

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

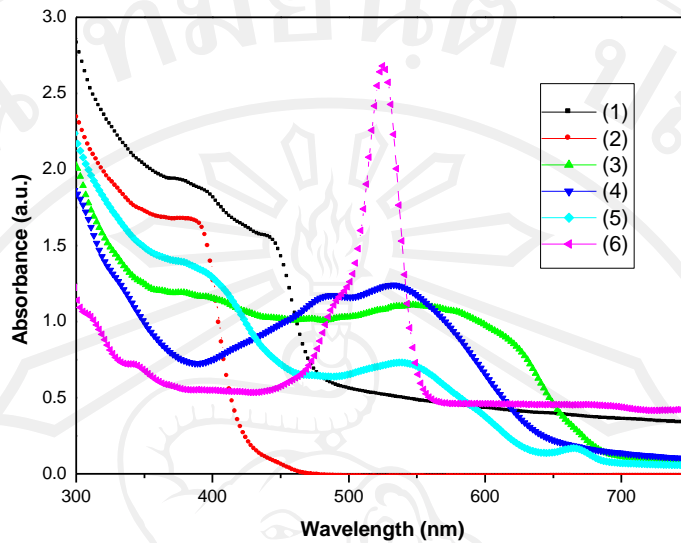
#### 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสง

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของสีข้อมไวแสง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของเม็ดสีข้อมที่สกัดได้จากพืช 5 ชนิด คือ สารสกัดจากเปลือกมังคุด 2 ชนิดคือ Xanthone ที่มี Xanthone มากกว่า 30 ชนิด Xanthoneบริสุทธิ์ ลูกผักปริง ลูกกระดุกอึ่ง ลูกหม่อน ที่ใช้เอทานอลเป็นสารละลายในการสกัดในอัตราส่วน 1:2 เท่ากัน มีสีข้อม Eosin-Y เป็นตัวเปรียบเทียบแล้วใช้เครื่อง UV-vis spectrophotometer วัดค่าการดูดกลืนแสงของสีข้อมแต่ละชนิดในช่วงความยาวคลื่น 300 – 700 nm จุดประสงค์ของการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีข้อมแต่ละชนิดก็คือเพื่อดูว่าสีข้อมไวแสงที่เราสกัดได้ดูดกลืนแสงได้จริงเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นสีข้อมไวแสงของ DSSCs ได้ผลดังรูป 4.1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูปที่ 4.1 แสดงการดูดกลืนของสีย้อมที่สกัดได้จากพืช 5 ชนิด ดังนี้

- (1) SS-DW01                      (2) SS-DW04                      (3) Basellarubra Linn.  
 (4) Dicerma biarticulatum (L.) DC.    (5) Morus alba L.                (6) Eosin-Y

จากรูป 4.1 แสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่สกัดได้แต่ละชนิด เมื่อแสงส่องผ่านสารละลายที่เราสกัดได้แสงจะถูกดูดกลืน เรียกว่า absorbance (A) โดยสัมพันธ์กับค่า transmittance (T) ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I}$$

$I_0$  = ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ

$I$  = ความเข้มของแสงที่เหลือ (transmittance)

$$A = 2 - \log \%T = -\log T = \log \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{I}{I_0}$$

จากรูป 4.1 จะเห็นได้ว่าสีย้อมแต่ละชนิดจะมีค่าการดูดกลืนสูงสุดแตกต่างกัน ซึ่งสีย้อมไวแสงของ DSSCs ที่ดีควรมีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงและสามารถดูดกลืนได้ในช่วงกว้าง จากสีย้อมที่เราสกัดได้ เมื่อนำไปวัดด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer จะสามารถบอกความสามารถในการดูดกลืนแสงของสีย้อมได้ว่าสีย้อมแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นเท่าใด ดังแสดงในตาราง 4.1

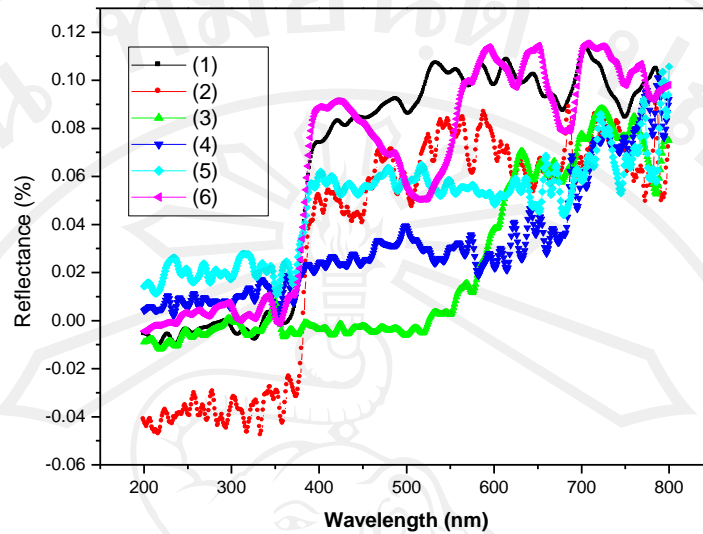
ตาราง 4.1 แสดงความยาวคลื่นที่สีย้อมแต่ละชนิดดูดกลืนแสงได้ดี

| Sensitizer                    | $\lambda_{\max}$ (nm) |
|-------------------------------|-----------------------|
| SS-DW01                       | 392 442               |
| SS-DW04                       | 383                   |
| Basellarubra Linn             | 547                   |
| Dicerma biarticulatum (L.) DC | 488 532               |
| Morus alba L                  | 536 664 664           |
| Eosin-Y                       | 524                   |

จากตาราง 4.1 พบว่าค่าการดูดกลืนสูงสุดของสีย้อมที่สกัดได้แต่ละชนิดอยู่ในช่วงของแสงที่ตามองเห็นเช่นเดียวกับตัวอ้างอิงจึงสามารถสันนิษฐานได้ว่าน่าจะนำไปทำเป็นสีย้อมไวแสงใน DSSCs ได้

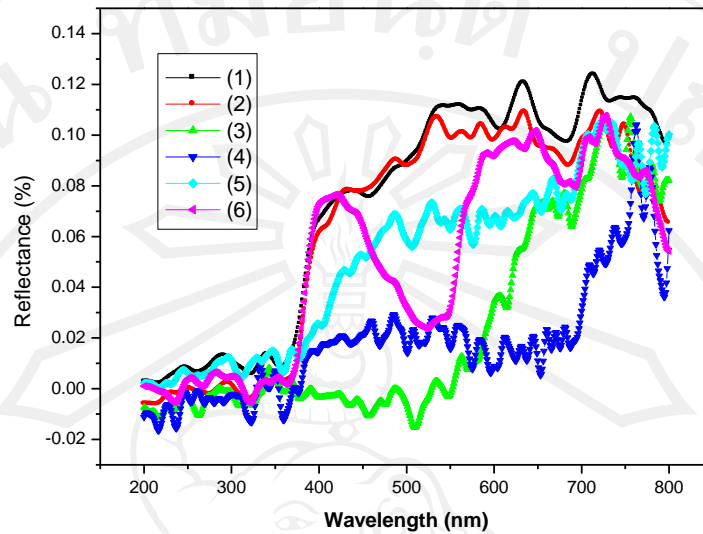
#### 4.1.2 ผลการวัดค่าการสะท้อนของขั้วโฟโตอิเล็กโทรดด้วย UV-vis spectroscopy

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนของขั้วโฟโตอิเล็กโทรดที่ใช้สีย้อมไวแสงจากพืชธรรมชาติที่มี ZnO nano และ ZnO powder เป็นฐานโดยใช้เวลาในการแช่ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการสะท้อน (reflectance) จุดมุ่งหมายของการวัดคือเพื่อดูว่าสีย้อมที่เราสกัดได้สามารถยึดเกาะบนพื้นผิวของ ZnO nano และ ZnO powder ที่จะนำไปทำเป็นขั้วโฟโตอิเล็กโทรดของ DSSCs ต่อไป ได้ผลดังรูป 4.2 - 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงค่าการสะท้อนของโฟโตอิเล็กโทรูดที่มี ZnO powder เป็นฐาน

- (1) ZnO P/SS-DW01    (2) ZnO P/SS-DW04    (3) ZnO P/ Basellarubra Linn  
 (4) ZnO P/ Dicerma biarticulatum (L.) DC    (5) ZnO P/ Morus alba L  
 (6) ZnO P/Eosin-Y



รูปที่ 4.3 แสดงค่าการสะท้อนของโฟโตอิเล็กโทโรดที่มี ZnO nano เป็นฐาน

- (1) ZnO NP/SS-DW01    (2) ZnO P/SS-DW04    (3) ZnO NP/ Basellarubra Linn  
 (4) ZnO NP/ Dicerma biarticulatum (L.) DC    (5) ZnO NP/ Morus alba L  
 (6) ZnO NP/Eosin-Y

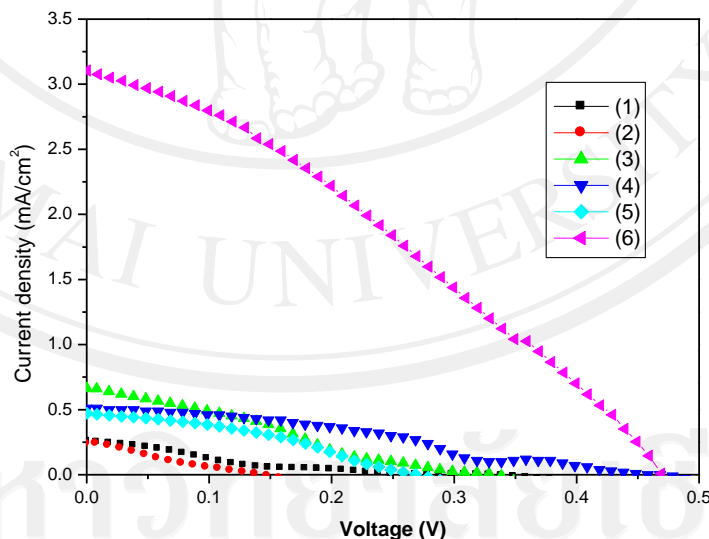
จากรูป 4.2 - 4.3 จะเห็นว่าเมื่อนำ ZnO powder และ ZnO nano ที่เตรียมได้ไปแช่ในสี  
 ย้อมไวแสงจากพืชธรรมชาติจาก Xanthone ที่มี Xanthone มากกว่า 30 ชนิด, Xanthone บริสุทธิ์,  
 ลูกผักปริง, ลูกกระดุกอึ้ง, ลูกหม่อน และใช้ Eosin-Y เป็นตัวมาตรฐานไปวัดค่าการสะท้อนแสง จะ  
 เห็นว่าโฟโตอิเล็กโทโรดที่แช่จากสีย้อมไวแสงที่ดูดกลืนแสงได้ดี ก็จะมีค่าการสะท้อนที่น้อย ผลการ  
 ทดลองในตอนนีชี้ให้เห็นว่าสีย้อมไวแสงที่เราสกัดได้นั้นสามารถยึดเกาะบน ZnO powder และ  
 ZnO nano ได้จริง

## 4.2 ผลการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สียอมไวแสงที่ใช้สียอมที่สกัดมาจากพืชธรรมชาติดังนี้ 1. Xanthone>30 ชนิด 2. Xanthone บริสุทธิ์ 3. ลูกผักปริง 4. ลูกกระดุกอึ้ง 5. หม่อนและ 6. Eosin-Y เป็นตัวมาตรฐาน โดยใช้ ZnO nano และ ZnO powder เป็นฐานในชั้นสารกึ่งตัวนำ และศึกษาการถ่ายเทประจุภายในเซลล์ด้วย EIS

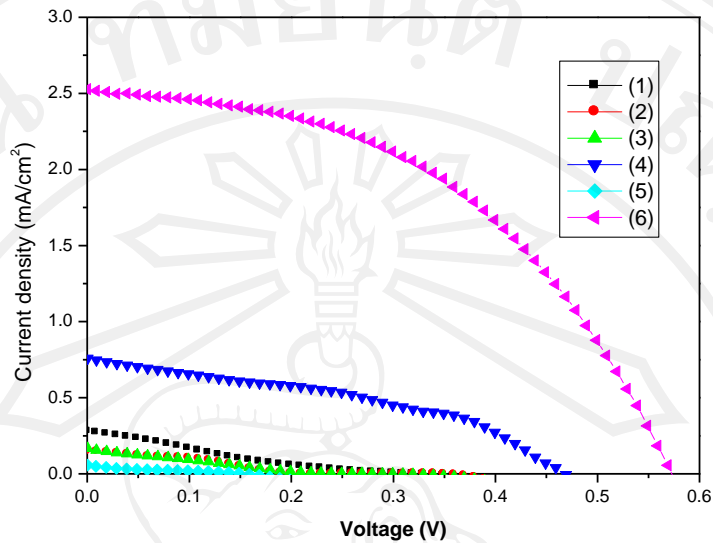
### 4.2.1 ผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการใช้การเปรียบเทียบของ J-V Characteristic Curve ของเซลล์ที่ใช้สียอมไวแสงที่สกัดได้ คือ 1. Xanthone>30 ชนิด 2. Xanthone บริสุทธิ์ 3. ลูกผักปริง 4. ลูกกระดุกอึ้ง 5. หม่อนและ 6. Eosin-Y เป็นตัวมาตรฐาน โดยใช้ ZnO nano และ ZnO powde เป็นฐานในชั้นสารกึ่งตัวนำจะได้ผลการทดลอง ดังรูป 4.4 - 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงที่มี ZnO powder เป็นฐาน

- (1) SS-DW01                      (2) SS-DW04                      (3) Basellarubra Linn.  
 (4) Dicerma biarticulatum (L.) DC.      (5) Morus alba L.                      (6) Eosin-Y



รูปที่ 4.5 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มี ZnO nano เป็นฐาน

- (1) SS-DW01                      (2) SS-DW04                      (3) Basellarubra Linn.  
 (4) Dicerma biarticulatum (L.) DC.    (5) Morus alba L.                      (6) Eosin-Y

จากรูปกราฟ J-V 4.3 - 4.4 เราสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า  $J_{SC}$ , FF,  $V_{OC}$  และ Efficiency ได้ดังตาราง 4.2 - 4.3

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $J_{sc}$ , FF,  $V_{oc}$  และ Efficiency เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี  
 ย้อมไวแสงจากพืชธรรมชาติที่มี ZnO powder เป็นฐาน

| Substrate     | Sensitizer                       | $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$<br>(V) | FF   | Efficiency<br>(%) |
|---------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|------|-------------------|
| ZnO<br>Powder | SS-DW01                          | 0.26                              | 0.32            | 0.16 | 0.013             |
|               | SS-DW04                          | 0.23                              | 0.14            | 0.22 | 0.007             |
|               | Basellarubra Linn                | 0.66                              | 0.33            | 0.26 | 0.057             |
|               | Dicerma biarticulatum<br>(L.) DC | 0.51                              | 0.46            | 0.32 | 0.076             |
|               | Morus alba L                     | 0.47                              | 0.27            | 0.36 | 0.046             |
|               | Eosin-Y                          | 3.1                               | 0.45            | 0.32 | 0.46              |

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า  $J_{sc}$ , FF,  $V_{oc}$  และ Efficiency เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี  
 ย้อมไวแสงจากพืชธรรมชาติที่มี ZnO nano เป็นฐาน

| Substrate   | Sensitizer                       | $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$<br>(V) | FF   | Efficiency<br>(%) |
|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|------|-------------------|
| ZnO<br>Nano | SS-DW01                          | 0.28                              | 0.31            | 0.19 | 0.016             |
|             | SS-DW04                          | 0.15                              | 0.19            | 0.37 | 0.017             |
|             | Basellarubra Linn                | 0.17                              | 0.29            | 0.19 | 0.009             |
|             | Dicerma biarticulatum (L.)<br>DC | 0.76                              | 0.46            | 0.4  | 0.14              |
|             | Morus alba L                     | 0.06                              | 0.15            | 0.23 | 0.002             |
|             | Eosin-Y                          | 2.53                              | 0.57            | 0.47 | 0.67              |

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์  
 แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมไวแสงจากพืชธรรมชาติที่เราสกัดได้ พบว่าสีย้อมที่สกัดได้  
 จากพืช สามารถนำมาใช้เป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้ สีย้อมไวแสงที่  
 สกัดได้จาก Dicerma biarticulatum (L.) DC ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดผลจากที่ใช้ ZnO  
 Powder เป็นฐานสีย้อมไวแสงที่สกัดได้จาก Dicerma biarticulatum (L.) DC ได้ผลดีที่สุดโดย  
 ให้ค่าความหนาแน่นกระแส 0.51 mA/cm<sup>2</sup> ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจเปิด 0.46 V ค่าฟิลแฟก  
 เทอร์ 0.32 และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า 0.076%



ผลจากที่ใช้ ZnO nano เป็นฐานสีย้อมไวแสงที่สกัดได้จาก ลูกกระดุกอึ่ง ได้ผลดีที่สุด โดยให้ค่าความหนาแน่นกระแส 0.76 mA/cm<sup>2</sup> ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 0.46 V ค่าฟิลแฟกเตอร์ 0.4 และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า 0.14%

ซึ่งการที่สีย้อมไวแสงที่สกัดได้จาก *Dicerma biarticulatum* (L.) DC ให้ประสิทธิภาพที่ด้นั้นอาจมาจากการที่สีย้อมนั้นสามารถยึดเกาะบน ZnO ได้ดีกว่าสีย้อมตัวอื่นดังผลจากการวัดค่าการสะท้อนของขั้วโฟโตอิเล็กโทรดรูป 4.2-4.3 แต่ทั้งสองเงื่อนไขยังให้ประสิทธิภาพน้อยกว่าเซลล์อ้างอิง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการรวมตัวของพาหะ (recombination) และการจับของพาหะ (trap) ในเนื้อสารและผิวสัมผัส ประสิทธิภาพในการจับพาหะซึ่งถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยกว่า 100% จึงส่งผลให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าเซลล์อ้างอิง ทั้งนี้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแคโทดอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ อาจอธิบายได้ด้วยอิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้าเคมี ดังรูป 4.7 และ 4.8

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วย EIS

EIS เป็นการศึกษาการถ่ายเทประจุภายในเซลล์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การถ่ายเทประจุเกิดขึ้นได้ 2 ทิศทางคือ ทิศทางไปข้างหน้า (forward bias) และทิศทางกลับหลัง (reverse bias) เมื่อใช้ประจุลบหรืออิเล็กตรอนเป็นเกณฑ์ จะนิยามทิศทางทั้งสองได้ดังนี้

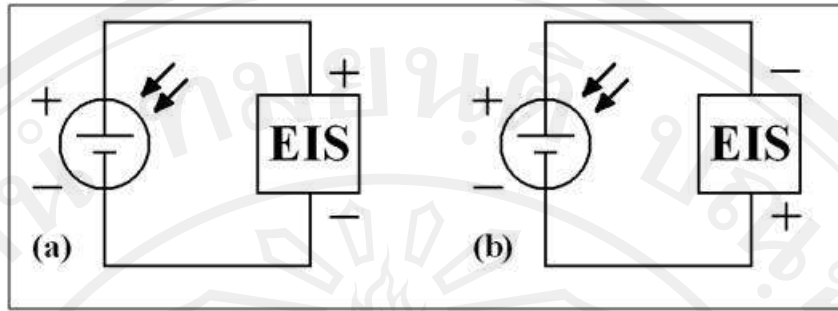
ทิศไปข้างหน้า

ZnO → FTO → external circuit → counterelectrode → electrolyte → ZnO

ทิศทางกลับหลัง

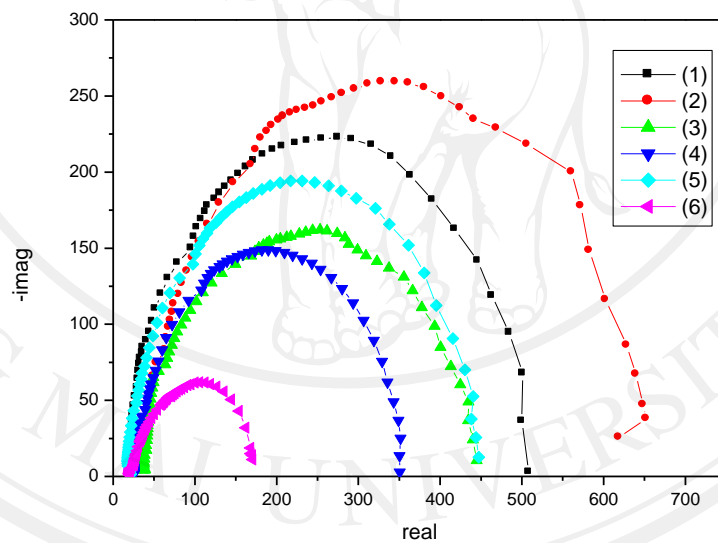
ZnO → electrolyte → counterelectrod → external circuit → FTO → ZnO

จากทั้งสองทิศทางจะเห็นได้ว่าทิศทางไปข้างหน้าคือ ทิศการไหลของอิเล็กตรอนขณะที่เซลล์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้า ส่วนทิศทางกลับหลังคือ ทิศการไหลของอิเล็กตรอนที่พิจารณาเป็นกระแสและไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นเซลล์ที่ดีควรมีการถ่ายเทประจุในทิศไปข้างหน้าสูง และถ่ายเทในทิศกลับหลังต่ำนั่นเอง และการต่อกับ EIS สามารถเขียนแผนภาพการต่อวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การต่อวงจรเพื่อวัด EIS ของ reverse bias (a) forward bias (b) (สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง ขั้วบวก คือโฟโตอิเล็กโทรด ส่วน ขั้วลบ คือแคโทดอิเล็กโทรด)

เมื่อทำการวิเคราะห์การไหลย้อนกลับของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานนำของซิงก์ออกไซด์สู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้ทำการทดลองวัดอิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้าเคมีได้ผล ดังรูปที่ 4.6-4.7



รูปที่ 4.7 แสดง Nyquist plot ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมีแสง ของเซลล์ที่มี ZnO powder เป็นฐานและใช้สีข้อมที่สกัดจากพืชธรรมชาติ

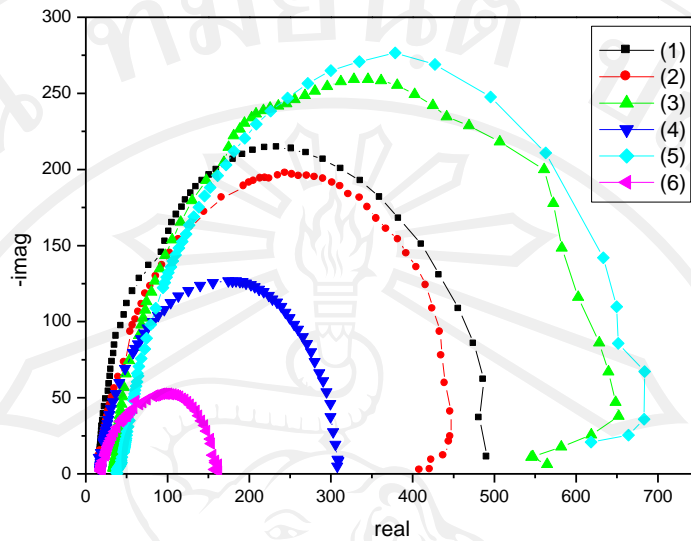
- (1) SS-DW01                      (2) SS-DW04                      (3) Basellarubra Linn.  
 (4) Dicerma biarticulatum (L.) DC.                      (5) Morus alba L.                      (6) Eosin-Y

จากรูปที่ 4.7 ได้มีการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้าเคมีโดยการจำลองกราฟโดยโปรแกรม Z-view เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานภายใน ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความต้านทานภายในเซลล์ของสีย้อมแต่ละชนิดที่มี ZnO powder เป็นฐาน

| Substrate | Type of dye                   | Light $R_{ct}(\Omega)$ |
|-----------|-------------------------------|------------------------|
| ZnO Nano  | SS-DW01                       | 527.8                  |
|           | SS-DW04                       | 544                    |
|           | Basellarubra Linn             | 339.8                  |
|           | Dicerma biarticulatum (L.) DC | 302.1                  |
|           | Morus alba L                  | 356.2                  |
|           | Eosin-Y                       | 121.3                  |

จากตารางที่ 4.4 ค่า  $R_{CT}$  หมายถึงค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อระหว่างซิงก์ออกไซด์ สีย้อมไวแสง และอิเล็กโทรไลต์ จากเงื่อนไขที่มี ZnO powder เป็นฐานพบว่า ค่า  $R_{CT}$  เรียงจากน้อยไปหามากตามลำดับดังนี้ Dicerma biarticulatum (L.), Basella rubra Linn, Morus alba L, SS-DW01, SS-DW04 ซึ่งตัวที่มีค่า  $R_{CT}$  น้อยสุดจะมีค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดก็คือสีย้อมจาก Dicerma biarticulatum (L.) แต่ยังมีค่าน้อยกว่าตัวอ้างอิง Eosin-Y ซึ่งมีค่า  $R_{CT}$  ที่น้อยกว่า ซึ่งการที่มีค่า  $R_{CT}$  สูงมากทำให้เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนที่ผ่านไปยังแคโทด อิเล็กโทรด ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพที่ต่ำ



รูปที่ 4.8 แสดง Nyquist plot ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมีแสง ของเซลล์ที่มี ZnO nano เป็นฐานและใช้สีย้อมที่สกัดจากพืชธรรมชาติ

- (1) SS-DW01                      (2) SS-DW04                      (3) Basellarubra Linn.  
 (4) Dicerma biarticulatum (L.) DC.    (5) Morus alba L.                (6) Eosin-Y

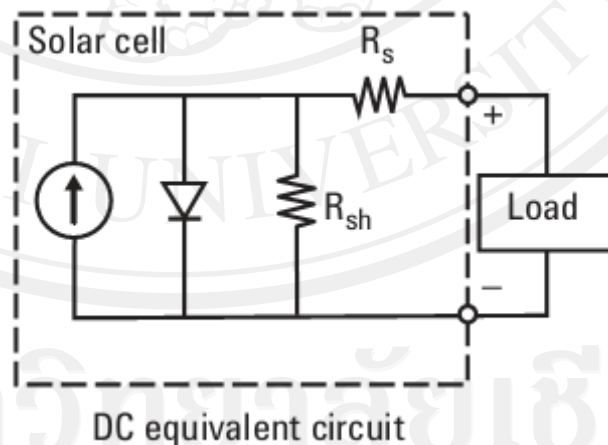
จากรูปที่ 4.8 ได้มีการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้าเคมีโดยการจำลองกราฟโดยโปรแกรม Z-view เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานภายใน ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความต้านทานภายในเซลล์ของสีย้อมแต่ละชนิดที่มี ZnO nano เป็นฐาน

| Substrate | Type of dye                   | Light $R_{ct}(\Omega)$ |
|-----------|-------------------------------|------------------------|
| ZnO Nano  | SS-DW01                       | 419.8                  |
|           | SS-DW04                       | 394                    |
|           | Basellarubra Linn             | 432.4                  |
|           | Dicerma biarticulatum (L.) DC | 255.5                  |
|           | Morus alba L                  | 767.3                  |
|           | Eosin-Y                       | 106.4                  |

จากตารางที่ 4.5 เป็นเงื่อนไขที่ใช้ ZnO nano เป็นฐานพบว่าค่า  $R_{CT}$  เรียงจากน้อยไปหามากตามลำดับดังนี้ *Dicerma biarticulatum* (L.) DC, SS-DW04, SS-DW01, *Basellarubra* Linn, *Morus alba* L สีย้อมที่มีค่า  $R_{CT}$  ต่ำ จะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูง ก็คือ *Dicerma biarticulatum* (L.) DC แต่ยังมีค่าน้อยกว่าตัวอ้างอิง Eosin-Y ซึ่งมีค่า  $R_{CT}$  ที่น้อยกว่า ซึ่งการที่มีค่า  $R_{CT}$  สูงทำให้เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนที่ผ่านไปยังแคโทดรีดิวซ์โทรด ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพที่ต่ำ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสภายในระบบ DSSC ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งอธิบายลักษณะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยแหล่งของกระแส (current, I) ไดโอด (PN junction) และตัวต้านทาน (shunt resistance,  $R_{sh}$ ) ที่ต่อขนานกับชุดตัวต้านทาน (series resistance,  $R_s$ ) ซึ่งเป็นความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดและเป็นความต้านทานหลักที่มีผลต่อการที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นถ้า  $R_s$  มีค่าน้อย ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่ามากขึ้น ส่วนความต้านทาน  $R_{sh}$  มีผลต่อกระแสไฟฟ้า เช่น กระแสเนื่องจากการคืนตัวของอิเล็กตรอน ( $e^-$  recombination) หรือการเกิดจากกระแสรั่วไหลบริเวณขอบของอุปกรณ์ ซึ่งกรณีนี้ ค่า  $R_{sh}$  ต้องมีขนาดที่มากจึงจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น สำหรับค่า  $R_s$  และ  $R_{sh}$  ของงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4.6-4.7



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรสมมูลกระแสตรงของเซลล์แสงอาทิตย์ [25]

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า  $R_{sh}$  และ  $R_s$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงจากพืชธรรมชาติที่ใช้ ZnO powder เป็นฐาน

| Substrate  | Sensitizer                    | $R_{sh}(\Omega)$ | $R_s(\Omega)$ |
|------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| ZnO Powder | ss-dw01                       | 871.96           | 336.2         |
|            | ss-dw04                       | 516.47           | 3604.83       |
|            | Basellarubra Linn             | 1625.45          | 1203.2        |
|            | Dicerma biarticulatum (L.) DC | 1834.22          | 1008.49       |
|            | Morus alba L                  | 1274.67          | 1676.33       |
|            | Eosin-Y                       | 996.82           | 98.04         |

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า  $R_{sh}$  และ  $R_s$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงจากพืชธรรมชาติที่ใช้ ZnO powder เป็นฐาน

| Substrate | Sensitizer                    | $R_{sh}(\Omega)$ | $R_s(\Omega)$ |
|-----------|-------------------------------|------------------|---------------|
| ZnO Nano  | ss-dw01                       | 933.33           | 2614.38       |
|           | ss-dw04                       | 909.54           | 2178.31       |
|           | Basellarubra Linn             | 588.36           | 3777.11       |
|           | Dicerma biarticulatum (L.) DC | 986.12           | 260.7         |
|           | Morus alba L                  | 871.96           | 6028.25       |
|           | Eosin-Y                       | 1255.75          | 69.86         |

จากผลการวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้สีข้อมไวแสงจากพืชธรรมชาติในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง พบว่าสีข้อมจาก Dicerma biarticulatum (L.) DC ที่มี ZnO powder เป็นฐานมีค่า  $R_{sh}$  สูงที่สุดเมื่อเทียบกับสีข้อมทั้งหมดซึ่งมีผลต่อกระแสเนื่องจากการคืนตัวของอิเล็กตรอน ( $e^-$  recombination) หรือการเกิดจากกระแสรั่วไหลบริเวณขอบของอุปกรณ์แต่มีค่า  $R_s$  ที่สูงกว่า Eosin-Y จึงทำให้ประสิทธิภาพนั้นน้อยกว่า Eosin-Y ที่เป็นเซลล์อ้างอิง ในส่วนผลการวิเคราะห์สีข้อมที่มี ZnO nano เป็นฐานสีข้อมจาก Dicerma biarticulatum (L.) DC จะมีค่า  $R_{sh}$  สูงสุดในบรรดาสีข้อมจากพืชธรรมชาติที่สกัดได้ทั้งหมดแต่มีค่าน้อยกว่า Eosin-Y และมีค่า  $R_s$  น้อยกว่าสีข้อมชนิดอื่นจึงมีผลทำให้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าสีข้อมจากพืชชนิดอื่น แต่มีค่า  $R_s$  ที่มากกว่าจึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพน้อยกว่า Eosin-Y