

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นผลการทดลองซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนที่สัมพันธ์กับวิธีการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วในบทก่อนหน้า ส่วนแรกเป็นผลการทดลองของการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง ZnO ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงและส่วนถัดมาจึงเป็นผลการทดลองวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ตามลำดับ

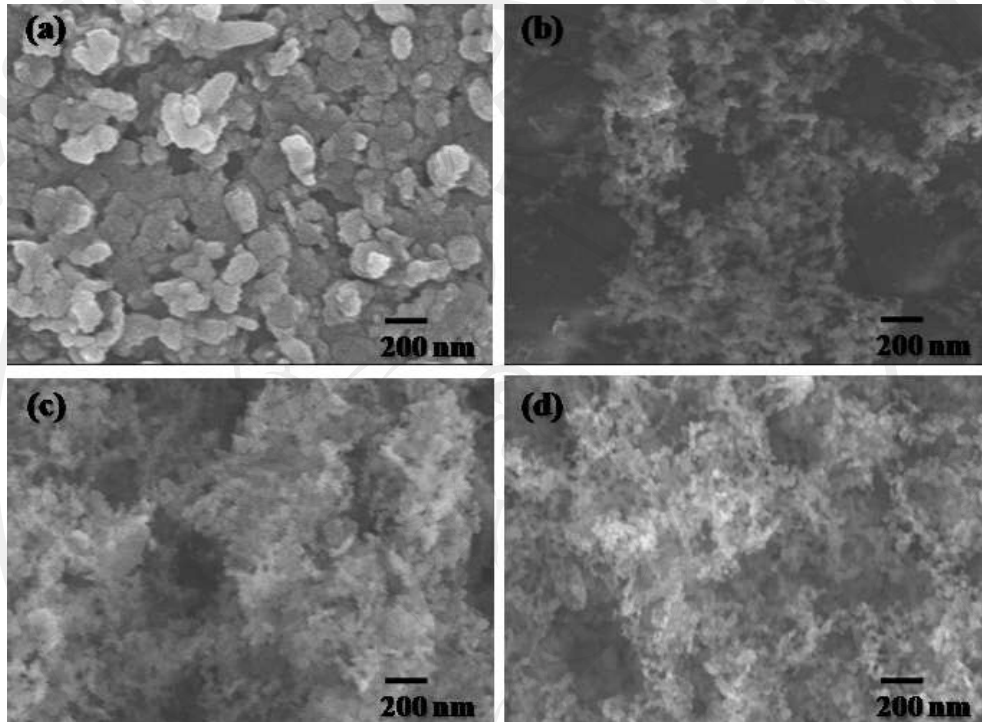
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ (ZnO)

สมบัติของฟิล์ม ZnO ที่ศึกษาในการทดลองครั้งนี้ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ZnO ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงหลังจากที่เตรียมด้วยการระเหยด้วยความร้อน และ วิธีการ sparking สัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าแถบช่องว่างพลังงาน สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ค่าดัชนีหักเหของแสงและความหนาของฟิล์ม ZnO ซึ่งจะแบ่งผลการทดลองตามเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ดังนี้

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย FE-SEM

การวิเคราะห์ด้วย FE-SEM เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาสภาพพื้นผิวของฟิล์ม ZnO ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงหลังจากที่เตรียมด้วยการระเหยด้วยความร้อน และ วิธีการ sparking ด้วยเทคนิค FE-SEM ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นฟิล์มชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ZnO ที่เตรียมโดยการระเหยด้วยความร้อน ZnO powder 0.125 กรัม และ วิธีการ sparking 0.5, 1.5, 2.5 รอบ ลงบนแผ่นกระจกแล้วนำไปเผา ได้ผลการวิเคราะห์ FE-SEM ดังรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาภาพ FE-SEM แล้วพบว่ารูปร่างและขนาดของพื้นผิวชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ZnO มีลักษณะดังนี้ รูป (a) แสดงรูปภาพ FE-SEM ของฟิล์มบาง ZnO ที่เตรียมโดยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนมีพื้นผิวที่ขรุขระและมีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร และใหญ่กว่าฟิล์มที่เตรียมจากวิธีการ sparking รูป (b) - (d) แสดงความเป็นรูพรุนของโครงสร้างอนุภาคนาโนของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการ sparking ที่จำนวนรอบต่างกัน ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคนาโนคือประมาณ 20-30 นาโนเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

ของการเผา [23] นอกจากนี้ความหนาแน่นของอนุภาคนาโนมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการ sparking ดังรูปที่ 4.1 (b) – (d)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก FE-SEM ของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ เตรียมโดย (a) การระเหยด้วยความร้อน และ กระบวนการ sparking ที่ (b) 0.5 รอบ (c) 1.5 รอบ (d) 2.5 รอบ

#### 4.1.2 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer

##### 4.1.2.1 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงของฟิล์มบาง ZnO และการประมาณค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง ZnO ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer

ในส่วนถัดมาจะเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์ม ZnO ที่เตรียมลงบนกระจก ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงเป็นค่าการส่งผ่านแสงของสารเทียบกับความยาวคลื่นของแสง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 และการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้เพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 4.3 จากที่ทราบมาแล้วว่าค่าพลังงานของคลื่นแสงจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นดังสมการ (4.1)

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (4.1)$$

เมื่อ	$E$	คือ พลังงานของคลื่นแสง
	$h$	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant)
	$c$	คือ ความเร็วแสง
	$v$	คือ ความถี่แสง
	$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นแสง

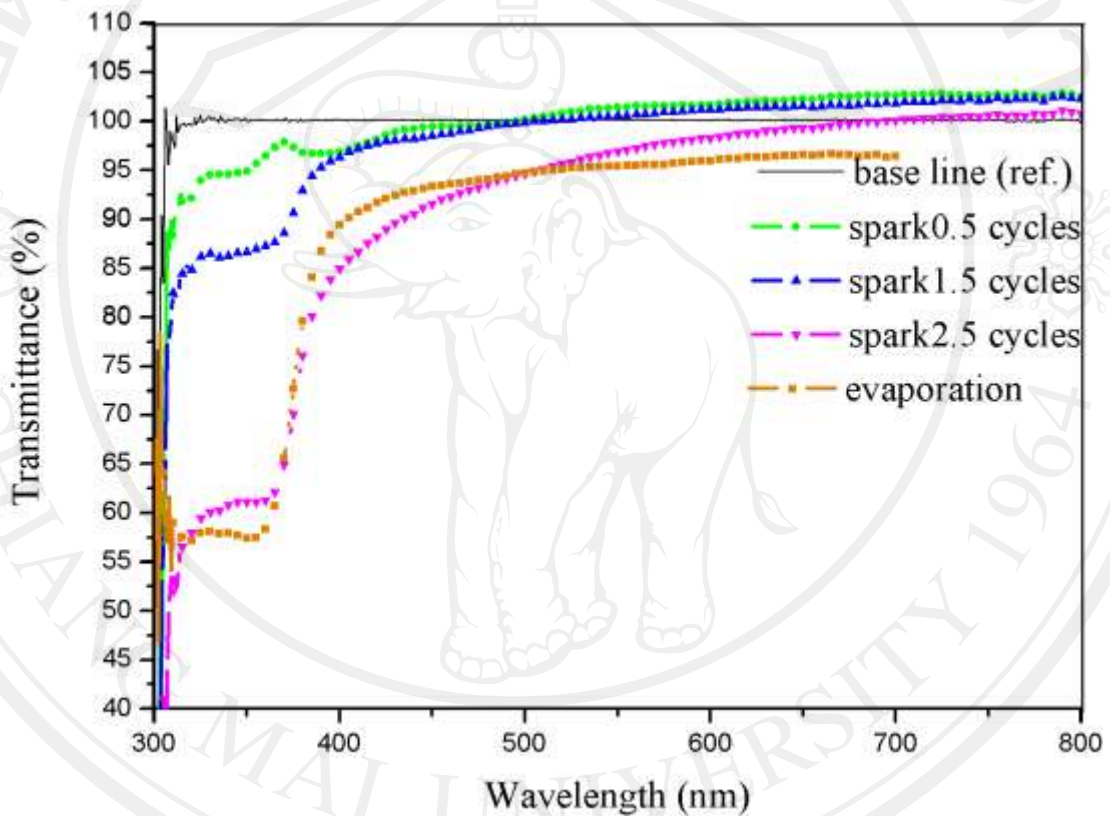
แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีพลังงานต่ำ และถ้าค่าพลังงานนี้ต่ำกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มก็จะทำให้แสงสามารถทะลุผ่านฟิล์มไปได้ ส่งผลให้ค่าการส่งผ่านแสงของสารมีค่าสูง แต่เมื่อเพิ่มค่าพลังงานของคลื่นแสงให้มีค่าเพิ่มขึ้น (ความยาวคลื่นแสงลดลง) จนมากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์ม แสงก็จะถูกดูดกลืนโดยฟิล์มสังเกตได้จากการลดลงของการส่งผ่านแสง ซึ่งการลดลงในส่วนนี้เองที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มโดยการพลอตระหว่าง  $(ahv)^2$  เทียบกับ  $hv$  แล้วลากเส้นตรงสัมผัสกราฟมาตัดที่แกนพลังงาน จุดตัดที่ได้จะเป็นค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มดังรูปที่ 4.3 และค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง ZnO สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

รูปที่ 4.2 แสดงผลการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้กับฟังก์ชันของความยาวคลื่น จากรูปภาพ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นของฟิล์มที่เตรียม โดยการระเหยด้วยความร้อนมีค่าน้อยลงและมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับฟิล์มที่เตรียมโดยการ sparking เมื่อเทียบกับตัวอ้างอิง โดยเฉพาะฟิล์ม sparking ที่เงื่อนไข 0.5 รอบ และ 1.5 รอบ แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของการทะลุผ่านของแสงได้สูงกว่าตัวอ้างอิงและฟิล์มที่เตรียมโดยการระเหยด้วยความร้อน ดังนั้นแสดงว่า sparking ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่สร้างเป็นชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงสามารถที่เพิ่มการส่งผ่านหรือทะลุผ่านของแสงไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากขึ้น

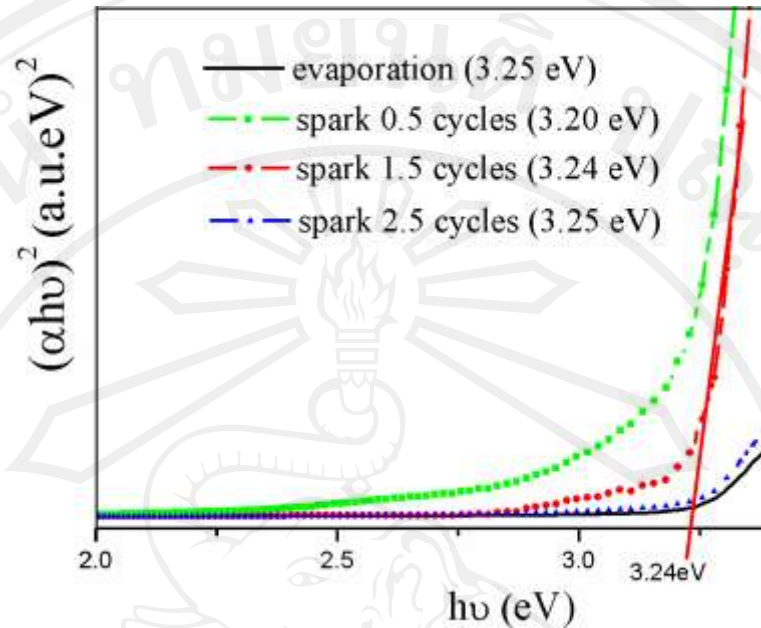
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟระหว่าง  $(ahv)^2$  กับพลังงาน  $(hv)$  เพื่อให้ได้ช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) เมื่อ  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\alpha \sim -\ln T$ ) และ  $hv$  คือพลังงานโฟตอน [34] จากกราฟสามารถประมาณค่าช่องว่างพลังงานได้ดังนี้ 3.25, 3.25, 3.24 และ 3.20 eV ซึ่งเป็นค่าของ ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมโดยการระเหยด้วยความร้อน ฟิล์มที่เตรียมโดยการ sparking ที่เงื่อนไข 2.5, 1.5, และ 0.5 รอบ ตามลำดับ โดยปกติแล้วค่าช่องว่างพลังงานของซิงก์ออกไซด์ที่ความยาวคลื่น 380 nm จะมีค่าประมาณ 3.26 eV นอกจากนี้แล้วค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความหนาของฟิล์ม

ตารางที่ 4.1 ค่าแถบช่องว่างพลังงานสำหรับฟิล์ม ZnO ที่เตรียมได้

วิธีการเตรียมฟิล์ม	ระเหยด้วยความร้อน	sparking 0.5 รอบ	sparking 1.5 รอบ	sparking 2.5 รอบ
ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (eV)	3.25	3.20	3.24	3.25



รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการระเหยด้วยความร้อน และกระบวนการ sparking ที่ 0.5 รอบ 1.5 รอบ และ 2.5 รอบของการ sparking



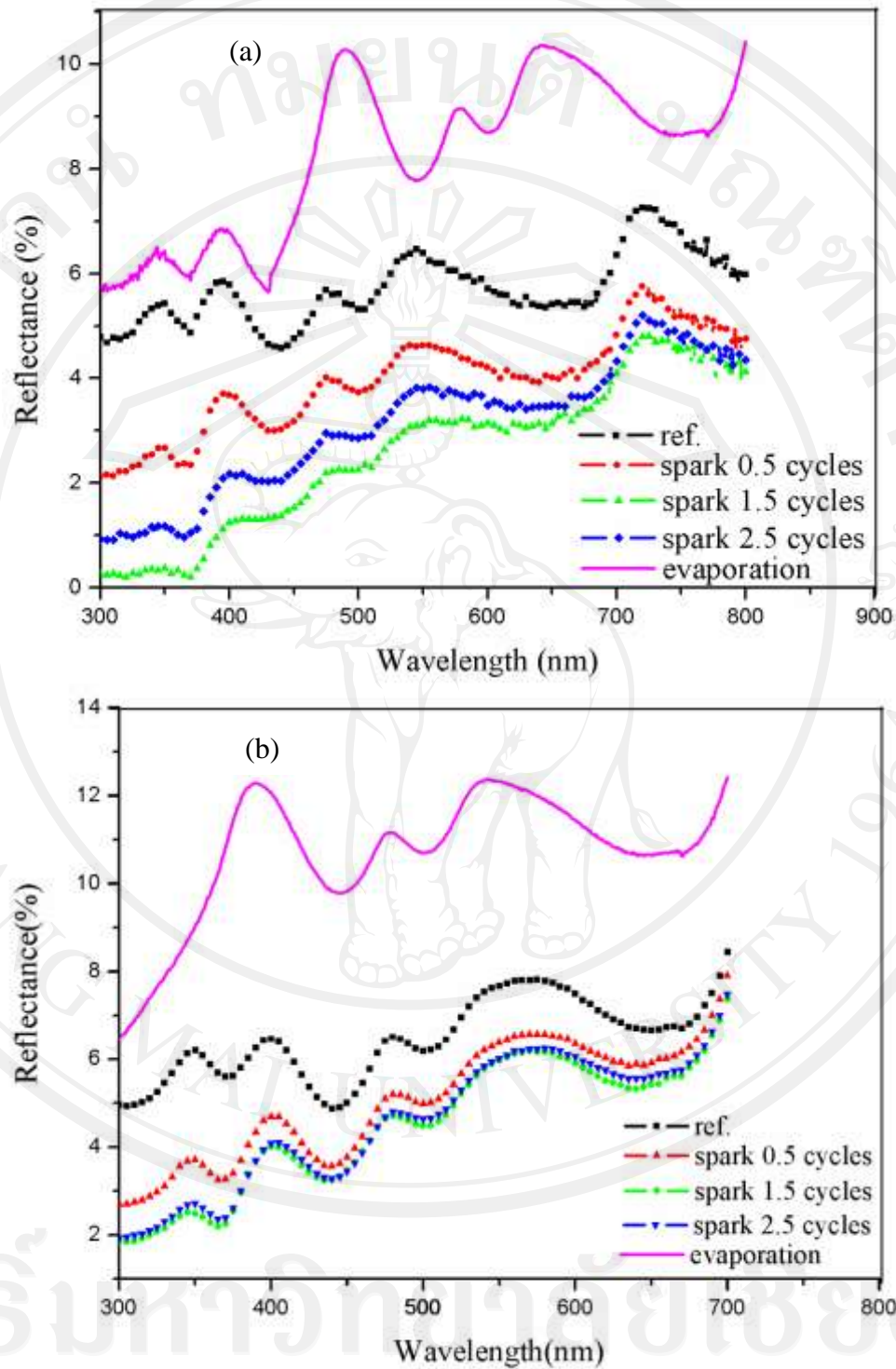
รูปที่ 4.3 แสดงการประมาณค่าของแถบช่องพลังงานของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

#### 4.1.2.2 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer

ในส่วนถัดมาจะเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์ม ZnO ที่เตรียมลงบนกระจก ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแสดงเป็นค่าการสะท้อนแสงของสารเทียบกับความยาวคลื่นของแสง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.4 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง รูป (a) เป็นฟิล์มบาง ZnO บนแผ่นรองรับที่เตรียมโดยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนและวิธีการ sparking ที่ 0.5, 1.5, 2.5 รอบ เทียบกับตัวอย่างที่เป็นกระจก ผลปรากฏว่า ฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีการ sparking สามารถที่จะช่วยลดการสะท้อนแสงและเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมด้วยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนและตัวอย่างอิง นอกจากนี้แล้วในรูป (a) ยังแสดงผลว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธี sparking ที่ 1.5 รอบ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงน้อยที่สุด ส่วนในรูปที่ 4.4 (b) แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีส้มไวแสงที่มีฟิล์มบาง ZnO ทำหน้าที่เป็นชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ผลปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์มที่เคลือบบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีส้มไวแสงมีค่าที่เพิ่มขึ้นมากกว่าฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นรองรับเพียงเล็กน้อยประมาณ 3-4% แต่อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่เตรียม

โดยวิธีการ sparking สามารถที่จะช่วยลดการสะท้อนแสงได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมด้วยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนและตัวอ้างอิง ดังนั้น ฟิล์มบาง ZnO ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ที่เตรียมโดยวิธีการ sparking สามารถที่จะช่วยลดการสะท้อนแสงและเพิ่มการทะลุผ่านของแสง นอกจากนี้รูปที่ 4.4 ยังแสดงผลของการส่ายขึ้นลงของกราฟการสะท้อนแสง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเป็นผลเนื่องจากการแทรกสอดของแสงที่ผิวยอดต่อระหว่างฟิล์มและแผ่นรองรับ ซึ่งฟิล์มที่เตรียมได้มีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ ขรุขระ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการแทรกสอดของแสงที่มีความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกันคือเกิดทั้งการแทรกสอดแบบเสริมทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสง ณ ตำแหน่งนั้นมากขึ้น และการแทรกสอดแบบหักล้างทำให้เกิดการทะลุผ่านของแสงไปยังแผ่นรองรับได้มากขึ้นจึงทำให้ ณ ตำแหน่งนั้นมีค่าการสะท้อนกลับของแสงน้อยลง [5]



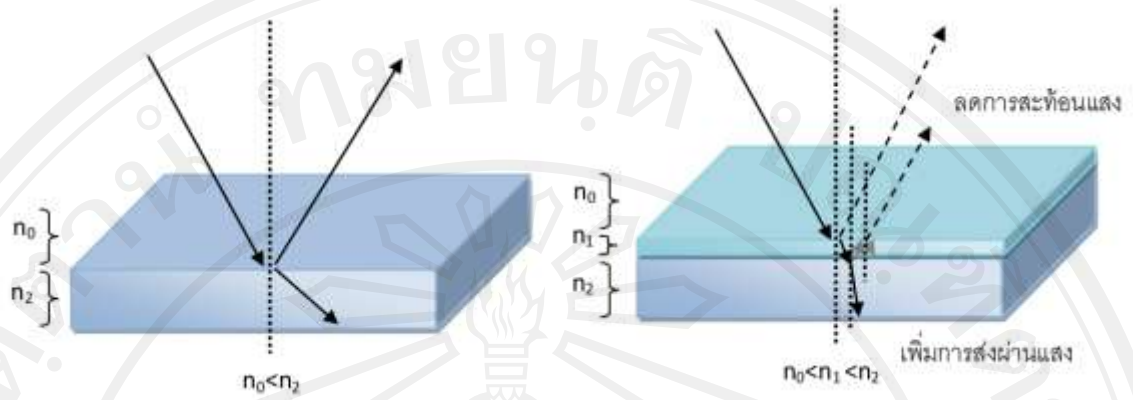
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของค่าการสะท้อนแสงของ (a) फिल्मบางซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนและวิธีการ sparking ที่ 0.5, 1.5, 2.5 รอบ (b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบด้วยชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์

#### 4.1.3 ผลวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์ม ด้วยเครื่องอิลิปโซเมทรี

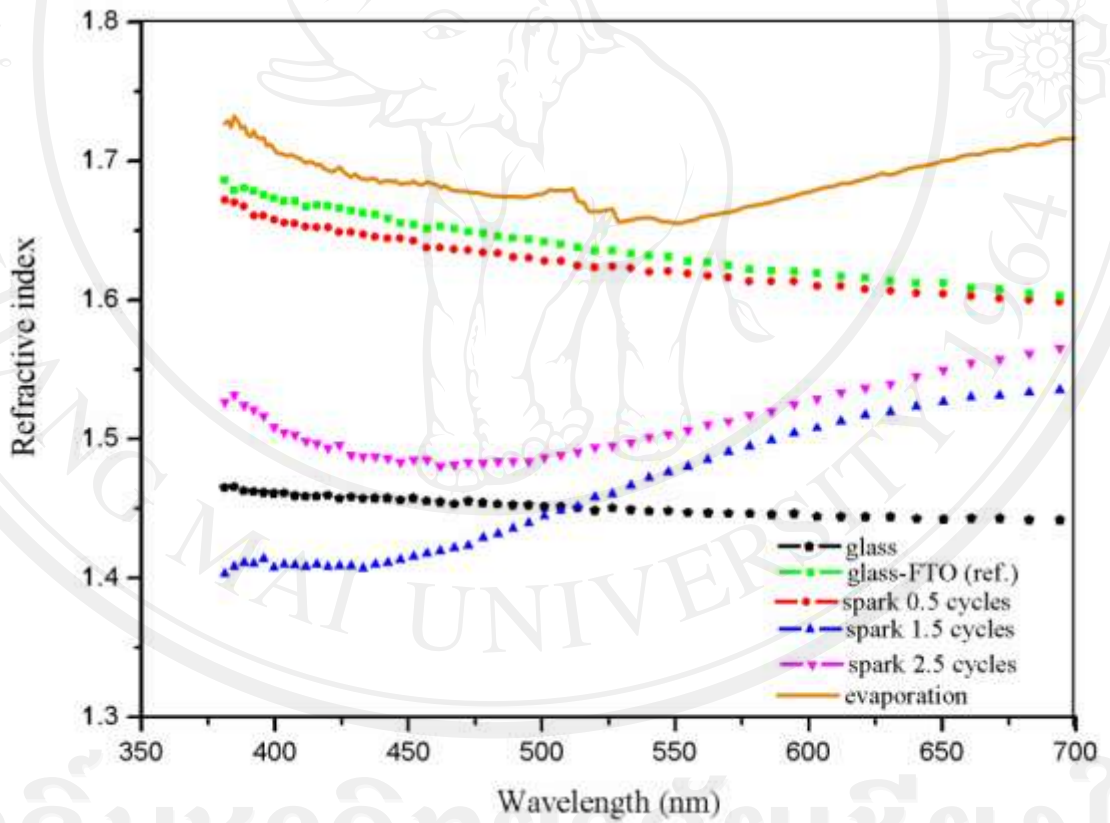
การวิเคราะห์ด้วยอิลิปโซเมทรีเป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาถึงค่าดัชนีหักเหของแสงและความหนาของฟิล์ม ทำได้โดยการยิงลำแสงไปชนกับฟิล์มแล้ววัดการเปลี่ยนแปลงสถานะของโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อนจากพื้นผิว ค่าที่วัดจะแสดงค่าที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามสมการของ Fresnel

ตามหลักการทางฟิสิกส์ ค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มที่เคลือบอยู่ระหว่างอากาศกับแผ่นรองรับจะต้องมีค่าดัชนีหักเหของแสงอยู่ระหว่างค่าของอากาศ ( $n \approx 1$ ) และตัวที่เป็นรับแสงหรือแผ่นรองรับ ทั้งนี้เมื่อแสงที่มาตกกระทบผิวของสารที่มีดัชนีหักเหแสงที่มีค่าสูงมากๆ แสงจะมีการเบนออกจากเส้นปกติมากขึ้น และยังขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบด้วย จะทำให้แสงนั้นจะสะท้อนกลับได้มากขึ้นด้วย ดังนั้น ถ้าต้องการให้อุปกรณ์ไม่มีการสูญเสียการสะท้อนแสงหรือต้องการให้แสงทะลุผ่านไปยังอุปกรณ์นั้นๆ ได้สูงขึ้นจำเป็นต้องเคลือบสารที่มีดัชนีหักเหแสงที่มีค่าเหมาะสมคือจะต้องมีค่าประมาณอยู่ระหว่างอากาศ ( $n \approx 1$ ) และตัวที่เป็นตัวรับแสงหรือแผ่นรองรับ แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นการพล็อตระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มเทียบกับความยาวคลื่นแสง ดังรูปที่ 4.6 แสดงรูปกราฟระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้ากับความยาวคลื่นในช่วง 300 – 700 nm จากรูป แสดงผลค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีการ sparking มีค่าที่ต่ำกว่าค่าดัชนีหักเหของแผ่นรองรับและฟิล์มที่เตรียมโดยกระบวนการระเหยด้วยความร้อน โดยเฉพาะฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีการ sparking ที่ 1.5, 2.5 รอบ มีค่าดัชนีหักเหที่มีค่าอยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหของแผ่นรองรับและอากาศ ซึ่งโดยปกติแล้ว ขั้นตอนด้านการสะท้อนแสงจะต้องมีค่าประมาณอยู่ระหว่างอากาศ ( $n \approx 1$ ) และตัวที่เป็นตัวรับแสงหรือแผ่นรองรับ [35] หรือกรณีที่เป็นฟิล์มบาง 1 ชั้นที่มีผิวเรียบสม่ำเสมอ จะต้องมามีค่าเท่ากับ  $\sqrt{n_0 n_2}$  เมื่อ  $n_0$  คือดัชนีหักเหของอากาศโดยปกติจะเท่ากับ 1,  $n_2$  คือ ดัชนีหักเหของแผ่นรองรับ [4] ดังรูปที่ 4.5





รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพการสะท้อนและการหักเหของแสงเมื่อมีฟิล์มชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง



รูปที่ 4.6 แสดงค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบาง ZnO บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกนำไฟฟ้าด้วยเครื่องอิลิปโซเมทรี

สำหรับผลการวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มบาง ZnO ด้วยเครื่องอิลิปโซเมทรี แสดงดังตารางที่ 4.2 จากตาราง ฟิล์มที่เตรียมโดยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนมีความหนามากกว่าฟิล์มที่เตรียมโดยวิธี sparking และ ฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีการ sparking จะมีความหนาที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของการ sparking ซึ่งความหนาของฟิล์มบางที่เป็นขั้นต่อด้านการสะท้อนแสงจะเป็นตัวเลือกที่จะสร้างการแทรกสอดแบบหักล้างของแสง ระหว่างผิวเพื่อที่จะลดการสะท้อนแสง ซึ่งความยาวคลื่นแสงที่ผ่านไปในฟิล์มจะค่าเป็น 0.25 เท่าของความยาวคลื่นแสงที่เข้ามา และความหนาที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการสะท้อนแสงน้อยที่สุด กำหนดตามสมการ (4.2) [5]

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $d_1$  คือความหนาของฟิล์มบาง  
 $\lambda_0$  คือความยาวคลื่น  
 $n_1$  คือดัชนีหักเหแสงของฟิล์มบาง

จากผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีการ sparking 1.5 รอบ ได้ค่าน้อยที่สุด เมื่อคำนวณความหนาด้วยสมการข้างบนและใช้ดัชนีหักเหแสงที่ความยาวคลื่น 632.8 nm มีค่า 1.52 จากรูปที่ 4.4 ดังนั้นความหนาของฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีการ sparking 1.5 รอบ จะต้องมียค่า 104.08 nm แต่ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิลิปโซเมทรีได้ความหนาเพียง 59.17 nm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าตามทฤษฎี เพราะว่าตามสมการข้างบนใช้สำหรับฟิล์มบางที่ลักษณะพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 4.5 แต่ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีพื้นผิวที่มีความขรุขระไม่สม่ำเสมอซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีการ sparking 1.5 รอบยังให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่น้อยที่สุดสำหรับการเคลือบขั้นต่อด้านการสะท้อนแสง แสดงว่าพื้นผิวที่มีโครงสร้างเป็นอนุภาคนาโนสามารถทำให้แสงสามารถทะลุผ่านไปได้ดีและทำให้แสงไม่สะท้อนออกไปจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เนื่องจากโครงสร้างของฟิล์มเป็นอนุภาคนาโนทำหน้าที่เป็นตัวกักเก็บแสงไม่ให้สะท้อนออกไปนั่นเอง แต่ผลของความหนาก็มีผลต่อการสะท้อนและหักเหของแสงผ่านฟิล์มบางด้วย จากผลการทดลองยังความหนาเพิ่มขึ้นค่าการสะท้อนแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องควบคุมความหนาของฟิล์มบางที่ทำหน้าที่เป็นขั้นต่อด้านการสะท้อนแสงให้เหมาะสม

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความหนาของฟิล์มบาง ZnO ด้วยเครื่องอิลิปโซเมทรี ที่ความยาวคลื่น 632.8 nm

วิธีการเตรียมฟิล์ม	ความหนา (nm)	error bar (nm)
sparking 0.5 รอบ	19.29	2.02
sparking 1.5 รอบ	59.17	3.15
sparking 2.5 รอบ	92.32	4.78
ระเหยด้วยความร้อน	1065.95	12.9

#### 4.2 ผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือผลของชั้นต่อการสะท้อนแสง ZnO ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็น ZnO ผลการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้จึงเป็นผลจากการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และในหัวข้อนี้จะแสดงถึงผลการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

##### 4.2.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การวัดประสิทธิภาพของเซลล์ทำภายใต้ความเข้มแสง  $100 \text{ mW/cm}^2$  เซลล์ที่ทำการวัดประสิทธิภาพประกอบไปด้วยเซลล์มาตรฐานที่ไม่ได้เคลือบชั้นต่อการสะท้อนแสง (reference cell) และเป็นเซลล์ที่เคลือบชั้นต่อการสะท้อนแสงด้วยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนและวิธีการ sparking เปรียบเทียบในการวัดสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 และผลการวัดประสิทธิภาพแสดงเป็นตารางที่ 4.4 และ กราฟ  $J-V$  ดังรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบในการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงในการทดลองครั้งนี้ที่ความเข้มของการส่องสว่าง  $100 \text{ mW/cm}^2$

วิธีการเตรียมฟิล์ม	ระเหยด้วยความร้อน	sparking 0.5 รอบ	sparking 1.5 รอบ	sparking 2.5 รอบ
จำนวนเซลล์	3	3	3	3

จากเงื่อนไขการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ได้ผลดังตารางที่ 4.4 และดัง รูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงผลค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ผลการทดลองยืนยันได้ว่าชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงที่เคลือบด้วยวิธีการ *sparkling* บนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้ค่าประสิทธิภาพ ( $E_{ff}$ ) ที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนด้วยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขของการ *sparkling* 1.5 รอบ ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด 0.8% เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง 0.43% ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 86.04% ซึ่งเป็นการแสดงว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยการเคลือบฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง เนื่องจากสามารถลดค่าการสะท้อนแสงและเพิ่มการทะลุผ่านของแสงไปยังโมเลกุลของสีย้อมจึงทำให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้น เพราะว่ามีปริมาณของพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งผลการทดลองค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยวิธีการ *sparkling* มีค่าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยกระบวนการระเหยด้วยความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง โดยเฉพาะเงื่อนไขของการ *sparkling* 1.5 รอบ ให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงถึง 4.34 mA/cm<sup>2</sup> เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร 3.00 mA/cm<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าสูงขึ้นถึง 44.67% เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าทั้งสี่ค่าจากตารางที่ 4.4  $E_{ff}$  มีความสัมพันธ์กับค่า  $J_{sc}$  มากที่สุด ได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากการเคลือบชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงด้วยฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์นั้นเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแส ตามสมการ (4.3) [21]

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

เมื่อ  $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน (electron charge)

$F(\lambda)$  คือ ฟลักซ์ของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ (flux of the solar spectrum)

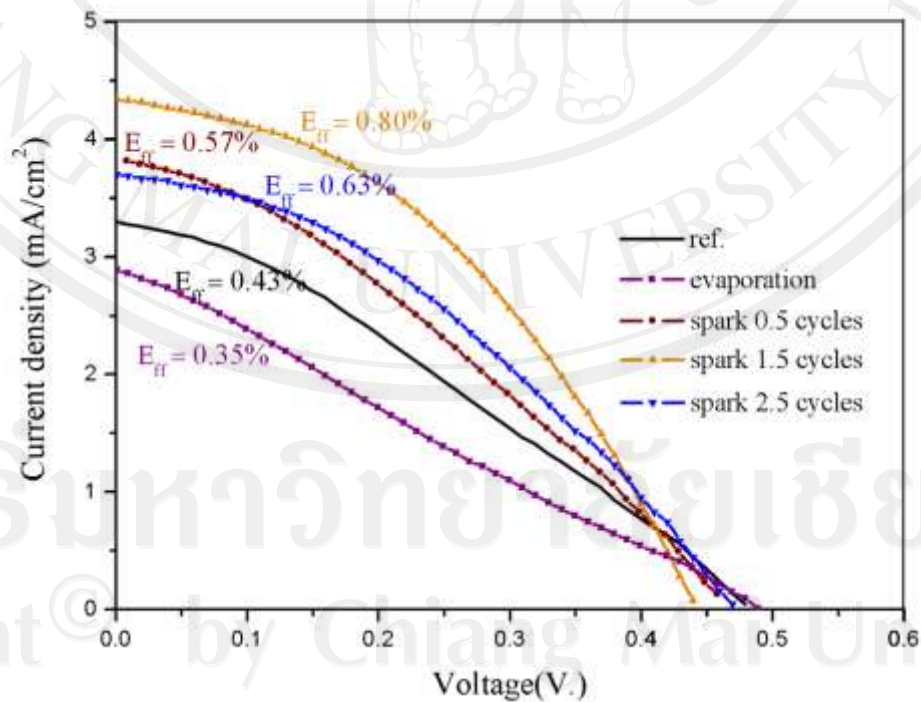
$R(\lambda)$  คือ ค่าการสะท้อนแสง (reflection)

$Q_i(\lambda)$  คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency)

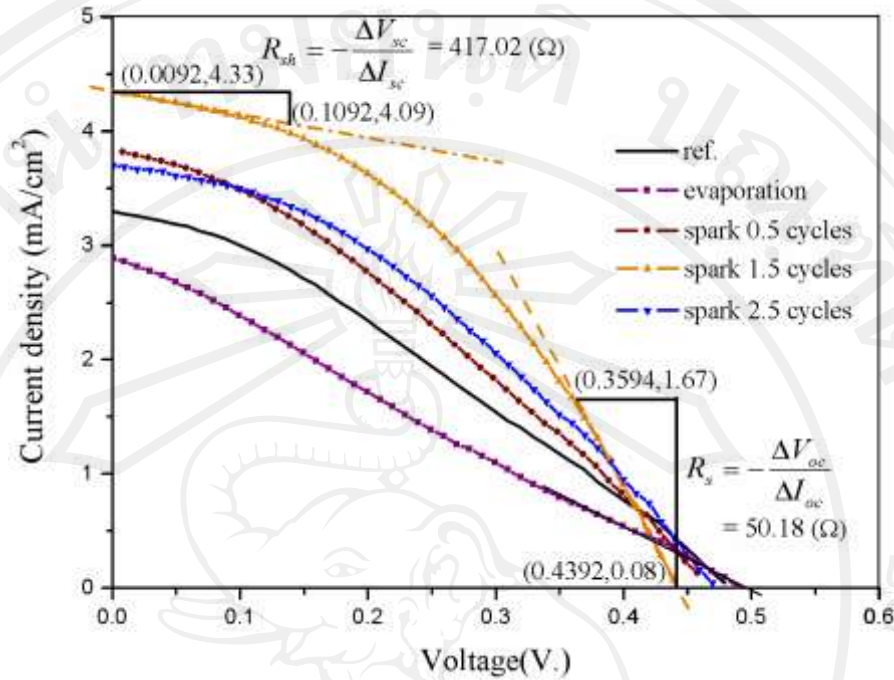
การลดการสะท้อนกลับของแสงที่ผิวกระจกได้ จะทำให้แสงสามารถทะลุผ่านไปยังโมเลกุลของสีย้อมที่เกาะติดกับสารตัวนำได้มากขึ้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงก็จะมีค่ามากขึ้น ถ้าเราสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเพิ่มสัมประสิทธิ์การส่งผ่านให้มากขึ้น จะทำให้จำนวนฟลักซ์ของโฟตอนที่ผ่านมายังโฟโตอิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า short circuit current ( $I_{sc}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นดังสมการ (4.3)

**ตารางที่ 4.4** แสดงค่าวัดทางไฟฟ้าต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีฟิล์มบาง ZnO ที่เป็นชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ไม่มีชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง

เซลล์แสงอาทิตย์	$R_{sh}(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(\text{V})$	FF(%)	$E_{ff}(\%)$
reference cell	448.29	110.47	3.00	0.46	31.29	0.43
sparkling 0.5 รอบ	296.37	100.97	3.82	0.46	32.95	0.57
sparkling 1.5 รอบ	417.02	50.18	4.34	0.47	41.83	0.80
sparkling 2.5 รอบ	474.26	83.62	3.70	0.47	36.74	0.63
ระเหยด้วยความร้อน	188.84	176.39	2.89	0.49	24.58	0.35



**รูปที่ 4.7** แสดงกราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ไม่มีชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงและมีชั้นต่อต้านการสะท้อนแสงฟิล์มบาง ZnO



รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างวิธีการประมาณค่าหาความต้านทาน  $R_{sh}$  และ  $R_s$  จากความชันของกราฟ IV ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลค่าความต้านทาน  $R_{sh}$  และ  $R_s$  ซึ่งคำนวณได้จากรูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ ปรากฏว่าค่าความต้านทาน  $R_{sh}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ZnO ด้วยวิธีการ sparking ให้ค่าที่สูงกว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อน จึงทำให้ค่า FF และ  $E_{ff}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ZnO ด้วยวิธีการ sparking มีค่าที่สูงด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากการที่มีค่า  $R_{sh}$  มีผลต่อกระแสไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟาลดลงเนื่องจากการคืนตัวของอิเล็กตรอน ( $e^-$  recombination) หรือเกิดจากกระแสรั่วไหลบริเวณขอบของอุปกรณ์ ดังนั้นค่า  $R_{sh}$  ต้องมีขนาดที่มากจึงทำให้ไม่เกิดการคืนตัวของอิเล็กตรอนและทำให้  $E_{ff}$  เพิ่มขึ้นนั่นเอง จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 ค่า  $R_{sh}$  ที่เซลล์แสงอาทิตย์ทุกเงื่อนไขมีค่าที่อยู่ในช่วง 180 -480  $\Omega$  ซึ่งยังเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำสำหรับค่า  $R_{sh}$  จึงส่งผลให้ค่า FF มีค่าที่ค่อนข้างต่ำนั่นเอง ซึ่งในทางตรงกันข้ามกับผลของความต้านทาน  $R_s$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ZnO ด้วยวิธีการ sparking ให้ค่าที่ต่ำกว่า ฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อน แต่ทำให้ค่า FF และ  $E_{ff}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบด้วยชั้นต่อต้านการสะท้อนแสง ZnO ด้วยวิธีการ sparking มีค่าที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจาก ค่า  $R_s$  เป็นความต้านทานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด

ดังนั้นถ้าหากค่าความต้านทาน  $R_s$  มีค่าน้อยค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่า FF และ  $E_{ff}$  มีค่าที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งการที่ค่า  $R_s$  มีค่าน้อยส่งผลให้กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น นี้มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการ sparking มีค่าที่ต่ำกว่าค่าการสะท้อนแสงของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อน ส่งผลให้ค่า  $J_{sc}$  ของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการ sparking มีค่าที่สูงกว่าค่า  $J_{sc}$  ของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อน ดังนั้นค่าการสะท้อนแสงมีค่าน้อย จะทำให้ค่า  $R_s$  มีค่าน้อยด้วย ค่า  $J_{sc}$  จะมีค่าสูงขึ้น  $E_{ff}$  มีค่าที่สูงขึ้นด้วยนั่นเอง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (4.4) และ (4.5)

$$J = \frac{V}{R_s} \quad (4.4)$$

$$J_{sc} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} qF(\lambda)[1-R(\lambda)]Q_i(\lambda)d\lambda \quad (4.5)$$

- เมื่อ  $J$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  
 $V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า  
 $R_s$  คือ ความต้านทานอนุกรม (series resistance)  
 $J_{sc}$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร  
 $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน (electron charge)  
 $F(\lambda)$  คือ ฟลักซ์ของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ (flux of the solar spectrum)  
 $R(\lambda)$  คือ ค่าการสะท้อนแสง (reflection)  
 $Q_i(\lambda)$  คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency)