

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นผลการทดลองของการเคลือบฟิล์ม ZnO บนกระจก ด้วยวิธี MOCVD เพื่อใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งแสงนำไฟฟ้า ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มจากศึกษาคุณสมบัติของกระจกเคลือบ SnO₂:F ของบริษัท NSG ประเทศญี่ปุ่น เป็นกระจก TCO ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน หลังจากนั้นทดลองเคลือบฟิล์ม ZnO บนกระจก โดยศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือโดโบเรน (B₂H₆) ที่ 0 sccm ถึง 20 sccm แล้วนำปริมาณสารเจือที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการทดลองและศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 100°C ถึง 200°C ที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์ม ZnO คือ คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้า และโครงสร้างจุลภาคของผลึก แล้วนำเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม ZnO ไปใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจก SnO₂:F

4.1 ศึกษาคุณสมบัติของกระจก SnO₂:F

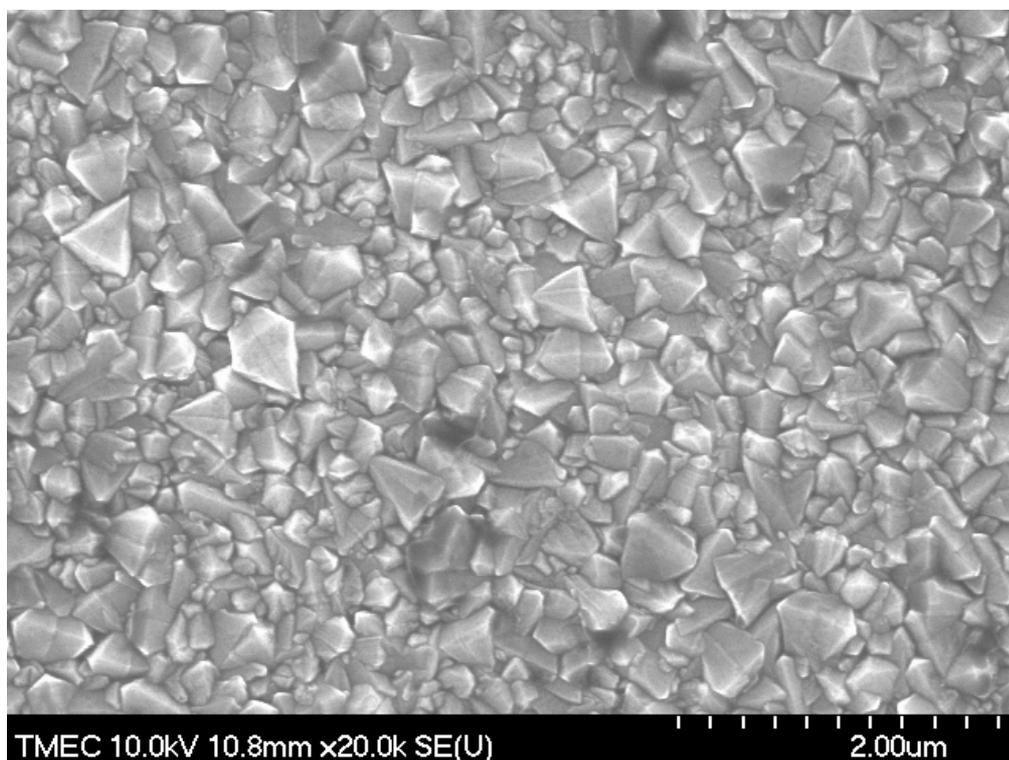
กระจก SnO₂:F ที่ใช้เป็นฐานรองในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ที่นิยมใช้กันจะใช้ของบริษัท NSG ของญี่ปุ่น เมื่อมองด้วยตาเปล่า จะมีสีขาวขุ่น มีลักษณะสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น แสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1

ภาพกระจก SnO₂:F ที่นิยมใช้เป็นกระจก TCO ของบริษัท NSG

ผลการศึกษารูปภาพถ่ายพื้นผิวของกระจก SnO₂:F จากเครื่อง SEM แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะเป็นผลึก มีขนาดของเกรนผลึกหลายขนาด เรียงตัวกันอย่างไม่สม่ำเสมอ

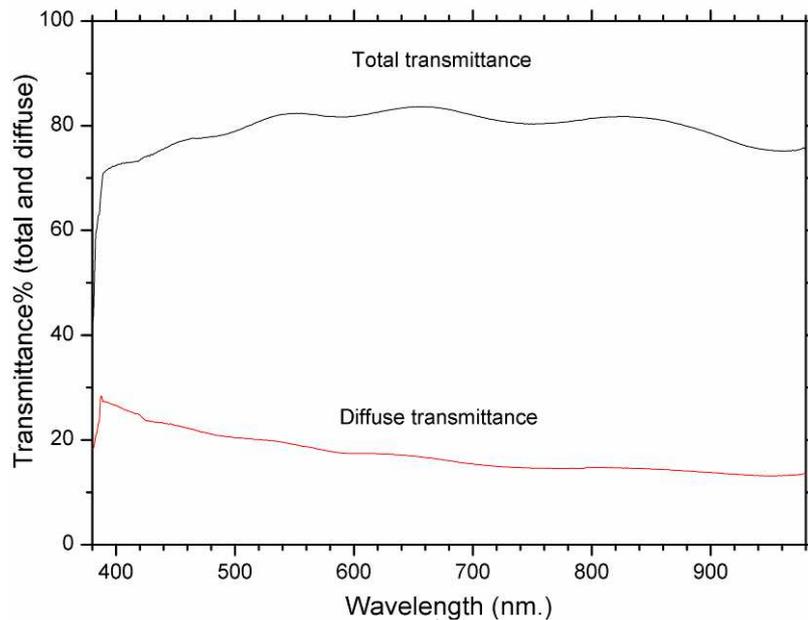


ภาพที่ 4.2

ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 20000 เท่าของผลึก SnO₂:F บนกระจกบริษัท NSG

วัดคุณสมบัติของกระจก SnO₂:F ด้วยเครื่อง Step profile เพื่อวัดค่าความหนาของฟิล์มได้ 8,595 Å และวัดค่าความขรุขระของฟิล์มได้ 14.46 nm. วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Four point probe มีค่าความต้านทานแผ่น 12.95 ohm.sq และคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ 1.11×10^{-3} ohm.cm

สำหรับคุณสมบัติทางแสงของกระจก TCO ในการนำไปใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด จะอยู่ที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 550 นาโนเมตร ซึ่งตัวอย่างกระจก SnO₂:F วัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมได้ 82.33% และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายได้ 19.15% ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.3 ซึ่งคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวได้ 6.85%



ภาพที่ 4.3

กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมและกระจาย
ในช่วงความยาวคลื่น 380-980 nm. ของกระจก SnO₂:F

จากผลการศึกษาคูณสมบัติต่างๆของกระจก SnO₂:F สามารถสรุปรวมดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

แสดงผลการศึกษาคูณสมบัติของกระจก SnO₂:F

คุณสมบัติ	ค่า
ความหนาฟิล์ม (Thickness)	8,595 Å ^o
ความขรุขระ (Roughness: R _{rms})	14.46 nm.
ค่าความต้านทานแผ่น (Sheet resistance)	12.95 ohm/sq
ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)	1.11 x10 ⁻³ ohm.cm
ค่าการส่งผ่านแสงรวม (%Total transmittance) ที่ความยาวคลื่น 550 nm.	82.33 %
ค่าการส่งผ่านแสงกระจาย(%Diffuse transmittance) ที่ความยาวคลื่น 550 nm.	19.15%
ค่าความขุ่นมัว (%Haze) ที่ความยาวคลื่น 550 nm.	6.85 %

4.2 ผลการทดลองที่ 1 ศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเจือโดโบเรน (B_2H_6) ที่มีต่อโครงสร้างผลึก คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสง ของฟิล์ม ZnO

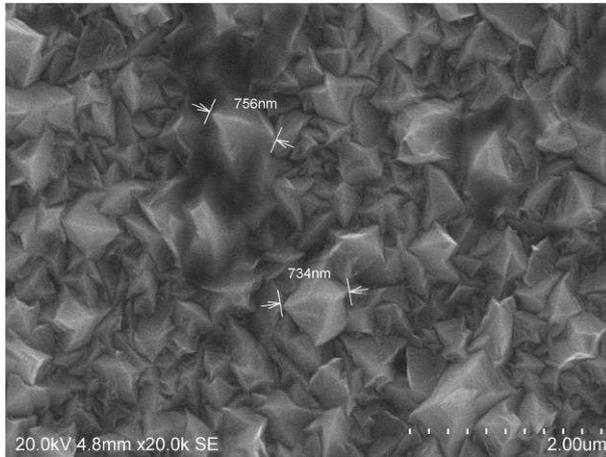
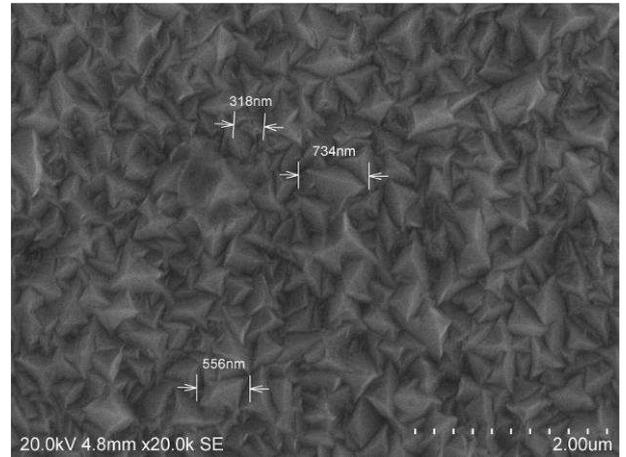
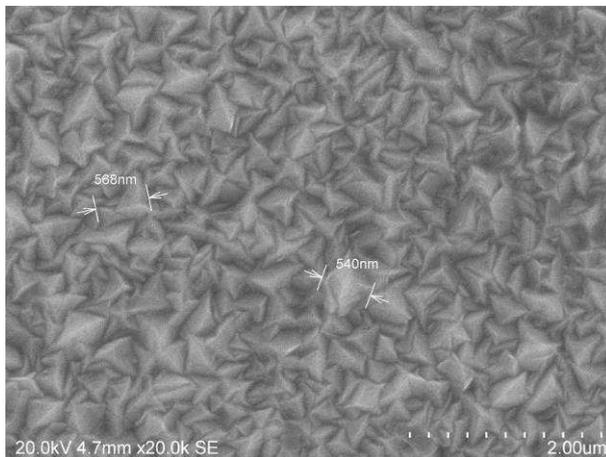
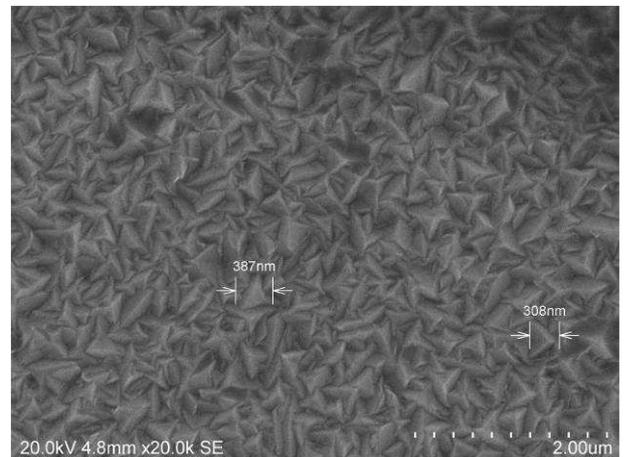
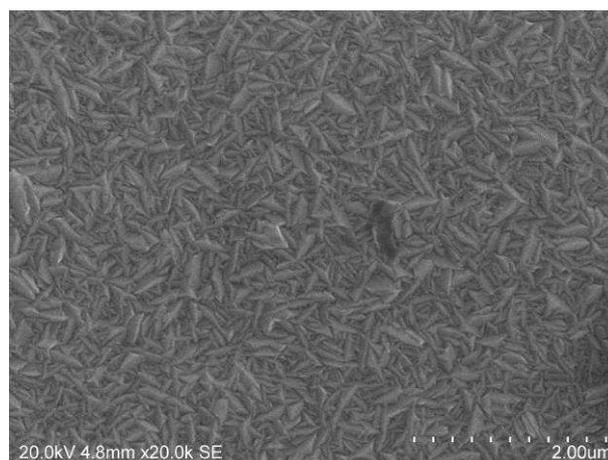
ในการทดลองนี้จะควบคุมปริมาณของก๊าซอาร์กอน (Ar) ซึ่งใช้เป็นก๊าซพาหะของสารตั้งต้น ไดเอทิลซิงค์ (DEZ) และน้ำ (H_2O) ให้คงที่ที่ 50 sccm และ 80 sccm ตามลำดับ ความดันภายในห้องเคลือบสุญญากาศ 300 มิลลิทอร์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการสร้างฟิล์มที่ $180^\circ C$ คงที่ทุกการทดลอง สารเจือที่ใช้ คือ ก๊าซโดโบเรน (B_2H_6) โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือเป็น 0 sccm, 5 sccm, 10 sccm, 15 sccm และ 20 sccm ตามลำดับ โดยทุกตัวอย่างการทดลองใช้เวลาในการเคลือบ 15 นาที

4.2.1 ผลกระทบของปริมาณสารเจือ B_2H_6 ที่มีต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ZnO

การวิเคราะห์ภาพถ่ายของผลึกฟิล์ม ZnO:B ด้วยเครื่อง SEM

จากการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO มาวิเคราะห์ผลของการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่มีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์ม โดยการนำไปวัดด้วยเครื่อง SEM เพื่อดูลักษณะของพื้นผิว จากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 20000 เท่า จะเห็นได้ว่าลักษณะการเกิดฟิล์ม ZnO นั้นมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการเติมสารเจือ เมื่อไม่มีการเติมสารเจือ B_2H_6 ผลึกจะมีเกรนขนาดใหญ่ ประมาณ 750 นาโนเมตร และเกรนขนาดเล็กแทรกอยู่ระหว่างเกรนขนาดใหญ่ เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (ภาพที่ 4.4 ก) เมื่อเติมสารเจือปริมาณ 5 sccm เกรนของผลึกจะมีขนาดเล็กลง ประมาณ 300-700 นาโนเมตร และเริ่มมีขนาดเกรนใกล้เคียงกัน แต่ก็ยังมีผลึกหลายขนาดปะปนกันอยู่ (ภาพที่ 4.4 ข)

ส่วนที่ปริมาณสารเจือ 10 sccm การเกิดผลึกจะมีลักษณะที่มีรูปร่างชัดเจน ขนาดเกรนประมาณ 550 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น การเรียงตัวกันเป็นระเบียบ มีลักษณะเป็นรูปทรงพีระมิด (ภาพที่ 4.4 ค) เมื่อเพิ่มสารเจือเป็น 15 sccm ได้ผลการทดลองใกล้เคียงกับการเติมสารเจือ 10 sccm แต่ผลึกจะมีรูปทรงพีระมิดที่ยอดแหลมขึ้น เกรนเล็กลง มีขนาดประมาณ 300 นาโนเมตร (ภาพที่ 4.4 ง) และสุดท้ายเมื่อเติมสารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 20 sccm ผลึกจะมีรูปทรงเล็กเรียวย ค่อยๆ เมล็ดข้าว (ภาพที่ 4.4 จ)

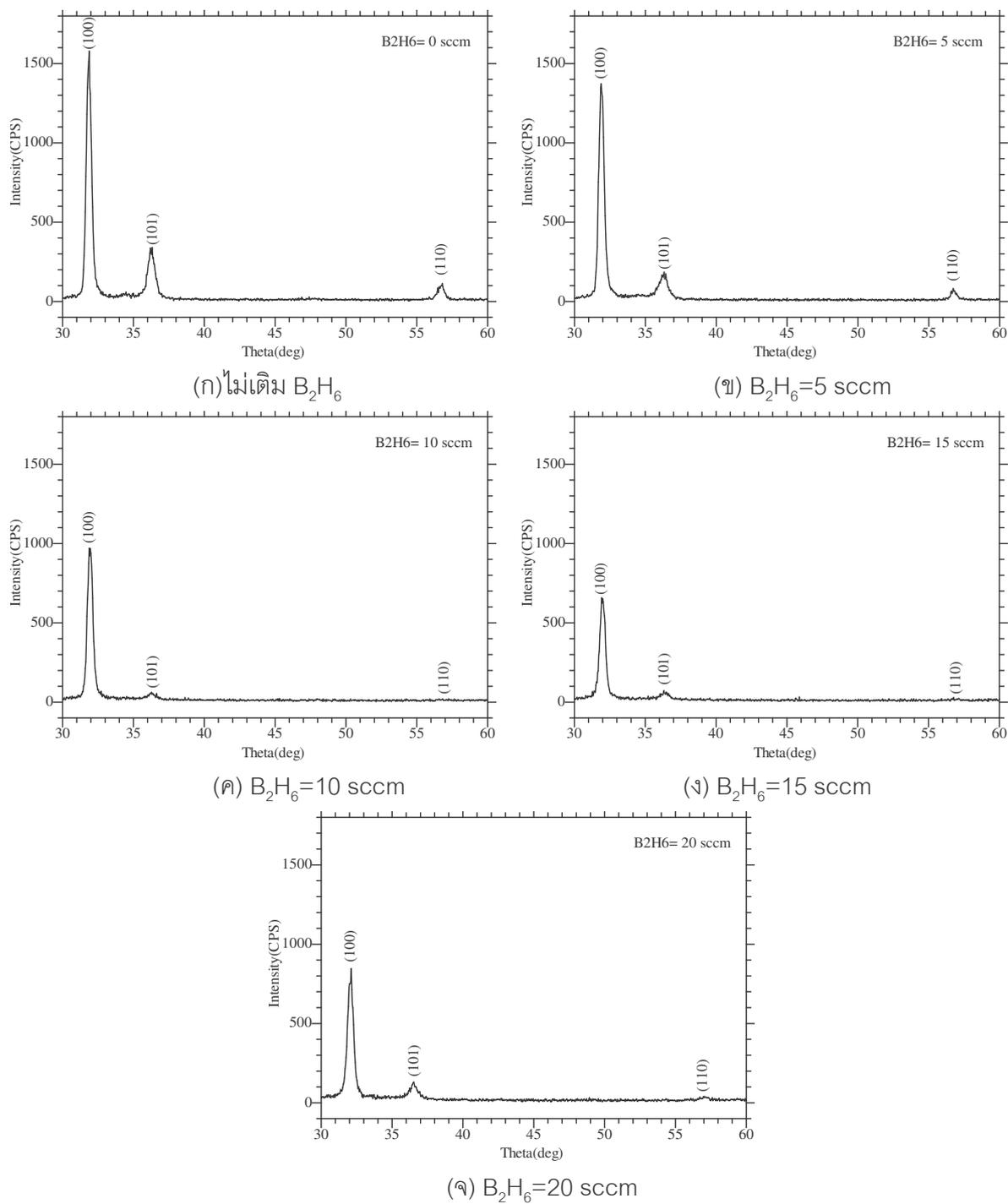
(ก) ไม่เติม B_2H_6 (ข) $B_2H_6=5$ sccm(ค) $B_2H_6=10$ sccm(ง) $B_2H_6=15$ sccm(จ) $B_2H_6=20$ sccm

ภาพที่ 4.4 (ก-จ)

ภาพถ่ายฟิล์ม ZnO จากเครื่อง SEM กำลังขยาย 20000 เท่า ที่สารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 0-20 sccm

การวิเคราะห์ระนาบและความเป็นผลึกของฟิล์ม ZnO ด้วยเครื่อง XRD

การวิเคราะห์ผลการทดลองของการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่มีผลต่อลักษณะการเกิดฟิล์มระนาบ และการเป็นผลึกของฟิล์ม ZnO ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังภาพที่ 4.5 (ก-จ)



ภาพที่ 4.5 (ก-จ)

ข้อมูลการวัด XRD ของฟิล์ม ZnO ที่สารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 0-20 sccm

จากผลการวัดด้วยเครื่อง XRD แสดงดังภาพที่ 4.5 (ก-จ) พบว่าเมื่อไม่มีการเติมสารเจือ B_2H_6 นั้นฟิล์ม ZnO จะแสดงระนาบ (100), (101) และ (110) ที่มีความเข้มของ spectrum สูงสุด เมื่อมีการเติมสารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 5 sccm, 10 sccm, 15 sccm ความเข้มของ Spectrum ที่ระนาบต่างๆ จะค่อยๆลดลงไปตามลำดับ โดยที่ปริมาณสารเจือ 10 sccm จะมีความเข้ม spectrum ของระนาบ (100) ระนาบเดี่ยวชัดเจนที่สุด และที่การเติมสารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 20 sccm กลับมีความเข้มของ Spectrum ของระนาบ (100), (101) และ (110) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณการเติมสารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 15 sccm

4.2.2 ผลกระทบของปริมาณสารเจือ B_2H_6 ที่มีต่อความหนาของฟิล์ม ZnO

ในการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO มาวิเคราะห์ผลของปริมาณสารเจือ B_2H_6 ที่มีต่อความหนาของฟิล์ม ด้วยเครื่อง Step profile แล้วนำความหนาของฟิล์มมาคำนวณเป็นอัตราการเกิดฟิล์ม ดังสมการ

$$\text{อัตราการเกิดฟิล์ม (Å/sec.)} = \text{ความหนาของฟิล์ม (Å)} / \text{เวลาในการเคลือบฟิล์ม (sec.)}$$

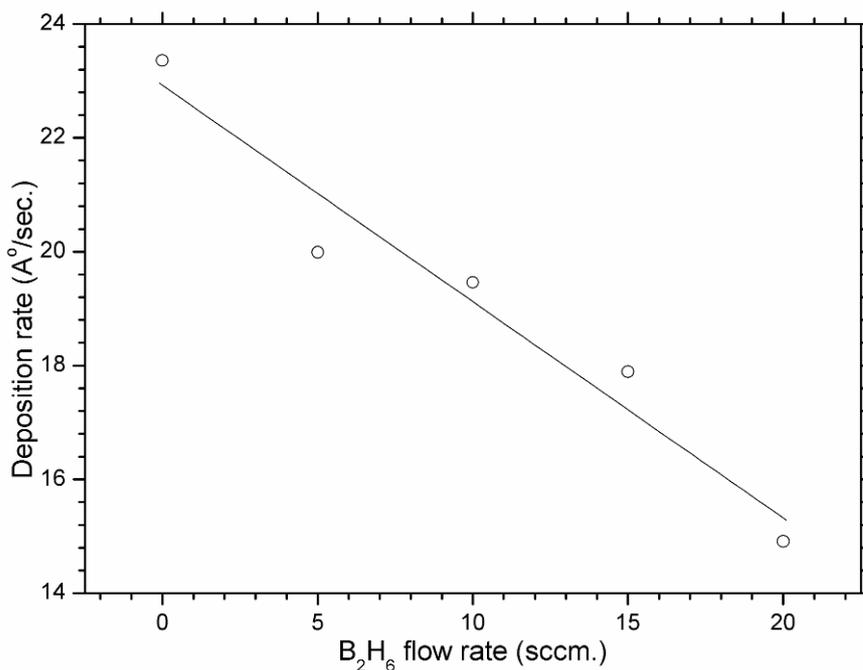
โดยใช้เวลาในการทดลองเคลือบฟิล์มนาน 15 นาที ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2

ผลการวัดค่าความหนาและอัตราการเกิดฟิล์มที่สารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 0-20 sccm เวลาที่ใช้เคลือบ 15 นาที

B_2H_6 (sccm)	Thickness (Å)				Deposition rate (Å/sec.)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย	
0	20987.6	19737.1	22357.5	21027.40	23.36
5	17456.1	17878.5	18631.4	17988.67	19.99
10	17477.1	17673	17385.2	17511.77	19.46
15	16129.9	16414.5	15729.3	16091.23	17.88
20	13485.3	13414.5	13365.8	13421.87	14.91

จากผลการทดลองนำอัตราการเกิดฟิล์ม ที่คำนวณได้จากความหนาของฟิล์ม มาเขียนกราฟแสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6

กราฟแสดงอัตราการเกิดฟิล์ม ZnO ที่สารเจือ B₂H₆ ปริมาณ 0 - 20 sccm

จากภาพที่ 4.6 เมื่อไม่เติมสารเจือ B₂H₆ วัดค่าความหนาเฉลี่ยได้ 21027.40 Å^o คำนวณอัตราการเกิดฟิล์มได้ 23.36 A°/sec. ซึ่งเป็นอัตราการเกิดฟิล์มสูงที่สุด เมื่อเริ่มเติมปริมาณสารเจือ B₂H₆ ที่ 5 sccm, 10 sccm, 15 sccm ตามลำดับ ความหนาของฟิล์มมีค่าลดลง ส่งผลให้อัตราการเกิดฟิล์มมีแนวโน้มลดลง และที่ปริมาณสารเจือ B₂H₆ ที่ 20 sccm วัดค่าความหนาเฉลี่ยได้ 13421.87 Å^o คำนวณเป็นอัตราการเกิดฟิล์มได้ 14.91 A°/sec ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ได้จากการทดลอง

พิจารณาจากผลการวัดความเป็นผลึก ด้วยเครื่อง XRD พบว่าการเติมสารเจือ B₂H₆ ที่เพิ่มมากขึ้น ความเข้มของ spectrum จะลดลง แสดงว่าความเป็นผลึกลดลง เป็นผลให้ฟิล์มมีความหนาลดลง ตามผลของปริมาณการเติมสารเจือ

4.2.3 ผลกระทบของปริมาณสารเจือ B₂H₆ ที่มีต่อความขรุขระของฟิล์ม ZnO:B

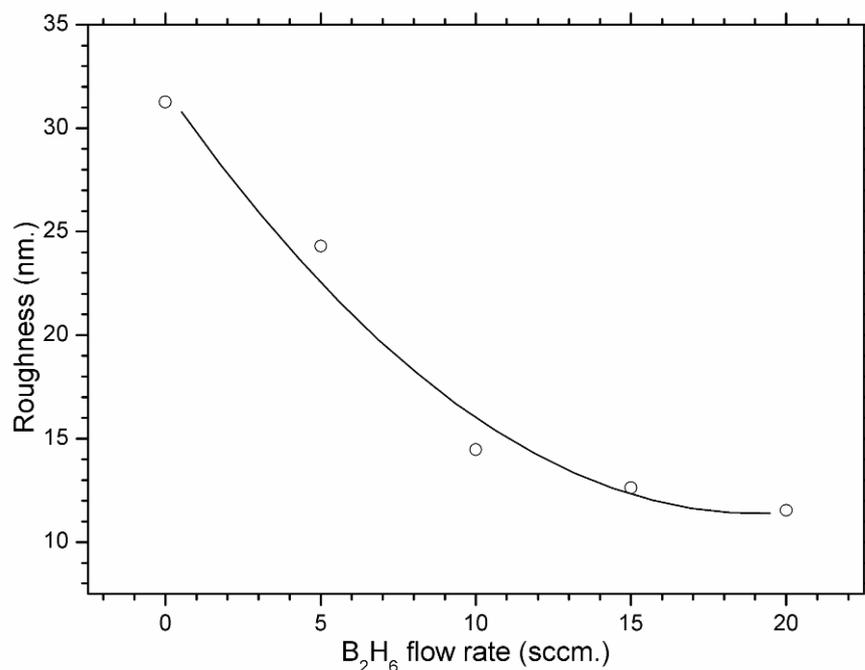
ในการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO มาวิเคราะห์ผลของปริมาณสารเจือ B₂H₆ ที่มีต่อความขรุขระของฟิล์ม เวลาในการทดลองเคลือบฟิล์มนาน 15 นาที แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3

ผลการวัดค่าความขรุขระที่สารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 0-20 sccm

B_2H_6 (sccm)	Roughness (nm.)			
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
0	29.7	32.75	31.35	31.27
5	25.08	28.43	19.38	24.30
10	17.3	15.53	16.29	16.37
15	11.83	12.38	13.65	12.62
20	11.31	10.79	12.53	11.54

ผลการทดลอง การเติมสารเจือ B_2H_6 ต่อค่าความขรุขระ พบว่ากรณีที่ไม่มีเติม B_2H_6 จะมีค่าความขรุขระมากที่สุดอยู่ที่ 31.27 นาโนเมตร เมื่อมีการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่ปริมาณต่างๆ พบว่าฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน มีค่าความขรุขระลดลง และฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน ที่มีปริมาณ 20 sccm จะมีค่าความขรุขระเท่ากับ 11.54 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด แสดงผลดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7

กราฟแสดงค่าความขรุขระของฟิล์ม ZnO ที่สารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 0 - 20 sccm

จากภาพที่ 4.7 เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของสารเจือโดโบเรน อะตอมโบรอนจะทำให้การเคลื่อนที่ของพื้นผิว (Surface mobility) ลดลง ส่งผลให้ความขรุขระของฟิล์ม ZnO มีค่าลดลง และจากภาพถ่าย SEM จะเห็นรูปร่างพื้นผิวของผลึกฟิล์มที่มีขนาดเกรนที่เล็กลง สอดคล้องกับความขรุขระที่ลดลงด้วย

4.2.4 ผลกระทบจากการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO

จากการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO มาวิเคราะห์ผลของการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ซึ่งคำนวณได้จากค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) และ ค่าความหนา (thickness) มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\text{ความต้านทานไฟฟ้า (ohm.cm)} = \text{ความต้านทานแผ่น (ohm/sq)} \times \text{ความหนาของฟิล์ม (cm.)}$$

โดยวัดความต้านทานแผ่นจำนวน 12 ตำแหน่ง คำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4

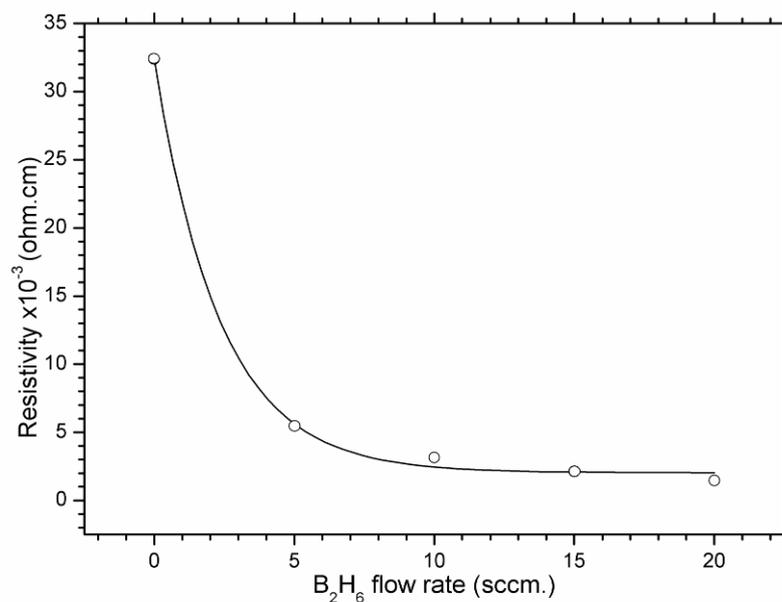
ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 0-20 sccm

B_2H_6 (sccm)	Sheet resistance(ohm/sq)			Thicknes ($^{\circ}A$)	Resistivity $\times 10^{-3}$ (ohm.cm)	
	ตำแหน่งที่ 1-12					
0	219	197	275	154.08	21027.40	32.40
	103	99	136			
	104	91	125			
	169	147	184			
5	67.26	44.84	66.53	32.18	17988.67	5.47
	22.42	15.59	20.95			
	22.17	15.1	19.73			
	34.36	26.8	30.46			
10	35.33	24.85	36.31	17.97	17511.77	3.15
	12.18	9	12.42			
	10.23	7.79	11.24			
	21.2	15.1	19.98			

ตารางที่ 4.4(ต่อ)

B ₂ H ₆ (sccm)	Sheet resistance(ohm/sq)			เฉลี่ย	Thickness (°A)	Resistivity x10 ⁻³ (ohm.cm)
	ตำแหน่งที่ 1-12					
15	24.37	17.54	21.17	13.19	16091.23	2.12
	10.23	9.5	10.96			
	9.74	7.79	10.23			
	13.64	11.69	11.37			
20	18.03	14.62	18.52	10.88	13421.87	1.46
	8.28	8.04	9.01			
	7.79	6.57	7.55			
	11.45	8.77	11.94			

จากผลการทดลอง ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO ที่ไม่มีสารเจือ B₂H₆ มีค่าความต้านทานแผ่น 154.08 ohm/sq และค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 32.40 x 10⁻³ ohm.cm ซึ่งเป็นค่าสูงสุด เมื่อมีการเติมสารเจือ B₂H₆ ที่ปริมาณต่างๆ ปรากฏว่าฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน มีความต้านทานแผ่นและค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง และฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน ที่มีปริมาณ 20 sccm จะมีค่าความต้านทานแผ่น คือ 10.88 ohm/sq. และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 1.46 x 10⁻³ ohm.cm ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด



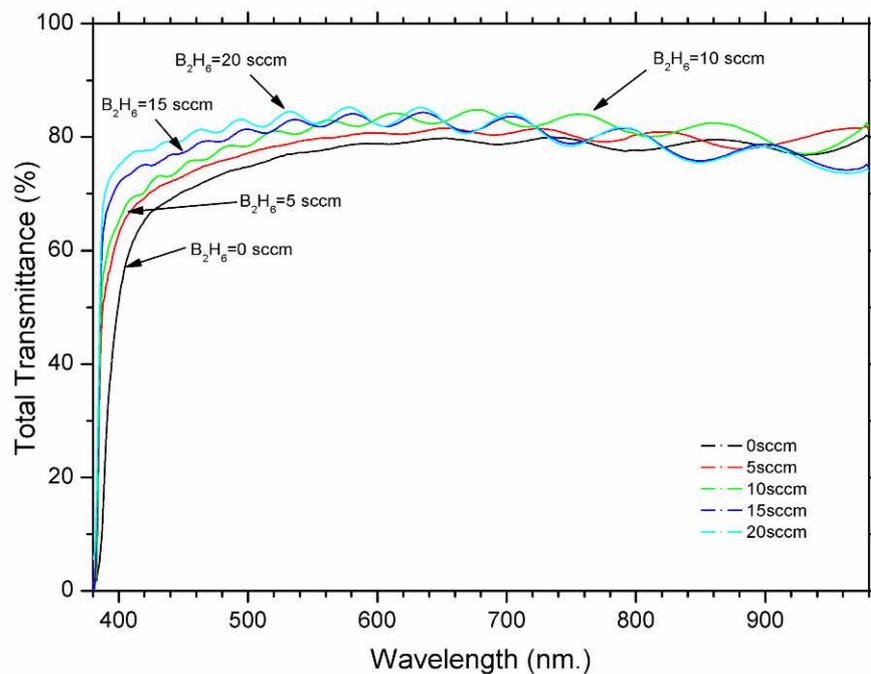
ภาพที่ 4.8

กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO ที่สารเจือ B₂H₆ ปริมาณ 0-20 sccm

จากภาพที่ 4.8 การเพิ่มปริมาณสารเจือโดโบเรน ทำให้สภาพการนำไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากอะตอมของโบรอน เป็นสารเจือชนิด n จากการเข้าไปแทนที่อะตอมของ Zn หรือ เข้าไปแทรกระหว่างอะตอมของ ZnO ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ ในการนำไฟฟ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO บนกระจก จึงลดลง สัมพันธ์กับปริมาณการเติมสารเจือโดโบเรน ที่เพิ่มขึ้น

4.2.5 ผลกระทบจากการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม ZnO

จากการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO มาวิเคราะห์ผลของการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่อง UV/Visible Spectrometer with integrating sphere ได้ผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวม (%Total transmittance: T_T) ในช่วงความยาวคลื่น 380 - 980 นาโนเมตร แสดงผลดังกราฟที่ 4.9



ภาพที่ 4.9

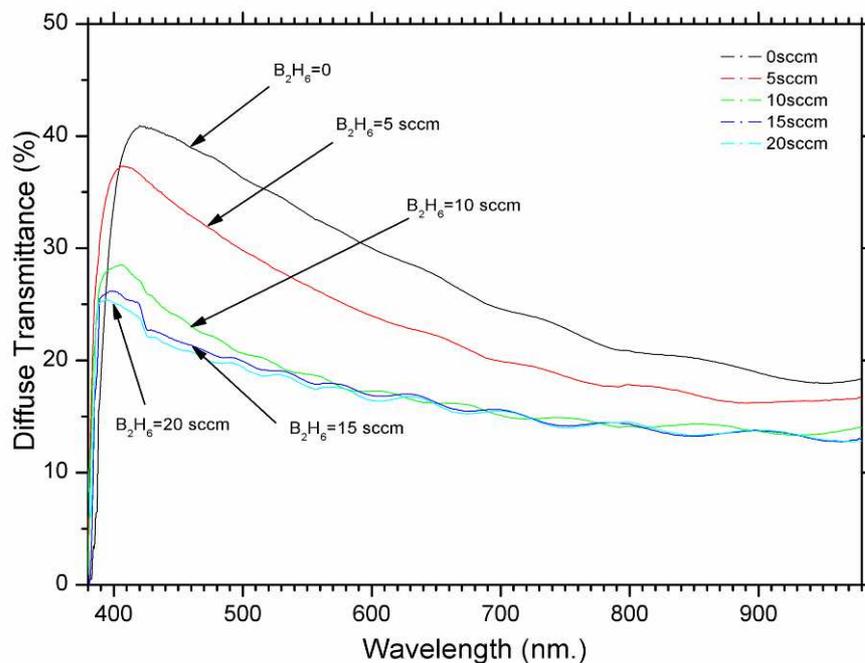
กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวม ที่สารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 0 - 20 sccm ในช่วงความยาวคลื่น 380-980 nm.

จากกราฟที่ 4.9 แสดงผลการทดลองพบว่า เมื่อไม่มีการเติมสารเจือ B_2H_6 มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 77.475% เมื่อมี

การเติมสารเจือ B_2H_6 ที่ปริมาณต่างๆ ปรากฏว่าฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมของฟิล์ม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน ที่มีปริมาณ 20 sccm มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมของฟิล์มที่สูงสุดเท่ากับ 82.425 %

ฟิล์มที่ไม่มีการเติมสารเจือ จะดูดกลืนแสงได้มากในช่วงต้นของความยาวคลื่นแสงช่วงที่ตามองเห็น ที่ประมาณ 400 นาโนเมตร ทำให้แสงส่งผ่านได้น้อยและที่ความยาวคลื่นแสงที่ยาวขึ้น การส่งผ่านแสงจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารเจือโบรอน เป็นการเพิ่มพาหะอิสระ ซึ่งจะดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นยาว ทำให้ในช่วงใกล้อินฟราเรดการส่งผ่านแสงลดลง และในช่วงคลื่นสั้นแสงจึงส่งผ่านได้มาก

สำหรับการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจาย (%Diffuse transmittance: T_D) ในช่วงความยาวคลื่น 380 - 980 นาโนเมตร แสดงผลดังกราฟที่ 4.10 จากกราฟพบว่า เมื่อไม่มีการเติมสารเจือ B_2H_6 มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 33.060% เมื่อมีการเติมสารเจือ B_2H_6 ที่ปริมาณต่างๆ ปรากฏว่าฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายของฟิล์ม มีแนวโน้มลดลง และฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน ที่มีปริมาณ 20 sccm มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายของฟิล์มที่ต่ำสุดเท่ากับ 17.702 %



ภาพที่ 4.10

กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจาย ที่สารเจือ B_2H_6 ปริมาณ 0 -20 sccm ในช่วงความยาวคลื่น 380-980 nm.

พิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมและกระจายที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร นำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัว (%Haze) ดังสมการ

$$\%Haze = \frac{T_D}{T_T} \times 100\%$$

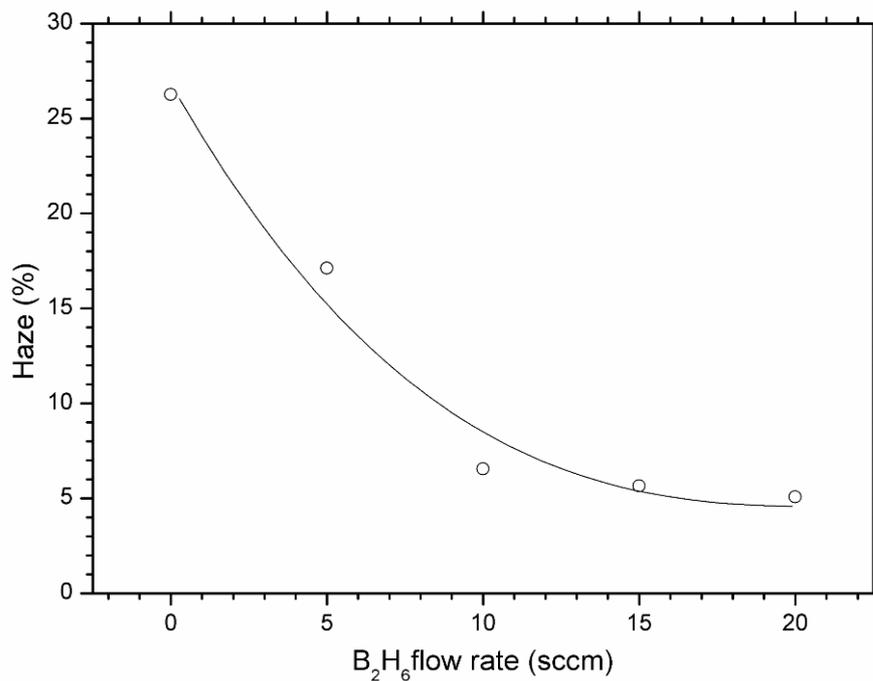
ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5 แล้วนำผลที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมสารเจือ กับค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวแสดงในกราฟที่ 4.11

ตารางที่ 4.5

ผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมและกระจายที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เพื่อนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัว ที่สารเจือ B₂H₆ ปริมาณ 0-20 sccm

B ₂ H ₆ (sccm)	Total transmittance (%)	Diffuse transmittance (%)	Haze (%)
0	77.475	33.060	26.26
5	79.647	26.708	17.12
10	81.792	18.782	6.55
15	82.033	18.103	5.66
20	82.425	17.702	5.07

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อไม่มีการเติมสารเจือ B₂H₆ ค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์มที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 26.26 % เมื่อมีการเติมสารเจือ B₂H₆ ที่ปริมาณต่างๆ ปรากฏว่าฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง และฟิล์ม ZnO เจือด้วยโบรอน ที่มีปริมาณ 20 sccm มีค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์มที่ต่ำสุดเท่ากับ 5.07 %



ภาพที่ 4.11

กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัว ที่สารเจือ B₂H₆ ปริมาณ 0 - 20 sccm ที่ความยาวคลื่น 550 nm.

จากภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์ม ZnO มีความสัมพันธ์กับค่าความขรุขระของฟิล์ม คือเมื่อไม่มีการเติมสารเจือ จะมีค่าความขรุขระมาก และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายสูง เมื่อมีการเติมสารเจือ B₂H₆ เพิ่มขึ้น ความขรุขระของพื้นผิวและค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายจะลดลง

4.2.6 วิเคราะห์และสรุปปริมาณสารเจือ B₂H₆ ที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม ZnO

สรุปผลการทดลอง

1. โครงสร้างผลึกจากภาพถ่ายของเครื่อง SEM ที่มีการเติมสารเจือ B₂H₆ ปริมาณ 10 sccm และ 15 sccm เกิดรูปทรงผลึกพีระมิด สมบูรณ์ชัดเจน และเมื่อพิจารณาระนาบของผลึกด้วยเครื่อง XRD ฟิล์มที่มีการเติมสารเจือ B₂H₆ ปริมาณ 10 sccm มีความเข้ม spectrum ของระนาบ (100) มากกว่าฟิล์มที่มีการเติมสารเจือ B₂H₆ ปริมาณ 15 sccm

2. อัตราการเกิดฟิล์ม ZnO มีค่าสูงสุดเมื่อไม่เติมสารเจือ B₂H₆ และเมื่อเติมสารเจือ B₂H₆ ที่ปริมาณ 5 sccm, 10 sccm, 15 sccm และ 20 sccm อัตราการเกิดฟิล์ม ZnO:B จะลดลงตามลำดับ

3. ค่าความขรุขระของฟิล์มจะมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มของสารเจือ B₂H₆ ความขรุขระจะมีผลต่อการส่งผ่านของแสง

4. ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มของสารเจือ B₂H₆ สำหรับกระจกที่ใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งแสงควรมีความต้านทานต่ำ

5. คุณสมบัติการส่งผ่านแสง เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมสารเจือ B₂H₆ ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมของฟิล์ม มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายลดลง ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์มที่ได้ลดลง คุณสมบัติทางแสงที่ดีของฟิล์มที่นำไปใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งแสง ควรมีค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์มที่สูง เนื่องจากแสงกระจายได้มากเมื่อนำไปใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้แสงเดินทางภายในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ยาวนาน

เลือกปริมาณสารเจือ B₂H₆ ที่ 10 sccm ในการเคลือบฟิล์ม Zn:B บนกระจก มากำหนดปริมาณสารเจือเป็นตัวแปรควบคุมในการทดลองที่ 2

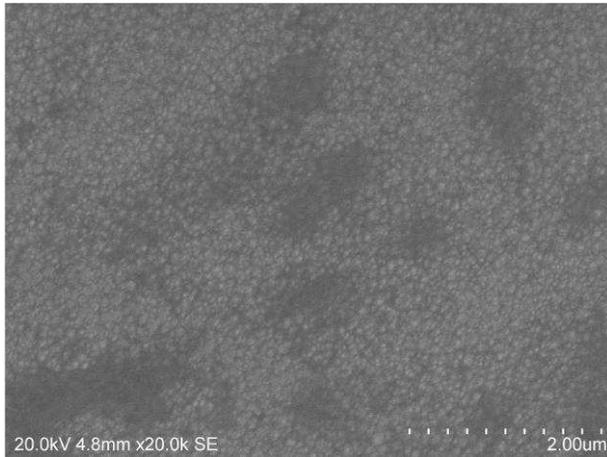
4.3 ผลการทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ที่มีต่อโครงสร้างผลึก คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสง ของฟิล์ม ZnO

ในการทดลองนี้จะควบคุมปริมาณของก๊าซ B₂H₆ ที่เป็นสารเจือคงที่ที่ 10 sccm ปริมาณของก๊าซ Ar ซึ่งใช้เป็นก๊าซพาหะของ DEZ และ H₂O ให้คงที่ที่ 50 sccm, 80 sccm ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเป็น 100°C, 150 °C, 160 °C 180°C และ 200°C ซึ่งทุกตัวอย่างของการทดลองใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม 15 นาที ผลที่ได้จากการทดลองกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B เมื่อมองด้วยตาเปล่า มีลักษณะสีขาวขุ่น สม่ำเสมอทั่วแผ่น

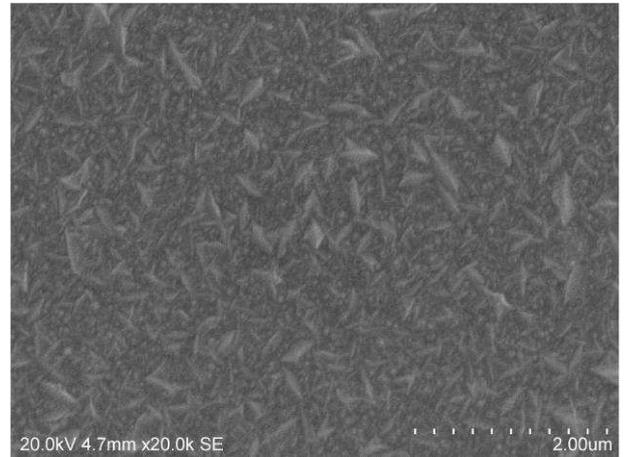
4.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ZnO:B บนกระจก

การวิเคราะห์ภาพถ่ายของผลึกฟิล์ม ZnO:B ด้วยเครื่อง SEM

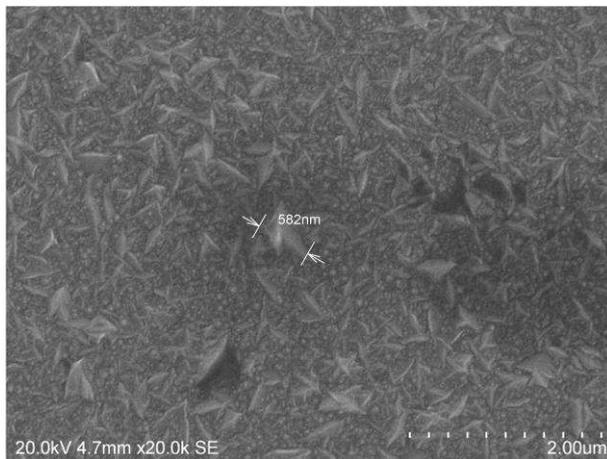
จากการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B มาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงสร้างผลึกฟิล์ม โดยนำไปวัดด้วยเครื่อง SEM เพื่อดูลักษณะของพื้นผิว จากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 20000 เท่า พบว่าลักษณะการเกิดฟิล์ม ZnO:B นั้นมีลักษณะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.12 (ก-จ)



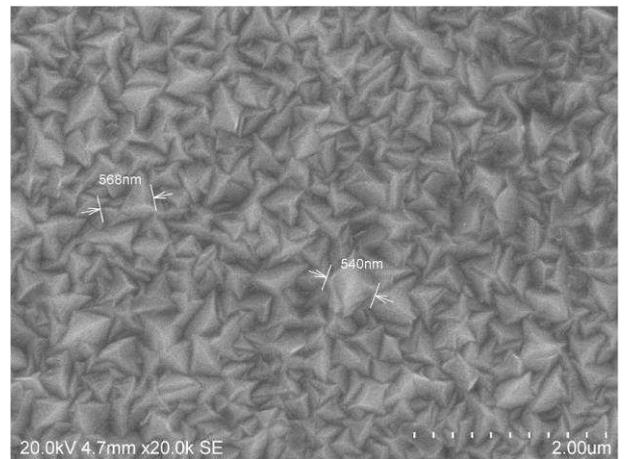
(ก) อุณหภูมิ 100°C



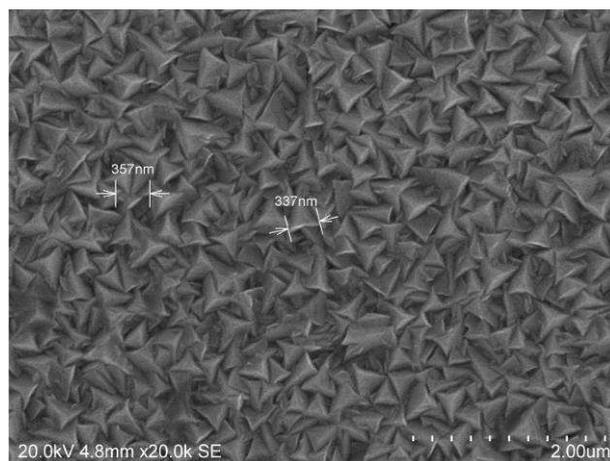
(ข) อุณหภูมิ 150°C



(ค) อุณหภูมิ 160°C



(ง) อุณหภูมิ 180°C



(จ) อุณหภูมิ 200°C

ภาพที่ 4.12 (ก - จ)

ภาพถ่ายฟิล์ม ZnO:B จากเครื่อง SEM กำลังขยาย 20000 เท่า ที่อุณหภูมิ 100-200 °C

โดยที่อุณหภูมิ 100 °C (ภาพที่ 4.12 ก) นั้นรูปร่างของผลึกไม่ชัดเจนมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ขนาดเล็กเรียงต่อกัน ที่อุณหภูมิ 150 °C (ภาพที่ 4.12 ข) เกิดเป็นรูปร่างลักษณะของผลึกขนาดเล็ก แทรกกระหว่างเม็ดกลม มีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเริ่มมีผลึกขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 160 °C (ภาพที่ 4.12 ค)

ที่อุณหภูมิ 180 °C (ภาพที่ 4.12 ง) การเกิดผลึกของฟิล์ม ZnO:B มีลักษณะรูปร่างชัดเจนและมีขนาดเกรนที่สม่ำเสมอประมาณ 500-550 นาโนเมตร มีลักษณะเป็นรูปทรงพีระมิด

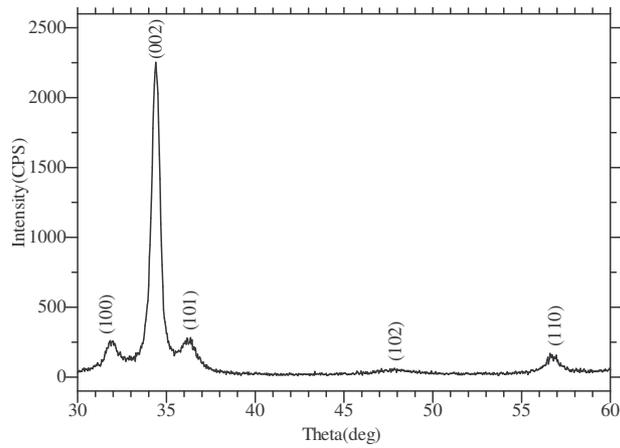
ที่อุณหภูมิ 200 °C (ภาพที่ 4.12 จ) เกิดผลึกของฟิล์มมีลักษณะเป็นรูปทรงพีระมิดเหมือนการทดลองที่อุณหภูมิ 180 °C แต่ขนาดของเกรนเล็กลงประมาณ 300-350 นาโนเมตร จะเห็นว่าอุณหภูมิมิมีส่วนสำคัญในการเกิดรูปร่างของผลึก

การวิเคราะห์ระนาบและความเป็นผลึกของฟิล์ม ZnO:B ด้วยเครื่อง XRD

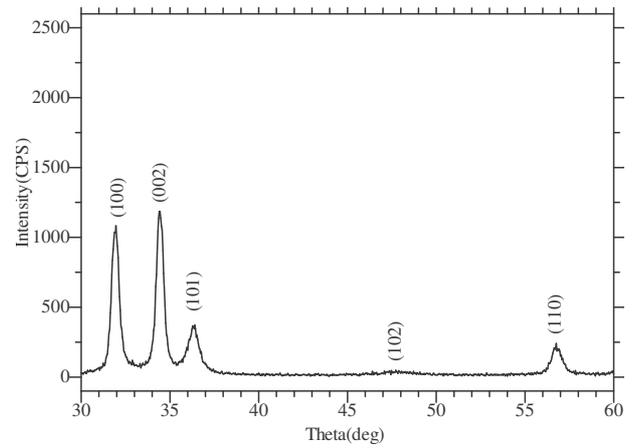
การวิเคราะห์ผลการทดลองของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะการเกิดฟิล์ม ระนาบ และความเป็นผลึกของฟิล์ม ZnO:B ด้วยเครื่อง XRD แสดงดังภาพที่ 4.20 (ก-จ) พบว่าที่อุณหภูมิ 100°C spectrum ของ XRD จะแสดงระนาบ (002) โดยมีระนาบ (100) (101) และ(110) เกิดขึ้นเล็กน้อย

ที่อุณหภูมิ 150 °C ระนาบ (002) ลดลง ส่วนระนาบ (100) (101) และ (110) จะสูงขึ้น อุณหภูมิ 160 °C จะได้ระนาบเช่นเดียวกับอุณหภูมิที่ 150 °C แต่ลักษณะกราฟความเข้มของ spectrum ที่ระนาบ (002) และ (110) มีความเข้มลดลง ส่วนระนาบ (100) และ (101) มีความเข้มเพิ่มขึ้น

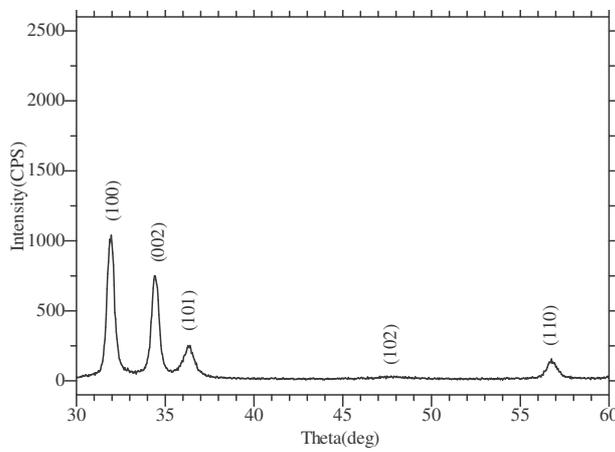
ส่วนที่อุณหภูมิ 180 °C และ 200 °C นั้น ความเข้มของ spectrum แสดงระนาบ (100) อย่างชัดเจน แต่ที่อุณหภูมิ 180 °C ระนาบ (100) มีความเข้มของ spectrum มากกว่าที่อุณหภูมิ 200 °C และที่อุณหภูมิ 200 °C เริ่มมีระนาบ (101) เกิดขึ้นมา



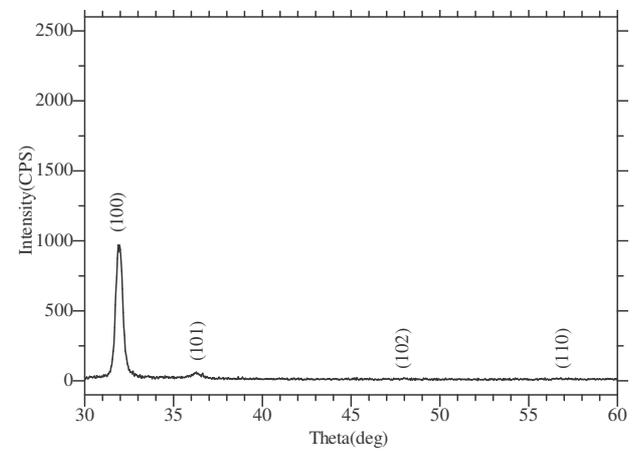
(ก) อุณหภูมิ 100°C



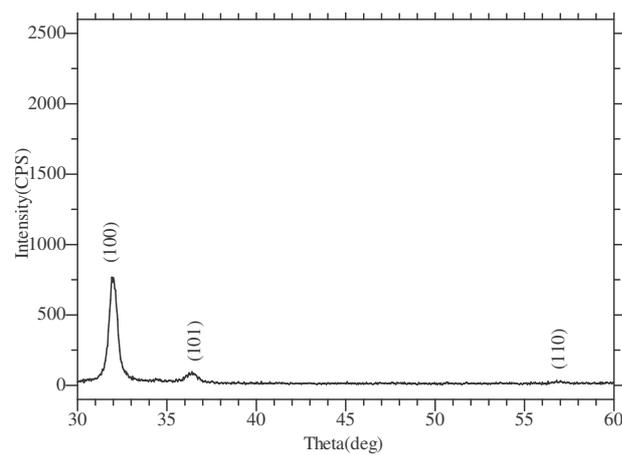
(ข) อุณหภูมิ 150°C



(ค) อุณหภูมิ 160°C



(ง) อุณหภูมิ 180°C



(จ) อุณหภูมิ 200°C

ภาพที่ 4.13 (ก - จ)

ข้อมูลการวัด XRD ของฟิล์ม ZnO:B ที่อุณหภูมิ 100°C-200°C

4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของฟิล์ม ZnO:B บนกระจก

จากการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B มาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาของฟิล์ม ด้วยเครื่อง step profile โดยทำการวัดความหนาของตัวอย่าง 3 ครั้งเพื่อหาค่าความหนาเฉลี่ย นำค่าความหนาของฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆ มาคำนวณหาอัตราการเกิดฟิล์ม ใช้เวลาในการทดลองเคลือบฟิล์มนาน 15 นาที ได้ผลดังตารางที่ 4.6

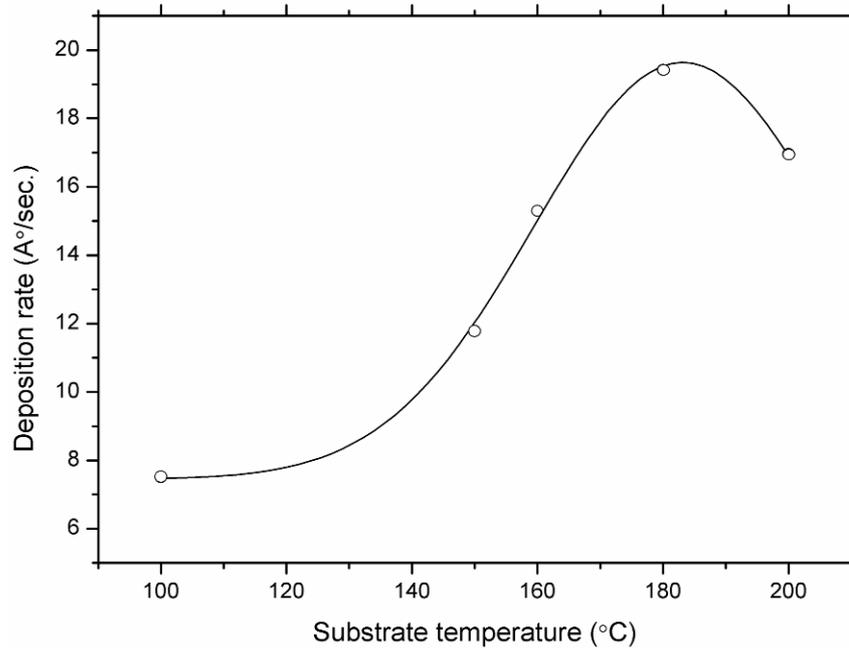
ตารางที่ 4.6

ผลการวัดค่าความหนาและอัตราการเกิดฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C-200°C
เวลาในการเคลือบ 15 นาที

Temperature (°C)	Thickness (Å)				Deposition rate (Å/sec.)
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย	
100	6758.5	5840.6	7251.3	6616.80	7.35
150	10609.5	10722.2	11016.1	10782.60	11.98
160	13077.6	13273.3	13785.2	13378.70	15.30
180	17477.1	17385.2	17673	17511.77	19.46
200	15258.6	15544.7	16439.2	15747.50	17.50

จากผลการทดลองนำอัตราการเกิดฟิล์ม ที่คำนวณได้จากความหนาของฟิล์ม มาเขียนกราฟแสดงดังภาพที่ 4.14 พบว่าที่อุณหภูมิ 100°C วัดค่าความหนาเฉลี่ยได้ 6616.8 Å คำนวณอัตราการเกิดฟิล์มได้ 7.35 Å/sec. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดฟิล์ม (Deposition rate) จะมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิที่ 180 °C อัตราการเกิดฟิล์มจะมีค่าสูงที่สุดเป็น 19.46 Å/sec และที่อุณหภูมิ 200°C อัตราการเกิดฟิล์มมีค่าลดลงเป็น 17.50 Å/sec

เนื่องจากระหว่างการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ DEZ โดยออกซิเจนจากไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 100°C การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับ DEZ ที่พื้นผิวสูง อัตราการเกิดฟิล์มของ ZnO จึงสูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิประมาณ 180°C ไอน้ำจะเกิดการแตกตัวที่พอเพียงสำหรับการเกิดฟิล์ม ZnO เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 180°C ทำให้ไอน้ำแตกตัวสูงยิ่งขึ้น เกิดออกซิเจนที่ปริมาณมาก และพลังงานจลน์สูง ทำให้อัตราการเกิดฟิล์มลดลง



ภาพที่ 4.14

กราฟแสดงอัตราการเกิดฟิล์ม ZnO:B ที่อุณหภูมิ 100°C-200°C เวลาที่ใช้ 15 นาที

4.3.3 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความขรุขระของฟิล์ม ZnO:B บนกระจก

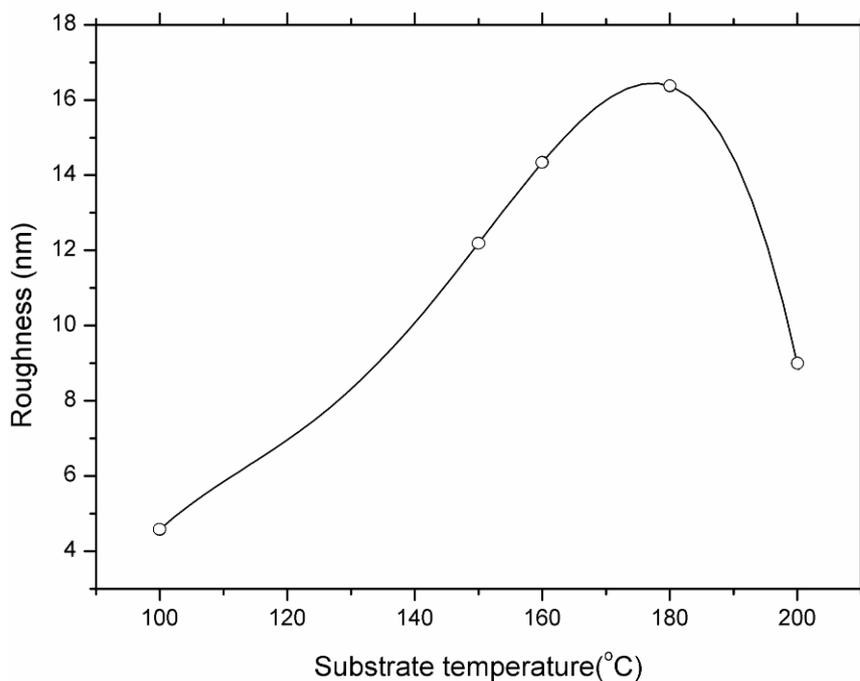
พารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของพื้นผิวของฟิล์ม ZnO ที่จะนำมาเป็นฐานรองในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางคือ ค่าความขรุขระ (Roughness : R_{rms}) ของฟิล์ม โดยการใช้เครื่อง Step profile ในการวิเคราะห์ จากการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B มาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความขรุขระของฟิล์ม แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7

ผลการวัดค่าความขรุขระของฟิล์ม ZnO:B ที่อุณหภูมิที่ 100°C-200°C

Temperature (°C)	Roughness (nm.)			
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
100	5.7	4.9	3.12	4.57
150	11.27	13.71	11.59	12.19
160	14.91	14.09	14.03	14.34
180	17.3	15.53	16.29	16.37
200	9.4	8.77	8.81	8.99

ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิ 100°C วัดค่าความขรุขระของฟิล์มมีค่า 4.57 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นมีผลให้ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้น และ ที่อุณหภูมิ 180 °C ได้ค่าความขรุขระของฟิล์มสูงสุดเท่ากับ 16.37 นาโนเมตร และที่อุณหภูมิ 200°C ค่าความขรุขระของฟิล์มมีค่าลดลง เป็น 8.99 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.15

กราฟแสดงค่าความขรุขระของฟิล์ม ZnO:B ที่อุณหภูมิ 100°C - 200°C

เมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม ZnO ที่อุณหภูมิ 100°C พลังงานความร้อนที่ใช้ในการสร้างฟิล์มต่ำ ทำให้การเคลื่อนที่ของพื้นผิวมีน้อย ผลึกที่ได้จึงเกิดในระนาบที่ตั้งฉากกับพื้นผิว (002) ซึ่งมีความขรุขระต่ำ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 180°C พลังงานความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้การเคลื่อนที่ของพื้นผิวมีมาก ฟิล์มที่ได้จึงเกิดเป็นผลึกในระนาบที่ขนานกับพื้นผิว (100) และเป็นรูปทรงพีระมิดมากขึ้น ทำให้ค่าความขรุขระสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้ นำเกิดการแตกตัวได้มากเกินสัดส่วนที่พอเหมาะกับการทำปฏิกิริยากับ DEZ ในการเกิดฟิล์ม ZnO แต่ พลังงานความร้อนที่สูงทำให้การเคลื่อนที่พื้นผิวมากขึ้น ขนาดเกรนจึงเล็กลง เป็นผลให้ความขรุขระลดลง

4.3.4 ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO:B บนกระจก

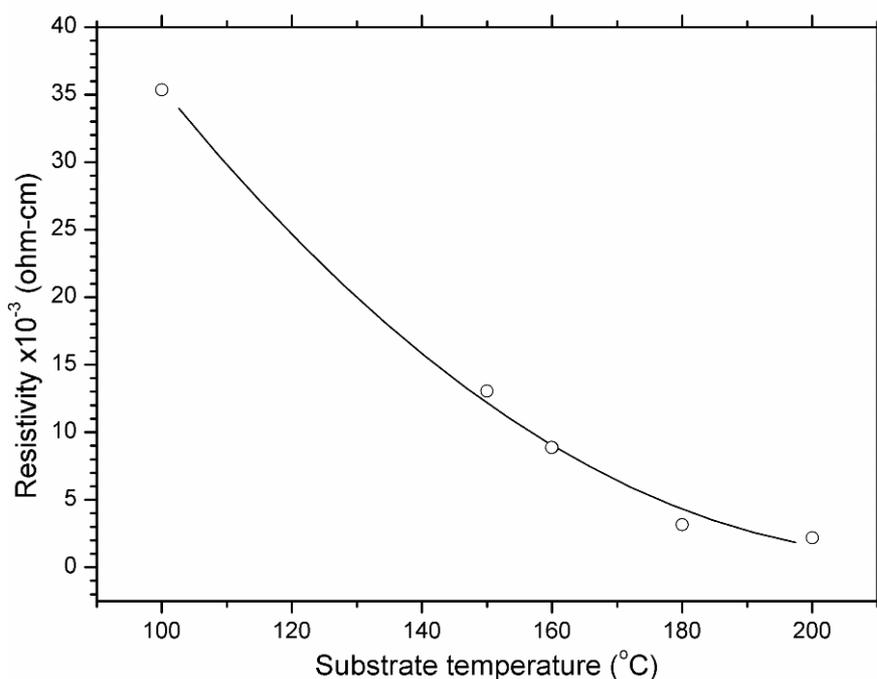
การทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B มาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม พิจารณาจากค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยวัดด้วยวิธี Four point probe ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์ม แล้วนำความหนาที่อุณหภูมิต่างๆ มาคำนวณหา ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8

ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO:B ที่อุณหภูมิ 100°C – 200°C

อุณหภูมิ (°C)	Sheet resistance(ohm/sq)			เฉลี่ย	Thickness (°A)	Resistivity x10 ⁻³ (ohm.cm)
	ตำแหน่งที่ 1-12					
100	630.49	509.63	473.02	534.40	6616.80	35.36
	599.3	528	524.52			
	450.71	481.44	599.84			
	574.62	507.84	533.33			
150	250	150	235	121.08	10782.60	13.06
	70	53	68			
	70.42	48	67.5			
	155	126	160			
160	136.52	91.68	135.06	66.37	13378.70	8.88
	46.84	33.18	43.9			
	46.34	32.2	41.46			
	70.72	55.6	62.92			
180	35.33	24.85	36.31	17.97	17511.77	3.15
	12.18	9	12.42			
	10.23	7.79	11.24			
	21.2	15.1	19.98			
200	24.8	16.81	25.34	13.90	15747.50	2.19
	10.23	12.42	11.69			
	10.72	11.45	13.64			
	9.26	9.74	10.72			

จากผลการทดลอง พบว่าที่อุณหภูมิ 100°C วัดค่าความต้านทานแผ่นได้ 534.4 ohm/sq คำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มได้ $35.36 \times 10^{-3} \text{ ohm.cm}$ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ได้ มีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งอุณหภูมิที่ 200°C ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม มีค่าต่ำสุดเป็น $2.19 \times 10^{-3} \text{ ohm.cm}$ แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในภาพที่ 4.16



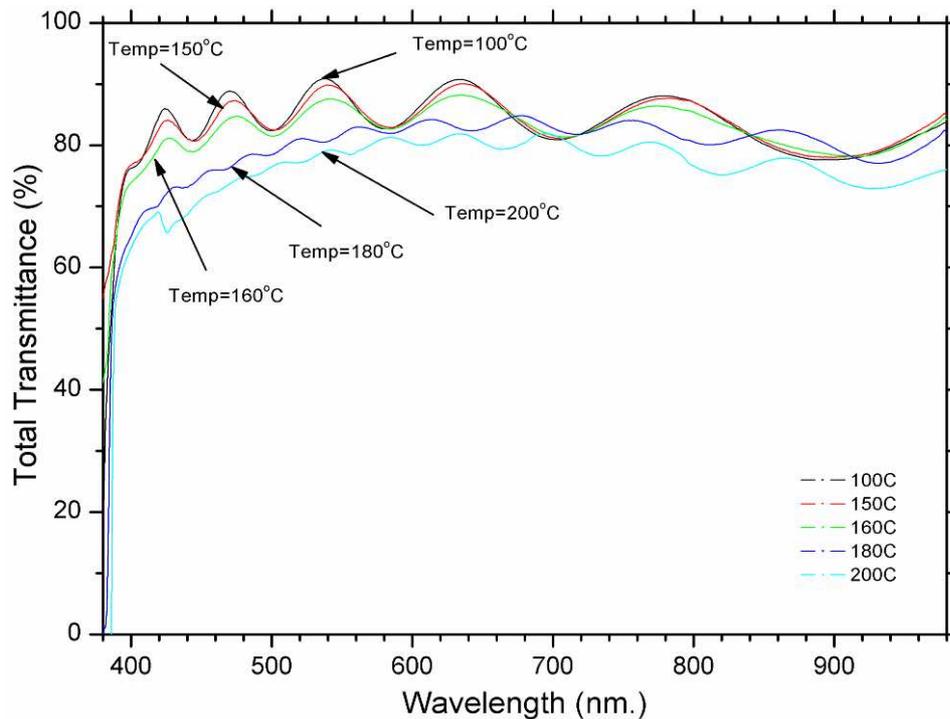
ภาพที่ 4.16

กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO:B ที่อุณหภูมิ $100^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$

ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO:B จะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 100°C จนถึง 200°C ทำให้ความเป็นผลึกในทิศทางขนานกับแผ่นฐานรอง (100) มีมากขึ้นและขนาดเกรนของผลึกที่ใหญ่ขึ้น การกระจายของขอบเกรนลดลง เป็นผลให้การนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

4.3.5 ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม ZnO:B บนกระจก

จากการทดลองนำกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B มาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่อง UV/Visible Spectrometer with integrating sphere ผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมในช่วงความยาวคลื่น 380-980 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 4.17

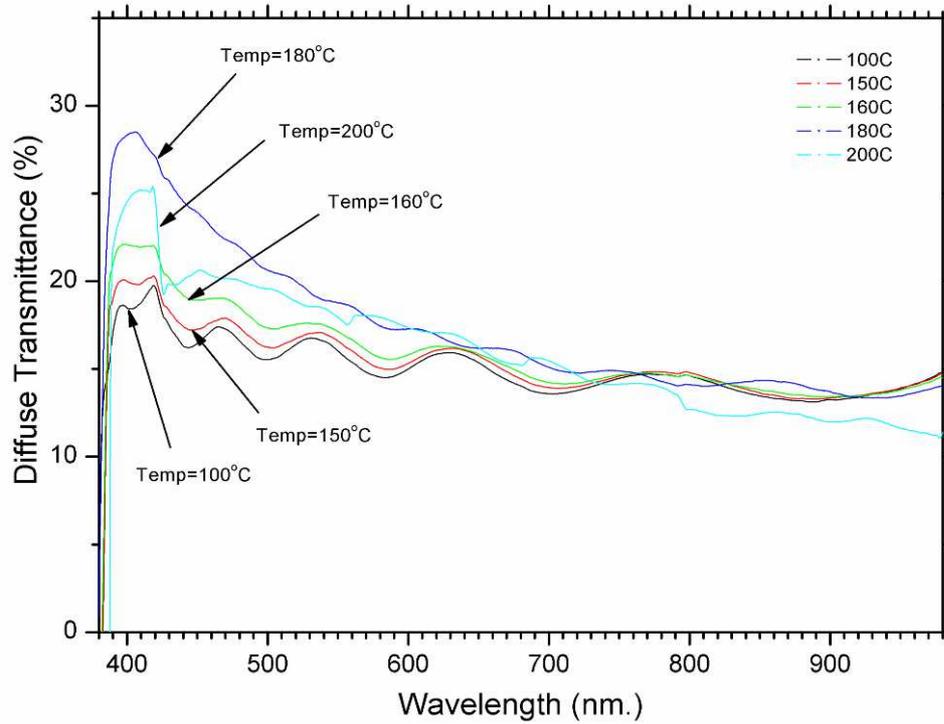


ภาพที่ 4.17

กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวม ที่อุณหภูมิ 100°C - 200°C
ในช่วงความยาวคลื่น 380-980 nm.

พิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวม ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.17 พบว่า ที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมของฟิล์มสูงสุดเท่ากับ 89.055% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมของฟิล์ม มีแนวโน้มลดลง และที่อุณหภูมิ 200 °C มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวม ที่ต่ำสุดเท่ากับ 78.833 %

ส่วนผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจาย ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ซึ่งแสดงผลดังภาพที่ 4.18 พบว่า ฟิล์ม ZnO:B เคลือบที่อุณหภูมิ 180°C ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายสูงสุด มีค่า 18.782 % รองลงมาเป็นอุณหภูมิที่ 200°C, 160°C, 150°C และ 100°C ตามลำดับ



ภาพที่ 4.18

กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจาย ที่อุณหภูมิ 100°C - 200°C
ในช่วงความยาวคลื่น 380-980 nm.

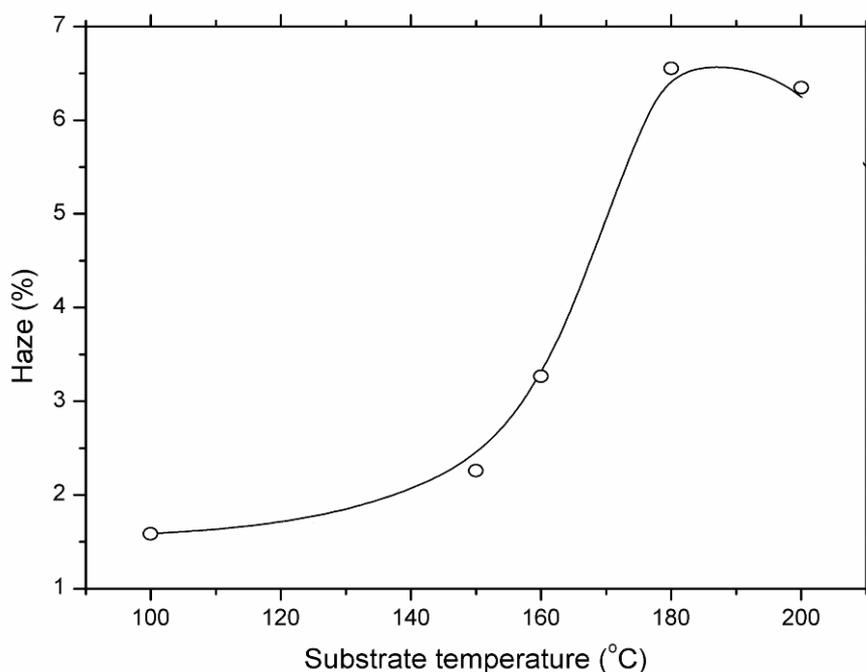
ผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมและกระจาย ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร นำมาคำนวณหา ค่าความขุ่นมัว ได้ผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9

ผลการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมและกระจายที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร
เพื่อนำมาหาค่าความขุ่นมัว ของฟิล์ม ZnO:B ที่อุณหภูมิ 100°C-200°C

อุณหภูมิ (°C)	Total transmittance (%)	Diffuse transmittance (%)	Haze (%)
100	89.055	16.025	1.58
150	88.910	16.598	2.26
160	87.13	17.144	3.27
180	81.792	18.782	6.55
200	78.833	17.939	6.35

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.9 มาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความขุ่นมัวกับอุณหภูมิในการเคลือบฟิล์ม ZnO:B แสดงผลดังกราฟภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19

กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์ม ZnO:B ที่อุณหภูมิ 100°C - 200°C ที่ความยาวคลื่น 550 nm.

ในส่วนของค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์ม ZnO:B บนกระจกนั้น จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเช่นกัน ดังตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลอง ที่อุณหภูมิ 100 °C ค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์ม อยู่ที่ 1.58 % และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แนวโน้มค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 180 °C นั้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์มมีค่าอยู่ที่ระดับ 6.55% ซึ่งเป็นค่าสูงสุด เมื่อเพิ่มเป็นอุณหภูมิ 200 °C ค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวจะลดลงเป็น 6.35%

ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมของฟิล์ม ZnO:B ที่ลดลง จากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 100°C ถึง 200°C เกิดจากลักษณะพื้นผิวผลึกรูปทรงพีระมิดที่มากขึ้น ผลึกจึงไปขวางการเดินทางของแสง ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจาย จะสัมพันธ์กับความขรุขระที่อุณหภูมิ 180°C จะมีค่าความขรุขระมากที่สุด ทำให้แสงที่ผ่านฟิล์มกระจายได้มากกว่าที่ความขรุขระต่ำกว่า เป็นผลให้ค่าความขุ่นมัวมีค่าเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 100°C ถึง 180°C และลดลงที่อุณหภูมิ 200°C

4.3.6 วิเคราะห์และสรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม ZnO:B บนกระจก

สรุปผลการทดลอง

1. โครงสร้างผลึกจากภาพถ่ายของเครื่อง SEM ที่อุณหภูมิ 180°C กับ 200°C เท่านั้นที่เกิดผลึกรูปทรงพีระมิดสมบูรณ์ชัดเจน แต่ที่อุณหภูมิ 180°C มีขนาดของเกรนใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 200°C การเกิดระนาบของผลึกที่วัดด้วยเครื่อง XRD ที่อุณหภูมิ 100°C กับ 150°C แสดงระนาบหลายระนาบ ส่วนที่อุณหภูมิ 180°C กับ 200°C นั้นแสดงระนาบ (100) อย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 180°C มีความเข้ม spectrum ของระนาบ (100) มากกว่าที่อุณหภูมิ 200°C
2. อัตราการเกิดฟิล์ม ZnO:B มีค่าสูงสุด ที่อุณหภูมิ 180 °C และลดลง 200°C, 160°C 150°C และ 100°C ตามลำดับ
3. ค่าความขรุขระของฟิล์ม ZnO:B มีค่ามากที่สุด ที่อุณหภูมิ 180°C, 160°C, 150°C, 200°C และ 100°C ตามลำดับ
4. ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม Zn:B ลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น มีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ 200°C, 180°C, 160°C, 150°C และ 100°C ตามลำดับ
5. ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงรวมของฟิล์ม Zn:B จะลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นจาก 100°C ถึง 200°C ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกระจายสูงสุดที่อุณหภูมิ 180°C และลดลงที่อุณหภูมิ 200°C, 160°C, 150°C และ 100°C ตามลำดับ ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความขุ่นมัวของฟิล์มมีค่ามากที่สุด ที่อุณหภูมิ 180°C, 200°C, 160°C, 150°C และ 100°C ตามลำดับ

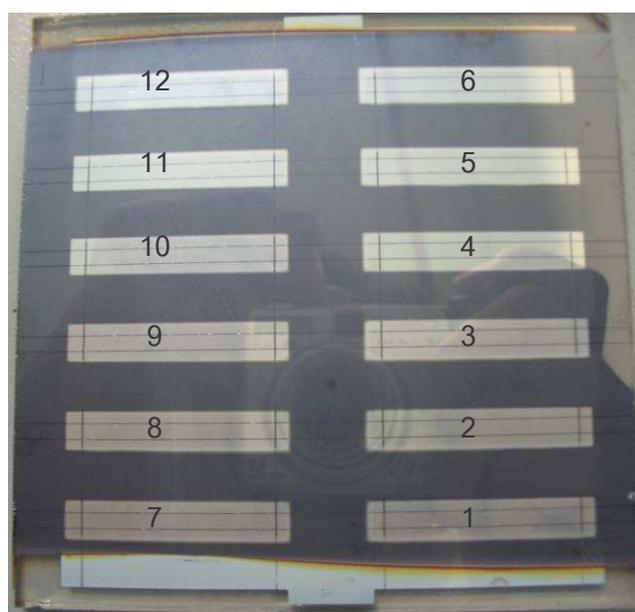
เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการเคลือบฟิล์ม ZnO:B ข้างต้น ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสง และลักษณะพื้นผิวของผลึก สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการเคลือบฟิล์ม ZnO:B บนกระจก คือ 180 °C

4.4 ผลการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจก SnO₂:F กับที่สร้างบนกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B

การทดลองนี้ได้นำกระจกเคลือบ SnO₂:F และ กระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B มาใช้เป็นฐานรองในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ของกระจกที่มีสารเคลือบทั้งสองชนิด

สำหรับกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B พิจารณาจากผลการทดลองที่ 1 และ 2 ปริมาณการเติมสารเจือ B₂H₆ ที่เหมาะสม คือ 10 sccm และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม ZnO ในการทำวิจัยนี้ คือ ที่ 180 °C

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน บนกระจกฐานรองทั้งสองชนิด จะใช้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งบนกระจก 1 แผ่น จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพื้นที่ 0.75 ตารางเซนติเมตร จำนวน 12 เซลล์ (ภาพที่ 4.20)

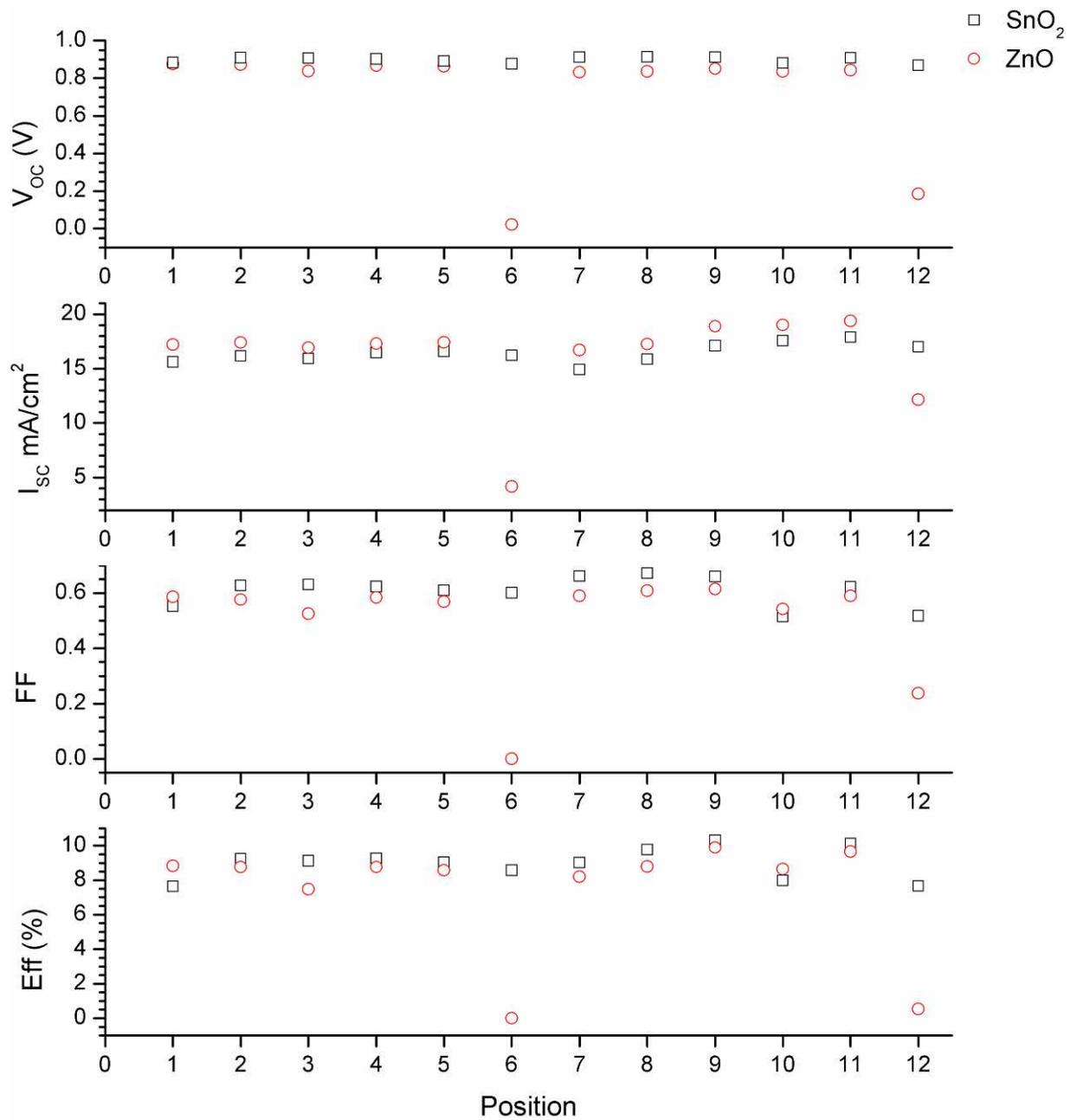


ภาพที่ 4.20

ตำแหน่งเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจก จำนวน 12 เซลล์

ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจกทั้งสองชนิดจำนวน 12 เซลล์ ด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Super Solar Simulator) แสดงในภาคผนวก ข นำมาเขียนกราฟได้ดังภาพที่ 4.21

จากผลการวัดพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจกทั้งสองชนิด พบว่าเซลล์ที่สร้างบนกระจก ZnO:B มีเซลล์ที่ใช้ไม่ได้จำนวน 2 เซลล์ ในตำแหน่งที่ 6 และ 12 เนื่องจากจากความสม่ำเสมอ (uniformity) ของฟิล์ม ZnO:B ส่วนเซลล์ที่สร้างบนกระจก SnO₂:F ใช้ได้ครบทั้ง 12 เซลล์ พิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด (ตำแหน่งที่ 9) เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดค่าพารามิเตอร์ ระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจก SnO₂:F กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจกเคลือบ ZnO:B



ภาพที่ 4.21

ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจกเคลือบ SnO₂:F กับ บนกระจกเคลือบ ZnO:B จำนวน 12 เซลล์

ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สร้างบนกระจก SnO₂:F และ กระจก ZnO:B ที่ตำแหน่งที่ 9 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุด ได้ผลดังนี้

กระจกเคลือบ SnO₂:F

- แรงดันไฟฟ้าเปิด 0.91 V.
- กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 17.10 mA/cm²
- ฟิวด์แฟกเตอร์ 0.66
- ประสิทธิภาพ 10.31 %

กระจกเคลือบ ZnO:B

- แรงดันไฟฟ้าเปิด 0.85 V.
- กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 18.90 mA/cm²
- ฟิวด์แฟกเตอร์ 0.61
- ประสิทธิภาพ 9.88 %

ผลที่ได้คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิด (V_{OC}), ฟิวด์แฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ บนกระจก ZnO:B มีค่าน้อยกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจก SnO₂:F เนื่องจากผลของความต้านทานไฟฟ้าของกระจก ZnO:B ที่สูงกว่า ทำให้สภาพการนำไฟฟ้าได้น้อยกว่ากระจก SnO₂:F และ ความหนาของชั้นฟิล์ม ZnO:B ที่หนา ทำให้การส่งผ่านแสงได้น้อย สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจก ZnO:B มีค่ามากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจก SnO₂:F เป็นผลมาจากฟิล์ม ZnO:B ที่มีรูปร่างผลึกเป็นรูปทรงพิระมิดและความขรุขระของฟิล์มที่มากกว่า เมื่อแสงส่งผ่านกระจกเคลือบ ZnO:B จึงกระเจิงได้มาก ทำให้แสงที่ผ่านเข้าสู่ชั้น i ซึ่งเป็นชั้นที่ผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะทางยาวมากขึ้น กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจกเคลือบ ZnO:B จึงมากกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจกเคลือบ SnO₂:F