

## 4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation)

จากการทดลองตอนที่ 4.1.1.2 จะเห็นได้ว่าเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซเมทรี (SE) สามารถวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีอีลิปโซเมทรีทรอนสปัตเตอริงได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงนำเทคนิค SE มาวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ ค่าช่องว่างพลังงาน และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเคลือบฟิล์มเซอร์โคเนียมด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นเวลา 5 นาที โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 8.6 sccm และให้พลังงานในการเคลือบเท่ากับ 140 W (ดังตารางที่ 4.8) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบที่ส่งผลการเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ นำฟิล์มเซอร์โคเนียมไปอบในอากาศด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และเมื่อทราบถึงอุณหภูมิที่สามารถทำให้เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์แล้ว จะทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ส่งผลทำให้เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ โดยนำฟิล์มไปอบในอากาศด้วยอุณหภูมิที่สามารถเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที ดังจะได้กล่าวต่อไป

### 4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบฟิล์มต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์

ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่สามารถทำให้เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ จะนำฟิล์มเซอร์โคเนียมไปอบในอากาศด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8

ตัวอย่างฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

Sample No.	Annealing Time (min)	Annealing Temperature ( $^{\circ}$ C)
T1	60	200
T2	60	300
T3	60	400
T4	60	500

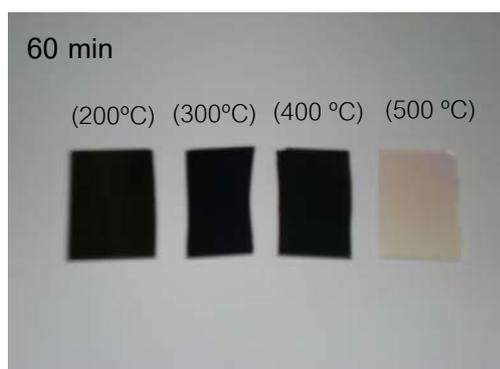
#### 4.2.1.1 การวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมได

##### ออกไซด์

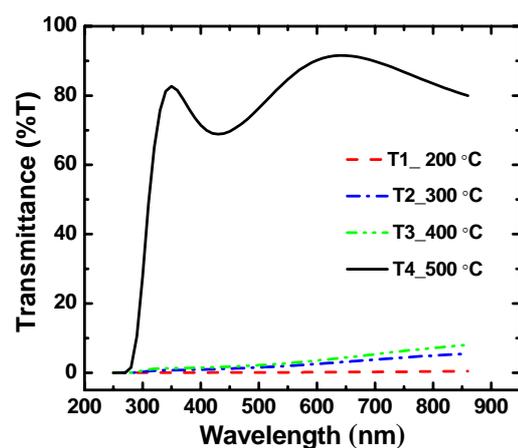
ภาพที่ 4.17 แสดงลักษณะและเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งสังเกตได้ว่าฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 และ 400 องศาเซลเซียส ยังคงมีลักษณะทึบแสง แต่เมื่ออุณหภูมิในการอบฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส ฟิล์มมีลักษณะโปร่งแสง และเมื่อไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสง พบว่าฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 และ 400 องศาเซลเซียส มีค่าการส่งผ่านแสงต่ำกว่า 10% ในขณะที่ฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงค่าการส่งผ่านแสงสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงสูงกว่า 80% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์กว่าฟิล์มที่อบด้วยอุณหภูมิ 200 300 และ 400 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.17

- a.) ภาพถ่ายของฟิล์ม b.) เปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 400 และ 500°C เป็นเวลา 60 นาที



a.)



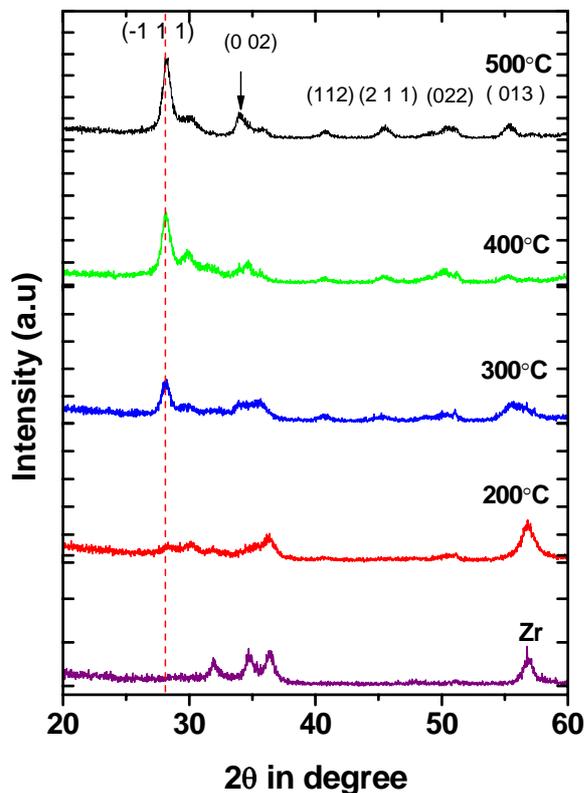
b.)

#### 4.2.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์

ภาพที่ 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD พบว่า ฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์หลังผ่านการอบด้วยเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ยังไม่ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ แต่เมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้นเป็น 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างฟิล์มเปลี่ยนแปลงไปเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการฟอร์มตัวของเซอร์โคเนียมกับออกซิเจนเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สามารถพบพีคที่ระนาบ (-1 1 1) และจะมีความเข้มพีคที่ระนาบนี้เพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบฟิล์มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้น โดยฟิล์มที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สามารถพบพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลีนิกที่ระนาบ (-111) (002) (112) (022) และ (013) ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 28 34 41 52 และ 57 องศา โดยเฉพาะที่ระนาบ (-1 1 1) มีความเข้มพีคสูงสุด แสดงว่าฟิล์มเซอร์โคเนียมเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างเป็นเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.18

พีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมและฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที



#### 4.2.2 ผลกระทบของเวลาในการอบต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอริโคเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบในบรรยากาศด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที มีลักษณะโปร่งแสงและเกิดโครงสร้างผลึกของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจน เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มที่อุณหภูมิดังกล่าว จึงทำการอบฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ด้วยเวลา 5 15 30 และ 60 นาที

ตารางที่ 4.9

ตัวอย่างฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 5 15 30 และ 60 นาที

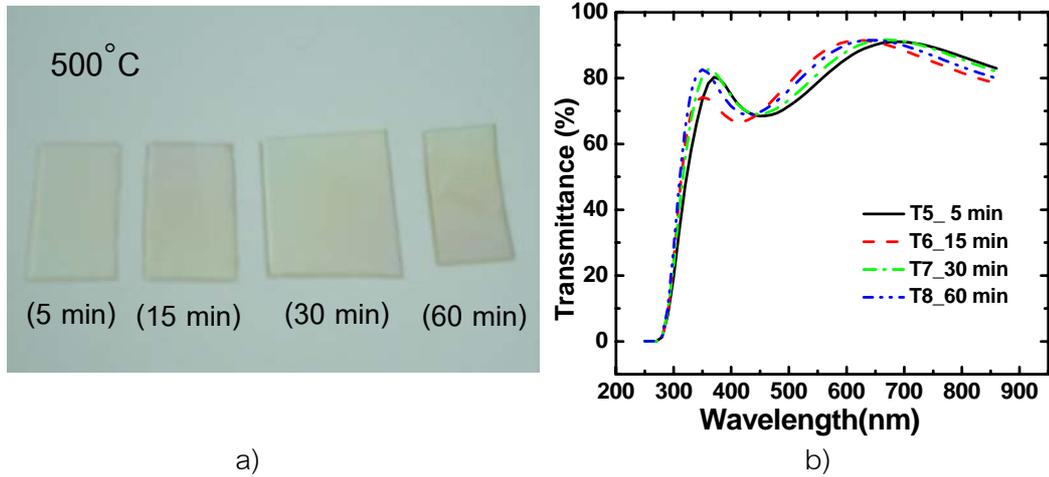
Sample No.	Annealing Temperature (°C)	Annealing Time (min)
T5	500	5
T6	500	15
T7	500	30
T8	500	60

##### 4.2.2.1 การวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเซอริโคเนียมไดออกไซด์

เมื่อนำฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาในการอบฟิล์มที่แตกต่างกัน พบว่า ฟิล์มมีลักษณะโปร่งแสงที่ใกล้เคียง ดังภาพที่ 4.19 และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที พบว่า ฟิล์มมีเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงใกล้เคียงกัน โดยเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร มีค่ามากขึ้นเมื่อฟิล์มผ่านการอบด้วยเวลามากขึ้น (ดังตารางที่ 4.10) และเมื่อนำเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน ไปคำนวณการส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามองเห็น ( $T_{avg_{vis}}$ ) ดังสมการที่ (3.15) พบว่าฟิล์มทั้งหมดมีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยมากกว่า 80% ซึ่งถือว่าฟิล์มมีระดับความใสที่ดี ดังภาพที่ 4.20 ดังนั้น จะสังเกตเห็นได้ว่าการอบฟิล์มที่เวลาเพียง 5 นาที สามารถที่จะเกิดฟิล์มออกไซด์ที่มีลักษณะโปร่งแสงและมีค่าการส่งผ่านแสงใกล้เคียงกับฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยเวลามากขึ้น

ภาพที่ 4.19

a.) ภาพถ่ายของฟิล์ม b.) เปรอ์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียม ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที

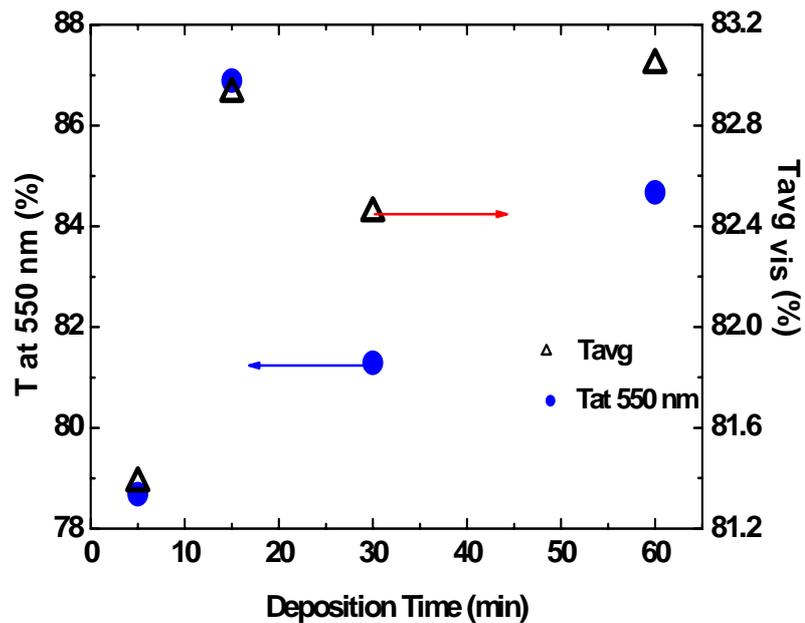


a)

b)

ภาพที่ 4.20

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที



#### ตารางที่ 4.10

ผลของเวลาในการอบฟิล์มมีต่อเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

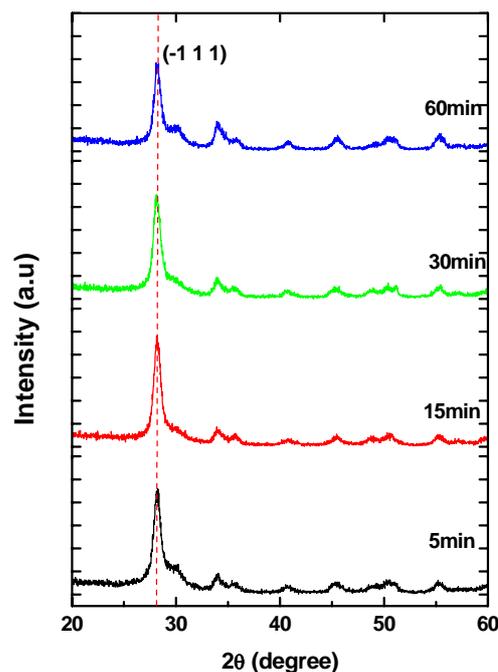
Sample No.	Deposition time (min)	%T at 550 nm	%Tavg <sub>vis</sub>
T5	5	78.68	81.38
T6	15	86.89	82.93
T7	30	81.29	82.45
T8	60	84.67	83.04

#### 4.2.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

เมื่อพิจารณาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาต่างกัน ดังภาพที่ 4.21 พบว่า เมื่อเวลาในการอบฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 30 นาที พีคที่ระนาบ (-1 1 1) และพีคที่ระนาบอื่น มีความเข้มพีคที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการอบฟิล์มถึง 60 นาที พีคที่ระนาบ (-1 1 1) มีความเข้มพีคลดลง

ภาพที่ 4.21

พีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที

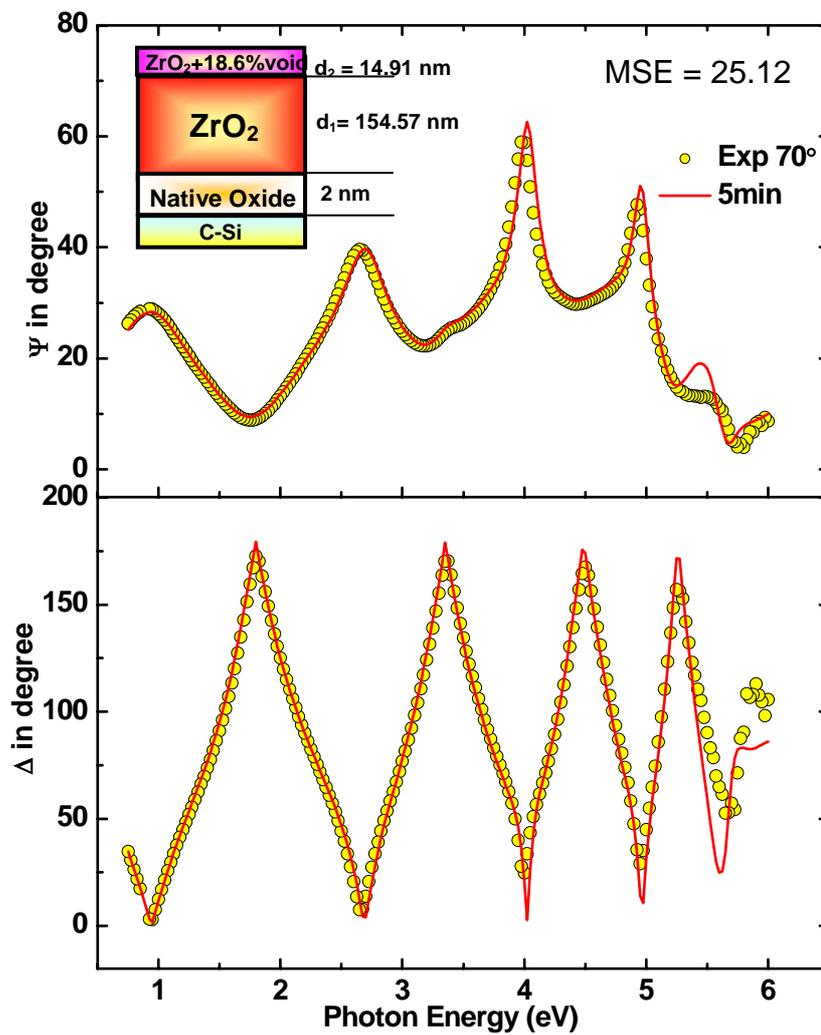


#### 4.2.2.3 ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ ค่าช่องว่างพลังงานและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงและความหนาของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเวลาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที โดยนำแบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมกับฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ตอนที่ 4.1.1.2) มาประยุกต์ใช้กับฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน จากการทดลอง พบว่า แบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์ สามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เฉพาะในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-5 อิเล็กตรอนโวลต์ ทั้งนี้ในช่วงพลังงานโฟตอน 5-6 อิเล็กตรอนโวลต์ไม่สามารถทำการเปรียบเทียบผลได้ เนื่องจากฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ด้วยวิธีนี้เนื้อฟิล์มมีความไม่สม่ำเสมอ โดยภาพที่ 4.22-4.25 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดของฟิล์มที่ผ่านการอบเป็นเวลา 5 ถึง 60 นาที และได้ทำการเปรียบเทียบความหนาและค่าดัชนีหักเหที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงของทาวน์ลอเรนซ์โดยใช้ 2 ออสซิลเลเตอร์ ของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน ดังตารางที่ 4.11

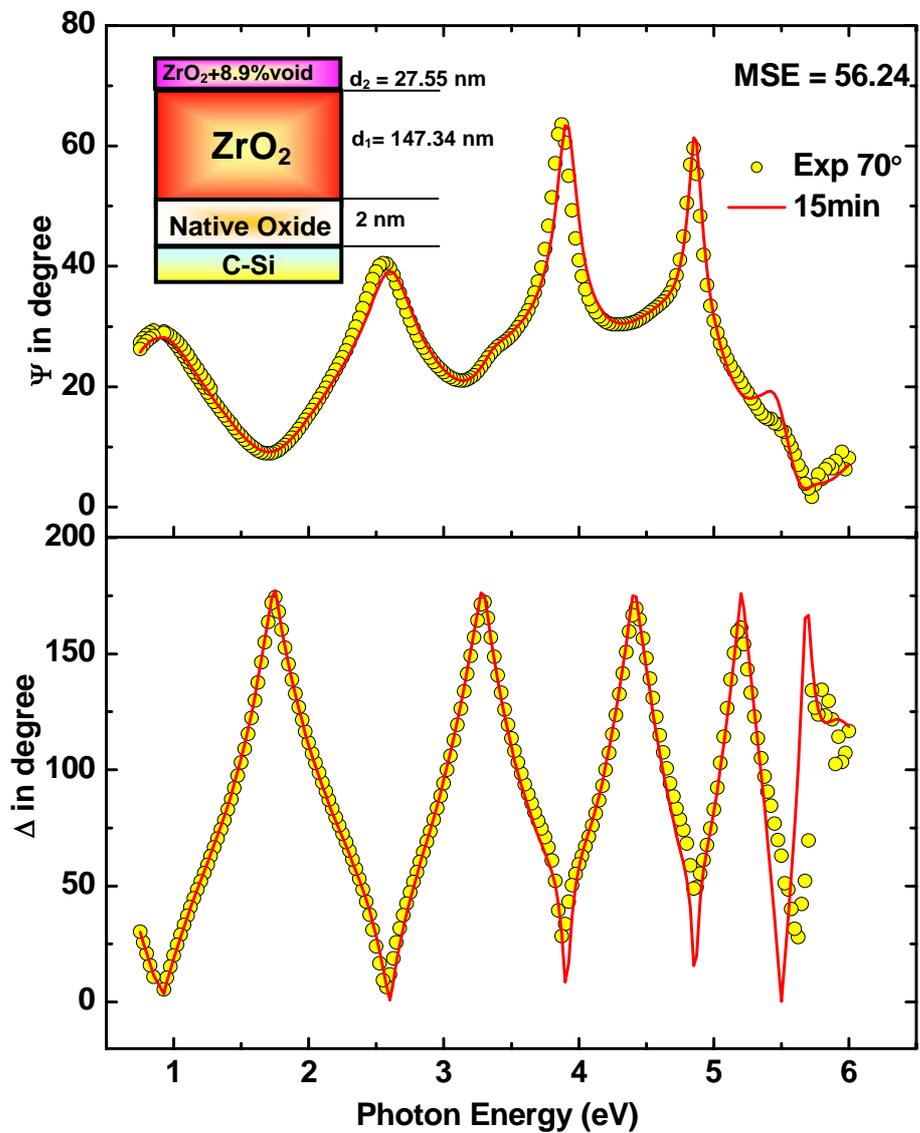
ภาพที่ 4.22

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิมพัลส์ซีลีเนียม  
มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



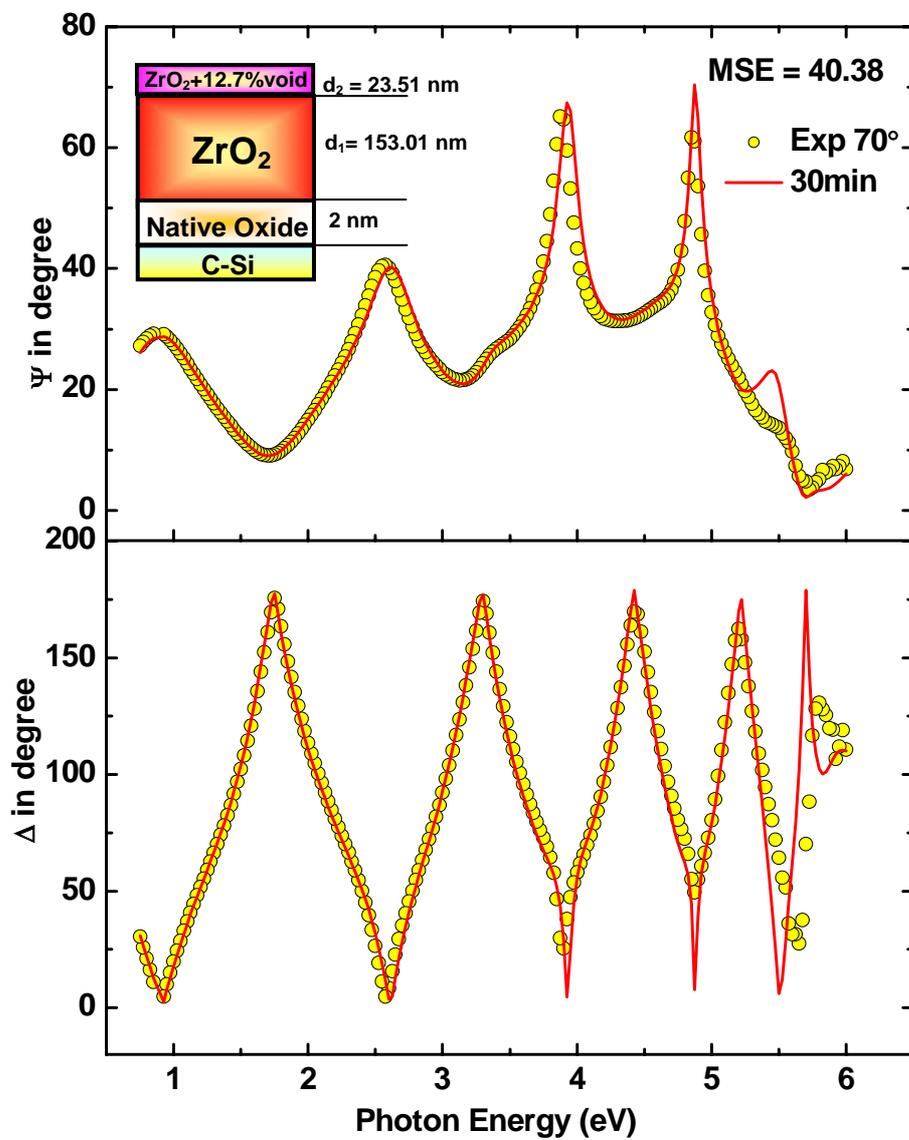
ภาพที่ 4.23

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



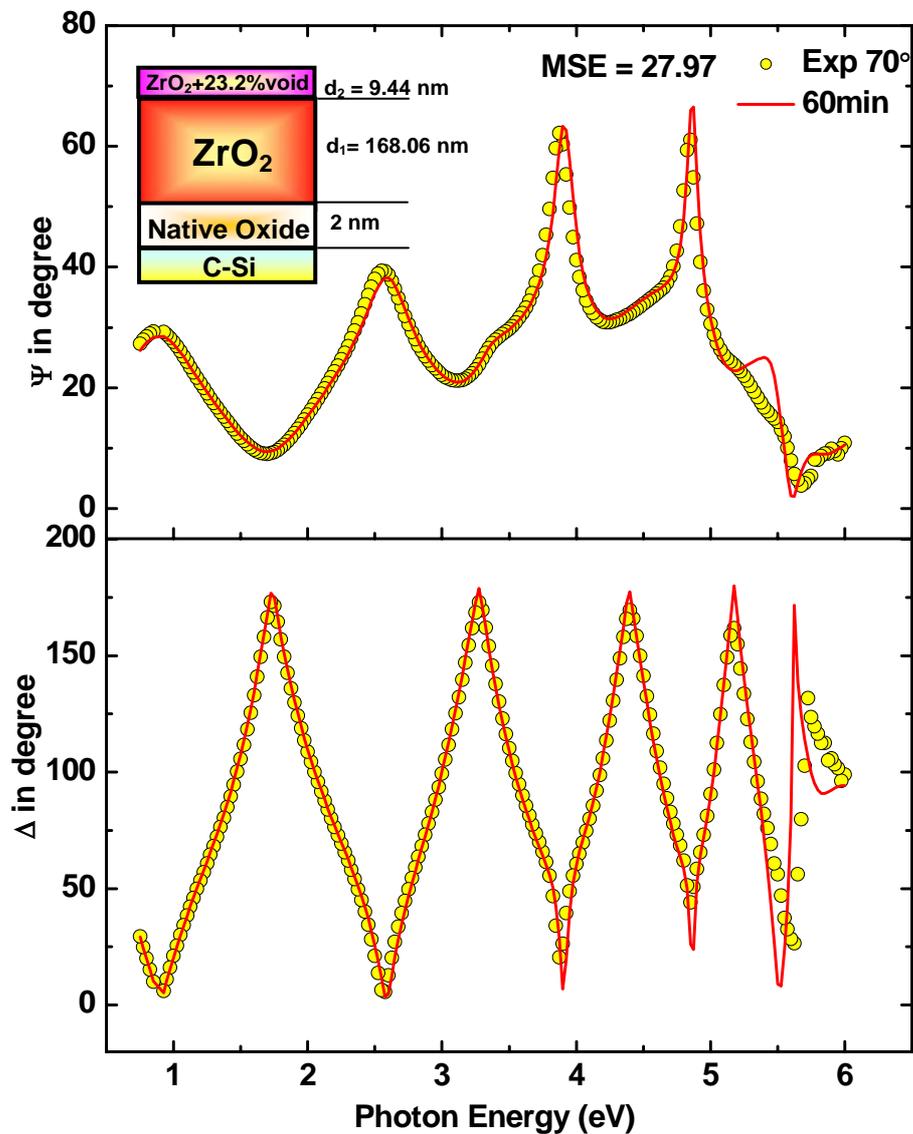
ภาพที่ 4.24

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



ภาพที่ 4.25

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิมัลชันโพลาไรซ์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



ตารางที่ 4.11

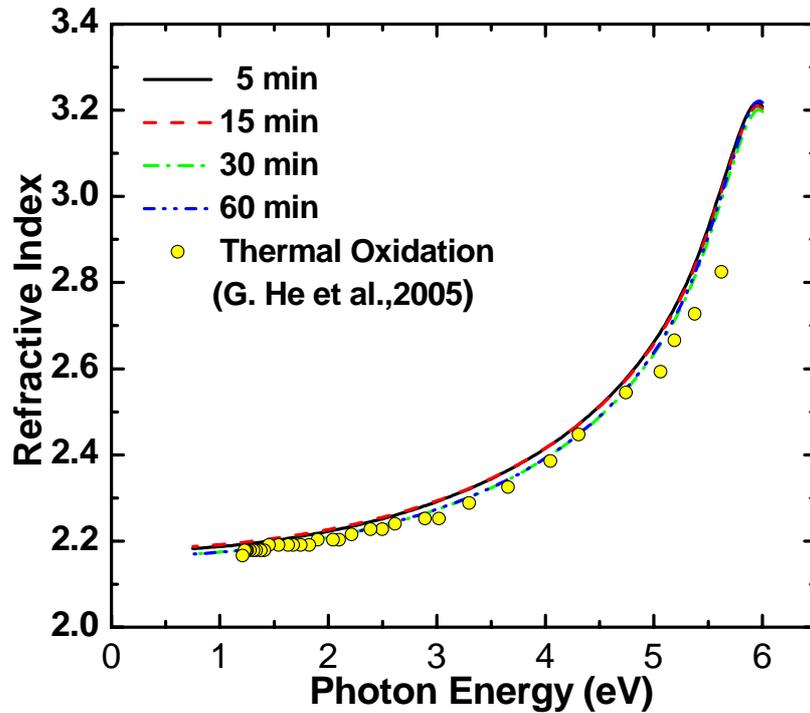
เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้น และแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ด้วย 2 ออสซิลเลเตอร์

Sample No.	Deposition Time (min)	Refractive	
		Index at 2.25 eV	Thickness(nm)
T1	5	2.23	169.48
T2	15	2.24	174.89
T3	30	2.22	176.53
T4	60	2.22	177.50

ภาพที่ 4.26 แสดงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่อบด้วยเวลาต่างก็มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าดัชนีหักเหที่พลังงานโฟตอน 2.25 eV อยู่ในช่วง 2.22-2.24 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน ที่ทำการอบฟิล์มในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ( G. He et al., 2005) พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน

ภาพที่ 4.26

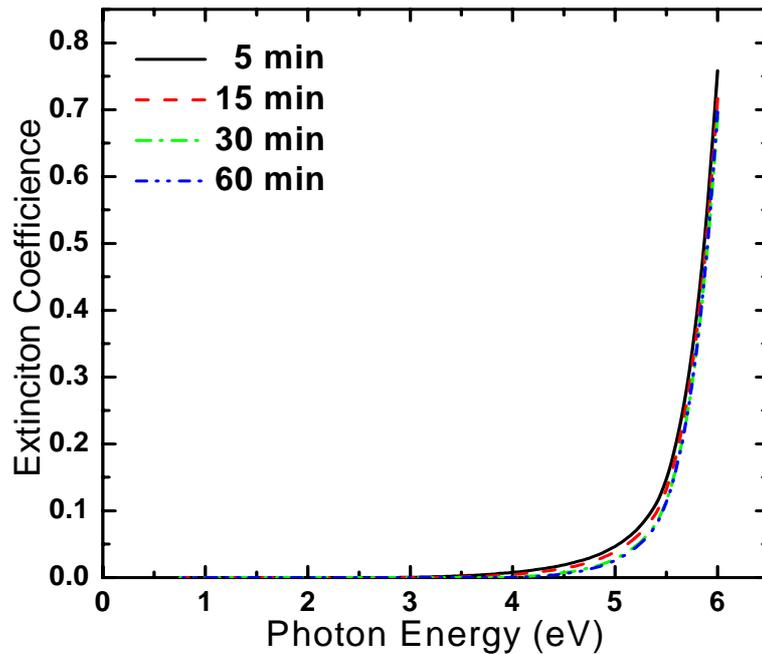
ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบ  
ด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที



ภาพที่ 4.27 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที พบว่า ในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-4 อิเล็กตรอน โวลต์ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงพลังงานโฟตอนตั้งแต่ 4 อิเล็กตรอน โวลต์ ขึ้นไป ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วง พลังงานโฟตอน 5 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป

ภาพที่ 4.27

ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบ  
ด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที



ในการคำนวณหาช่องว่างพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha hv)^{1/2}$  กับ  $hv$  ดังภาพที่ 4.28 โดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจากการนำค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SE ไปแทนในสมการที่ (2.23) พบว่าฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกันมีค่าช่องว่างพลังงานใกล้เคียงกัน โดยมีค่าประมาณ 5.25 eV ดังตารางที่ 4.12 โดยค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอริโคเนียมที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน ดังรายงานของ G. He และคณะ (G. He et al., 2005) ที่ทำการอบฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600-900 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 4.13-4.59 eV และค่าช่องว่างพลังงานในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ L. Q. Zhu และคณะ (L. Q. Zhu et al., 2006) ที่ทำการอบฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ในบรรยากาศของออกซิเจนและไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 และ 700 องศาเซลเซียส โดยมีค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5.06-5.18 eV ทั้งนี้ค่าช่องว่างพลังงานที่ได้กล่าวข้างต้นมีค่าต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงานของ Bulk เฟสโมโนคลินิก ที่มีค่าเท่ากับ 5.4 eV (B.

Kralik et al., 1998) เนื่องจากฟิล์มที่ได้จากการเคลือบอาจมีความบกพร่อง (Defect) จึงทำให้มีค่าช่องว่างพลังงานต่ำกว่าของ Bulk

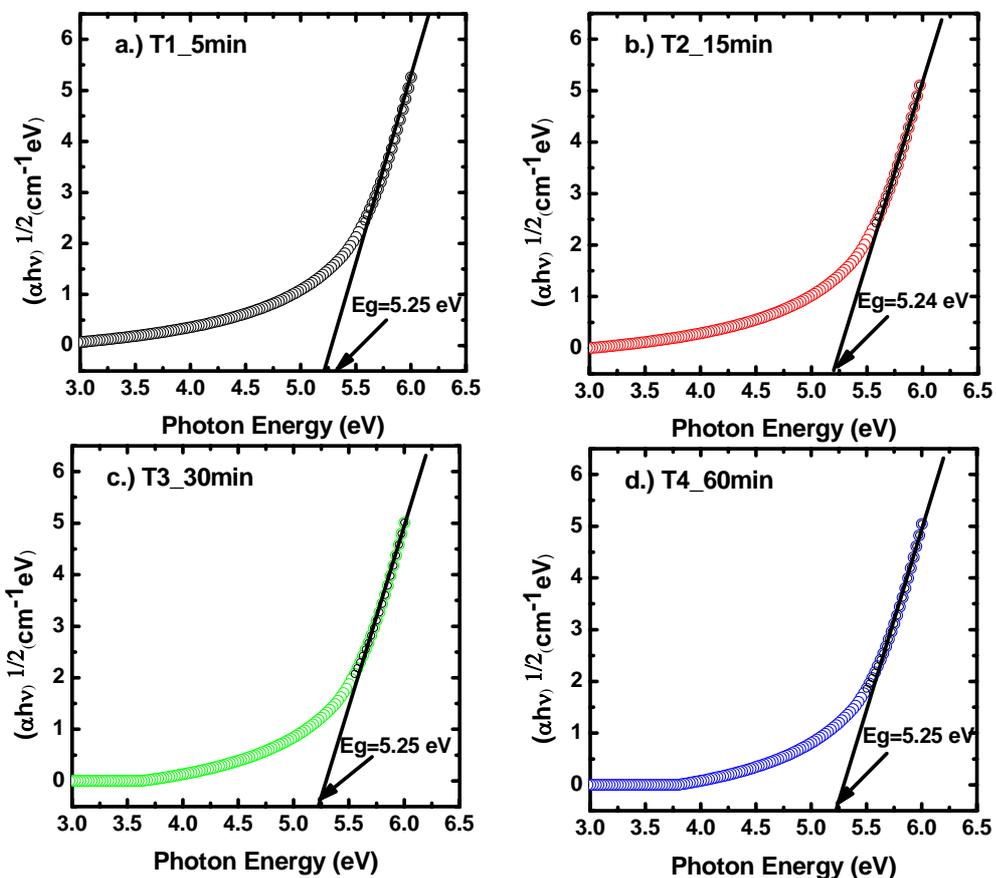
ตารางที่ 4.12

ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน

Sample No.	Deposition Time (min)	Optical Bandgap	Thickness(nm)
T1	5	5.25	169.48
T2	15	5.24	174.89
T3	30	5.25	176.53
T4	60	5.25	177.50

ภาพที่ 4.28

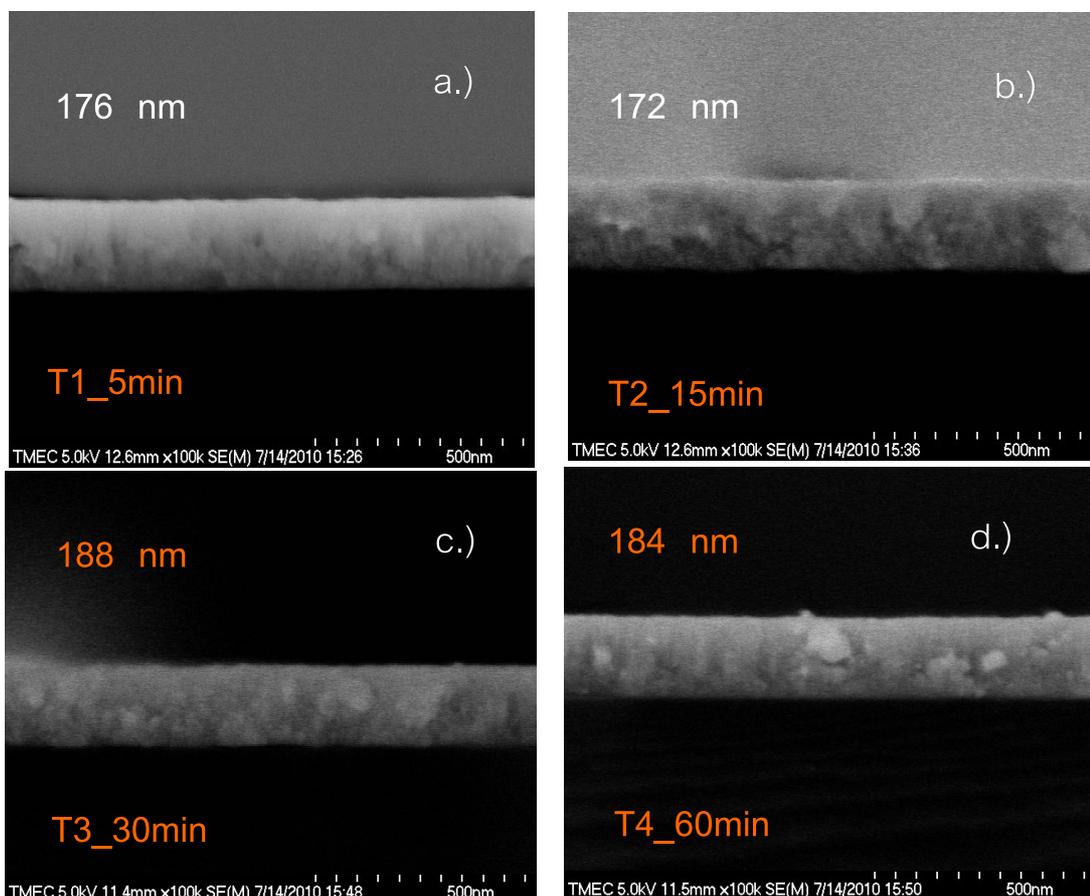
ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา a.) 5 b.) 15 c.) 30 และ d.) 60 นาที



หลังจากวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค SE แล้ว จึงทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ความหนาของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM) ดังภาพที่ 4.29 พบว่า ความหนาของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีความหนาเท่ากับ 176 172 188 และ 184 นาโนเมตร เมื่อทำการอบฟิล์มเป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ สันนิษฐานว่าเมื่อเวลาในการอบฟิล์มนานขึ้นออกซิเจนสามารถแทรกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ได้นานขึ้น ส่งผลทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่หนาเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM กับเทคนิค SE พบว่าความหนาจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SE มีค่าใกล้เคียงกันกับความหนาจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ความหนาด้วยเทคนิค SE มีความหนาที่แตกต่างจากการวิเคราะห์ความหนาด้วยเทคนิค FE-SEM สูงสุดเพียง 6% ดังตารางที่ 4.13

ภาพที่ 4.29

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา a.) 5 b.) 15 c.) 30 และ d.) 60 นาที



ตารางที่ 4.13

เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FE-SEM และเทคนิค SE

Sample No	Deposition Time (min)	Thickness (nm)	
		FE-SEM	SE
T1	5	176	169
T2	15	172	174
T3	30	188	176
T4	60	184	177

#### 4.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของระบบฟิล์มบางป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-reflection coating: AR)

การเคลือบป้องกันการสะท้อนแสงเป็นการเคลือบเพื่อลดการสะท้อนแสงที่ไม่ต้องการบนผิวเลนส์ และเพิ่มปริมาณของแสงที่ผ่านเลนส์เข้าสู่ตามากขึ้น ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตา ในการเคลือบฟิล์มประเภทนี้จะประกอบด้วยชั้นฟิล์มที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำสลับกับชั้นฟิล์มที่มีค่าดัชนีหักเหสูง ในการทดลองตอนนี้จะทำการวิเคราะห์ระบบฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสง โดยฟิล์มที่นำมาวิเคราะห์เตรียมด้วยวิธีการระเหยสารจากโรงงานอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตา ซึ่งประกอบด้วยชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ (Low-index) กับชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียไดออกไซด์ (High-index) สลับกันเป็นจำนวนทั้งหมด 5 ชั้น จากเครื่องเคลือบฟิล์ม 3 เครื่อง โดยจะทำการวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหและความหนาของแต่ละชั้นฟิล์ม และตรวจสอบสภาวะการใช้งานของเครื่องเคลือบแต่ละเครื่องอีกเช่นกัน

ในการทดลองตอนนี้จะทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มด้วยเทคนิค SE เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มในแต่ละชั้นได้เป็นอย่างดี และยังให้ค่าดัชนีหักเหตลอดทั้งช่วงความยาวคลื่นแสง ซึ่งในขั้นแรกของการวิเคราะห์จะทำการหาค่าดัชนีหักเหจากฟิล์มบางชั้นเดียว ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) ที่เคลือบลงบนกระจกที่ใช้เป็นแผ่นรองรับ (Monitor glass) เพื่อหาแบบจำลองทางแสงและแบบจำลองทางกายภาพที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์ม 5 ชั้น เพื่อป้องกัน

การสะท้อนแสง โดยตารางที่ 4.14 แสดงตัวอย่างของฟิล์มและระบบฟิล์มสำหรับป้องกันการสะท้อนแสงที่นำมาใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.14  
ตัวอย่างฟิล์มบางสำหรับป้องกันการสะท้อนแสง

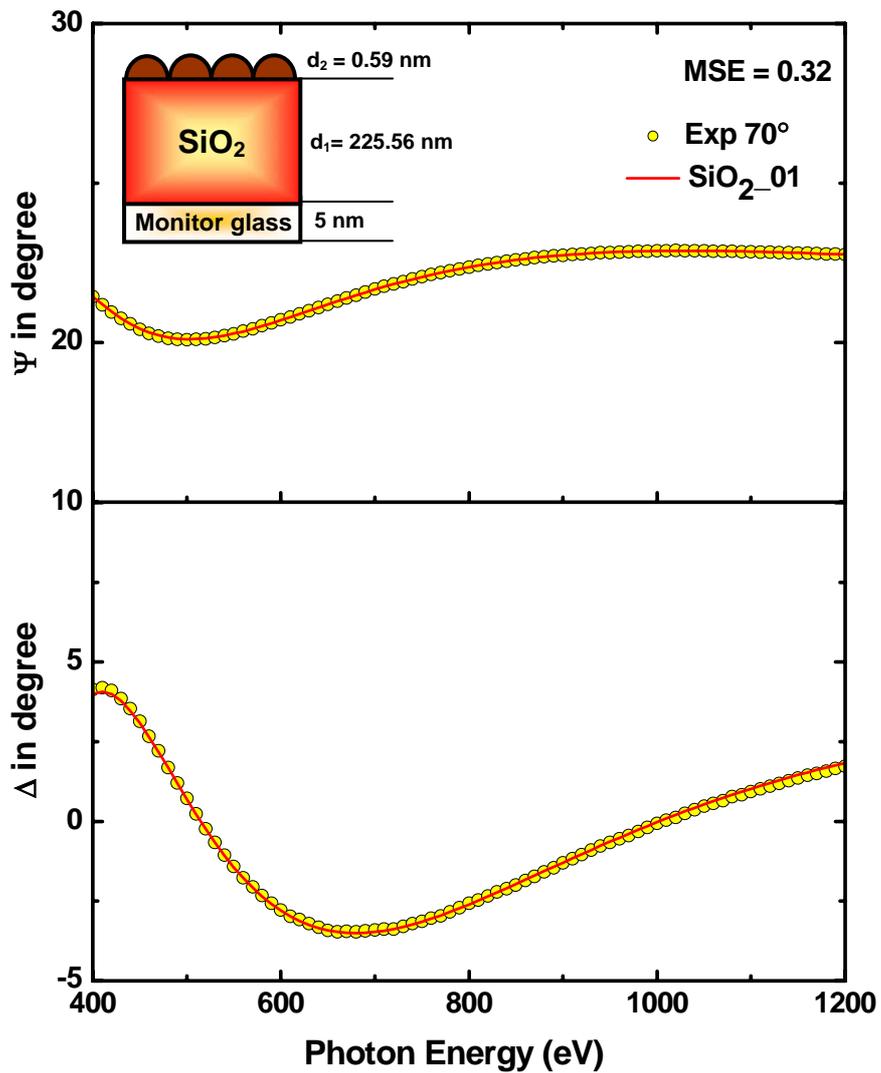
Sample No.	Coater No.	Number of Layer	Remark
SiO <sub>2</sub> _01		1	-
ZrO <sub>2</sub> _01	1	1	-
AR_01		5	SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>
SiO <sub>2</sub> _02		1	-
ZrO <sub>2</sub> _02	2	1	-
AR_02		5	SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>
SiO <sub>2</sub> _03		1	-
ZrO <sub>2</sub> _03	3	1	-
AR_03		5	SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>

#### 4.3.1 การวิเคราะห์ฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>)

ในการทดลองตอนนี้จะทำการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มบาง SiO<sub>2</sub> ที่ทำการเตรียมจากเครื่องเคลือบ 3 เครื่อง โดยใช้สมการเซลล์มายด์ (Sellmier equation) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางแสงที่ใช้กับฟิล์ม SiO<sub>2</sub> อย่างแพร่หลาย จากภาพที่ 4.30 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบผลระหว่างผลการวัดกับแบบจำลองของฟิล์มบาง SiO<sub>2</sub> ที่ได้จากเครื่องเคลือบที่ 1 (Sample: SiO<sub>2</sub>\_01) โดยแบบจำลองสำหรับฟิล์ม SiO<sub>2</sub> ที่เหมาะสมนี้จะประกอบด้วยชั้นกระจกที่ใช้เป็นแผ่นรองรับ (Monitor glass) ที่มีความหนาประมาณ 5 นาโนเมตร ชั้นฟิล์ม SiO<sub>2</sub> ความหนา 225.56 นาโนเมตร และชั้นความขรุขระบนพื้นผิวที่มีความหนาเพียง 0.58 นาโนเมตร ซึ่งจะเห็นว่าฟิล์ม SiO<sub>2</sub> โดยฟิล์มที่ได้มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.51 ที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร ซึ่งจะมีค่าสูงกว่า Bulk material ของ SiO<sub>2</sub> ที่ทำการวิเคราะห์โดย Palik ดังภาพที่ 4.31

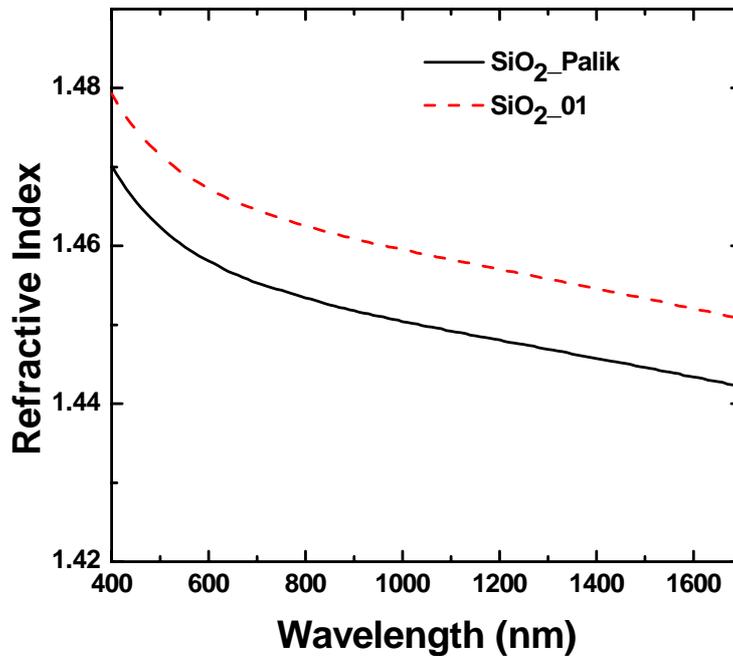
ภาพที่ 4.30

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงระหว่างความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบบน Monitor glass โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการเซลล์มายด์ (Sellmier equation)



ภาพที่ 4. 31

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่เคลือบ 1 ชั้น  
กับค่าดัชนีหักเหของ Bulk material ที่ทำการวิเคราะห์โดย Palik

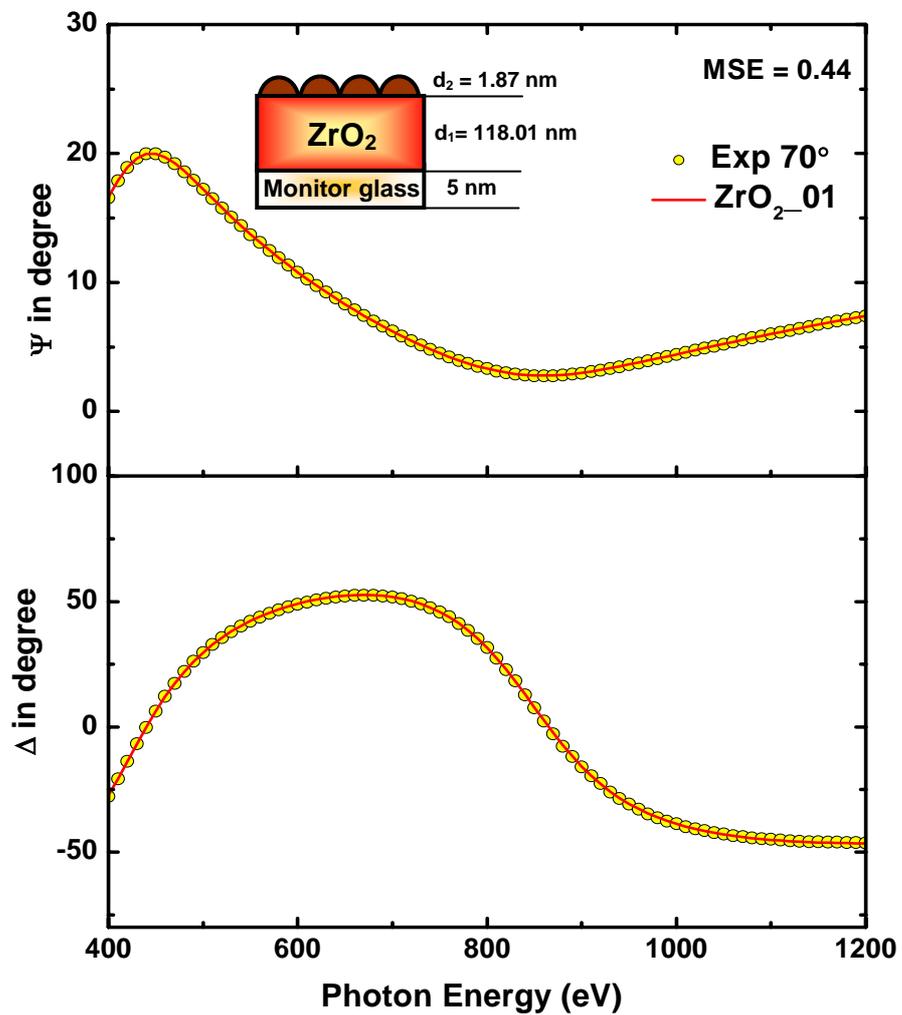


#### 4.3.2 การวิเคราะห์ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO<sub>2</sub>)

จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีแอดที่ฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ในหัวข้อที่ 4.1.1.2 พบว่าแบบจำลองทางแสงของคอร์ซีเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 400-1200 นาโนเมตร ดังนั้น จึงนำแบบจำลองทางแสงดังกล่าวมาใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบ 1 ชั้นบน Monitor glass ดังภาพที่ 4.32 จากการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดพบว่า สามารถทำการเปรียบเทียบ Curve fitting ได้ดี โดยมีค่า MSE เท่ากับ 0.44 ชั้นฟิล์มมีความหนา 118.01 นาโนเมตร และชั้นความขรุขระบนพื้นผิวมีความหนา 1.87 นาโนเมตร ฟิล์มมีความหนา 131 นาโนเมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงาน AR coating ซึ่งเตรียมด้วยวิธีระเหยสารพบว่ามีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จากรายงานอ้างอิงที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกันและมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีสปัตเตอริง ดังภาพที่ 4.32

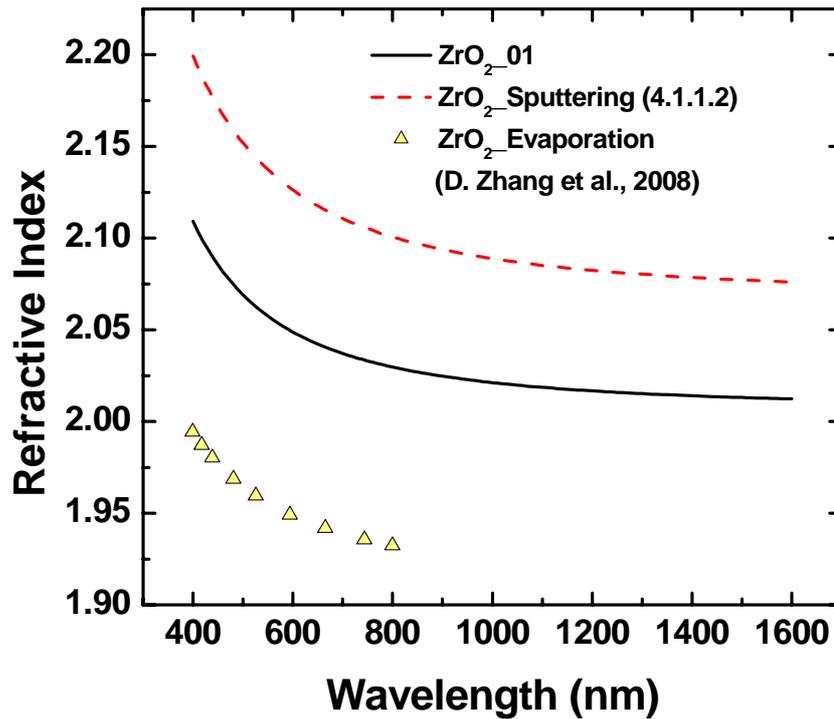
ภาพที่ 4.32

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงระหว่างความยาวคลื่น 400-1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกซ์ลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบบน Monitor glass โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการคอว์ชี (Cauchy equation)



ภาพที่ 4.33

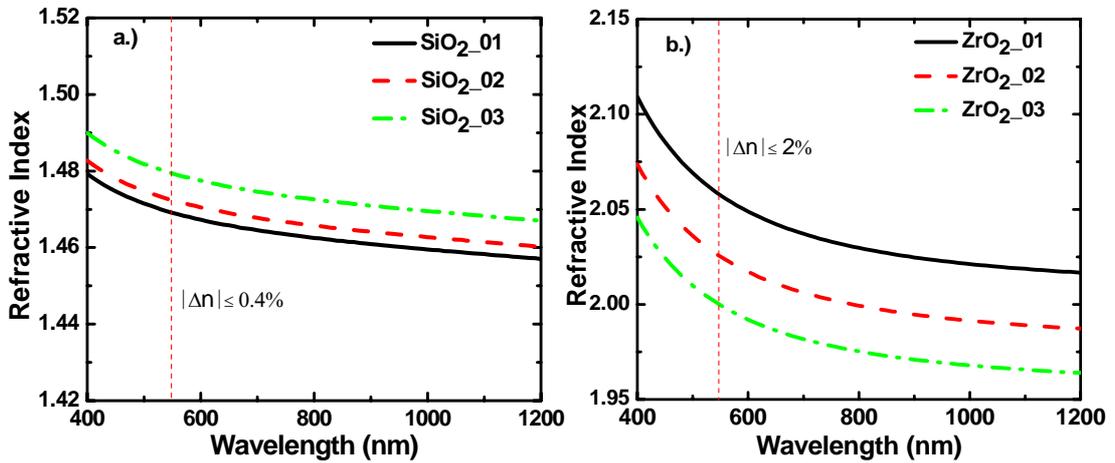
เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้นบน Monitor glass กับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ จากรายงานอ้างอิงที่เตรียมด้วยวิธีระเหยสารและวิธีสปัตเตอร์



เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เคลือบหนึ่งชั้นจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่อง ดังภาพที่ 4.34 พบว่า ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหเพียง 0.4% ส่วนฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหไม่เกิน 2% และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มดังตารางที่ 4.15 พบว่า ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามมีเปอร์เซ็นต์ค่าความแตกต่างของความหนาสูงสุดไม่เกิน 2% ดังนั้น จะเห็นได้ว่าทั้งความหนาและค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่องมีค่าใกล้เคียงกัน

ภาพที่ 4.34

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่อง a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์  
b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์



ตารางที่ 4.15

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหและความหนาของแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้น  
จากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่อง

Coater No.	SiO <sub>2</sub>		ZrO <sub>2</sub>	
	d(nm)	n at 550 nm	d(nm)	n at 550 nm
1.	226.1	1.4691	119.9	2.0574
2.	232.4	1.4724	125.6	2.0251
3.	235.9	1.4794	130.9	1.9996

### 4.3.3 การวิเคราะห์ฟิล์มบาง 5 ชั้น

ในการวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง 5 ชั้น จะพิจารณาจากการสร้างแบบจำลองที่เกิดจากการนำค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบ 1 ชั้น บน Monitor glass มาทำการสลับชั้นเป็นจำนวนทั้งหมด 5 ชั้น โดยแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับฟิล์มบาง 5 ชั้น เกิดจากการแบบจำลองที่สามารถวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหในแต่ละชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ

เป็นฟิล์ม 5 ชั้น ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบบน Monitor glass 1 ชั้น โดยแบบจำลองที่นำมาใช้วิเคราะห์มีทั้งหมดด้วยกัน 4 แบบ ดังภาพที่ 4.35 แสดงแบบจำลองของฟิล์ม 5 ชั้น ซึ่งเกิดจากสมมติฐานว่า

a.) m1 ในกระบวนการเคลือบฟิล์มสามารถเคลือบทั้งฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ได้อย่างเสถียร (Stable) ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองจึงทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มชนิดเดียวกัน นั่นหมายความว่า ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบในชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า จะมีค่าดัชนีหักเหเหมือนกัน และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบในชั้นที่สองและชั้นที่สี่มีค่าดัชนีหักเหเหมือนกัน

b.) m2 ในกระบวนการเคลือบฟิล์มสามารถเคลือบฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ได้อย่างเสถียร จึงทำการ Couple ชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ ส่วนชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์นั้นอาจมีความไม่เสถียรในการเคลือบ ซึ่งอาจส่งผลให้แต่ละชั้นของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

c.) m3 ในกระบวนการเคลือบฟิล์มสามารถเคลือบฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ได้อย่างเสถียร จึงทำการ Couple ชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ส่วนชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์นั้นอาจมีความไม่เสถียรในการเคลือบ ซึ่งอาจส่งผลให้แต่ละชั้นของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

d.) m4 ในกระบวนการเคลือบฟิล์มไม่สามารถเคลือบทั้งฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ให้มีความเสถียร ดังนั้นฟิล์มแต่ละชั้นอาจมีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

ภาพที่ 4.35

แบบจำลองฟิล์มบาง 5 ชั้น สำหรับเคลือบป้องกันการสะท้อนแสง



a.) m1

b.) m2

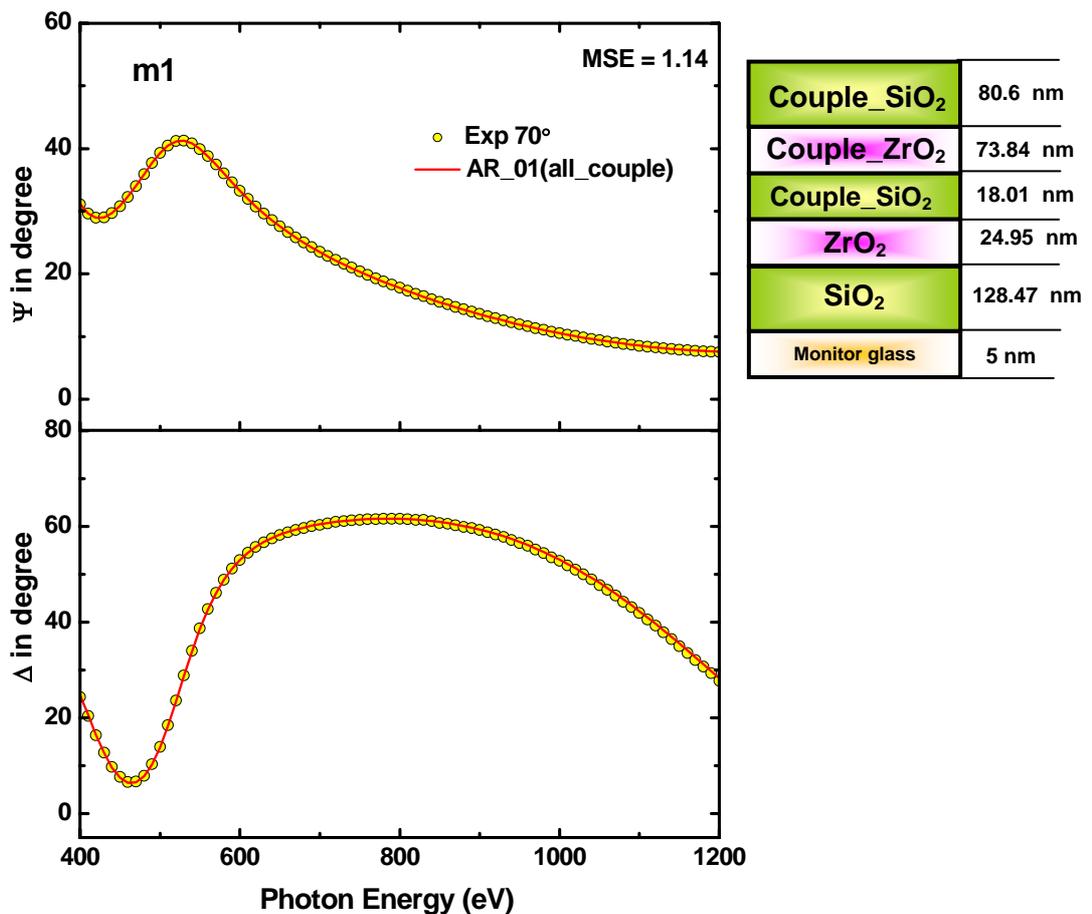
c.) m3

d.) m4

ภาพที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบค่า ( $\Psi$ ,  $\Delta$ ) จากการสร้างแบบจำลอง m1 (ภาพที่ 4.35a) กับผลการวัด พบว่าสามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า MSE เท่ากับ 1.14 ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า มีค่าเท่ากับ 128.47 18.01 และ 80.6 นาโนเมตร ตามลำดับ และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ชั้นที่สองและชั้นที่สี่มีค่าเท่ากับ 24.95 และ 73.84 นาโนเมตร ตามลำดับ

ภาพที่ 4.36

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของตัวอย่างฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยการ Couple ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

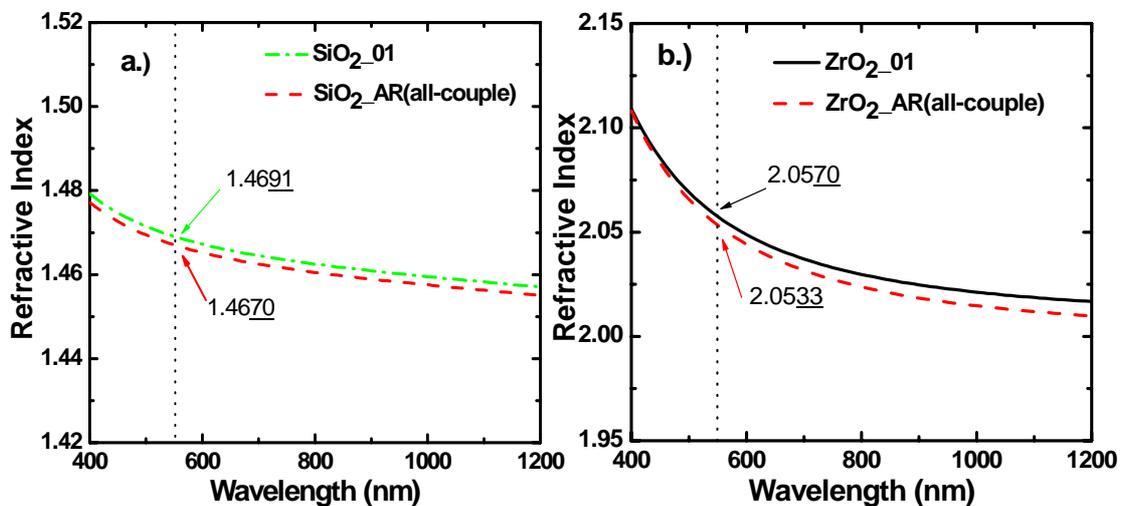


เมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในฟิล์มบาง 5 ชั้น กับฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น พบว่า ค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีความแตกต่างเพียง 0.002 ดังภาพที่ 4.37a.) เช่นเดียวกับ ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในระบบฟิล์ม 5 ชั้น มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น โดยมีความแตกต่างกันเพียง 0.004 ดังภาพที่ 4.37b.) ดังนั้น แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองหนึ่งที่สามารถนำมาใช้หาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง 5 ชั้น เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของทั้งฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น

ภาพที่ 4.37

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยทำการ Couple ทั้งค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

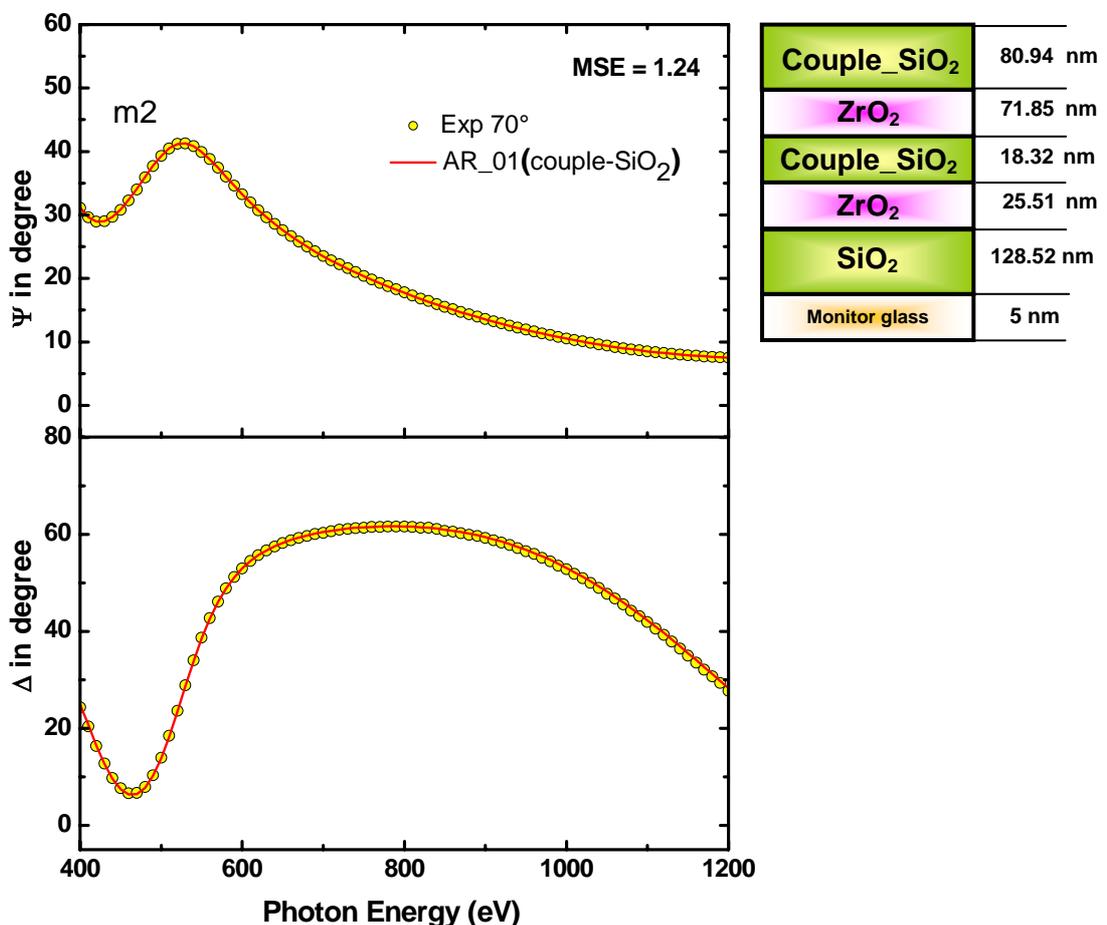


เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $(\Psi, \Delta)$  จากการสร้างแบบจำลอง m2 ซึ่งทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหเฉพาะชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ (ภาพที่ 4.35b) กับผลการวัด ดังภาพที่ 4.38 พบว่า สามารถทำการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้ดีเช่นเดียวกับแบบจำลองแรก โดยมีค่า MSE เท่ากับ 1.24 ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า มีค่าเท่ากับ 128.53 18.32 และ 80.94 นาโนเมตร ตามลำดับ และความหนาของฟิล์ม

เซอริโคเนียมไดออกไซด์ชั้นที่สองและชั้นที่สี่มีค่าเท่ากับ 25.51 และ 71.85 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ของฟิล์ม 5 ชั้นกับฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ของฟิล์ม 1 ชั้น พบว่า มีค่าดัชนีหักเหเท่ากัน ดังภาพที่ 4.39 a.) โดยค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบเป็นชั้นที่สองและชั้นที่สี่ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น มีค่าเท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์ม 1 ชั้น ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.39 b.) พบว่ามีค่าใกล้เคียง โดยมีค่าแตกต่างกันเพียง 0.001 ดังนั้น จะเห็นได้ว่า แบบจำลองนี้ก็เป็นแบบจำลองหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น

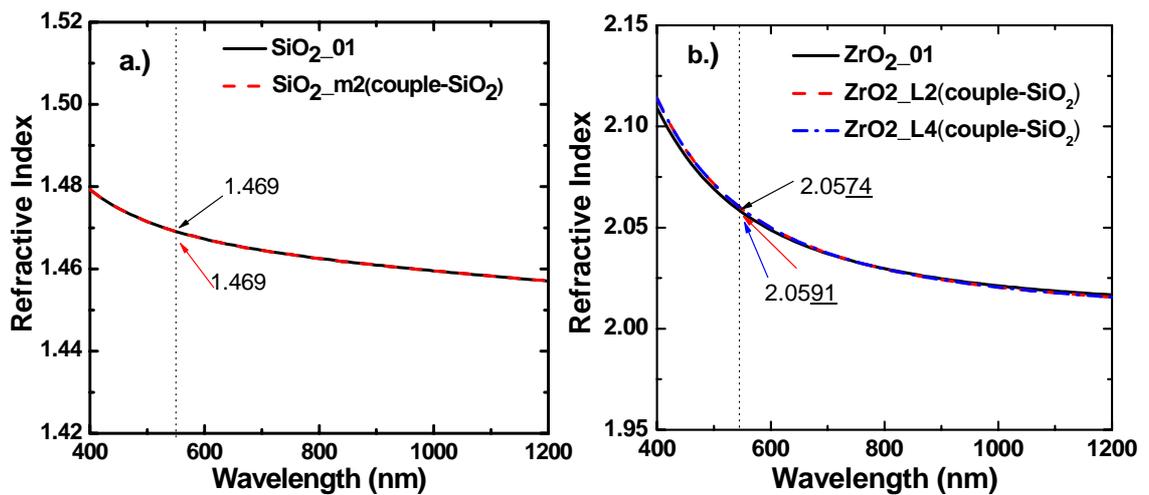
ภาพที่ 4.38

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงระหว่างในช่วงความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบาง 5 ชั้น จากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยทำการcouple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์



ภาพที่ 4.39

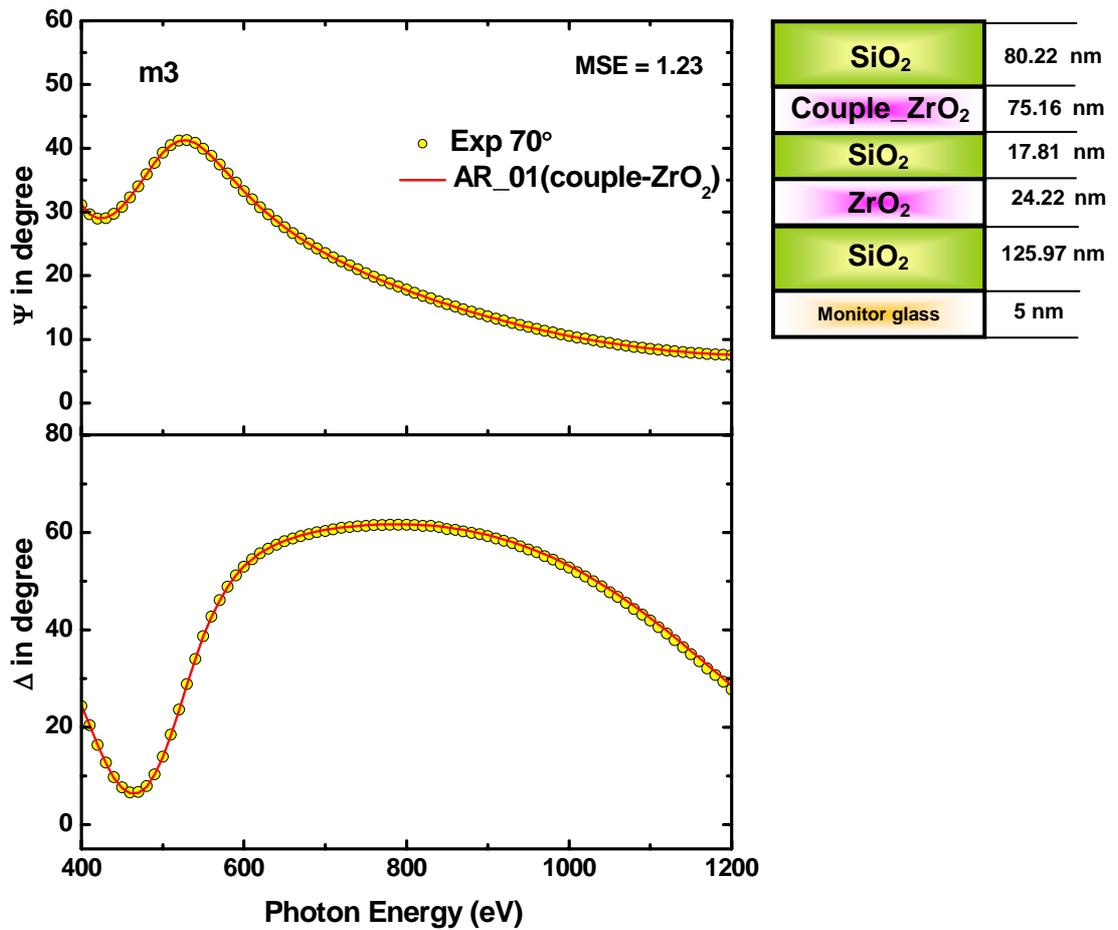
เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์



เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า ( $\Psi, \Delta$ ) จากการสร้างแบบจำลอง m3 (4.35c) กับผลการวัด ซึ่งทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหเฉพาะชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ดังภาพที่ 4.40 พบว่า สามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เป็นอย่างดี มีค่า MSE เท่ากับ 1.23 ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า มีค่าเท่ากับ 125.97 17.81 และ 80.22 นาโนเมตร ตามลำดับ และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ชั้นที่สอง และชั้นที่สี่มีค่าเท่ากับ 24.22 และ 75.16 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อสังเกตค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบในชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า กับฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ 1 ชั้น ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร พบว่า ค่าดัชนีหักเหมีความแตกต่างกันถึง 0.02 ดังภาพที่ 4.41 a.) ส่วนความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ 1 ชั้น กับฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในชั้นฟิล์มบาง 5 ชั้น มีค่าเท่ากับ 0.004 ซึ่งเป็นค่าดัชนีหักเหที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.41 b.) ดังนั้นแบบจำลองนี้ไม่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มที่ทำการเคลือบ 5 ชั้น เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในชั้นฟิล์ม 5 ชั้น มีค่าแตกต่างจากค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น

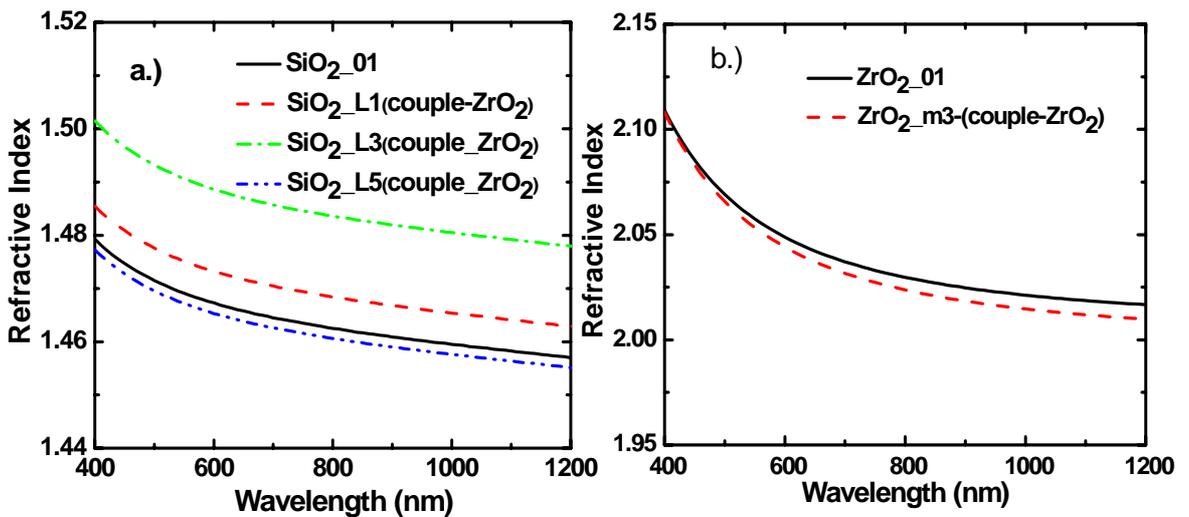
ภาพที่ 4.40

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอีลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 4.41

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

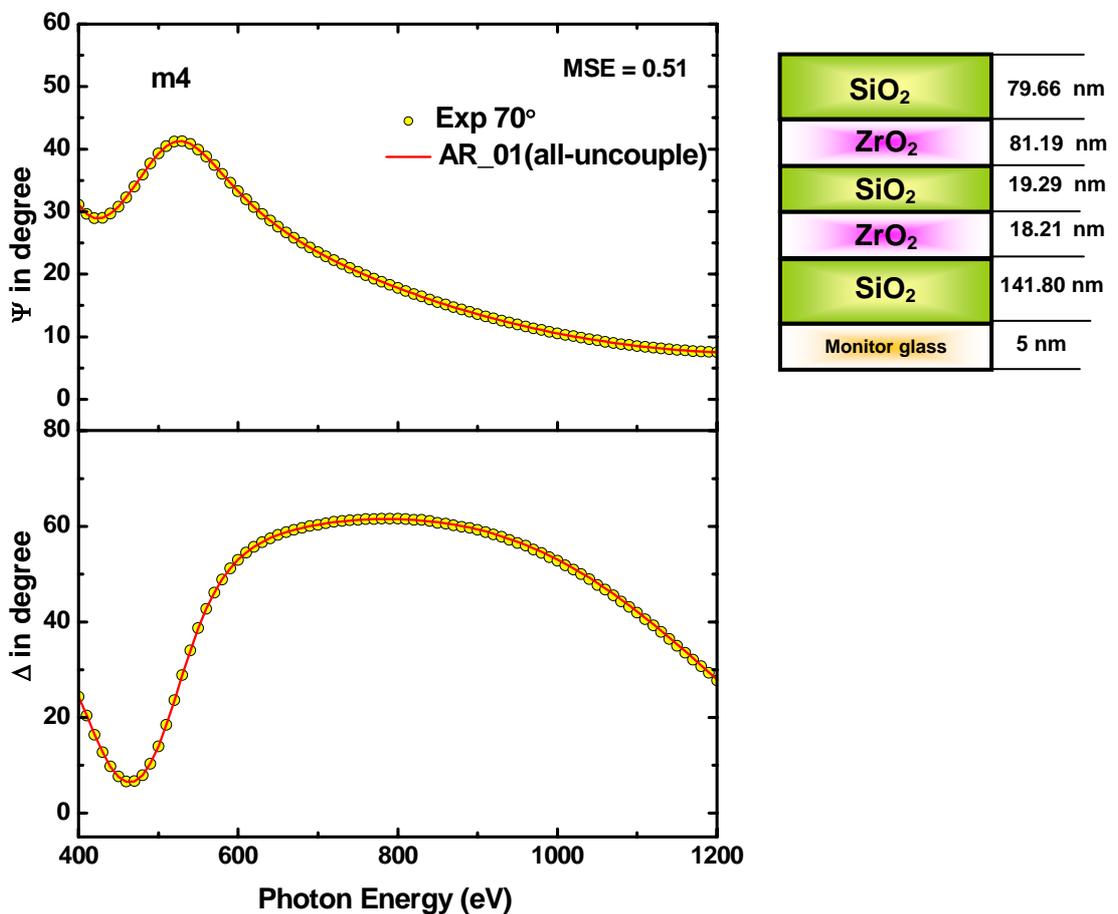


จากผลการเปรียบเทียบค่า ( $\Psi, \Delta$ ) ที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง m4 (ภาพ 4.35d) กับผลการวัด ซึ่งได้จากแบบจำลองที่ไม่ทำการ Couple ทั้งค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ดังภาพที่ 4.42 พบว่าสามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า MSE ต่ำสุด เท่ากับ 0.51 ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า มีค่าเท่ากับ 141.80 19.29 และ 79.66 นาโนเมตร ตามลำดับ และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ชั้นที่สองและชั้นที่สี่มีค่าเท่ากับ 18.21 และ 81.19 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น กับฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้นที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.43 a.) พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในแต่ละชั้นฟิล์มมีความแตกต่างกัน 0.095 ซึ่งถือว่าค่าดัชนีหักเหในแต่ละชั้นฟิล์มมีความแตกต่างกันอย่างมาก และเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ 1 ชั้น กับฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในชั้นฟิล์ม 5 ชั้น พบว่ามีค่าแตกต่างกันถึง 0.028 ดังภาพที่ 4.43 b.) ดังนั้น แบบจำลองนี้เป็นอีกแบบจำลองหนึ่งที่ไม่มีความเหมาะสมเพื่อทำการ

วิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์ม 5 ชั้น เนื่องจากมีความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำการเคลือบ 1 ชั้นและในชั้นของฟิล์มบาง 5 ชั้น

ภาพที่ 4.42

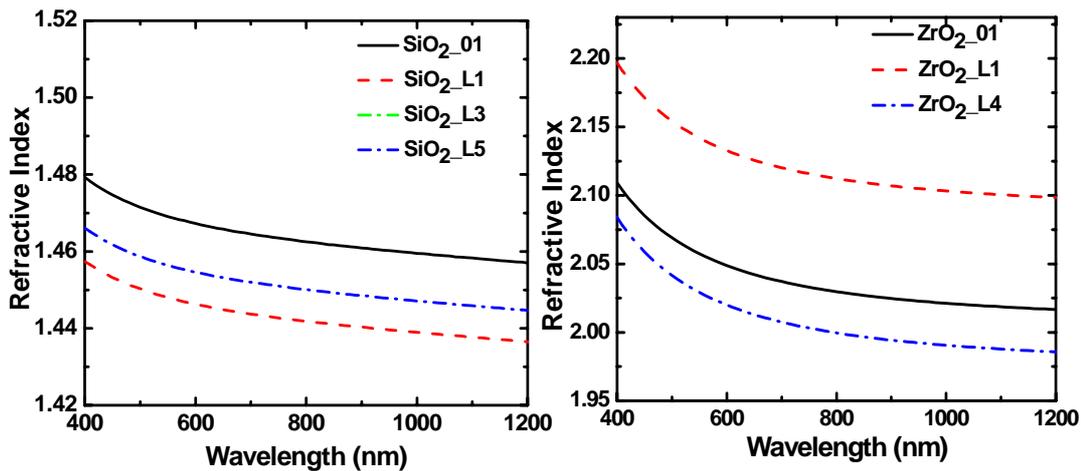
เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ( $\Psi$ ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส ( $\Delta$ ) ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอีลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม 5 ชั้น ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างจากแบบจำลองด้วยการไม่ Couple ค่าดัชนีหักเหทั้งฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียไดออกไซด์



ภาพที่ 4.43

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยไม่ทำการ Couple ทั้งค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

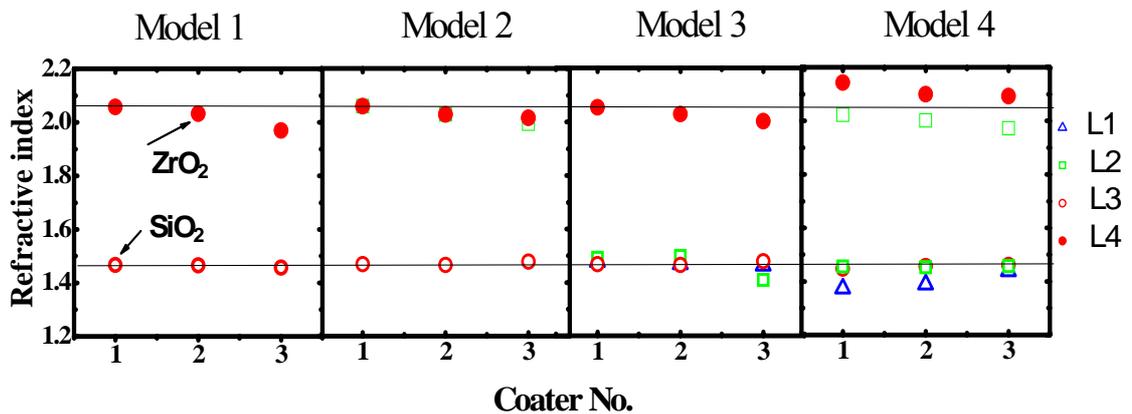


จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มจากการใช้แบบจำลองทั้ง 4 แบบ พบว่า แบบจำลอง m1 ซึ่งทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มชนิดเดียวกันในแต่ละชั้นฟิล์ม และแบบจำลอง m2 ซึ่งทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหเฉพาะชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสม แต่ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาโดยละเอียด พบว่า แบบจำลอง m2 นั้นมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้นกับชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในระบบฟิล์ม 5 ชั้น มีค่าเท่ากัน และค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ 1 ชั้น ก็มีค่าใกล้เคียงกับชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในระบบฟิล์ม 5 ชั้น

หลังจากทดลองหาแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมในการหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของระบบฟิล์ม 5 ชั้นที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 1 แล้ว จึงทำการทดลองหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับระบบฟิล์ม 5 ชั้นที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 2 และเครื่องเคลือบที่ 3 โดยภาพที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทั้ง 4 แบบ โดยสังเกตเห็นได้ว่า แบบจำลองที่ 2 เป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของระบบฟิล์ม 5 ชั้น ที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบทั้ง 3 เครื่องเนื่องจากค่าดัชนีหักเหของฟิล์มชนิดเดียวกันในแต่ละชั้นฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน

ภาพที่ 4.44

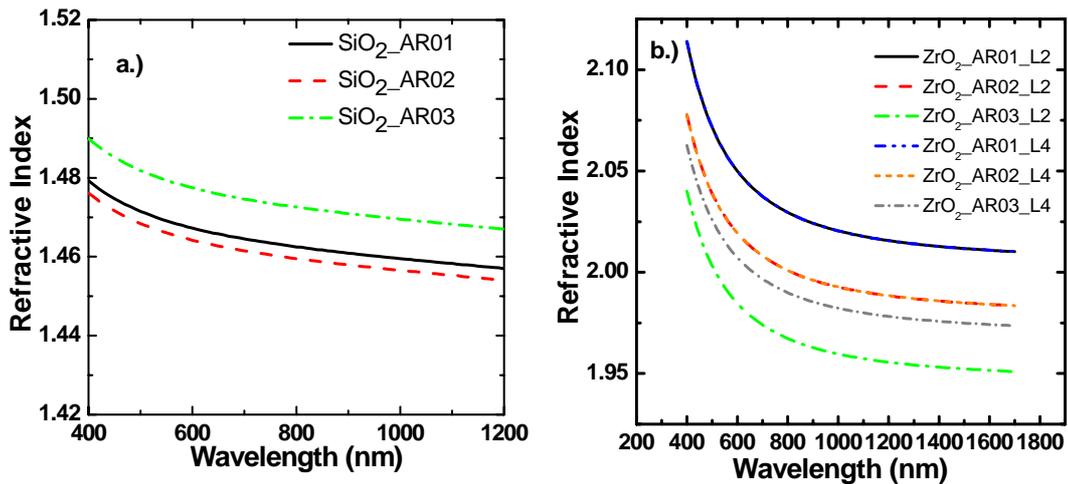
เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ใน  
ระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น จากการสร้างแบบจำลองทั้ง 4 แบบ



เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้ง 3 เครื่อง ที่ทำการวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ 2 ดังภาพที่ 4.44 พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์จากเครื่องเคลือบที่ 1 และเครื่องเคลือบที่ 2 มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงมากกว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 3 แสดงดังภาพที่ 4.45a.) สำหรับภาพที่ 4.45b.) แสดงค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบทั้งสามเครื่อง มีค่าดัชนีหักเหไม่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ที่เคลือบจากเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2 มีค่าดัชนีหักเหเท่ากัน ซึ่งแตกต่างจากฟิล์มเซอร์โคเนียมชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 3 ที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน ดังนั้น เมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของระบบฟิล์ม 5 ชั้น จะพบว่าเครื่องเคลือบที่ 3 มีค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่แตกต่างจากเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 1 และเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 2

ภาพที่ 4. 45

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำกร Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม ซิลิกอนไดออกไซด์จากเครื่องเคลือบที่ 1 (AR\_01) เครื่องเคลือบที่ 2 (AR\_02) และเครื่องเคลือบที่ 3 (AR\_03) โดย a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมชั้นที่สอง (L2) และชั้นที่สี่ (L4)



ตารางที่ 4.16 แสดงความหนาในแต่ละชั้นฟิล์มของระบบฟิล์ม 5 ชั้น ที่ทำการเคลือบฟิล์มด้วยเครื่องเคลือบทั้ง 3 พบว่า ความหนาในแต่ละชั้นฟิล์มและความหนาโดยรวมจากเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 3 มีความหนาที่แตกต่างจากความหนาในแต่ละชั้นฟิล์มและความหนาโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 4.46 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความหนา โดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความหนาจากเครื่องเคลือบที่สามมีความของชั้นฟิล์มที่ 2 และชั้นฟิล์มที่ 5 มีค่าสูงกว่าฟิล์มที่ทำกรเคลือบฟิล์มจากเครื่องเคลือบที่ 1 และเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 2 ได้อย่างชัดเจน ดังนั้น ในการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องเคลือบฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของแต่ละชั้นฟิล์ม พบว่าเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 3 น่าจะมีปัจจัยที่ส่งฟิล์ม 5 ชั้น มีค่าดัชนีหักเหและความหนาที่แตกต่างจากฟิล์มที่ทำกรเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 1 และเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 2

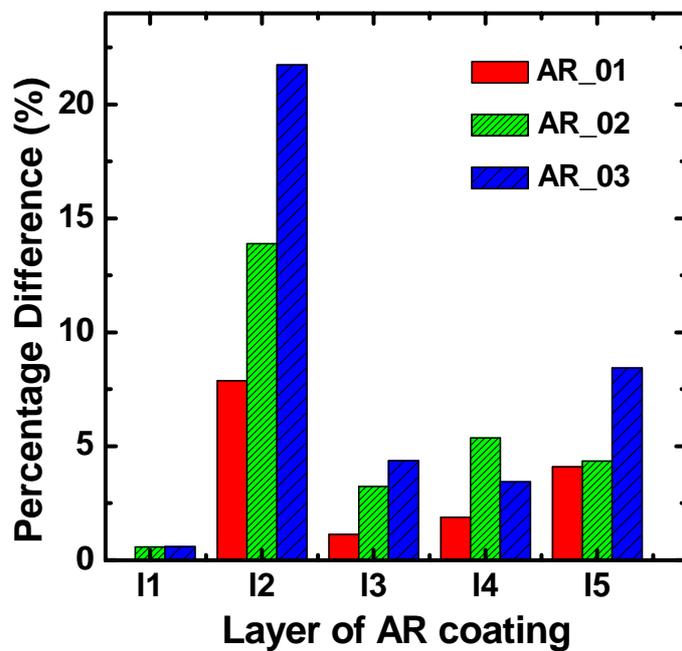
ตารางที่ 4.16

เปรียบเทียบความหนาแต่ละชั้นฟิล์มในระบบฟิล์ม 5 ชั้น ที่เคลือบฟิล์ม  
จากเครื่องเคลือบทั้ง 3 เครื่อง

Coater No.	Films Thickness (nm)					Total
	SiO <sub>2</sub> _L1	ZrO <sub>2</sub> _L2	SiO <sub>2</sub> _L3	ZrO <sub>2</sub> _L4	SiO <sub>2</sub> _L5	
AR_01	128.53	25.51	18.32	71.85	80.93	325.15
AR_02	127.84	23.84	17.30	77.13	80.72	327.49
AR_03	129.33	33.71	19.34	70.71	91.51	344.61

ภาพที่ 4.46

เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความหนาของฟิล์ม 5 ชั้นที่ทำจากเคลือบจากเครื่อง  
เคลือบฟิล์มเครื่องที่ 1 (AR\_01) เครื่องที่ 2 (AR\_02) และเครื่องที่ 3 (AR\_03)



ทั้งนี้ การตรวจสอบคุณภาพของฟิล์ม 5 ชั้น เพื่อป้องกันการสะท้อนแสงนั้น จะพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง ดังภาพที่ 4.47 a.) พบว่า สเปกตรัมค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มจากเครื่องเคลือบเครื่องที่ 3 มีความแตกต่างเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2 แต่เนื่องจากฟิล์ม 5 ชั้น ถูกนำมาใช้งานในช่วงตามองเห็น จะพิจารณาเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านเฉลี่ยในช่วงตามองเห็น ดังภาพที่ 4.47 b.) พบว่า ฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้ง 3 เครื่องมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นและค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ใกล้เคียงกัน ซึ่งในส่วนของ การนำฟิล์ม 5 ชั้น มาใช้งานเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงนั้นฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 3 ก็ยังคงสามารถมีประสิทธิภาพในการป้องกันการสะท้อนแสงได้ดีเทียบเท่ากับฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 1 และเครื่องเคลือบที่ 2

ภาพที่ 4.47

เปรียบเทียบการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง 5 ชั้น จากเครื่องเคลือบที่ 1 (AR\_01) เครื่องเคลือบที่ 2 (AR\_02) และเครื่องเคลือบที่ 3 (AR\_03) a.) สเปกตรัมเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสง  
 b.) เปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นและเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

