



การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเมื่อใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไพลและดอกอัญชัน

## Comparison of Dye-Sensitized Solar Cells Performance using Natural Dye Sensitizer Extracted from *Zingiber cassumunar* and *Clitoria ternatea*

สถาพร คำหอม<sup>\*</sup>

Received: December, 2017; Accepted: June, 2018

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไพลและดอกอัญชัน เพื่อใช้เป็นสีย้อมไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ผลการวิเคราะห์พบว่าสีย้อมธรรมชาติบนอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 400 - 800 นาโนเมตร การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงของสีย้อมทั้งสองชนิดด้วยเงื่อนไขของค่า pH ในการสกัดคงที่เท่ากับ 7 โดยเปลี่ยนแปลงมวลที่ใช้สกัดต่อปริมาตรตัวทำละลายตั้งแต่ร้อยละ 1 3 5 7 9 11 15 และ 20 โดยมวลต่อปริมาตร พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อใช้สีย้อมทั้งสองชนิดเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ด้วยการสกัดที่ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร การใช้สีย้อมสกัดจากไพลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.493 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยการสกัดที่ร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร ในขณะที่สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.684 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยการสกัดที่ร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นเมื่อกำหนดค่าร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตรให้คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 2.4 4.3 7.0 9.4 และ 11.0 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและ

<sup>1</sup> Department of Chemical and Materials Engineering, College of Engineering, Rangsit University, Pathumthani

<sup>\*</sup> Corresponding Author E - mail Address: sataporn.k@rsu.ac.th

ดอกอัญชันมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.444 และ 0.700 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 7 และ 4.3 ทั้งสองเงื่อนไขแสดงผลชัดเจนว่าการใช้สีย้อมสกัดจากไพลให้ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงที่ดีกว่าสีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง; สีย้อมธรรมชาติ; ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

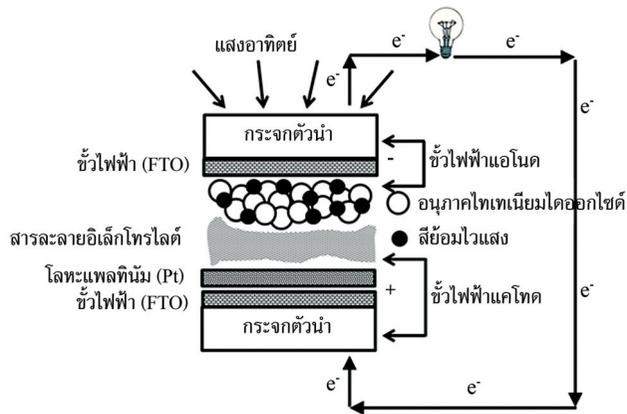
## Abstract

This research investigated the use of natural dye sensitizer extracted from *Zingiber cassumunar* and *Clitoria ternatea* for dye-sensitized solar cells (DSCs). The results showed that natural dye sensitizer on  $\text{TiO}_2$  absorbed visible light in a region with peak between 400 and 800 nm. Photoelectrochemical properties of two natural dye sensitizers were compared in the extraction conditions at constant pH of 7, with the varying of extraction mass per volume of solvent: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 15, and 20 %w/v. It was found that the highest maximum power of DSCs of both natural dye sensitizers reached to the constant when using of 11 %w/v. Dye sensitizer from *Zingiber cassumunar* showed the highest maximum power of  $1.493 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  at 15 %w/v while dye sensitizer from *Clitoria ternatea* showed the highest maximum power of  $0.684 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  at 5 %w/v. The following experiment at constant of 11 %w/v, with the varying of extraction pH values: 2.4, 4.3, 7.0, 9.4, and 11.0. It was found that the highest maximum power of DSCs using both natural dye sensitizers of 1.444 and  $0.700 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  at extraction pH 7.0 and 4.3, respectively. From both conditions, the photoelectrochemical properties of DSCs with dye sensitizer from *Zingiber cassumunar* were found to be apparently higher than that of *Clitoria ternatea*.

**Keywords:** Dye-Sensitized Solar Cells; Natural Dye Sensitizer; Maximum Power

## บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการพัฒนาอย่างมากในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงคือแนวคิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การประกอบเซลล์ทำโดยใช้กระจกเคลือบติดบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออไรด์จำนวน 2 ชั้นประกบกัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วโลหะนำไฟฟ้าโปร่งแสง ขั้วแอนโอดหรืออาจเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) คือกระจกด้านรับแสงและเคลือบอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากดูดซับโมเลกุลของสีย้อมไวแสงจนอิ่มตัว ขั้วแคโทดหรืออาจเรียกว่า ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter Electrode) คือกระจกด้านที่เคลือบด้วยชั้นของคาร์บอนหรือโลหะแพลทินัมเพื่อใช้เร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น ไอโอไดด์ ( $\text{I}^-$ ) และ ไตรไอโอไดด์ไอออน ( $\text{I}_3^-$ ) [1] - [2]



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ปัจจัยของสีย้อมส่งผลต่อการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การใช้สีย้อมสังเคราะห์ของสารประกอบรูทีเนียมคู่กับบนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงประสิทธิภาพได้สูงสุดเท่ากับ 11 - 12 % [3] - [4] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตที่สูงเพราะการใช้โลหะมีตระกูลในสีย้อมสังเคราะห์ทำให้ยังคงเป็นข้อเสียที่น่าจะพัฒนาต่อไป ด้วยเหตุผลนี้การใช้สีย้อมธรรมชาติจึงมีความน่าสนใจในการแก้ปัญหาด้านต้นทุนงานวิจัยการใช้สีย้อมธรรมชาติเป็นสีย้อมไวแสงได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จากที่ผ่านมาพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงประสิทธิภาพได้สูงถึง 9.8 % [5] ในส่วนข้อได้แก่เกี่ยวกับความยุ่งยากของการสกัดสีย้อมธรรมชาติและปริมาณของการสกัดได้ต่ำยังคงเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณา แต่ด้วยแหล่งของวัตถุดิบที่มีความหลากหลายและข้อดีอื่น ๆ เช่น ความเป็นพิษและเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อม ยังคงเป็นสิ่งดึงดูดให้มีการทำวิจัยอยู่เป็นจำนวนมาก นักวิจัยพยายามค้นหาและพัฒนาสีย้อมไวแสงจากสีย้อมธรรมชาติกันอย่างต่อเนื่อง สารประกอบภายในสีย้อมธรรมชาติ เช่น แอนโทไซยานิน เคอร์คูมิน แคโรทีน แทนนิน และคลอโรฟิลล์ ในพืชหลายชนิดได้ถูกศึกษาถึงการส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อถูกใช้เป็นสีย้อมไวแสง [6] - [9] โดยทั่วไปแอนโทไซยานินถูกพบได้ในผล ดอก และใบของพืช สามารถตอบสนองต่อสีที่หลากหลายในช่วงสีแดงถึงสีน้ำเงิน หมู่คาร์บอนิลและไฮดรอกซิลของโมเลกุลแอนโทไซยานินสามารถยึดติดกับพื้นผิวรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ทำให้ช่วยส่งเสริมการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของแอนโทไซยานินไปยังแถบการนำกระแส (Conduction Band) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ [10] ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการใช้สีย้อมธรรมชาติที่สกัดจากเปลือกของพรมไม้ดอกพุดในสกุลงพุด การวิเคราะห์ที่พบหมู่ฟังก์ชันในสีย้อมที่เป็นสารประกอบแอนโทไซยานิน ซึ่งเมื่อใช้เป็นสีย้อมไวแสงแล้วสามารถแสดงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าได้เป็นที่น่าพอใจ [11] ด้วยความหลากหลายของวัตถุดิบในการสกัดสีย้อมธรรมชาติดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้แม้ในแต่ละประเทศยังคงมีการศึกษาถึงการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากพืชพื้นเมือง ผลการทดสอบประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงพบว่าสามารถใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ [12] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยการใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากว่านหางจระเข้และกระบองเพชรเป็นสีย้อมไวแสง ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยวิธียูวี วิส สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยวิธีฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) พบโครงสร้างของคลอโรฟิลล์

และแอนโทไซยานินที่สามารถช่วยในการดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ และโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ ให้ผลที่ดีกว่าในการใช้เป็นสีย้อมไวแสง [13] ในแนวคิดที่น่าสนใจคือ การเปรียบเทียบโครงสร้างของ เคอร์คูมินกับโครงสร้างของแอนโทไซยานินจะส่งผลต่อการใช้งานเป็นสีย้อมไวแสงอย่างไร งานวิจัยที่ผ่านมา ของสารประกอบเคอร์คูมินได้แสดงการดูดกลืนแสงที่มองเห็นในช่วงความยาวคลื่น 420 - 580 นาโนเมตร และยังมียานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากเหง้าของขมิ้นเพื่อใช้เป็นสีย้อม ไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ [14]

ด้วยเหตุที่โมเลกุลของเคอร์คูมินและแอนโทไซยานินมีอยู่มากมายในแหล่งวัตถุดิบทาง ธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการศึกษาการใช้เป็นสีย้อมไวแสง ในงานวิจัยนี้นอกจากจะศึกษา ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากการใช้สีย้อมธรรมชาติเป็นสีย้อมไวแสงแล้ว ยังได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีย้อมธรรมชาติที่มีโมเลกุลของเคอร์คูมินและแอนโทไซยานิน ซึ่งได้ทำการสกัดจากไหลและดอกอัญชัน ภายใต้เงื่อนไขการสกัดที่เปลี่ยนแปลงค่าร้อยละโดยมวลต่อ ปริมาตรและค่า pH ที่ใช้ในการสกัด

## วิธีดำเนินการทดลอง

### 1. การเตรียมสีย้อมไวแสงจากสีย้อมธรรมชาติ

สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไหลและดอกอัญชันโดยใช้ตัวทำละลายเมทานอล มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ล้างวัตถุดิบด้วยน้ำให้สะอาดแล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ขั้นที่ 2 บดวัตถุดิบที่อบแห้งแล้วทำให้เป็นผง

ขั้นที่ 3 นำผงวัตถุดิบใส่ในเมทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นที่ 4 ทำการกรองและเก็บสารละลายไว้ในสภาวะที่บ่มแสง การสกัดมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปร 2 ตัวแปร คือ

1. เปลี่ยนแปลงค่ามวลที่ใช้ในการสกัดตั้งแต่ร้อยละ 1 3 5 7 9 11 15 และ 20 โดยมวลต่อปริมาตร

2. เปลี่ยนแปลงค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 2.4 4.3 7 9.4 และ 11 โดยใช้สารละลาย 0.1 โมลาริตี ของสารละลายไฮโดรคลอริก และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

### 2. การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ทำความสะอาดกระจกเคลือบดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออไรด์ด้วยเอทานอลและทิ้งให้แห้ง จากนั้นเตรียมส่วนประกอบดังนี้

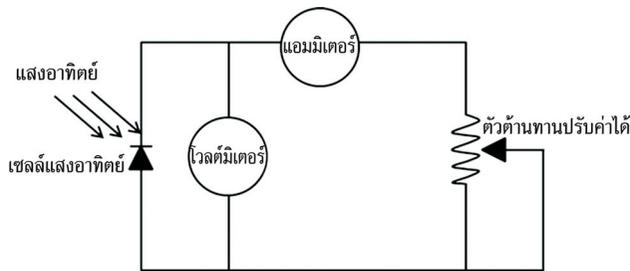
1. แผ่นขั้วไฟฟ้าลบบ เริ่มจากการเตรียมครีมสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยผสม อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ กรดอะซิติก พอลิเอทิลีนไกลคอล และสารลดแรงตึงผิว Triton X-100 เข้าด้วยกัน จากนั้นใช้วิธีการดอกเตอร์เบลด (Doctor-Blade) ทำฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ บนกระจกตัวนำ ซึ่งจะได้นขนาดของฟิล์มบางที่สม่ำเสมอ มีขนาดพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร

2. แผ่นขั้วไฟฟ้าบวก เตรียมโดยทำฟิล์มบางของครีมแพลทินัมบนกระจกตัวนำโดยใช้วิธีการ ดอกเตอร์เบลดเช่นเดียวกัน

3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เตรียมโดยใช้ไอโอดีนและโพแทสเซียมไอโอไดด์ผสมกันแล้วละลายในเอทิลีนไกลคอล แผ่นขั้วไฟฟ้าลบและขั้วไฟฟ้าบวกจะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อทิ้งไว้จนเย็นตัวแล้ว นำกระจกฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จุ่มในสารละลายเมทานอลของสีย้อมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นมาล้างด้วยเอทานอลแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำมาประกบกับกระจกฟิล์มแพลทินัมโดยสอดแผ่นซีรินไว้ตรงกลาง แล้วทำการหดยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลงไประหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

### 3. การวัดประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสง

การดูคลื่นแสงของสีย้อมธรรมชาติดูดซับบนฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงผลวิเคราะห์โดยเครื่องยูวี เทอร์โม (UV-Thermo) การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่าฟิลแฟคเตอร์แสดงผลวิเคราะห์โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีการต่อวงจรประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ และตัวต้านทานปรับค่าได้ ดังรูปที่ 2 การทดลองใช้แหล่งกำเนิดแสงสีขาวขนาด 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar Simulator) ขนาด 300 วัตต์ บันทึกผลโดยเครื่องวัดและบันทึกค่าไฟฟ้า (Voltage Recorder VR-71)



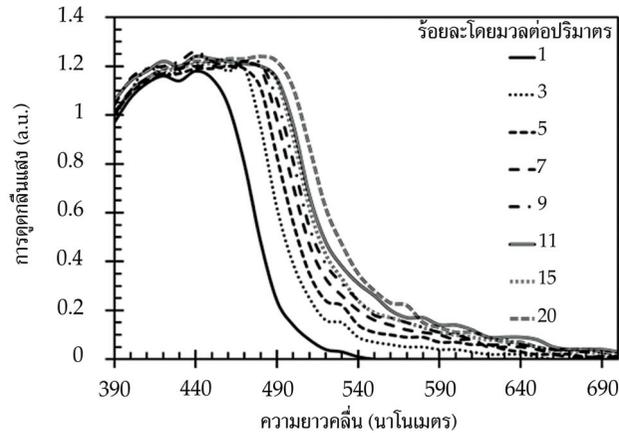
รูปที่ 2 การต่อวงจรเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### 1. การดูคลื่นแสงของสีย้อมไวแสง

สีย้อมธรรมชาติสกัดจากโพลีแซคคาไรด์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3 เส้นสเปกตรัมแสดงตำแหน่งการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกันและมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 490 นาโนเมตร โดยอยู่ในช่วงของการมองเห็นซึ่งจะมีความยาวคลื่นระหว่าง 380 - 780 นาโนเมตร เส้นสเปกตรัมมีการขยายความสูงและความกว้างของความยาวคลื่นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของร้อยละ โดยมวลต่อปริมาตรของการสกัด บ่งบอกว่ามีความแตกต่างของความเข้มของโมเลกุลสีย้อม โดยเส้นสเปกตรัมจะมีแนวโน้มขยายตัวได้สูงสุดเมื่อใช้การสกัดร้อยละ 20 โดยมวลต่อปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยการสกัดสีย้อมธรรมชาติจากผลไม้ เช่น แบล็คเบอร์รี่ บลูเบอร์รี่ เชอร์รี่ ราสเบอร์รี่ และ สตรอว์เบอร์รี่ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นแอนโทไซยานินทั้งหมด โดยความแตกต่างของส่วนประกอบของแอนโทไซยานินในผลไม้แต่ละชนิดเมื่อถูกวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงพบว่าเส้นสเปกตรัมมีรูปร่าง

ที่เหมือนกันและมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในความสูงและความกว้างของค่าความยาวคลื่น [15] ผลของงานวิจัยดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกันกับกรณีของไหลในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามความสามารถการดูดกลืนแสงในช่วงที่กว้างจะส่งผลดีต่อการนำไปใช้งานเป็นสีย้อมไวแสง

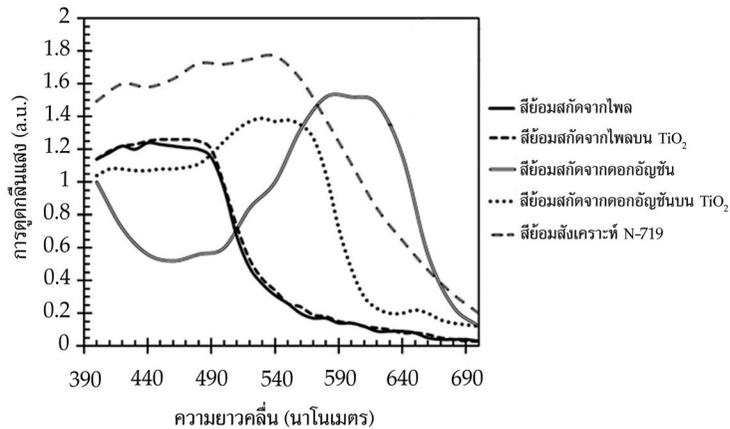


รูปที่ 3 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากไหลเมื่อเปลี่ยนแปลงร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัด

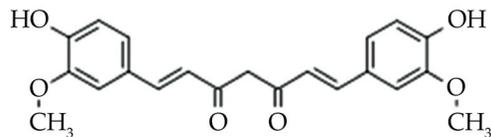
การเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากไหลและดอกอัญชัน แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าสีย้อมสกัดจากไหลก่อนและหลังการดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์มีตำแหน่งการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 390 - 490 นาโนเมตร ในขณะที่สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันแสดงความยาวคลื่นที่สูงกว่าโดยอยู่ในช่วงระหว่าง 520 - 610 นาโนเมตร ความแตกต่างของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบ่งบอกถึงความแตกต่างของสารประกอบในสีย้อมทั้งสองชนิด และสีย้อมสกัดจากไหลมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่กว้างกว่าสีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน แสดงว่าสีย้อมสกัดจากไหลมีการดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ดี [16]

โดยทั่วไปรงควัตถุของพืชในสีย้อมธรรมชาติที่พบส่วนใหญ่ซึ่งสามารถใช้เป็นสีย้อมไวแสงได้ มีอยู่ 4 กลุ่ม 1) คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) 2) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) 3) แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) 4) แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) ความแตกต่างทางโครงสร้างของรงควัตถุทั้ง 4 ชนิด ทำให้ปรากฏเห็นเป็นสีต่าง ๆ และมีความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงที่ต่างกันด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุสำคัญที่ให้สีเขียว ให้ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงส่วนใหญ่ที่ค่าประมาณ 600 nm ขึ้นไป ส่วนฟลาโวนอยด์เป็นรงควัตถุที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้มากมาย ความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงส่วนใหญ่มีค่าประมาณ 400 nm ในขณะที่แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่สำคัญมากอีกชนิดหนึ่งเหมือนกับคลอโรฟิลล์ โดยส่วนใหญ่ปรากฏเป็นสีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงประมาณ 520 - 650 nm และชนิดสุดท้ายแคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่อาจปรากฏเป็นสีแดง สีส้ม หรือสีเหลืองและมีความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงประมาณ 400 - 520 nm [17] เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยฉบับนี้พบว่ามีความเป็นไปได้ที่สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันจะมีรงควัตถุแอนโทไซยานินเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในสีย้อม เพราะมีความสอดคล้องของสีและค่าการดูดกลืนแสง ส่วนในกรณีของ

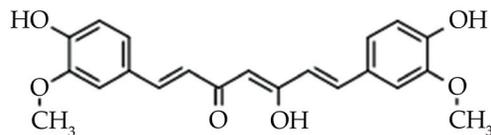
สี้อมสกัดจากไพลมีค่าความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับรงควัตถุแคโรทีนอยด์ แต่ไพลจัดเป็นพืชในตระกูลเดียวกับมันชันที่ให้รงควัตถุสำคัญเป็นเคอร์คูมิน (Curcumin) ซึ่งให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นใกล้เคียงกับรงควัตถุแคโรทีนอยด์ ดังนั้นลักษณะของสี้อมสกัดจากไพลจะให้สารประกอบของเคอร์คูมิน ซึ่งคือกลุ่มของฟีนอล (Phenol) ธรรมชาติที่ตอบสนองต่อสีเหลือง แม้ว่าเคอร์คูมินจะมีโครงสร้างหลายรูป แต่รูปแบบอินอล (Enol) ในสถานะของแข็งและสารละลายจะมีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีเป็นอย่างมาก แสดงดังรูปที่ 5 สารนี้จะแสดงความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงในช่วงที่กว้างระหว่าง 420 - 580 นาโนเมตร [16]



รูปที่ 4 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันเปรียบเทียบกับสี้อมสังเคราะห์ N-719



(ก) รูปแบบคีโต (1, 3-Diketo Form)

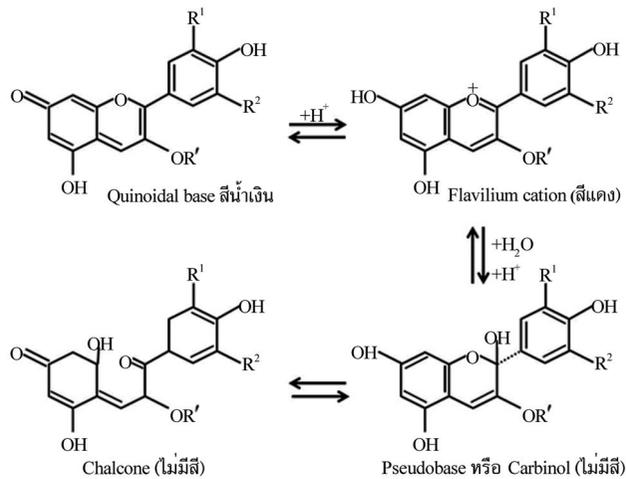


(ข) รูปแบบอินอล (Enol Form)

รูปที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของเคอร์คูมิน

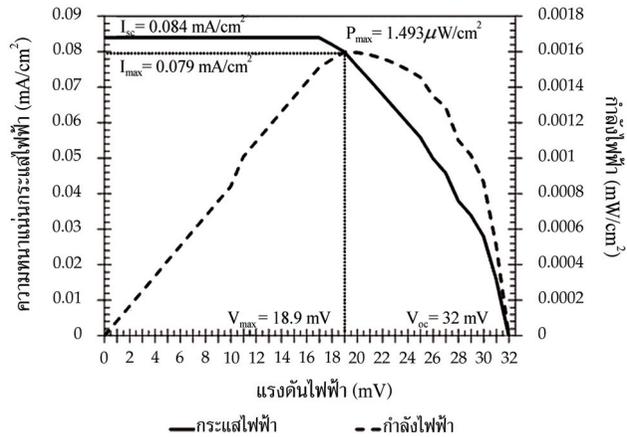
ในกรณีของสี้อมสกัดจากดอกอัญชันที่มีส่วนประกอบของแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารประกอบที่สามารถพบได้ในเนื้อเยื่อของพืชชั้นสูง ได้แก่ ใบ ลำต้น ราก ดอก และผล เป็นสีที่ละลายน้ำได้และอาจปรากฏเป็นสีแดง ม่วง หรือน้ำเงิน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นฐานและค่า pH ของสารละลาย

รูปแบบของแอนโทไซยานินที่ขึ้นกับค่า pH มี 4 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 6 สำหรับค่า pH เท่ากับ 3 หรือต่ำกว่าจะปรากฏเป็นสีแดง ซึ่งอาจเป็นรูปแบบของ Flavilium Cation และเมื่อค่า pH เป็นกลางหรือเป็นเบสจะปรากฏเป็นสีม่วงหรือสีน้ำเงิน ซึ่งอาจเป็นรูปแบบของ Quinoidal Base นอกจากนี้ยังอาจปรากฏเป็นรูปแบบที่ไม่มีสีได้อีก เช่น Pseudobase หรือ Carbinol และ Chalcone สารในกลุ่มนี้จะแสดงความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงในช่วงระหว่าง 520 - 600 นาโนเมตร [18]

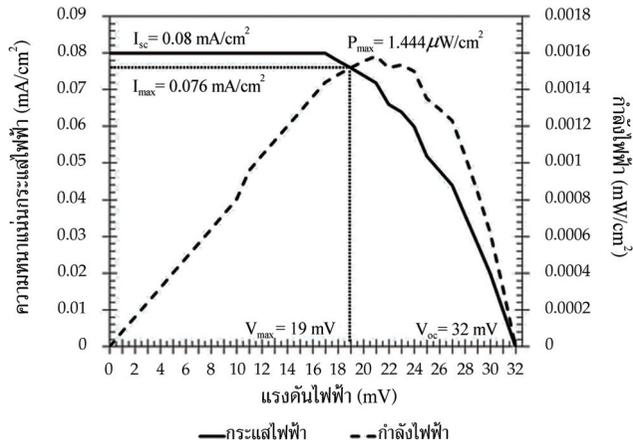


รูปที่ 6 การเปลี่ยนรูปของแอนโทไซยานินในสภาวะค่า pH ที่ต่างกัน

การดูดซับทางเคมีของสีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเคอร์คูมินและแอนโทไซยานิน ด้วยเหตุผลว่ากลไกการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นจากการควมแน่นของโปรตอนของแอลกอฮอล์ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ [19] สีย้อมสกัดจากไพลที่ดูดซับบนอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังคงมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่กว้าง แสดงว่าสีย้อมมีการดูดซับได้ดีและมีความแข็งแรงของการดูดซับ ทำให้ส่งเสริมอันตรกิริยาบนพื้นผิวของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ [20] นอกจากนี้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากไพลที่ดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเลื่อนตำแหน่งเล็กน้อยในทิศทางของความยาวคลื่นที่สูงขึ้น ในขณะที่สีย้อมสกัดจากดอกอัญชันมีแนวโน้มการเลื่อนตำแหน่งของความยาวคลื่นในทิศทางตรงกันข้าม การเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่เกิดขึ้นนี้แสดงถึงอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมและพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก เกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีในรูปแบบ C-O-Ti [10] นั่นอาจเป็นไปได้ว่าอันตรกิริยาของสีย้อมสกัดจากไพลแข็งแรงกว่าสีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน เพราะผลโดยตรงของการยึดติดระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทำให้ช่วยส่งเสริมการดูดกลืนแสงโดยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ [12] ในอีกเหตุผลหนึ่งที่เป็นไปได้คือโครงสร้างของแอนโทไซยานินในสีย้อมสกัดจากดอกอัญชันมีหลายรูปแบบ จึงทำให้เกิดการขัดขวางจากความไม่เป็นระเบียบกับพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จึงทำให้ลดประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมไปยังแถบการนำกระแสของไทเทเนียมไดออกไซด์ [21]



(ก) ทำการสกัดที่ร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร และค่า pH เท่ากับ 7

(ข) ทำการสกัดที่ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร และค่า pH เท่ากับ 9.4  
รูปที่ 7 กราฟ กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพล

## 2. ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชัน กราฟแสดงการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงและผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 1 ประกอบด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{max}$ ) และค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) การศึกษาผลของมวลที่ใช้สกัดแสดงผลว่า การใช้สีย้อมสกัดจากไพลที่เงื่อนไขการสกัดร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร ภายใต้ค่า pH เท่ากับ 7 คือสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรเท่ากับ 0.084 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเท่ากับ 32 มิลลิโวลต์ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.493 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าฟิลแฟคเตอร์ 55.54 %

ในกรณีของการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน สภาวะที่ดีที่สุดให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.684 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เงื่อนไขการสกัดร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร ภายใต้ค่า pH เท่ากับ 7 ในส่วนของการศึกษาผลของค่า pH ที่ใช้ในการสกัดสีย้อมต่อประสิทธิภาพในการใช้เป็นสีย้อมไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ได้กำหนดเงื่อนไขการสกัดร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตรให้คงที่สำหรับไพลและดอกอัญชันที่ใช้สกัด พบว่าค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 9.4 คือสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการสกัดสีย้อมจากไพล แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรเท่ากับ 0.08 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเท่ากับ 32 มิลลิโวลต์ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 1.444 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าฟิลแฟคเตอร์ 56.41 % ในกรณีของการสกัดสีย้อมจากดอกอัญชัน สภาวะที่ดีที่สุดคือ ค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 4.3 ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 0.700 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดลองของตัวแปรมวลและค่า pH ที่ใช้สกัดนี้ สามารถกล่าวได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากไพลเป็นสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ดีกว่าการใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากดอกอัญชัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สีย้อมสังเคราะห์ N-719 ยังมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน

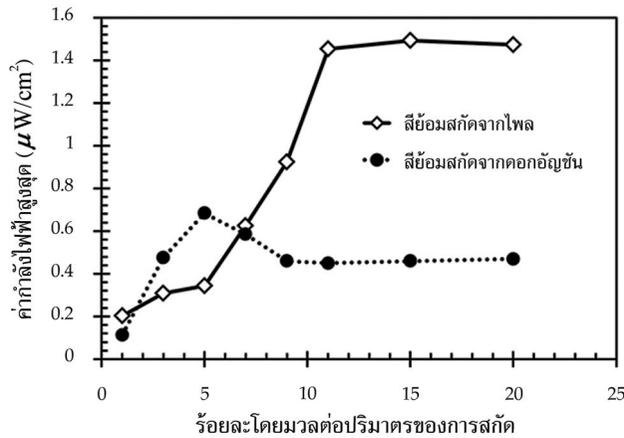
ผลการทดลองที่ช่วยสนับสนุนสามารถพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสังเคราะห์จะมีความกว้างที่ชัดเจนมากที่สุด ด้วยเหตุผลว่าในโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมสังเคราะห์แสดงหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิกที่ส่วนปลาย ซึ่งสามารถสนับสนุนความมีเสถียรภาพและความเป็นคู่แรงกระทำทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สูงระหว่างสีย้อมและพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ นั่นคือการมีพันธะที่ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนจากโมเลกุลสีย้อมในชั้นกระตุ้นไปยังฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ [10] เหตุผลนี้บ่งบอกว่าอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมกับชั้นฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสำคัญในการส่งเสริมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 1 ค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันเป็นสีย้อมไวแสง

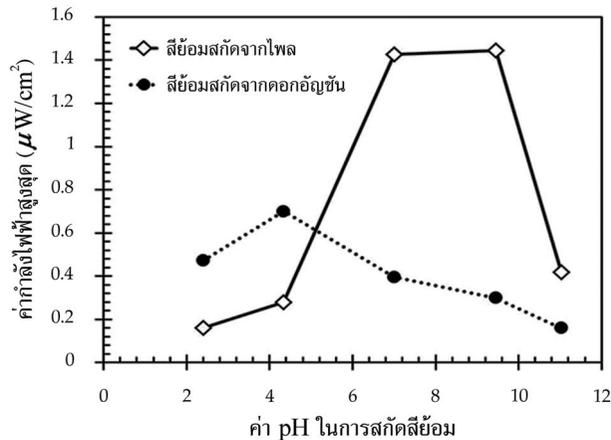
ชนิดของสีย้อมธรรมชาติ (เงื่อนไขในการสกัด)	I <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (mV)	P <sub>max</sub> ( $\mu$ W/cm <sup>2</sup> )	FF (%)
สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน (ร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร, ค่า pH = 7)	0.004	222	0.684	77.03
สีย้อมสกัดจากไพล (ร้อยละ 15 โดยมวลต่อปริมาตร, ค่า pH = 7)	0.084	32	1.493	55.54
สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน (ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร, ค่า pH = 4.3)	0.01	172	0.700	40.69
สีย้อมสกัดจากไพล (ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร, ค่า pH = 9.4)	0.08	32	1.444	56.41
สีย้อมสังเคราะห์ N-719	1.666	148	145	58.81

รูปที่ 8 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไพลและดอกอัญชันโดยใช้ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัดต่างกัน ในกรณีของไพลพบว่าในช่วงแรกค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะแปรผันตรงกับร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัดและจะเริ่มคงที่เมื่อใช้การสกัดที่ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตรเป็นต้นไป สำหรับกรณีของดอกอัญชันจะมีการแปรผัน

ตรงในช่วงแรกเช่นกัน แต่ในช่วงหลังค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าลดลงเล็กน้อยและเริ่มคงที่เมื่อใช้การสกัดที่ร้อยละ 9 โดยมวลต่อปริมาตรเป็นต้นไป



(ก) ใช้ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัดต่างกัน (กำหนดค่า pH ในการสกัดคงที่ = 7)



(ข) ใช้ค่า pH ในการสกัดต่างกัน (กำหนดร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตรคงที่)  
รูปที่ 8 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไหลและคอกอัญชัน

รูปที่ 8 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมสกัดจากไหลและคอกอัญชันโดยใช้ค่า pH ในการสกัดต่างกัน ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการใช้สีย้อมสกัดจากไหลจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 2.4 - 9.4 แต่หลังจากค่า pH มากกว่า 9.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าลดลง หมายความว่า การสกัดสีย้อมธรรมชาติจากไหลภายใต้ค่า pH 7 - 9.4 ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสีย้อมที่ดีขึ้นในการนำไปใช้ ในส่วนของการใช้สีย้อมสกัดจากคอกอัญชันจะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า pH ในการสกัดมากกว่า 4.3

เป็นที่ทราบกันดีว่าการค้นหาหรือการศึกษาสีย้อมธรรมชาติเพื่อใช้เป็นสีย้อมไวแสงยังคงมีงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อการหาความเหมาะสมของแหล่งวัตถุดิบสำหรับการสกัดสีย้อมเพื่อการใช้งานในพื้นที่หนึ่ง ๆ จากการศึกษาข้อมูลของงานวิจัยต่าง ๆ พบงานวิจัยของ Hamadani, M. et al. ได้เปรียบเทียบการใช้สีย้อมธรรมชาติจากพืช 9 ชนิด เป็นสีย้อมไวแสง ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบแรงควัตถุหลักแต่ละชนิดในพืชชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าทางไฟฟ้า ผลที่ได้พบว่า พืช *Consolida Ajacis* ที่มีรงควัตถุหลัก Delphinidin ให้ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าเชิงแสงที่ดีที่สุดจากพืชทั้งหมด 9 ชนิด โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรเท่ากับ 1.68 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเท่ากับ 0.55 โวลต์ และค่าฟิลแฟคเตอร์ 65 % จากการเปรียบเทียบสัดส่วนของค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรระหว่างสีย้อมสกัดจาก *Consolida Ajacis* กับสีย้อมสังเคราะห์ N719 คิดเป็น 10.94 % [22] ในลักษณะเดียวกันกับการเปรียบเทียบสัดส่วนของค่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรในงานวิจัยนี้ ระหว่างสีย้อมสกัดจากไหลที่สภาวะดีที่สุด ให้ค่า 0.08 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับสีย้อมสังเคราะห์ N719 ให้ค่า 1.666 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็นสัดส่วน 4.8 % แม้จะมีค่าน้อยกว่ากรณีของสีย้อมสกัดจากพืช *Consolida Ajacis* แต่ก็ให้ค่าสัดส่วนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชอีก 8 ชนิด ของงานวิจัย Hamadani, M. et al. อย่างไรก็ตามปัจจัยที่สามารถสร้างความแตกต่างของค่าทางไฟฟ้า มีความเป็นไปได้หลายปัจจัย เช่น การเก็บรักษาสีย้อมธรรมชาติ [23] การเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์และวิธีการเตรียม [17] การกระจายตัวและความหนาของชั้นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกตัวนำ [24] แม้ว่าค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในงานวิจัยนี้อาจไม่ได้เป็นค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ทำในพื้นที่อื่น ๆ แต่ก็นับว่าเป็นการได้มาขององค์ความรู้ในบริเวณพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งของประเทศไทยที่มีความเหมาะสมในการเลือกใช้วัตถุดิบไหลในการสกัดสีย้อมธรรมชาติ

### 3. การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากรูปที่ 2 ในกรณีของสีย้อมสกัดจากไหล การเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัดตั้งแต่ 1 - 9 ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มความกว้างของเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสง สิ่งนี้คือตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ในช่วงค่าร้อยละโดยมวลต่อปริมาตรของการสกัด 11 - 20 พบการขยายความกว้างของเส้นสเปกตรัมเพียงเล็กน้อย ซึ่งก็ส่งผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน จึงสามารถบอกได้ว่ามวลของพืชที่ใช้ในการสกัดสีย้อมมีค่าจำกัดค่าหนึ่งที่จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ปรากฏดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 3 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมสกัดจากไหลที่ดูดซับบนไทเทเนียมไดออกไซด์ มีการเลื่อนตำแหน่งทางด้านบวกและเส้นสเปกตรัมมีลักษณะความยาวคลื่นที่กว้าง แต่ในกรณีของสีย้อมสกัดจากดอกอัญชันให้ผลที่ตรงกันข้าม ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้แสดงว่าในกรณีของสีย้อมสกัดจากไหล อิเล็กตรอนจะสามารถส่งผ่านได้ง่ายระหว่างสีย้อมกับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ [10] จึงส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากดอกอัญชันมีตำแหน่งของเส้นสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นสูงกว่า ซึ่งส่งผลกระทบทำให้ความหนาแน่นของกระแสลดลงได้ [25]

โดยทั่วไปการสกัดสีย้อมธรรมชาติภายใต้การใช้ตัวทำละลายแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือเมทานอล จะมีค่า pH ในการสกัดอยู่ในช่วง 4 - 7 การรบกวนระบบด้วยกรดหรือเบสจะส่งผลต่อสารประกอบของสีย้อมธรรมชาติที่สกัดได้ ซึ่งแน่นอนว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างแน่นอน [26] จากรูปที่ 10 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดที่ค่า pH

ในการสกัดเหมาะสมค่าหนึ่ง ผลลัพธ์นี้มีแนวโน้มที่เหมือนกันของสีย้อมสกัดจากไหลและดอกอัญชัน ในกรณีของการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน เซลล์แสงอาทิตย์จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ค่า pH ในการสกัดเท่ากับ 4.3 สามารถอธิบายได้ว่า เกี่ยวข้องกับความเสถียรภาพและรูปแบบของแอนโทไซยานิน ที่เกิดขึ้นในสารละลายที่สภาวะค่า pH ต่าง ๆ กัน จากข้อมูลการศึกษาพบว่าแอนโทไซยานินจะมีความเสถียร ที่สุดในสภาวะของกรดและรูปแบบของ Quinonoidal Base สามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดในสภาวะที่เป็นกรด pH 4 - 6 โดยสภาวะนี้จะปรากฏสีม่วงแดงและมีความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วง 525 - 550 นาโนเมตร ดังนั้นจึงมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ในลักษณะสีย้อมสกัดจาก ดอกอัญชันที่ได้รับและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4 อย่างไรก็ตามในสารละลายที่ค่า pH ไม่ได้อยู่ในช่วง 4 - 6 อาจเกิดรูปแบบของแอนโทไซยานินที่ไม่ได้ส่งเสริมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงทำให้ มีค่าลดต่ำลงได้ปรากฏดังรูปที่ 8 (ข) เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบเคอร์คูมินจากสีย้อมสกัดจากไหล พบว่าเคอร์คูมินส่งเสริมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมากกว่าแอนโทไซยานิน เหตุผลที่เป็นไปได้คือการขยาย การคอนจูเกตของหมู่อะโรมาติก (Aromatic Groups) และอินอลของเคอร์คูมิน ซึ่งทำให้สารประกอบ มีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงขึ้นในช่วงแสงที่มองเห็นได้ นอกจากนี้การมีหมู่ฟีนิล (Phenyl Groups) ที่ส่วนปลายโดยมีหมู่เมทอกซี (Methoxy) และไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups) ในตำแหน่งที่ 3 และ 4 จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เลื่อนตำแหน่งของความยาวคลื่นสูงสุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไปทาง ความยาวคลื่นสูงขึ้น (Bathochromic Shift) สิ่งนี้คือผลที่เกิดขึ้นจากลักษณะเด่นของสารประกอบ เคอร์คูมิน [27] แต่เมื่อค่า pH ในการสกัดเป็นเบสจะส่งผลต่อเสถียรภาพของเคอร์คูมินจึงทำให้ค่ากำลัง ไฟฟ้าสูงสุดมีค่าลดลง แม้ว่าการสร้างสภาวะกรดจะช่วยเพิ่มความเสถียรภาพได้แต่ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของ กรดที่ใช้ด้วยเช่นกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้กรดไฮโดรคลอริกที่อาจส่งผลต่อสถานะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเกิดเป็นความบกพร่องที่พื้นผิว ทำให้การทำงานประสานร่วมกันกับสีย้อมมีประสิทธิภาพลดลง นั้นหมายความว่า การส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างกันจะทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร เหตุนี้จึงส่งผลต่อการลดลง ของค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุด [28]

ถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจากสีย้อมธรรมชาติจะมีข้อดีในหลายด้าน เช่น การใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ การมีความยืดหยุ่นในการออกแบบ และมีทางเลือกของการใช้วัสดุที่หลากหลาย แต่ก็ยังพบข้อด้อยที่ต้องพัฒนาอยู่อีกหลายด้านเช่นกัน หนึ่งในนั้นคือเรื่องความคงตัวของเซลล์ ซึ่งไม่ได้ ถูกแสดงไว้ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีความพยายามในการพัฒนาความคงตัว ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยทำการศึกษาในหลาย ๆ ด้าน เช่น โครงสร้างโมเลกุลสีย้อม ชนิดตัวทำละลายที่ใช้สกัดสีย้อม อุณหภูมิการสกัดสีย้อม อันตรกิริยาระหว่างสีย้อมกับอนุภาคไทเทเนียม ไดออกไซด์ ตัวทำละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าแพลทินัม เป็นต้น เพื่อค้นหาแนวทาง ที่จะช่วยรักษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานได้ยาวนานขึ้น [17]

## สรุปผลการทดลอง

การใช้สีย้อมสกัดจากไหลเป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ที่ดีกว่าการใช้สีย้อมสกัดจากดอกอัญชัน เหตุผลสนับสนุนคือ สารประกอบเคอร์คูมินในสีย้อมสกัดจากไหล แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง เนื่องจากการมีคอนจูเกตในโครงสร้าง นอกจากนี้ยังมีอันตรกิริยากับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูงกว่า

เงื่อนไขของการสกัดที่เหมาะสมในการเตรียมสีย้อมสกัดจากไหลเป็นไปได้ 2 แนวทาง คือ

1. ร้อยละ 11 - 15 โดยมวลต่อปริมาตร ที่ค่า pH ในการสกัดคงที่เท่ากับ 7

2. ร้อยละ 11 โดยมวลต่อปริมาตร ที่ค่า pH ในการสกัดอยู่ในช่วง 7 - 9 จากการเปรียบเทียบสีย้อมสกัดจากไหลและดอกอัญชันในงานวิจัยนี้ โดยการศึกษาถึงสารประกอบในโครงสร้างของสีย้อมสามารถสร้างความเข้าใจเพื่อการเลือกใช้สีย้อมธรรมชาติเป็นสีย้อมไวแสงได้อย่างเหมาะสมต่อไปในอนาคต

## References

- [1] Papageorgiou, N., Maier, W. F., and Grätzel, M. (1997). An Iodine/Triiodide Reduction Electrocatalyst for Aqueous and Organic Media. **Journal of The Electrochemical Society**. Vol. 144, Issue 3, pp. 876-884. DOI: 10.1149/1.1837502
- [2] Papageorgiou, N. (2004). Counter-Electrode Function in Nanocrystalline Photoelectrochemical Cell Configurations. **Coordination Chemistry Reviews**. Vol. 248, Issue 13-14, pp. 1421-1446. DOI: 10.1016/j.ccr.2004.03.028
- [3] Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiya, R., Koide, N., and Han, L.Y. (2006). Dye-Sensitized Solar Cells with Conversion Efficiency of 11.1 %. **Japanese Journal of Applied Physics**. Vol. 45, Issue 25, pp. L638-L640. DOI: 10.1143/JJAP.45.L638
- [4] Buscaino, R., Baiocchi, C., Barolo, C., Medana, C., Grätzel, M., Nazeeruddin, Md. K., and Viscardi, G. (2008). A Mass Spectrometric Analysis of Sensitizer Solution Used for Dye-Sensitized Solar Cell. **Inorganica Chimica Acta**. Vol. 361, Issue 3, pp. 798-805. DOI: 10.1016/j.ica.2007.07.016
- [5] Zhang, G., Bala, H., Cheng, Y., Shi, D., Lv, X., Yu, Q., and Wang, P. (2009). High Efficiency and Stable Dye-Sensitized Solar Cells with an Organic Chromophore Featuring a Binary  $\pi$ -Conjugated Spacer. **Chemical Communications**. Issue 16, pp. 2198-2200. DOI: 10.1039/b822325d
- [6] Espinosa, R., Zumeta, I., Santana, J. L., Martí'nez-Luzardo, F., Gonzá'lez, B., Docteur, S., and Vigil, E. (2005). Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Photosensitized with Natural Polymers with Enhanced Efficiency from 400 to 600 nm. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Vol. 85, Issue 3, pp. 359-369
- [7] Kumara, G. R. A., Kaneko, S., Okuya, M., Onwona-Agyeman, B., Konno, A., and Tennakone, K. (2006). Shiso Leaf Pigments for Dye-Sensitized Solid-State Solar Cell. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Vol. 90, Issue 9, pp. 1220-1226. DOI: 10.1016/j.solmat.2005.07.007
- [8] Furukawa, S., Iino, H., Iwamoto, T., Kukita, K. and Yamauchi, S. (2009). Characteristics of Dye-Sensitized Solar Cells Using Natural Dye. **Thin Solid Films**. Vol. 518, No. 2, pp. 526-529
- [9] Gómez-Ortíz, N. M., Vázquez-Maldonado, I. A., Pérez-Espadas, A. R., Mena-Rejón, G. J., Azamar-Barrios, J. A., and Oskam, G. (2010). Dye-Sensitized Solar Cells with Natural Dyes Extracted from Achiote Seeds. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Vol. 94, Issue 1, pp. 40-44. DOI: 10.1016/j.solmat.2009.05.013

- [10] Hao, S., Wu, J., Huang, Y., and Lin, J. (2006). Natural Dyes as Photosensitizers for Dye-Sensitized Solar Cell. **Solar Energy**. Vol. 80, Issue 2, pp. 209-214. DOI: 10.1016/j.solener.2005.05.009
- [11] Nishantha, M. R., Yapa, Y. P. Y. P., and Perera, V. P. S. (2012). Sensitization of PhotoelectroChemical Solar Cells with a Natural Dye Extracted from Kopsia Flavida Fruit. In **Proceedings of the 28<sup>th</sup> Technical Sessions**. March 2012, Kelaniya, Sri Lanka, Institute of Physics - Sri Lanka. pp. 54-58
- [12] Mozaffari, S. A., Saeidi, M., and Rahmanian, R. (2015). Photoelectric Characterization of Fabricated Dye-Sensitized Solar Cell Using Dye Extracted from Red Siahkooti Fruit as Natural Sensitizer. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. Vol. 142, pp. 226-231. DOI: 10.1016/j.saa.2015.02.003
- [13] Ganta, D., Jara, J., and Villanueva, R. (2017). Dye-Sensitized Solar Cells Using Aloe Vera and Cladode of Cactus Extracts as Natural Sensitizers. **Chemical Physics Letters**. Vol. 679, pp. 97-101. DOI: 10.1016/j.cplett.2017.04.094
- [14] Ganesh, T., Kim, J. H., Yoon, S. J., Lee, S., Lee, W., Mane, R. S., Han, J. W., and Han, S. H. (2009). Dye Anchored ZnO Nanoparticles: The Positive and Negative Photoluminescence Quenching Effects. **Journal of Applied Physics**. Vol. 106, Issue 8, DOI: 10.1063/1.3245398
- [15] Teoli, F., Lucioli, S., Nota, P., Frattarelli, A., Matteocci, F., Carlo, A. Di and Caboni, E. (2016). Role of pH and Pigment Concentration for Natural Dye-Sensitized Solar Cells Treated with Anthocyanin Extracts of Common Fruits. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. Vol. 316, pp. 24-30
- [16] Kolev, T. M., Velcheva, E. A., Stamboliyska, B. A., and Spitteller, M. (2005). DFT and Experimental Studies of the Structure and Vibrational Spectra of Curcumin. **International Journal of Quantum Chemistry**. Vol. 102, Issue 6, pp. 1069-1079
- [17] Shalini, S., Balasundara prabhu, R., Prasanna, S., Mallick, Tapas K., and Senthilarasu, S. (2015). Review on Natural Dye Sensitized Solar Cells: Operation, Materials and Methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 51, Issue C, pp. 1306-1325. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.052
- [18] Lopes, T. J., Yaginuma, S. R., Novy Quadri, M. G., and Bastos Quadri, M. (2011). Evaluation of Red Cabbage Anthocyanins After Partial Purification on Clay. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. Vol. 54, No. 6, pp.1349-1356. DOI: 10.1590/S1516-89132011000600022
- [19] Meng, S., Ren, J., and E. Kaxiras, E. (2008). Natural Dyes Adsorbed on TiO<sub>2</sub> Nanowire for Photovoltaic Applications: Enhanced Light Absorption and Ultrafast Electron Injection. **Nano Letters**. Vol. 8, No. 10, pp. 3266-3272. DOI: 10.1021/nl801644d
- [20] Ma, T., Inoue, K., Noma, H., Yao, K., and Abe, E. (2002). Effect of Functional Group on Photochemical Properties and Photosensitization of TiO<sub>2</sub> Electrode Sensitized by Porphyrin Derivatives. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. Vol. 152, Issue 1-3, pp. 207-212. DOI: 10.1016/S1010-6030(02)00025-4

- [21] 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 and Solar Cells**. Vol. 91, No. 7, pp. 566-571
- [22] Hamadani, M., Safaei-Ghomi, J., Hosseinpour, M., and Masoomi, R. (2014). Uses of New Natural Dye Photosensitizers in Fabrication of High Potential Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). **Materials Science in Semiconductor Processing**. Vol. 27, pp. 733-739. DOI: 10.1016/j.mssp.2014.08.017
- [23] Hossain, Md. K., Pervez, M. F., Mia, M. N. H., Mortuza, A. A., Rahaman, M. S., Karim, M. R., Islam, J. M. M., Ahmed, F., and Khan, M. A. (2017). Effect of Dye Extracting Solvents and Sensitization Time on Photovoltaic Performance of Natural Dye Sensitized Solar Cells. **Results in Physics**. Vol. 7, pp. 1516-1523. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.011
- [24] Rajab, F. M. (2015). Effect of Solvent, Dye-Loading Time, and Dye Choice on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells. **Journal of Nanomaterials**. Vol. 2016, p. 8. DOI: 10.1155/2016/3703167
- [25] Narayan, M. and Raturi, A. (2011). Investigation of Some Common Fijian Flower Dyes as Photosensitizers for Dye Sensitized Solar Cells abstract. **Applied Solar Energy**. Vol. 47, No. 2, pp. 112-117. DOI: 10.3103/S0003701X11020149
- [26] Zhou, H., Wu, L., Gao, Y., and Ma, T. (2011). Dye-Sensitized Solar Cells using 20 Natural Dyes as Sensitizers. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. Vol. 219, Issue 2-3, pp. 188-194. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2011.02.008
- [27] Crivello, J. V. and Bulut, U. (2005). Curcumin: A Naturally Occurring Long-Wavelength Photosensitizer for Diaryliodonium Salts. **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry**. Vol. 43, No. 21, pp. 5217-5231. DOI: 10.1002/pola.21017
- [28] Hao, S., Wu, J., Fan, L., Huang, Y., Lin, J., and Wei, Y. (2004). The Influence of Acid Treatment of TiO<sub>2</sub> Porous Film Electrode on Photoelectric Performance of Dye-Sensitized Solar Cell. **Solar Energy**. Vol. 76, pp. 745-750