การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
โดยใช้เม็ดสีธรรมชาติที่สกัดจากองุ่น

DYE-SENSITIZED SOLAR CELL FABRICATED WITH
NATURAL PIGMENT EXTRACTED FROM GRAPES

อนาวิล เจะปอ
ANAWIN JEHPOR

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

DYE-SENSITIZED SOLAR CELL FABRICATED WITH NATURAL PIGMENT EXTRACTED FROM GRAPES

ANAWIN JEHPOR

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้เม็ดสีธรรมชาติที่สกัดจากองุ่น

Special Project Title DYE-SENSITIZED SOLAR CELL FABRICATED WITH NATURAL PIGMENT EXTRACTED FROM GRAPES

นักศึกษา นาย อนาวิล เจะปอ
รหัสประจำตัว 55110055
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2558
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อดิเรก แรงกสิกรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ		ลายมือชื่อ
ดร. กรกช	อ่อนละออ	
ดร. อดิเรก	แรงกสิกรณ์	
ดร. กิตติพงศ์	อำนวยสวัสดิ์	กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชุติไพจิตร)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่...20... เดือน...ตุลาคม...พ.ศ. 2559

โครงงานพิเศษเรื่อง	ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้สารสกัดจากองุ่น
นักศึกษา	นายอนาวิล เจะปอ
รหัสประจำตัว	55110055
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อดิเรก แรงกสิกรณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อมสารสกัดจากองุ่น ขั้วเวิคคิงจะใช้ฟิล์มบางนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ขั้วเคาน์เตอร์จะใช้ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น ซึ่งใช้วิธีการปาดเคลือบสำหรับขั้วทั้งสอง สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้เป็นระบบคู่รีดอกซ์ของไอโอไดด์-ไตรไอโอไดด์ (I^-/I^{3-}) ทดสอบประสิทธิภาพภายใต้แสงมาตรฐาน A.M. 1.5 ที่อุณหภูมิ 25 °C ในงานวิจัยจะทำการสกัดสารย้อมสีธรรมชาติจากองุ่นโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอล ที่เงื่อนไขอุณหภูมิการสกัดต่างกันที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าสีย้อมให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเงื่อนไขอุณหภูมิการสกัด 50 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพ 0.071391% (V_{oc} =0.4948 V, J_{sc} =0.28891 mA/cm^2, FF=0.49941)

Special Project Title	Dye-sensitized Solar Cell Fabricated with Natural Pigment Extracted from Grapes
Student	Mister Anawin Jehpor
Student ID	55110055
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Special Project Advisor	Dr. Adirek Rangkasikorn

ABSTRACT

This research was fabricated dye-sensitized solar cells using dyes extracted from grapes. The nanocrystalline titanium dioxide film was used as the working electrode and the multi-wall carbon nanotube film was used as the counter electrode. Both electrodes were prepared by the doctor blade technique. The electrolyte of DSSC was the redox couple of iodide/triiodide (I^-/I^{3-}) in organic solvent. DSSCs were measured under the AM 1.5 solar simulator at 25 °C. The research will make natural dyes extracted from grapes by using ethanol as a solvent. Extraction temperature conditions of 30, 40, 50, 60 and 70 degrees Celsius. The efficiency of solar cells maximum 50 degrees Celsius temperature conditions extraction. The Temperature extracted produces the maximum efficiency of DSSCs of 0.071391% (V_{oc} =0.4948 V, J_{sc} =0.28891 mA/cm^2, FF=0.49941)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำในการทำวิจัย ได้รับความช่วยเหลือ และสนับสนุดที่ดีจาก ดร.อดิเรก แรงกสิกรณ์ และนายณัฐเกียรติ เกตะมะ คอยให้ความรู้ชี้แนะ สอนวิธีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และเพื่อน พี่ น้อง ที่ให้ความสะดวก คำแนะนำในการทำวิจัยมาโดยตลอด และคณะกรรมการที่ช่วยชี้แนะการทำวิจัย และขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่ให้ความรู้ ประสบการณ์ อีกทั้งเป็นสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การดูแล เอาใจใส่ ช่วยเหลือและสนับสนุนในการศึกษาที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นายอนาวิล เจะปอ

สารบัญ

หน้า

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการหาทางออกเรื่องพลังงานยังคงเป็นปัญหาเนื่องจากมีความต้องการการใช้พลังงานที่มากขึ้นและขาดแคลนแหล่งพลังงาน อีกทั้งยังมีผลกระทบจากการใช้พลังงานยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หนึ่งทางเลือกในการหาทางออกนั้นคือพลังงานทดแทน

พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานที่สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ่านหิน, ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติ ซึ่งสามารถปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นจำนวนมาก เป็นสาเหตุของโลกร้อน ตัวอย่างพลังงานทดแทนที่สำคัญ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น เชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อน และแสงสว่างที่สะอาดเราสามารถนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้งานด้วยการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวตาอิก การใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในโดยการใช้ผลึกซิลิกอนนั้นมีราคาค่อนข้างสูง และมีการผลิตที่ยุ่งยากจึงพัฒนามาใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cell) โดยใช้ สีย้อม (Dye) เป็นตัวรับแสงและส่งอิเล็กตรอน

ส่วนประกอบของเซลล์ชนิดย้อมไวแสงจะประกอบด้วย ชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ สีย้อม สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วเคาน์เตอร์ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการดูดกลืนแสงนั้นคือ สีย้อม ในปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ N719 ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทิเนียม (Ru) มีราคาสูงและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการวิจัยค้นคว้าหาสีย้อมที่มีราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถพัฒนาการวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตและลดการใช้โลหะหนักที่มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการสกัดสีย้อมจากธรรมชาติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นสีย้อมไวแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.2 ศึกษาค่าตัวแปรของอุณหภูมิสกัดสีย้อมที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.3 ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

1.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาวิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นขั้วเคาน์เตอร์

1.3.2 ศึกษาการสกัดสีย้อมไวแสง

1.3.3 ศึกษาสมบัติของสีย้อม

1.3.4 วัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

1.3.5 ปรับปรุงคุณภาพสีย้อม

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย

ส่วนประกอบสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไวแสงที่เป็นตัวรับแสง คือ สีย้อม ซึ่งสีย้อมที่สกัดจากธรรมชาติสามารถดูดกลืนแสงและให้ค่าประสิทธิภาพที่ดี โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาการสกัดสีจากองุ่นและปรับหาค่าความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการย้อมสี ที่เหมาะสม เป็นการปรับปรุงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และลดการใช้สีย้อมมาตรฐานซึ่งมีโลหะหนักและมีราคาแพงได้

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยของการดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

1.5.1 ศึกษาผลจากความอุณหภูมิการสกัดที่มีต่อค่าประสิทธิภาพในตัวเซลล์แสงอาทิตย์

1.5.2 ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากธรรมชาติ

1.5.3 ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมมาตรฐาน N719

1.5.4 ศึกษาการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากธรรมชาติและสีย้อมมาตรฐาน N719

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ มีชื่อเรียกหลายอย่าง เช่น โซล่าเซลล์ (Solar cell) เซลล์สุริยะ หรือเซลล์ photovoltaic (photo หมายถึงแสง และ volt หมายถึงแรงดันไฟฟ้า) มีกระบวนการที่สามารถผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงแล้วเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้า แนวความคิดนี้ค้นพบมาตั้งแต่ ค.ศ. 1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมา จนกระทั่งใน ปี ค.ศ. 1954 มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศ เมื่อ ปี ค.ศ. 1959

2.2 หลักการทำงานทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนและ โฮล โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ เพื่อแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโฮลไปที่ขั้วบวก (ปกติที่ฐานจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก ส่วนด้านรับแสงใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น ดังภาพ 2.1

ภาพที่ 2.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น

2.3 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

สามารถแบ่งตามสารประกอบที่ใช้ประดิษฐ์มี 3 ชนิด

2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารอนินทรีย์

สารที่นิยมนำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ Si เนื่องจากเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลก ทำให้มีราคาถูกกว่าสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เช่น GaAs, GaP, Si เป็นต้น โดยนำซิลิคอนมาถลุง และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ [1] จนกระทั่งทำให้เป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮลซึ่งมีประจุบวก) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอน สามารถแบ่งตามลักษณะผลึกที่เกิดได้เป็นหลายแบบ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Solar Cell และแบบผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) อย่างไรก็ตาม เซลล์ทั้ง 2 ชนิดมีข้อเสีย คือแตกหักง่าย นอกจากนี้ยังมีเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้ การเคลือบสารซิลิคอนที่เป็นฟิล์มบาง (Thin film) เพียง 0.5 ไมครอน บนแผ่นแก้วหรือแผ่นโลหะสารซิลิคอนที่ใช้เป็นแบบไม่มีรูปผลึกหรืออะมอร์ฟัส (Amorphous) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำกว่า 2 แบบแรก ลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีข้อดีที่น้ำหนักเบา สามารถบิดงอได้โดยไม่แตกหัก

2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารอินทรีย์

องค์ประกอบหลักในการทำเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้จะใช้วัสดุสารอินทรีย์เป็น เช่น poly(phenylene vinylene)(PPV) และ poly(3-hexylthiophene) (P3HT) [2, 3] เป็นต้น มีข้อดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารอนินทรีย์ คือ สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ที่มีแสงน้อย มีความยืดหยุ่นสูง สามารถโค้งงอได้ ทนต่อการแตกหัก สามารถใช้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบ Inkjet ซึ่งทำให้ประดิษฐ์ได้ทีละมากๆ อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ไม่เสถียรเมื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีแสงความเข้มสูงและความชื้นสูง โครงสร้างเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์มีชั้นสารอินทรีย์แบบชั้นเดียว สองชั้น และบัลคเฮทเทอโรจังชั่น (Bulk heterojunctions) ที่เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด ทำหน้าที่เป็นชั้นของตัวให้และรับอิเล็กตรอน (donor-acceptor bilayer) จากนั้นประกอบกับขั้วไฟฟ้าสองด้าน โดยด้านหนึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เช่น ITO และอีกด้านเป็นโลหะเช่น Al, Ca และ Mg เป็นต้น

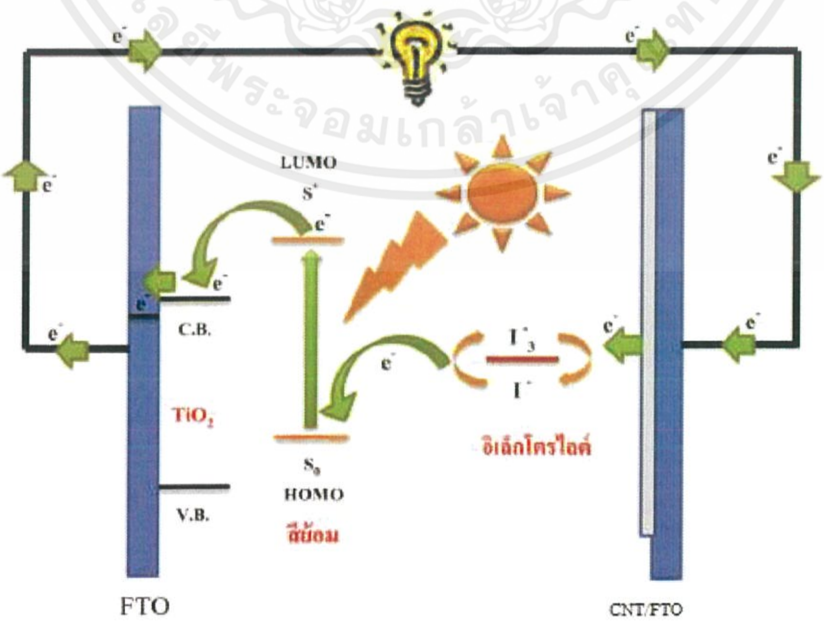
2.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

เซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ประดิษฐ์จากวัสดุผสมระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น ใช้วัสดุประเภทพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่น poly(3-hexylthiophene) (P3HT), phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM) และ poly(3,4ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) เป็นต้น มาผสมกับวัสดุนาโนของสารอนินทรีย์พวก CdSe [4], GaAs [5], TiO_2 [6]และ ZnO [7] อีกพวกคือเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าที่ดีนำมาผสมกับ P3HT:PCBM ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ และอีกแบบหนึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ที่มีข้อดีทางด้านต้นทุนการผลิตต่ำ มีขั้นตอนการผลิตไม่ยุ่งยากมากนัก เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งใช้สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ถูกย้อมอยู่บนชั้นของวัสดุนาโนของสารอนินทรีย์อย่างเช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในวงการวิชาการและวงการพาณิชย์ เนื่องจากแนวโน้มที่จะผลิตในเชิงการค้าได้ในราคาที่ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ผลิตในปัจจุบัน

2.4.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

จากภาพ 2.2 เมื่อแสงมาตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ สีย้อมจะทำหน้าที่ดูดกลืนแสงแล้วอิเล็กตรอนของเม็ดสีเองจะมีระดับพลังงานที่สูงขึ้นจากสภาวะพื้น (HOMO, S_0) ไปที่สภาวะถูกกระตุ้น (LUMO, S*) และสามารถเคลื่อนที่เข้าไปสู่แถบการนำของผลึกสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานกว้าง (TiO_2) จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง (กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง) ไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก และเคลื่อนที่มายังขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์อีกข้างหนึ่งซึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ สารอิเล็กโตรไลต์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น-ออกซิเดชั่น (Redox) โดยให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมที่เสียอิเล็กตรอนไป ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกลับสู่สภาวะพื้น ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโตรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ กระบวนการอย่างนี้จะเกิดซ้ำไปเรื่อยๆ

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด

$S_0 + h\nu \longrightarrow S^*$: การดูดกลืนแสง

$S^* \longrightarrow S^+ + e^-$ (ให้โลหะออกไซด์) : การส่งผ่านอิเล็กตรอน

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด

$S^+ + I^-$ (อิเล็กโตรไลต์) $\longrightarrow S_0 + I^{3-}$: สีย้อมกลับคืนสู่สภาวะพื้น

I^{3-} (อิเล็กโตรไลต์) + e^- (ขั้วเคาน์เตอร์) $\longrightarrow I^-$: อิเล็กโตรไลต์รับอิเล็กตรอน

ปฏิกิริยารวม

e^- (ขั้วเคาน์เตอร์) + $h\nu \longrightarrow e^-$ (ให้โลหะออกไซด์)

2.4.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

2.4.2.1 สีย้อมไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นจะต้องมีสมบัติที่สำคัญ เช่น มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้างในช่วงตาเห็นและใกล้อินฟาเรดเพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับแสงโฟตอนที่ตกกระทบ มีคุณสมบัติของสภาวะพื้นและสภาวะกระตุ้นที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสภาวะถูกออกซิไดส์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี ซึ่งปกติแล้วมักใช้โมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูเทเนียม (Ru) กับลิแกนด์ในกลุ่มของโพลีไพริดีน (polypyridine) โดยลิแกนด์นี้จะมีหมู่ฟังก์ชั่นคาร์บอกซิล (-COOH) เป็นส่วนประกอบของโมเลกุลและมีความสามารถยึดเกาะบนพื้นผิวของ โลหะออกไซด์ได้ดี ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มนี้อย่างเช่น N3 Dye, Black Dye และ N719 [8] เป็นต้น ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ได้จากสีย้อมกลุ่มนี้ให้ค่าสูง อย่างไรก็ตามสารดังกล่าวมีราคาแพงอันเนื่องมาจากการมีอยู่น้อยมากของโลหะรูเทเนียม การสังเคราะห์และทำให้บริสุทธิ์ยาก จึงมีการเลือกใช้สีย้อมที่ได้จากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ใน ธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นมา โดยส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะ เดี่ยวต่อกันยาว และมีหมู่ฟังก์ชั่นที่มีความเป็นขั้วสูง อย่างเช่น สารอนุพันธ์ของเคามาริน (Coumarin) และสารอนุพันธ์ของไตรฟีนิลลามีน (Triphenylamine) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการเลือกใช้สีย้อมที่สกัดได้จากพืช เช่น สารคลอโรฟิล แอนโทไซยานิน แคโรทีนอย เป็นต้น จึงเป็นทางเลือกหนึ่งของการประดิษฐ์เซลล์ แสงอาทิตย์ให้มีราคาถูกลง

2.4.2.2 ชั้นฟิล์มของโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน มักถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของฟิล์มบางที่มีลักษณะ เป็นรูพรุนสูง (high porous) [9] ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสีย้อมไวแสง เนื่องจากต้องการให้ โมเลกุลของสีย้อมมีการดูดกลืนแสงให้ได้มากที่สุด สารกึ่งตัวนำที่ใช้ควรจะไม่ดูดกลืน แสงในช่วงที่ตามองเห็น ทำให้ต้องเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานต้องมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) และระดับพลังงานของขอบล่างของแถบการนำ ควรจะมีค่าน้อยกว่า ค่าระดับพลังงานที่ถูกกระตุ้นของโมเลกุลของสีย้อม เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของเม็ดสีมายังสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ได้ นอกจากนั้นสารกึ่งตัวนำยังต้องมีค่าคงที่ของการนำไฟฟ้า (dielectric constant) ที่สูง มีความเสถียร ราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สารกึ่งตัวนำในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่นิยม ใช้กันมากที่สุดคือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในรูปของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (Anatase) (ค่า E_g = 3.2 eV) ซึ่งผลึกแบบอนาเทสมีค่าคงที่การนำไฟฟ้าสูง และมีค่าดัชนีหักเหของแสงสูง (n = 2.5) ทำให้มีการสะท้อนของแสงกลับไปกลับมาได้ดี [10] เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของโมเลกุลของเม็ดสีย้อม

2.4.2.3 สารอิเล็กโตรไลต์ หรือตัวส่งผ่านประจุบวก ทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งคุณสมบัติของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ดี จะต้องไม่มีการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงที่ตามองเห็น มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดักชั่น-ออกซิเดชั่นได้ง่าย เพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้แก่เม็ดสีย้อมที่อยู่ในรูปตัวออกซิไดซ์ได้ อย่างรวดเร็ว และต้องมีความคงตัวสูง ไม่ก่อให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ที่ไม่ต้องการขึ้นภายในเซลล์ สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่นิยมใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ สารละลายอิเล็กโตรไลต์ในระบบ ที่ได้จากการแตกตัวของสารไอโอดีน (I_2) โดย จะมีประสิทธิภาพในการให้อิเล็กตรอนกับเม็ดสีย้อมที่อยู่ในรูปของตัวออกซิไดซ์ที่สถานะพื้นได้ เป็นอย่างดี สารละลายอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวจะให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีแต่มีข้อเสียคือ ตัวทำละลายที่ใช้ระเหยง่าย จึงทำให้เกิดปัญหาการรั่วซึมของสารละลายออกจากตัวเซลล์ แสงอาทิตย์ ส่งผลให้อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ไม่มีความคงทน ซึ่งถือเป็นปัญหาใหญ่ของระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลว จึงได้มีการคิดค้นระบบอิเล็กโตรไลต์แบบของเหลวไอออนิก [11] ที่มีจุดเดือดสูงขึ้น มีการนำไฟฟ้าที่ดีแต่ก็ยังคงมีการรั่วซึมอยู่ และให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำกว่าระบบ อิเล็กโตรไลต์ของเหลวเพราะมีความหนืดสูงกว่า ทำให้ไอออนแพร่ได้ช้า

2.4.2.4 แก้วเคลือบด้วยสารนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide glass)

สารนำไฟฟ้าโปร่งแสงมีคุณสมบัติสามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่ในขณะเดียวกันก็ยอมให้แสงในช่วงที่ตามองเห็นผ่านได้ ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มักใช้สารอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากในกระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจะต้องมีการให้ความร้อนประมาณ 450 องศาเซลเซียส ในการเตรียมชั้นฟิล์มของสารกึ่งตัวนำแบบแถบพลังงานกว้าง ซึ่งพบว่าการใช้ ITO นั้นจะไม่มีความเสถียร เมื่อผ่านอุณหภูมิสูงทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานเริ่มต้น อันจะส่งผลให้ ประสิทธิภาพ

ของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ดังนั้นจึงมีการใช้สารทินออกไซด์ที่เจือด้วย สารฟลูออร์ไรด์ (SnO_2 : F) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง เป็นชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสงหรือกระจกนำไฟฟ้า

2.4.3 ลักษณะเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.3.1 ใช้พลังงานจากธรรมชาติ คือ แสงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่สะอาด ไม่เป็นพิษสิ่งแวดล้อม

2.4.3.2 เป็นการนำพลังงานจากแหล่งธรรมชาติมาใช้อย่างคุ้มค่า

2.4.3.3 สามารถนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า และได้พลังงานไฟฟ้าใช้โดยตรง

2.4.3.4 ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านอากาศและน้ำ ไม่เกิดของเสียขณะใช้งาน จึงไม่มีการปล่อยมลพิษทำลายสิ่งแวดล้อม

2.4.3.5 ไม่เกิดเสียงและไม่มีการเคลื่อนไหวขณะใช้งาน จึงไม่เกิดมลภาวะด้านเสียง

2.4.3.6 มีน้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย เคลื่อนย้ายสะดวกและรวดเร็ว เนื่องจากมีลักษณะเป็นโมดูล จึงสามารถประกอบได้ตามขนาดที่ต้องการ

2.4.3.7 ช่วยลดปัญหาการสะสมของก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ไฮโดรคาร์บอน และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ฯลฯ ซึ่งเป็นผลจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจำพวกน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ทำให้เกิดเกิดปฏิกิริยาเรือนกระจก ทำให้โลกร้อนขึ้น เกิดฝนกรด และอากาศเป็นพิษ ฯลฯ

2.4.4 สมบัติที่ดีของสีย้อมในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

2.4.4.1 มีสมบัติในการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงกว้างตั้งแต่ช่วงอินฟราเรดครอบคลุมถึงช่วงอัลตราไวโอเลต เพื่อให้ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด อย่างเช่น สีย้อมที่โครงสร้างมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวหรือมีวงอะโรเมติกเป็นองค์ประกอบ และมีหมู่อัลคิลเป็นสายยาว เป็นต้น

2.4.4.2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน (extinction coefficient) มีค่าสูงและมีความสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี ซึ่งจะเป็นสีที่มีหมู่ฟังก์ชั่นคาร์บอกซิล (-COOH) หรือ ไฮดรอกซิล (-OH) ที่เป็นหมู่ฟังก์ชั่นที่ช่วยให้สีย้อมเกาะกับผิวของชั้นโลหะออกไซด์ได้

2.4.4.3 สีย้อมควรมีเสถียรภาพเมื่ออยู่ในสภาวะที่ถูกออกซิไดซ์

2.4.4.4 สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสีย้อมกับโลหะออกไซด์ได้ดี

2.4.4.5 ขนาดของโมเลกุลสีย้อมที่เหมาะสมควรมีขนาดเล็กเพื่อสามารถเข้าเกาะภายในรูพรุนของชั้นโลหะออกไซด์ได้

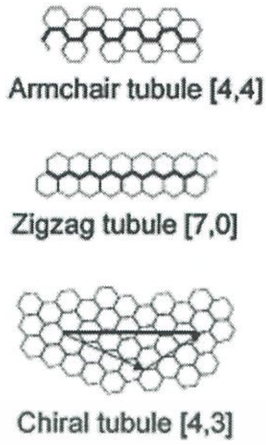
2.5 ท่อนาโนคาร์บอน

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีความสำคัญและมีประโยชน์หลายด้าน ซึ่งนอกจากจะเป็น องค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตแล้ว คาร์บอนยังเป็นที่รู้จักในแง่ของการถูกนำไปใช้ประโยชน์ ในการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากมาย เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีหลายอย่าง เช่น ความแข็งเมื่อมีโครงสร้างอยู่ในอัญรูปของเพชรซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งมากที่สุด เช่นเดียวกันกับสมบัติ พิเศษของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อเปรียบเทียบขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน สามารถทนต่อแรงดึงได้ สูงกว่าเหล็กกล้านับร้อยหลายเท่า จึงได้มีการวิจัยเชิงประยุกต์เพื่อนำไปเป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงหรือผสมกับวัสดุอื่น เช่น พอลิเมอร์ ยาง โลหะ และ เซรามิกส์ นอกจากนี้แล้วคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน สามารถนำไฟฟ้าดีเหมือนโลหะ หรือเป็นสารกึ่งตัวนำทำให้มีการศึกษาวิจัย เพื่อนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ที่มีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร

2.5.1 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

คุณสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว มีค่ายังมอดูลัสมากกว่า 1 TPa ส่วนของท่อนาโน คาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น มีค่าประมาณ 1.25 TPa ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) เท่ากับ 200 GPa ซึ่งมากกว่าเหล็กประมาณ 100 เท่าในขณะที่น้ำหนักเบากว่า 6 เท่า

คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน สามารถกำหนดได้ด้วยขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของท่อ และมุม θ (Chiral angle) ซึ่งเป็นมุมระหว่างทิศการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยมกับแนวแกนของท่อ ทำให้สามารถชนิดของท่อนาโนคาร์บอนแบ่งโดยใช้เกณฑ์ดังกล่าวนี้ เป็นสามชนิด ได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chairal ดังแสดงในภาพ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่มีทิศการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยมกับแนวแกนของท่อต่างกัน

2.5.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ทั้งในด้านความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณที่ผลิต และ ความบริสุทธิ์ของ ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ อาจแบ่งวิธีการสังเคราะห์ออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้ดังนี้

2.5.2.1 วิธีอารค์ ดิสชารจ์ (Arc Discharge) เป็นการสังเคราะห์โดยท่อนาโนคาร์บอนโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50 - 120 แอมแปร์ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18 - 40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างปลายแท่งแกรไฟต์สอง แท่งที่วางใกล้ๆ กันในระยะห่างประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม หรืออาร์กอน เป็นต้น ที่ความดันต่ำระหว่าง 50 - 700 Torr ทำให้มีแท่งแกรไฟต์มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ และควบแน่นกลับเป็นของเหลวและของแข็งหรือเป็นท่อนาโนคาร์บอน ณ บริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนนั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมาระหว่างปลายแท่งแกรไฟต์ และอาจควบคุมชนิดของท่อนาโนคาร์บอนได้โดย การผสมโลหะบางชนิดลงไป เช่น เหล็ก นิเกิล และ โคบอลต์ เป็นต้น ซึ่งเรียกว่า โลหะคะตะลิสต์ (Metal catalyst) ซึ่งเป็นตัวช่วยให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวขึ้น

2.5.2.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization) เป็นวิธีการสร้างท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้า ซึ่งเป็นแกรไฟต์ภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น ความดันต่ำ ประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส โดยเทคนิคนี้คล้ายกับวิธี อาร์คดิสชาร์จ จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิเกิล และโคบอลต์เป็นตัวคะตะลิสต์ซึ่งจะช่วย ให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว

2.5.2.3 วิธีการตกสะสมไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) เป็นวิธีที่ให้ความร้อนกับก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เพื่อให้มีการแตกตัวและมีการ

สร้างท่อนาโนคาร์บอนบนเม็ดคะตะลิสต์โดยก๊าซที่นิยมใช้ได้แก่ มีเทน (CH_4) อะเซทิลีน (C_2H_2) และคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ซึ่งวิธีนี้จำเป็นต้องอาศัยตัวคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิเกิล และโคบอลต์ เป็นต้น เป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอน อุณหภูมิที่เหมาะสมของการสังเคราะห์อยู่ที่ประมาณ 650 - 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเทคนิคนี้สามารถ ควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ โดยการ ควบคุมขนาดของตัวคะตะลิสต์ และอัตราการไหลของก๊าซตามลำดับ ทั้งนี้ต้องทำภายใต้ บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่นก๊าซฮีเลียม หรืออาร์กอน เป็นต้น วิธีนี้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอน ได้ปริมาณมาก และมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งอาจแบ่งเป็นวิธีย่อยๆ ได้อีกดังนี้

(1) การตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition) เป็นการให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอน เช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เกิดการแตกตัว และคาร์บอนจะตกบนวัสดุฐานรอง เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์ และแก้ว โดยมีโลหะคะตะลิสต์ เคลือบอยู่บนผิว ซึ่งเป็นตัวช่วยให้เกิดการ จัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็น ท่อนาโนคาร์บอน

(2) การตกสะสมไอสารเคมีด้วยความร้อน (Thermal chemical vapor deposition) เป็นเทคนิคนี้ที่ใช้ เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ หรือ โลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้เป็นตัวคะตะลิสต์ ให้ตกเคลือบบนวัสดุฐานรอง หลังจากนำฐานรองไปทำการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก หรือ ใช้ก๊าซแอมโมเนีย เพื่อให้เกิดก้อนของโลหะขนาดนาโนเมตรที่เรียกว่า “การเกิดใหม่” (nucleation) แล้วนำไปปลูกท่อนาโนคาร์บอนโดยนำไปใส่ในห้องเผาหรือเตาเผาแบบท่อ ซึ่งจะใช้อุณหภูมิ ประมาณ 600 - 1,050 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรคาร์บอนและอาร์กอน

(3) การตกสะสมไอสารเคมีจากแอลกอฮอล์ (Alcohol catalytic chemical vapor deposition, ACVD) ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก และโคบอลต์ ที่ อุณหภูมิ 550 ^{o}C เพื่อให้เกิดกระบวนการตกสะสมไอสารเคมีได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

(4) การปลูกจากสถานะไอ (Vapor phase growth) การสังเคราะห์มีการแบ่งพื้นที่ในห้องทดลองออกเป็นสองส่วน พื้นที่ส่วนแรกมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะวางภาชนะใส่ผง ferrocene ($Fe(C_5H_5)_2$) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดโลหะคะตะลิสต์วางอยู่ และส่วนที่สองมีอุณหภูมิสูงกว่า เมื่อปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอนเข้าไป ทำให้คะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาไปรวมตัวกันส่วนที่สอง และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีทั้งท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนัง ชั้นเดียว 2-4 นาโนเมตรและชนิดผนังหลายชั้น 70 - 100 นาโนเมตร

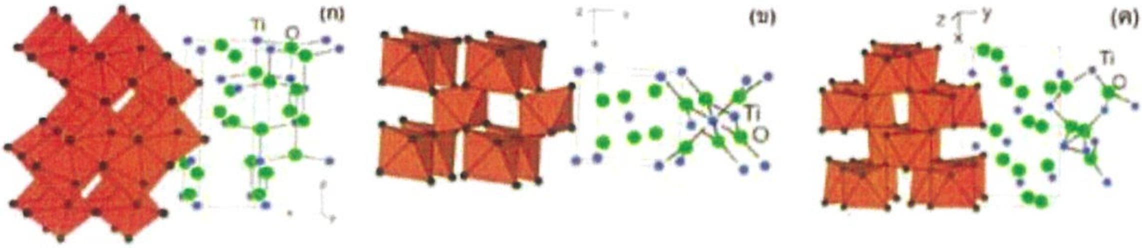
(5) การตกสะสมไอสารเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งให้ความร้อน (Laser-assisted thermal chemical vapor deposition, LCVD) โดยใช้ตัวคะตะลิสต์จากไอระเหยของสารละลายเหล็กเพนตะคาร์บอนิว $Fe(CO)_5$ ซึ่งถูกพาเข้ามาใน Reactor ด้วยการผ่านก๊าซ C_2H_2 แล้วจึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วยลำแสงเลเซอร์ ทำให้มีการสร้างตัวของตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนบนเม็ดคะตะลิสต์เหล็กที่ได้จากการแตกตัวของเหล็กเพนตะคาร์บอนิว

2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์

วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และ สามารถนำไปใช้งานด้านต่างๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ลิเทียมไอออนแบตเตอรีวัสดุกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดสีย้อมไวแสง และเซลล์เชื้อเพลิง ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถขึ้นรูป เกิดเป็นวัสดุนาโนที่มี โครงสร้างแบบ ต่างๆ เช่น อนุภาคนาโน ท่อนาโน เส้นใยนาโน แผ่นนาโน นาโนริบบอน และลวดนาโน ซึ่งขนาดอนุภาคและโครงสร้างของวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้น อยู่กับวิธีและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ นอกจากนี้ การเจือวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไอออนของโลหะ ออกไซด์ของโลหะ และธาตุกลุ่มอัลคาไลน์เป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น การจะได้มาซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างต่างๆขึ้น อยู่กับวิธีการและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ นอกจากโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีหลากหลายแล้ว ปัจจุบันยังมีการเจือไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย โลหะอื่นๆเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติหลายๆประการแก่ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ในแต่ละด้านต่อไป

2.6.1 โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ โครงสร้างแบบอนาเทส (Anatase) แบบรูไทล์ (Rutile) และแบบบรูคไคท์ (Brookite) ดังภาพที่ 2.4 โดยเฟสอะนาเทส และรูไทล์จะมีโครงสร้างแบบเททระกอนอล ส่วนบรุ๊คไคท์จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โทรอมบิก โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ มีโครงสร้างแบบอนาเทส จะมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ดีกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ สาเหตุเนื่องมาจากการกลับมา รวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดได้ยากกว่าโครงสร้างแบบรูไทล์ ในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีค่ารีแฟรคทีฟอินเดกซ์ (Refractive Index) สูงกว่าโครงสร้างแบบอนาเทส และมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวเติมเพื่อสะท้อนแสง โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และ รูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสให้ ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึก TiO_2 แบบ (ก) อะนาเทส (Anatase) (ข) รูไทล์(Rutile) และ (ค) บรุ๊คไคท (Brookite)

2.7 รังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ แสงอาทิตย์สามารถทราบค่าในรูปของความเข้มรังสีอาทิตย์ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร และพลังงานแสงอาทิตย์มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน รังสีอาทิตย์ประกอบด้วยสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 0.3-3 ไมโครเมตร เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดสามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมได้ต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน รังสีที่ผ่านกระบวนการดูดกลืนและแผ่รังสีจากชั้นบรรยากาศทำให้สเปกตรัมของแสงอาทิตย์เปลี่ยนไป เกิดการกระจายตัว และการสะท้อนของแสงอาทิตย์ขึ้น ประเภทของรังสีอาทิตย์บนพื้นโลกมีดังนี้

(1) รังสีตรง (Beam or Direction) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกลงบนผิวรับแสง มีทิศทางแน่นอนที่เวลาหนึ่งเวลาใด ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์

(2) รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) คือ รังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศของโลกและวัตถุต่างๆที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบพื้นผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทุกทางของท้องฟ้า

(3) รังสีรวม (Total or Global Radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกกระทบผิวรับแสง ในกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นเอียงรังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและผิวโลก เรียกรังสีรวมนี้ว่า Total Radiation สำหรับกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นราบ รังสีรวมจะมาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้าไม่มีส่วนมาจากผิวโลก เรียกรังสีรวมในกรณีนี้ว่า Global Radiation

2.7.1 มวลอากาศ

มวลอากาศ (Air Mass, m) คือ สัดส่วนของความหนาของบรรยากาศที่รังสีตกส่องผ่านต่อความหนาของบรรยากาศเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งตรงศีรษะ นอกบรรยากาศกำหนดให้มวลอากาศเท่ากับ 0 สามารถหาค่ามวลอากาศ ดังสมการ

$$m = \sec \theta_z \tag{2.1}$$

โดย θ_z คือ มุมระหว่างแนวตั้งฉากกับระนาบระดับและแนวลำแสงดวงอาทิตย์

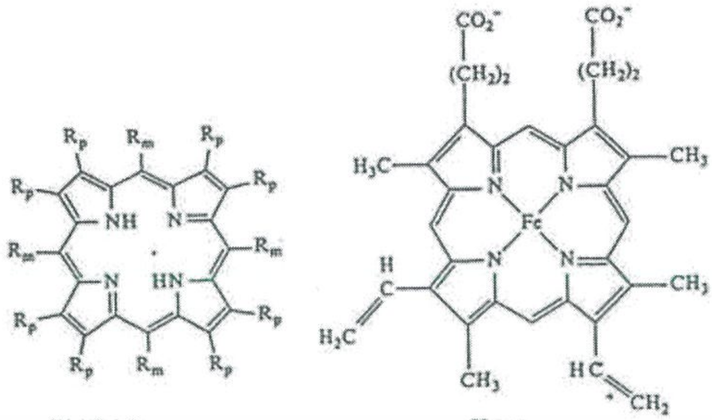
การปล่อยกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับความเข้มของแสง โดยเมื่อความเข้มแสงสูงกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่แรงดันไฟฟ้าแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงเลย แต่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแทน ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าความเข้มแสงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์คือ ความเข้มแสงที่วัดได้บนโลก ในสภาพอากาศปราศจากเมฆ และมีสภาพอากาศปลอดโปร่ง ที่ระดับในทะเล ที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นผิวโลก ทำให้ความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 1,000 W/m^2 ซึ่งกำหนดว่าที่ค่ามวลอากาศ 1.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นค่ามาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ [12]

2.8 สารสี

สารสีหรือรงควัตถุ (Pigments) คือสารที่ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันไป ทำให้เกิดเป็นสีต่างๆสามารถพบได้ตามธรรมชาติ [13] เช่น คลอโรฟิลล์ในพืชให้สีเขียว เป็นต้น สารสีธรรมชาติแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารสีเหล่านั้น คือ สารสีที่มีโครงสร้างของวงไพโรล 4 วง สารสีที่มีโครงสร้างแบบไอโซพรีน สารที่มีโครงสร้างแบบเบนโซ่ไพรานและสารสีกลุ่มบีตาไซยานินหรือบีตาเลน

2.8.1 สารสีที่มีโครงสร้างของวงไพโรล 4 วง

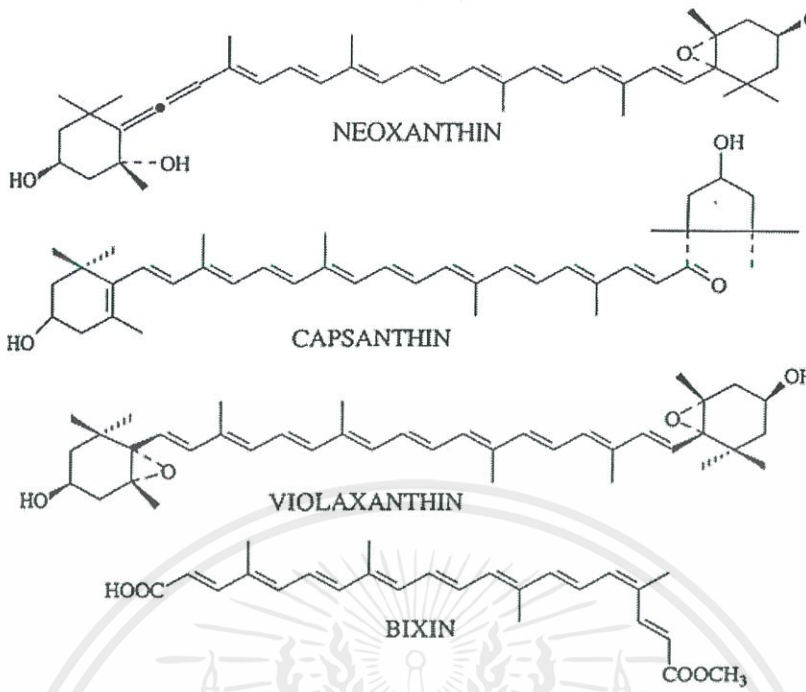
สารสีที่มีโครงสร้างของวงไพโรล 4 วง หรือเรียกวงรวมกันว่า วงพอร์ไพริน (Porphyrin) พบในสัตว์ เรียกว่า ฮีม ซึ่งมีเหล็กอยู่ตรงกลางสร้างพันธะกับไนโตนเจนของวงไพโรล พบในพืช เรียกว่า คลอโรฟิลล์ [14] มีแมกนีเซียมอยู่ตรงกลาง ฮีมในกล้ามเนื้อสัตว์เรียกว่า ไมโอโกลบิน และในเลือดเรียกว่า ฮีโมโกลบิน ดังภาพ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของวงพอร์ไพริน และฮีม

2.8.2 สารสีที่มีโครงสร้างแบบไอโซพรีน

ไอโซพรีนเป็นหน่วยย่อยของแคโรทีนอยด์ [15] ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอม 5 ตัว สารสีในกลุ่มนี้คือ แคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นสารสีหลักในแครอท สารแคโรทีนอยด์เป็นจำนวนมาก ประกอบด้วยคาร์บอนถึง 40 อะตอม โครงสร้างจะเป็นแบบพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวจำนวนมาก ซึ่งยิ่งมีมากสีก็จะเข้มขึ้น รูปร่างของโครงสร้างส่วนมากจะเป็นแบบทรานส์ ถ้าเป็นแบบซิสจะมีน้อยและจะทำให้สีจางลง สีของแคโรทีนอยด์จะเป็นสีเหลืองและแดง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ชนิดแรกเป็นไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด ซึ่งจะมีทั้งชนิดที่ไม่มีวงแหวน และชนิดที่มีวงแหวนที่ปลายด้านหนึ่ง และทั้งสองด้าน ส่วนชนิดที่สองโครงสร้างโมเลกุลมีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล เช่น หมู่ของไฮดรอกซิล อีพอกซี แอลดีไฮด์ หรือหมู่คีโตน รวมเรียกว่า แซนโทฟิลล์แคโรทีนอยด์อย่าง เช่น บีตา-แคโรทีน ที่เป็นสีผสมอาหารที่สกัดจากสารธรรมชาติหรือการสังเคราะห์ไลโคพีนมีสีแดงพบในมะเขือเทศ บีตา-แคโรทีนและแอลฟา-แคโรทีน มีสีเหลืองพบในแครอทบีตา-คริปโทแซนทินมีสีเหลืองพบในข้าวโพด มะละกอ และส้มแมนดาริน นีโอแซนทินมีสีเหลืองพบในใบผักที่มีสีเขียว แคปแซนทินมีสีแดงพบในพริก ไวโอลาแซนทินมีสีเหลืองพบในผักใบเขียวไบซินพบในเมล็ดของคำแสด ผักใบเขียวทั้งหมดจะมีแคโรทีนนอยด์รวมอยู่กับครอโรฟิลล์ แต่ไม่ปรากฏสีเพราะมีอยู่น้อย จะเห็นเมื่อผักเริ่มแก่มาก ซึ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกันในผลไม้บางชนิดนอกจากนี้ยังมีแคโรทีนอยด์บางชนิดอยู่รวมกับกรดไขมันในรูปเอสเทอร์ เช่น ลูทีนในใบไม้ของไม้ยืนต้นที่เปลี่ยนสีได้ในฤดูหนาว บางชนิดอยู่รวมกับโปรตีน เป็นสารประกอบเชิงซ้อนพบในเปลือกกุ้ง และปู ให้สีฟ้าเทา หรือ สีน้ำเงิน จะสลายไปเมื่อโดนความร้อนทำให้เปลี่ยนเป็นสีแดง

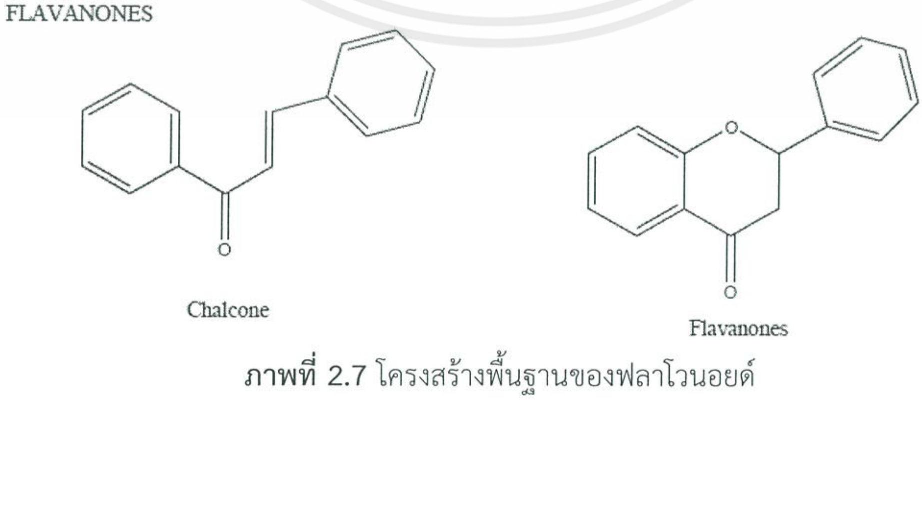


ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของแคโรทีนอยด์ชนิดต่างๆ

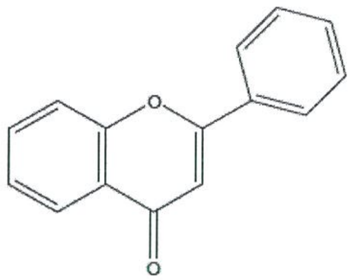
2.8.3 สารสีที่มีโครงสร้างแบบเบนโซไพราน

2.8.3.1 ฟลาโวนอยด์

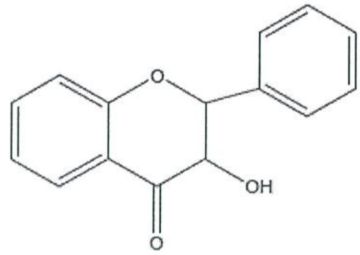
ฟลาโวนอยด์มีโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลประกอบด้วยวงเบนซีน 2 วงเชื่อมกันด้วยคาร์บอน 3 อะตอม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ฟลาวาโนน (flavanones) ซึ่งมีโครงสร้างแบบคีโทนอยู่ในโมเลกุล และฟลาวาน (flavans) ซึ่งมีโครงสร้างแบบแอลดีไฮด์หรือแอลกอฮอล์ ดังภาพ 2.7 เนื่องจากแอนโทไซยานินเป็นฟลาโวนอยด์หลักที่พบทั่วไป จึงจะกล่าวแอนโทไซยานินเป็นหลัก ส่วนฟลาโวนอยด์อื่นๆ มีข้อมูลน้อยกว่าแอนโทไซยานิน สำหรับสารประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างจากนี้จัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลอื่นๆ



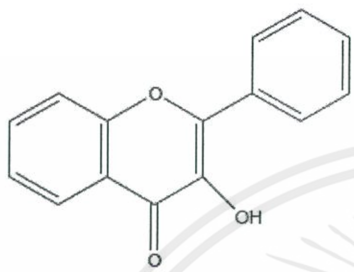
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างพื้นฐานของฟลาโวนอยด์



Flavones

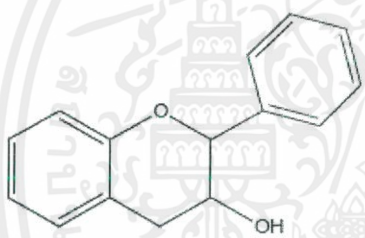


Flavanonols

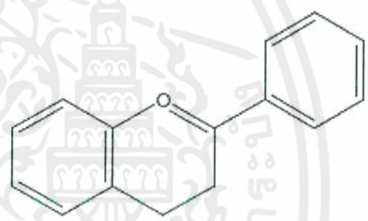


Flavonols

FLAVANS



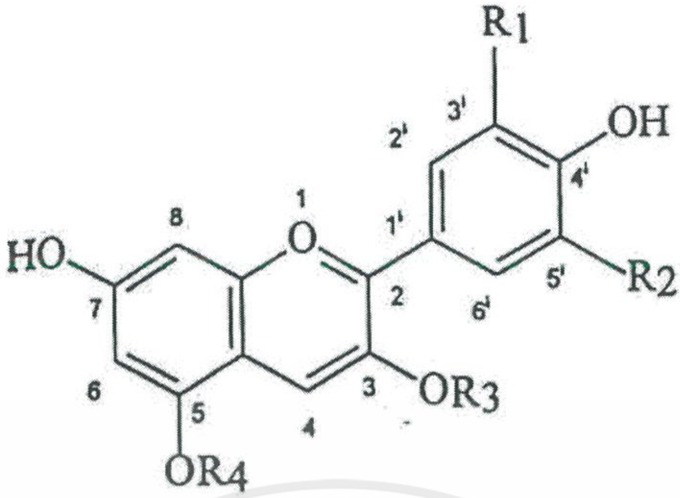
Catechins



Anthocyanidins

ภาพที่ 2.7 (ต่อ)

(1) แอนโทไซยานิน เป็นสารสีที่มีหลายสีตั้งแต่สีน้ำเงิน ม่วง จนถึงสีแดงพบในผัก ผลไม้และดอกไม้ ละลายน้ำได้ดี โครงสร้างพื้นฐานของแอนโทไซยานิน ประกอบด้วยฟลาวีเลียม แคทไอออน (flavylium cation) โดยมีโมเลกุลของน้ำตาลเกาะที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 5 แต่ก็พบน้ำตาลเกาะที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 7 3' 4 ' หรือ 5' เล็กน้อย ดังภาพ 2.8 น้ำตาลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป มอโน ได หรือ ไตรแซ็กคาไรด์ของน้ำตาลกลูโคส กาแลกโทส อะราบิโนส และไซโลส เมื่อน้ำตาลถูกไฮโดรไลซ์จะเหลืออะไกลโคน (aglycone) หรือที่เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidines)



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของฟลาวีเลียมแคทไอออน

(2) ฟลาโวนอยด์อื่นๆ เรียกว่า แอนโทแซนทีน (anthoxanthins) เป็นกลุ่มสารสีที่ไม่มีสีไปจนถึงมีสีเหลือง กลุ่มฟลาวาโนน (flavanones) เช่น เฮสเพอริดิน (hesperidin) ในผลไม้จำพวกส้ม นาริน-จิน (naringin) เป็นสารที่ให้รสขมในส้มโอและมะนาว แทงเจอริน (tengerin) ในส้มจีน กลุ่มฟลาโวน เช่น อะพิจินิน(apiginin) ในผักชีฝรั่ง กลุ่มฟลาโวนมีโครงสร้างเช่นเดียวกับไอโซฟลา-โวน (isoflavane) ยกเว้นวงแหวนฟีนิลที่อยู่ตำแหน่งที่ 2 ขณะที่ในกลุ่มไอโซฟลาโวนจะอยู่ที่ตำแหน่งที่ 3 ของฟลาวิเลียมแคทไอออน ไอโซฟลาโวนมีตัวอย่างเช่น เจนิสทีน (genistein) ในพวกถั่ว เช่น ถั่วเหลือง กลุ่มฟลาโวนอล (flavanol) ในพืชทั่วไปและหัวหอม สตรอเบอรี่ และน้ำผึ้ง และไมริซิทิน (myricetin) ในองุ่น ส่วนคาเทชิน (catechin) เช่น อิพิคาเทชิน (epicatechin) แกลโลคาเทชิน (gallocatechin) และแกลโลอิพิคาเทชิน (gallepicatechin) ในชาเขียว แอปเปิลลูกพรุนและองุ่น ฟลาโวนอยด์เหล่านี้เป็นสารที่มีฤทธิ์เป็นสารต้านออกซิเดชั่น

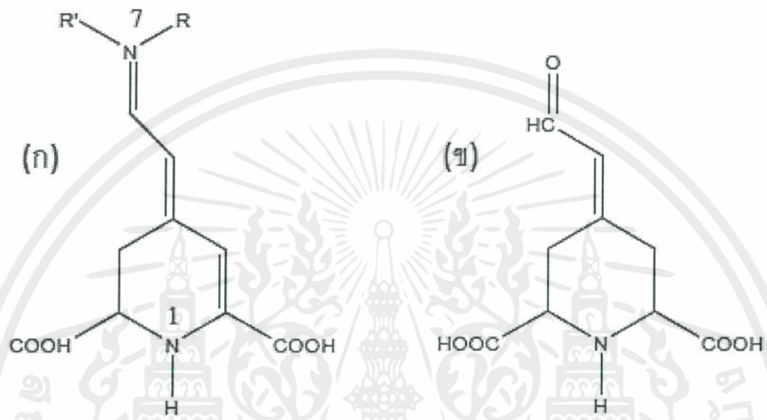
2.8.3.2 กลุ่มสารประกอบฟีนอลอื่นๆ สารสีกลุ่มสารประกอบฟีนอลที่ไม่อยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ จะมีสารประกอบกลุ่มควินโนน (quinones) และสารประกอบกลุ่มแซนโทน (xanthones) ซึ่งเป็นสารสีที่ให้สีเหลือง

(1) ควินโนน เป็นสารที่มีโครงสร้างวงแหวนเบนซีนซึ่งอาจเป็นวงแหวนเดียว (monomer) สองวง (dimer) หรือหลายๆ วง (polymer) พบในพืชหลากหลายที่ให้รสขม ให้สีเหลือง สีส้ม และในเชื้อราบางชนิดให้สีน้ำตาล สารประกอบแนฟทาควินโน (naphthaquinone) และแอนโทรควินโนน (antroquinine) พบในพืชให้เฉดสีในช่วงสีม่วงจนถึงสีดำ มีการนำใช้เป็นสีย้อมผ้า

(2) แซนโทนเป็นสารสีเหลืองมีโครงสร้างไม่เหมือนกับสารฟลาโวน เป็นสารสีที่มีสีเหลือง เช่น แมงจิเฟอรินที่พบในมะม่วง

2.8.4 บีตาเลน (Betalains)

บีตาเลนมีโครงสร้างพื้นฐานดังภาพ 2.9 ประกอบด้วยสารสี 2 กลุ่มคือ บีตาไซยานินมีสีแดง และบีตาแซนทินให้สีเหลืองพบในผักโขม (amaranth) pH ไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนสี เป็นสารที่ละลายนำได้ พืชที่มีสารสีชนิดนี้เป็นพืชในตระกูล *Ccentrosperme* เท่านั้น ถ้าหมู่ R' ไม่ทำให้เกิดพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว (conjugation) ในตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 7 จะให้สีเหลือง ซึ่งดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร แต่ถ้าหมู่ R' ทำให้เกิดคอนจูเกชันจะให้สีแดง ซึ่งดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นลักษณะของบีตาไซยานิน



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลพื้นฐานของบีตาเลน (ก) บีตาเลน (ข) กรดบีตาเลน

2.9 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Solar Cell Conversion Efficiency) จะมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และฟิลด์แฟกเตอร์ (FF) โดยค่า J_{sc} เป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุดขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นศูนย์ ส่วนค่า V_{oc} เป็นแรงดันไฟฟ้าสูงสุดขณะไม่มีกระแสไฟฟ้า ส่วนค่าฟิลด์แฟกเตอร์เป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดทำงานสูงสุด(จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด, P_{max}) และผลคูณของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับแรงดันไฟฟ้าวงจร และพบว่าค่า FF มีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ

สมการหาค่าฟิลด์แฟกเตอร์ (FF)

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}} \tag{2.2}$$

เนื่องจาก P_{max} จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ประสิทธิภาพ(η)ของเซลล์แสงอาทิตย์จึงหาจาก

$$\eta = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \tag{2.3}$$

โดย η คือ ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

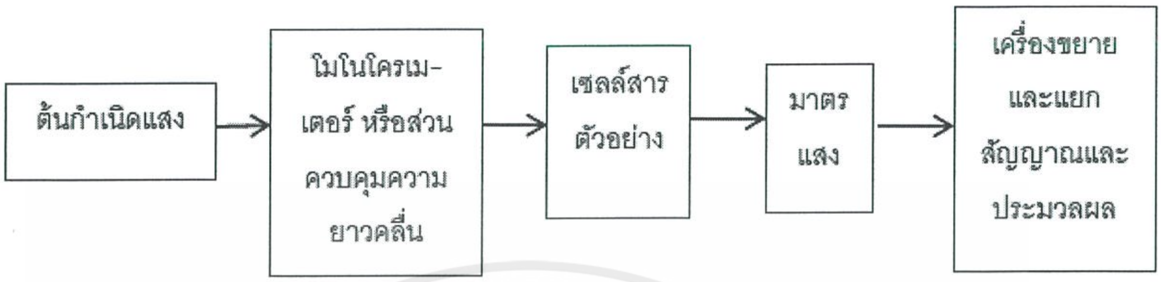
P_{in} คือ พลังงานที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

2.10 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์สามารถวัดการดูดกลืน (absorption) หรือการคาย(emission) รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ของสารตัวอย่าง โดยเฉพาะสารส่วนใหญ่สามารถดูดกลืนคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet UV) และช่วงแสงที่มองเห็นได้ (visible) จากสมบัตินี้จึงนำมาใช้เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่เรียกว่า ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี เมื่อให้แสงเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องผ่านเข้าไปในวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนทะลุผ่านออกไปถ้าให้แสงที่ผ่านออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสงพวกปริซึม หรือเกรตติง จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปเรียกว่า สเปกตรัมที่ถูกดูดกลืน (absorption spectrum)

2.10.1 ส่วนประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังภาพ 2.10



ภาพที่ 2.10 ส่วนประกอบต่างๆโดยทั่วไปของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

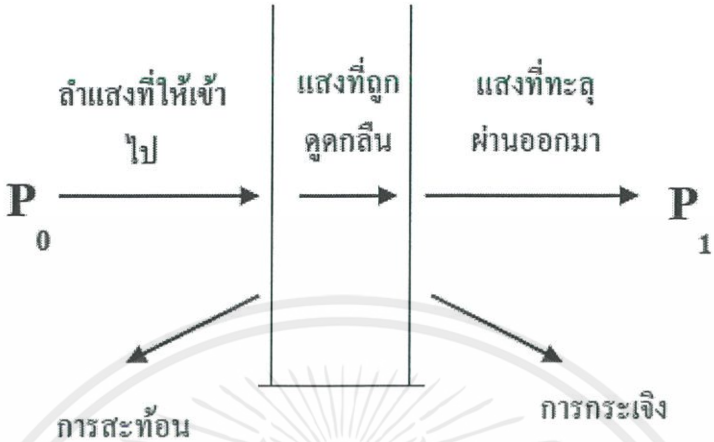
ต้นกำเนิดแสงที่ใช้นั้นจะเป็นหลอดไฮโดรเจน หรือหลอดดิวทิเรียม ให้แสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 185-375 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการคายพลังงานของหลอดแสง ช่องที่ให้แสงออกจะต้องทำด้วยควอร์ตซ์ (quartz) ทั้งหลอดดิวทิเรียมและไฮโดรเจนมีอายุใช้งานจำกัด แต่หลอดดิวทิเรียมซึ่งมีราคาแพงกว่าจะมีอายุการใช้งานมากกว่า และให้ความเข้มแสงมากกว่าส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นมักใช้หลอดชนิดทังสเตน

โมโนโครเมเตอร์ (monocrometor) เป็นส่วนที่ควบคุมแสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก (แสงที่ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ) ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ โมโนโครเมเตอร์จะประกอบด้วย ช่องที่ปล่อยให้แสงเข้า กระจกและเลนส์เพื่อให้เกิดการสะท้อนไปมาในเครื่องและส่วนที่ใช้ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆกันเพื่อให้เหมาะแก่การใช้หรืออาจเป็นส่วนที่ตัดแสงบางช่วงออกไปให้เหลือเฉพาะช่วงแสงที่ต้องการ เช่น เกรตติง (grating)

แสงจากส่วนโมโนโครเมเตอร์จะผ่านช่องแสงออกไปสู่สารตัวอย่างและมาตรวัดแสง โดยทั่วไปช่องแสงเข้าและช่องแสงออกมักจะเปิดเท่ากัน เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างบางครั้งเรียกว่า คิวเวท (cuvettes) ซึ่งทำจากซิลิกาและควอร์ตซ์ที่ใช้ได้ทั้งในช่วงยูวีและวิสิเบิล

ส่วนของเครื่องวัดแสงซึ่งจะมีหลายแบบ แต่ละแบบอาจแตกต่างกันบ้างที่ความกว้างของช่วงคลื่นแสงที่สามารถตรวจสอบได้ ความเร็วของการตอบสนองของแสง สภาพไวของการรับแสง เป็นต้น เครื่องวัดแสงที่ดีควรมีลักษณะที่มีสภาพไวแสงสูง มีการตอบสนองเป็นแบบสภาพเชิงเส้นตามแสงที่ตกกระทบ มีสัญญาณรบกวนน้อย มีเสถียรภาพที่ดีให้ค่าที่วัดไม่แปรปรวนมาก ขนาดไม่ใหญ่และราคาไม่แพงมาก เครื่องจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่ เกิดการดูดกลืน ผลของสเปคตรัมที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟระหว่างค่า absorbance และค่าความยาวคลื่น

ในการวัดปริมาณของแสงที่ดูดกลืนเข้าไปในสารตัวอย่าง โดยการวัดปริมาณแสงที่ทะลุออกมาจากสารที่เป็นตัวทำละลายในสารตัวอย่าง นำมาเปรียบเทียบกับปริมาณแสงที่ทะลุออกมาจากสารตัวอย่าง ดังภาพ 2.11



ภาพที่ 2.11 การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง

สมการค่าการดูกลืน

$$A = \varepsilon bc = log\frac{P_0}{P} \text{ หรือ } -\log T = \varepsilon bc \tag{2.4}$$

โดย A คือ ค่าการดูดกลืนของสาร (absorbance)

ε คือ ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารและความยาวคลื่นที่วัด

b คือ ความกว้างของเซลล์เป็นเซนติเมตร

c คือ ความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อมสกัดจากธรรมชาติ โดยคุณขวัญชิต วงศ์ชารี และคณะ [16] ได้ทำการวิจัยการสกัดสีย้อมจากผลกระเจี๊ยบและดอกอัญชัน เพื่อนำไปประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ในการวิจัยจะหาเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ดีที่สุด

ในการทดลองจะใช้อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อตัวถูกละลาย 100:1 ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่อไปนี้ 1.ผลของอุณหภูมิในการสกัด 2. ผลของตัวทำละลาย 3. ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสีย้อมที่สกัด ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพขอองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

2.11.1 ผลของอุณหภูมิในการสกัดที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ในการทดลองจะใช้อุณหภูมิในการสกัดที่ 25,50,70 และ100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์ได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากระเจี๊ยบที่อุณหภูมิต่างกัน

Extracting temperature (°C)	I_{sc} (mA cm^{-2})	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
25	1.24	396	0.55	0.27
50	2.06	433	0.59	0.52
70	1.75	412	0.57	0.41
100	1.63	404	0.57	0.37

จากตารางที่ 2.1 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงที่มีค่าประสิทธิภาพลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 50 องศาเซลเซียส เกิดจากสาร anthocyanin จะมีความเสถียรน้อยลงจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ anthocyanin เกิดการย่อยสลาย ที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ 100 องศาเซลเซียส และค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพอยู่ที่ 0.52

2.11.2 ผลของตัวทำละลายในการสกัดที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ในการทดลองจะนำตัวทำละลายเอทานอลและน้ำ มาทำการสกัดสีย้อม จากนั้นนำไปวัดประสิทธิภาพของเซลล์ได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากระเจี๊ยบที่ใช้ตัวทำละลายต่างกัน

Extracting solvent	Irradiated time (h)	I_{sc} (mA cm^{-2})	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
Water	a	2.06	433	0.59	0.52
Water	3	1.91	412	0.55	0.43
Ethanol	a	2.51	488	0.58	0.71
Ethanol	3	0.01	212	0.25	5×10^{-3}

[a]Just finished assembling.

จากตารางที่ 2.2 พบว่าตัวทำละลายเอทานอลให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าน้ำ โดยเปรียบเทียบจากค่าประสิทธิภาพสูงสุดในตัวทำละลาย โดยตัวทำละลายเอทานอลให้ค่าประสิทธิภาพ 0.71 และน้ำให้ค่าประสิทธิภาพ 0.52

2.11.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมสกัดที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ในการทดลองจำทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยปรับจากเดิมซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.2 โดยใช้สารละลาย HCl เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ลดความเป็นกรด-ด่างเป็น 3.2 3.0 1.0 0.5 แล้วนำไปวัดค่าประสิทธิภาพ มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างในการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากกระเจี๊ยบที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่างกัน

pH	Irradiated time (h)	I_{sc} (mA cm^{-2})	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
3.2[a]	[b]	2.06	433	0.59	0.52
3.2[a]	3	1.91	412	0.55	0.43
3.0	[b]	2.18	429	0.59	0.55
2.0	[b]	2.32	417	0.60	0.58
1.0	[b]	2.72	408	0.63	0.70
1.0	3	2.68	406	0.61	0.66
0.5	[b]	2.26	392	0.52	0.46

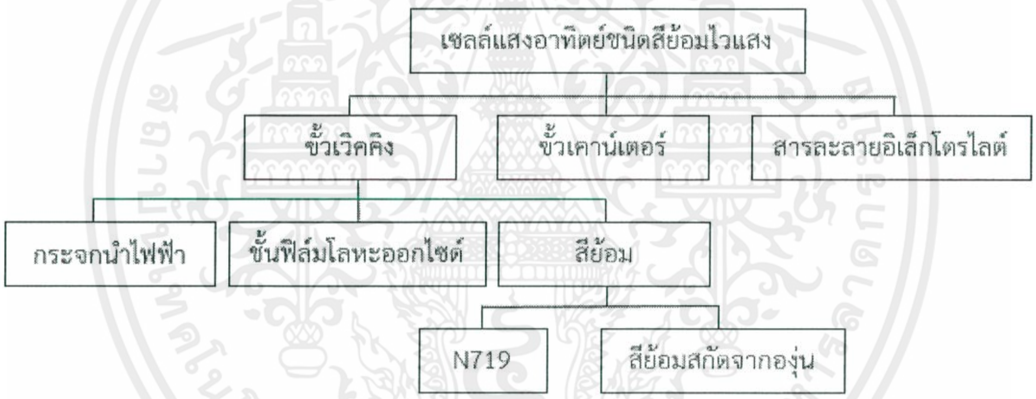
[a]Original pH.
[b]Just finished assembling.

จากตางรางที่ 2.3 พบว่าค่าประสิทธิภาพของโซลาเซลล์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดค่าความเป็นกรด-ด่าง จากค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.2 ลดลงที่ 1 จะได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดมีค่า 0.7 เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าประสิทธิภาพจะมีค่าลดลง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการศึกษางานวิจัย หลักการทำงาน ขั้นตอนการประดิษฐ์ วัสดุอุปกรณ์ การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และศึกษาบทความที่มีการใช้สีย้อมจากธรรมชาติในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาการสกัดสีย้อมจากธรรมชาติและนำมาเป็นตัวอย่างการดำเนินงาน อีกทั้งยังศึกษาปัจจัยอื่นๆในการย้อมสี ที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของสีย้อม อุณหภูมิที่ใช้สกัดสีย้อม และเวลาที่ใช้ในการย้อมสีไททาเนียม เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่ดี สามารถแบ่งขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสดงดังภาพ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

3.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโตรไลต์ และการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

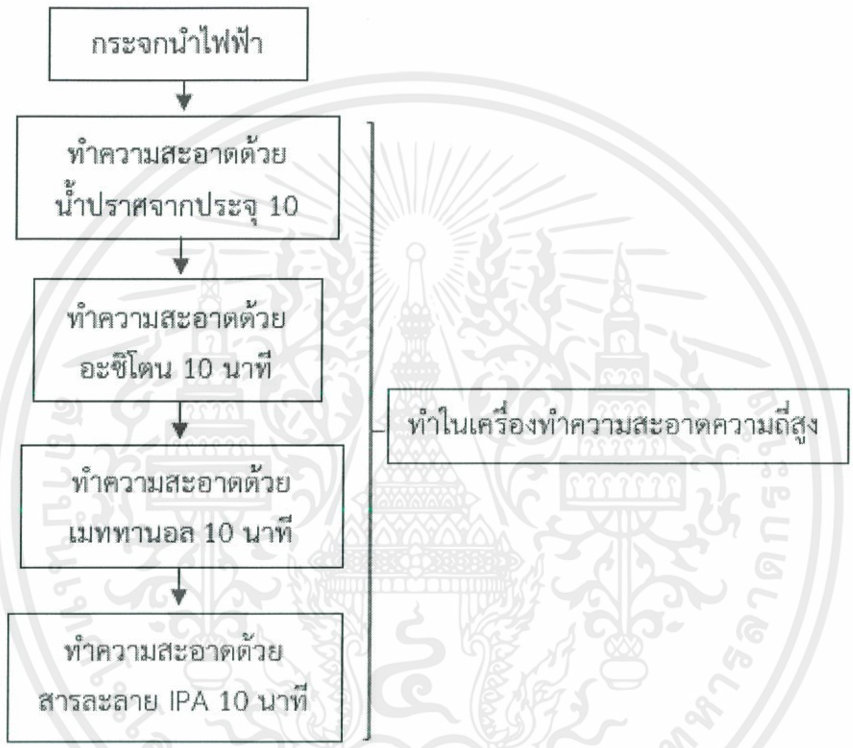
ขั้วไฟฟ้าของแซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเวิคคิง และขั้วเคาน์เตอร์มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

3.1.1 ขั้วไฟฟ้าเวิคคิง

ขั้วไฟฟ้าเวิคคิงประกอบไปด้วย กระจกนำไฟฟ้า ฟิล์มโลหะออกไซด์ และสีย้อมไวแสง

3.1.1.1 กระจกนำไฟฟ้า

กระจกไฟฟ้าที่ใช้มีลักษณะแก้วโปร่งแสงเคลือบด้วยสารทินออกไซด์เจือด้วยสารฟลูออร์ไรด์ (SnO_2 : F) นำมาตัดให้ได้ขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง

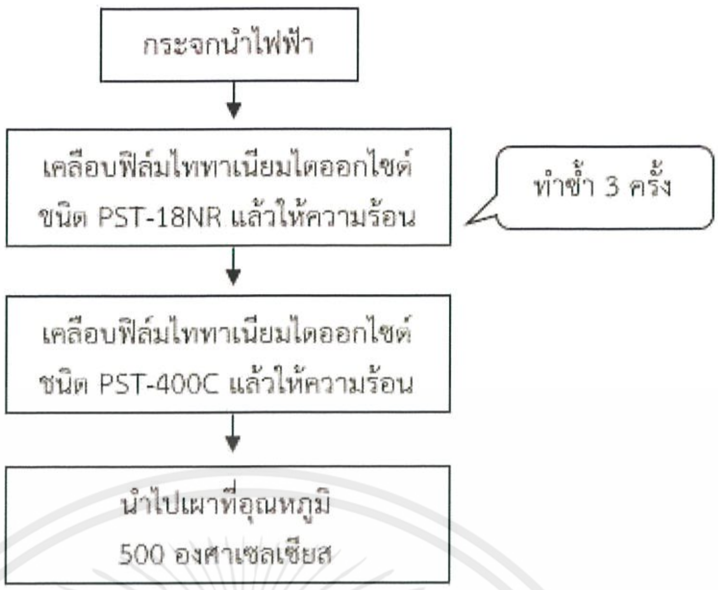


ภาพที่ 3.2 การทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง

ในการทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่สูง ทำโดยแช่กระจกไว้ในน้ำปราศจากประจุ อะซิโตน (acetone) แมททานอล (methanol) และ IPA (isopropyl alcohol) ตามลำดับ โดยใช้เวลาครั้งละ 10 นาที ดังภาพ 3.2 นำกระจกที่ล้างเสร็จแล้วไปเป่าให้แห้ง พร้อมสำหรับการเตรียมขั้นต่อไป

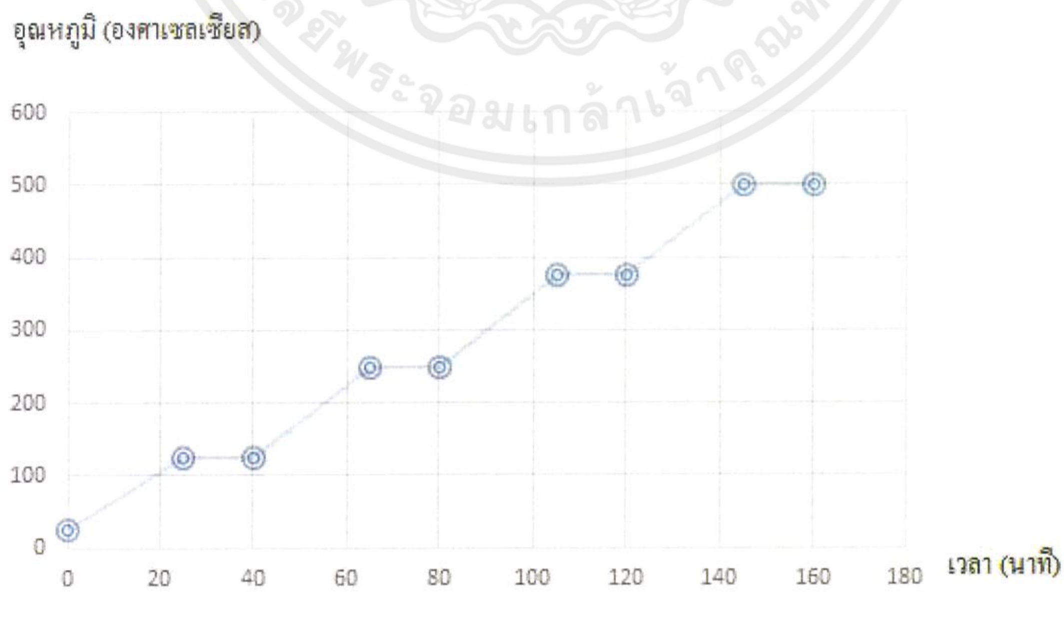
3.1.1.2 ชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์

การเตรียมชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์จะนำกระจกที่ผ่านการเตรียมในหัวข้อ 3.1.1.1 นำมาเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการปาดเคลือบ โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์

จากภาพ 3.3 นำไททาเนียมไดออกไซด์เพสต์ (Titanium dioxide paste) ชนิด PST-18NR เคลือบลงไปบนกระจกนำไฟฟ้าลงบนด้านนำไฟฟ้าให้ได้พื้นที่กว้าง 1*1 เซนติเมตรจากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสใช้เวลา 10 นาที ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง จากนั้นนำไททาเนียมไดออกไซด์แบบกระเจิงแสงโดยใช้สารที่เรียกว่า สแคตเตอริงเพสต์ (TiO_2-scattering paste) ชนิด PST-400C มาปาดเรียบลงบนไททาเนียมไดออกไซด์เพสต์ชนิด PST-18NR แล้วให้ความร้อนที่อุหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชม แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิแบบขั้นบรรไดดังภาพ 3.4 แล้วรอให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3.4 การเผาชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แบบขั้นบันได

จากภาพ 3.4 การเผาชั้นฟิล์มโลหะออกไซด์แบบขั้นบันได จะเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง เป็นอุณหภูมิ 125 โดยใช้เวลา 25 นาที แล้วหยุดการเพิ่มอุณภูมิเป็นเวลา 15 นาที จึงจะเพิ่มอุณหภูมิต่อไปเป็น 250 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 25 นาที แล้วหยุดการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 15 นาที จึงจะเพิ่มอุณหภูมิต่อไปเป็น 375 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 25 นาที แล้วหยุดการเพิ่มอุณหภูมิเป็นเวลา 15 นาที จึงจะเพิ่มอุณหภูมิต่อไปเป็น 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 25 นาที แล้วรอให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วนำออกจากเตาเผา

3.1.1.3 สีย้อมไวแสง

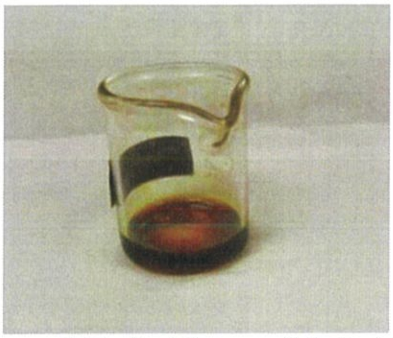
ชั้นฟิล์มไททาเนียมที่ผ่านการเผาจะถูกนำมาแช่สีย้อมไวแสงมาตรฐาน N719 (cis-dithiocyanate-N,N'-bis-(4-carboxylate-4'-tetra butyl ammonium-carboxylate-2,2'-bipyridine)ruthenium (II)) เป็นเวลาอย่างน้อย 1 วัน พร้อมทั้งเก็บไว้ในที่มืด จากนั้นทำความสะอาดด้วยเอททานอลจะได้เป็นขั้วเวิคคิงที่พร้อมใช้งาน

3.1.2 ขั้วเคาน์เตอร์

นำท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (multi-wall carbon nanotube : MWCNT) ที่ผ่านกระบวนการ Plasma treatment ปาดเรียบลงบนกระจกนำไฟฟ้าลงบนด้านนำไฟฟ้าให้ได้พื้นที่กว้าง 1*1 เซนติเมตร ให้ความร้อนที่อุหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงจะได้เป็นขั้วเคาน์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

3.1.3 สารละลายอิเล็กโตรไลต์

ใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์เป็นระบบไอโอไดด์-ไตรไอโอไดด์ (I^-/I^{3-}) เตรียมจากสารละลายไอโอดีน 0.05 โมลต่อลิตร ลิเทียมไอโอไดด์ (LiI) เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร สารละลายเตตระบิวทิวไพริดีน (4-tert- butylpyridine,TBP) เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และอิมิดาโซเลียมไอโอไดด์(Imidazolium Iodide) เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายคือสารละลาย 3-เมทอกซีโพรพิโอไนตรายต์ (3-methoxypropionitrile) ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะได้สารละลายสีน้ำตาลเข้มดังภาพ 3.5



ภาพที่ 3.5 สารละลายอิเล็กโตรไลต์เป็นระบบไอโอไดด์-ไตรไอโอไดด์ (I^-/I^{3-})

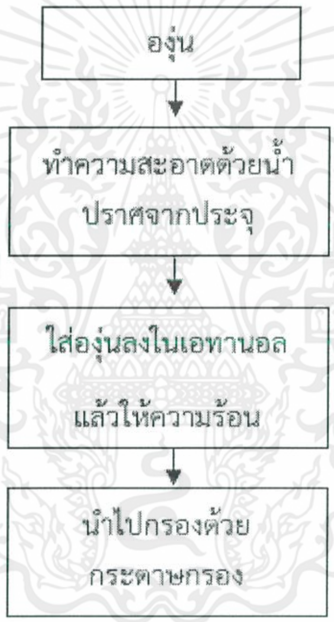
3.1.4 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ประกอบเริ่มจากการนำขั้วเวิคคิงและขั้วเคาน์เตอร์มาประกบกัน โดยมีพาราฟิล์มเป็นตัวขั้นกลางโดยตัดพาราฟิล์มให้มีพื้นที่ 1×1 เซนติเมตร สำหรับหยอดสารละลายอิเล็กโตรไลต์ไว้ระหว่างขั้วทั้งสอง พร้อมทั้งหยอดสารละลายอิเล็กโตรไลต์ลงไป

3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อมไวแสงที่สกัดจากองุ่น

3.2.1 การสกัดสีย้อมธรรมชาติด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ในการสกัดสีย้อมจากธรรมชาติ ผู้ทดลองได้ศึกษาวิธีการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากบทความที่มีการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้จะใช้องุ่นพันธุ์ชีรา (Syrah) เก็บในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ มีวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายดังภาพ 3.6



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อมจากองุ่น

นำองุ่นมาล้างน้ำปราศจากประจุ แล้วนำไปแช่ในสารละลายเอทานอล (บริสุทธิ 95%) ในอัตราส่วนองุ่น 1 กรัมต่อตัวทำละลายเอทานอล 1 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อน ใช้เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วนำไปเก็บไว้ในที่มืดและอุณหภูมิต่ำ

3.2.2 การสกัดสีย้อมธรรมชาติโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิในการสกัดต่างกัน

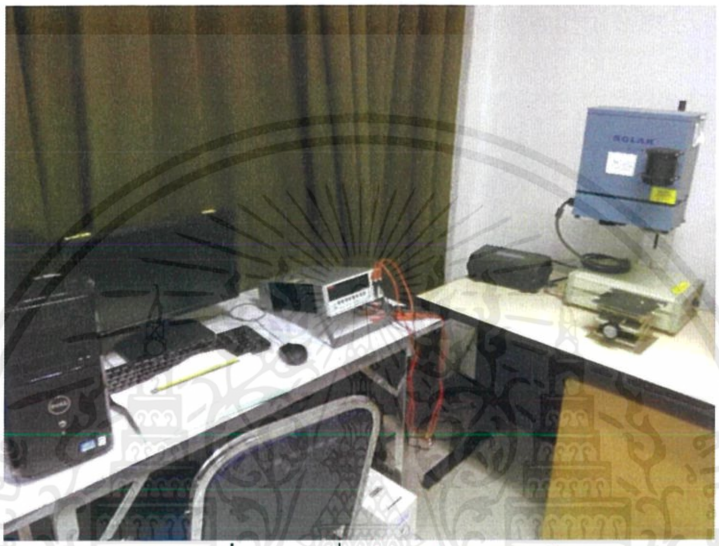
ในการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากองุ่น สกัดโดยใช้ตัวทำละลาย และมีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัดต่างกันที่ 30,40,50,60 และ 70 องศาเซลเซียส ดังภาพ 3.6

สีย้อมที่ได้จากสกัดโดยมีเงื่อนไขของอุณมิการสกัดต่างกัน จะถูกนำไปแช่ชั้นฟิล์มของโลหะออกไซด์ แล้วนำไปประกอบเข้ากับขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์พร้อมทั้งหยอดสารละลายอิเล็กโตรไลต์ลงไปตามข้อ 3.1.4 แล้วนำไปวัดค่าประสิทธิภาพด้วยเครื่องโซลาร์ซิมมูเลเตอร์ (Solar simulator

Instrument) โดยวัดที่ค่ามวลอากาศ 1.5 ที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและใช้เครื่องวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า Keithley 2400 electrometer

3.2.3 การวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อมจากองุ่น

การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่แช่สีย้อมองุ่นที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัดที่ 30,40,50,60 และ70 อาศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องโซลาร์ซิมูเลเตอร์ดังภาพ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องโซลาร์ซิมูเลเตอร์

3.3 การวัดการดูดกลืนแสงของสีย้อมด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์ ดังภาพ 3.8 จะต้องทำการเจือจางสารละลาย เพื่อให้สามารถวัดตำแหน่งจุดยอดของกราฟได้

ภาพที่ 3.8 เครื่องสเปกโตโฟโต้มิเตอร์

3.3.1 การวัดการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่สกัดจากองุ่นที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัดต่างกัน

การวัดการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่สกัดจากองุ่นโดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัดต่างกันที่ 30 40,50,60 และ70 องศาเซลเซียส สามารถวัดได้โดยการทำการเจือจางสารละลายโดยเอทานอล 3000 ไมโครลิตรต่อสารละลายสีย้อม 100 ไมโครลิตร จากนั้นสามารถนำสารละลายที่ผ่านการเจือจางแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์

3.3.2 การวัดการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐาน N719

การวัดการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐาน N719 โดยการทำการเจือจางด้วยเอทานอล 3000 ไมโครลิตรต่อสีย้อม N719 10 ไมโครลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องสเปกโตโฟโตมิเตอร์

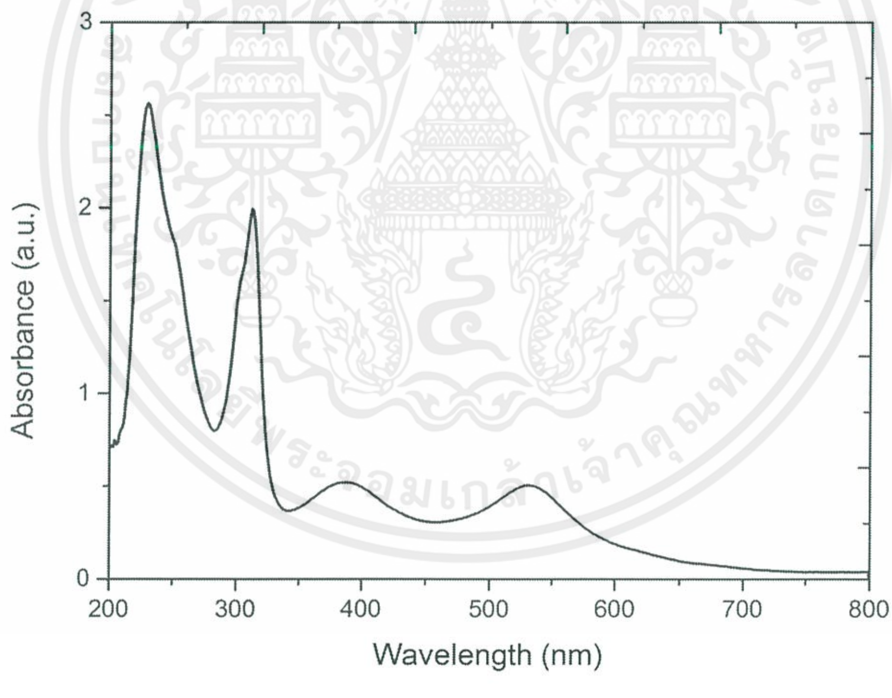
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการสกัดสีย้อมจากธรรมชาติ คือ องุ่น โดยมีเงื่อนไขเวลาในการแช่ของชั้นฟิล์มกับสีย้อมที่สกัดจากองุ่น และเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัดสีย้อม เพื่อนำไปพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงต่อไป

4.1 การวัดการดูดกลืนแสงของสีย้อม

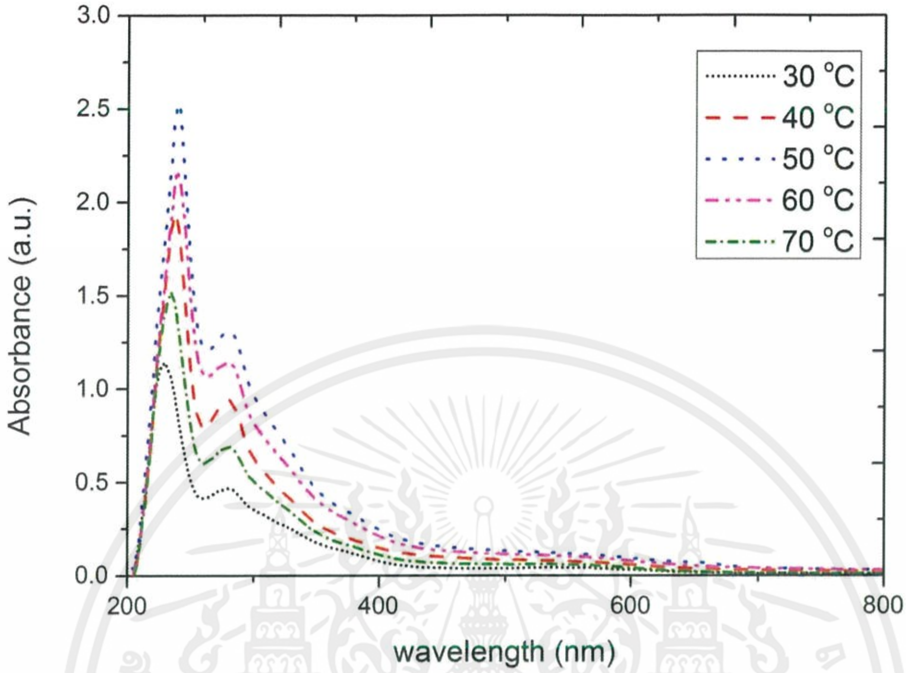
4.1.1 การวัดการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐาน N719



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐาน N719

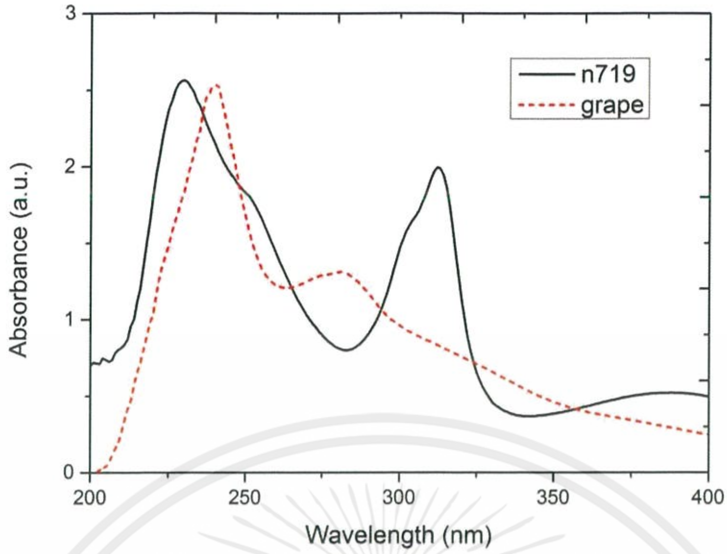
จากภาพ 4.1 การดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐานมีช่วงการดูดกลืนที่ 200-700 nm พบจุดยอดในการดูดกลืนแสง 4 จุด ที่ตำแหน่ง 230nm, 321nm, 388nm และ 531 nm ตามลำดับ

4.1.2 การวัดการดูดกลืนแสงของสีย้อมจากองุ่นโดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัด



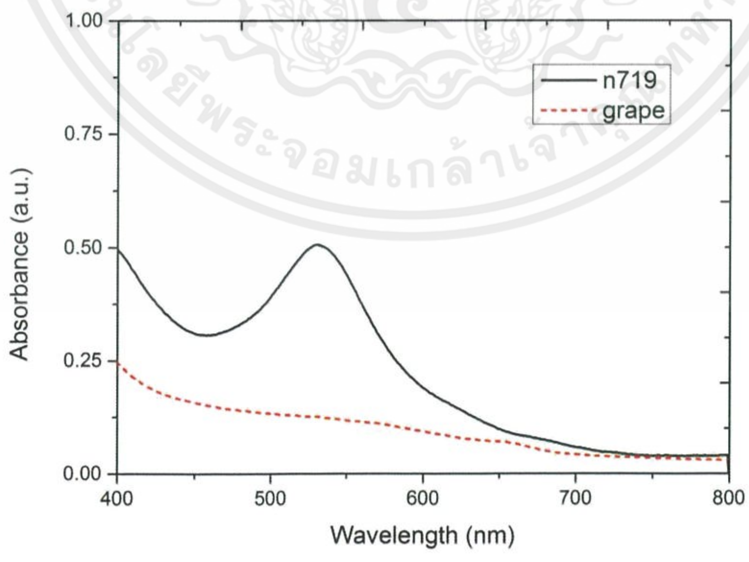
ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่สกัดจากองุ่น โดยมีเงื่อนไขอุณหภูมิการสกัดต่างกันที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐานสกัดจากองุ่น โดยมีเงื่อนไขอุณหภูมิการสกัดต่างกันที 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส สีย้อมที่สกัดดูดกลืนแสงได้ดีในช่วง 200nm ถึง 400 nm พบจุดยอดในการดูดกลืนแสง 2 จุด ที่ตำแหน่ง 240 nm และ 282 nm ตามลำดับ ความสารถในการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่แตกต่างกันนั้น แสดงให้เห็นถึงปริมาณความเข้มข้นของโมเลกุลสีย้อมที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการสกัดในช่วงแรก คือ สีย้อมที่สกัดด้วยอุณหภูมิ 30, 40 และมีค่าสูงสุดที่ 50 องศาเซลเซียส และความสามารถในการดูดกลืนแสงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐาน N719 และสีย้อมที่สกัดจากองุ่น ที่ช่วง 200 nm ถึง 400 nm

จากภาพ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 200 nm ถึง 400 nm จุดยอดการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐานที่ตำแหน่ง 230 nm 312, และ 388 nm และจุดยอดการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่สกัดจากองุ่นที่ตำแหน่ง 240 nm และ 282 nm แสดงให้เห็นถึงการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วง 200 nm ถึง 400 nm ของสีย้อมทั้งสอง



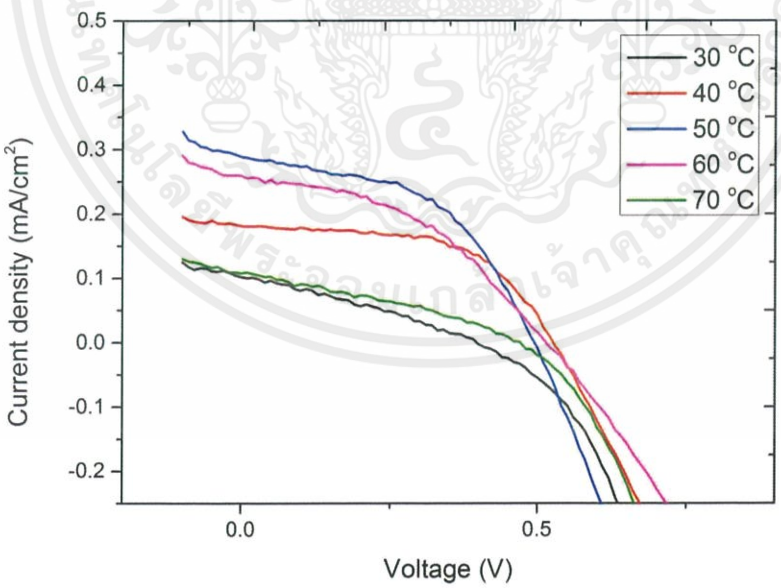
ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐาน N719 และสีย้อมที่สกัดจากองุ่น ที่ช่วง 400 nm ถึง 800 nm

จากภาพ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 400 nm ถึง 800 nm จุดยอดการดูดกลืนแสงของสีย้อมมาตรฐานที่ตำแหน่ง 531 nm ส่วนของสีย้อมที่สกัดจากองุ่นไม่พบจุดยอดของกราฟในช่วง 400 nm ถึง 800 nm แต่ยังคงมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นนี้

4.2 การวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงที่สกัดจากองุ่น โดยมีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัด

ในการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากองุ่นทำได้โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย และมีเงื่อนไขอุณหภูมิการสกัดที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถหาอุณหภูมิสกัดที่เหมาะสมในการสกัดด้วยการนำไปวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัดสีย้อมที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 อาศาเซลเซียส สีย้อมที่สกัดได้จากองุ่นจะถูกนำไปแช่ขั้วเวิคคิงซึ่งมีขั้นฟิล์มของไททาเนียมไดออกไซด์ โดยชั้นฟิล์มของไททาเนียมไดออกไซด์สามารถรับโมเลกุลของสีย้อมเข้าไปแทรกตามรูพรุนของชั้นฟิล์ม เมื่ออุณหภูมิของการสกัดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า J_{sc} มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสกัดที่ 30, 40, 50 อาศาเซลเซียส และค่า J_{sc} มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการสกัดที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียส

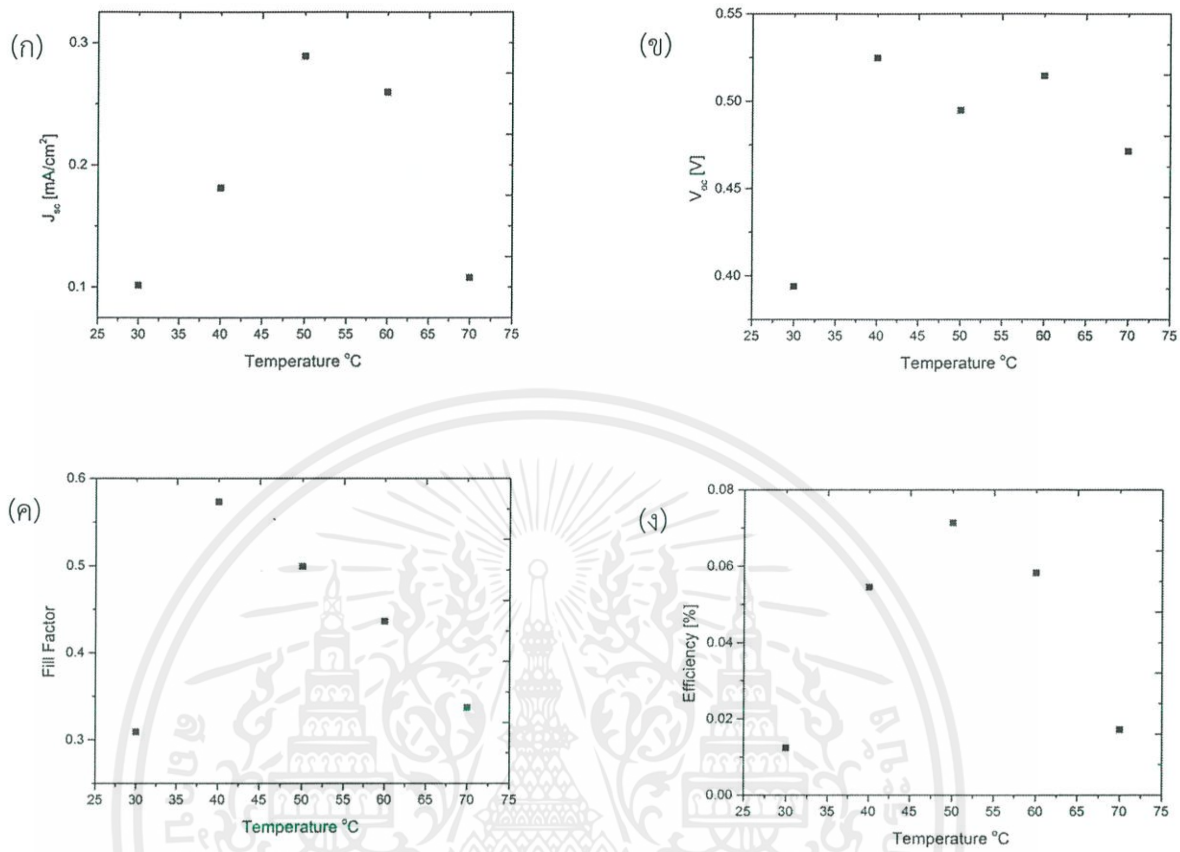


ภาพที่ 4.5 กราฟความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเงื่อนไขอุณหภูมิการสกัดที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงที่มีเงื่อนไขอุณหภูมิการสกัดที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส

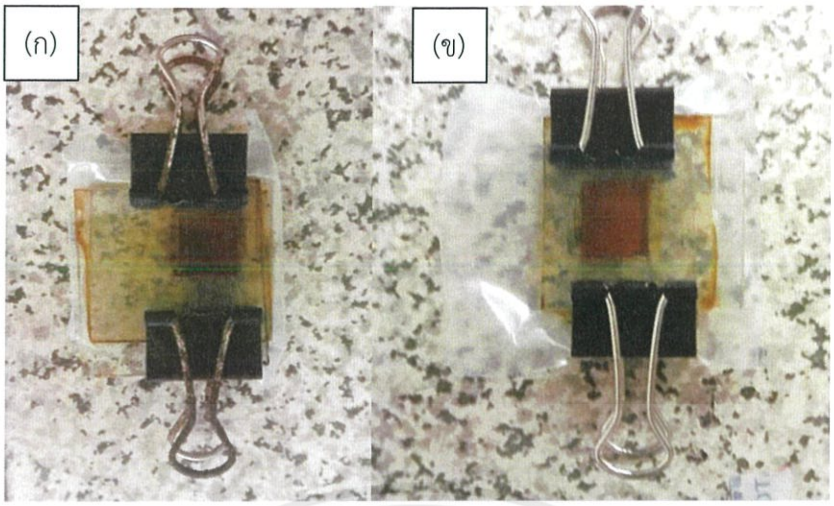
อุณหภูมิ [°C]	V_{oc} [V]	J_{sc} [mA/cm^2]	FF	η [%]
30	0.394	0.102	0.309	0.012
40	0.525	0.181	0.573	0.055
50	0.495	0.289	0.499	0.071
60	0.514	0.260	0.436	0.058
70	0.471	0.108	0.337	0.017

จากตาราง 4.1 แสดงให้เห็นถึงผลของการวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงที่มีเงื่อนไขอุณหภูมิการสกัดที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ค่า J_{sc} มีค่าเพิ่มขึ้น จากอุณหภูมิสกัดที่ 30, 40, 50 มีค่า J_{sc} เท่ากับ 0.102, 0.181, 0.289, mA/cm^2 ค่า J_{sc} ลดลงเมื่ออุณหภูมิการสกัดเพิ่มขึ้น ที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่า J_{sc} เท่ากับ 0.260, 0.108 mA/cm^2 ค่า V_{oc} ที่อุณหภูมิสกัด 30 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.394 V ค่า V_{oc} เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 0.47-0.52 ที่อุณหภูมิการสกัดที่ 40, 50, 60 และ70 อาศาเซลเซียส มีค่า V_{oc} เท่ากับ 0.525, 0.495, 0.514 และ 0.471 V ค่า FF อุณหภูมิสกัดที่ 30 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.309 และเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสกัดที่ 40 องศาเซลเซียส มีค่า FF เท่ากับ 0.573 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าค่า FF มีค่าลดลงเท่ากับ 0.499, 0.436, 0.337 ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิการสกัดที่ 30 ,40 และ 50 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.012%, 0.055%, 0.071% ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสกัดที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.058% และ 0.017% จากตารางที่ แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิการสกัดสีย้อมจากองุ่นที่ 50 องศาเซลเซียส ให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด

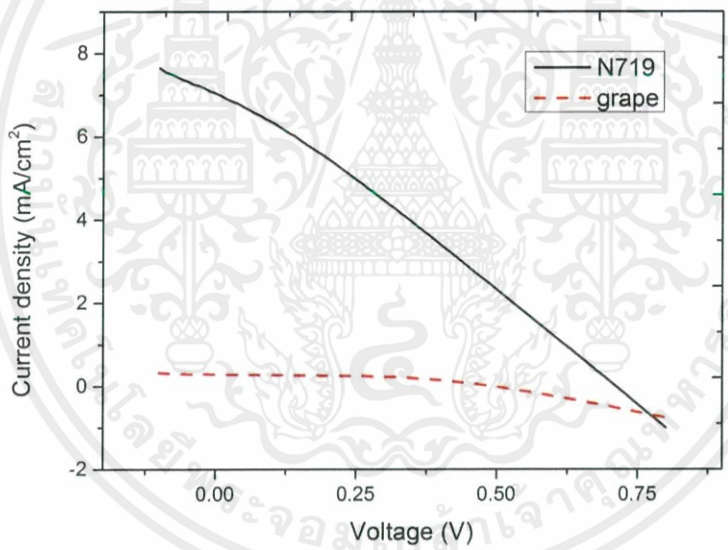


ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ที่อุณหภูมิการสกัดต่างกันที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส (ก) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (ข) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (ค) ฟิลด์แฟกเตอร์ (ง) ค่าประสิทธิภาพ

ภาพที่ 4.6 แสดงค่า J_{sc}, V_{oc}, FF และ η ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัดต่างกันที่ 30, 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า J_{sc} มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการสกัดที่เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ค่า V_{oc} เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการสกัดมากกว่า 30 องศาเซลเซียส ค่า FF เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการสกัดจนถึงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการสกัดมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ค่าประสิทธิภาพมีแนวโน้มคล้ายกับค่า J_{sc} โดยอุณหภูมิสกัดที่ 50 องศาเซลเซียส ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.071% เกิดจากการเสื่อมสภาพของเม็ดสีเนื่องจากความร้อน [16]



ภาพที่ 4.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อม (ก) สีย้อมมาตรฐาน N719 (ข) สีย้อมจากองุ่นสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.8 กราฟความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมมาตรฐาน N719 และสีย้อมสกัดจากองุ่นสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นการเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงที่มีการดูดซับสีย้อมมาตรฐาน N719 และสีย้อมสกัดจากองุ่น พบว่าชั้นฟิล์มของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้สีย้อมมาตรฐาน N719 มีลักษณะเป็นสีม่วงเข้มกว่าชั้นฟิล์มของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากองุ่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงที่ใช้สีย้อมมาตรฐาน และสีย้อมจากองุ่น

	N719	องุ่น
J_{sc} [mA/cm^2]	7.038	0.289
V_{oc} [V]	0.711	0.495
Fill Factor	0.276	0.499
Efficiency [%]	1.379	0.071

จากภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงค่าความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมมาตรฐาน และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากองุ่น สกัดที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 50 องศาเซลเซียส จากตาราง 4.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมมาตรฐาน N719 มีค่าประสิทธิภาพ 1.379% และเซลล์แสงอาทิตย์ที่สีย้อมที่สกัดจากองุ่นให้ค่าประสิทธิภาพ 0.071% เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมมาตรฐานมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สีย้อมที่สกัดจากองุ่น เนื่องจากสีย้อมมาตรฐานสามารถดูดกลืนแสงได้ดีดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4 การส่งอิเล็กตรอนไปยังชั้นฟิล์มของไททาเนียมได้ดีโดยสังเกตได้จากค่า J_{sc} ของสีย้อมมาตรฐานมีค่าสูงถึง 7.038 mA/cm^2 ต่างกับค่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สีย้อมที่สกัดจากองุ่นมีค่าเท่ากับ 0.289 mA/cm^2

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอผลของการวิจัยสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงโดยใช้สีย้อมไวแสงจากสารสกัดจากองุ่น ซึ่งมีเงื่อนไขการสกัดที่อุณหภูมิต่างกัน โดยมีขั้วเวิคคิงเป็นชั้นฟิล์มของไททาเนียม ขั้วเคาน์เตอร์จะใช้ท่อนาโนคาร์ผนังหลายชั้น และใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ระบบสารละลายคู่รีดอกซ์ของไอโอไดด์-ไตรไอโอไดด์ (I^-/I^{3-}) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การดูดกลืนแสงของสีย้อมที่สกัดจากองุ่น ให้ค่าการดูดกลืนสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

5.1.2 การดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากองุ่น ดูดกลืนแสงได้ดีในช่วง 200 nm ถึง 400 nm

5.1.3 พบการดูดกลืนแสงในช่วง 400 nm ถึง 800 nm ของสีย้อมที่สกัดจากองุ่น แต่มีค่ายังคงน้อยกว่าสีย้อมมาตรฐาน N719

5.1.4 ค่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสงโดยใช้สีย้อมไวแสงจากสารสกัดจากองุ่น มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

5.1.5 การสกัดสีย้อมที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิการสกัดต่างกัน พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสกัดนั้น คือ 50 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.071%

5.1.6 การสกัดสีย้อมที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส โมเลกุลสีย้อมเกิดการสลายตัว ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง

5.1.7 การสกัดสีย้อมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส โมเลกุลสีย้อมออกมาได้น้อยทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นการสกัดสีย้อมจากองุ่นมาประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสีไวแสง แต่ค่าประสิทธิภาพที่ได้นั้นยังคงน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมมาตรฐาน แต่สีย้อมมาตรฐาน N719 มีธาตุโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ มีราคาสูง แตกต่างกับสีย้อมที่สกัดจากองุ่นซึ่งมีขั้นตอนการสกัดไม่ซับซ้อน ราคาถูกและปลอดดภัย

5.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มีอีกหลายปัจจัยที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ความเข้มข้นของสีย้อม ความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาในการแช่ ปัจจัยเหล่านี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้

บรรณานุกรม

[1] ก. พวงจำปี, "ซิลิคอน," กรุงเทพ: กลุ่มเทคโนโลยีโลหวิทยา, สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน, กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ 2547.

[2] G. Dennler, M. C. Scharber, and C. J. Brabec, "Polymer-Fullerene Bulk-Heterojunction Solar Cells," *Advanced Materials,* vol. 21, pp. 1323-1338, 2009.

[3] N. Blouin, A. Michaud, D. Gendron, S. Wakim, E. Blair, R. Neagu-Plesu, M. Belletate, G. Durocher, Y. Tao, and M. Leclerc, "Toward a Rational Design of Poly(2,7-Carbazole) Derivatives for Solar Cells," *Journal of the American Chemical Society,* vol. 130, pp. 732-742, 2013/02/04 2007.

[4] H. Fu, M. Choi, W. Luan, Y.-S. Kim, and S.-T. Tu, "Hybrid solar cells with an inverted structure: Nanodots incorporated ternary system," *Solid-State Electronics,* vol. 69, pp. 50-54.

[5] J.-J. Chao, S.-C. Shiu, and C.-F. Lin, "GaAs nanowire/poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate) hybrid solar cells with incorporating electron blocking poly (3-hexylthiophene) layer," *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 105, pp. 40-45.

[6] T.-W. Zeng, H.-H. Lo, C.-H. Chang, Y.-Y. Lin, C.-W. Chen, and W.-F. Su, "Hybrid poly (3-hexylthiophene)/titanium dioxide nanorods material for solar cell applications," *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 93, pp. 952-957, 2009.

[7] C.-T. Chen, F.-C. Hsu, Y.-M. Sung, H.-C. Liao, W.-C. Yen, W.-F. Su, and Y.-F. Chen, "Effects of metal-free conjugated oligomer as a surface modifier in hybrid polymer/ZnO solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 107, pp. 69-74.

[8] P. Pachy, T. Renouard, S. M. Zakeeruddin, R. Humphry-Baker, P. Comte, P. Liska, L. Cevey, E. Costa, V. Shklover, L. Spiccia, G. B. Deacon, C. A. Bignozzi, and M. Gratzel, "Engineering of Efficient Panchromatic Sensitizers for Nanocrystalline TiO2-Based Solar Cells," *Journal of the American Chemical Society,* vol. 123, pp. 1613-1624, 2012/08/29 2001.

[9] B. O'Regan and M. Gratzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dyesensitized colloidal TiO2 films," *Nature,* vol. 353, pp. 737-740, 1991.

[10] A. Kay and M. GrÃ¤tzel, "Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder," *Solar Energy Materials and Solar Cells,* vol. 44, pp. 99-117, 1996.

[11] P. Wang, Ș. M. Zakeeruddin, J.-E. Moser, and M. Gratzel, "A New Ionic Liquid Electrolyte Enhances the Conversion Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells," *The Journal of Physical Chemistry B,* vol. 107, pp. 13280-13285, 2012.

[12] สำนักวิชาการพลังงาน, "เซลล์แสงอาทิตย์," in *[Online].Available: area3.energy.go.th*:กระทรวงพลังงาน.

[13] J. H. V. Elbe and S. J. Schwartz, *Colorants. In Food Chemistry*. New york: Marcel Dekker, Inc., 1996.

[14] E. Yamazaki, M. Murayama, N. Nishikawa, N. Hashimoto, M. Shoyama, and O. Kurita, "Utilization of natural carotenoids as photosensitizers for dye-sensitized solar cells," *Solar Energy,* vol. 81, pp. 512-516, 2007.

[15] H. Chang, H. M. Wu, T. L. Chen, K. D. Huang, C. S. Jwo, and Y. J. Lo, "Dyesensitized solar cell using natural dyes extracted from spinach and ipomoea," *Journal of Alloys and Compounds,* vol. 495, pp. 606-610.

[16] K. Wongcharee, V. Meeyoo, S. Chavadej, “Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers,” Solar Energy Materials & Solar Cells , vol. 91, pp. 566-571, 2007.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอนาวิล เจะปอ
วัน-เดือน-ปีเกิด	1 กันยายน 2536
สถานที่เกิด	จังหวัดปัตตานี
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 25 หมู่ 2 ตำบลลิปะสะโง อำเภอหนองจิก จังหวัดปัตตานี 94170
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2554 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนมหาวชิราวุธ จังหวัดสงขลา ปีการศึกษา 2555 ได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง