

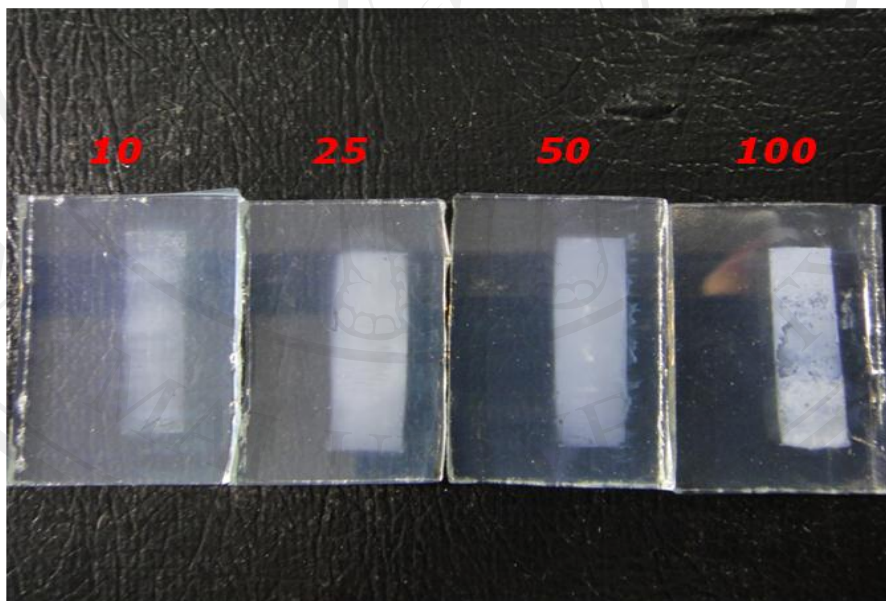
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มซิงก์ออกไซด์

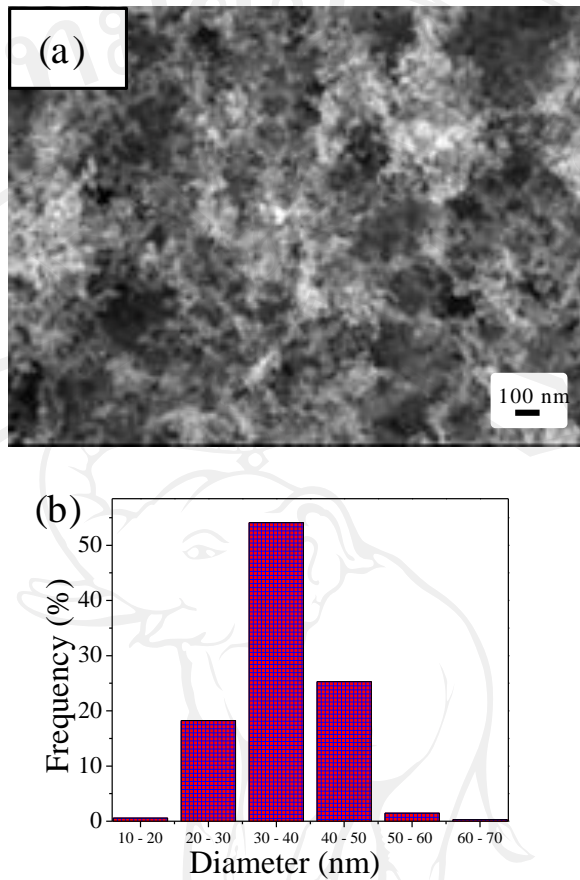
##### 4.1.1 ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ค

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คด้วยศักย์ไฟฟ้าแรงสูง โดยกำหนดเงื่อนไขในการสปาร์คคือจำนวนรอบในการสปาร์คที่ 10, 25, 50 และ 100 รอบลงบนกระจกนำไฟฟ้า ปรากฏว่าได้ฟิล์มบางที่ได้มีสีขาวเข้มและมีความหนาขึ้นเมื่อมีการสปาร์คที่จำนวนรอบมากขึ้น แสดงดังรูป 4.1



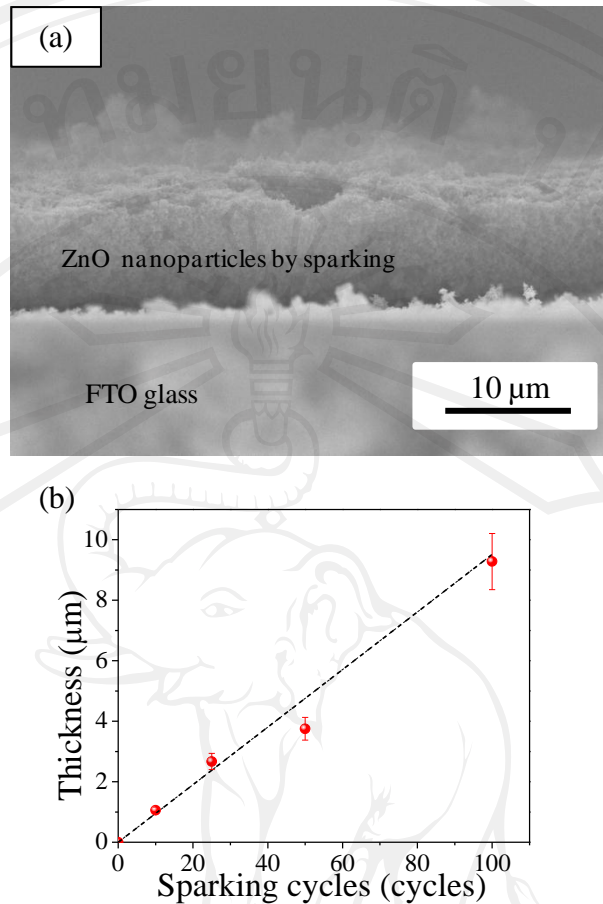
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มที่ได้จากการสปาร์คที่เงื่อนไข 10, 25, 50 และ 100 รอบ

จากนั้นนำฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คมาเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมงโดยนำฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ตัวอย่างที่ได้จากการสปาร์คที่ 100 รอบ นำไปศึกษา ลักษณะพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) พบว่าอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ได้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (ZnO nanoparticles, ZN) และมีการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 30 – 40 นาโนเมตร แสดงดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 แสดง (a) ลักษณะพื้นผิว และ (b) การกระจายของอนุภาค ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ ที่ได้จากการสปาร์คจำนวน 100 รอบ เหนือที่ 400 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง

และเมื่อนำฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คมาหาความหนาโดยการทำ cross section โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ได้ความหนาในแต่ละเงื่อนไขโดยแสดงความหนาตัวอย่างที่ได้จากการสปาร์คที่จำนวน 100 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.3(a) และเมื่อนำความหนาที่คำนวณได้จากรูป FE-SEM กับจำนวนรอบในการสปาร์คนำมาพล็อตกราฟ จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.3(b) และแสดงค่าความหนาต่างๆที่คำนวณได้ แสดงดังตาราง 4.1

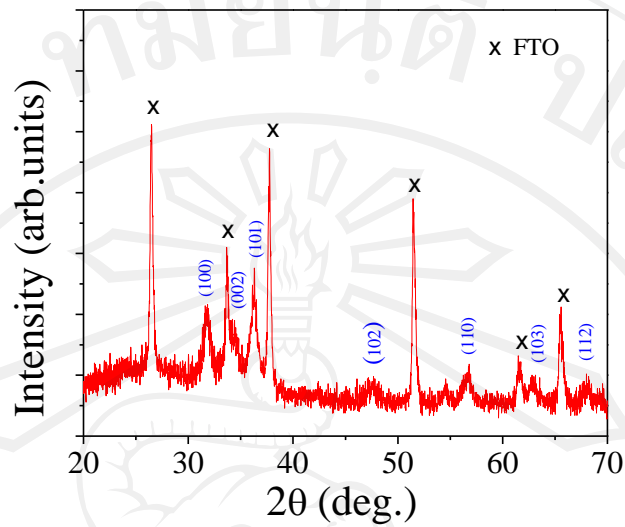


รูปที่ 4.3 แสดง (a) ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการสปาร์คจำนวน 100 รอบ และ (b) กราฟความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ต่อจำนวนรอบในการสปาร์ค

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คในแต่ละเงื่อนไข

จำนวนรอบ	10	25	50	100
ความหนา(μm)	1.06±0.11	2.67±0.27	3.75±0.38	9.28±0.93

และเมื่อนำฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คมาทดสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยการทำ X-Ray diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์แสดงดังรูป 4.4 เมื่อมาวิเคราะห์หามุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสาร พบว่าในฟิล์มบางที่ได้จากการสปาร์คพบพีคของซิงก์ออกไซด์ที่มุม 2θ ต่างๆ คือ 31.8°, 34.4°, 36.3°, 47.5°, 56.6°, 62.9°, และ 67.8° ตรงกับระนาบ (hkl) คือ (100), (002), (101), (102), (110), (103), และ (112) ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มบางที่ได้จากการสปาร์คล้วนซิงก์เป็นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

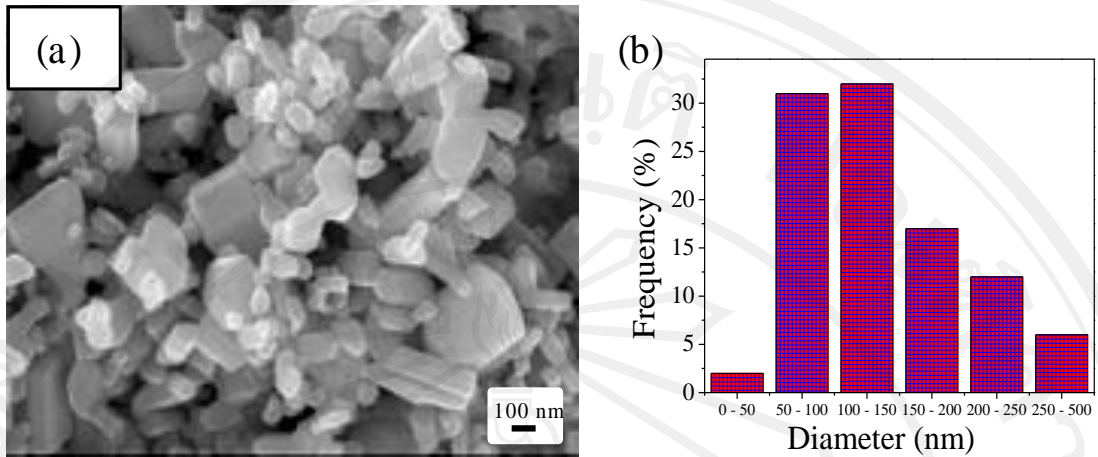


รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์กที่จำนวน 100 รอบ

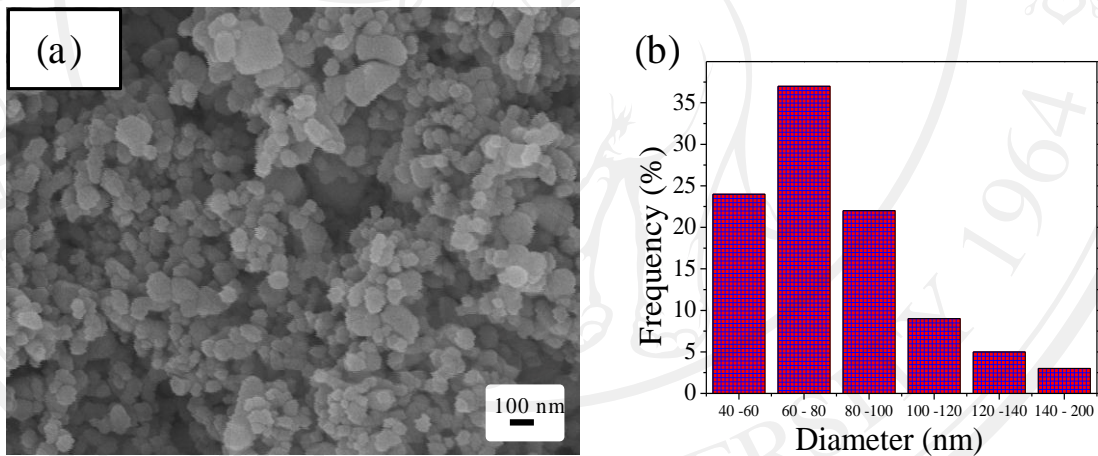
#### 4.1.2 ผงซิงก์ออกไซด์ (ZnO powder) และ ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO nanopowder)

ฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในการสกรีนทับลงบนฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์กทำเป็นสองชั้นในโพโตอิเล็กโทโรด ใช้ผงซิงก์ออกไซด์อยู่สองลักษณะคือ ผงซิงก์ออกไซด์ (ZnO powder, ZP) และ ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO nanopowder, ZNP) เมื่อนำไปวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้ ขนาดของผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) มีขนาดใหญ่กว่า ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) และ ซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ก (ZN) ตามลำดับ โดยมีการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 100 – 150 นาโนเมตร แสดงดังรูป 4.5 และขนาดของผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 60 – 80 นาโนเมตร แสดงดังรูป 4.6

สรุปในการวิจัยใช้ซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้อยู่สามลักษณะ คือ ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ก (ZN) ซึ่งมีขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์เล็กที่สุดประมาณ 30 – 40 นาโนเมตร ต่อมาคือ ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) 60 – 80 นาโนเมตร และ ผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) 100 – 150 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำเป็นสองชั้นในโพโตอิเล็กโทโรด ต่อไป

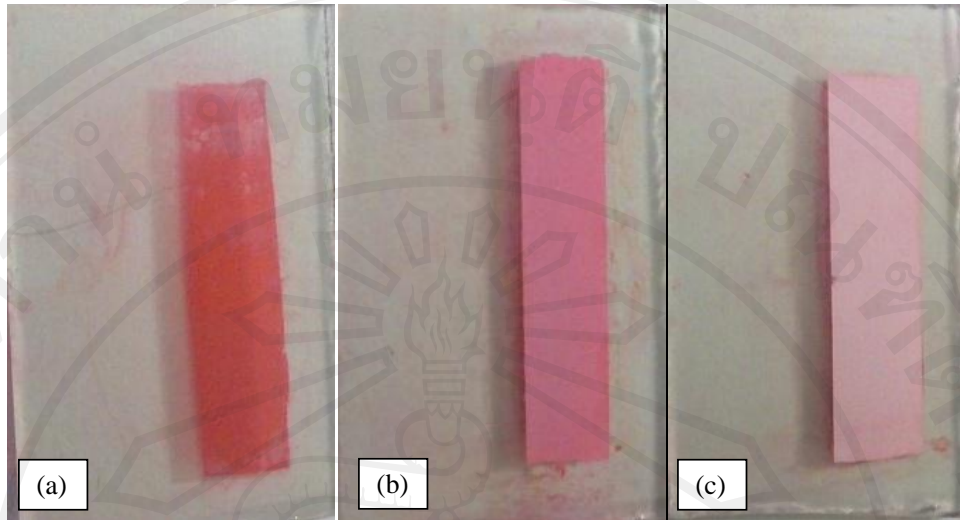


รูปที่ 4.5 แสดง (a) ลักษณะพื้นผิว และ (b) การกระจายของอนุภาค ของผงซิงก์ออกไซด์ (ZP)



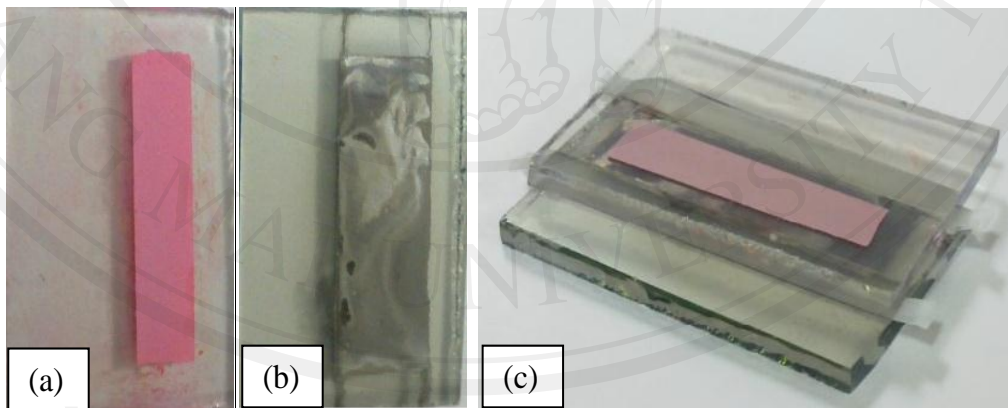
รูปที่ 4.6 แสดง (a) ลักษณะพื้นผิว และ (b) การกระจายของอนุภาค ของผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP)

เมื่อนำฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้ไปแช่ในสีย้อมไวแสง Eosin Y พบว่าลักษณะการเกาะของสีย้อมจะมีความเข้มต่างกันคือที่เป็นฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คจะมีสีที่เข้มกว่าผงนาโนซิงก์ออกไซด์ และผงซิงก์ออกไซด์ ตามลำดับ เนื่องจากขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกันทำให้การดูดซับโมเลกุลของสีย้อม Eosin Y มีค่าต่างกัน แสดงดังรูป 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการดูดซึมสีย้อม Eosin Y ของ (a) फिल्मซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ก (ZN) (b) ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) และ (c) ผงซิงก์ออกไซด์ (ZP)

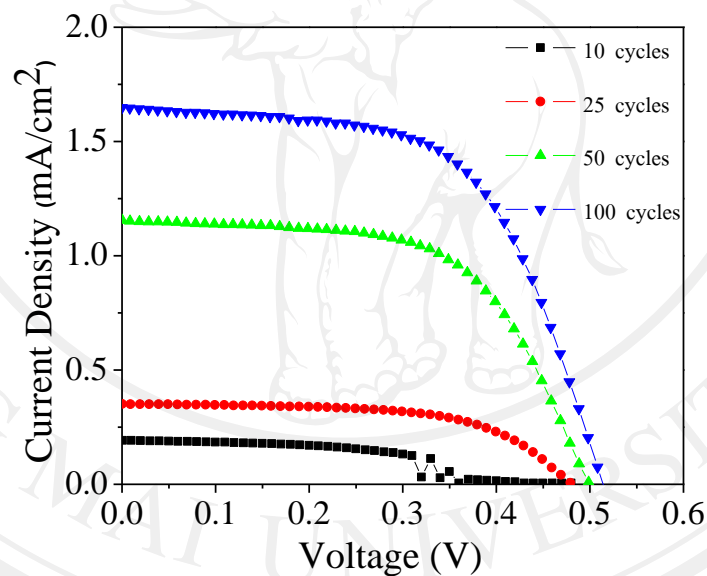
จากนั้นนำส่วนที่เป็นขั้วโฟโตอิเล็กโทโรดไปทำการแช่ในสีย้อม Eosin Y แล้วนำมาประกอบเซลล์เข้ากับขั้วแคโทดอิเล็กโทโรด ที่มีฟิล์มของแพลทินัมติดอยู่บนกระจกนำไฟฟ้า โดยมีชั้นของพาราฟิล์มกั้นอยู่ระหว่างขั้วทั้งสองแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดง ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (a) โฟโตอิเล็กโทโรด (b) แคโทดอิเล็กโทโรด และ (c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบเสร็จแล้ว

#### 4.2 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ในการวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์โดยการควบคุมจำนวนรอบในการสปาร์ค ที่จำนวน 10, 25, 50 และ 100 รอบ เมื่อนำเซลล์ที่สปาร์คไปวัดประสิทธิภาพแสดงดังรูป 4.9 และแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตาราง 4.2 พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการสปาร์คในจำนวนรอบที่มากขึ้นแต่ค่าประสิทธิภาพที่ได้ยังมีค่าน้อย อาจเป็นผลมาจากเซลล์ที่ทำจากการสปาร์คอย่างเดียวมีความหนาของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่บางและไม่ค่อยมีความสม่ำเสมอทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสมีค่าน้อย โดยเฉพาะที่สปาร์ค 10 รอบ จะเห็นว่าเส้นกราฟค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพมีค่าต่ำไปด้วย



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะเฉพาะทางความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการสปาร์ค 10, 25, 50 และ 100 รอบ

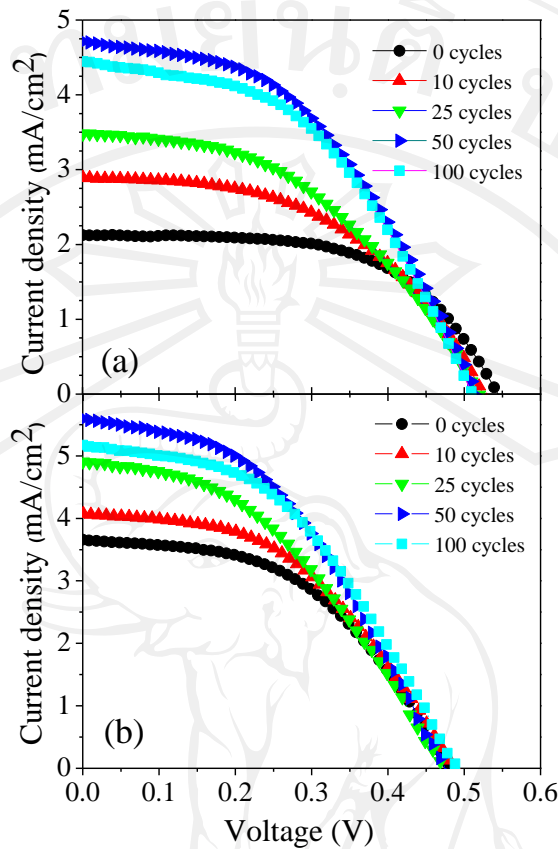
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ได้จากการสปาร์ก

จำนวนรอบในการสปาร์ก	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$FF$	$\eta$ (%)
10	0.48	0.19	0.43	0.04
25	0.48	0.35	0.60	0.10
50	0.50	1.15	0.60	0.34
100	0.51	1.65	0.60	0.50

#### 4.3 การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์กในการทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์กในการทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง จำเป็นต้องมีความหนาที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ในการวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์โดยการควบคุมจำนวนรอบในการสปาร์ก ที่จำนวน 10, 25, 50 และ 100 รอบ แล้วสกรีนทับด้วยผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และ ฟงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) เพื่อทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบเสร็จแล้วนำไปวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยวัดลักษณะเฉพาะทางความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อความต่างศักย์ แสดงดังรูป 4.10





รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะเฉพาะทางความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่อความต่างศักย์ของ (a) ผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และ (b) ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) เมื่อทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด

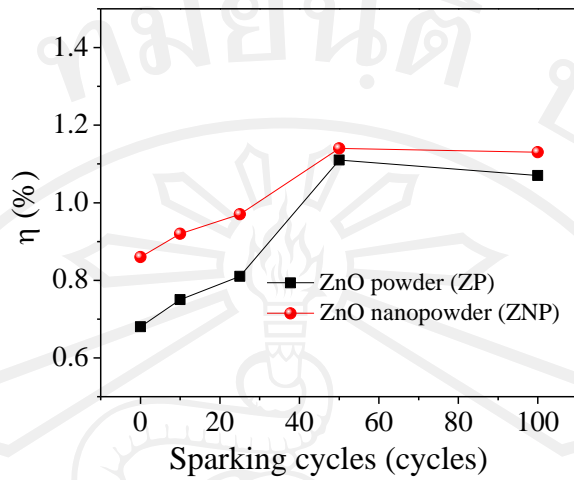
เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจากรูป 4.10 สามารถหาค่าต่างๆได้เช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) ค่าฟิลแฟกเตอร์ ( $FF$ ) ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ( $\eta(\%)$ ) ความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $R_s$ ) และ ความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียภายในเซลล์ ( $R_{sh}$ ) แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเมื่อทำเป็นสองชั้นในโพโตอิเล็กโทรด

Upper-layer	sparkling cycles (cycles)	Sample label	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	$J_{SC}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{OC}$ (V)	$FF$	$\eta$ (%)	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )
ZnO powder	0	ZP	0	2.12	0.54	0.59	0.68	5545	68
	10	10ZN/ZP	1.06 $\pm$ 0.11	2.89	0.52	0.50	0.75	2500	62
	25	25ZN/ZP	2.67 $\pm$ 0.27	3.48	0.51	0.46	0.81	1112	63
	50	50ZN/ZP	3.75 $\pm$ 0.38	4.71	0.51	0.46	1.11	778	50
	100	100ZN/ZP	9.28 $\pm$ 0.93	4.45	0.51	0.47	1.07	630	49
ZnO nano powder	0	ZNP	0	3.66	0.48	0.49	0.86	1230	50
	10	10ZN/ZNP	1.06 $\pm$ 0.11	4.07	0.48	0.47	0.92	1230	52
	25	25ZN/ZNP	2.67 $\pm$ 0.27	4.91	0.47	0.42	0.97	684	50
	50	50ZN/ZNP	3.75 $\pm$ 0.38	5.59	0.47	0.43	1.14	536	44
	100	100ZN/ZNP	9.28 $\pm$ 0.93	5.17	0.49	0.45	1.13	640	45

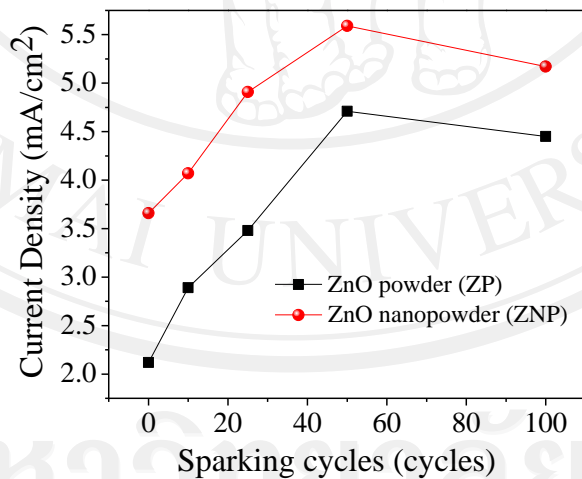
จากตาราง 4.3 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนรอบในการสปาร์คมีค่าเพิ่มขึ้นหรือความหนาของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จาก 0.68% ไปเป็น 0.75%, 0.81% และ 1.11% ของผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และ 0.86% ไปเป็น 0.92%, 0.97%, 1.14% ของผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ภายใต้การสปาร์คที่จำนวนรอบ 10, 25 และ 50 รอบ ตามลำดับ แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) แสดงดังรูป 4.11

ข้อสังเกต จะเห็นว่าที่ทำการสปาร์คจำนวน 50 รอบ มีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่ในการทดลองเราได้กำหนดความหนาของฟิล์มทั้งหมดให้คงที่ ซึ่งความหนาของชั้นซิงก์ออกไซด์ทั้งหมดเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการเปลี่ยนความหนาของฟิล์มผงซิงก์ออกไซด์ทั้งหมดที่ใช้สกรีน โดยใช้ความหนาของชั้นซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากการสปาร์คลงที่ 50 รอบ น่าจะเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจศึกษาต่อไปในอนาคต



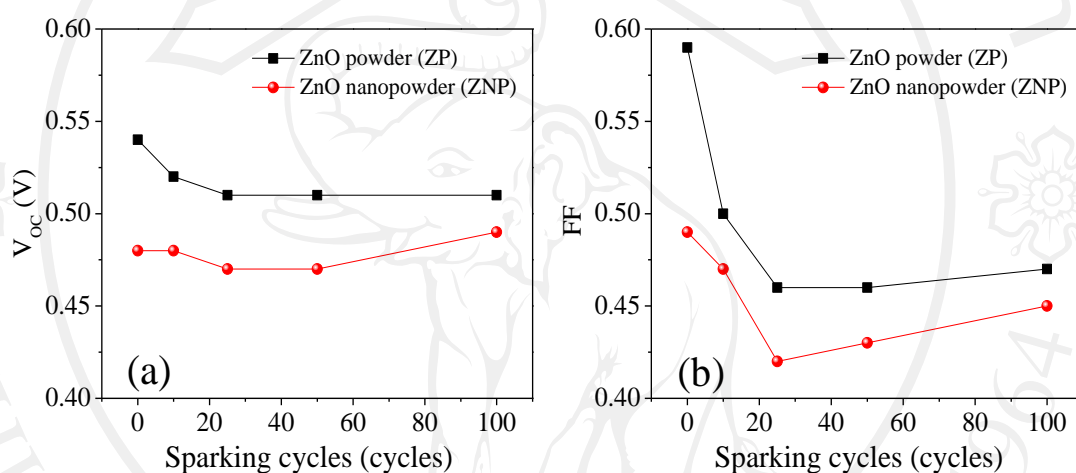
รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพต่อจำนวนรอบในการสปาร์ก ระหว่างผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP)

การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแส ( $J_{SC}$ ) ที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการสปาร์กเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อจำนวนรอบที่ใช้ในการสปาร์กมีการสปาร์กที่ 100 รอบ แสดงดังรูป 4.12



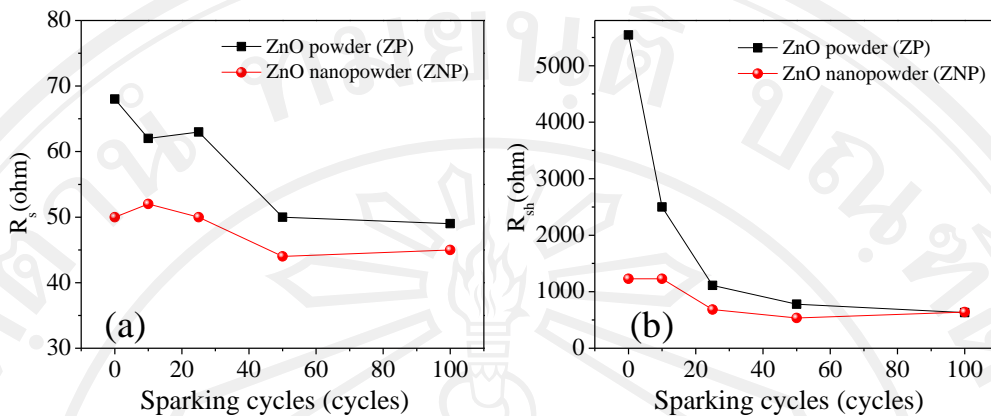
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแส ( $J_{SC}$ ) ต่อจำนวนรอบในการสปาร์ก ระหว่างผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP)

เมื่อดูค่าความต่างศักย์ของวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) และค่า  $FF$  พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้ผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) ในการทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรดจะมีค่า  $V_{OC}$  และ  $FF$  มากกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) แสดงดังรูป 4.1 จาก F. E. Gálvez [31] สามารถอธิบายโดยการที่ค่าการกระเจิงของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความต่างศักย์ของวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) ก็จะมีค่าสูงขึ้นตาม โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้ผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) มีค่าการกระเจิงของแสงที่มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงที่ใช้ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) จึงมีค่าความต่างศักย์ของวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) และค่า  $FF$  มากกว่า



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ของค่า (a)  $V_{OC}$  และ (b)  $FF$  ต่อจำนวนรอบในการสปาร์ค

จากรูป 4.10 เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง (Series resistance,  $R_s$ ) และค่าความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียภายในเซลล์ (Shunt resistance,  $R_{sh}$ ) ได้จากกราฟประสิทธิภาพโดยหาความชันของกราฟแสดงค่าดังตาราง 4.3 เมื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกันระหว่างผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) แสดงดังรูป 4.14 พบว่าค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง ( $R_s$ ) และค่าความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียภายในเซลล์ ( $R_{sh}$ ) ของผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) จะมีค่ามากกว่าผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) เมื่อทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กจะมีค่าการกระเจิงของอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่าซิงก์ออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

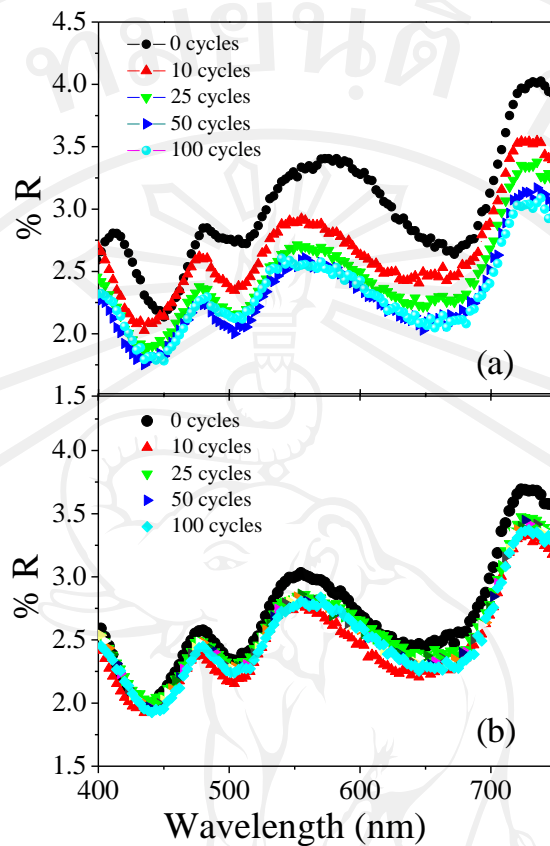


รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ของค่า (a) Series resistance,  $R_s$  และ (b) Shunt resistance,  $R_{sh}$  ต่อจำนวนรอบในการสปาร์ก

อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อมีการสปาร์กที่จำนวนรอบ 100 รอบ ของทั้งผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ที่ใช้ในการสกรีนทับฟิล์มบางที่ได้จากการสปาร์ก โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานขึ้นอยู่กับจำนวนรอบในการสปาร์ก ซึ่งสามารถอธิบายได้ในสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยการใช้การวัดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (reflectance spectroscopy) และการศึกษาความต้านทานภายในเซลล์ (EIS)

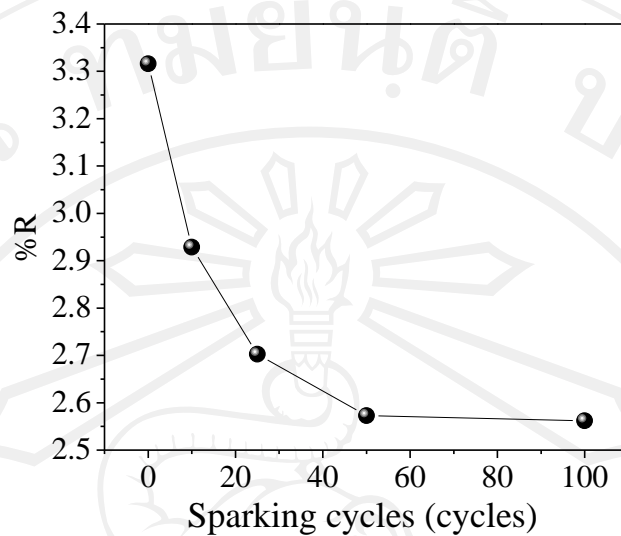
#### 4.4 ผลของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในการทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด โดยใช้การศึกษาสมบัติทางแสง (Optical Properties)

สำหรับการศึกษาสมบัติทางแสงโดยการใช้การวัดการสะท้อนแสงในโฟโตอิเล็กโทรดของการทำเป็นสองชั้นของซิงก์ออกไซด์ โดยการใช้ UV-vis spectroscopy ที่อยู่ในขอบเขตของความยาวคลื่น 400 – 750 นาโนเมตร แสดงดังรูป 4.15 แสดงการสะท้อนแสงของซิงก์ออกไซด์ที่ทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรดหลังจากที่แช่ในสีย้อม (Eosin Y) แล้ว โดยใช้ผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ในการสกรีนทับ



รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของ (a) ฟงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และ (b) ฟงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) เมื่อใช้สกรีนทับบนฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ตเพื่อทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด

พบว่า การสะท้อนแสงของของตัวอย่างที่ใช้ฟงซิงก์ออกไซด์ในการสกรีนทับฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากการสปาร์ต ZN/ZP มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อชั้นของฟิล์มบางที่ได้จากการสปาร์ตมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาหาค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของแสง (%R) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรเปรียบเทียบกับจำนวนรอบของการสปาร์ต พบว่าค่าการสะท้อนจะมีค่าลดลงเมื่อมีการสปาร์ตที่จำนวนรอบมากขึ้นและจะเริ่มคงที่เมื่อมีการสปาร์ตที่จำนวน 100 รอบแสดงดังรูป 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ต่อจำนวนรอบในการสปาร์กของผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) ในการทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด

ส่วนการสะท้อนแสงของของตัวอย่างที่ใช้ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ในการสกรีนทับฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากการสปาร์ก ZN/ZNP พบว่าสเปกตรัมที่ได้ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงเมื่อฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากการสปาร์กมีการเปลี่ยนแปลง โดยเป็นผลของความแตกต่างของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ซึ่งอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ก (ZN) มีขนาดต่างจากผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) ทำให้การสะท้อนของแสงมีแตกต่างกัน ส่วนอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ก (ZN) มีขนาดใกล้เคียงกับผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ทำให้สเปกตรัมการสะท้อนของแสงมีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง

ในการวัดการสะท้อนของแสงในทุกตัวอย่างได้ยิงแสงผ่านด้านกระจกนำไฟฟ้า (FTO) แล้วผ่านไปยังฟิล์มซิงก์ออกไซด์ โดยทั่วไปแสงจะเกิดการกระเจิงภายในชั้นโฟโตอิเล็กโทรด โดยค่าการกระเจิงของแสงสามารถแปลงค่าได้จาก สเปกตรัมการสะท้อนของแสง สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการ 4.1

$$S = 1 - (R + T) \quad (4.1)$$

โดย  $S$  คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงของแสง

$R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง

$T$  คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง

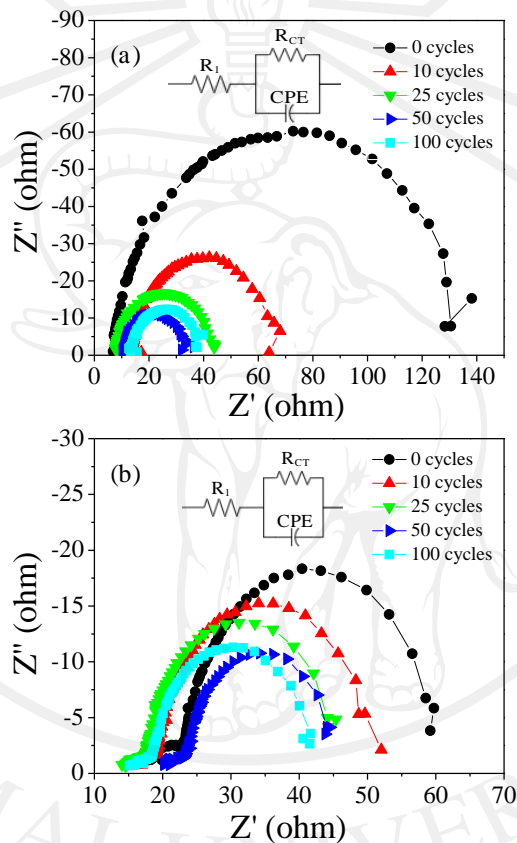
อย่างไรก็ตามความหนาของของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ในโฟโตอิเล็กโทรดทั้งหมดถูกควบคุมความหนาด้วยความหนาของชั้นเทพหรือความหนาคงที่ เพราะฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (T) จึงไม่เปลี่ยนแปลง ให้การทะลุผ่านของแสงเป็นค่าคงที่ ดังนั้นส่วนของการกระเจิงของแสงจะสัมพันธ์กับการสะท้อนของแสง ตามสมการ 4.1 โดยการกระเจิงของแสงแสดงถึงการดูดซับแสงภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าการกระเจิงของแสงภายในเซลล์มีค่ามาก การดูดซับแสงก็จะมีค่ามากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น [5, 19, 20] จากรูป 4.15 (a) ความแตกต่างระหว่างเซลล์ที่ไม่ได้สปาร์คหรือใช้ผงซิงก์ออกไซด์อย่างเดียวก่อนและการทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรดมีค่าการกระเจิงของแสงสูงกว่าฟิล์มที่ทำเป็นชั้นเดียวของผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และการสะท้อนของแสงมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อชั้นที่ใช้ในการสกรีนทับเปลี่ยนมาเป็นผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ค่าการสะท้อนของแสงภายในโฟโตอิเล็กโทรดไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ค ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ว่าขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ค (ZN) มีขนาดใกล้เคียงกับผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ทำให้การสะท้อนของแสงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง

#### 4.5 ผลของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในการทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด โดยใช้การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)

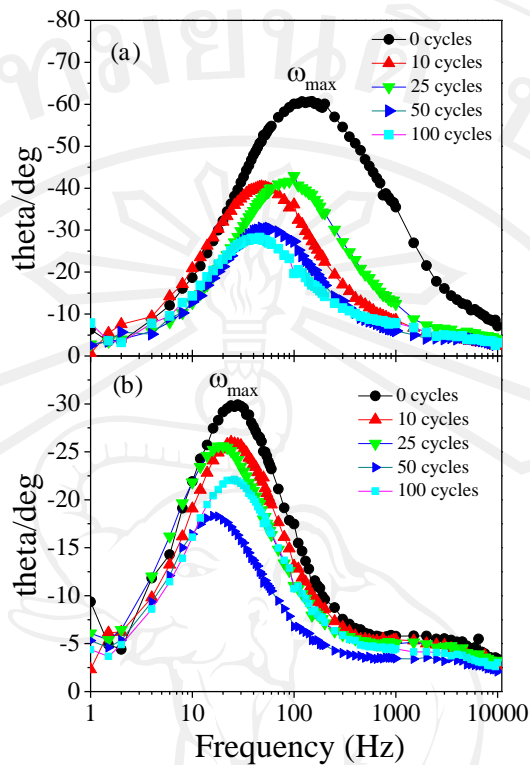
สำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าสเปกโทรสโคปี (EIS) ใช้ในการศึกษากระบวนการเคลื่อนที่ของมวลภายในทางเคมีไฟฟ้า เช่นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron transfer) การคืนกลับของประจุอิเล็กตรอน (Charge recombination) หรือ ช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time) การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (EIS) ทำในช่วงความถี่ 1 ถึง 10000 Hz กับไฟฟ้ากระแสสลับ 20 mV ที่ 100 mW/cm<sup>2</sup> ของความเข้มแสง



โดยข้อมูลที่ได้อาจการวิเคราะห์ห้อมพีแดนซ์ (EIS) โดยสามารถเขียนกราฟได้อยู่สองแบบ คือ Nyquist และ Bode plots แสดงดังรูป 4.17 และ 4.18 เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจากรูป 4.17, 4.18 สามารถหาค่าต่างๆได้เช่น ความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้า ( $R_f$ ) ความต้านทานของการนำประจุ (Charge transfer resistance,  $R_{CT}$ ) ช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time,  $\tau$ ) แสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟ Nyquist plots ของ (a) พงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และ (b) พงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) เมื่อใช้สกรีนทับฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากการสปาร์คทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด

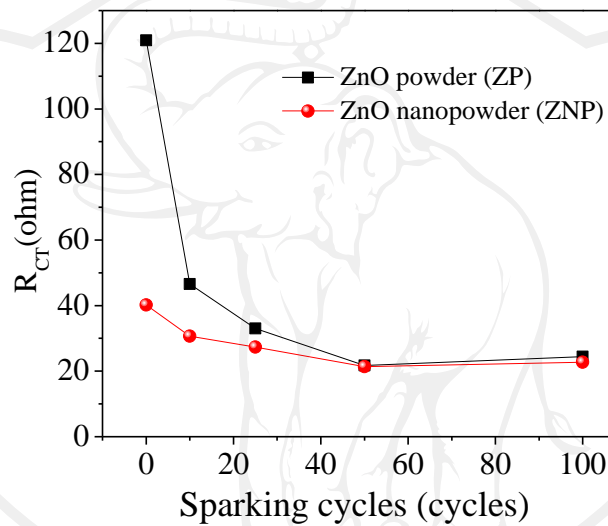


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟ Bode plots ของ (a) ฟังก์ชันออกไซด์ (ZP) และ (b) ฟังก์ชันออกไซด์นาโน (ZNP) เมื่อใช้สกรีนทับบนฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คเพื่อทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้าสเปกโทรสโคปี (EIS) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงเมื่อทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด

การสกรีน ทำเป็นสอง ชั้น	จำนวนรอบ ในการ สปาร์ค	$R_i (\Omega)$	$R_{CT} (\Omega)$	$f (Hz)$	$\omega (rad)$	$\tau (ms)$
ZnO powder	0	7.5	120.9	140	879.6	1.1
	10	14.5	46.6	46	289.1	3.5
	25	8.5	33.0	80	502.6	2.0
	50	10.8	21.7	52	326.7	3.1
	100	13.6	24.4	40	251.3	4.0
ZnO nano powder	0	16.7	40.2	28	175.9	5.7
	10	16.0	30.7	24	150.8	6.6
	25	14.6	27.3	20	125.7	8.0
	50	20.3	21.4	16	100.5	9.9
	100	15.9	22.7	22	138.2	7.2

โดยทั่วไปแล้วกราฟ Nyquist plots จะแสดงเป็นรูปครึ่งวงกลมอยู่สามวงภายใต้ช่วงความถี่สูงปานกลางและต่ำ อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้ จะศึกษาเพียงครึ่งวงกลมเดียว คือ ช่วงความถี่ปานกลาง ซึ่งความแตกต่างของครึ่งวงกลมจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในของโฟโตอิเล็กโทโรด จากรูป 4.17 (a) และ (b) ขนาดของครึ่งวงกลมจะมีขนาดลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากการสปาร์คมีค่าเพิ่มขึ้น กราฟ Nyquist plots ที่มีขนาดเล็กลง บอกให้รู้ถึงความต้านทานของการนำประจุ (Charge transfer resistance,  $R_{CT}$ ) รวมถึงรอยต่อระหว่างขั้วโฟโตอิเล็กโทโรดกับอิเล็กโทโรไลต์ มีค่าความต้านทานลดลง แสดงดังรูป 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานของการนำประจุต่อจำนวนรอบในการสปาร์ค ระหว่างผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP)

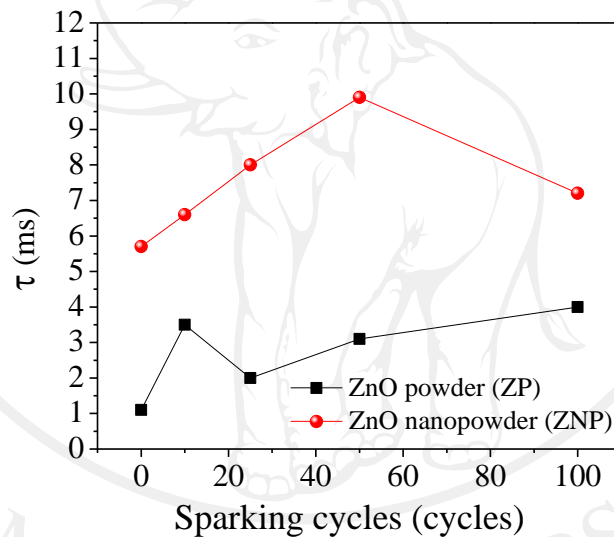
และพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ทำการสปาร์คที่จำนวน 50 รอบของทั้งผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ที่ใช้ทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทโรด มีค่าความต้านทานของการนำประจุ (Charge transfer resistance,  $R_{CT}$ ) น้อยที่สุด ทำให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วย

กราฟ Bode plots สามารถอธิบายได้ถึงช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time,  $\tau$ ) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความถี่หรือความถี่เชิงมุม สามารถเขียนได้ดังสมการ 4.2 [21, 22]

$$\tau = \frac{1}{\omega_{\max}} = \frac{1}{2\pi f_{\max}} \quad (4.2)$$

โดย  $\tau$  คือ ช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time)  
 $f_{max}$  คือ ความถี่สูงสุดที่ทำให้อิเล็กตรอนเริ่มเคลื่อนที่  
 $\omega_{max}$  คือ ความถี่เชิงมุมสูงสุดที่ทำให้อิเล็กตรอนเริ่มเคลื่อนที่

จากรูป 4.18 (a) และ (b) แสดงให้เห็นพิกของความถี่ที่จุดต่างๆ ของโฟโตอิเล็กโทโรด ทั้งผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ที่ใช้ในการสกรีนทับ พบว่าที่จุดสูงสุด ( $f_{max}$ ) ของกราฟจะเลื่อนมาทางความถี่ที่มีค่าต่ำลงเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิง แสดงว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านขั้วโฟโตอิเล็กโทโรดได้ช้าลงเพราะการกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในขั้วโฟโตอิเล็กโทโรด ทำให้ค่าช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time) มีค่าสูงขึ้น แสดงดังรูป 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time) ต่อจำนวนรอบในการสปาร์ค ระหว่างผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) และผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP)

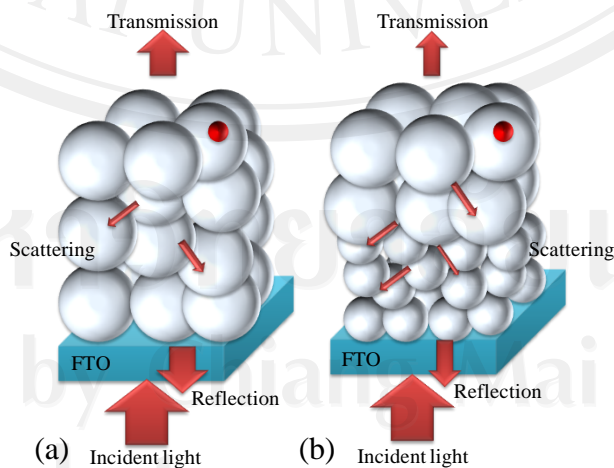
การเพิ่มขึ้นของค่าช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโฟโตอิเล็กโทโรดของเซลล์แสงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ผ่านได้ช้าลง [23]

#### 4.6 วิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ที่ทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด

จากการทดลอง การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ขึ้นอยู่กับผลของการดูดซับโมเลกุลของสีย้อม การกระเจิงของแสง และการกระเจิงของอิเล็กตรอน ภายในโฟโตอิเล็กโทรด จากผลของสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เป็นผลมาจากความหนาที่แตกต่างกันของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์กและขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของกระแส ( $J_{sc}$ ) อธิบายได้โดยการดูดซับโมเลกุลของสีย้อมของซิงก์ออกไซด์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิง ฟงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) มีขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เล็กกว่าฟงซิงก์ออกไซด์ (ZP) ดังนั้นพื้นที่ผิวของฟงนาโนซิงก์ออกไซด์จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าฟงซิงก์ออกไซด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้มากกว่า ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบไปด้วยฟงนาโนซิงก์ออกไซด์ในโฟโตอิเล็กโทรดสามารถทำให้การเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำด้วยฟงซิงก์ออกไซด์ (ZP) โดยผลการทดลองสามารถยืนยันได้จากค่าความหนาแน่นของกระแสของฟงนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีค่าสูงกว่าฟงซิงก์ออกไซด์ ดังตาราง 4.3

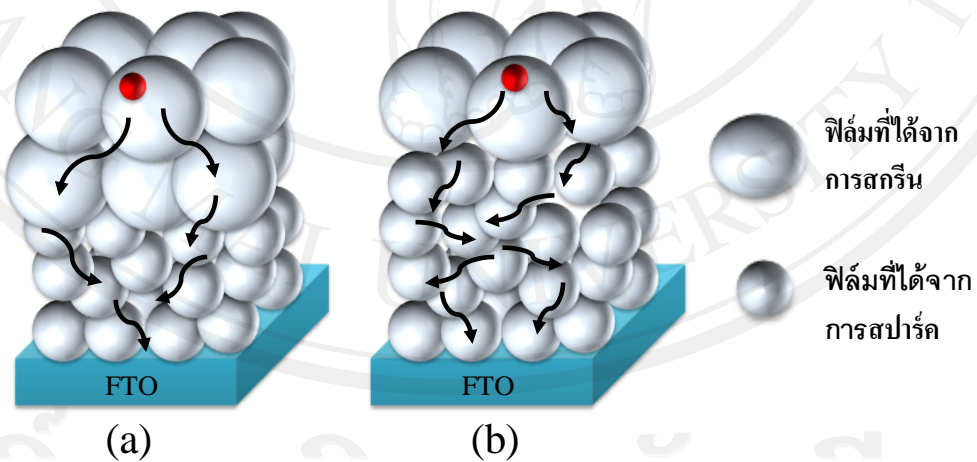
สมบัติทางแสงเราสามารถอธิบายการเดินทางของแสงทั้งการสะท้อน การกระเจิงของแสง และการทะลุผ่านของแสง ภายในฟิล์มซิงก์ออกไซด์ของขั้วโฟโตอิเล็กโทรดสามารถแสดงได้ดังรูป 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงการกระเจิงของแสงภายในขั้วโฟโตอิเล็กโทรดของ (a) เซลล์อ้างอิง และ (b) เซลล์ที่ทำเป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรด

จากรูป 4.21 (a) และ (b) โดยทั่วไปความหนาแน่นของกระแส ( $J_{SC}$ ) จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนโฟตอนที่ผ่านมาผ่านกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ฟิล์มชั้นของซิงก์ออกไซด์ ดังนั้นเพื่อต้องการเพิ่มความหนาแน่นของจำนวนโฟตอน จึงต้องลดการสะท้อนของแสง[5, 24] และเพิ่มการกระเจิงของแสงภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง[5, 19] นอกจากนี้การกระเจิงของแสงยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์และความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นเราสามารถเพิ่มการกระเจิงของแสงภายในโฟโตอิเล็กโทรดโดยการทำให้เป็นสองชั้นในโฟโตอิเล็กโทรดโดยใช้อนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดที่ต่างกัน เพราะรอยต่อระหว่างอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกับขนาดใหญ่กว่าจะช่วยเพิ่มการกระเจิงของแสงภายในโฟโตอิเล็กโทรด[5] ซึ่งสามารถอธิบายได้ในการทดลองที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าการสะท้อนของแสงที่ต่ำจะมีการกระเจิงของแสงที่สูง ทำให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น

สุดท้ายสามารถอธิบายถึงความหนาแน่นและขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ก จะเป็นสิ่งที่ทำให้การเดินทางของอิเล็กตรอนภายในขั้วโฟโตอิเล็กโทรดเคลื่อนที่ผ่านได้ช้าลง สามารถอธิบายการเดินทางของอิเล็กตรอนภายในโฟโตอิเล็กโทรดได้ แสดงดังรูป 4.22 เรียกว่าการกระเจิงของอิเล็กตรอน (Electron scattering)



รูปที่ 4.22 แสดงการเดินทางของอิเล็กตรอนภายในขั้วโฟโตอิเล็กโทรดเมื่อฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์กมีความหนาแน่น (a) น้อย (b) มาก

จากรูป 4.22 (a) และ (b) แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองการเดินทางของอิเล็กตรอนภายในขั้วโฟโตอิเล็กโทรด การกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในโฟโตอิเล็กโทรดจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยการที่จะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแส

( $J_{sc}$ ) มีค่าลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีค่าช้าลง และส่งผลให้เกิดการไหลย้อนกลับของอิเล็กตรอน โดยสามารถอธิบายได้ว่าการกระเจิงของอิเล็กตรอนมีค่าสูงเกิดจากอนุภาคซึ่งก็ออกไซด์มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่น นอกจากนั้นความสามารถการกระเจิงของอิเล็กตรอนสามารถดูได้จากสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียภายในเซลล์ (Shunt resistance,  $R_{sh}$ ) ค่าช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time,  $\tau$ )

อย่างไรก็ตาม การที่จะเพิ่มการกระเจิงของแสงโดยการเพิ่มความหนาของฟิล์มที่ได้จากการสปาร์กในโฟโตอิเล็กโทรด แต่ผลที่ได้คือค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังมีค่าต่ำอยู่เนื่องมาจากค่าการกระเจิงของอิเล็กตรอนที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อฟิล์มซึ่งก็ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์กมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยผลของการกระเจิงของแสงและการกระเจิงของอิเล็กตรอน ทั้งสองอย่างมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ดังนั้นการรวมกันของการกระเจิงของแสงและการกระเจิงของอิเล็กตรอนควรศึกษาเพื่อหาค่าสูงสุดที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าสูงสุด

สำหรับการรวมกันของผลการกระเจิงของแสงและการกระเจิงของอิเล็กตรอน สามารถเขียนสมการความหนาแน่นกระแสได้ใหม่แสดงดังสมการ 4.3

$$J_{sc} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} qF(\lambda)[1 - R(\lambda) + S(\lambda)]Q_i(\lambda)d\lambda - \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \quad (4.3)$$

- โดย  $J_{sc}$  คือ ความหนาแน่นของกระแสที่มีผลของการกระเจิงของแสง  
 $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน (electron charge)  
 $\lambda_1, \lambda_2$  คือ ความยาวคลื่นจำกัด (อ้างอิงจากความยาวคลื่น 350 – 1100 นาโนเมตร ของสีย้อม Eosin Y)  
 $F(\lambda)$  คือ ความหนาแน่นจำนวนโฟตอนของสเปกตรัมแสง ( $100 \text{ mW/cm}^2$ )  
 $R(\lambda)$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง คำนวณได้จากทฤษฎีและการทดลอง  
 $S(\lambda)$  คือ ค่าการกระเจิงของแสง  
 $Q_i(\lambda)$  คือ ประสิทธิภาพควันตัมภายใน (Internal quantum efficiency)  
 $V_{sh}$  คือ ความต่างศักย์ที่เกิดจากการสูญเสียภายในเซลล์  
 $R_{sh}$  คือ ความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียภายในเซลล์

เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขของความหนาของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ค สามารถอธิบายโดยใช้สมการที่ 4.3

จากตาราง 4.3 การเพิ่มความหนาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์ค ค่าความหนาแน่นของกระแส ( $J_{SC}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $2.12 \text{ mA/cm}^2$  ไปเป็น  $4.71 \text{ mA/cm}^2$  ของผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) ที่ทำเป็นสองชั้นในโพโตอิเล็กโทรด สามารถอธิบายได้ด้วยการลดลงของค่าการสะท้อนของแสงหรือการลดลงของ  $R(\lambda)$  ในสมการที่ 4.3 อย่างไรก็ตามโพโตอิเล็กโทรดที่ใช้ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) ในการทำเป็นสองชั้น ค่าการสะท้อนของแสงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง แต่ค่าความหนาแน่นของกระแสยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $3.66 \text{ mA/cm}^2$  ไปเป็น  $5.59 \text{ mA/cm}^2$  สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแส ( $J_{SC}$ ) เนื่องจากผลของการกระเจิงของแสงและสามารถอธิบายได้ว่าฟิล์มสองชั้นในโพโตอิเล็กโทรดที่ใช้ผงซิงก์ออกไซด์ (ZP) มีค่าการกระเจิงของแสงมากกว่าฟิล์มที่ใช้ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZNP) เนื่องจากความแตกต่างของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระหว่างทั้งสองชั้น ดังนั้น การกระเจิงของแสง  $S(\lambda)$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากการสะท้อนของแสงมีค่าลดลงและเพิ่มการกระเจิงของแสงทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในสมการที่ 4.3

อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาแน่นกระแสจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คมีค่ามากขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยการกระเจิงของอิเล็กตรอนคู่ได้จากรูป 4.22 (a) และ (b) จากตาราง 4.3 ค่าความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียภายในเซลล์ ( $R_{sh}$ ) จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คมีค่ามากขึ้น จากการทดลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีค่า  $R_{sh}$  น้อยบอกให้รู้ว่าการกระเจิงของอิเล็กตรอนจะมีค่ามากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่า  $R_{sh}$  มาก สามารถยืนยันได้จากการเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time,  $\tau$ ) ที่สามารถคำนวณได้จากกราฟ Bode phase และแสดงค่าดังตาราง 4.4

ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพที่ใช้สองชั้นในโพโตอิเล็กโทรด ยังมีขีดจำกัดอยู่ภายใต้ความหนาของฟิล์มที่อยู่ชั้นล่าง โดยอธิบายได้โดยการคูณผลของการกระเจิงของอิเล็กตรอนจากค่า  $FF$  เพราะค่า  $FF$  มีค่าต่ำบอกให้รู้ถึงค่าความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสียภายในเซลล์ ( $R_{sh}$ ) มีค่าต่ำตามไปด้วยรวมกับช่วงเวลาของอิเล็กตรอน (Electron life time,  $\tau$ ) จะมีค่าสูงขึ้น สามารถสรุปผลของการเพิ่มประสิทธิภาพการทำให้เป็นสองชั้นในโพโตอิเล็กโทรดได้ดังตาราง 4.5 และ 4.6



ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่ากันระหว่างฟังก์ชันออกไซด์ (ZP) กับ ฟังก์ชันนาโนออกไซด์ (ZNP)

ตัวแปรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	การเปรียบเทียบระหว่าง ฟังก์ชันออกไซด์ (ZP) กับ ฟังก์ชันนาโนออกไซด์ (ZNP)	คำอธิบาย
$J_{SC}$ (single layer)	$ZP < ZNP$	การดูดซับของสีย้อม
$J_{SC}$ (double layer)	$ZP < ZNP$	การกระเจิงของแสงและการดูดซับของสีย้อม
$FF$ (single layer)	$ZP > ZNP$	การกระเจิงของอิเล็กตรอน
$FF$ (double layer)	$ZP > ZNP$	การกระเจิงของอิเล็กตรอน
Shunt resistance	$ZP > ZNP$	การกระเจิงของอิเล็กตรอน
Electron life time	$ZP < ZNP$	การกระเจิงของอิเล็กตรอน

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อความหนาของฟิล์มฟังก์ชันออกไซด์ที่ได้จากการสปาร์คมีค่าเพิ่มขึ้น

ตัวแปรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	ความหนาที่ได้จากการสปาร์คมีค่าเพิ่มขึ้น	คำอธิบาย
$J_{SC}$	เพิ่มขึ้น	การกระเจิงของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและการสะท้อนมีค่าลดลง
$FF$	ลดลง	การกระเจิงของอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น
Shunt resistance	ลดลง	การกระเจิงของอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น
Electron life time	เพิ่มขึ้น	การกระเจิงของอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น
Eff%	เพิ่มขึ้น	ความหนาแน่นกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น