

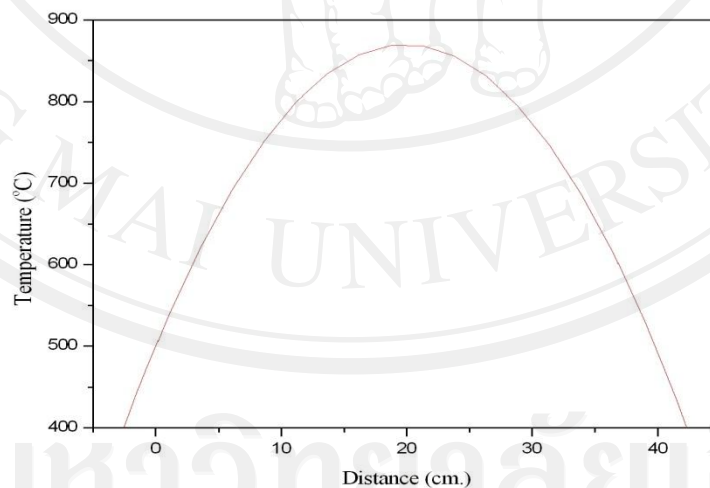
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

เส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ได้ถูกปลูกขึ้นบนกระจกนำไฟฟ้าที่มีชั้นของฟิล์มซิงก์เคลือบอยู่ตามเงื่อนไขต่างๆ ด้วยกระบวนการวิธี CVD ตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-FEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และสมบัติทางแสงด้วยรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) เครื่องวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence spectroscopy) และเครื่องตรวจวัดสมบัติทางแสง (UV-visible spectroscopy) นำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของเตาเผาชนิดท่อที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น

เมื่อทำการออกแบบและประดิษฐ์เตาเผาชนิดท่อเสร็จเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดสอบวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของท่อเตาเผา ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



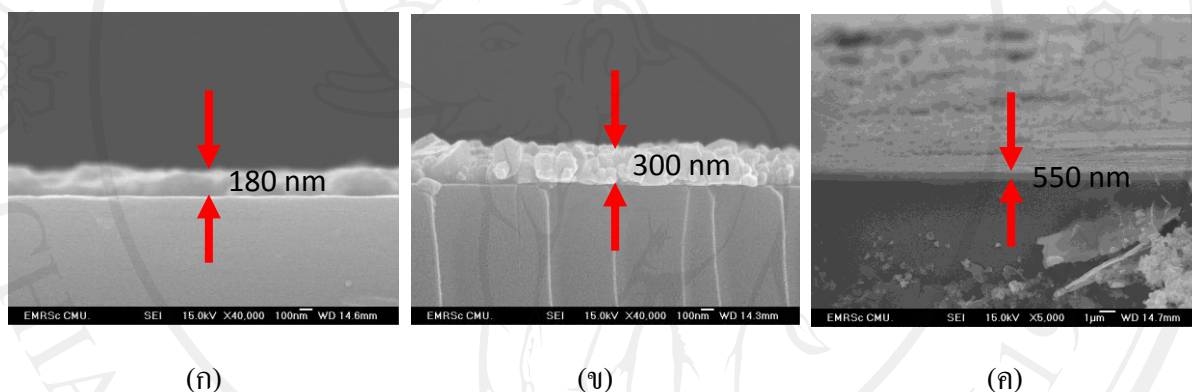
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง temperature และ distance ของท่อเตาเผา

จากรูปที่ 4.1 ทำให้ได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเตาและระยะของเตาเผาชนิดท่อนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะ ที่จุดกึ่งกลางของเตาเผาชนิดท่อกจะมีอุณหภูมิสูงสุด และค่อยๆลดลงตามระยะห่างจากกึ่งกลางของท่อเตาเผา โดยที่ในการทดลองได้ตั้งให้จุดกึ่งกลางของท่อเตาเผา

อุณหภูมิที่ 850 °C เพื่อในการทดลองจะทำให้สารซิงก์ที่วางอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางท่อระเหยเป็นไอ และวางกระจกนำไฟฟ้าที่มีชั้นของฟิล์มซิงก์เคลือบอยู่ที่ตำแหน่ง 18 cm. ห่างจากกึ่งกลางของท่อเตาเผา ซึ่งมีอุณหภูมิ 530 °C

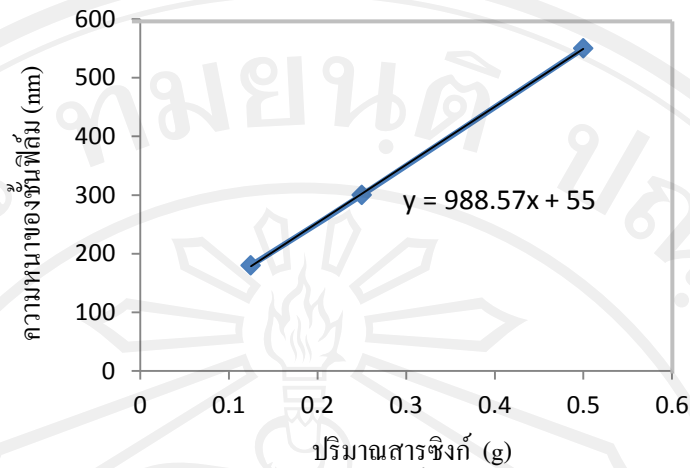
#### 4.2 ผลการศึกษาการเคลือบชั้นฟิล์มซิงก์บนกระจกนำไฟฟ้า

การเคลือบชั้นฟิล์มบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค evaporation ที่ควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มโดยควบคุมปริมาณสารซิงก์ที่ใช้ในการ evaporation ที่ 0.12, 0.25 และ 0.5g ซึ่งทำการวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (FE-SEM) และทำการถ่ายภาพแบบ cross-section ดังแสดงในรูปที่ 4.2.1



รูปที่ 4.2.1 (ก-ค) ภาพ FE-SEM แบบ cross-section ของฟิล์มซิงก์ที่เคลือบโดยเทคนิค evaporation บนกระจกนำไฟฟ้าที่ปริมาณสารซิงก์ 0.125, 0.25 และ 0.5 g ตามลำดับ

จากผลการทดลอง พบว่าการเคลือบฟิล์มซิงก์ด้วยเทคนิค evaporation บนกระจกนำไฟฟ้าที่ปริมาณสารซิงก์ 0.125, 0.25 และ 0.5 g ทำให้ได้ความหนาของชั้นฟิล์มที่ความหนา 180, 300 และ 550 nm ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มซิงก์และปริมาณสารซิงก์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 4.2.2



รูปที่ 4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฟิล์มซิงก์และปริมาณสารซิงก์

#### 4.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ ZnO nanowires

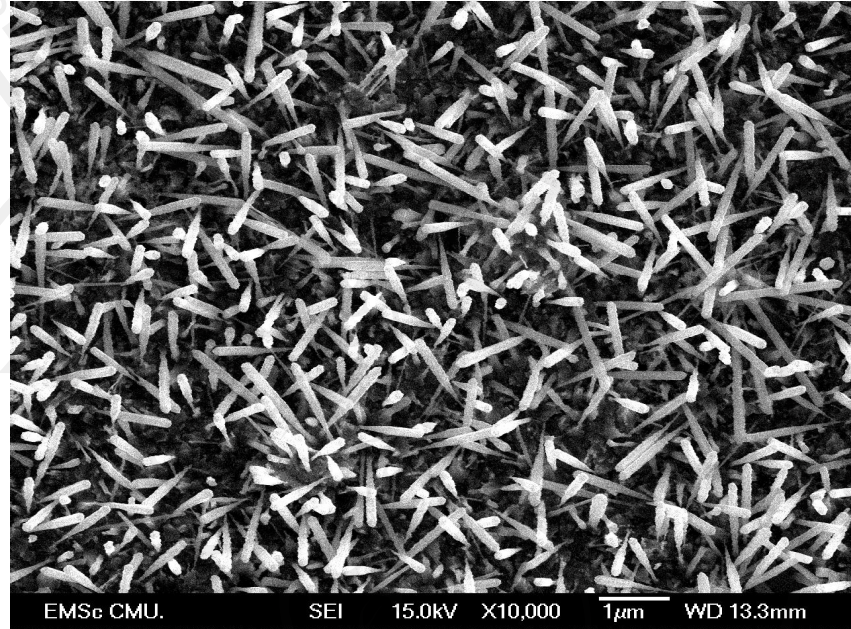
##### 4.3.1 การศึกษาโครงสร้างพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เมื่อทำการปลูก ZnO nanowires บนกระจกนำไฟฟ้าที่มีชั้นของฟิล์มซิงก์เคลือบอยู่ด้วยกระบวนการ Chemical Vapor Deposition (CVD) โดยที่ใช้เงื่อนไขในการปลูก ZnO nanowires ดังแสดงในตารางที่ 4.3.1

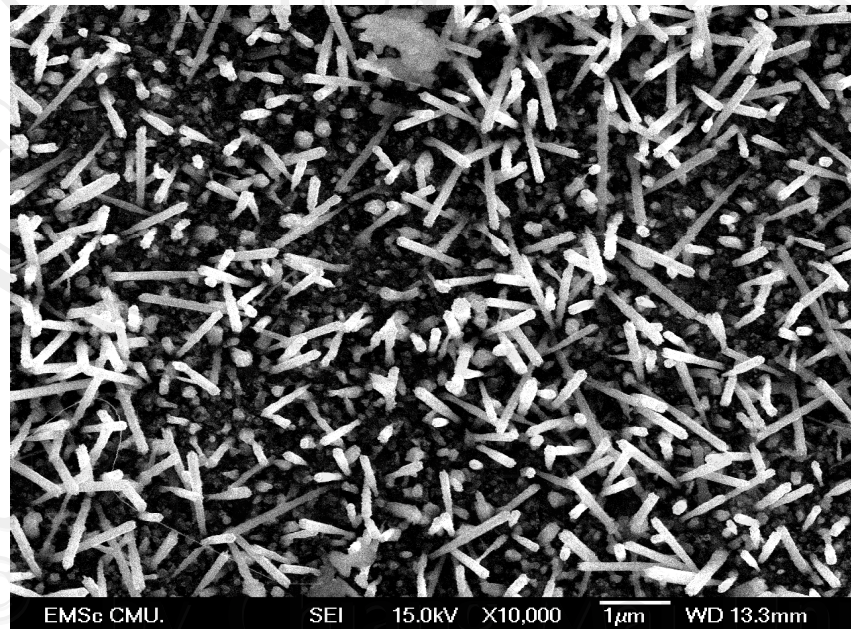
ตารางที่ 4.3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการปลูก ZnO nanowires

Sample	Zn layer (g)	Acetone flow rate (scm)
Sample a	0.125	12.5
Sample b	0.125	25
Sample c	0.125	50
Sample d	0.25	12.5
Sample e	0.25	25
Sample f	0.25	50
Sample g	0.5	12.5
Sample h	0.5	25
Sample i	0.5	50

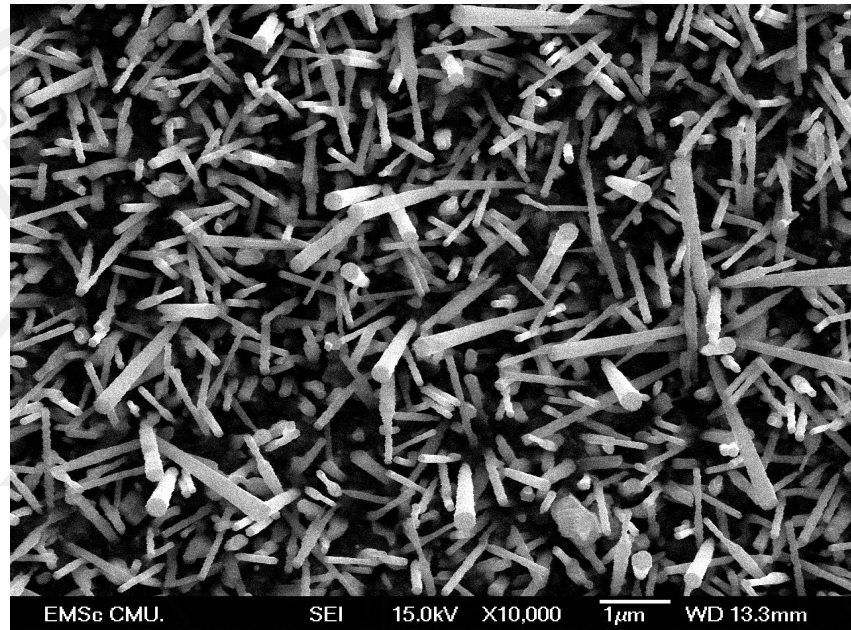
และนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3.1-4.3.3



(a)

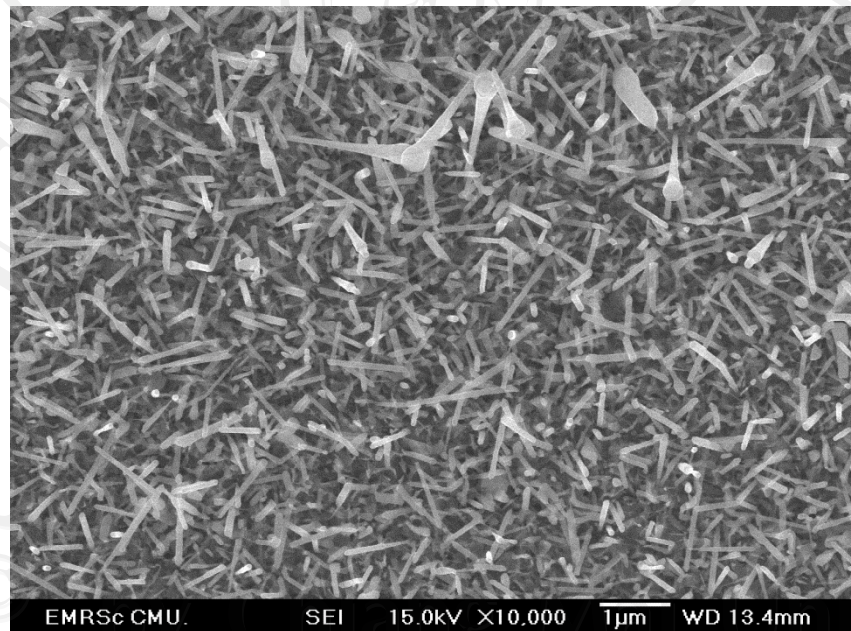


(b)

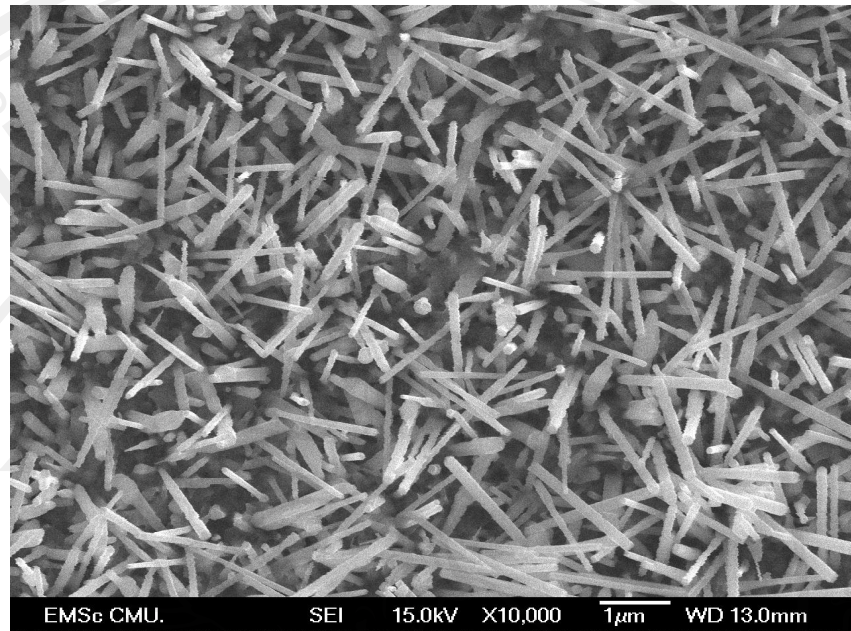


(c)

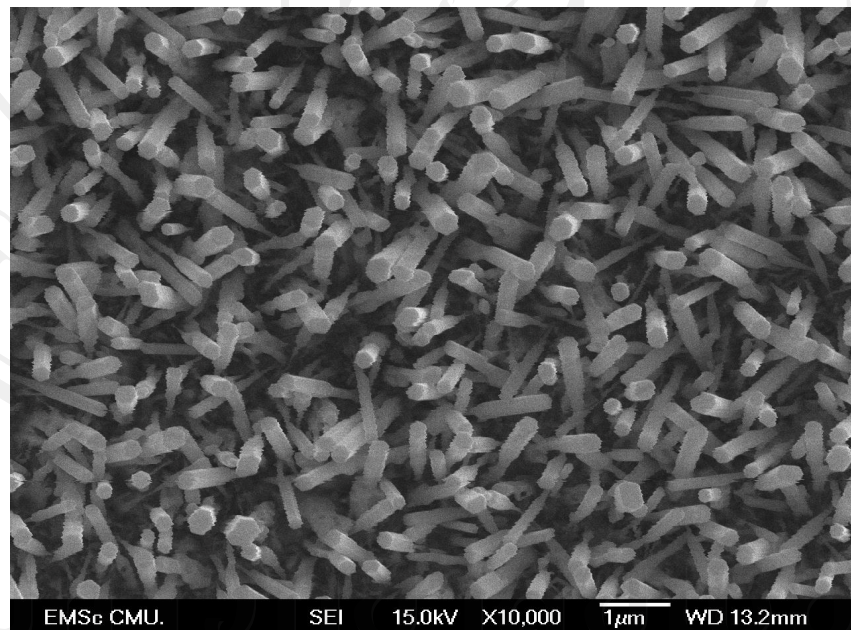
รูปที่ 4.3.1 (a-c) ลักษณะ ZnO nanowires ที่เจือปน Zn layer 0.125g และ acetone flow rate 12.5, 25 และ 50 sccm ตามลำดับ



(d)

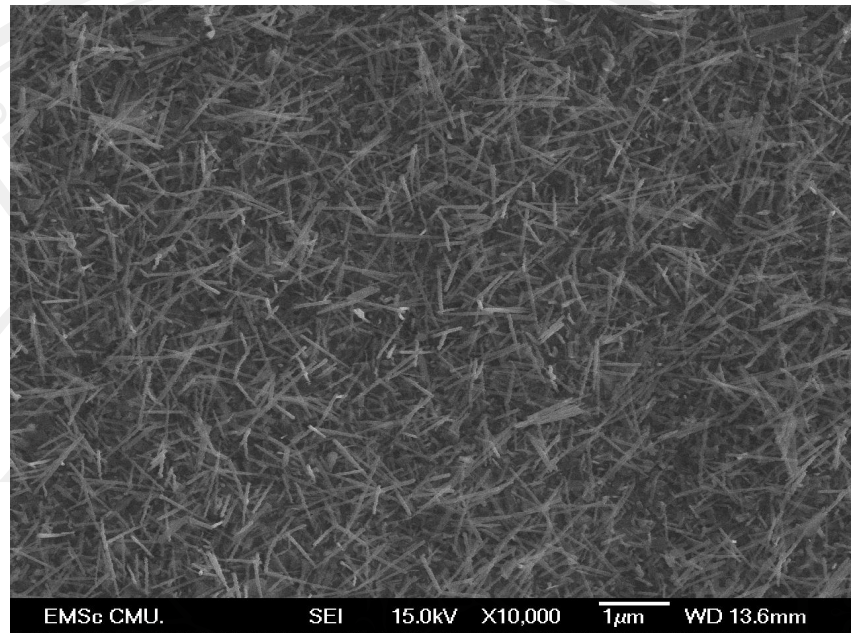


(e)

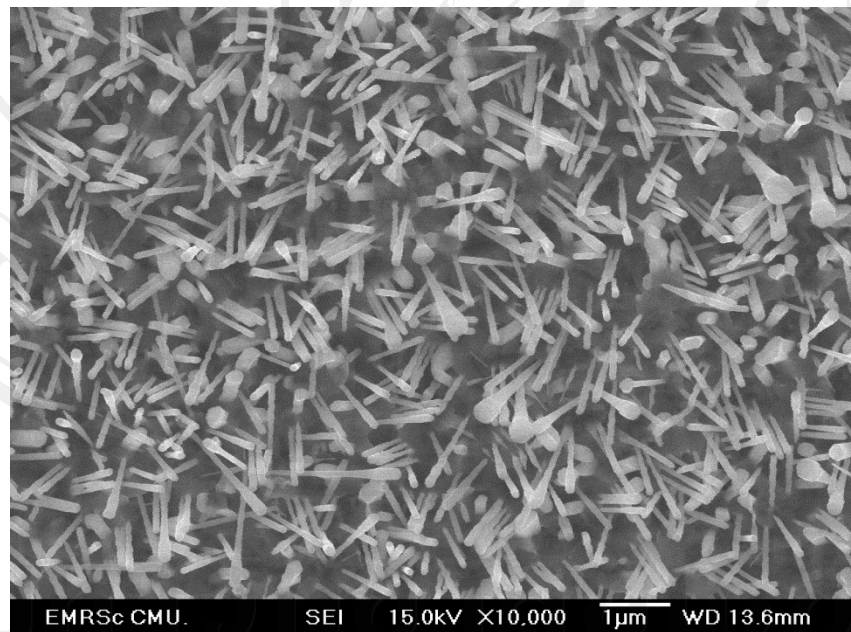


(f)

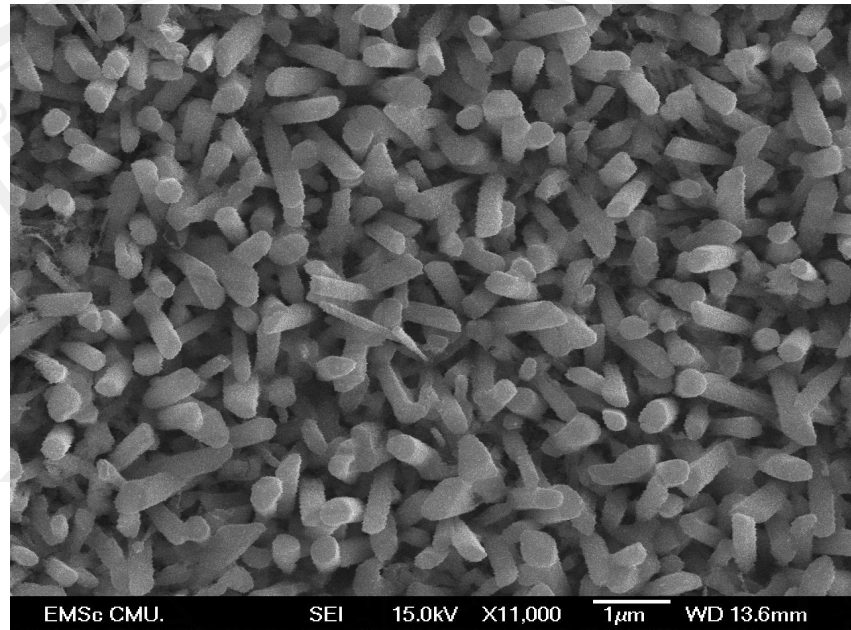
รูปที่ 4.3.2 (d-f) ลักษณะ ZnO nanowires ที่ขึ้นไข Zn layer 0.25g และ acetone flow rate 12.5, 25 และ 50 sccm ตามลำดับ



(g)



(h)



(i)

รูปที่ 4.3.3 (g-i) ลักษณะ ZnO nanowires ที่เจือไนซ์ Zn layer 0.5g และ acetone flow rate 12.5, 25 และ 50 sccm ตามลำดับ

ผล FE-SEM จากรูปที่ 4.3.1-4.3.3 สามารถวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ZnO nanowires จาก sample a –sample i ซึ่งผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ZnO nanowires แสดงดังตารางที่ 4.3.2

ตารางที่ 4.3.2 แสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ZnO nanowires

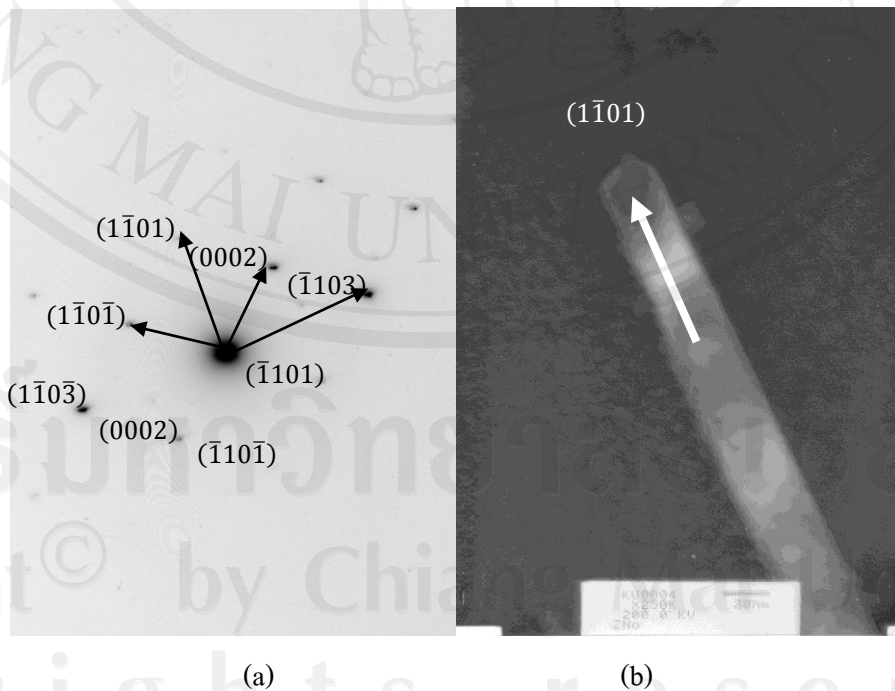
Sample	Min. diameter (nm)	Max. diameter (nm)	Average diameter (nm)	Standard deviation
Sample a	101.64	174.6	134.76	14.05
Sample b	107.1	179.66	145.67	15.48
Sample c	80.65	294.33	156.31	53.76
Sample d	53.37	102.14	72.18	8.82
Sample e	79.37	185.11	120.47	22.57
Sample f	168.73	366.46	264.02	40.29
Sample g	31.5	61.5	45.47	6.14
Sample h	60.41	96.31	81.09	7.64
Sample i	193.43	470.82	319.41	46.84



จากผลการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ZnO nanowires พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอะซิโตนให้แก่ระบบในการปลูก ZnO nanowires ทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ZnO nanowires มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก super-saturation ratio ซึ่งมีผลต่อขนาดและลักษณะของ ZnO nanowires โดยเมื่ออัตราการไหลของอะซิโตนที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้น ทำให้ในระบบมีในส่วนของความดัน  $O_2$  เพิ่มมากขึ้นทำให้ super-saturation ratio มีค่ามากขึ้นมีผลต่อการเกิด ZnO nanowires ทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้น ในขณะที่เมื่ออัตราการไหลของอะซิโตนที่ให้แก่ระบบมีค่าน้อย ทำให้ความดัน  $O_2$  ต่ำ และ super-saturation ratio มีค่าต่ำ เส้นผ่านศูนย์กลางที่เกิดขึ้นก็จะมีขนาดเล็กนั่นเอง

#### 4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

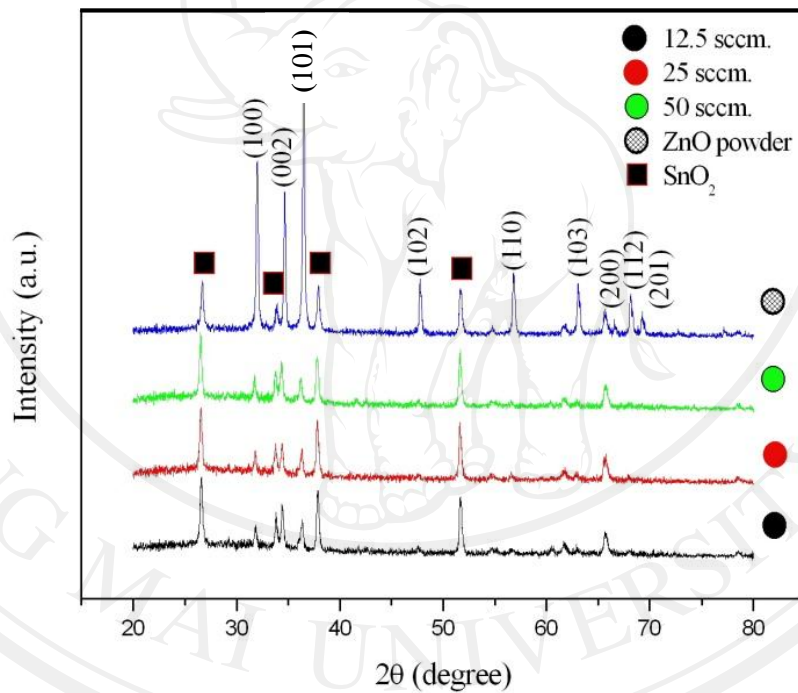
จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนแบบเลือกพื้นที่ (selected area electron diffraction ; SAED) ของ ZnO nanowires ที่ได้จากการปลูกบนกระจกนำไฟฟ้า โดยจากเงื่อนไขที่ฟิล์มซิงก์หนา 0.5g และให้อัตราการไหลของอะซิโตนที่ 50 sccm ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนที่วิเคราะห์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3.4 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก) ซึ่งตรงกับระนาบ  $(1\bar{1}0\bar{1})$ ,  $(1\bar{1}01)$ ,  $(0002)$  และ  $(\bar{1}103)$  สอดคล้องกับการเลี้ยวเบนของซิงก์ออกไซด์ในฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 89-1397 มีโครงสร้างแบบ hexagonal structure การเกิด ZnO nanowires มีการเกิดในทิศทาง  $(1\bar{1}01)$



รูปที่ 4.3.4 a) SEAD pattern ของ ZnO nanowires b) รูป TEM ของ ZnO nanowires

#### 4.3.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

ผลการศึกษาโครงสร้างทางผลึกด้วย XRD โดยใช้ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ( $\lambda$ ) เท่ากับ 1.54056 Å ผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3.5 พบว่า สารที่สังเคราะห์เป็นซิงก์ออกไซด์โดยได้เทียบกับข้อมูลมาตรฐานของ Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS)-International Centre for Diffraction Data เพื่อยืนยันผลที่อ่านได้ ซึ่งผลทั้งหมดที่ปรากฏขึ้นดังรูปที่ 4.3.5 พบว่าโครงสร้างของ ZnO nanowires ที่ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ hexagonal เทียบกับ ZnO no. 89-1397 JCPDS ค่า lattice parameter  $a = 3.253$  Å และ  $c = 5.213$  Å และยังมีฟีดของ SnO<sub>2</sub> ปะปนด้วยเนื่องจากกระจกนำไฟฟ้า โดยที่ผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.3.3



รูปที่ 4.3.5 ผล XRD ของ ZnO powder และ ZnO nanowires ที่ปลูกที่เงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 4.3.3 ค่า lattice parameter จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของ ZnO powder และ ZnO nanowires

conditions	2 Theta	d-spacing (Å)	The lattice parameter					
			ผลการวิเคราะห์		JCPDS ZnO no. 89-1397		ความคลาดเคลื่อน	
			a (Å)	c (Å)	a (Å)	c (Å)	a	c
powder	31.85	2.80634	3.248	5.190	3.253	5.213	0.153%	0.441%
	34.51	2.59587						
	36.35	2.46858						
	47.62	1.90733						
	56.69	1.62181						
	62.93	1.47516						
	66.43	1.40567						
	68.02	1.37663						
	69.17	1.35652						
12.5 sccm	31.79	2.8115	3.243	5.209	3.253	5.213	0.310%	0.076%
	34.39	2.60465						
	36.34	2.46924						
	47.57	1.90922						
	56.68	1.62207						
	62.92	1.47537						
	66.51	1.40417						
	68	1.37698						
	69.15	1.35687						
25 sccm	31.66	2.82275	3.244	5.220	3.253	5.213	0.169%	0.134%
	34.3	2.61128						
	36.2	2.47846						
	47.47	1.91301						

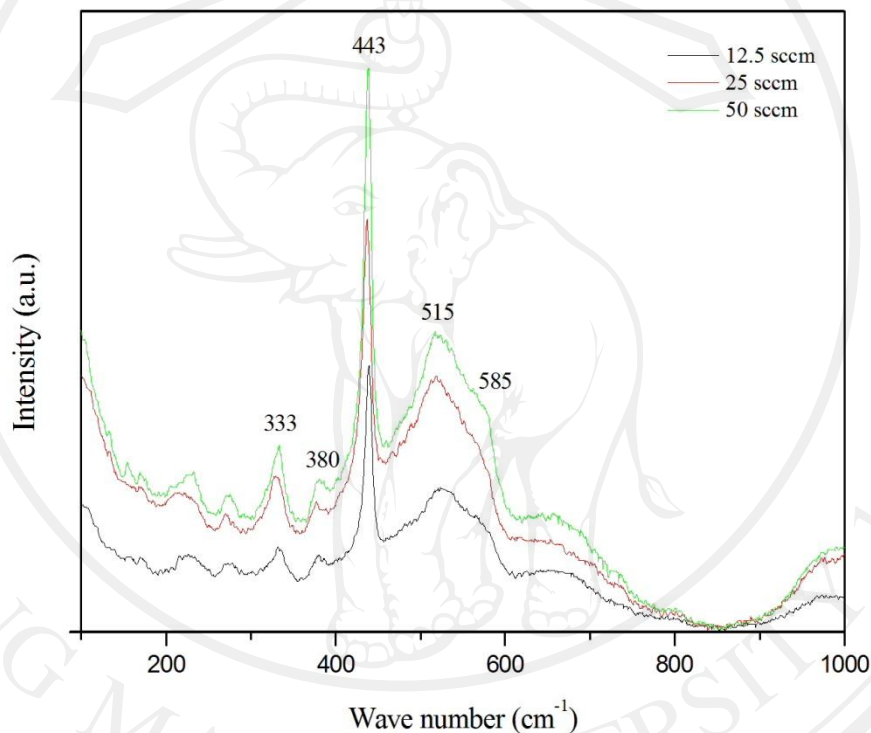
ตารางที่ 4.3.3 (ต่อ)

conditions	2 Theta	d-spacing (Å)	The lattice parameter					
			ผลการวิเคราะห์		JCPDS ZnO no. 89-1397		ความคลาดเคลื่อน	
			a (Å)	c (Å)	a (Å)	c (Å)	a	c
	56.49	1.62707						
	62.8	1.4779						
	66.23	1.40943						
	67.81	1.38038						
	69.19	1.35618						
50 sccm	31.57	2.83059	3.244	5.240	3.253	5.213	0.284%	0.518%
	34.17	2.62092						
	36.05	2.48843						
	47.54	1.91036						
	56.44	1.62839						
	62.82	1.47748						
	66.23	1.40943						
	67.9	1.37877						
	69.06	1.35841						

#### 4.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ ZnO nanowires

##### 4.4.1 การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

จากผลของรามานสเปกโทรสโคปี ได้ผลดังรูปที่ 4.3.6 ซึ่งผลที่ได้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบของชิ้นงาน sample g, sample h และ sample i คือ ความหนาฟิล์มซิงก์ 0.5 g และอัตราการไหลของอะซิโตนที่ 12.5, 25 และ 50 sccm ตามลำดับ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์มีขนาดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.4.1 แสดงรามานสเปกตรัมของเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ของชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม 0.5 g และอัตราการไหลของอะซิโตนที่ 12.5, 25 และ 50 sccm

จากผลการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาโหมดการสั่นของ ZnO nanowires แสดงดังตารางที่ 4.3.6 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของงานวิจัยอื่น ทำให้ว่า ZnO nanowires ที่ปรากฏที่ 333 cm<sup>-1</sup> เป็นโหมดที่เกิดจาก E<sub>2</sub> (high)-E<sub>2</sub> (low), 380 cm<sup>-1</sup> เป็นโหมด A<sub>1</sub> (TO), 443 cm<sup>-1</sup> เป็นโหมด E<sub>2</sub> (high) และที่ 585 cm<sup>-1</sup> เป็นโหมด E<sub>1</sub> (LO)

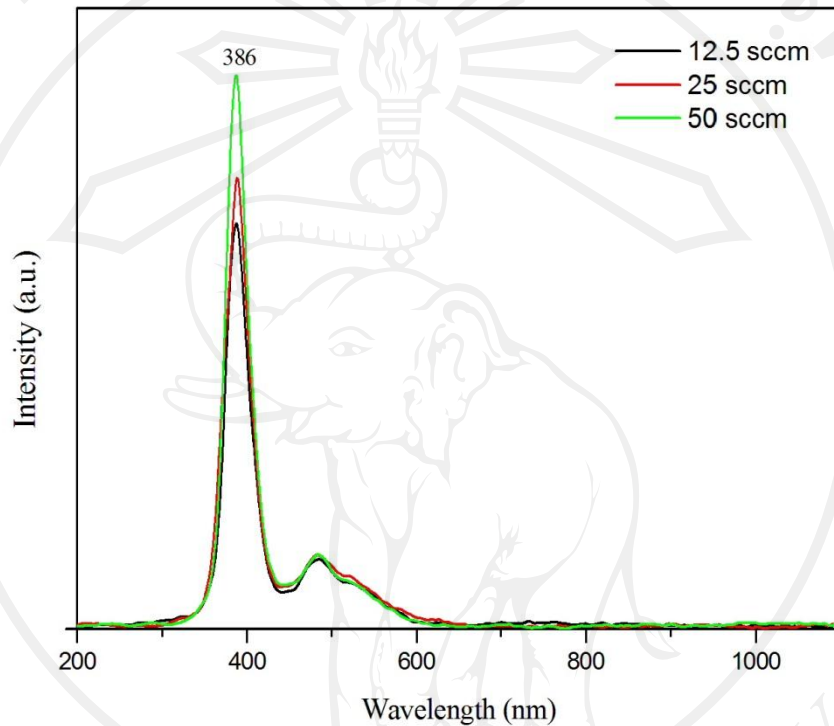
ตารางที่ 4.4.1 แสดงตำแหน่งเส้นสเปกตรัมของสาร ZnO nanowires

ZnO nanowires	Symmetry	อ้างอิง	อ้างอิง
333	$E_2$ (high)- $E_2$ (low)	331	331
385	$A_1$ (TO)	383	382
443	$E_2$ (high)	438	439
515	-	-	-
585	$E_1$ (LO)	584	580

จากตำแหน่งของเส้นสเปกตรัมที่ปรากฏ  $333\text{ cm}^{-1}$  เป็นโหมดที่เกิดจาก  $E_2$  (high)- $E_2$  (low),  $380\text{ cm}^{-1}$  เป็นโหมด  $A_1$  (TO),  $443\text{ cm}^{-1}$  เป็นโหมด  $E_2$  (high) และที่  $585\text{ cm}^{-1}$  เป็นโหมด  $E_1$  (LO) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่าเกิดการ shift ของตำแหน่งเส้นสเปกตรัมไปในความถี่ที่มากกว่า ซึ่งเรียกว่า “blue shift” และ intensity ของชิ้นงานที่ปรากฏสามารถอธิบายได้ถึงความหนาของชิ้นงานมากขึ้นมีผลต่อ intensity ที่เพิ่มมากขึ้น จากจากนี้ที่  $585\text{ cm}^{-1}$  เป็นโหมด  $E_1$  (LO) สามารถอธิบายได้ถึง Oxygen vacancy ของชิ้นงาน รวมถึงขนาดของเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ ดังนั้นจากการวิเคราะห์รามานสเปกโตรสโคปี ทำให้ทราบถึงสมบัติทางแสงที่น่าสนใจเมื่อขนาดของเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดการ shift ของโหมดการสั่น

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ PL spectroscopy (Photoluminescence spectroscopy)

ทำการศึกษาสมบัติทางแสงของชิ้นงานด้วยการวิเคราะห์ด้วย PL spectroscopy ซึ่งได้ทำการศึกษาชิ้นงานในเงื่อนไขที่ความหนาชั้นฟิล์มซิงก์ 0.5 g และอัตราการไหลอะซิโตนที่ 12.5, 25 และ 50 sccm ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.4.1

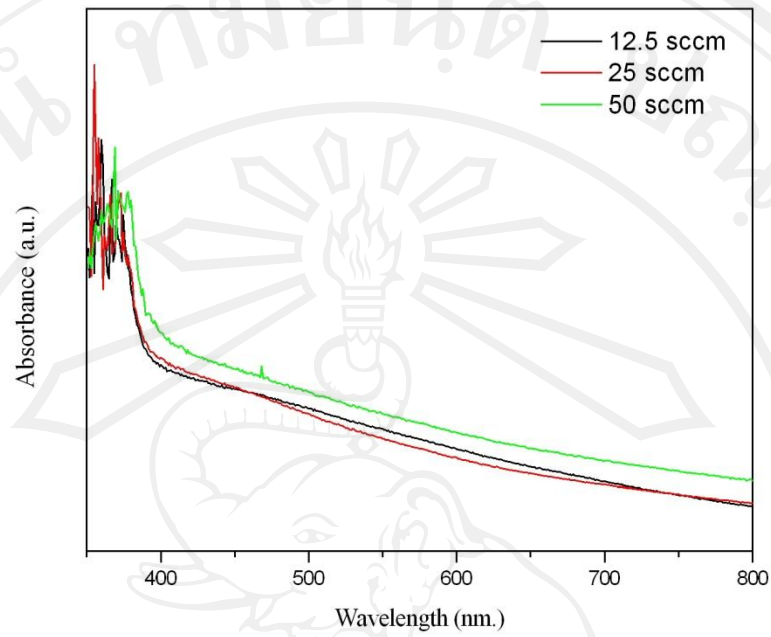


รูปที่ 4.4.2 photoluminescence ของชิ้นงานที่เงื่อนไขความหนาชั้นฟิล์มซิงก์ 0.5 g และอัตราการไหลอะซิโตนที่ 12.5, 25 และ 50 sccm

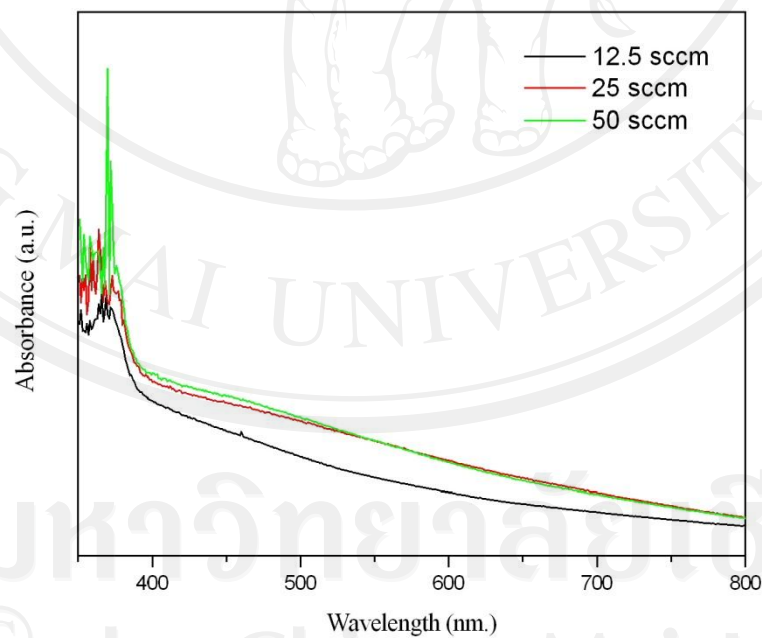
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานที่เงื่อนไขต่างๆพบพีคหลักที่เป็นลักษณะของ ZnO nanowires ที่ตำแหน่ง 386 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นที่ 384 nm [42] และ 385 nm [43] นอกจากนี้ยังพบพีคในช่วง 450-550 nm ซึ่งเกิดจาก Oxygen vacancy

#### 4.4.3 การวิเคราะห์อัตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทสโคปี (Ultraviolet-Visible Spectroscopy, UV-vis spectroscopy)

ทำการศึกษาสมบัติทางแสงของชิ้นงานด้วยการวิเคราะห์ด้วย UV-vis spectroscopy โดยทำการวัดการดูดกลืนสเปกตรัมของแสง (absorbance) ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงดังแสดงในรูปที่ 4.4.2 -4.4.4

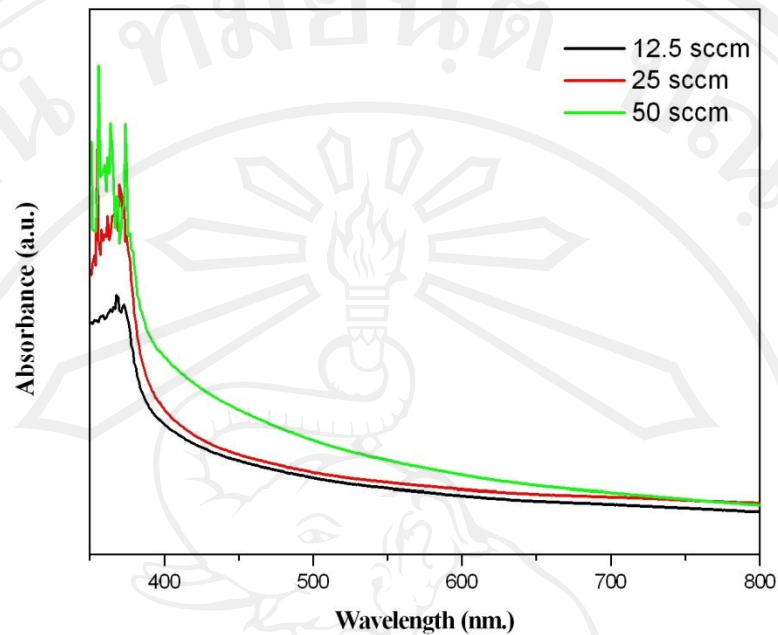


รูปที่ 4.4.3 การดูดกลืนสเปกตรัมของแสงของ ZnO nanowires จากฟิล์มซิงก์ 0.125g



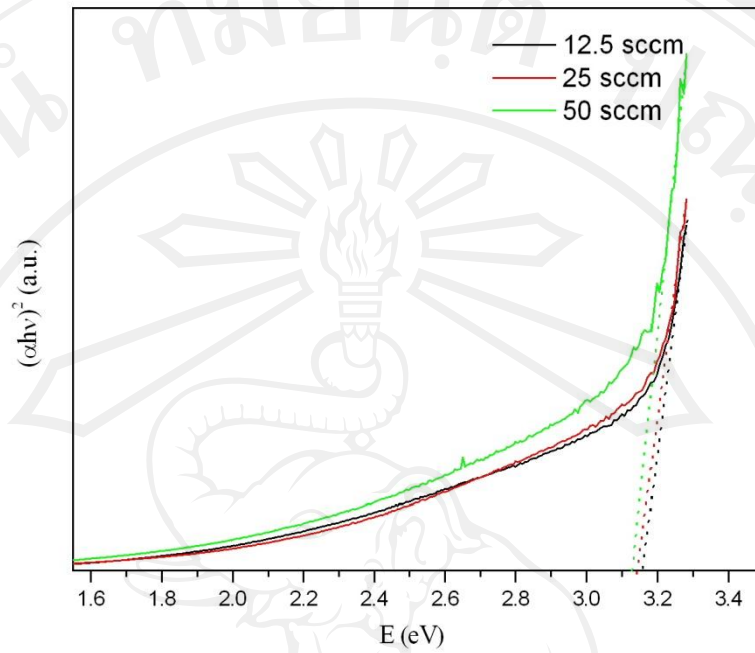
รูปที่ 4.4.4 การดูดกลืนสเปกตรัมของแสงของ ZnO nanowires จากฟิล์มซิงก์ 0.25g



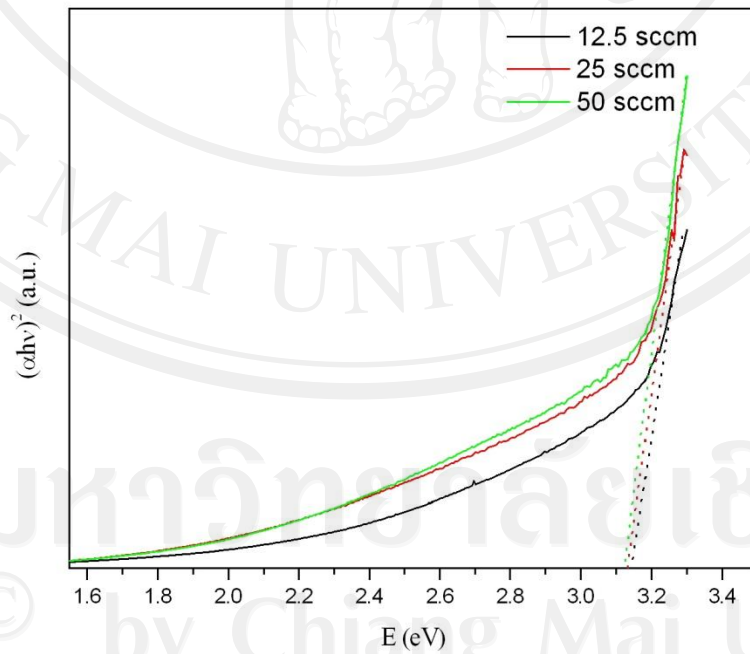


รูปที่ 4.4.5 การดูดกลืนสเปกตรัมของแสงของ ZnO nanowires จากฟิล์มซิงก์ 0.5g

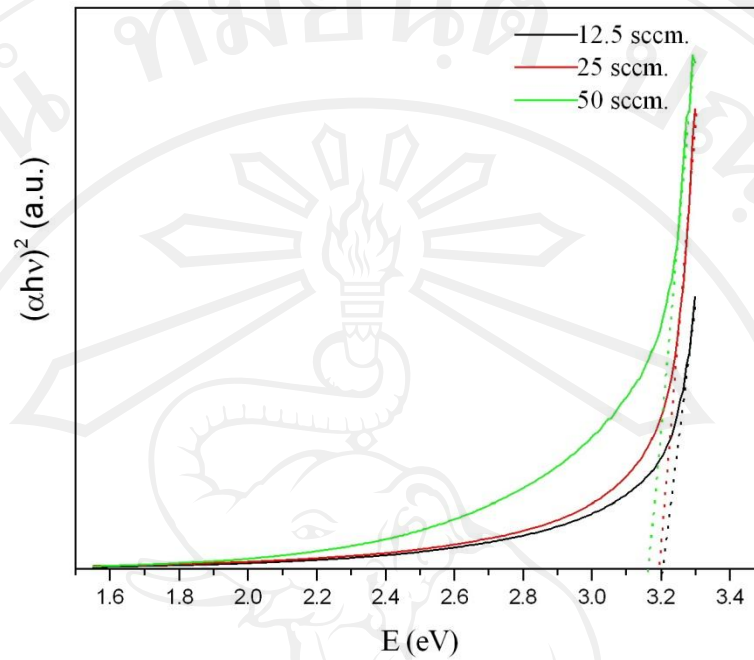
จากรูปที่ 4.4.3-4.4.5 แสดงการดูดกลืนสเปกตรัมของแสง ZnO nanowires ที่ได้จากการปลูกในเงื่อนไขต่างๆ พบว่า ในแต่ละเงื่อนไขของความหนาฟิล์มซิงก์ที่ใช้ในการปลูก ZnO nanowires เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของอะซิโตนเพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ ZnO nanowires เพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการ shift ของ absorption edges โดยที่มีการ shift ไปในทิศทางที่ความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้น และจากผลการดูดกลืนสเปกตรัมของแสง สามารถนำไปศึกษาหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 4.4.6-4.4.8 และค่าช่องว่างแถบพลังงานแสดงดังตารางที่ 4.4.1



รูปที่ 4.4.6 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires ที่มีฟิล์มซิงก์ 0.125g



รูปที่ 4.4.7 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires ที่มีฟิล์มซิงก์ 0.25g



รูปที่ 4.4.8 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires ที่มีฟิล์มซิงค์ 0.5g

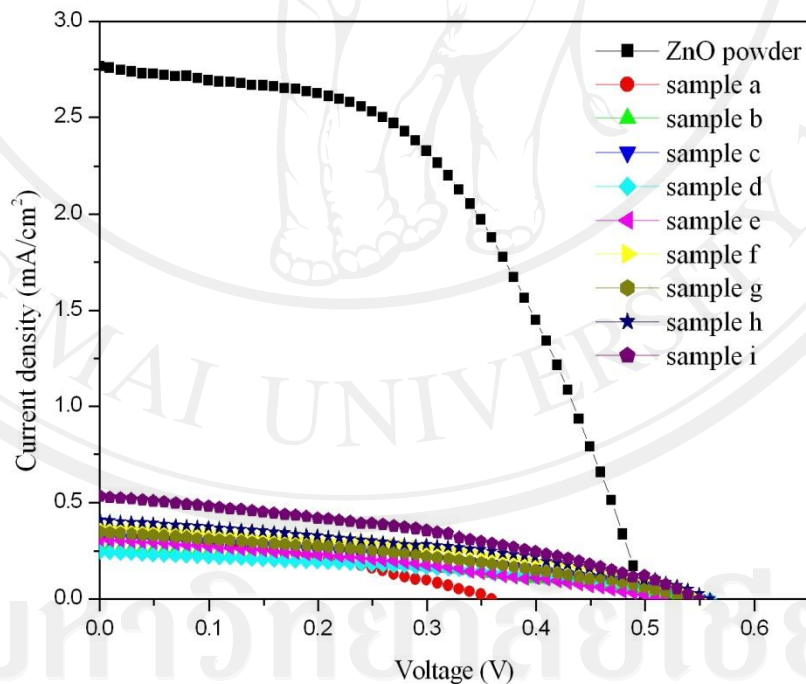
ตารางที่ 4.4.2 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires

sample	E (eV)
sample a	3.15
sample b	3.13
sample c	3.12
sample d	3.16
sample e	3.14
sample f	3.13
sample g	3.20
sample h	3.19
sample i	3.16

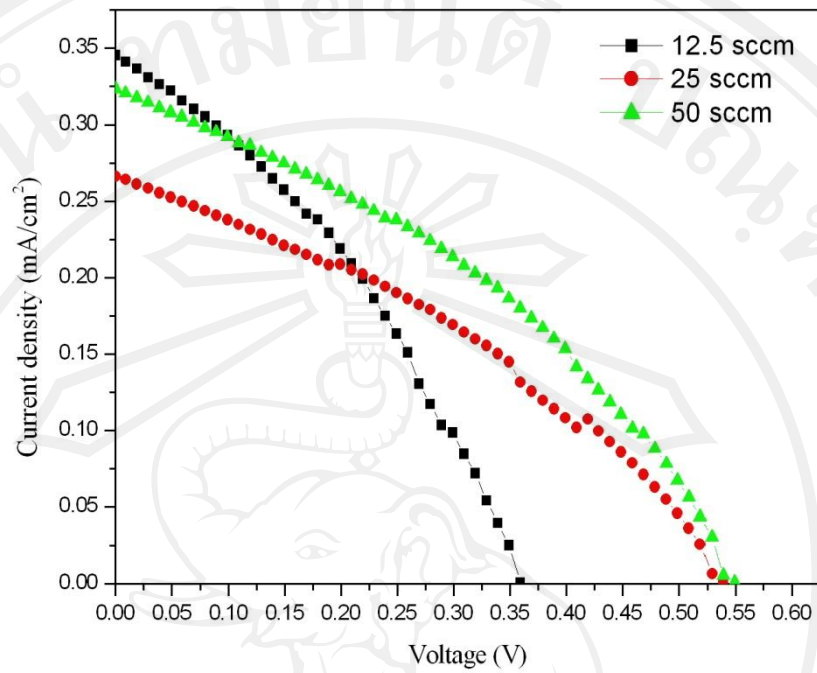
จากค่าช่องว่างแถบพลังงานในตารางที่ 4.4.1 พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ ZnO nanowires ที่ปลูกบนกระจกนำไฟฟ้าได้นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 3.12-3.20 eV โดยที่ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของอะซิโตน เมื่อมีอัตราการไหลของอะซิโตนมากขึ้น ทำให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ ZnO nanowires มีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง ถ้าอัตราการไหลของอะซิโตนลดลง ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ZnO nanowires ที่ได้มีขนาดเล็กลง และค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่ามากขึ้นตาม

#### 4.5 การศึกษาความสามารถการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ ZnO nanowires

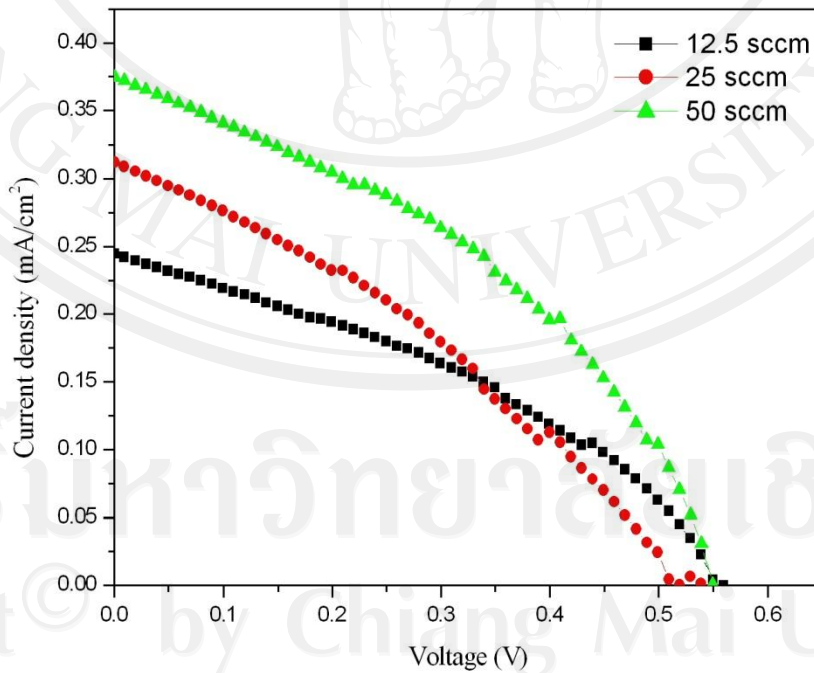
เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการเปรียบเทียบ I-V characteristic curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO powder ที่เตรียมด้วยวิธีการสกรีน และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการปลูก ZnO nanowires ลงบนกระจกนำไฟฟ้าที่เงื่อนไขการปลูกต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5.1-4.5.4 และสามารถคำนวณค่า  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$  และ  $Eff$  ดังตารางที่ 4.5.1



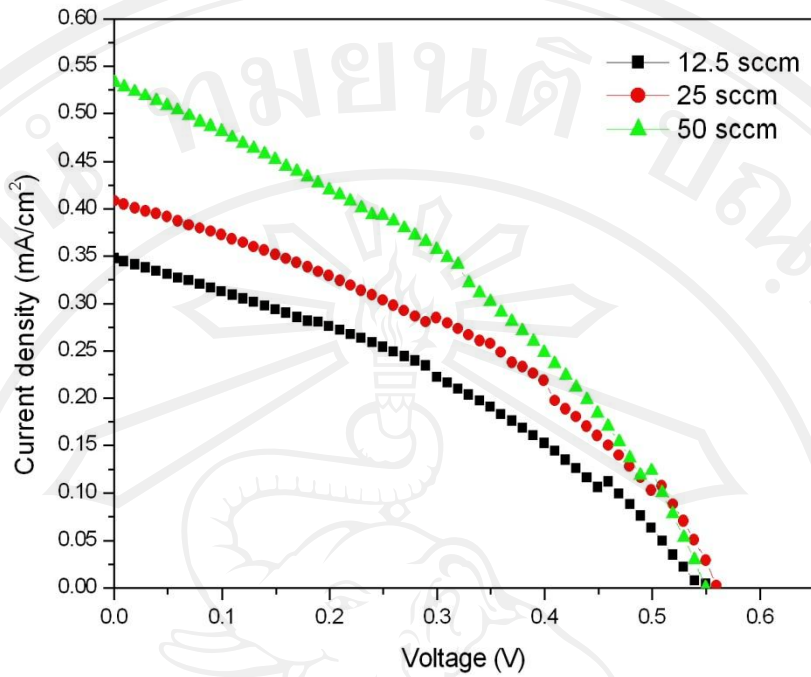
รูปที่ 4.5.1 แสดงการเปรียบเทียบ I-V characteristic curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO powder และ ZnO nanowires ที่ปลูกที่เงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 4.5.2 แสดงการเปรียบเทียบ I-V characteristic curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO nanowires ที่เตรียมจากฟิล์มซิงค์ 0.125g



รูปที่ 4.5.3 แสดงการเปรียบเทียบ I-V characteristic curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO nanowires ที่เตรียมจากฟิล์มซิงค์ 0.25g



รูปที่ 4.5.4 แสดงการเปรียบเทียบ I-V characteristic curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จาก ZnO nanowires ที่เตรียมจากฟิล์มซิงก์ 0.5g

ตารางที่ 4.5.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF และ efficiency ของเซลล์แสงอาทิตย์

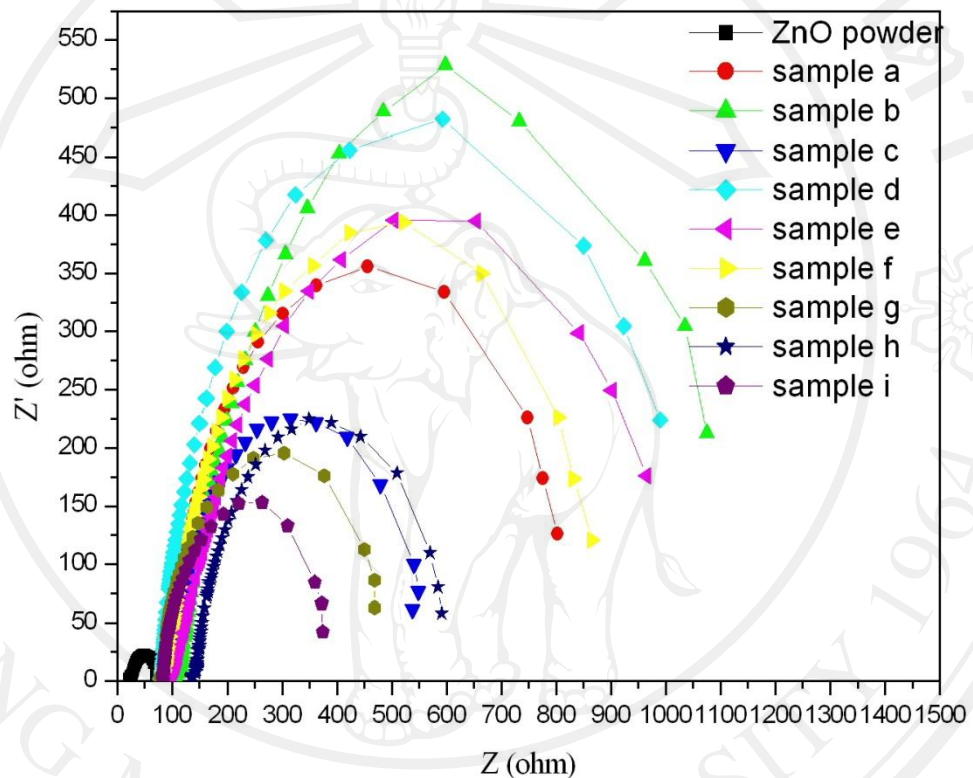
Sample	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	Eff(%)	Note
ZnO powder	2.7658	0.4993	0.5091	0.7031	Ref.
sample a	0.3453	0.3595	0.3528	0.0438	
sample b	0.2664	0.5392	0.3566	0.0512	
sample c	0.3228	0.5489	0.3692	0.0654	
sample d	0.2446	0.5592	0.3721	0.0509	
sample e	0.3121	0.5193	0.3336	0.0541	
sample f	0.3745	0.5493	0.4002	0.0823	
sample g	0.3478	0.5394	0.3617	0.0679	
sample h	0.4083	0.5592	0.3945	0.0901	
sample i	0.5326	0.5495	0.3722	0.1089	Max

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมจาก ZnO powder กับ ZnO nanowires พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง จาก ZnO powder ที่เป็นตัวอ้างอิงมีประสิทธิภาพมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง จาก ZnO nanowires มาก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง จาก ZnO nanowires ที่เตรียมนั้นมีความหนาของ ZnO electrode น้อยมาก ทำให้การที่สีข้อมมาเกาะที่ ZnO electrode นั้นน้อย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพที่ได้ก็น้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสง ที่เป็นตัวอ้างอิงมาก โดยที่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงจาก ZnO nanowires ที่มากที่สุดคือที่เงื่อนไข ฟิล์มซิงก์หนา 0.5g และอัตราการไหลของอะซิโตน 50 sccm ให้ค่ากระแสมากที่สุด 0.5326 mA/cm<sup>2</sup> และค่าประสิทธิภาพมากที่สุด 0.1089 %

#### 4.6 การศึกษาลักษณะเซลล์เคมีไฟฟ้าของ ZnO nanowires

##### 4.6.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า

การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซกซ์เคมีไฟฟ้าในการทดลองทำการรบกวนระบบด้วยค่าความต่างศักย์ 10 mV Bias แบบ reveres light ศึกษาค่าความถี่ตั้งแต่ 10,000 - 1 Hz ได้ผลการศึกษายเป็นดังรูปที่ 4.6.1



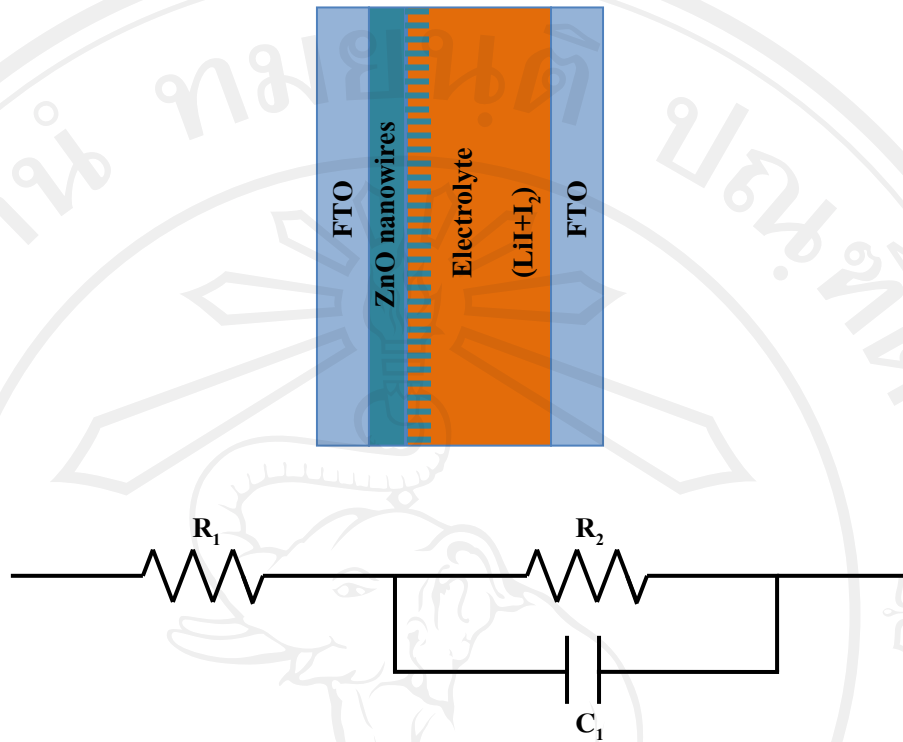
รูปที่ 4.6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจริง (Z) กับส่วนจินตภาพ (Z') ของอิมพีแดนซ์ (Nyquist plot) ของ ZnO powder เทียบกับ ZnO nanowires

จากรูปที่ 4.6.1 จะเห็นได้ว่ามี loop เกิดขึ้น โดยที่ loop ของ ZnO powder ที่เป็นเซลล์มาตรฐานนั้นมีขนาด loop เล็ก ซึ่งแสดงถึงค่าความต้านทานของเซลล์มีค่าน้อย โดยที่ขนาดของ loop ของเซลล์จาก ZnO nanowires นั้นมีขนาดใหญ่ ซึ่งมีค่าความต้านทานมากนั่นเอง

##### 4.6.2 การจำลองเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Z-View

จากรูปที่ 4.6.1 เราทำการสมมุติให้มี loop เกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากชั้นของสารกึ่งตัวนำ จึงทำการเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังรูป 4.6.2 เราสามารถจำลองเซลล์ไฟฟ้าเคมีของเราใน equivalent circuits mode ได้ดังนี้

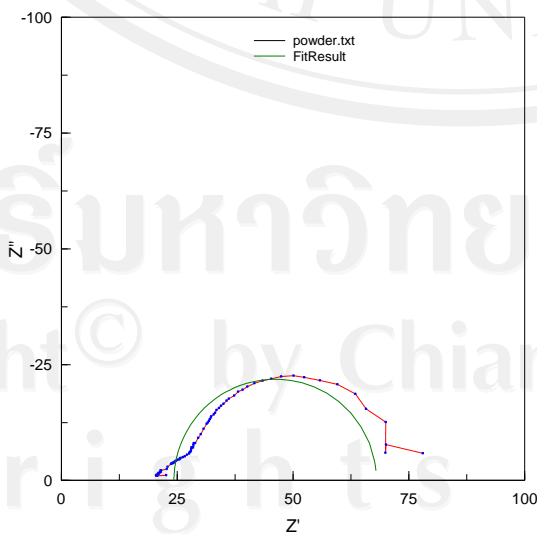




รูปที่ 4.6.2 เซลล์ไฟฟ้าเคมีจำลองใน equivalent circuits mode

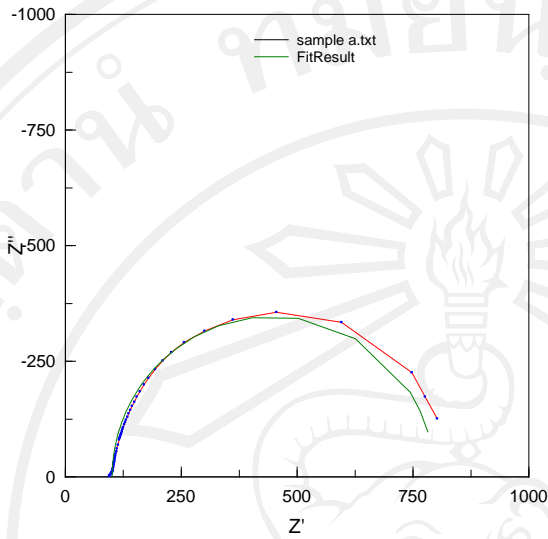
- โดย  $R_1$  คือ ความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้า  
 $R_2$  คือ ความต้านทานของ ZnO nanowires  
 $C_1$  คือ ความต่างประจุระหว่าง ZnO nanowires และสารละลายอิเล็กโทรไลต์

**ZnO powder**



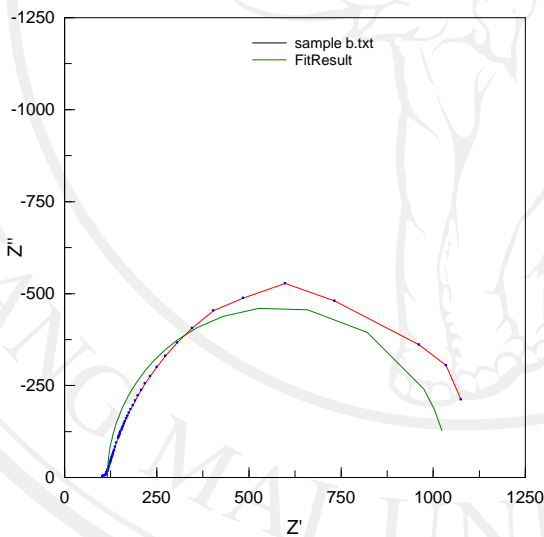
Chi-Squared 0.061926		
Sum of Sqr 9.7223		
	Data	Error%
$R_1$	24.32	1.1111
$R_2$	43.71	3.1352
$C_1$	0.0001732	3.3395

sample a



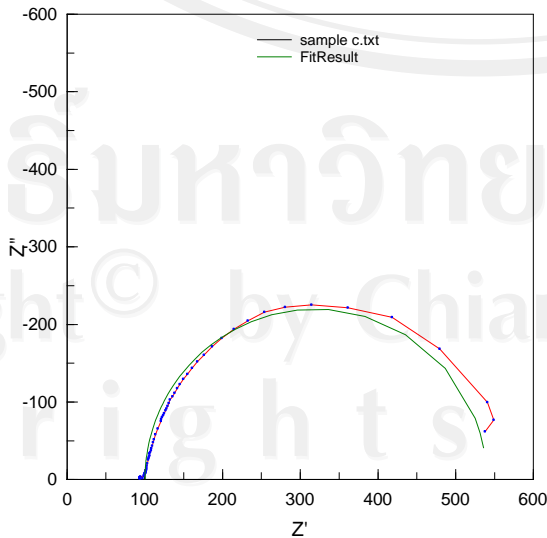
Chi-Squared 0.061926		
Sum of Sqr 1.2583		
	Data	Error%
$R_1$	101	0.080147
$R_2$	695.1	1.4248
$C_1$	3.261E-05	0.80917

Sample b



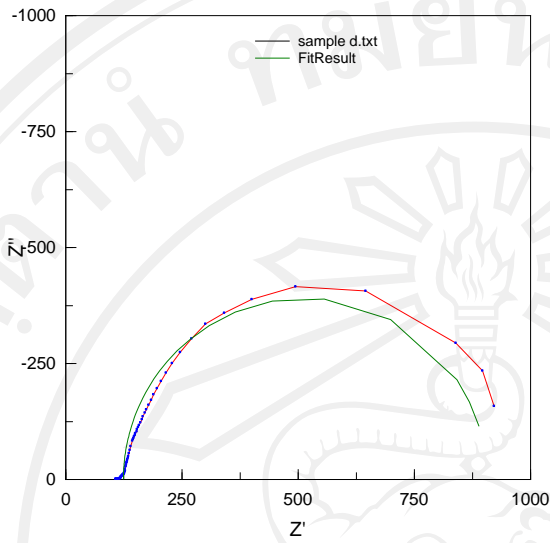
Chi-Squared 0.025473		
Sum of Sqr 3.9993		
	Data	Error%
$R_1$	116.1	0.85773
$R_2$	925.4	2.535
$C_1$	2.4064E-05	1.4237

sample c



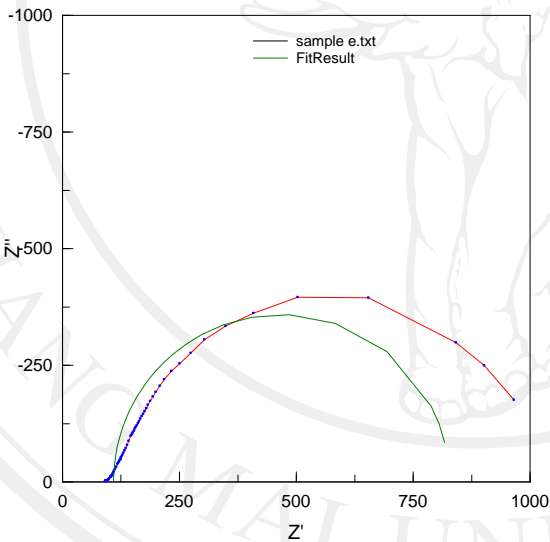
Chi-Squared 0.0081173		
Sum of Sqr 1.2739		
	Data	Error%
$R_1$	100.2	0.44579
$R_2$	439.5	1.304
$C_1$	3.3641E-05	0.89798

sample d



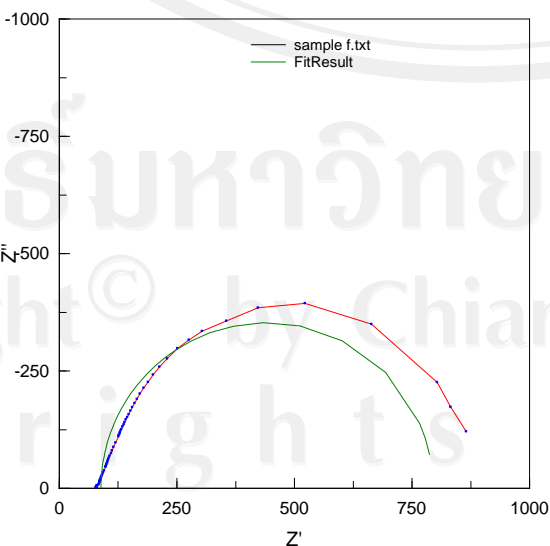
Chi-Squared 0.018765		
Sum of Sqr 2.9461		
	Data	Error%
$R_1$	124.1	0.65104
$R_2$	782.2	2.153
$C_1$	3.0544E-05	1.2457

sample e



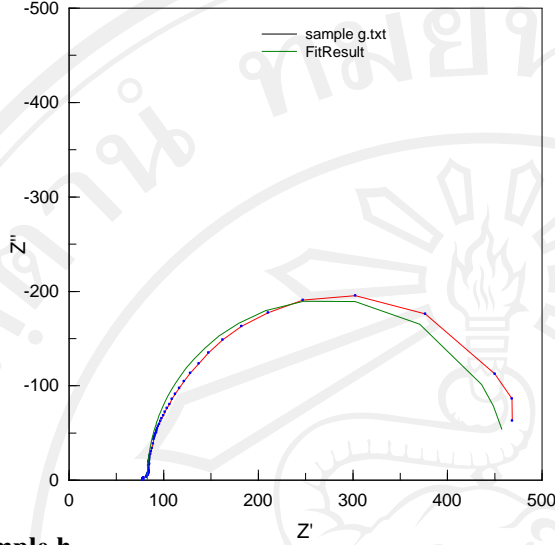
Chi-Squared 0.060929		
Sum of Sqr 9.5658		
	Data	Error%
$R_1$	109.3	1.3227
$R_2$	781.1	3.6119
$C_1$	2.6506E-05	2.3091

sample f



Chi-Squared 0.038632		
Sum of Sqr 6.0653		
	Data	Error%
$R_1$	88.53	1.1897
$R_2$	706	2.9487
$C_1$	3.2023E-05	1.8195

sample g

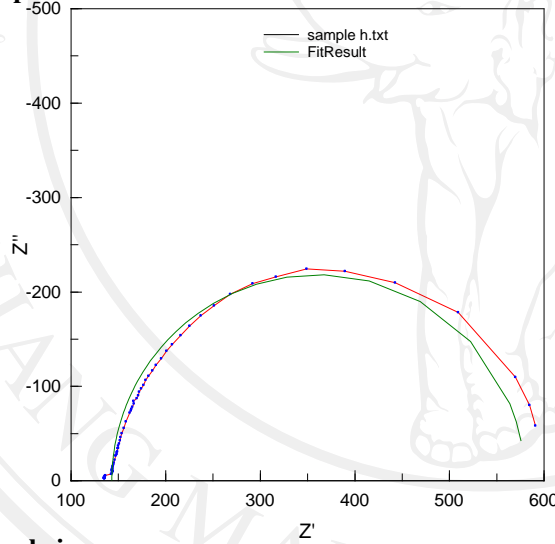


Chi-Squared 0.0074632

Sum of Sqr 1.1717

	Data	Error%
$R_1$	82.52	0.36608
$R_2$	382.8	1.317
$C_1$	5.9662E-05	0.82927

sample h

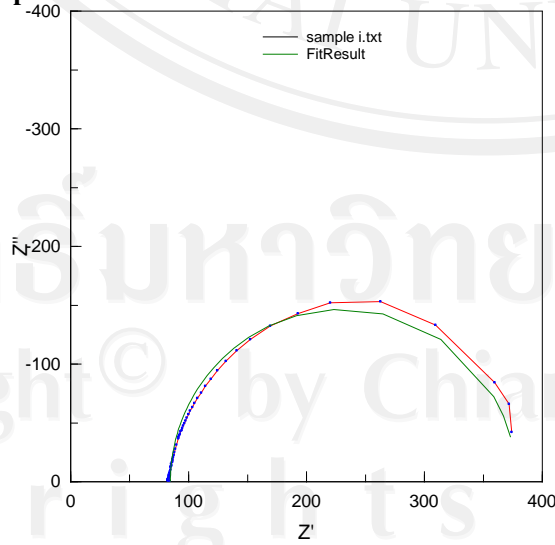


Chi-Squared 0.0093212

Sum of Sqr 1.4634

	Data	Error%
$R_1$	143.1	0.40317
$R_2$	436.6	1.3743
$C_1$	3.5448 E-05	1.0298

sample i



Chi-Squared 0.0037746

Sum of Sqr 0.59262

	Data	Error%
$R_1$	84.58	0.23785
$R_2$	293.4	0.9119
$C_1$	7.1612 E-05	0.62425

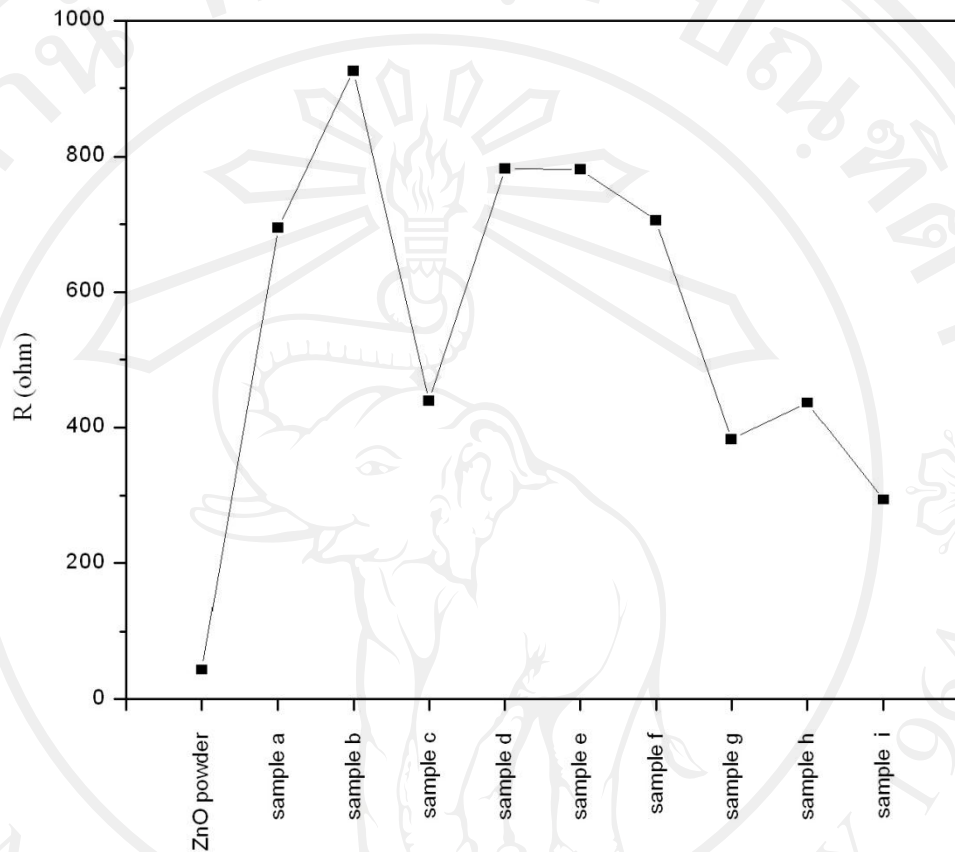
รูปที่ 4.6.3 แสดงระหว่างข้อมูลจริงกับการจำลองข้อมูลในโปรแกรม Z-View

ตารางที่ 4.6.1 แสดงผลค่าความต้านทาน (R) ความเก็บประจุ (C) ที่ได้จากโปรแกรม Z-View

sample	R (ohm)		C (coulomb)	T
	$R_1$	$R_2$	$C_1$	$(R_2 \times C_1)$ (msec)
ZnO powder	24.32	43.71	17.32E-05	0.007571
sample a	101	695.1	3.261E-05	0.022667
sample b	116.1	925.4	2.4064E-05	0.022269
sample c	100.2	439.5	3.3641E-05	0.014785
sample d	124.1	782.2	3.0544E-05	0.023892
sample e	109.3	781.1	2.6506E-05	0.020704
sample f	88.53	706	3.2023E-05	0.022608
sample g	82.52	382.8	5.9662E-05	0.022839
sample h	143.1	436.6	3.5448E-05	0.015477
sample i	84.58	293.4	7.1612E-05	0.021011

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6.1  $R_1$  คือ ค่าความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้าชนิด FTO พบว่าเมื่อมีการปลูก ZnO nanowires ด้วยกระบวนการ chemical vapor deposition (CVD) บนกระจกนำไฟฟ้า ค่า  $R_1$  ของกระจกนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า  $R_1$  ของกระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมด้วยวิธีการสกรีน ZnO powder ที่เป็นเซลล์มาตรฐาน เนื่องจากมีการเกิดขึ้นของ ZnO บนกระจกนำไฟฟ้าในบริเวณพื้นผิวที่นอกเหนือจากบริเวณที่ต้องการควบคุม จึงทำให้มีการเพิ่มขึ้นของค่า  $R_1$  มากขึ้น  $R_2$  คือ ค่าความต้านทานของชั้นกึ่งตัวนำ ZnO nanowires ซึ่งมีค่าแตกต่างจากค่าความต้านทานของเซลล์มาตรฐาน โดยที่ค่าน้อยที่สุดของ ZnO nanowires ที่เงื่อนไข sample i คือ 293.4 โอห์ม T คือ ระยะเวลาในการส่งผ่านของอิเล็กตรอน หน่วยเป็น msec ซึ่งที่เงื่อนไข sample i มีค่า T คือ 0.021011 msec

โดยที่ในงานวิจัยได้มีการศึกษาชั้นของสารกึ่งตัวนำ ZnO nanowires โดยได้นำค่าความต้านทานมาหาความสัมพันธ์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6.4



รูปที่ 4.6.4 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านทานกับ ZnO powder และ ZnO nanowires ที่เงื่อนไขต่างๆ

จากความสัมพันธ์ของความต้านทานกับ ZnO powder และ ZnO nanowires ที่เงื่อนไขต่างๆ ในกราฟที่ 4.7.1 พบว่าค่า R ของ ZnO nanowires ที่ปลูกได้ มีค่ามากกว่าค่า R ของ ZnO powder ที่เป็นเซลล์มาตรฐาน โดยที่ในแต่ละเงื่อนไขของความหนาของชั้นฟิล์มซิงก์ที่เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า ที่ให้อัตราไหลของอะซิโตนที่ 50 sccm ทำให้ค่า R ลดลง ดังที่เงื่อนไข sample c, sample f และ sample i

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6.2

ตารางที่ 4.6.2 ตารางสรุปผลการทดลอง

sample	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	Eff(%)	R ( $\Omega$ )	Eg (eV)	T2 x10 <sup>-5</sup> (msec)
ZnO powder	2.7658	0.4993	0.5091	0.7031	43.71	3.15	0.007571
sample a	0.3453	0.3595	0.3528	0.0438	695.1	3.13	0.022667
sample b	0.2664	0.5392	0.3566	0.0512	925.4	3.12	0.022269
sample c	0.3228	0.5489	0.3692	0.0654	439.5	3.16	0.014785
sample d	0.2446	0.5592	0.3721	0.0509	782.2	3.14	0.023892
sample e	0.3121	0.5193	0.3336	0.0541	781.1	3.13	0.020704
sample f	0.3745	0.5493	0.4002	0.0823	706	3.20	0.022608
sample g	0.3478	0.5394	0.3617	0.0679	382.8	3.19	0.022839
sample h	0.4083	0.5592	0.3945	0.0901	436.6	3.16	0.015477
sample i	0.5326	0.5495	0.3722	0.1089	293.4	3.15	0.021011