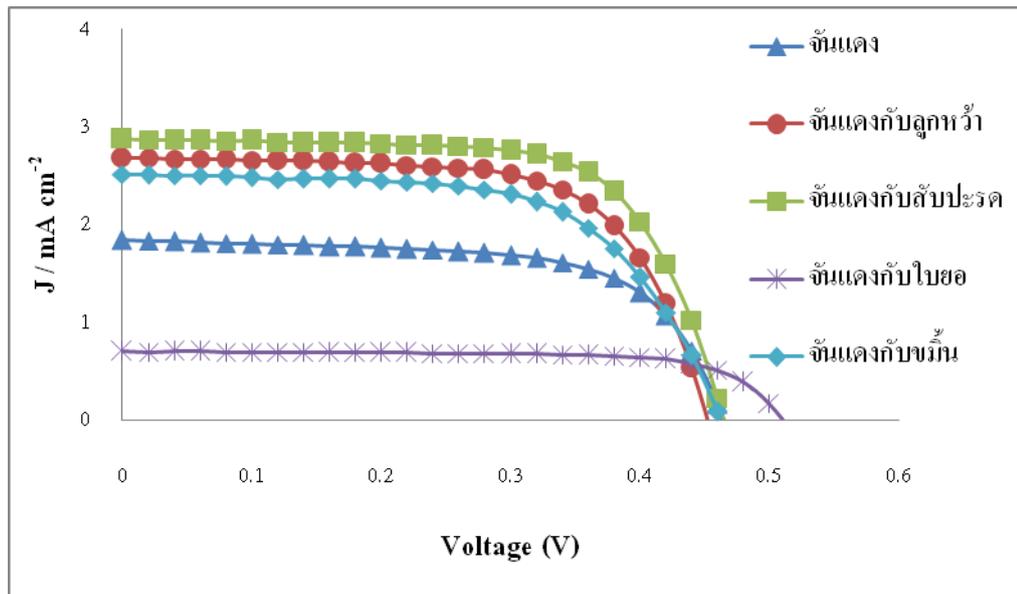
**รูปที่ 4.11** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสีย้อมจากไม้จันทน์แดงที่ค่า pH 1.3 pH 2.6 pH 4.8 pH 7.2 และ pH 9.8

จากรูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของสีย้อมจากไม้จันทน์แดง ครั่ง และเปลือกมังคุด ด้วยวิธีสกัดแบบบรีสุทธี พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมจากไม้จันทน์แดง เปลือกมังคุด ครั่ง เท่ากับร้อยละ 1.471 0.769 และ 0.267 ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมไม้จันทน์แดงได้มากที่สุด เนื่องจากประกอบด้วยรงควัตถุซานทาลิน (Santalin) ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญจากไม้จันทน์แดง และได้ทำการสกัดไขมันในขั้นตอนการทำบรีสุทธีส่งผลให้ประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มมากขึ้น



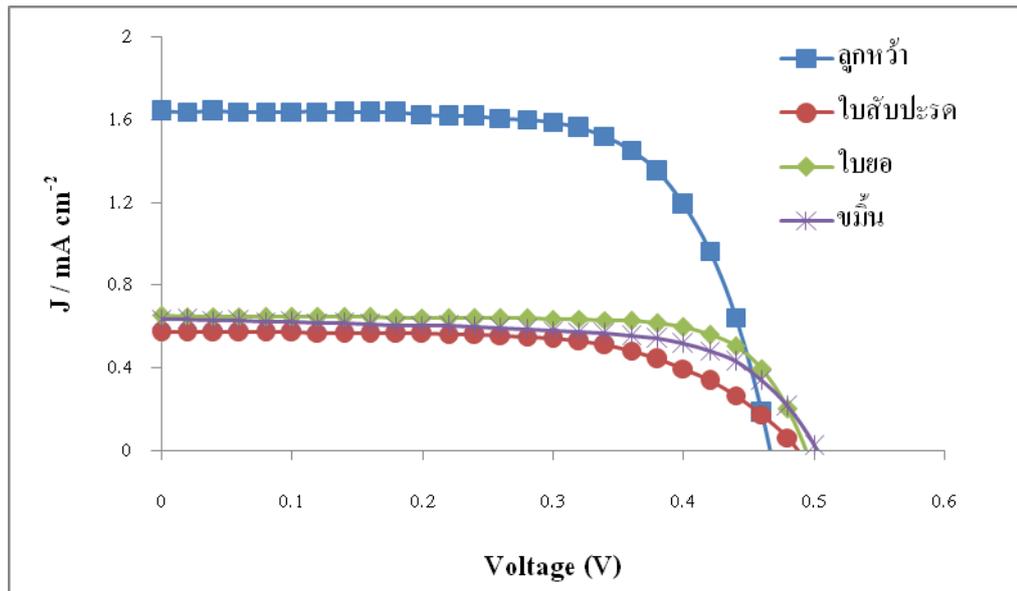
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของสีย้อมจากไม้จันทน์แดง ครั่ง และเปลือกมังคุด ด้วยวิธีสกัดแบบบรีสุทธี

จากรูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดงโดยผสมกับ ลูกหว้า ไบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมไม้จันทน์แดง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมไม้จันทน์แดงที่ผสมกับสีย้อมจากใบสับปะรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุดจากร้อยละ 0.586 เป็นร้อยละ 0.914



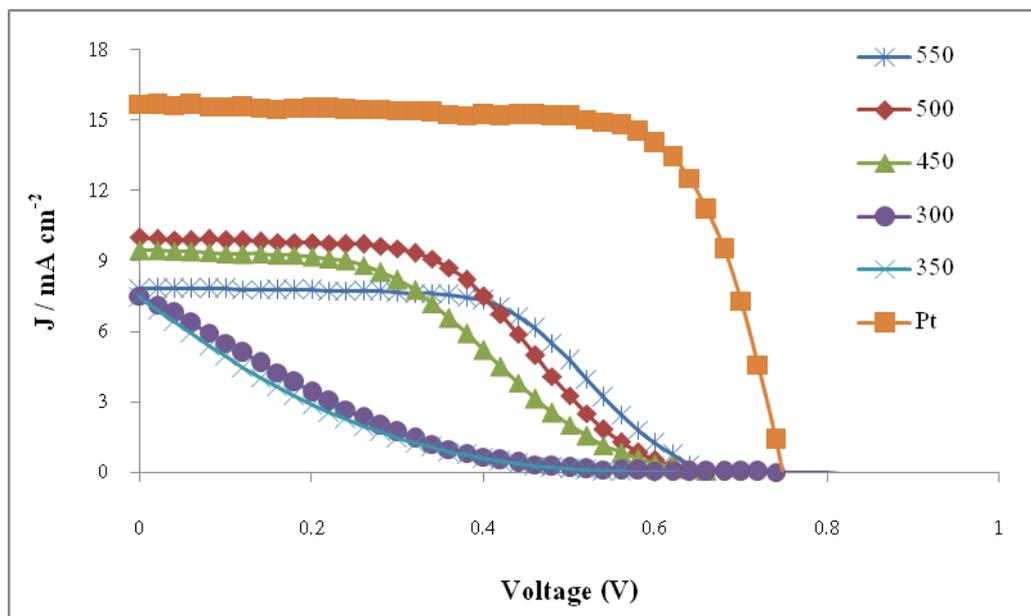
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากไม้จันทน์แดงโดยผสมกับ ลูกหว้า ไบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น

จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจาก ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมเหล่านี้ แล้วนำไปผสมกับสีย้อมจากไม้จันทน์แดง



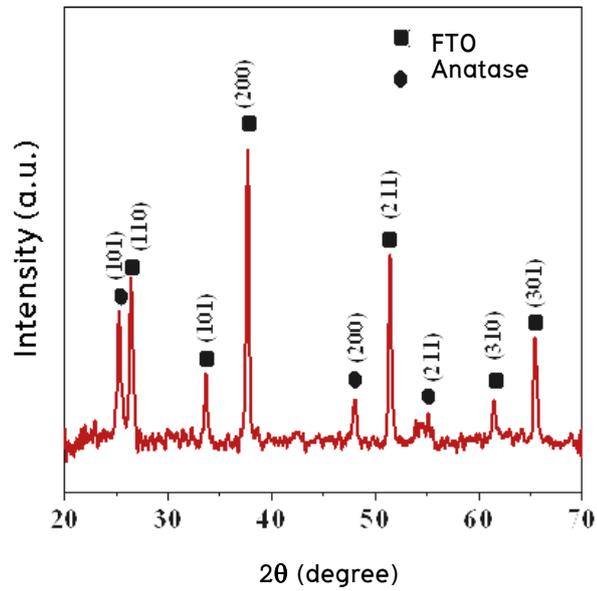
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจาก ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยใช้ขั้วไฟฟ้าบวก จากการสังเคราะห์จากซูโครสที่อุณหภูมิต่าง ๆ และจากแพลทตินัม พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยใช้ขั้วบวกจากแพลทตินัมจะมีค่าสูงสุด หากใช้ขั้วไฟฟ้าบวกจากการสังเคราะห์จากซูโครส ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด แต่เมื่อทำการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพจากเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าลดลงจากเดิม



**รูปที่ 4.15** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยขั้วไฟฟ้าบวก จากการสังเคราะห์จากซูโครสที่อุณหภูมิต่าง ๆ และจากแพลทตินัม

#### 4.4 การวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์

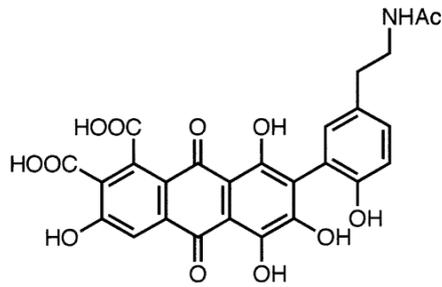


รูปที่ 4.16 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์

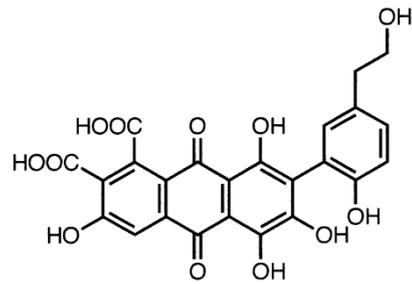
จากรูปที่ 4.16 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-rays diffractometer สแกนที่มุมระหว่าง  $20^{\circ}$  ถึง  $70^{\circ}$  พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดนี้ มีเฟสแบบอนาเทส

#### 4.5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมครั้ง และจันแดง

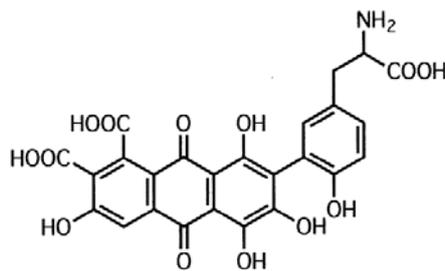
จากรูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ Laccaic acids ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในครั้ง ที่ใช้สกัดเป็นสีย้อมในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง



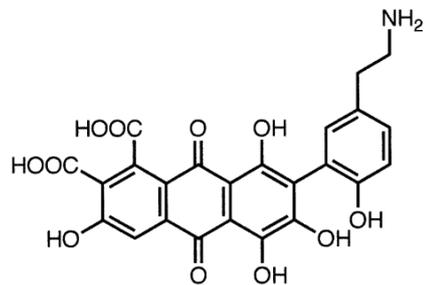
Laccaic Acid A



Laccaic Acid B



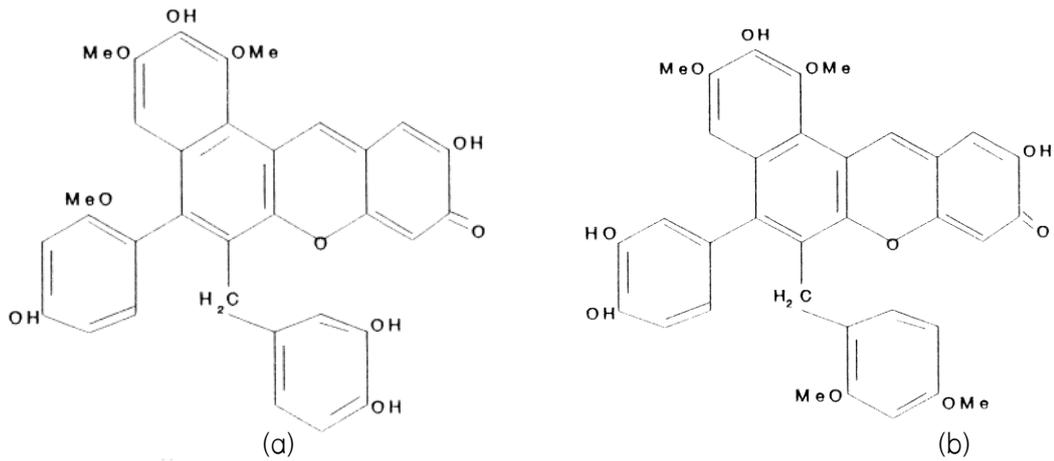
Laccaic Acid C



Laccaic Acid E

รูปที่ 4.17 โครงสร้างทางเคมีของ Laccaic acids จากครั้ง [25]

จากรูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ (a) แซนทาลิน (b) แซนทารูบิน จากจันแดงที่ใช้สกัดเป็นสี้อมในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสี้อมไวแสง โดยในขั้นตอนการสกัดได้ทำการสกัดสารเหล่านี้ออกจากสี้อมด้วยสารละลาย Dichloromethane



รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางเคมีของ (a) แซนทาลิน (b) แซนทารูบิน จากจันแดง [24]

## บทที่ 5

### อภิปรายผล สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ได้นำเสนอสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ โดยงานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้สีย้อมจากธรรมชาติ 4 ประเภท จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ จันแดง ขมิ้น ครั่ง เปลือกมังคุด ลูกหว้า ใบยอ และใบสับปะรด ศึกษาความหลากหลายของสีย้อมที่มีอยู่ในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเหมาะแก่การนำมา ย้อมบนฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมจากสีสังเคราะห์ (N 719) โดยการเคลือบชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ 7 ชั้น โดยที่ 6 ชั้นแรกใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิด PST-18NR (ชั้นโปร่งแสง) ส่วนชั้นที่เจ็ดใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ ชนิด PST-400C (ชั้นกระจิงแสง) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองเมื่อใช้ครั้งเป็นสีย้อมในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงควรใช้ Acetone ในการสกัดสีย้อมเพราะได้ค่าประสิทธิภาพมากกว่าสีย้อมจากครั้ง ที่สกัดจาก Ethyl alcohol จากข้างต้นเมื่อนำสีย้อมจากครั้ง ที่สกัดจาก Acetone ทำการ pure โดยใช้ Vertipak c18 พบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าลดลง เช่นเดียวกับการนำสีย้อมจากครั้ง ที่สกัดจาก Acetone แล้วทำการปรับค่า pH เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ดีขึ้น ปรากฏว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ลดลง เนื่องจากสีย้อมที่ได้จางลงกว่าเดิม ฉะนั้นในการใช้สีย้อมจากครั้งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงควรใช้ Acetone เป็นตัวทำละลาย ส่งผลให้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.627
2. จากการทดลองเมื่อใช้ไม้จันแดงเป็นสีย้อมในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง เมื่อใช้สาร Acetone ในการสกัดสีย้อม พบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จะมีค่ามากกว่าสีย้อมจากครั้ง ที่สกัดด้วย Ethyl alcohol และ Acetonitrile ในขณะที่ไม้จันแดงไปสกัดด้วยสาร Petroleum ether dichloromethane และ Acetone ทำให้บริสุทธิ์ โดยใช้ Vertipak c18 ชะสารด้วย Acetone และ Dichloromethane พบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นมากขึ้นเมื่อเทียบกับการสกัดสารด้วย Acetone อย่างเดียว เมื่อทำการปรับค่า pH เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ดีขึ้น พบว่าค่าประสิทธิภาพของ

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นในการทดลองนี้พบว่า การใช้สีย้อมจากไม้จันทน์แดงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ควรสกัดด้วยสาร Petroleum ether dichloromethane และ Acetone

3. เมื่อสกัดไม้จันทน์แดงด้วย Petroleum ether dichloromethane และ Acetone ทำให้สารบริสุทธิ์ โดยใช้ Vertipak c18 และชะสารด้วยสาร Acetone และ Dichloromethane พบว่าเมื่อนำวิธีนี้มาเตรียมกับครั้งและเปลี่ยนมั่งคุด พบว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้นั้นมีค่าลดลง ดังนั้นจึงพบว่า การเตรียมสารด้วยวิธีนี้ น่าจะเหมาะสมกับการเตรียมสีย้อมจากไม้จันทน์แดง
4. เมื่อนำสีย้อมจากธรรมชาติ ได้แก่ ลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น สกัดด้วย Ethyl alcohol พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.522 0.238 0.174 และ 0.206 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมที่สกัดจากลูกหว้ามีค่าประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจาก ลูกหว้ามีสารสีม่วงที่ประกอบด้วยสารแอนโทไซยานิน ส่งผลโดยตรงต่อการดูดกลืนแสง
5. เมื่อนำสีย้อมที่สกัดจากไม้จันทน์แดงทำการผสมสีกับสีย้อมจากลูกหว้า ใบยอ ใบสับปะรด และขมิ้น ตามลำดับ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จากสีย้อมไม้จันทน์แดงที่ผสมกับสีย้อมจากใบสับปะรด สามารถเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุด และมีค่าเป็นร้อยละ 0.914
6. ผลของการวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ใช้เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้า พบว่า ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ มีเฟสเป็นแบบอนาเทส
7. ผลจากการสังเคราะห์ซูโครส เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าขั้วบวก โดยเตรียมที่อุณหภูมิ 550 500 450 400 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ที่ใช้ขั้วบวกจากสารซูโครส ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจาก ณ ที่อุณหภูมิ 500 ซูโครสสามารถสังเคราะห์คาร์บอนได้มากที่สุด
8. ผลของการทดลองทุกเงื่อนไขพบว่า สีย้อมจากธรรมชาติที่เหมาะสมในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด คือ สีย้อมที่ได้จากไม้จันทน์แดง โดยการสกัดไขมันออกด้วย Petroleum ether dichloromethane และ acetone ทำให้บริสุทธิ์ โดยการ ใช้ Vertipak c18 และชะสารด้วย Acetone และ Dichloromethane นอกจากนี้สีย้อมที่เหมาะสมในการนำมาผสมสีกับสีย้อมไม้จันทน์แดง คือ สีย้อมจากใบสับปะรดที่สกัดจาก Ethyl alcohol โดยการแช่สีย้อมจันทน์แดง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อมานำมาแช่ด้วยสีย้อมจากใบสับปะรด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นกว่าเดิม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้เทคนิคขั้นสูง อาทิเช่น การตรวจสอบอนุภาคผง BNT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน (TEM)
2. ผู้ทดลองต้องคำนึงถึงการใช้สีย้อมต้องได้มากจากธรรมชาติ เพื่อเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิต และลดปัญหาด้านสารเคมีซึ่งอาจจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป
3. ควรพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดให้มีค่าใกล้เคียงค่าทางทฤษฎี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิทยา อมรกิจบำรุง, เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง, สมพร ชั้นเงิน และชูศักดิ์ พูลสวัสดิ์. (2551). เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกนาโนเม็ดสีหลายชนิด. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [2] B. O'Regan and M. Grätzel, (1991) "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films". Nature. 353, 737-740.
- [3] พีรศักดิ์ คมสัน. (2550). เซลล์แสงอาทิตย์กับสีย้อมไวแสงจากพืชในประเทศไทย. วารสารวิจัย มข. 35(4): 205-214.
- [4] ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์. โททาเนีย (ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม). สืบค้นเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม 2557.
- [5] Advances in Micro/Nano Electromechanical Systems and Fabrication Technologies Edited by Kenichi Takahata, ISBN 978-953-51-1085-9, 234 pages, Publisher: InTech, Chapters published May 29, 2013 under CC BY 3.0 license (<http://www.intechopen.com/books/advances-in-micro-nano-electromechanical-systems-and-fabrication-technologies>)
- [6] กิตติศักดิ์ อามา. (2553). การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างนาโน Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O สำหรับใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [7] ชัยวัฒน์ ศรีสมานวัตร. (2552). เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีไทเทเนียมออกไซด์แบบพ่นเคลือบ. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] ชวนพิศ คณะพัฒน์. (2553). การศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากเปลือกไม้. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. อุบลราชธานี : มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.
- [9] พิษเนศ อุปชัย. (2552). ผลของตัวกระตุ้นคอปเปอร์ฟทาไลโซยานีนต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

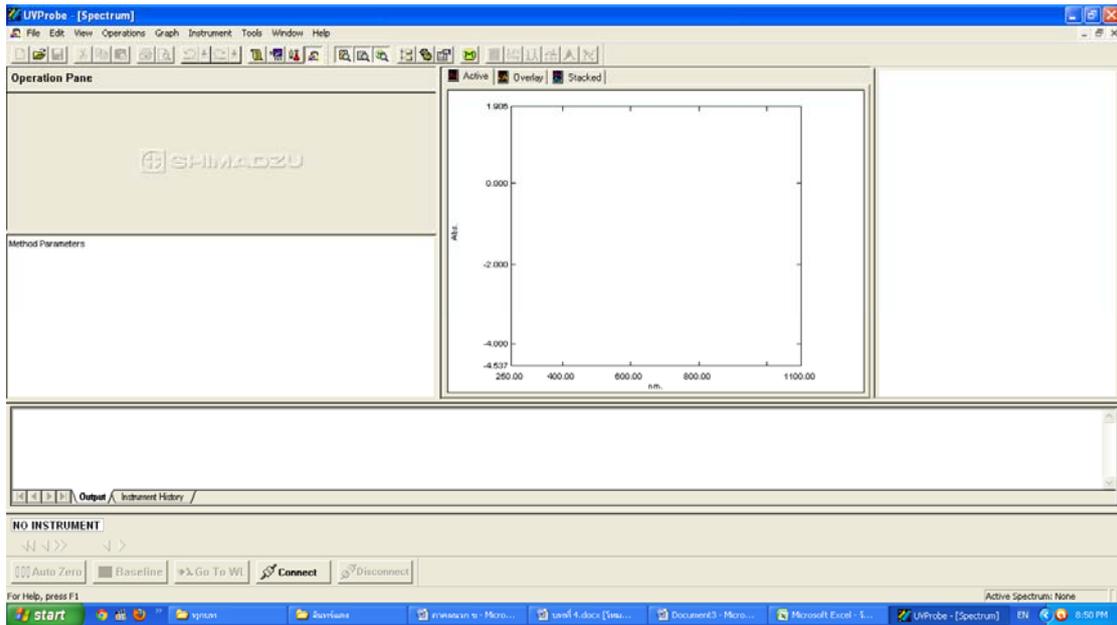
- [10] ทวนทอง ธนนิมิต. (2550). การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมจากคลอโรฟิลล์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [11] ทวนทอง ธนนิมิตร, ภัทร อัยรักษ์, วชิรพันธ์ พัฒนโชติ, และรัตนา เกียรติตันสกุล. (2548). ศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์ที่ได้จากพืช. วารสารหาดใหญ่ วิชาการ 8 (1) : หน้า 15 – 219
- [12] วินิช พรหมอารักษ์, ทวีศักดิ์ สูดยอดสุข, สายันต์ แสงสุวรรณ และ ทินกร แก้วอินทร. (2550). เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี 9 (2). หน้า 14-31.
- [13] สุทธิพจน์ สุทชนะ. (2550). ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมสำหรับการประยุกต์ใน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [14] สุเมธ ศิริจัน. (2555). การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลเพื่อใช้เป็น เคาน์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต. ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [15] สรรพชญ์ นิลผาย. (2551). โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์สำหรับการประยุกต์เป็น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [16] ศุภชัย จันทร์งาม. (2552). ผลของตัวกระตุ้นซิงก์ฟทาโลไซยานินต่อประสิทธิภาพของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [17] Zhou,H. Wu,L. Gao,Y. and Ma,Ti. (2011). “Dye–sensitized solar cells using 20 natural dyes as sensitizers”. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 219,188–194.
- [18] Calogero,G. and Marco,G.D. (2008). “Red Sicilian orange and purple eggplant fruits as natural sensitizers for dye–sensitized solar cells”. Solar Energy Materials & Solar Cells. 92,1341– 1346.
- [19] Wongcharee,K. Meeyoo,V. and Chavadej,S. (2007). “Dye–sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers”. Solar Energy Materials & Solar Cells. 91, 566–571.

- [20] Hao,S. Wu,J. Huang,Y. and Lin,J. (2006). "Natural dyes as photosensitizers for dye-sensitized solar cell". *Solar Energy*. 80, 209–214.
- [21] Matsuia,M. Ito,A., Kotani,M. Kubota,Y. Funabiki,K. Jin,J. Yoshida,T. Minoura,H. Miura, H. (2009). "The use of indoline dyes in a zinc oxide dye-sensitized solar cell". *Dyes and Pigments*. 80, 233–238.
- [22] Yamazaki,E. Murayama,M. Nishikawa,N. Hashimoto,N. Shoyama,M. and Kurita,O. (2007). "Utilization of natural carotenoids as photosensitizers for dye-sensitized solar cells". *Solar Energy*. 81,512–516.
- [23] Kim,S.S. Yum,J.H. and Sung,Y.E. (2009). "Improved performance of a dye-sensitized solar cell using a TiO<sub>2</sub>/ZnO/Eosin Y electrode". *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 79, 495–505.
- [24] Tennakone,K. Kumara,G.R.R.A. Kottegoda,I.R.M. Perera,V.P.S. and Weerasundara,P.S.R.S. (1998). "Sensitization of nano-porous films of TiO<sub>2</sub> with santalin (red sandalwood pigment) and construction of dye-sensitized solid-state photovoltaic cells" *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*. 117, 137 – 142.
- [25] Oka,H. Ito,Y. Yamada,S. Kagami,T. Hayakawa,J. Harada,K.i. Atsumi,E. Suzuki,M. Suzuki,M. Odani,H. Akahori,S. Maeda,K. Nakazawa,H. and Ito,Y. (1998). "Separation of lac dye components by high-speed counter-current chromatography" *Journal of Chromatography A*. 813, 71–77.
- [26] Lai Xie,Z. White,R.J. Weber,J. and Taubert,A. and Titirici,M.M. (2011). "Hierarchical Porous Carbonaceous Materials via Ionothermal Carbonization of Carbohydrates". *The royal society of chemistry*. 1–4.

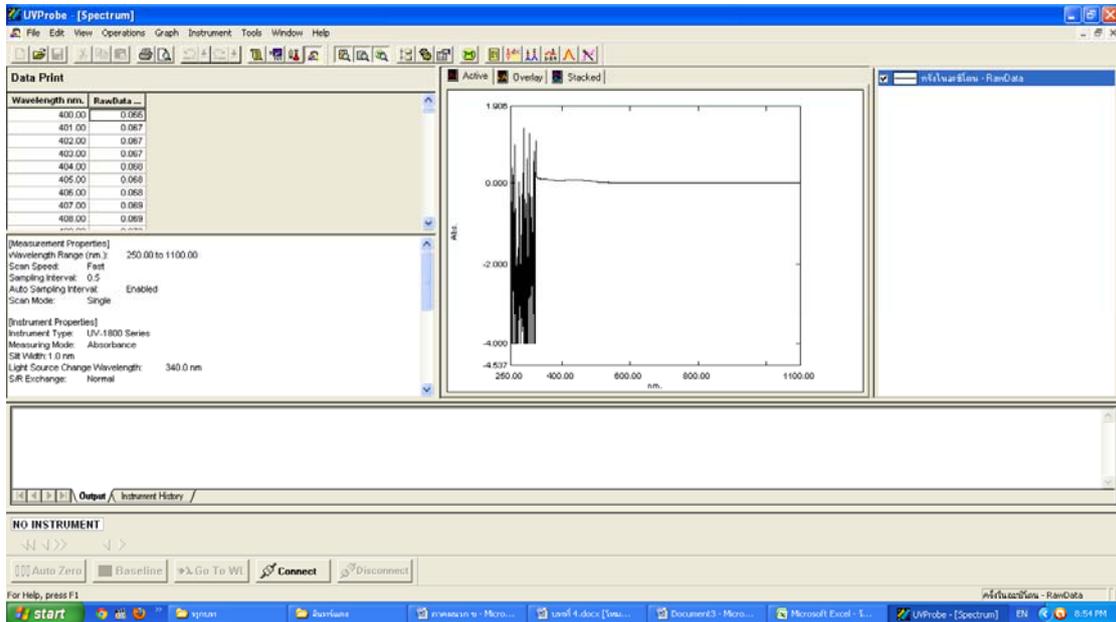
## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรม UV Visible (บางตัวอย่าง)

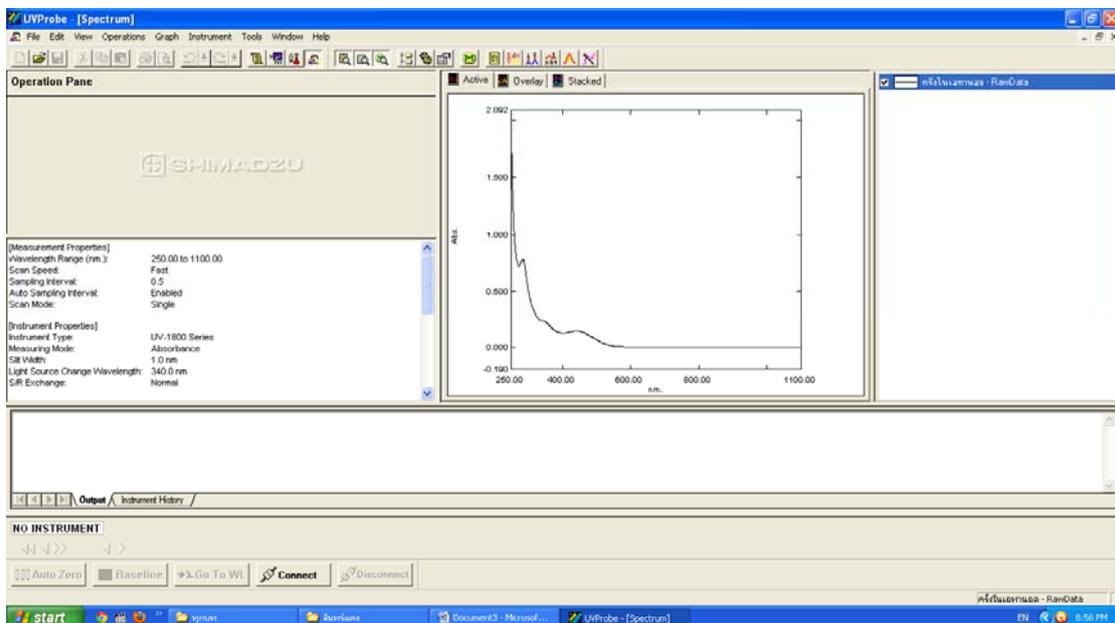
ผ ก-1 หน้าต่างโปรแกรม UV Visible



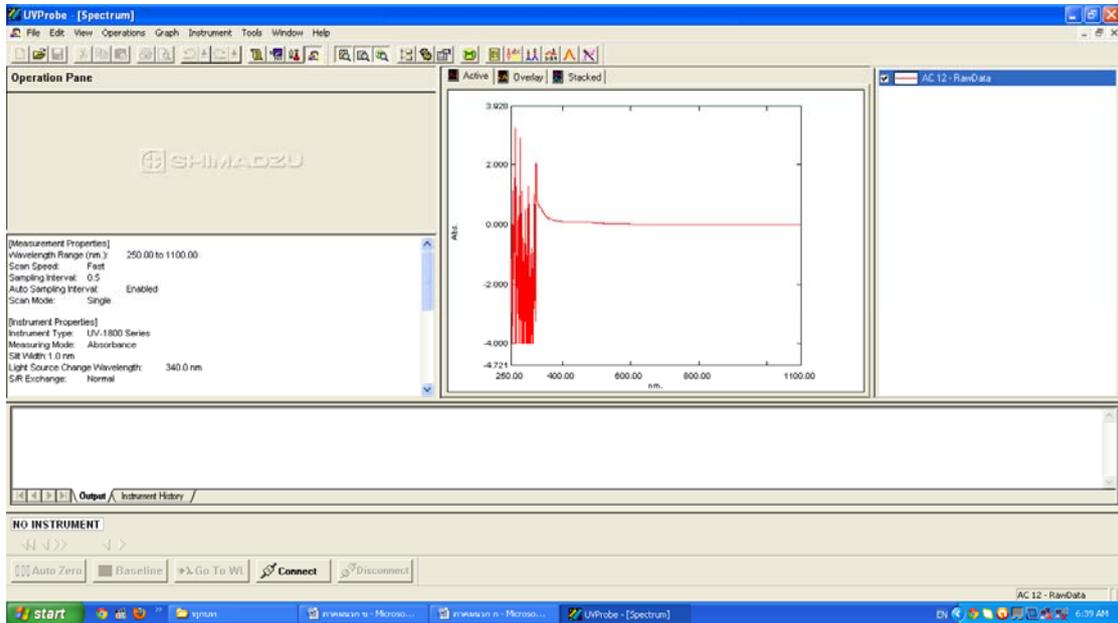
ผ ก-2 หน้าต่างโปรแกรม UV Visible จากสี่ข้อมครั้งสกัดจาก Acetone



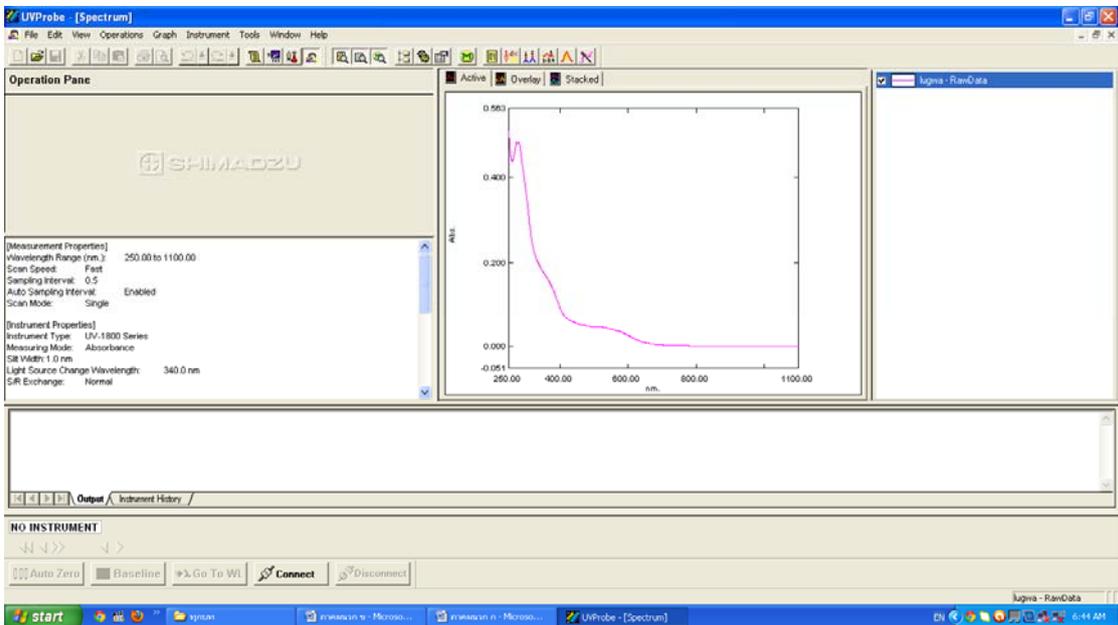
ผ ก-3 หน้าต่างโปรแกรม UV Visible จากสี่ข้อมครั้งสกัดจาก Ethyl Alcohol



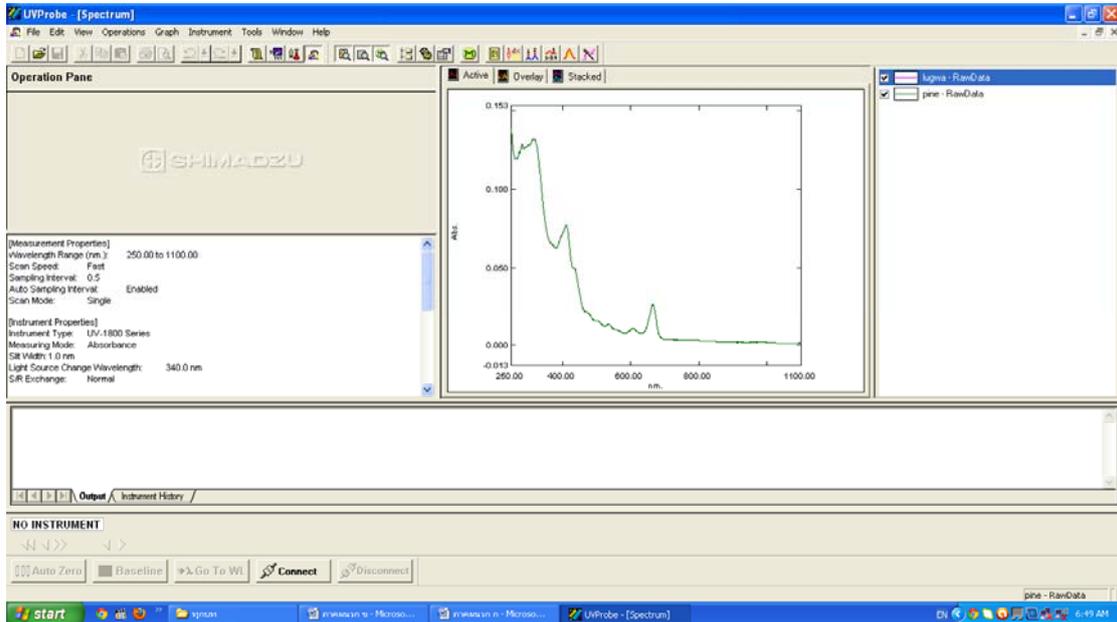
ผ ก-4 หน้าต่างโปรแกรม UV Visible จากสี่ข้อมไม้จันแดงสกัดจาก Acetone



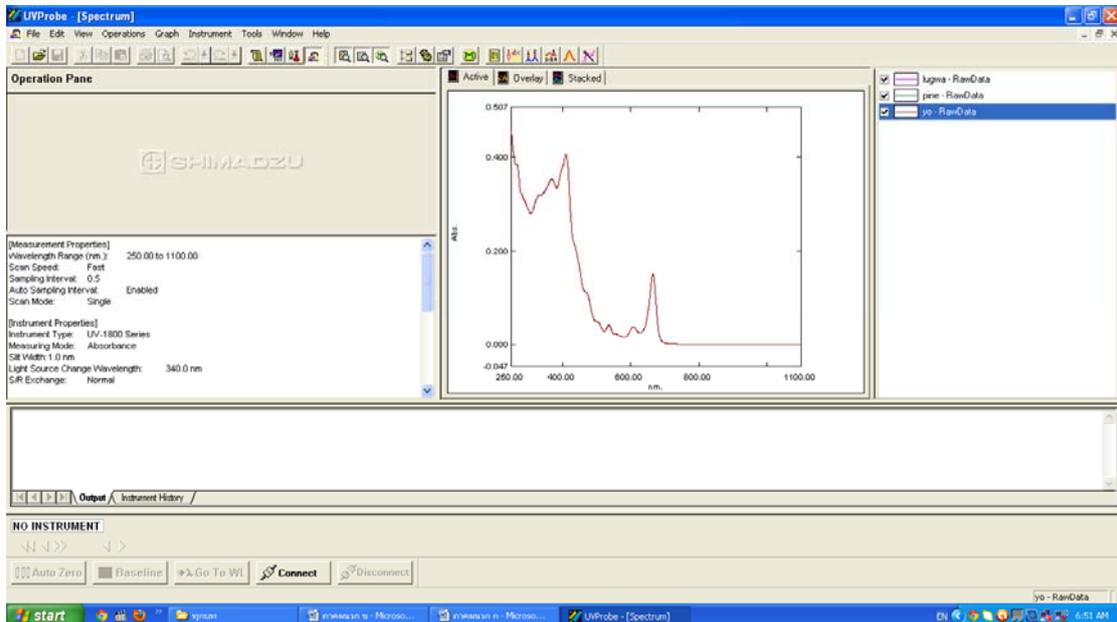
ผ ก-5 หน้าต่างโปรแกรม UV Visible จากสี่ข้อมลูกหว้าสกัดจาก Ethyl Alcohol



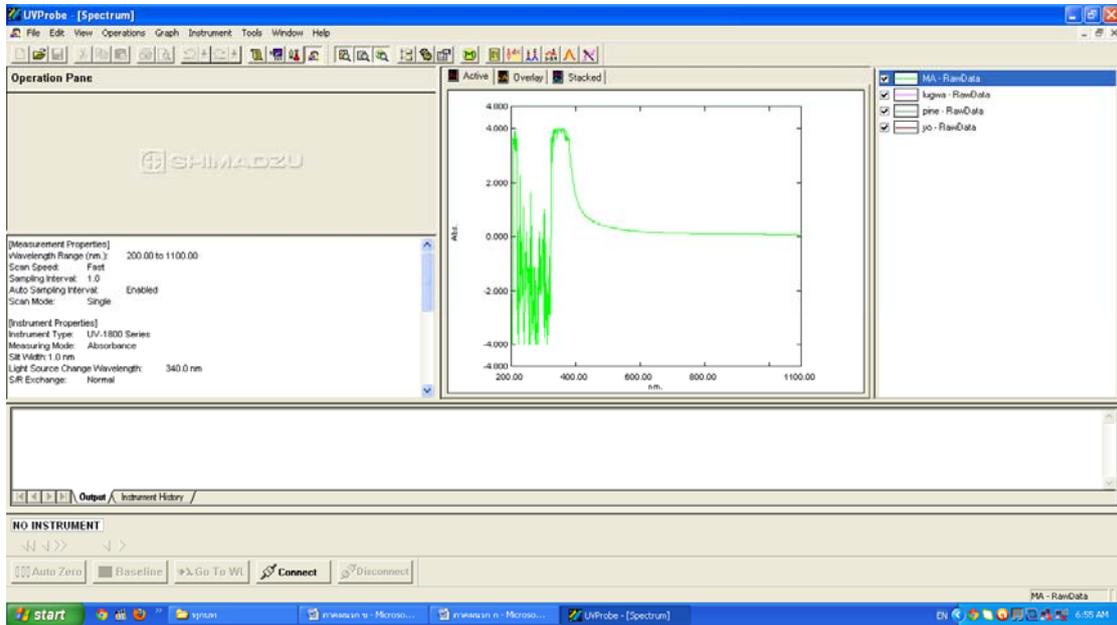
ผ ก-6 หน้าต่างโปรแกรม UV Visible จากสี่ข้มไบสัประดสกััดจาก Ethyl Alcohol



ผ ก-7 หน้าต่างโปรแกรม UV Visible จากสี่ข้มไบยอสกััดจาก Ethyl Alcohol



ผ ก-8 หน้าต่างโปรแกรม UV Visible จากสี่ข้อมมั่งคุดสกัดจาก Acetone



## ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากสี่ข้อมไวแสง  
จากเครื่อง Solar Simulator (บางตัวอย่าง)

ข้อมูลการวัดประสิทธิภาพจากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากไม้จันทน์แดงสกัดจาก Ethyl Alcohol

Start / V	-0.1
Stop / V	0.9
Step / V	0.02
Compliance / A	0.03
Search Delay / s	0.12
NPLC	1
Hold Time / s	0
Cell Active Area / cm <sup>2</sup>	0.25
Input Power / mW cm <sup>-2</sup>	100
Segment	1
I <sub>sc</sub> / mA	0.5899894
J <sub>sc</sub> / mA cm <sup>-2</sup>	2.3599576
Voc / V	0.417484285
Fill Factor	0.592400001
Efficiency / %	0.583659264
P <sub>max</sub> / mW	0.145914816
I <sub>max</sub> / mA	0.4559838
V <sub>max</sub> / V	0.32

ผ ข-1 แสดงค่าความต่างศักย์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากเครื่อง Solar Simulator ของ เซลล์แสงอาทิตย์จากไม้จันทน์แดงสกัดจาก Ethyl Alcohol

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.1	2.409948	0.602487
-0.08	2.3988008	0.5997
-0.06	2.3863844	0.596596
-0.04	2.372408	0.593102

ผ ข-1 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.02	2.3666488	0.591662
0	2.3599576	0.589989
0.02	2.354774	0.588694
0.04	2.3446616	0.586165
0.06	2.348458	0.587115
0.08	2.341274	0.585319
0.1	2.3279944	0.581999
0.12	2.3261968	0.581549
0.14	2.3179644	0.579491
0.16	2.3038536	0.575963
0.18	2.2880152	0.572004
0.2	2.2691792	0.567295
0.22	2.239484	0.559871
0.24	2.192932	0.548233
0.26	2.1289176	0.532229
0.28	2.0561964	0.514049
0.3	1.9440036	0.486001
0.32	1.8239352	0.455984
0.34	1.6048364	0.401209
0.36	1.4015772	0.350394

0.38	1.245138	0.311285
0.4	0.7285448	0.182136
0.42	-0.21338744	-0.05335
0.44	-1.9098232	-0.47746
0.46	-3.7873484	-0.94684
0.48	-5.188968	-1.29724

ผ ข-1 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
0.5	-8.057908	-2.01448
0.52	-11.258732	-2.81468
0.54	-14.561096	-3.64027
0.56	-18.306484	-4.57662
0.58	-22.139516	-5.53488
0.6	-26.367856	-6.59196
0.62	-30.579284	-7.64482
0.64	-35.239336	-8.80983
0.66	-40.02536	-10.0063
0.68	-44.8182	-11.2046
0.7	-49.93548	-12.4839
0.72	-55.29052	-13.8226
0.74	-60.56404	-15.141
0.76	-66.06764	-16.5169
0.78	-71.61328	-17.9033
0.8	-77.33108	-19.3328
0.82	-83.08748	-20.7719
0.84	-88.68136	-22.1703
0.86	-94.1144	-23.5286
0.88	-98.61584	-24.654
0.9	-102.2368	-25.5592

ข้อมูลการวัดประสิทธิภาพจากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากไม้จันทน์แดงสกัดจาก Acetone

Start / V	-0.1
Stop / V	0.9
Step / V	0.02
Compliance / A	0.03
Search Delay / s	0.12
NPLC	1
Hold Time / s	0
Cell Active Area / cm <sup>2</sup>	0.25
Input Power / mW cm <sup>-2</sup>	100
Segment	1
I <sub>sc</sub> / mA	0.596816
J <sub>sc</sub> / mA cm <sup>-2</sup>	2.387265
Voc / V	0.433691
Fill Factor	0.632837
Efficiency / %	0.655198
Pmax / mW	0.163799
I <sub>max</sub> / mA	0.545998
V <sub>max</sub> / V	0.3

ผ ข-2 แสดงค่าความต่างศักย์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากไม้จันทน์แดงสกัดจาก Acetone

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.1	2.500557	0.625139
-0.08	2.479991	0.619998
-0.06	2.455531	0.613883
-0.04	2.440201	0.61005

ผ ข-2 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.02	2.440133	0.610033
0	2.387265	0.596816
0.02	2.472114	0.618029
0.04	2.48614	0.621535
0.06	2.452669	0.613167
0.08	2.440896	0.610224
0.1	2.42511	0.606277
0.12	2.422517	0.605629
0.14	2.412216	0.603054
0.16	2.393906	0.598476
0.18	2.386164	0.596541
0.2	2.380897	0.595224
0.22	2.356183	0.589046
0.24	2.35537	0.588843
0.26	2.303347	0.575837
0.28	2.243213	0.560803
0.3	2.183993	0.545998
0.32	2.040349	0.510087
0.34	1.610072	0.402518
0.36	1.791441	0.44786
0.38	1.474116	0.368529
0.4	1.187841	0.29696
0.42	0.710914	0.177728
0.44	-0.4814	-0.12035
0.46	-2.00743	-0.50186
0.48	-4.20317	-1.05079

ผ ข-2 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
0.5	-6.48429	-1.62107
0.52	-8.95465	-2.23866
0.54	-12.6237	-3.15592
0.56	-15.9797	-3.99492
0.58	-19.8425	-4.96064
0.6	-23.7217	-5.93043
0.62	-28.0662	-7.01656
0.64	-32.4951	-8.12376
0.66	-37.2455	-9.31137
0.68	-42.1327	-10.5332
0.7	-47.2042	-11.8011
0.72	-52.496	-13.124
0.74	-57.799	-14.4498
0.76	-63.1652	-15.7913
0.78	-68.7624	-17.1906
0.8	-74.3653	-18.5913
0.82	-80.0668	-20.0167
0.84	-85.8491	-21.4623
0.86	-90.9298	-22.7325
0.88	-95.249	-23.8123
0.9	-98.9801	-24.745

ข้อมูลการวัดประสิทธิภาพจากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากไม้จันแดงสกัดจาก Acetonitrile

Start / V	-0.1
Stop / V	0.9
Step / V	0.02
Compliance / A	0.03
Search Delay / s	0.12
NPLC	1
Hold Time / s	0
Cell Active Area / cm <sup>2</sup>	0.25
Input Power / mW cm <sup>-2</sup>	100
Segment	1
I <sub>sc</sub> / mA	0.667257
J <sub>sc</sub> / mA cm <sup>-2</sup>	2.669029
Voc / V	0.385077
Fill Factor	0.53271
Efficiency / %	0.54751
P <sub>max</sub> / mW	0.136878
I <sub>max</sub> / mA	0.488848
V <sub>max</sub> / V	0.28

ผ ข-3 ค่าความต่างศักย์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากไม้จันแดงสกัดจาก Acetonitrile

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.1	2.792788	0.698197
-0.08	2.752032	0.688008
-0.06	2.733127	0.683282
-0.04	2.71312	0.67828

ผ ข-3 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.02	2.684106	0.671026
0	2.669029	0.667257
0.02	2.65204	0.66301
0.04	2.638386	0.659597
0.06	2.614502	0.653626
0.08	2.601288	0.650322
0.1	2.571018	0.642755
0.12	2.584435	0.646109
0.14	2.516828	0.629207
0.16	2.477716	0.619429
0.18	2.440128	0.610032
0.2	2.397814	0.599453
0.22	2.329854	0.582464
0.24	2.236619	0.559155
0.26	2.104136	0.526034
0.28	1.955393	0.488848
0.3	1.821928	0.455482
0.32	1.673895	0.418474
0.34	1.407237	0.351809
0.36	0.935459	0.233865
0.38	0.255922	0.063981
0.4	-0.75219	-0.18805
0.42	-2.14029	-0.53507
0.44	-3.95164	-0.98791
0.46	-6.30387	-1.57597
0.48	-9.45058	-2.36265

ผ ข-3 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
0.5	-13.2505	-3.31262
0.52	-17.4615	-4.36538
0.54	-21.6859	-5.42147
0.56	-25.8047	-6.45118
0.58	-30.2743	-7.56857
0.6	-35.1786	-8.79464
0.62	-39.8911	-9.97276
0.64	-45.106	-11.2765
0.66	-50.2076	-12.5519
0.68	-55.5217	-13.8804
0.7	-61.0735	-15.2684
0.72	-66.6482	-16.662
0.74	-72.8646	-18.2162
0.76	-78.4671	-19.6168
0.78	-84.2941	-21.0735
0.8	-89.3057	-22.3264
0.82	-93.2096	-23.3024
0.84	-96.9134	-24.2283
0.86	-100.489	-25.1222
0.88	-103.794	-25.9484
0.9	-107.116	-26.7789

ข้อมูลการวัดประสิทธิภาพจากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากไม้จันแดงสกัดจาก Acetone เป็นตัวทำละลายทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum Ether

Start / V	-0.1
Stop / V	0.9
Step / V	0.02
Compliance / A	0.03
Search Delay / s	0.12
NPLC	1
Hold Time / s	0
Cell Active Area / cm <sup>2</sup>	0.25
Input Power / mW cm <sup>-2</sup>	100
Segment	1
I <sub>sc</sub> / mA	1.933403
J <sub>sc</sub> / mA cm <sup>-2</sup>	7.733612
Voc / V	0.400083
Fill Factor	0.484739
Efficiency / %	1.499825
P <sub>max</sub> / mW	0.374956
I <sub>max</sub> / mA	1.562318
V <sub>max</sub> / V	0.24

ผ ข-4 ค่าความต่างศักย์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากไม้จันแดงสกัดจาก Acetone เป็นตัวทำละลายทำการสกัดไขมันด้วย Dichloromethane และ Petroleum Ether

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.1	7.86994	1.967485
-0.08	7.84014	1.960035
-0.06	7.792652	1.948163

ผ ๗-4 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.04	7.75154	1.937885
-0.02	7.749456	1.937364
0	7.733612	1.933403
0.02	7.729032	1.932258
0.04	7.702808	1.925702
0.06	7.735976	1.933994
0.08	7.707816	1.926954
0.1	7.667488	1.916872
0.12	7.661012	1.915253
0.14	7.515832	1.878958
0.16	7.33596	1.83399
0.18	7.16296	1.79074
0.2	6.956068	1.739017
0.22	6.590488	1.647622
0.24	6.249272	1.562318
0.26	5.415176	1.353794
0.28	4.844012	1.211003
0.3	4.438384	1.109596
0.32	3.82521	0.956303
0.34	3.08752	0.77188
0.36	2.060622	0.515155
0.38	1.008754	0.252188
0.4	0.007456	0.001864
0.42	-1.79069	-0.44767
0.44	-3.66048	-0.91512
0.46	-5.895	-1.47375

พ ๗-4 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
0.48	-8.35073	-2.08768
0.5	-11.12	-2.78
0.52	-14.4247	-3.60617
0.54	-18.1033	-4.52582
0.56	-21.8686	-5.46714
0.58	-26.1694	-6.54235
0.6	-30.8717	-7.71793
0.62	-35.8791	-8.96978
0.64	-41.1002	-10.2751
0.66	-46.5391	-11.6348
0.68	-51.9105	-12.9776
0.7	-57.444	-14.361
0.72	-63.3762	-15.844
0.74	-69.2109	-17.3027
0.76	-75.5829	-18.8957
0.78	-81.6729	-20.4182
0.8	-88.229	-22.0573
0.82	-94.6594	-23.6648
0.84	-100.564	-25.141
0.86	-106.632	-26.6579
0.88	-112.302	-28.0756
0.9	-116.614	-29.1535

ข้อมูลการวัดประสิทธิภาพจากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากครึ่งสีกัดจาก Acetone

Start / V	-0.1
Stop / V	0.9
Step / V	0.02
Compliance / A	0.03
Search Delay / s	0.12
NPLC	1
Hold Time / s	0
Cell Active Area / cm <sup>2</sup>	0.25
Input Power / mW cm <sup>-2</sup>	100
Segment	1
I <sub>sc</sub> / mA	0.596816
J <sub>sc</sub> / mA cm <sup>-2</sup>	2.387265
Voc / V	0.433691
Fill Factor	0.632837
Efficiency / %	0.655198
P <sub>max</sub> / mW	0.163799
I <sub>max</sub> / mA	0.545998
V <sub>max</sub> / V	0.3

ผ ข-5 ค่าความต่างศักย์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากครึ่งสีกัดจาก Acetone

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.1	2.500557	0.625139
-0.08	2.479991	0.619998
-0.06	2.455531	0.613883
-0.04	2.440201	0.61005

ผ ข-5 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.02	2.440133	0.610033
0	2.387265	0.596816
0.02	2.472114	0.618029
0.04	2.48614	0.621535
0.06	2.452669	0.613167
0.08	2.440896	0.610224
0.1	2.42511	0.606277
0.12	2.422517	0.605629
0.14	2.412216	0.603054
0.16	2.393906	0.598476
0.18	2.386164	0.596541
0.2	2.380897	0.595224
0.22	2.356183	0.589046
0.24	2.35537	0.588843
0.26	2.303347	0.575837
0.28	2.243213	0.560803
0.3	2.183993	0.545998
0.32	2.040349	0.510087
0.34	1.610072	0.402518
0.36	1.791441	0.44786
0.38	1.474116	0.368529
0.4	1.187841	0.29696
0.42	0.710914	0.177728
0.44	-0.4814	-0.12035
0.46	-2.00743	-0.50186
0.48	-4.20317	-1.05079

ผ ข-5 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
0.5	-6.48429	-1.62107
0.52	-8.95465	-2.23866
0.54	-12.6237	-3.15592
0.56	-15.9797	-3.99492
0.58	-19.8425	-4.96064
0.6	-23.7217	-5.93043
0.62	-28.0662	-7.01656
0.64	-32.4951	-8.12376
0.66	-37.2455	-9.31137
0.68	-42.1327	-10.5332
0.7	-47.2042	-11.8011
0.72	-52.496	-13.124
0.74	-57.799	-14.4498
0.76	-63.1652	-15.7913
0.78	-68.7624	-17.1906
0.8	-74.3653	-18.5913
0.82	-80.0668	-20.0167
0.84	-85.8491	-21.4623
0.86	-90.9298	-22.7325
0.88	-95.249	-23.8123
0.9	-98.9801	-24.745

ข้อมูลการวัดประสิทธิภาพจากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากครึ่งสีกัดจาก Acetone (ปรับค่า pH)

Start / V	-0.1
Stop / V	0.9
Step / V	0.02
Compliance / A	0.03
Search Delay / s	0.12
NPLC	1
Hold Time / s	0
Cell Active Area / cm <sup>2</sup>	0.25
Input Power / mW cm <sup>-2</sup>	100
Segment	1
I <sub>sc</sub> / mA	0.780731
J <sub>sc</sub> / mA cm <sup>-2</sup>	3.122922
V <sub>oc</sub> / V	0.406659
Fill Factor	0.612009
Efficiency / %	0.777231
P <sub>max</sub> / mW	0.194308
I <sub>max</sub> / mA	0.647692
V <sub>max</sub> / V	0.3

ผ ข – 6 ค่าความต่างศักย์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า จากเครื่อง Solar Simulator ของเซลล์แสงอาทิตย์จากครึ่งสีกัดจาก Acetone (ปรับค่า pH)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.1	3.211446	0.802862
-0.08	3.190002	0.7975
-0.06	3.164474	0.791119
-0.04	3.157529	0.789382

ผ ข - 6 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
-0.02	3.124786	0.781197
0	3.122922	0.780731
0.02	3.097973	0.774493
0.04	3.093501	0.773375
0.06	3.073969	0.768492
0.08	3.064332	0.766083
0.1	3.050562	0.762641
0.12	3.037958	0.759489
0.14	3.004048	0.751012
0.16	2.992275	0.748069
0.18	2.964985	0.741246
0.2	2.943694	0.735924
0.22	2.909356	0.727339
0.24	2.864216	0.716054
0.26	2.79656	0.69914
0.28	2.721436	0.680359
0.3	2.590769	0.647692
0.32	2.417212	0.604303
0.34	2.150373	0.537593
0.36	1.764249	0.441062
0.38	1.192897	0.298224
0.4	0.368054	0.092014
0.42	-0.7373	-0.18432
0.44	-2.20808	-0.55202
0.46	-4.12079	-1.0302
0.48	-6.43029	-1.60757

ผ ข - 6 (ต่อ)

Voltage / V	J / mA cm <sup>-2</sup>	I / mA
0.5	-9.15647	-2.28912
0.52	-12.2771	-3.06928
0.54	-15.8241	-3.95603
0.56	-19.6355	-4.90888
0.58	-23.7311	-5.93277
0.6	-28.1577	-7.03943
0.62	-32.703	-8.17575
0.64	-37.4165	-9.35412
0.66	-42.3734	-10.5934
0.68	-47.335	-11.8337
0.7	-52.4212	-13.1053
0.72	-57.7383	-14.4346
0.74	-63.0967	-15.7742
0.76	-68.5808	-17.1452
0.78	-74.2124	-18.5531
0.8	-80.079	-20.0198
0.82	-85.91	-21.4775
0.84	-91.8018	-22.9504
0.86	-97.8108	-24.4527
0.88	-103.641	-25.9102
0.9	-109.383	-27.3456

## ผลงานวิจัย

### 1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1.1 C. Sangsubuna,\* K. Kunmuaka, P. Nutongkaewa,b, N. Choosiri1a, V. Amornkitbamrungc, J. Waewsaka,b, Synthesis Dye Sensitized Solar Cells from Red Sandal Wood, Mangosteen and Lac, Energy Procedia Vol. 52, pp. 567–571 (2014).

### 2. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

2.1 K. Kunmuak, J. Waewsak, S. Saekow, C. Sangsubun, V. Amornkitbamrung and N. Choosiri, Dye Sensitized Solar Cells from Natural Dye Red Sandal Wood, Mangosteen and Lac, วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณฉบับพิเศษ ปีที่ 17 (บทความรอกการตีพิมพ์)

### 3. ผลงานเผยแพร่ในที่ประชุมสัมมนาระดับนานาชาติ

3.1 K. Kunmuak, P. Nutongkaew, N. Choosiri, V. Amornkitbamrung J. Waewsak and C. Sangsubun, Synthesis Dye Sensitized Solar Cells from Red Sandal Wood, Mangosteen and Lac, International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies, Bangkok, Thailand, 30–31 May (2013). (แบบบรรยาย)

### 4. ผลงานเผยแพร่ในที่ประชุมสัมมนาระดับชาติ

4.1 กาญติมา กุลหมวก, สมาน แซ่โค้ว, จอมภพ แววงศ์ดี, ชลธิรา แสงสุบัน, วิทยา อมรกิจ บำรุง และนิคม ชูศิริ. การศึกษาการเตรียมสีย้อมจากไม้จันทน์แดงเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10 วันที่ 4–6 มิถุนายน พ.ศ. 2557 ม.สงขลานครินทร์. (แบบโปสเตอร์)

4.2 K. Kunmuak, J. Waewsak, S. Saekow, C. Sangsubun, V. Amornkitbamrung and N. Choosiri, Dye Sensitized Solar Cells from Natural Dye Red Sandal Wood, , ประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณครั้งที่ 24 , Song Kla, Thailand, 21–24 May (2014).

(แบบบรรยาย)

4.3 **Kantima Kunmuak\***, Samarn Saekow, Jompob Waewsak, Chontira Sangsubun, Vittaya Amornkitbamrung and Nikom Choosiri, Study of preparation and efficiency for Dye sensitized solar cells from red sandal wood mangosteen and lac dye, ประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณครั้งที่ 23 , Song Kla, Thailand, 22–25 May (2013). (แบบบรรยาย)

4.4 **กาญจติมา กุลหมวก**, สมาน แซ่ไคว้, จอมภพ แวค์ศักดิ์, ชลธิรา แสงสุบ้น, วิทยา อมรกิจบำรุง และนิคม ชูศิริ, การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงจากธรรมชาติ (ครั้ง), การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 จังหวัดนครนายก ระหว่างวันที่ 8–10 พฤษภาคม 2556. (แบบโปสเตอร์)

4.5 **K. Kunmuak**, J. Waewsak and C. Sangsubun, Study of Nature Dye in Southern Thailand via UV–Vis Spectroscopy for Dye Sensitized Solar Cells, การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณครั้งที่ 22 , Song Kla, Thailand, 23–26 May (2012). (แบบโปสเตอร์)

4.6 **K. Kunmuak**, S. Saekow, V. Amornkitbamrung, and J. Waewsak, (2013). Lac Dye as Sensitizer for Dye–Sensitized Solar Cells. Siam Physics Congress 2013 The 8th Annual Conference of Thai Physics Society (Chiangmai Grandview Hotel, Chiang Mai, Thailand.)