

การเตรียมข้อวิไลค์โทรดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวงไวแสง  
โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานที่แตกต่างกัน

นายวิกรม ศรีสุรกันต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PREPARATION OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELL ELECTRODES USING ZINC OXIDE  
NANOPARTICLES WITH VARIOUS MORPHOLOGY

Mr. Wikrom Srisurakarn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมตัวอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวงไวแสง
	โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ที่มีฐานที่แตกต่างกัน
โดย	นาย วิกรม ศรีสุรกันต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศฤทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพร โทณานนท์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วงศ์ ปวราจารย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์)

วิกรม ศรีสุภานันท์ : การเตรียมขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดวงไวแสง โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานที่แตกต่างกัน.

(PREPARATION OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELL ELECTRODES USING ZINC OXIDE NANOPARTICLES WITH VARIOUS MORPHOLOGY) อ. ที่ปรึกษา  
 วิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช,อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.ดร.  
 วัชชัย ชรินพานิชกุล, 135 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะสัณฐานแตกต่างกัน 12 สัณฐาน ได้แก่ สัณฐานทรงสี่เหลี่ยมที่มีความยาวขาแตกต่างกัน 3 สัณฐาน ทรงกลมกลวง ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นสี่เหลี่ยมซ้อนกัน ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งตัน ลวด แท่งตัน ท่อกลวงและแผ่นมีรูพรุน โดยทำการสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาในเฟสแก๊ส และเฟสของเหลว และนำซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ลักษณะโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการหักเหของรังสีเอกซ์เรย์ ซึ่งผลที่ได้บ่งบอกว่าซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล เวอร์ริชไซด์ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สามารถวิเคราะห์ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุนถูกวิเคราะห์โดยเครื่องวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธีการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจน ซึ่งผลที่ได้แสดงถึงซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะรูพรุนทั้งในระดับไมโคร และไม่มีรูพรุน ค่าความกว้างแถบพลังงานสามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยความสามารถในการสะท้อนของแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโทรสโคปี โดยแนวโน้มของความกว้างแถบพลังงานที่มากขึ้นจะเป็นผลมาจากขนาดของผลึกที่มีขนาดเล็กลง ความไม่สมบูรณ์ของผลึกสามารถวิเคราะห์ได้ โดยอาศัยความสามารถในการเปล่งแสงของสารตัวอย่างด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซน โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตั้งต้น อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้แต่ละสัณฐานที่ถูกใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดสามารถวิเคราะห์ได้ โดยทำการสกัดสีย้อมด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ หาปริมาณสีย้อมที่สกัดได้ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโทรสโคปี โดยปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากขึ้นจะส่งผลให้มีปริมาณการดูดซับสีย้อมที่มากขึ้นด้วย และค่าประสิทธิภาพโดยรวมสามารถวัดได้จากเครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์จำลอง โดยค่าประสิทธิภาพโดยรวมจะขึ้นอยู่กับค่าความกว้างแถบพลังงาน ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และค่าปริมาณการดูดซับสีย้อม ซึ่งค่าความกว้างแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นและระดับพลังงานแถบการนำของซิงค์ออกไซด์ที่น้อยกว่าชั้นที่อิเล็กตรอนของสีย้อมถูกกระตุ้น จะส่งผลให้มีอิเล็กตรอนจากสีย้อมตกบนชั้นแถบการนำของซิงค์ออกไซด์มากขึ้น ทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้นด้วย ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง จะมีค่าประสิทธิภาพโดยรวมมากที่สุดเท่ากับ 0.49 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีค่าความกว้างแถบพลังงานที่สูง ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่น้อยที่สุด และค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมที่มากที่สุด

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 5270494421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ZnO NANOPARTICLES, SEMICONDUCTOR, DSSC

WIKROM SRISURAKARN : PREPARATION OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELL ELECTRODES USING ZINC OXIDE NANOPARTICLES WITH VARIOUS MORPHOLOGY.

ADVISOR : APINAN SOOTTITANTAWAT, Ph.D., CO-ADVISOR : ASSOC. PROF.

TAWATCHAI CHARINPANITKUL, Ph.D., 135 pp.

This research work is to synthesize ZnO nanostructured powders with 12 different morphologies by gas phase and liquid phase reaction. Different morphologies were obtained, such as nanotetrapods with three different long legs, nanospheres, hollow spheres, flower-like nanosheets, flower-like nanorods, nanowires, nanorods, nanotubes and porous plates which were observed by scanning electron microscopy (SEM). Crystalline characteristics of ZnO nanoparticles indicated hexagonal structure wurtzite phase which were investigated by X-ray diffraction technique (XRD). Their porosity were meso-porous and non-porous materials which were measured by nitrogen absorption desorption method. Energy band gap were characterized by reflectance of ZnO powder by UV-Visible spectroscopy. It was found that the trend of crystallite size decreases with increasing of band gap energy. Crystal defects were observed by photoluminescence technique. The defects were depended on the amount of substance, time and temperature of reaction. In addition, the synthesized ZnO were employed for fabricating as anodes of dye sensitized solar cell (DSSC). The amount of dye absorption on ZnO powder was leached by 0.1 M of NaOH and then determined by UV-Visible spectroscopy. The highest surface area, the highest dye absorption was obtained. The overall efficiency of DSSC depended on energy and gap, crystal defect and dye adsorption. The band gap energy was related to the energy level of conduction band when the electron from dye was transferred to the electrode. Therefore, DSSCs with anodes fabricated from ZnO hollow spheres with the highest surface area showed the maximal efficiency of 0.49% because of high energy band gap, lowest of crystal defect and the highest of dye absorption,

Department :.....Chemical Engineering.....	Student's Signature .....
Field of Study :...Chemical Engineering.....	Advisor's Signature .....
Academic Year :.....2011.....	Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรมาวัช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ ผศ.ดร. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์ ประธานกรรมการ ผศ.ดร.ณัฐพร โทณานนท์ ผศ.ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ และ ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในการให้ข้อเสนอแนะและสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคต เพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลในการทำวิจัย ข้อคิดเห็นต่างๆ และกำลังใจที่มอบให้อย่างต่อเนื่องเสมอมา ดร.บุษราคัม ชาญหัตถถกร ที่อนุเคราะห์ให้เครื่องออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้าที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีเฟสแก๊ส มาประยุกต์ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดใน DSSC และคุณภุษาณิศา ที่ช่วยเหลือดำเนินการจัดการด้านการเงินในการซื้ออุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคตไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC) ภายใต้สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวทช.) ในการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เลขที่ 530 ภายใต้หัวข้อโครงการ “การพัฒนาประสิทธิภาพของ Semiconductor electrode และ Dye สำหรับ Dye-sensitized solar cell (DSSC)” และการสนับสนุนอุปกรณ์การทดลองจากศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคตไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ซิงค์ออกไซด์ .....	4
2.1.1 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์.....	7
2.1.1.1 การสังเคราะห์ด้วยเฟสแก๊ส (Gas phase synthesis)	7
2.1.1.2 การสังเคราะห์ด้วยเฟสของเหลว (Liquid phase synthesis).....	9
2.1.1.2.1 ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal).....	9
2.1.1.2.2 การตกตะกอน (Precipitation).....	15
2.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide defect chemistry)..	18
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cells or DSSC)...	20
2.3.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	20
2.3.2 กระบวนการที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	22
2.3.3 ประสิทธิภาพ (Efficiency).....	23
2.3.4 ค่าประสิทธิภาพของ DSSC ที่ได้จากการประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์ สัณฐานต่างๆ เป็นขั้วอิเล็กโทรด.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 แผนการทดลอง.....	37

3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	38
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	38
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.3.1 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะทางสัณฐานแตกต่างกัน..	40
3.3.1.1 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากแผ่นซีทเรียงซ้อนกัน.....	40
3.3.1.2 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง...	41
3.3.1.3 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมอนุภาคขนาดนาโนเมตร.....	42
3.3.1.4 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน.....	43
3.3.1.5 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานท่อกลวง.....	44
3.3.1.6 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน.....	45
3.3.1.7 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แบบแท่งตัน.....	46
3.3.1.8 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวด.....	47
3.3.1.9 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่เกิดจากการซ้อนกันของแผ่นซีท.....	48
3.3.1.10 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้า.....	49
3.3.2 การศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์.....	51
3.3.3 การทดลองประยุกต์ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	52
3.3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมขั้วอิเล็กโทรด.....	52
3.3.3.2 การหาปริมาณการดูดซับสีย้อมของขั้วอิเล็กโทรด.....	53
3.3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมเคาเตอร์อิเล็กโทรด.....	53
3.3.3.4 ขั้นตอนการเตรียม DSSC.....	54
3.3.3.5 การวัดค่าประสิทธิภาพของ DSSC.....	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์.....	55



4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	55
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction, XRD).....	61
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีดูดซับคายซับไนโตรเจน (N <sub>2</sub> absorption desorption).....	63
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโทรสโคปี (UV-visible Spectroscopy).....	65
4.1.5 ผลการวิเคราะห์หาความไม่สมบูรณ์ของผลึก (Defect) ของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซน (Photoluminescence, PL).....	68
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสียอมที่ดูดซับได้จากซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด.....	72
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด.....	75
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความกว้างแถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (J <sub>sc</sub> ) ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (V <sub>oc</sub> ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC .....	75
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (J <sub>sc</sub> ) ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (V <sub>oc</sub> ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC.....	78
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณการดูดซับสียอมของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ประยุกต์เป็นขั้วแอโนดที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (J <sub>sc</sub> ) ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (V <sub>oc</sub> ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC .....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95

รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	115
ภาคผนวก ค.....	122
ภาคผนวก ง.....	124
ภาคผนวก จ.....	131
ภาคผนวก ฉ.....	134
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	135

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางด้านเคมีของซิงค์ออกไซด์.....	6
2.2	ตำแหน่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ .....	18
2.3	การเปรียบเทียบพื้นที่ผิว สัณฐาน (Morphology) ขนาด (Size) ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นเซมิคอนดักเตอร์ใน DSSC และค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiency, $\eta$ %) ของแต่ละงานวิจัย.....	35
4.1	พื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์แต่ละสัณฐาน.....	65
4.2	ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 12 สัณฐาน.....	66
4.3	ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน.....	69
4.4	ผลการวัดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณสีย้อมที่ได้จากซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด.....	73

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	จำลองโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ของซิงค์ออกไซด์ a) คิวบิก ร็อกซอลท์ b) คิวบิก ซิงค์เบลนด์ c) เฮกซะโกนอล เวิร์ทไซด์ โดยทรงกลมสีเทาแทนอะตอมของสังกะสี และทรงกลมสีดำแทนอะตอมของออกซิเจน .....	5
2.2	รูปจากกล้อง SEM แสดงการเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดบนเซปไฟร์ซึ่งใช้เป็นสับสเตรต .....	8
2.3	รูปจากกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์ทรงสี่หน้า.....	9
2.4	ชิ้นส่วนอุปกรณ์ของหม้อนิ่งอัดความดัน.....	10
2.5	รูปจากกล้อง TEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมขนาดนาโนเมตร.....	10
2.6	รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง a) กำลังขยายต่ำ b) กำลัง ขยายสูง c) ซิงค์ออกไซด์ทรงกลมกลวงที่แตก d) รูปจากกล้อง TEM.....	11
2.7	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน แต่ละแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 500 นา โนเมตร.....	12
2.8	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตันความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร.....	12
2.9	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดที่มีขนาดประมาณ 100 นาโนเมตร a) ที่กำลังขยาย ต่ำ b) ที่กำลังขยายสูง.....	13
2.10	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดที่มีความหนาประมาณ 70-140 นาโนเมตร	13
2.11	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 ไมโครเมตร.....	14
2.12	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แท่งตันที่มีความหนาประมาณ 75-150 นาโนเมตร ยาวประมาณ 0.5-2.5 ไมโครเมตร.....	14
2.13	SEM และ TEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน.....	15
2.14	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการเรียงซ้อนกันของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่น a) กำลังขยายต่ำ b) กำลังขยายสูง .....	16
2.15	รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ a) พีเอช6 b) พีเอช7 c) พีเอช8 d) พีเอช9 e) พีเอช 10 และ f) พีเอช 11 .....	17
2.16	คำนวณระดับพลังงานของความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่แตกต่างกันของซิงค์ออกไซด์.....	19

รูปที่		หน้า
2.17	แสดงส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	20
2.18	แสดงรูปแบบของการยึดเกาะของสีย้อมด้วยกลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิกบนโลหะออกไซด์.....	21
2.19	หลักการงานที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	23
2.20	ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	24
2.21	การทดสอบวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	25
2.22	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม แต่ละอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 นาโนเมตร.....	26
2.23	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200-500 นาโนเมตร.....	26
2.24	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-20 นาโนเมตร.....	27
2.25	รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่ขาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขา 500 นาโนเมตร ยาวประมาณ 2-3 ไมโครเมตร.....	27
2.26	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานเข็มขัดที่มีความหนาประมาณ 50-200 นาโนเมตร ขนาดของแผ่น ประมาณ 2-5 ไมโครเมตร .....	28
2.27	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นที่มีความกว้างแผ่นประมาณ 100 นาโนเมตร .....	28
2.28	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดที่ยาว 1 ไมโครเมตรเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 60 นาโนเมตร.....	29
2.29	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดแบบโครงสร้างกิ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 นาโนเมตร ยาว 5-6 ไมโครเมตร .....	30
2.30	รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 นาโนเมตรยาว 300 นาโนเมตร .....	30
2.31	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งต้นที่มีความยาวประมาณ 5 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 150 นาโนเมตร.....	31
2.32	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งต้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 103 นาโนเมตร...	31
2.33	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 นาโนเมตร .....	32

รูปที่		หน้า
2.34	SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวด เส้นผ่านเท่ากับ 60 นาโนเมตร ยาว 1 ไมโครเมตร รูปทรงคล้ายเส้นประสาทที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นาโนเมตร.....	33
2.35	รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์ที่มี a) สัณฐานแบบลวด b) ภาพจำลองของซิงค์ ออกไซด์สัณฐานแบบลวดที่มีซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมเกาะอยู่ที่ด้านบนและด้านข้าง (Hybrid) c) รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์ (Hybrid) ที่กำลังขยายต่ำ และ (d) ที่กำลังขยายสูง .....	34
3.1	ขั้นตอนการวิจัย.....	37
3.2	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากแผ่นซีท.....	40
3.3	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง.....	41
3.4	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมอนุภาคขนาดนาโนเมตร.....	42
3.5	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน.....	43
3.6	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานท่อกลวง.....	44
3.7	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน.....	45
3.8	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แบบแท่งตัน.....	46
3.9	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวด.....	47
3.10	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่เกิดจากการซ้อนกันของแผ่นซีท..	48
3.11	การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้า.....	49
3.12	แสดงแผนภาพการจัดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง 1) ถังบรรจุอากาศ 2) ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจน 3) วาล์วควบคุมการผ่านของแก๊สไนโตรเจน 4) โลหะซิงค์ (Zinc foil) 5) เต้าเผา 6) ภาชนะกักเก็บผงซิงค์ออกไซด์ 7) ฟิลเตอร์ 8) บั้มสุญญากาศ	50
3.13	ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด.....	52
3.14	แสดงขั้นตอนการเตรียมเคาเตอร์อิเล็กโทรด.....	53
3.15	ขั้นตอนการเตรียม DSSC.....	54
4.1	รูปจากกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน a) ทรงสี่หน้ายาว b) ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง c) ทรงสี่หน้าขาสั้น d) ท่อกลวง e) แท่งตัน f) ทรงกลม (commercial) g) แผ่นมีรูพรุน h) ทรงกลมกลวง i) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมของแท่งตัน j) ลวด k) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท และ l) ทรงกลม (สังเคราะห์).....	58
4.2	กระบวนการเกิดของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง.....	59

รูปที่		หน้า
4.3	การเกิดของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการซ้อนของแผ่นซีท.....	60
4.4	กราฟ XRD ของซิงค์ออกไซด์ a) ทรงสี่หน้าขาสั้น b) ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง c) ทรงสี่หน้ายาว d) ท่อกลวง e) แท่งตัน f) ทรงกลม (commercial) g) แผ่นมีรูพรุน h) ทรงกลมกลวง i) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมของแท่งตัน j) ลวด k) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท และ l) ทรงกลม (สังเคราะห์).....	62
4.5	กราฟการดูดซับคายซึบไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน a) ทรงกลมกลวง b) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท c) ทรงกลม (Commercial) d) แท่งตัน e) ดอกไม้ที่เกิดจากแท่งตัน f) แผ่นมีรูพรุน g) ทรงสี่หน้ายาว h) ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง i) ทรงกลม (สังเคราะห์) j) ทรงสี่หน้าขาสั้น k) ท่อกลวง l) และลวด.....	64
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าช่องว่างแถบพลังงาน.....	66
4.7	เส้นโค้งโฟโตลูมิเนสเซนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน a) ทรงสี่หน้าขาสั้น b) ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง c) ลวด d) ทรงกลมกลวง e) ทรงกลม (สังเคราะห์) f) ทรงสี่หน้ายาว g) แท่งตัน h) ทรงกลม (Commercial) i) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งตัน j) ท่อกลวง k) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท และ l) แผ่นมีรูพรุน.....	68
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน.....	74
4.9	ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน (Energy band gap) และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด (Short circuit current, $J_{sc}$ ).....	75
4.10	ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน (Energy band gap) และค่าความต่างศักย์วงจรถัด (Open circuit voltage, $V_{oc}$ ).....	76
4.11	ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน (Energy band gap) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%).....	77
4.12	ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน (Energy band gap) และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและค่าความกว้างแถบพลังงาน.....	78
4.13	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี) และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด (Short circuit current, $J_{sc}$ ).....	79

รูปที่	หน้า
4.14	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและรังสียูวี) และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (Short circuit current, $J_{sc}$ )..... 79
4.15	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี) และค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (Open circuit voltage, V)..... 80
4.16	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและรังสียูวี) และค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (Open circuit voltage, V)..... 81
4.17	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงเขียวและรังสียูวี) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%)..... 82
4.18	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและรังสียูวี) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%)..... 82
4.19	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี) และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและความไม่สมบูรณ์ของผลึกของแสงเขียว..... 83
4.20	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี) และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและความไม่สมบูรณ์ของผลึกของแสงสีม่วง..... 84
4.21	ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและแสงสีเขียวต่อรังสียูวี) และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและความไม่สมบูรณ์ของผลึกของแสงสีม่วงและแสงสีเขียว..... 85
4.22	ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับสีเข้มของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (Short circuit current, $J_{sc}$ )..... 86
4.23	ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับสีเข้มของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด และค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (Open circuit voltage, $V_{oc}$ )..... 87
4.24	ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับสีเข้มของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด และค่าประสิทธิภาพ (Eff%)..... 88
4.25	ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับสีเข้มของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพต่อปริมาณการดูดซับสีเข้ม..... 89



4.26	ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของอัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี และค่าประสิทธิภาพโดยรวม.....	90
4.27	ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการดูดซับสีเข้ม ค่าความกว้างแถบพลังงาน และค่าประสิทธิภาพโดยรวม.....	91
4.28	ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการดูดซับสีเข้ม ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของอัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวีและค่าประสิทธิภาพโดยรวม.....	92
4.29	กราฟแท่งแสดงค่าประสิทธิภาพโดยรวมที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานประยุกต์ใช้ เป็นซั้วแอโนดอิเล็กโทรดใน DSSC โดยทำการประกอบเซลล์สัณฐานละ 3 ตัวอย่าง a) ทรงกลมกลวง b) ทรงสี่หน้ายาว c) ดอกไม้แผ่นซีท d) แท่งตัน e) ท่อกลวง f) ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง g) ทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์ h) ดอกไม้แท่งตัน i) ทรงสี่หน้าขาสั้น j) ทรงกลม (Commercial) k) แผ่นมีรูพรุน l) ลวด.....	93

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการดำรงชีวิต ในปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบปัญหาเรื่องการขาดแคลนพลังงาน เนื่องจากน้ำมันปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักจะหมดไปจากโลก การวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทนเป็นเรื่องที่ทั่วโลกให้ความสนใจ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเร่งพัฒนาพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆได้แก่ พลังงานลม น้ำ ผลิตภัณฑจากการเกษตร และพลังงานแสงอาทิตย์ แสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกคิดเป็นพลังงานมหาศาล (พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลกเพียง 1 ชั่วโมงจะมีพลังงานประมาณ  $4.3 \times 10^{20}$  จูล มากกว่าพลังงานที่ทั้งโลกใช้ในระยะเวลา 1 ปี ซึ่งมีค่าประมาณ  $4.1 \times 10^{20}$  จูล) [1] แต่ในปัจจุบันถูกนำไปใช้ประโยชน์เพียงส่วนน้อย นักวิจัยทั่วโลกจึงพยายามอย่างมากในการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยผ่านกระบวนการ โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic or PV) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง วัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวคือสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เมื่อนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสง ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า โซลาร์ โฟโตโวลตาอิก เซลล์ (Solar photovoltaic cell) หรือเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง

ในเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นแรกใช้ซิลิกอนที่บริสุทธิ์มากเพื่อหลีกเลี่ยงการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ อิเล็กตรอนและโฮล การทำให้ซิลิกอนบริสุทธิ์และพร้อมที่จะสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีราคาแพงมาก จึงได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่เรียกว่า Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดย Gratzel และคณะ[2] ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักได้แก่ 1. กระจกนำไฟฟ้า (Conductive glass) ทำหน้าที่รวบรวมประจุและส่งผ่านอิเล็กตรอน 2. สีย้อม (Dye) ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน โดยสีย้อมที่มีประสิทธิภาพสูงจะเป็นสีย้อมประเภทออร์กาโนเมทัลลิก (Organometallic dye) ได้แก่ สีย้อมรูทีเนียม (Ruthenium dye) 3. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes) เป็นตัวกลางในการหมุนเวียนอิเล็กตรอน 4. เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาหมุนเวียนอิเล็กตรอนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ 5. ชั้นอิเล็กโทรด ใช้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor) สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์มักเป็นกลุ่มสารกึ่งตัวนำที่มี

แถบพลังงานกว้าง (Wide band gap semiconductor) เมื่อถูกเคลือบด้วยโมเลกุลของเม็ดสีย้อม ทำให้สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงที่ตาเรามองเห็นได้เป็นอย่างดี โดยมากมักเป็นโลหะออกไซด์เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) หรือ ซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ )

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดใน DSSC เนื่องจากมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานหรือแบนแกป (Band gap) สูง (3.37 eV) การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สามารถทำได้ง่ายและหลากหลายวิธีโดยสามารถสังเคราะห์ได้จากเฟสแก๊สและเฟสของเหลวซึ่งมีขั้นตอนไม่ซับซ้อนยุ่งยาก สำหรับประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้น จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด และค่าความต่างศักย์วงจรถัด โดยคุณสมบัติบางอย่างประการของซิงค์ออกไซด์ จะสามารถเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด และค่าความต่างศักย์วงจรถัดได้ ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มคุณสมบัติความกว้างแถบพลังงาน ปริมาณการดูดซับสีย้อม และการลดคุณสมบัติความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ลง จะส่งผลให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดมากขึ้น และการเพิ่มคุณสมบัติความกว้างแถบพลังงานและปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เพิ่มขึ้น จะเพิ่มค่าความต่างศักย์วงจรถัดด้วยเช่นกัน โดยการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าวงจรถัด และความต่างศักย์วงจรถัดนี้ จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของ DSSC ที่ได้มีค่ามากขึ้น และอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยในการพัฒนาพลังงานทางเลือกใหม่ต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์ได้แก่ ค่าความกว้างแถบพลังงาน ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก และค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ทั้ง 12 สัณฐาน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ DSSC

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ก. สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน ศึกษาโครงสร้างผลึก ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและพื้นที่ผิวของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Brunauer-Emmett-Teller (BET)

ข. หาค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้แต่ละสัณฐานจากความสะท้อนแสง (Reflectance spectra) ของซิงค์ออกไซด์ โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectroscopy

ค. หาค่าความไม่สมบรูณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์แต่ละสัณฐานได้จากเครื่อง Photoluminescenc (PL)

ง. หาปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้แต่ละสัณฐาน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในเอทานอลความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นตัวทำละลายสีย้อมที่ติดอยู่บนพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด นำสารละลายที่ได้ไปวัดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy

จ. หาประสิทธิภาพของ DSSC ที่ได้จากการนำซิงค์ออกไซด์แต่ละสัณฐานเป็นขั้วอิเล็กโทรดได้จากเครื่อง I-V tester โดยทำการควบคุมตัวแปรต่างๆได้แก่

จ.1 พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.5 x 1 ตารางเซนติเมตร

จ.2 ความเข้มข้นของสีย้อมชนิด N719 เท่ากับ 0.5 มิลลิโมลาร์

จ.3 ขั้วอิเล็กโทรดใช้เวลาจุ่มในสีย้อม 24 ชั่วโมง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ก. ทราบสภาวะในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์เพื่อให้ได้ลักษณะทางสัณฐานที่แตกต่างกัน

ข. ได้ศึกษาคุณสมบัติต่างๆของซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของ DSSC

ค. เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เซลล์ต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อสามารถนำไปเป็นองค์ความรู้หนึ่งในการพัฒนาต่อในระดับอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ซิงค์ออกไซด์ [3-5]

ซิงค์ออกไซด์ คือสารประกอบอนินทรีย์ ที่มีสูตรโมเลกุลทั่วไปว่า ZnO โดยทั่วไปซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาวและซิงค์ออกไซด์ละลายในน้ำได้น้อยมาก ซิงค์ออกไซด์มีอยู่บนผิวโลก โดยมีชื่อเรียกว่า แร่ซิงไซต์ (The mineral zincite) แต่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนมากได้จากการสังเคราะห์ ซิงค์ออกไซด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายอุตสาหกรรมได้แก่ พลาสติก เซรามิก แก้ว ซีเมนต์ ยาง น้ำมันพืช สี กาว อาหาร แบตเตอรี่ ปุ๋ย สารทนไฟ เป็นต้น

ในทางวัสดุศาสตร์ ซิงค์ออกไซด์ถูกเรียกว่า II-VI semiconductor เนื่องจากธาตุสังกะสีและออกซิเจน อยู่หมู่ 2 และหมู่ 6 ในตารางธาตุตามลำดับ ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติหลากหลายได้แก่ โปร่งแสง อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านได้รวดเร็ว (High electron mobility) ระดับพลังงานกว้าง (Wide band gap) เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติทั้งหลายเหล่านี้ จึงสามารถนำซิงค์ออกไซด์ประยุกต์ในงานต่างๆได้เช่น ขั้วอิเล็กโทรดโปร่งแสง (Transparent electrodes) หน้าต่างกันความร้อน (Heat-protecting windows) เป็นต้น

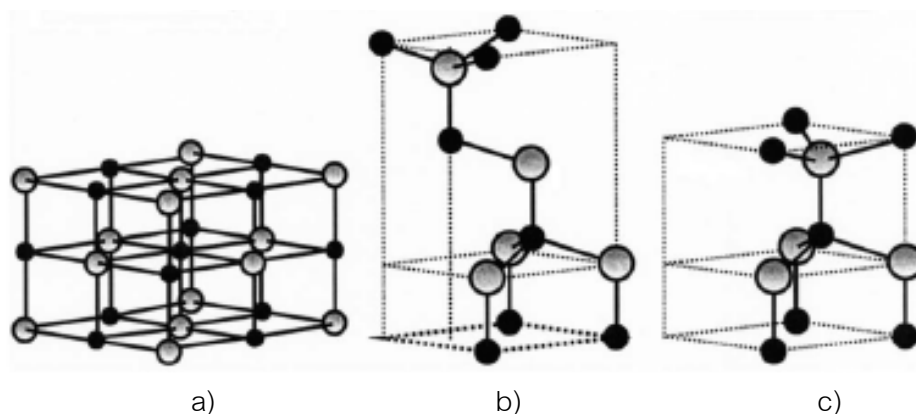
#### คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

ซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาว โดยมีผลึกเป็นเทอร์โมโครมิก (Thermochromic) กล่าวคือสามารถเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเหลืองเมื่อได้รับความร้อนและเปลี่ยนกลับเป็นสีขาวอีกครั้งเมื่อเย็นลง และไม่ละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ แต่สามารถละลายได้ในกรดและเบส (Amphoteric oxide) สามารถยกตัวอย่างการละลายในกรดไฮโดรคลอริกได้จากสมการ 2.1) และการละลายในเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ได้จากสมการ 2.2)



### คุณสมบัติทางด้านกายภาพ (Physical properties)

ซิงค์ออกไซด์ มีแถบพลังงานประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีพลังงานกระตุ้นอิสระ (Free excitation energy) เท่ากับ 60 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ และด้วยคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าที่โดดเด่น (Unique optical and electrical properties) ทำให้ซิงค์ออกไซด์ใช้งานได้ในอุณหภูมิสูง และสามารถประยุกต์ใช้ใน นาโนเลเซอร์ (Nanolasers) เปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) อุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส (Gas sensors) และเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) เป็นต้น ซิงค์ออกไซด์อยู่ในรูปโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบได้แก่ เฮกซะโกนอล เวอร์ทไซต์ (Hexagonal wurtzite) คิวบิก ซิงค์เบลนด์ (Cubic zincblende) และคิวบิก ร็อคซอลท์ (Cubic rocksalt) โดยแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบเวอร์ทไซต์เสถียรที่สุดในสภาวะบรรยากาศปกติ ค่าคงที่แลตทิซ (The lattice constant) ของเวอร์ทไซต์ ซิงค์ออกไซด์คือ  $a$  เท่ากับ 3.25 อังสตรอม และ  $c$  เท่ากับ 5.2 อังสตรอม อัตราส่วนระหว่าง  $c$  ต่อ  $a$  ประมาณ 1.6 โดยใกล้เคียงกับค่าอุดมคติ (เท่ากับ 1.633)



รูปที่ 2.1 จำลองโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ของซิงค์ออกไซด์ a) คิวบิก ร็อคซอลท์ b) คิวบิก ซิงค์เบลนด์ c) เฮกซะโกนอล เวอร์ทไซต์ โดยทรงกลมสีเทาแทนอะตอมของสังกะสี และทรงกลมสีดำแทนอะตอมของออกซิเจน [5]

โดยสามารถสรุปคุณสมบัติทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางด้านเคมีของซิงค์ออกไซด์ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางด้านกายภาพและคุณสมบัติทางด้านเคมีของซิงค์ออกไซด์ [6]

สูตรโมเลกุล	ZnO
มวลโมเลกุล	81.38 กรัมต่อโมล
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนอล เวอร์ทไซต์ คิวบิก ซิงค์เบลนด์ คิวบิก ร็อคซอลล์
แลตทิซ พารามิเตอร์(Lattice parameters) ของ เฮกซะโกนอล เวอร์ทไซต์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน	
$a$	0.32495 นาโนเมตร
$c$	0.52069 นาโนเมตร
$c/a$	1.600 นาโนเมตร
ความหนาแน่น	5.606 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1970 – 1975 องศาเซลเซียส
ค่าช่องว่างระหว่างระดับพลังงานหรือ	3.37 อิเล็กตรอนโวลต์
พลังงานกระตุ้นอิสระ	60 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์
ลักษณะและสี	ผงสีขาว
ความสามารถในการละลาย	เกือบจะไม่ละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ ละลายในกรดและเบส

### 2.1.1 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์

วิธีการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สามารถแบ่งหลักๆได้ 2 วิธีคือ การสังเคราะห์ด้วยเฟสแก๊ส (Gas phase synthesis) และการสังเคราะห์ด้วยเฟสของเหลว (Liquid phase synthesis) ซึ่งแต่ละวิธีสามารถสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ได้หลากหลายสัญญาณ โดยรายละเอียดของทั้ง 2 วิธีสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 2.1.1.1 การสังเคราะห์ด้วยเฟสแก๊ส (Gas phase synthesis) [7-9]

การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยเฟสแก๊ส เป็นวิธีการสังเคราะห์โดยอาศัยการให้ความร้อนของสังกะสีเกิดเป็นไอและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในท่อปิดและเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ขึ้น ซึ่งการจะได้ซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะทางสัญญาณต่างๆ จะต้องควบคุมสัดส่วนระหว่างความดันไอของสังกะสีและความดันของออกซิเจน โดยซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในเชิงพาณิชย์จะสังเคราะห์ด้วยวิธีหลักๆสองวิธีได้แก่ วิธีเฟรนช์ โปรเซส (French process) และ อเมริกัน โปรเซส (American process)

##### เฟรนช์ โปรเซส (French process)

สำหรับวิธีการสังเคราะห์ด้วยเฟรนช์ โปรเซส โลหะซิงค์จะถูกให้ความร้อนจนระเหยกกลายเป็นไอ และทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน และเกิดเป็นผงซิงค์ออกไซด์ขึ้น โดยที่อุณหภูมิและความเร็วในการผสมกันระหว่างแก๊สออกซิเจนและไอระเหยของโลหะซิงค์คือตัวแปรสำคัญในการควบคุมขนาดของอนุภาคโดยอุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่สูงกว่าจะได้ขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ที่ละเอียดว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่ำ โดยกระบวนการผลิตจะทำได้โดยนำโลหะซิงค์ใส่ลงในภาชนะที่เป็นเซรามิคทนความร้อนสูง (Crucible) จากนั้นนำไปใส่ในเตาเผาที่ทำจากอิฐทนไฟรูปทรงกระบอก โลหะซิงค์จะถูกหลอมที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส และเดือดที่อุณหภูมิ 907 องศาเซลเซียส จากนั้นไอระเหยของโลหะซิงค์ที่จะทำปฏิกิริยา ณ พื้นที่ทำปฏิกิริยา (Reaction zone) เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จแล้วผงของโลหะซิงค์ออกไซด์จะถูกกักเก็บไว้ได้ด้วยถุงยางหลายๆถุง (Multiplicity of textile bags) ขนาดของอนุภาคซิงค์ออกไซด์จะมีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึงหลายไมครอนโดยการเพิ่มขนาดของอนุภาคทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา

##### อเมริกัน โปรเซส (American process)

สำหรับอเมริกัน โปรเซส จะใช้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นสินแร่ของโลหะซิงค์ (Zinc ore) ที่มีส่วนประกอบของซัลไฟด์ หลังจากให้อุณหภูมิ โลหะซิงค์จะถูกเผาไหม้และได้ก๊าซ

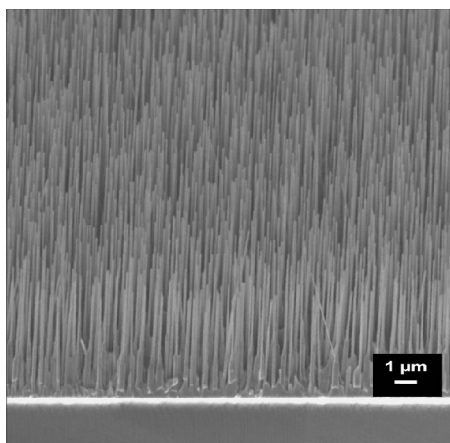


คาร์บอนไดออกไซด์และไอระเหยของโลหะซิงค์ จากนั้นไอระเหยของโลหะซิงค์จะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนจะผงของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะถูกกักเก็บไว้ในถุงที่จัดเตรียมไว้

โดยลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเฟสแก๊สมีดังนี้

### 1. สัณฐานลวด (Wire)

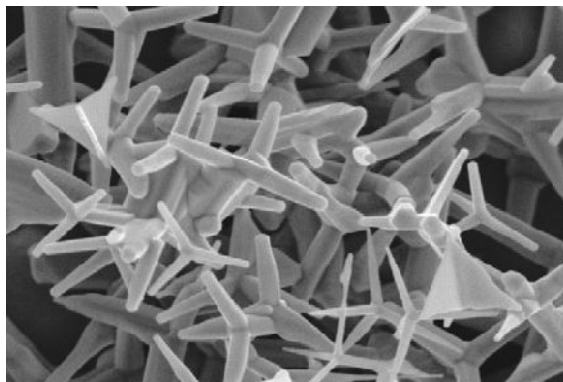
Li และคณะ [7] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดโดยใช้วิธีการสังเคราะห์ด้วยเฟสแก๊ส ปฏิกิริยาที่ใช้คือปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลระหว่างสารตั้งต้นซิงค์ออกไซด์และผงคาร์บอน ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองหรือเงินช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการเกิดของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะโตบนสับสเตรต (แซปไฟร์) ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดมีการเรียงตัวกันหนาแน่นและเป็นระเบียบ แต่ละเส้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 นาโนเมตร ยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปจากกล้อง SEM แสดงการเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดบนแซปไฟร์ซึ่งใช้เป็นสับสเตรต [7]

### 2. สัณฐานทรงสี่หน้า (Tetrapod)

Jean Delaunay และคณะ [8] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้าโดยใช้วิธีการสังเคราะห์ด้วยเฟสแก๊ส สารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ ผงสังกะสีที่ถูกให้ความร้อนจนกลายเป็นไอ ไอของสังกะสีจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์ขึ้น ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.3 รูปจากกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์ทรงสี่หน้า [8]

#### 2.1.1.2 การสังเคราะห์ด้วยเฟสของเหลว (Liquid phase synthesis)

การสังเคราะห์ด้วยเฟสของเหลว เป็นวิธีการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์โดยกระบวนการสังเคราะห์จะเกิดขึ้นในน้ำหรือตัวทำละลายต่างๆ ซึ่งการสังเคราะห์ด้วยเฟสของเหลวสามารถแบ่งแยกย่อยได้อีก 2 วิธีคือ ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และการตกตะกอน (Precipitation)

##### 2.1.1.2.1 ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) [9, 10]

คำว่า ไฮโดรเทอร์มอล ถูกตั้งขึ้นโดยนักธรณีวิทยาชาวอังกฤษชื่อ เซอร์ โรเจอร์ริค เมอร์ซีย์สัน เพื่อใช้อธิบายการเกิดแร่ธาตุต่างๆเนื่องจากน้ำมีอุณหภูมิและความดันที่เพิ่มสูงขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก โดยมาจากคำว่าไฮโดร แปลว่าน้ำ และเทอร์โม แปลว่าอุณหภูมิ เมื่อนำคำทั้งสองมาผสมกันจะได้ความหมายว่า เป็นปฏิกิริยาเคมีใดๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายหรือตัวทำละลาย ณ อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องและความดันสูงกว่า 1 บรรยากาศภายใต้ระบบปิด

การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะเกิดผลึกซิงค์ออกไซด์ได้โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะละลายอยู่ในน้ำหรือสารละลายที่ร้อนภายใต้ความดันสูง ภายในอุปกรณ์ที่เรียกว่า หม้อนึ่งอัดความดัน (Autoclave) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ข้อดีของการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลคือ ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะมีผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูงและสม่ำเสมอ มีความสมมาตร ใช้พลังงานต่ำเนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยารวดเร็ว เป็นต้น

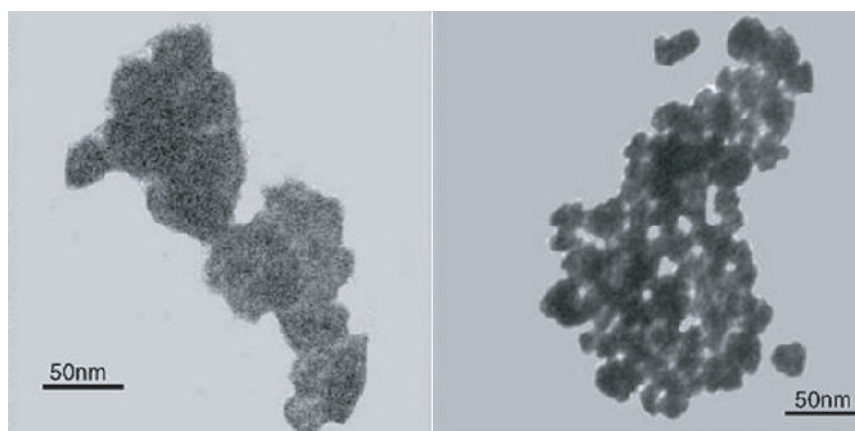


รูปที่ 2.4 ชิ้นส่วนอุปกรณ์ของหม้อนึ่งอัดความดัน [11]

โดยลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลมีดังต่อไปนี้

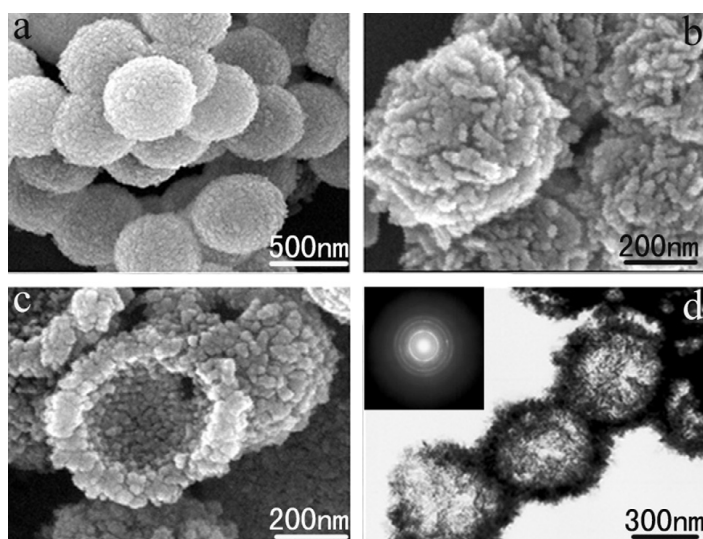
#### 1. สัณฐานทรงกลม (Sphere)

Baruwati และคณะ [12] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมโดยใช้ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) ใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เท่ากับ 7.5 หลังจากการล้างและอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ผงซิงค์ออกไซด์สีขาว ซึ่งลักษณะทางสัณฐานสามารถทราบได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รูปจากกล้อง TEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมขนาดนาโนเมตร [12]

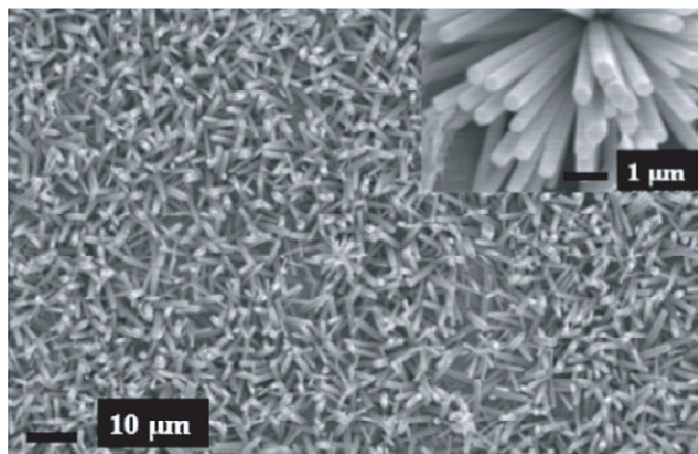
Li และคณะ [13] ได้ทำการสังเคราะห์หิ้งค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง(hollow spheres) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (รูปที่ 2.6) ความหนาเปลือก(Thickness of shell)ประมาณ 80 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมประมาณ 400-600 นาโนเมตร โดยทรงกลมแต่ละอันประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆของหิ้งค์ออกไซด์หลายๆอันประกอบกัน อนุภาคเล็กๆแต่ละอันมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40 นาโนเมตร ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 176 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์หิ้งค์ออกไซด์คือ หิ้งค์อะซีเตตไดไฮเดรต ( $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ) และทั้งสโตฟอสฟอริก แอซิด( $H_3PW_{12}O_{40}$ : HPW) โดยที่ HPW จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา(Catalyst) ช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดหิ้งค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบทรงกลมกลวง



รูปที่ 2.6 รูปจากกล้อง SEM ของหิ้งค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง a) กำลังขยายต่ำ b) กำลังขยายสูง c) หิ้งค์ออกไซด์ทรงกลมกลวงที่แตก d) รูปจากกล้อง TEM [13]

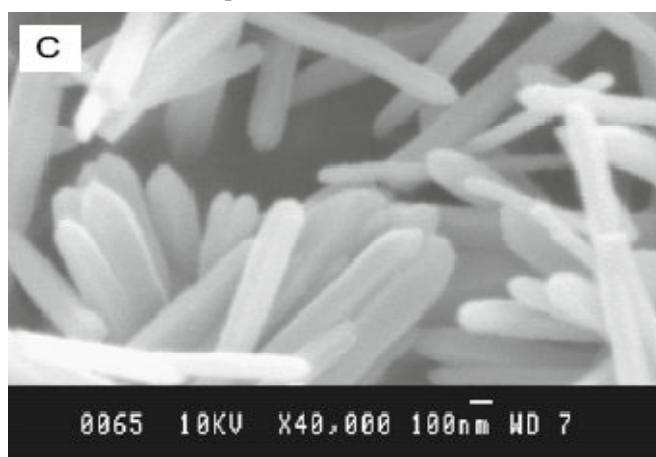
## 2. สัณฐานแท่งตัน (Rod)

Pal และ Santiago [10] ได้ทำการสังเคราะห์ และควบคุมลักษณะทางสัณฐานของหิ้งค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตันโดยการปรับเปลี่ยนค่าของสารลดแรงตึงผิวแบบอ่อน (Soft surfactant) สารเอทิลีนไดเอมีน และค่าพีเอชของสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยสารละลายประกอบด้วย หิ้งค์อะซีเตต โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารลดแรงตึงผิว ผลึกของหิ้งค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จะมีสัณฐานเป็นแท่งตันหมดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 12 และความเข้มข้นของเอทิลีนไดเอมีนที่ 10 เปอร์เซ็นต์จะให้ค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) มากกว่าที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะทางสัณฐานสามารถทราบได้จากกล้อง SEM ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน แต่ละแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 500 นาโนเมตร [10]

Nagaraju และคณะ [14] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สารตั้งต้นที่ใช้คือซิงค์ซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 ชั่วโมง ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตันที่สังเคราะห์ได้หนาประมาณ 100 นาโนเมตรซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

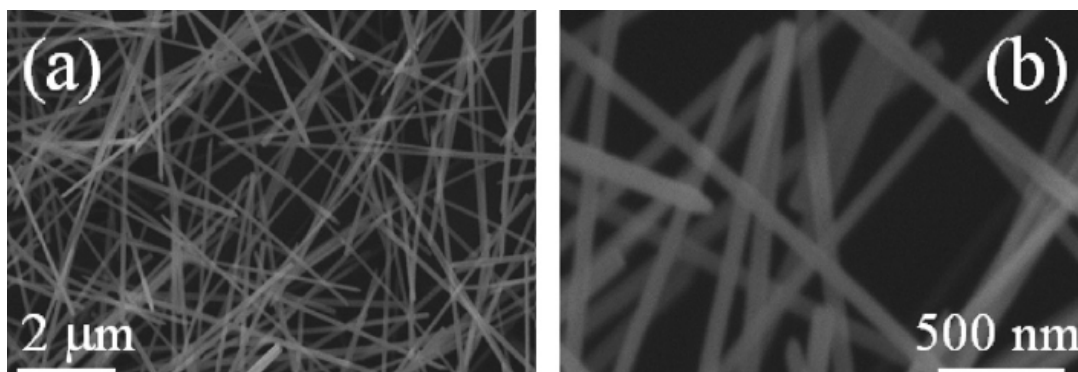


รูปที่ 2.8 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตันความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร [14]

### 3. สัณฐานลวด (Wire)

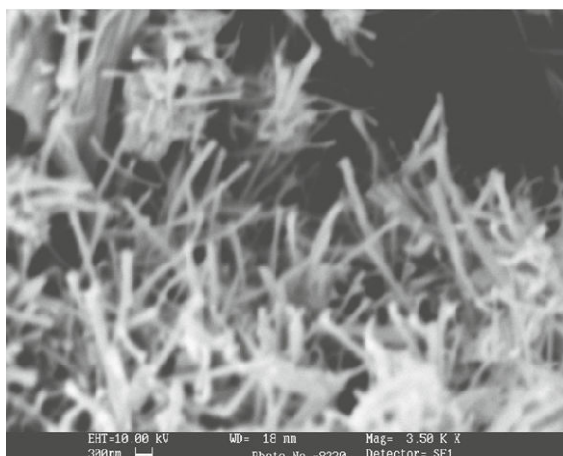
Li และคณะ[15]ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ใช้สารตั้งต้นเป็น ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต โซเดียมคาบอร์เนต และสารโพลีสไตรีน ออลท์มาเลอิก แอซิด (Poly (Styrene-alt-maleic acid sodium, PSMA)) ลักษณะทางสัณฐานของซิงค์

อกไซด์สัณฐานลวดที่ได้หนาประมาณ 100 นาโนเมตร และมีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) สูงซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดที่มีขนาดประมาณ 100 นาโนเมตร a) ที่กำลังขยายต่ำ b) ที่กำลังขยายสูง [15]

Nagaraju และคณะ [14] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแบบลวดด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สารตั้งต้นที่ใช้คือซิงค์ซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 ชั่วโมง ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดที่สังเคราะห์ได้จะมีความหนาประมาณ 70-140 นาโนเมตรซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.10

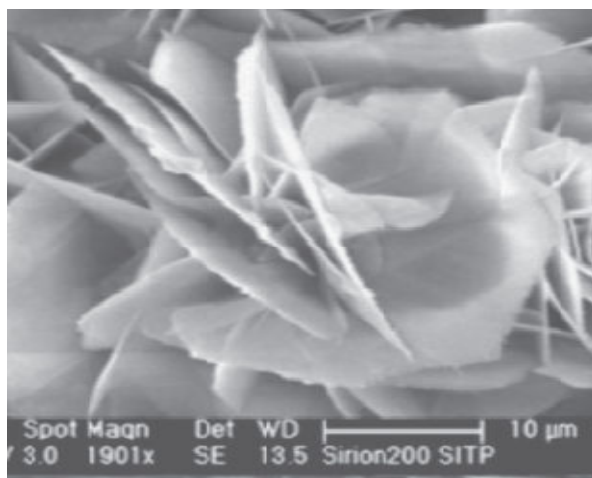


รูปที่ 2.10 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดที่มีความหนาประมาณ 70-140 นาโนเมตร [14]

#### 4. สัณฐานดอกไม้ (Flower-like)

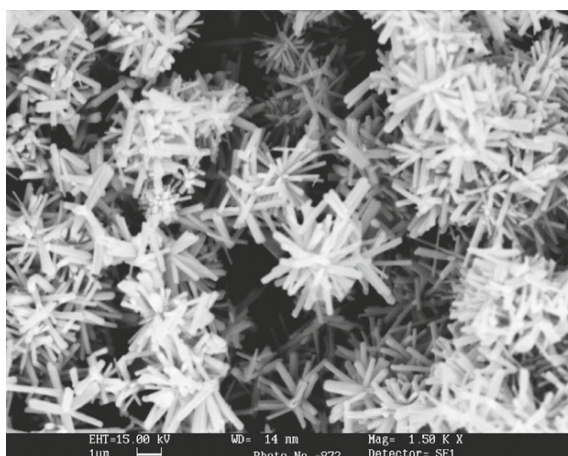
Shao และคณะ [10] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์คลอไรด์และแอมโมเนีย ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้มี

เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 ไมโครเมตร ซึ่งเกิดจากการซ้อนกันของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่น (Sheet) แสดงลักษณะทางสัณฐานที่ได้จากกล้อง SEM ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 ไมโครเมตร [10]

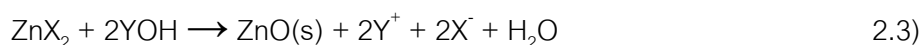
Nagaraju และคณะ [14] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แท่งต้น (Flower-like rods) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สารตั้งต้นที่ใช้คือซิงค์ซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ละแท่งต้นหนาประมาณ 75-150 นาโนเมตร ยาวประมาณ 0.5-2.5 ไมโครเมตร แสดงลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แท่งต้นได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แท่งต้นที่มีความหนาประมาณ 75-150 นาโนเมตร ยาวประมาณ 0.5-2.5 ไมโครเมตร [14]

### 2.1.1.2.2 การตกตะกอน (Precipitation) [16]

การตกตะกอน คือการเกิดของแข็งในของเหลวหรือในของแข็ง โดยเกิดจากปฏิกิริยาเคมีในของเหลวหรือเกิดจากการแพร่ภายในของแข็ง เมื่อปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในของเหลว เราเรียกของแข็งที่เกิดขึ้นว่าตะกอน (Precipitate) ในการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอน ซิงค์ออกไซด์จะเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้น โดยตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นที่ใช้ในการตกตะกอนเพื่อสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์แสดงได้ดังสมการ 2.3)

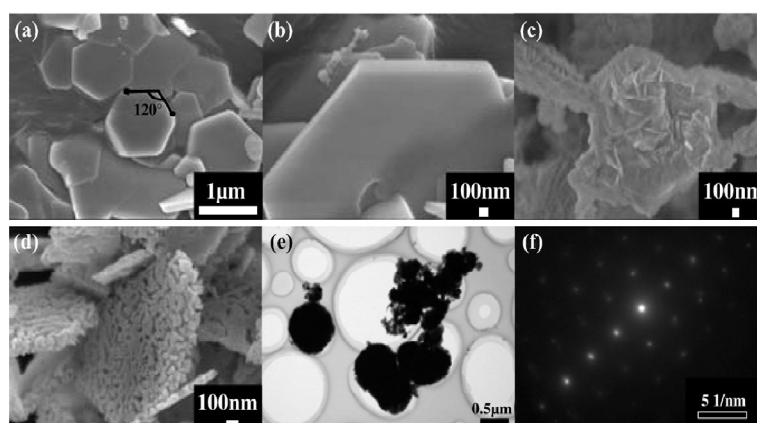


โดยที่ X คือแอนไอออน (anion) ( $\text{CH}_3\text{CO}_2^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{ClO}_4^-$ ) และ Y คือแคตไอออน (cation) ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+$ )

โดยลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนมีดังต่อไปนี้

#### 1. สัณฐานแผ่นมีรูพรุน (Porous plate)

Qiang Zhong และคณะ [17] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นหนาที่มีรูพรุนด้วยวิธีการตกตะกอน (รูปที่ 2.13) หนาประมาณ 100-200 นาโนเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ ซิงค์คลอไรด์ และเอทิลีนไดเอมีน โดยเมื่อทำปฏิกิริยากันจะได้สารประกอบ ซิงค์ไฮดรอกไซด์ คลอไรด์ ( $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) และกลายเป็นซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุนเมื่อนำไปเผาไล่คลอไรด์ที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$



รูปที่ 2.13 SEM และ TEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน [17]

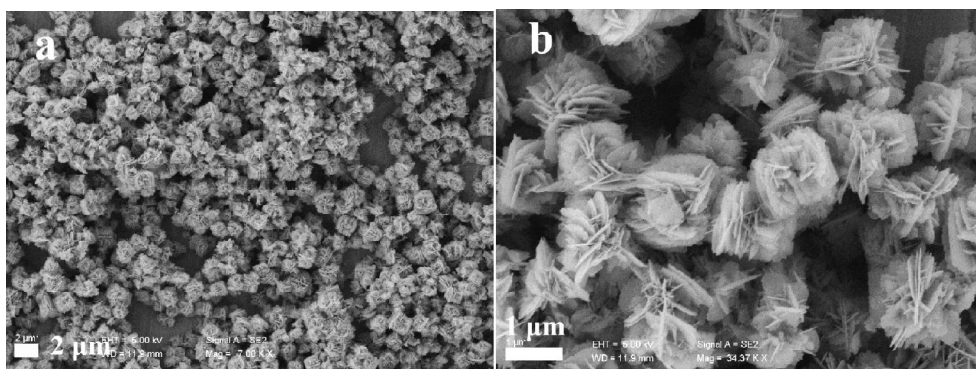


## 2. สัณฐานดอกไม้ (Flower-like)

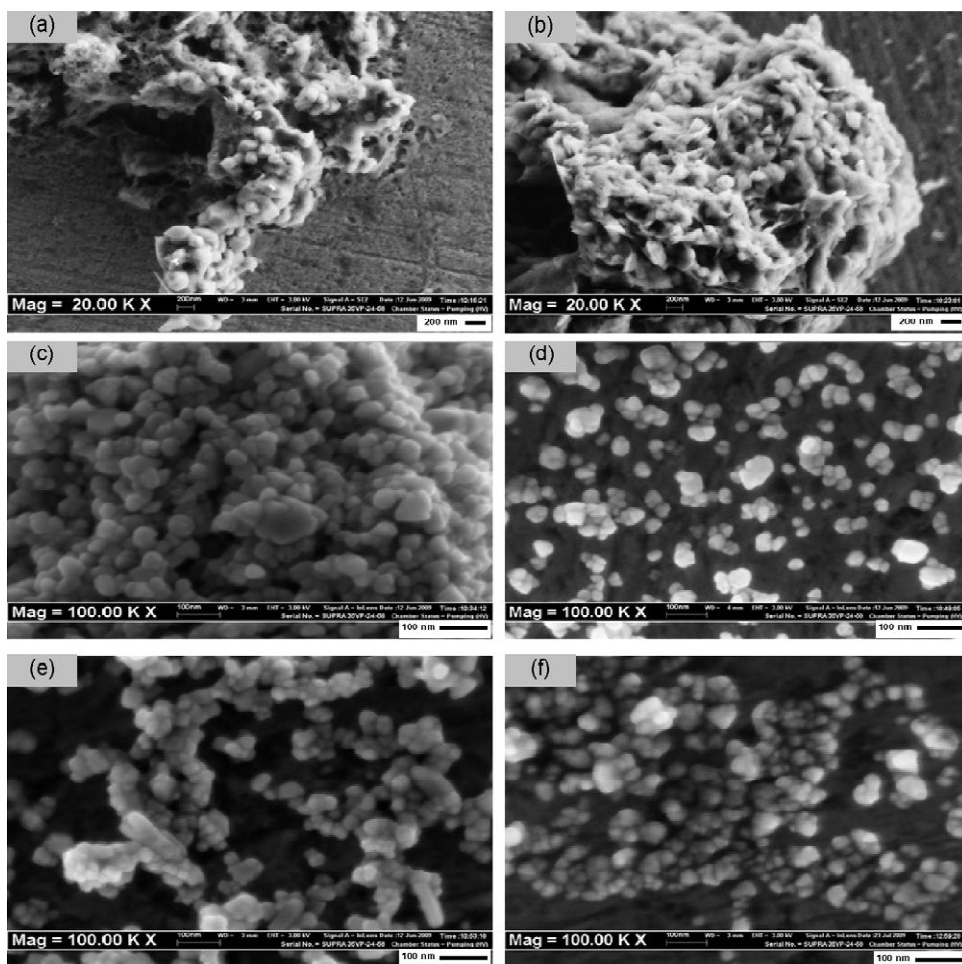
Li และคณะ [18] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ ด้วยวิธีตกตะกอน (รูปที่ 2.14) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 ไมโครเมตร โครงสร้างแบบดอกไม้เกิดจากซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นขนาดนาโนแต่ละแผ่นวางซ้อนกัน ซึ่งแต่ละแผ่นยาวประมาณ 200 นาโนเมตร สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ ซิงค์คลอไรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปริมาณสารตั้งต้นที่เหมาะสมระหว่างซิงค์คลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงจะทำให้เกิดซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้

## 3. สัณฐานทรงกลม (Sphere)

Alias และคณะ [16] ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมด้วยวิธีตกตะกอน (รูปที่ 2.15) รูปจากกล้อง SEM แสดงขนาดของอนุภาคมีขนาดประมาณ 48 นาโนเมตร สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ ซิงค์อะซีเตตไดไฮเดรต เมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการปรับค่าพีเอชสารละลายเท่ากับ 9 เนื่องจากสารละลายที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9 จะมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) มากพอที่จะทำปฏิกิริยาให้เกิดซิงค์ออกไซด์ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร



รูปที่ 2.14 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการเรียงซ้อนกันของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่น a) กำลังขยายต่ำ b) กำลังขยายสูง [18]



รูปที่ 2.15 รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ a) พีเอช6 b) พีเอช7 c) พีเอช8 d) พีเอช9 e) พีเอช 10 และ f) พีเอช 11 [16]

## 2.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide defect chemistry)

ในการหาความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์โดยใช้การเปล่งแสงที่อุณหภูมิห้องนั้น มีการรายงานถึงตำแหน่งพีคที่ถูกระบุถึงความไม่สมบูรณ์ของผลึกซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตำแหน่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ [19]

Peak position (nm)	Proposed origin
373–390	Near-and-edge emission
~402 (77 K)	O <sub>Zn</sub>
~446	Shallow donor-oxygen vacancy transition
~459	Zinc interstitial
~495	Oxygen vacancy
~500/510	Cu <sup>+</sup> /Cu <sup>2+</sup>
~510	Surface defects/defect complexes
~510	Singly ionized oxygen vacancy
~520	Zinc vacancy
~520	O <sub>Zn</sub>
~520	Oxygen vacancies and zinc interstitials
~540	V <sub>o</sub> <sup>**</sup>
~560	Surface defects
~566 (10 K)	Shallow donor–deep acceptor (zinc vacancy containing complex)
~580	Oxygen interstitials, Li impurities
~590	Hydroxyl groups
~626	Oxygen interstitials
~750	Oxygen-related defects, zinc interstitials

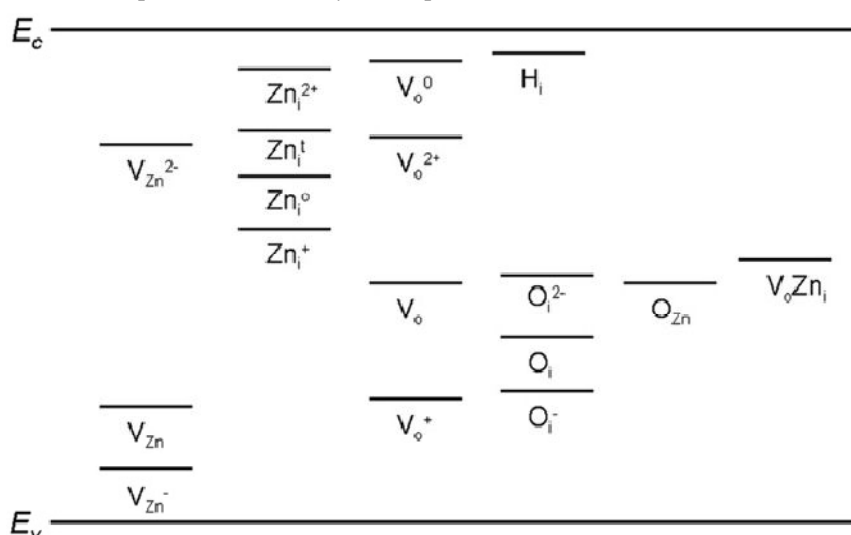
โดยตำแหน่งในการปลดปล่อยของรังสียูวีที่ เนีย แบนด์ เอจ (Near band edge emission) เกิดจากการรวมกันของอิเล็กตรอนในชั้นแถบการนำ และโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นแสงที่อยู่ในชั้นแถบวาเลนซ์ (Photogenerated hole) อัตราส่วนระหว่างการปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นหารด้วยการปลดปล่อยรังสีในช่วงยูวีจะแสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์

การปลดปล่อยแสงสีเขียวนั้นถูกกล่าวถึงมากที่สุดในการปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็น มีหลายหลักการที่ใช้ในการอธิบายการปลดปล่อยแสงสีเขียว ในบางกรณีได้อธิบายการปลดปล่อยแสงสีเขียวเนื่องจากมีทองแดงเป็นสารเจือปน หลายหลักการได้ถูกยกขึ้นมาอธิบาย เช่น ช่องว่างของซิงค์ (Zn vacancies) และออกซิเจนแอนติไซต์ (Oxygen antisite) หลักการที่ถูกยกขึ้นมาอธิบายจุดเริ่มต้นของการปลดปล่อยแสงคือช่องว่างของออกซิเจนที่มีประจุเดี่ยว (Singly ionized oxygen vacancy) การคำนวณได้ระบุว่า ช่องว่างของออกซิเจนเป็นตัวให้ที่มาก (Deep donor) และไม่เสถียร การปลดปล่อยแสงสีเขียวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเมตรยังได้

ถูกระบุอีกว่าเกิดจากการรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนในช่องว่างของออกซิเจนและไฮลด์ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ หนึ่งในวิธีการสำรวจความไม่สมบูรณ์ของผลึกโดยการปลดปล่อยของแสงสีเขียวได้ถูกแสดงความสัมพันธ์กับพื้นผิว โดยปริมาณความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่พื้นผิวจะมากกว่าในเนื้อสาร และได้มีการระบุด้วยว่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกจะขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการทดลอง การทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมจะสามารถทำให้ผลึกโตได้โดยมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่ต่ำได้ ในบางกรณี ความสูงพีคในช่วงแสงสีเขียวที่ตำแหน่งแตกต่างกันจะระบุถึงความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่แตกต่างกัน (Different defects) เนื่องจากความกว้างและการเหลื่อมกันของแต่ละพีค (Broad and overlapping) จึงจำเป็นต้องมีการใช้ การพล็อตกราฟแบบเกาส์เซียน (Gaussian fitting) เพื่อที่จะช่วยระบุตำแหน่งและความสูงของพีคให้มีความแม่นยำมากขึ้น

ในส่วนของการปลดปล่อยแสงสีเหลืองจะถูกอ้างอิงถึงความไม่สมบูรณ์ของผลึกของออกซิเจนที่มากเกินไป (Excess oxygen) การมีสารลิเทียมเจือปน (Li impurities) และการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) นอกจากการปลดปล่อยแสงสีเขียวและแสงสีเหลืองแล้ว ยังมีการปลดปล่อยแสงสีอื่นอีก เช่น แสงสีฟ้า และแสงสีแดง โดยแสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่น 446 นาโนเมตร แสดงถึงการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนในชั้นซิงค์อินเตอร์สทิเชียล (Zn interstitial) และไฮลด์ในชั้นวาเลนซ์ ในขณะที่แสงสีแดงแสดงถึงช่องว่างของออกซิเจนที่มีประจุสองประจุ (Doubly charged oxygen vacancy)

ได้มีการทำการศึกษาความไม่สมบูรณ์ของผลึกและคำนวณระดับพลังงานงานที่ต่างกันของความไม่สมบูรณ์ของผลึกซึ่งสรุปได้ดังรูปที่ 2.16

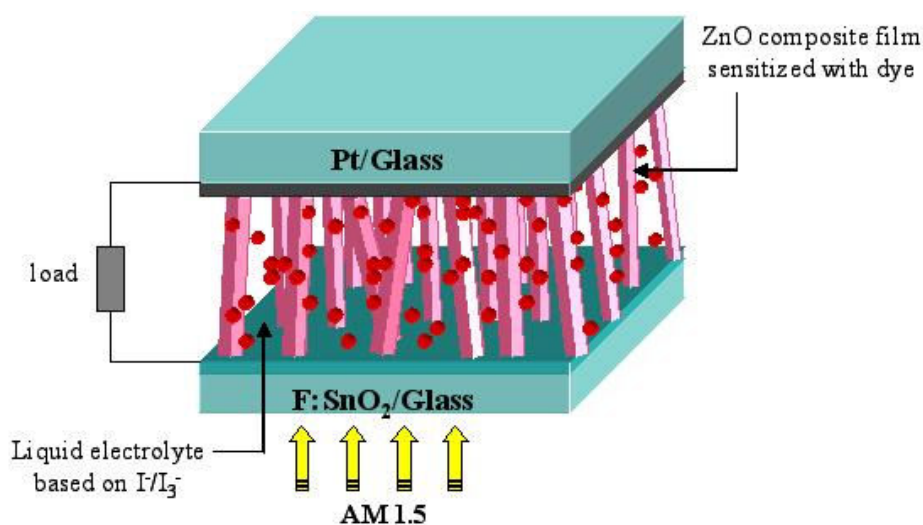


รูปที่ 2.16 คำนวณระดับพลังงานของความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่แตกต่างกันของซิงค์ออกไซด์ [19]

## 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cells or DSSC) [2, 20-23]

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงหรือ DSSC คือเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทหนึ่งที่มีราคาถูก DSSC ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย ศ.ดร. ไมเคิล เกรทเซล (Michael Grätzel) และศ.ดร.ไบรอัน โอเรแกน (Brian O'Regan) ที่ École Polytechnique Fédérale de Lausanne ในปี ค.ศ. 1991 และเรียกเซลล์ชนิดนี้ว่า เกรทเซล เซลล์ เซลล์ชนิดนี้มีความน่าสนใจเนื่องจากมีราคาถูกและใช้อุปกรณ์ไม่ซับซ้อนในกระบวนการผลิต มีราคาถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นก่อน (Silicon cell) สามารถสร้างเซลล์ชนิดนี้ให้เป็นแผ่นที่มีความยืดหยุ่นและทนต่อแรงทางกล สำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังคงชะลอการใช้นี้ เนื่องจากด้วยปัญหาความเสถียรทางด้านเคมีของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งปัจจุบันกำลังดำเนินการแก้ปัญหา โดยได้มีการทำนายไว้ในแผน European Union Photovoltaic Roadmap อย่างมีนัยสำคัญถึงการนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเป็นพลังงานทางเลือกภายในปี ค.ศ. 2020

### 2.3.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (รูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 แสดงส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [24]

ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงประกอบด้วย

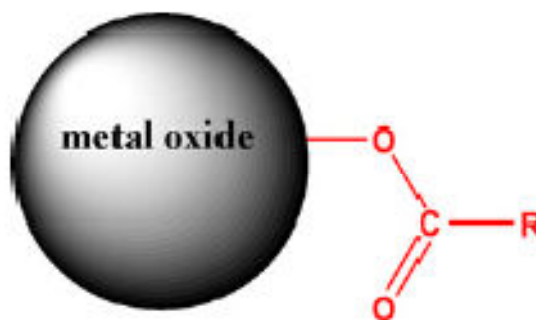
#### 1. ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode)

ประกอบด้วยชั้นโลหะออกไซด์ที่ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน ปกติด้วยโมเลกุลของสีย้อมสำหรับดูดกลืนพลังงานแสง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นขั้วอิเล็กโทรดใน DSSC เนื่องจากคุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์ที่มีช่องว่างระหว่างระดับพลังงานกว้าง (Wide

band gap) ถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดี กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อนยุ่งยาก สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายสัณฐานเพื่อช่วยในการส่งผ่านของอิเล็กตรอน และได้พื้นที่ผิวสูงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวยึดเกาะของสีย้อม เพิ่มพื้นที่ในการรับแสง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ DSSC

## 2. สีย้อมไวแสง (Dye)

ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับโลหะออกไซด์ในขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้สีย้อมที่เป็นโลหะของแร่รูทีเนียม (N719) โดยโมเลกุลของสีย้อมจะดูดซับบนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์และเกิดพันธะเอสเทอร์ (Ester-like bonding) ขึ้นระหว่างกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid group) และซิงค์ออกไซด์ (รูปที่ 2.18) โดยเป็นที่แน่ชัดว่ากลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกจะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมบนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ และส่งเสริมคู่อิเล็กตรอน (electronic coupling) ระหว่างระดับของผู้รับ (The donor levels) ของสีย้อมที่ถูกกระตุ้นและระดับของผู้รับ (The acceptor levels) ของซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 2.18 แสดงรูปแบบของการยึดเกาะของสีย้อมด้วยกลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิกบนโลหะออกไซด์ [25]

## 3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution)

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่สำคัญในกระบวนการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนสามารถส่งผ่านประจุระหว่างฝั่งแอโนดและแคโทดอิเล็กโทรด งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบ ไอโอไดด์-ไตรไอโอไดด์ ไอออน ( $I^-/I_3^-$ ) โดยหลังจากสีย้อมให้อิเล็กตรอนสู่แถบการนำพลังงานของโลหะออกไซด์แล้ว จะถูกชดเชยอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอโอไดด์ ไอออน ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยอิเล็กโทรไลต์จะต้องไม่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นเนื่องจากจะไปตรงกับช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้นของอิเล็กตรอนในสีย้อมส่งผลให้ประสิทธิภาพของ DSSC ลดลง

#### 4. เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode)

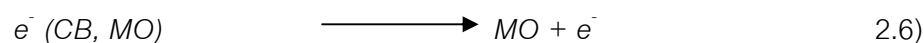
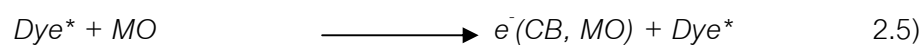
เคาน์เตอร์อิเล็กโทรดทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดักชันให้อิเล็กตรอนจากวงจรไฟฟ้าภายนอกกลับสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในฝั่งเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด

##### 2.3.2 กระบวนการที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [25]

สำหรับกระบวนการที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงแสดงได้ดังรูปที่ 2.20 โดยหลักการทำงานคล้ายกับการสังเคราะห์แสงของพืช กล่าวคือ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านขั้วอิเล็กโทรดโปร่งแสง พลังงานโฟตอนจะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในสีย้อมให้เคลื่อนไปยังสถานะกระตุ้น (Dye\*)



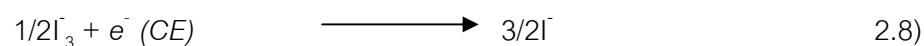
อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ขึ้นไปแล้วตกมายังบนแถบการนำ (Conductive band) ของสารกึ่งตัวนำ ผ่านสารกึ่งตัวนำและออกสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก

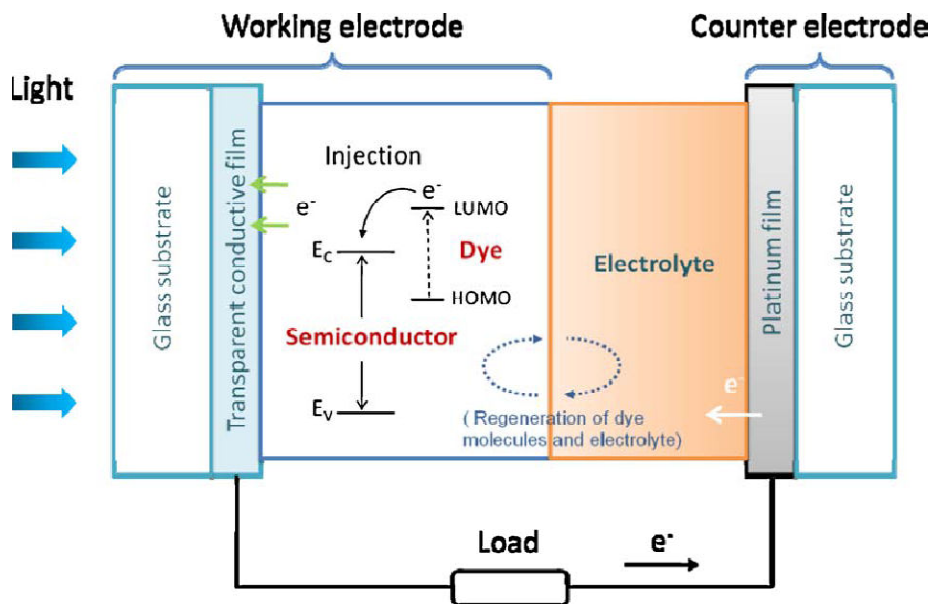


สีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปจะถูกชดเชยอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $\text{I}^-$  ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์



อิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกจะกลับเข้าสู่เซลล์ผ่านทางเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดและผ่านไปยังสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดย  $\text{I}_3^-$  ที่เกิดขึ้นจะถูกรีดิวซ์ที่เคาน์เตอร์อิเล็กโทรดให้กลายเป็น  $\text{I}^-$  อีกครั้ง





รูปที่ 2.19 หลักการทำงานที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [26]

2.3.3 ประสิทธิภาพ (Efficiency) [27]

ค่าประสิทธิภาพหรือค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม (Overall conversion efficiency) คือค่าไร้หน่วยที่แสดงสัดส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{max}$ ) กับกำลังไฟฟ้าที่เซลล์ได้รับ ( $P_{in}$ ) โดยกำลังไฟฟ้าที่เซลล์ได้รับสามารถคำนวณได้จากแหล่งกำเนิดแสง สามารถแสดงสมการหาค่าประสิทธิภาพโดยรวมได้ดังสมการ 2.9)

$$Eff. (\%) = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{(V_{oc}I_{sc}FF)}{P_{in}} \tag{2.9}$$

โดยตัวแปรแต่ละตัวมีความหมายดังนี้

$P_{max}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด

$P_{in}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่เซลล์ได้รับ

$V_{oc}$  คือ ค่าความต่างศักย์วงจรมืด

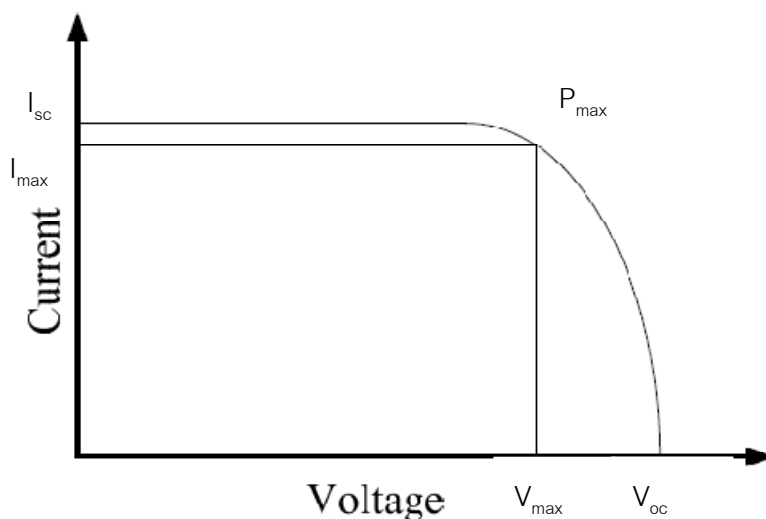
$I_{sc}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมืด

FF คือ ฟิลล์แฟคเตอร์



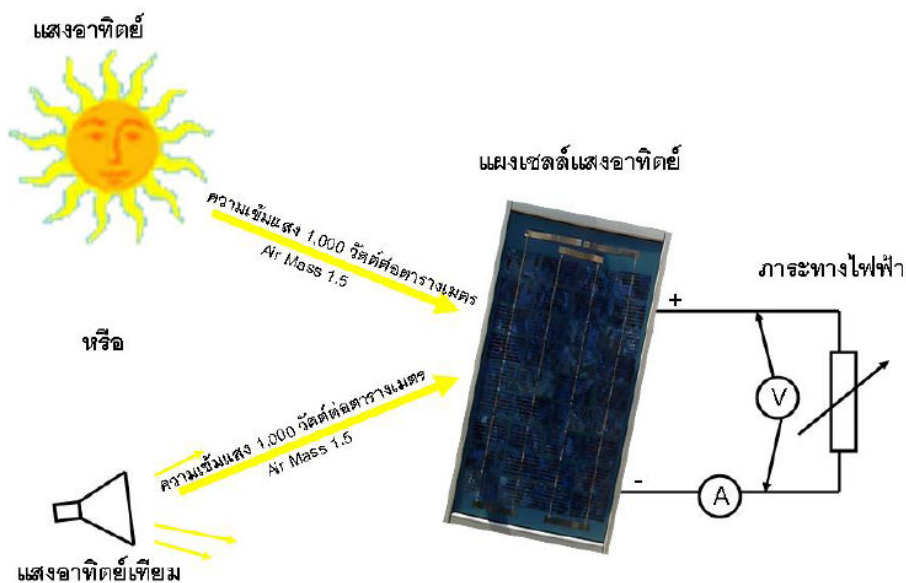
สามารถอธิบายค่า  $P_{max}$ ,  $P_{in}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  และ FF ได้จากรูปที่ 2.20 ซึ่งแสดงกราฟกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์เมื่อต่อเข้ากับโหลดที่แปรค่าตั้งแต่สภาวะลัดวงจร (Shot circuit) ถึงสภาวะวงจรเปิด (Open circuit) โดยตัดแกนที่แรงดันเป็นศูนย์ จะได้ค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจร (Short circuit current:  $I_{sc}$ ) ส่วนจุดตัดแกนที่กระแสเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันขณะวงจรเปิด (Open circuit voltage:  $V_{oc}$ ) เมื่อนำค่า  $I_{sc}$  คูณกับค่า  $V_{oc}$  ก็จะได้กำลังไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในกราฟต้องมีจุดเดียวที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเราเรียกว่า กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (Power at maximum point:  $P_{max}$ ) ส่วนกระแสกับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at maximum power point:  $I_m$ ) กับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at maximum power point:  $V_m$ ) ตามลำดับ และ FF คือค่าไร้หน่วยที่เป็นค่าอัตราส่วนที่เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นกับเซลล์ไฟฟ้าอุดมคติซึ่งมีสูตรการคำนวณที่อธิบายไว้ในสมการ 2.10)

$$FF = P_{max} / (I_{sc} V_{oc}) \quad 2.10)$$



รูปที่ 2.20 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ [27]

ค่าสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ถูกระบุภายใต้เป็นผลที่ได้จากการทดสอบวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) โดยต่อภาระทางไฟฟ้าที่สามารถแปรค่าได้ตั้งแต่สภาวะวงจรเปิดไปจนถึงสภาวะลัดวงจรเข้ากับแผงแล้วฉายแสงให้กับแผงเซลล์ตามรูปที่ 2.21 โดยมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่สภาวะการทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition, STC) คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยมีสเปกตรัมของแสงที่ Air Mass เท่ากับ 1.5 AM



รูปที่ 2.21 การทดสอบวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้า [27]

2.3.4 ค่าประสิทธิภาพของ DSSC ที่ได้จากการประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานต่างๆ เป็นขั้วอิเล็กโทรด

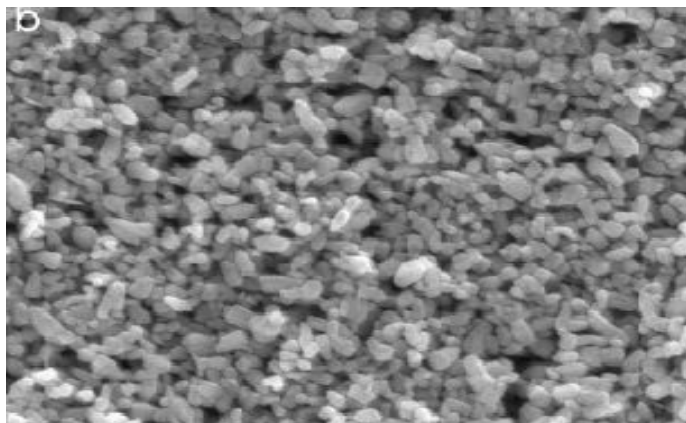
ซิงค์ออกไซด์มีหลากหลายลักษณะทางสัณฐาน ได้แก่ ทรงกลม (Sphere) แผ่น (Sheet) ทรงสี่หน้า (Tetrapod) เป็นต้น พื้นที่ผิวที่มากของซิงค์ออกไซด์จะช่วยเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะของสีย้อมมากขึ้น แต่ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของ DSSC มากขึ้นไม่ใช่เพียงพื้นที่ผิวนั้น แต่ยังขึ้นกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ซึ่งจะช่วยให้การส่งผ่านของอิเล็กตรอนและการดูดซับพลังงานแสงจากโฟตอน ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของ DSSC เพิ่มขึ้นด้วย

โดยรายงานการประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานต่างๆ เป็นขั้วอิเล็กโทรดใน DSSC มีดังต่อไปนี้

#### 1. สัณฐานทรงกลม (Sphere)

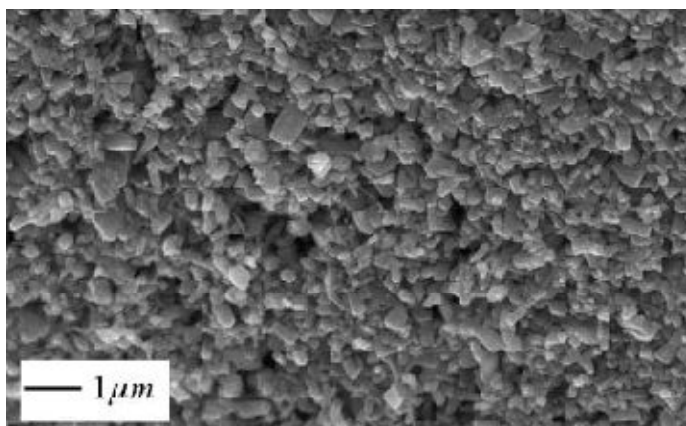
ได้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงกลมสำหรับ DSSC ดังนี้

Elkhidir และคณะ [28] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานทรงกลม (รูปที่ 2.22) แต่ละอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 นาโนเมตรให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) เท่ากับ 0.75



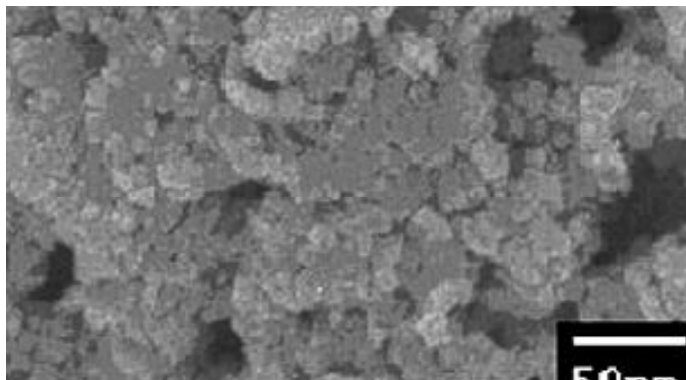
รูปที่ 2.22 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม แต่ละอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 นาโนเมตร [28]

Choopun และคณะ [29] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานทรงกลม (รูปที่ 2.23) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200-500 นาโนเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) เท่ากับ 0.68



รูปที่ 2.23 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200-500 นาโนเมตร [29]

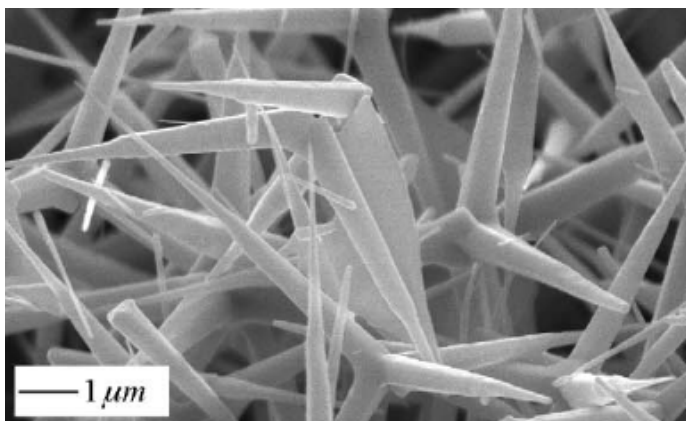
Liu และ คณะ [30] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานทรงกลม (รูปที่ 2.24) เส้นผ่านศูนย์กลาง 15-20 นาโนเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) = 0.25(N3 dye) และ 0.2 (N719 dye)



รูปที่ 2.24 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-20 นาโนเมตร [30]

## 2. สัณฐานทรงสี่หน้า (Tetrapod)

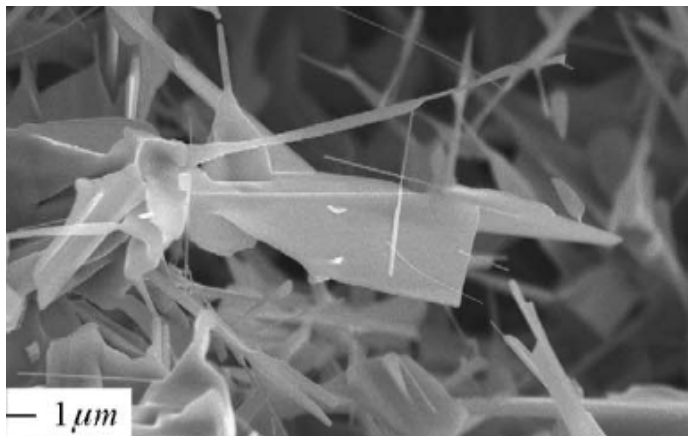
ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้ามีโครงสร้างแบบสามมิติประกอบด้วยแขนสี่แขนที่ยื่นออกมาจากแกนกลางเดียวกัน Choopun และคณะ[29] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานทรงสี่ขา มีเส้นผ่านศูนย์กลางขา (Leg diameter) ประมาณ 500 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 2-3 ไมโครเมตร (รูปที่ 2.25) ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) เท่ากับ 0.41



รูปที่ 2.25 รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่ขาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขา 500 นาโนเมตร ยาวประมาณ 2-3 ไมโครเมตร [29]

## 3. สัณฐานเข็มขัด (Belt)

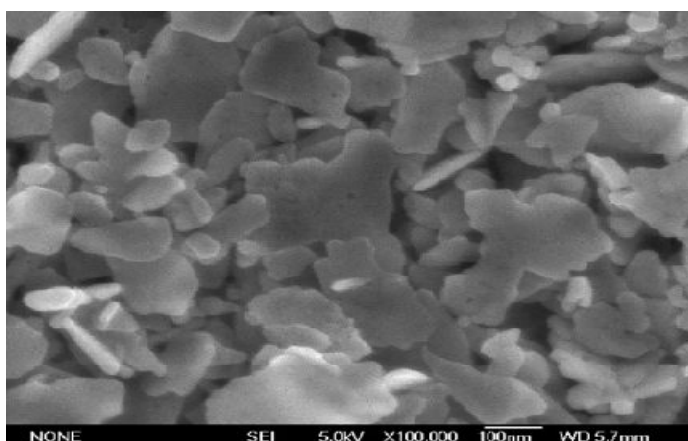
ซิงค์ออกไซด์สัณฐานเข็มขัดถูกนำไปประยุกต์ใช้ใน DSSC ในปี ค.ศ. 2009 โดย Choopun และคณะ [29] ซิงค์ออกไซด์สัณฐานเข็มขัดที่สังเคราะห์ได้มีความหนาประมาณ 50-200 นาโนเมตร ขนาดของแผ่น (Size of sheet) ประมาณ 2-5 ไมโครเมตร (รูปที่ 2.26) ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) เท่ากับ 0.29



รูปที่ 2.26 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานเข็มขัดที่มีความหนาประมาณ 50-200 นาโนเมตร ขนาดของแผ่น ประมาณ 2-5 ไมโครเมตร [29]

#### 4. สัณฐานแผ่น (Sheet)

Suliman และคณะ [25] ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีโครงสร้างแบบกึ่งสองมิติ (Quasi two dimensional structures) สังเคราะห์ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลซ้ำ (Rehydrothermal growth process) ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีความกว้าง (Surface view) ประมาณ 100 นาโนเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 2.27 ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$ %) เท่ากับ 1.55

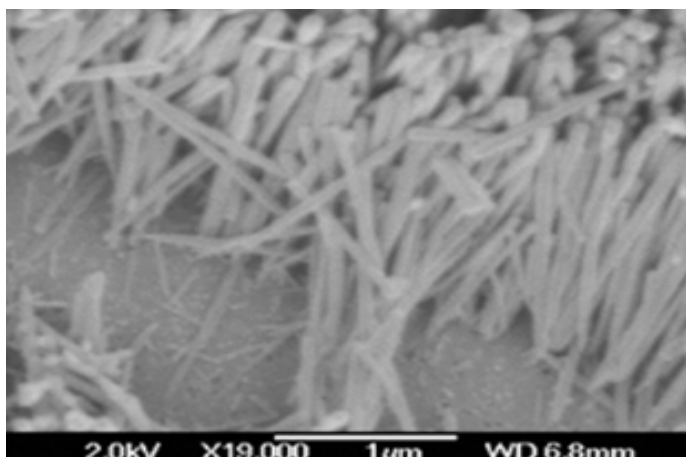


รูปที่ 2.27 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นที่มีความกว้างแผ่นประมาณ 100 นาโนเมตร [28]

### 5. สัณฐานลวดและแท่งตัน (Wire and Rod)

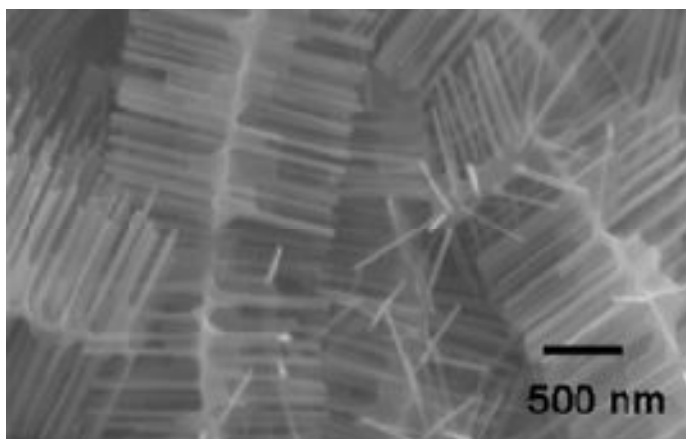
ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดและแท่งตันที่มีค่าความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่สูงจะช่วยให้การส่งผ่านของอิเล็กตรอนของซัลไฟด์ไอโอดีนใน DSSC สำหรับงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดและสัณฐานแท่งตันใน DSSC มีดังนี้

Pradhan และคณะ [31] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานลวด (รูปที่ 2.28) ความยาว 1 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 นาโนเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) = 0.7



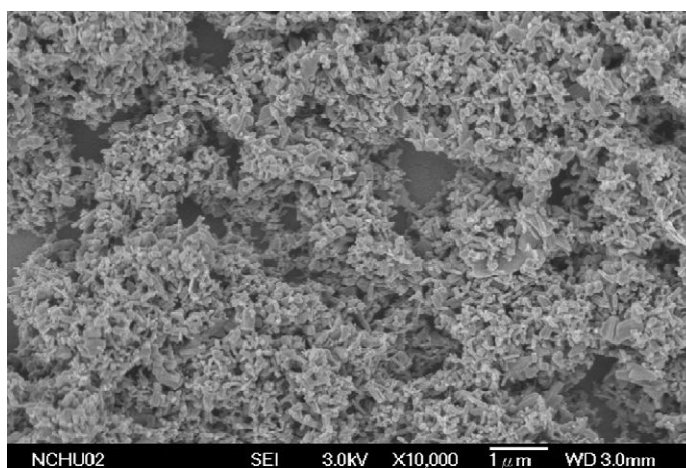
รูปที่ 2.28 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดที่ยาว 1 ไมโครเมตรเส้นผ่านศูนย์กลางยาว 60 นาโนเมตร [31]

Suh และคณะ [32] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานลวดแบบโครงสร้างกิ่ง (branched structure) (รูปที่ 2.29) เส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 นาโนเมตร ยาว 5-6 ไมโครเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) = 0.46



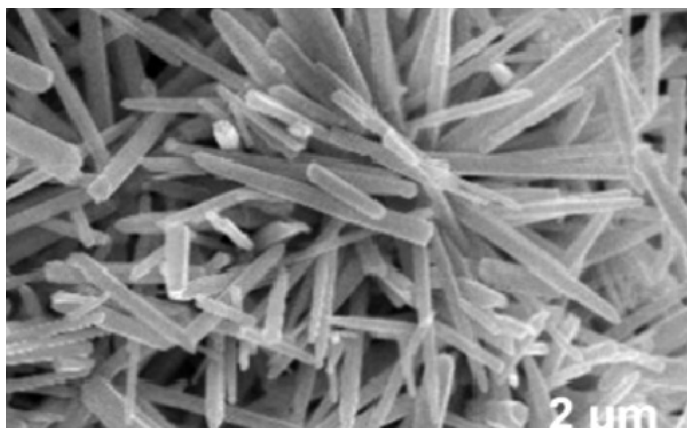
รูปที่ 2.29 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดแบบโครงสร้างกึ่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 นาโนเมตร ยาว 5-6 ไมโครเมตร [32]

Chu และคณะ[33] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานแท่งตัน (รูปที่ 2.30) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 นาโนเมตร ยาว 300 นาโนเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) เท่ากับ 0.006



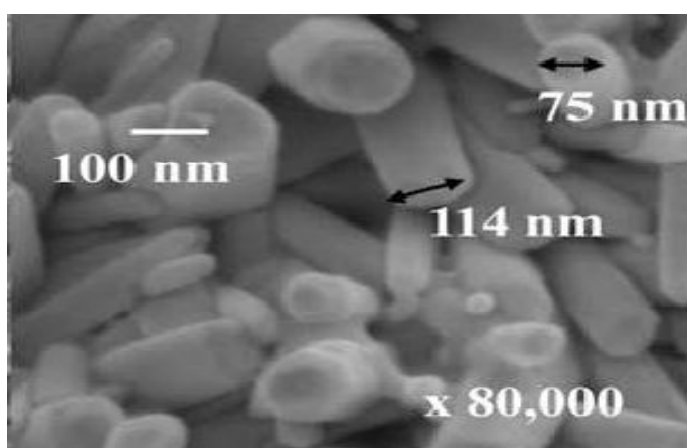
รูปที่ 2.30 รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 นาโนเมตร ยาว 300 นาโนเมตร [33]

Umar และคณะ [34] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานแท่งตันทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal-shaped nanorods) (รูปที่ 2.31) ความยาวประมาณ 5 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 150 นาโนเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) เท่ากับ 1.86



รูปที่ 2.31 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตันที่มีความยาวประมาณ 5 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 150 นาโนเมตร [34]

M.F Hossain และคณะ [35] สังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานแท่งตัน(รูปที่ 2.32) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 103 นาโนเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %)เท่ากับ 1.04



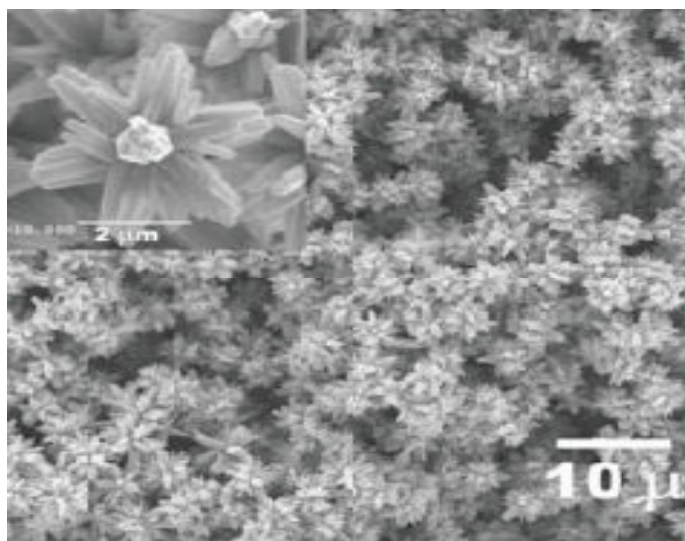
รูปที่ 2.32 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 103 นาโนเมตร [35]

#### 6. สัณฐานดอกไม้ (Flower-like)

การประยุกต์ใช้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ใน DSSC เนื่องมาจากซิงค์ออกไซด์สัณฐานหลอดและแท่งตันอย่างเดียวอาจจะจับโฟตอนของแสงอาทิตย์ได้ไม่มากเนื่องจากมีช่องว่างระหว่างหลอดและแท่งตัน จึงได้มีความคิดที่จะใช้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้มาประยุกต์ใน DSSC เพราะมีพื้นที่ผิวมากและมีการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีเนื่องจากมีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกันกลาง (รูปที่ 2.33) โดยสามารถสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ได้จากวิธีไฮโดรเทอร์มอล มีเส้นผ่าน



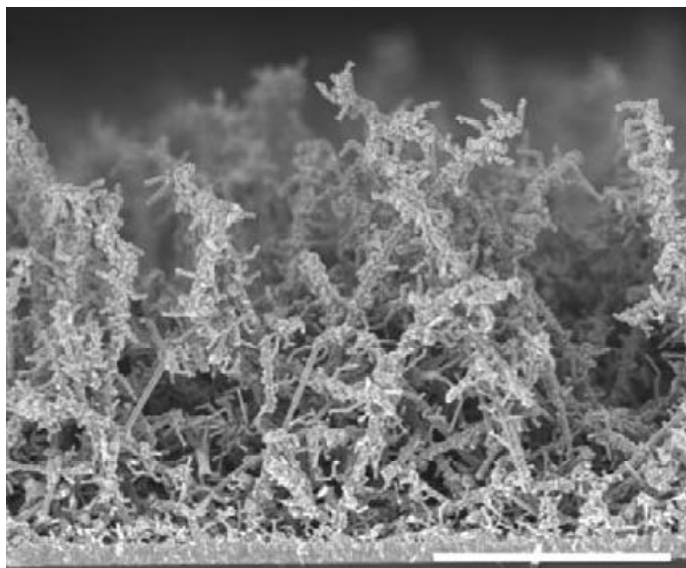
ศูนย์กลางประมาณ 200 นาโนเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$ %) เท่ากับ 1.9



รูปที่ 2.33 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 นาโนเมตร [34]

#### 7. สัณฐานลวดรูปทรงคล้ายเซลล์ประสาท (Dendritic ZnO nanowire)

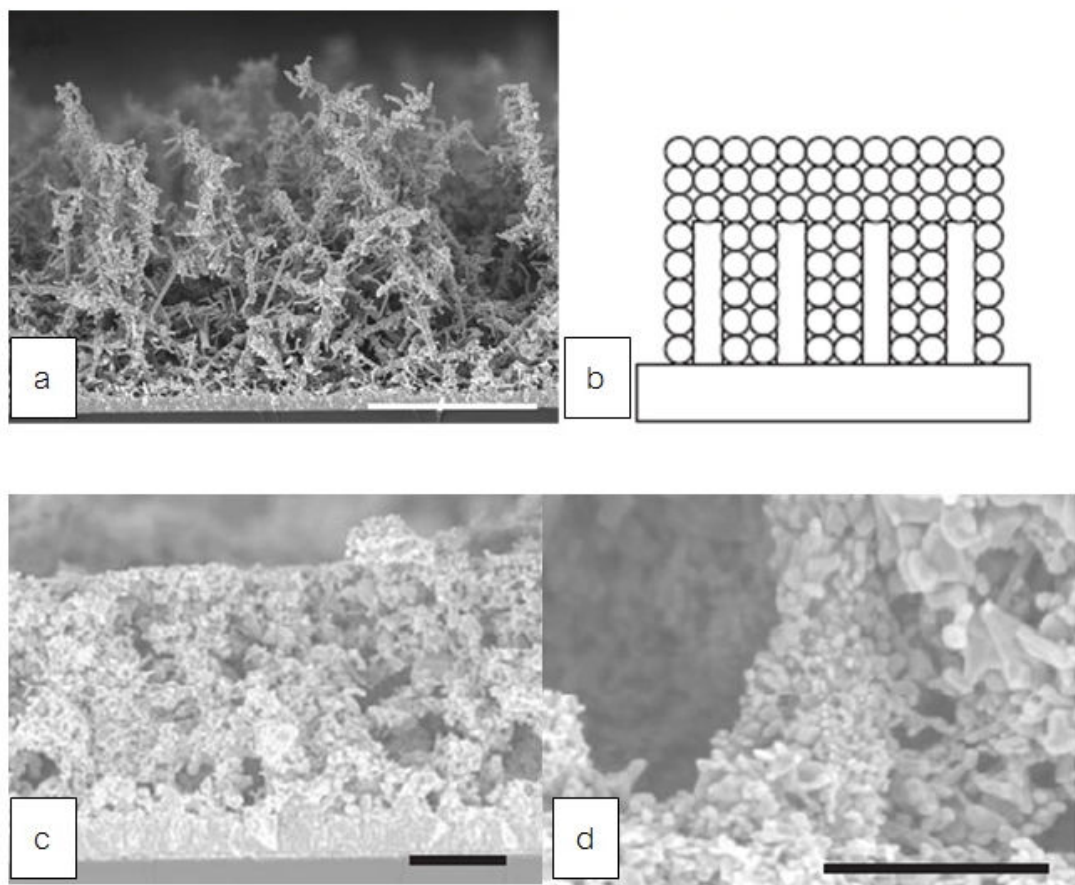
ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดรูปทรงคล้ายเซลล์ประสาท มีโครงสร้างค่อนข้างซับซ้อน เดนไดร์เกิดจากการโตของซิงค์ออกไซด์จากแกนกลางหลัก (Back bone) Baxter และคณะ [36] ได้อธิบายการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดแบบเดนไดร์ โดยเรียกว่าโตแบบนี้ว่า มัลติเพิลเจเนอเรชัน (Multiple-generation) สังเคราะห์ด้วยวิธี เมทัลออกไซด์โมเวเปอไรเดโพสิชัน (MOCVD) โดยแกนกลางหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 นาโนเมตร ยาว 1 ไมโครเมตร และเดนไดร์ที่ต่อออกมาจากโครงสร้างหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 นาโนเมตร (รูปที่ 2.34) ให้ค่าประสิทธิภาพ (Overall conversion efficiencies,  $\eta$ %) เท่ากับ 0.5



รูปที่ 2.34 SEM ของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวด เส้นผ่านเท่ากับ 60 นาโนเมตร ยาว 1 ไมโครเมตร รูปทรงคล้ายเส้นประสาทมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นาโนเมตร [36]

#### 8. สัณฐานที่เกิดจากการรวมระหว่างสัณฐานลวดและสัณฐานทรงกลม (Hybrid cell)

ซิงค์ออกไซด์สัณฐานที่เกิดจากการรวมระหว่างสัณฐานลวดและสัณฐานทรงกลมเกิดจากแนวความคิดที่ว่า พื้นที่ในการรับแสงจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติมช่องว่างระหว่างซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดด้วยซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม และซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดจะช่วยให้การส่งผ่านของอิเล็กตรอน โดย Baxter และคณะ [36] ได้นำมาประยุกต์ใช้ใน DSSC ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 นาโนเมตร ยาว 1 ไมโครเมตร ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 นาโนเมตร (รูปที่ 2.35) ให้ค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiencies,  $\eta$  %) เท่ากับ 1.3



รูปที่ 2.35 รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์ที่มี a) สัณฐานแบบลวด b) ภาพจำลองของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแบบลวดที่มีซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมเกาะอยู่ที่ด้านบนและด้านข้าง (Hybrid) c) รูปจากกล้อง SEM ของซิงค์ออกไซด์ (Hybrid) ที่กำลังขยายต่ำ และ (d) ที่กำลังขยายสูง [36]

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิว สัณฐาน (Morphology) ขนาด (Size) ของอนุภาคซึ่งคอกออกไซด์ที่ใช้เป็นเคมีคอนดักเตอร์ใน DSSC และค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiency,  $\eta$  %) ของแต่ละงานวิจัย

ลำดับที่	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)	สัณฐานของซึ่งคอกออกไซด์ที่ใช้เป็นเคมีคอนดักเตอร์ในDSSCs	ชนิดสีย้อม	ขนาดของอนุภาค (นาโนเมตร)	ค่าประสิทธิภาพรวม (%)
1.[25]	-	สัณฐานทรงกลม	N 719	เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 นาโนเมตร	0.75
2.[26]	-	สัณฐานทรงกลม	N 719	เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200-500 นาโนเมตร	0.68
3.[27]	-	สัณฐานทรงกลม	N 3 N 719	เส้นผ่านศูนย์กลาง 15-20 นาโนเมตร	0.2 0.25
4.[26]	-	สัณฐานทรงสี่หน้า	N 719	เส้นผ่านศูนย์กลางขา(Leg diameter) ประมาณ 500 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 2-3 ไมโครเมตร	0.41
5.[26]	-	สัณฐานเข็มขัด	N 719	ความหนาประมาณ 50-200นาโนเมตร ขนาดของแผ่น(Size of sheet) ประมาณ 2-5 ไมโครเมตร	0.29
6.[25]	63.2	สัณฐานแผ่น	N 719	ความหนาประมาณ 3-10 นาโนเมตร (Surface view) ความหนาประมาณ 4 ไมโครเมตร(Cross-sectional view)	1.55
7.[28]	-	สัณฐานลวด	N 719	ความยาว 1 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง60 นาโนเมตร	0.7

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบพื้นที่ผิว สัณฐาน (Morphology) ขนาด (Size) ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นเคมีคอนดักเตอร์ใน DSSC และค่าประสิทธิภาพรวม (Overall conversion efficiency,  $\eta$  %) ของแต่ละงานวิจัย (ต่อ)

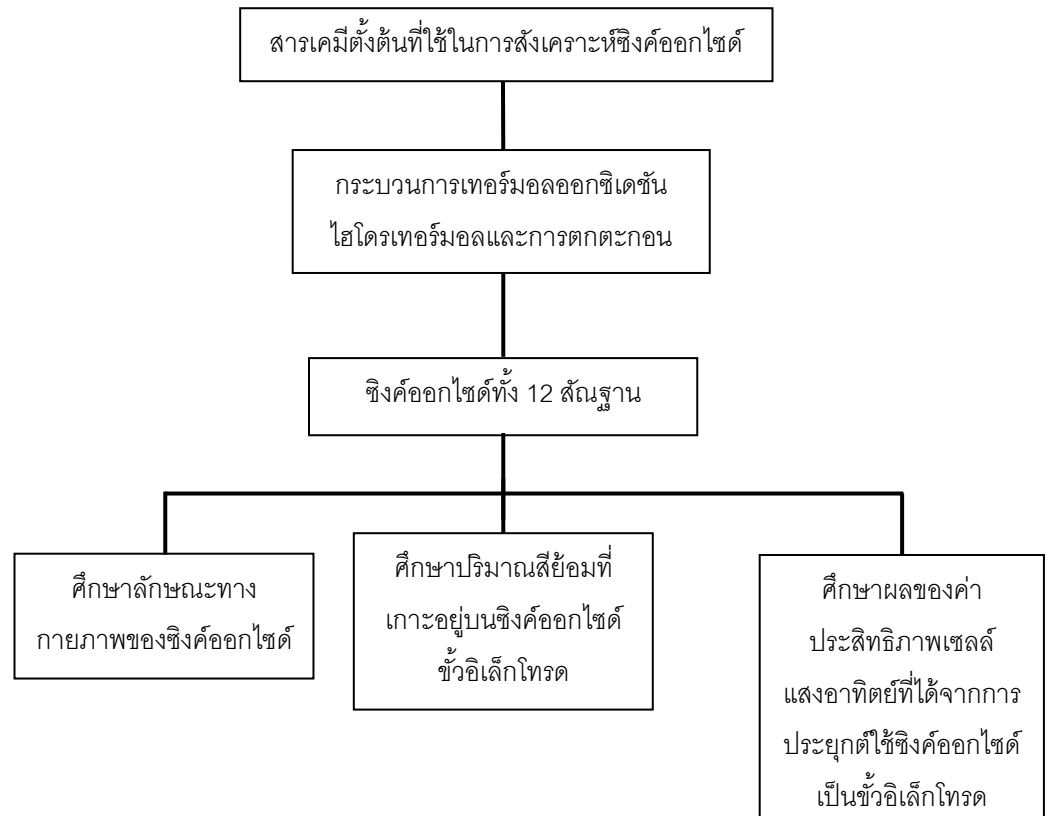
ลำดับที่	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/กรัม)	สัณฐานของซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นเคมีคอนดักเตอร์ในDSSCs	ชนิดสี้อม	ขนาดของอนุภาค (นาโนเมตร)	ค่าประสิทธิภาพรวม (%)
8.[29]	-	สัณฐานลวดแบบโครงสร้างกิ่ง	N 719	เส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 นาโนเมตร ยาว 5-6 ไมโครเมตร	0.46
9.[30]	-	สัณฐานแท่งตัน	N 719	เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 นาโนเมตร ยาว 300 นาโนเมตร	0.006
10.[31]	12.71	สัณฐานแท่งตัน ทรงหกเหลี่ยม	N 719	ความยาว ประมาณ 5 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 150 นาโนเมตร	1.86
11.[32]	-	สัณฐานแท่งตัน	N719	มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 103 นาโนเมตร	1.04
12.[20]	-	สัณฐานดอกไม้	N719	เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200 นาโนเมตร	1.9
13.[33]	-	สัณฐานลวด โครงสร้างคล้ายเส้นประสาท	N719	แกนกลางหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 นาโนเมตร ยาว 1 ไมโครเมตร และเดนไดรที่ต่อออกมาจากโครงสร้างหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 นาโนเมตร	0.5
14.[33]	-	สัณฐานที่เกิดจากการรวมระหว่าง สัณฐานลวดและ สัณฐานทรงกลม	N719	มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 นาโนเมตร ยาว 1 ไมโครเมตร ซิงค์ออกไซด์ สัณฐานทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 นาโนเมตร	1.3

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานโดยใช้กระบวนการเทอร์มอลออกซิเดชันที่เป็นวิธีการสังเคราะห์แบบเฟสแก๊ส(French process) กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและการตกตะกอนซึ่งเป็นวิธีการสังเคราะห์แบบเฟสของเหลว จากนั้นทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ซึ่งประกอบด้วย เฟส ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน จากนั้นนำซิงค์ออกไซด์ที่ได้นำไปใช้เป็นสารกึ่งตัวนำในขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยทำการวัดปริมาณสีย้อมที่ติดอยู่ที่พื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ขั้วอิเล็กโทรดและวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยขั้นตอนการวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

### 3.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

#### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. หม้อนึ่งอัดความดัน (Autoclave) ภาชนะภายในทำด้วยเทฟลอนปริมาตร 50 มิลลิลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ภายนอกทำด้วยสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร
2. เครื่องปั่น (Stirrer)
3. ตู้อบ (Memmert, EN274A)
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JSM-5800LV, JSM-6510, JEOL)
5. เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง BET (The Brunauer–Emmett–Teller) (BELSORP-Mini, Rubotherm)
6. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X'Pert PRO MPD model pw3040/60, PANalytical)
7. เครื่องโฟโตลูมิเนสเซน (Photoluminescence, PL) (Model Perkin Elmer LS55)
8. เครื่องทดสอบประสิทธิภาพเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Keithley model 236, MV Systems Inc.)
9. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรสโคปี (UV-1700, SHIMADZU)
10. ชุดแบบพิมพ์ซิลิโคน

#### 3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl) Laboratory grade จากบริษัท Ajax Finechem
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) Analytical grade จากบริษัท Qrec
3. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

4. เอทานอล ( $C_2H_5OH$ ) Analytical grade จากบริษัท Merck
5. ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต ( $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ) Analytical grade จากบริษัท Ajax Finechem
6. ทังสโตฟอสฟอริก แอซิด ( $H_3PW_{12}O_{40}$ )
7. เมทานอล ( $CH_3OH$ ) Analytical grade จากบริษัท Merck
8. เอทิลีนไดเอมีน ( $C_2H_8N_2$ ) Analytical grade จากบริษัท Qrec
9. ผงซิงค์ออกไซด์ ( $ZnO$  powder) Product Number 544906 จากบริษัท Sigma-Aldrich
10. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) Analytical grade จากบริษัท Qrec
11. ซิงค์ซัลเฟต ( $ZnSO_4$ ) จากบริษัท Analytical grade Ajax Finechem
12. เฮกซะเมทาลีนเตตระมีน ( $C_6H_{12}N_4$ ) Analytical grade จากบริษัท Ajax Finechem
13. ไตรโซเดียมซีเตรต ( $Na_3C_6H_5O_7$ ) Analytical grade จากบริษัท Ajax Finechem
14. เอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose) Analytical grade จากบริษัท Fluka
15. เทอร์พีนอล (Terpineol) Analytical grade จากบริษัท Fluka
16. กระจกนำไฟฟ้า FTO (TEC7) จากบริษัท Pilkington
17. สีย้อมของสารประกอบโลหะรูทีเนียม (N719) จากบริษัท Dyesol
18. แพลทตินั่ม จากบริษัท Dyesol
19. แผ่นพลาสติกเซอรลินและบายเนล (Surlyn & Bynel film) จากบริษัท ดูปองต์ ประเทศไทย จำกัด

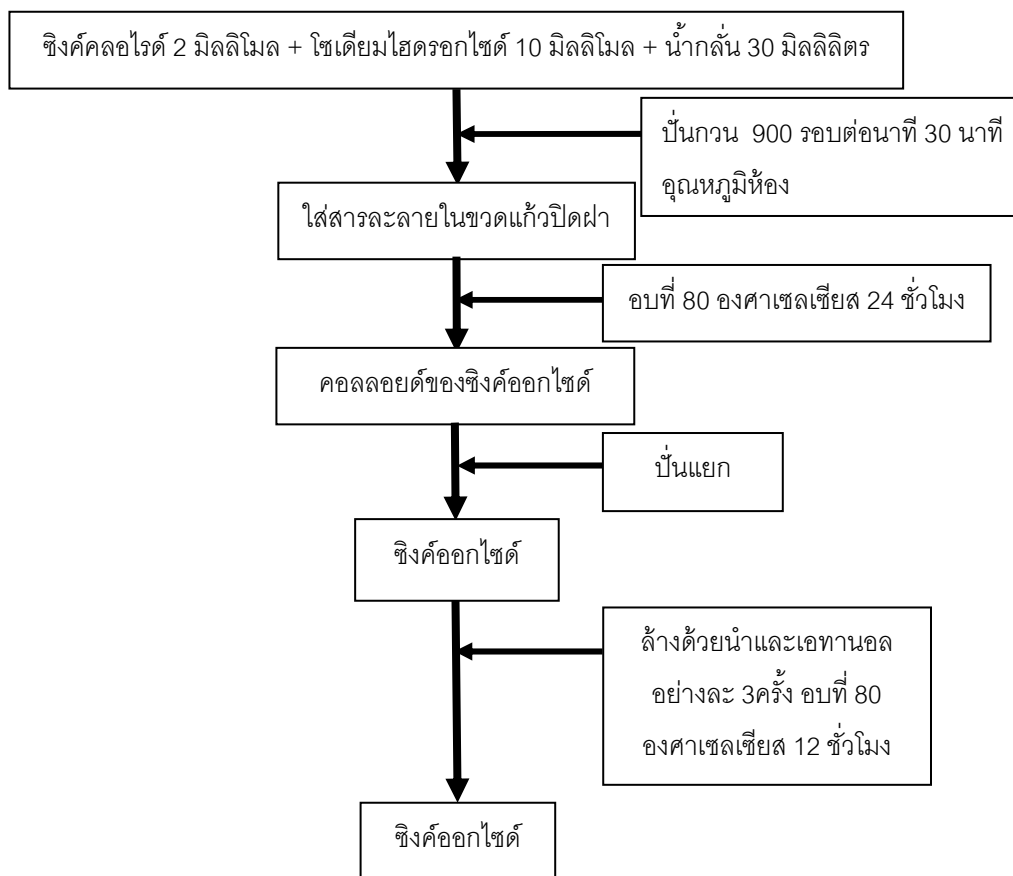


### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะทางสัณฐานแตกต่างกัน

##### 3.3.1.1 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากแผ่นซีทเรียงซ้อนกัน

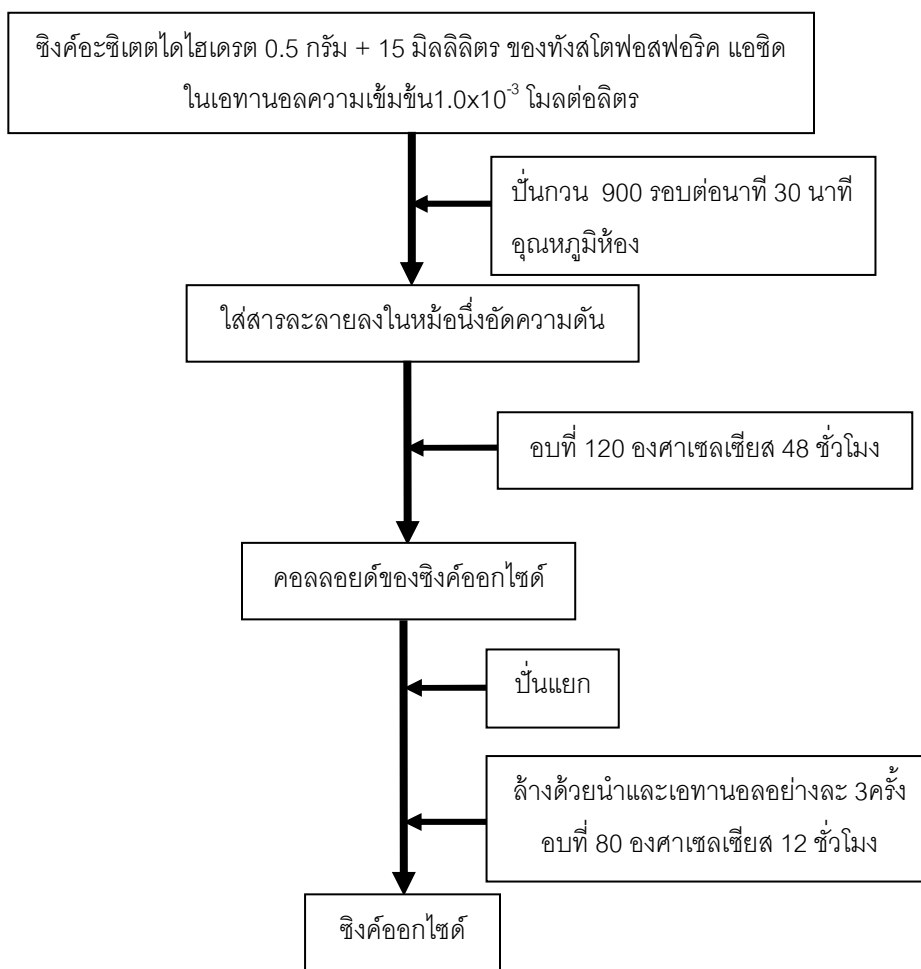
[18]



รูปที่ 3.2 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากแผ่นซีท

จากรูปที่ 3.2 ซิงค์คลอไรด์ปริมาณ 2 มิลลิโมล และไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิโมล ละลายลงในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ทำการปั่นกวน นำสารละลายที่ได้ใส่ลงในถ้วยแก้วที่ปิดสนิทและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง ตะกอนสีขาวที่ได้จะนำไปแยกออกจากสารละลายด้วยเครื่องแยกเหวี่ยง (centrifuge) ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลหลายๆครั้งเพื่อเอาสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกไป จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงจะได้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แผ่นซีท

## 3.3.1.2 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงกลมกลวง [13]

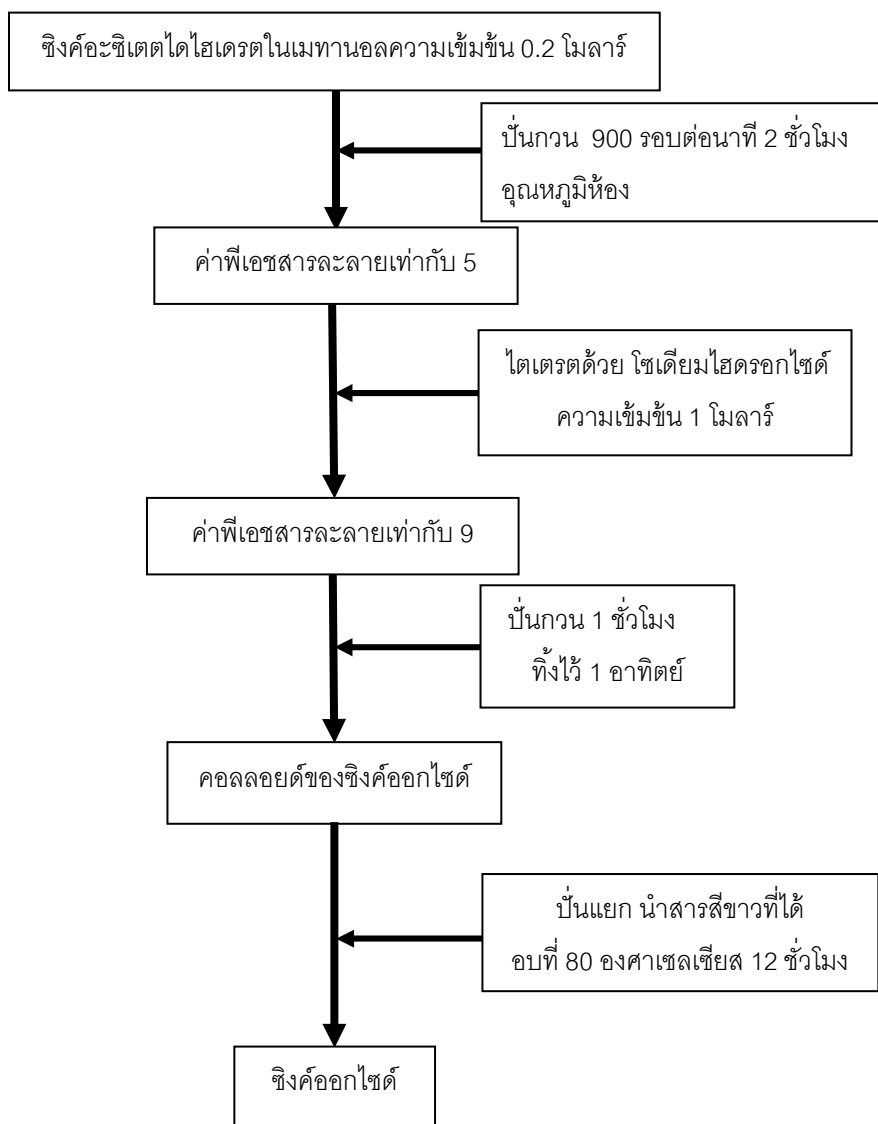


รูปที่ 3.3 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงกลมกลวง

จากรูปที่ 3.3 ใส่สารซิงค์อะซิเตต 0.5 กรัม ลงในสารละลายทั้งสโตฟอสฟอริก แอซิดในเอทานอลเข้มข้น  $1 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร 15 มิลลิลิตร ปั่นกวนสารละลายและใส่ลงในหม้อนึ่งอัดความดัน อบที่อุณหภูมิต้อง 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แยกตะกอนที่ได้จากสารละลายและไปล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอล จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิต้อง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงกลมกลวง

3.3.1.3 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมอนุภาคนาโนเมตร

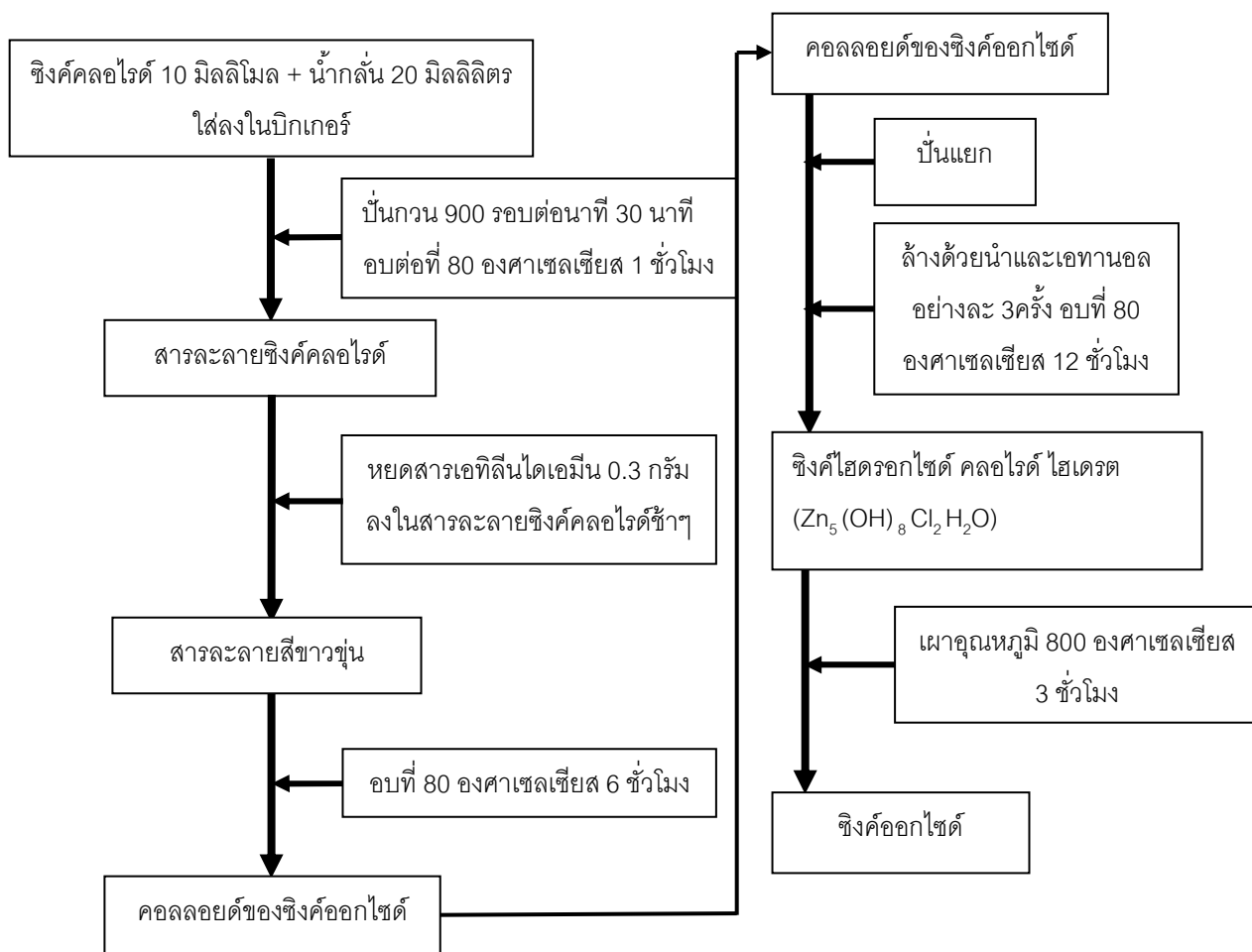
[16]



รูปที่ 3.4 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมอนุภาคนาโนเมตร

จากรูปที่ 3.4 ในขั้นต้นจะนำซิงค์อะซิเตตไปละลายในเมทานอลจนได้ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นไตเตรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์จนค่าพีเอชสารละลายเท่ากับ 9 จากนั้นปั่นกวนเพิ่มอีก 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 อาทิตย์ แยกตะกอนออกจากสารละลายโดยวิธีการเหวี่ยงแยก อบแห้งตะกอนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมขนาดนาโนเมตร

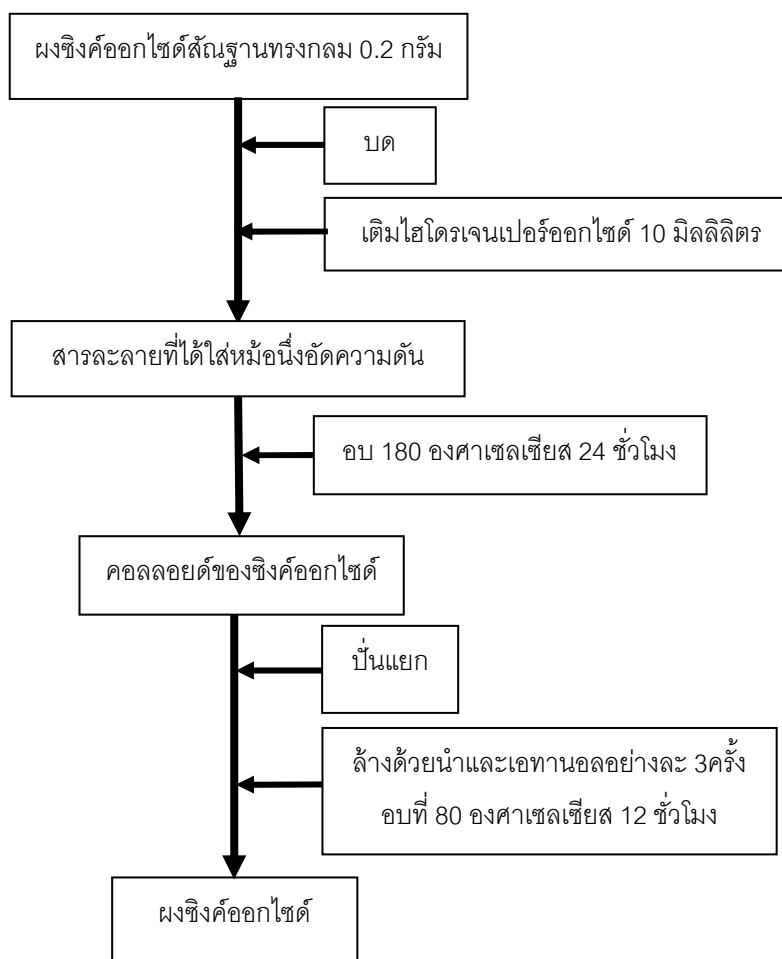
## 3.3.1.4 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน [17]



รูปที่ 3.5 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน

จากรูปที่ 3.5 ซิงค์คลอไรด์ 10 มิลลิโมลละลายในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ใส่สารละลายที่ได้ในบีกเกอร์และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นค่อยๆหยดสารเอทิลีนไดเอมีนลงในสารละลายที่กำลังปั่นกวน นำสารละลายที่ได้ไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะได้สารซิงค์ไฮดรอกไซด์ คลอไรด์ ไฮเดรต จากนั้นนำไปเผาที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะได้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน

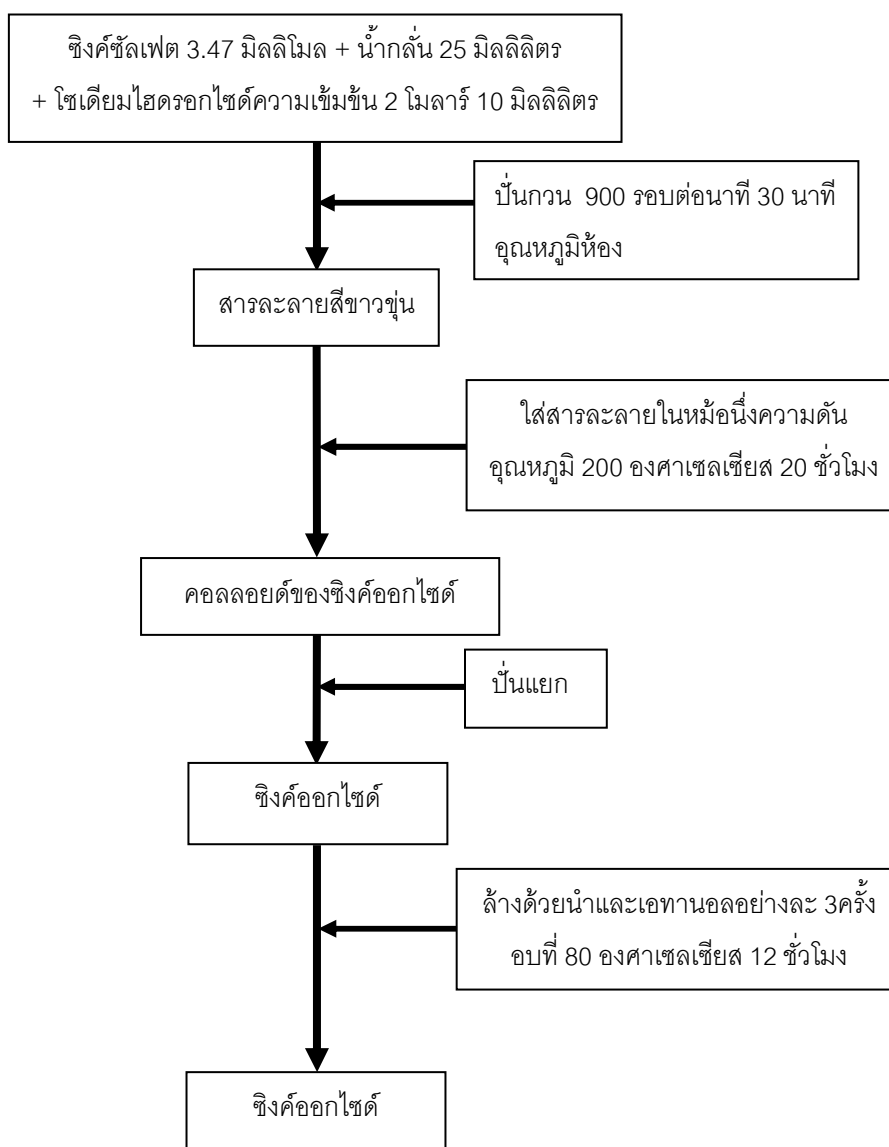
## 3.3.1.5 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานท่อกลวง [37]



รูปที่ 3.6 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานท่อกลวง

จากรูปที่ 3.6 ผงซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม 0.2 กรัม บดให้ละเอียดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นใส่ลงในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ใสในหม้อหนึ่งอัดความดัน อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แยกตะกอนที่ได้ออกจากสารละลายด้วยวิธีเหวี่ยงแยก จากนั้นนำตะกอนล้างด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลหลายครั้ง อบที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงจะได้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานท่อกลวง

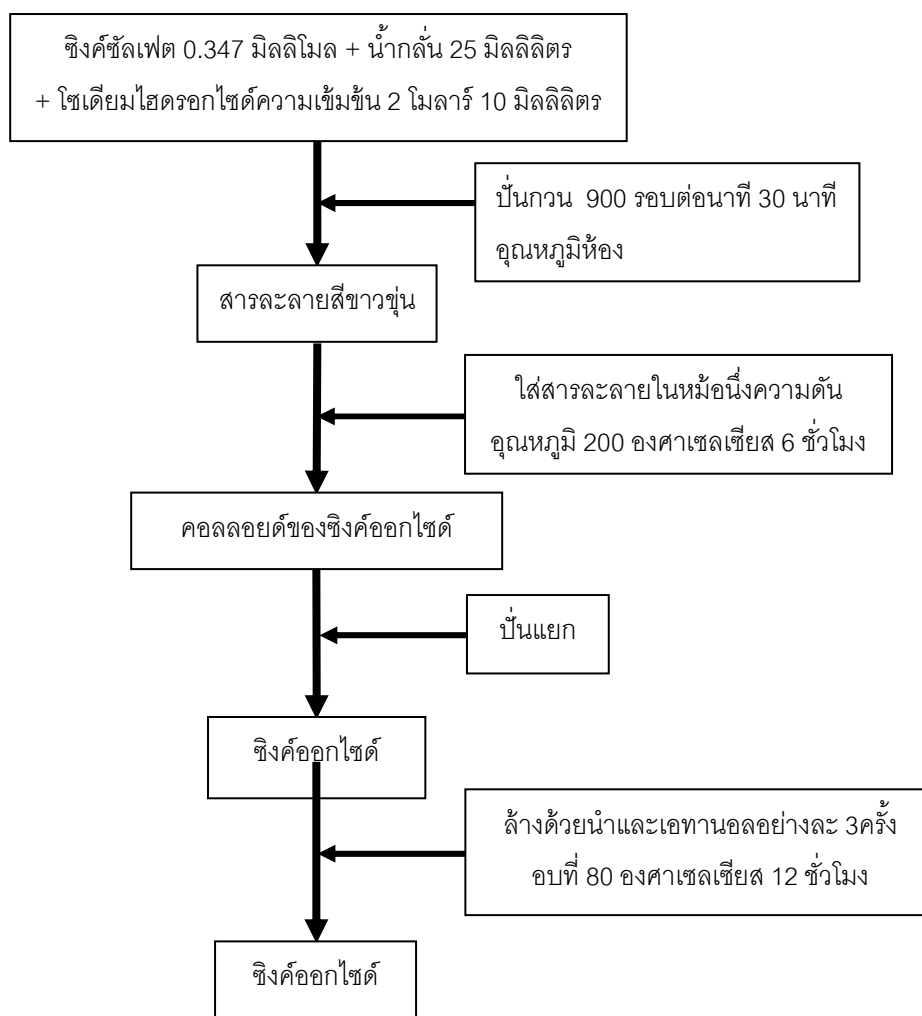
## 3.3.1.6 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานแห้งต้น [14]



รูปที่ 3.7 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานแห้งต้น

รูปที่ 3.7 ซิงค์ซัลเฟต 3.47 มิลลิโมลและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ 10 มิลลิลิตร ละลายในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ปั่นกวนสารละลายที่ได้และนำไปใส่ในหม้อนึ่งอัดความดันอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 20 ชั่วโมงจะได้คอลลอยด์ของซิงค์ออกไซด์ แยกตะกอนของซิงค์ออกไซด์ออกจากสารละลายได้ด้วยเครื่องปั่นแยก ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลอบที่ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง จะได้ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานแห้งต้น

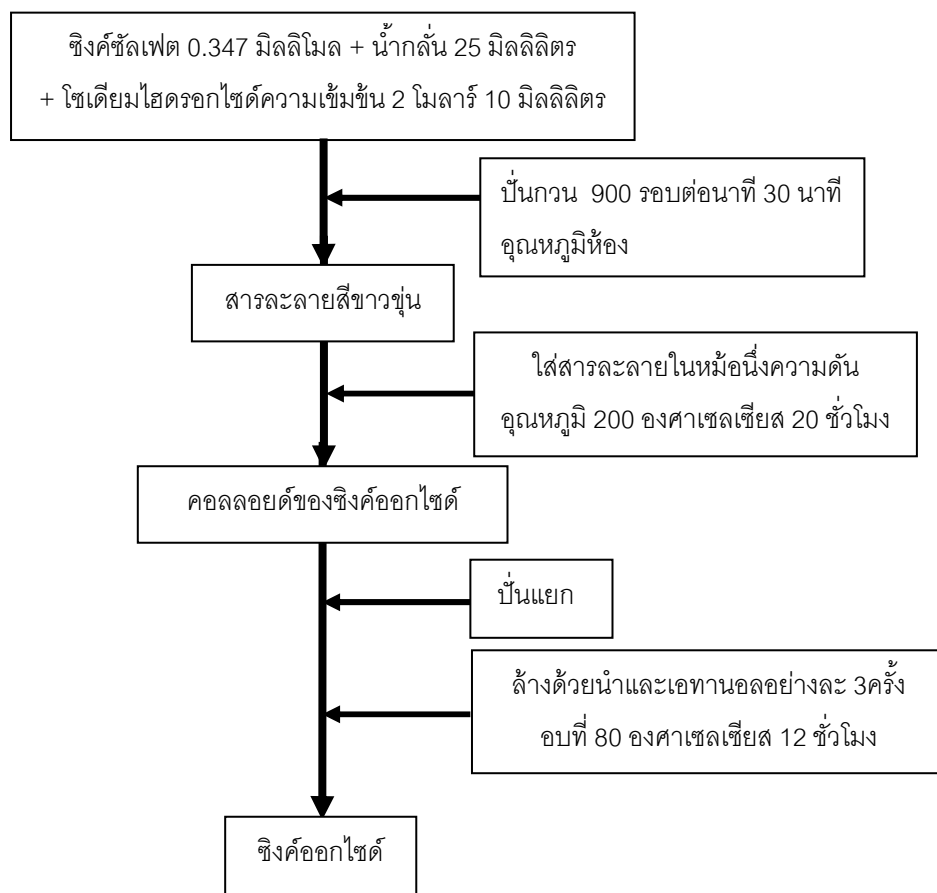
## 3.3.1.7 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แบบแท่งตัน [14]



รูปที่ 3.8 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แบบแท่งตัน

รูปที่ 3.8 เริ่มต้นโดยนำซิงค์ซัลเฟต 0.347 มิลลิโมลและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ 10 มิลลิลิตรไปทำละลายในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ปั่นกวนสารละลายที่ได้และนำไปใส่ในหม้อนิ่งอัดความดันอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมงจะได้คอลลอยด์ของซิงค์ออกไซด์ แยกตะกอนของซิงค์ออกไซด์ออกจากสารละลายได้ด้วยเครื่องปั่นแยก ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลอบที่ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง จะได้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แท่งตัน

## 3.3.1.8 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สังฐานลวด [14]

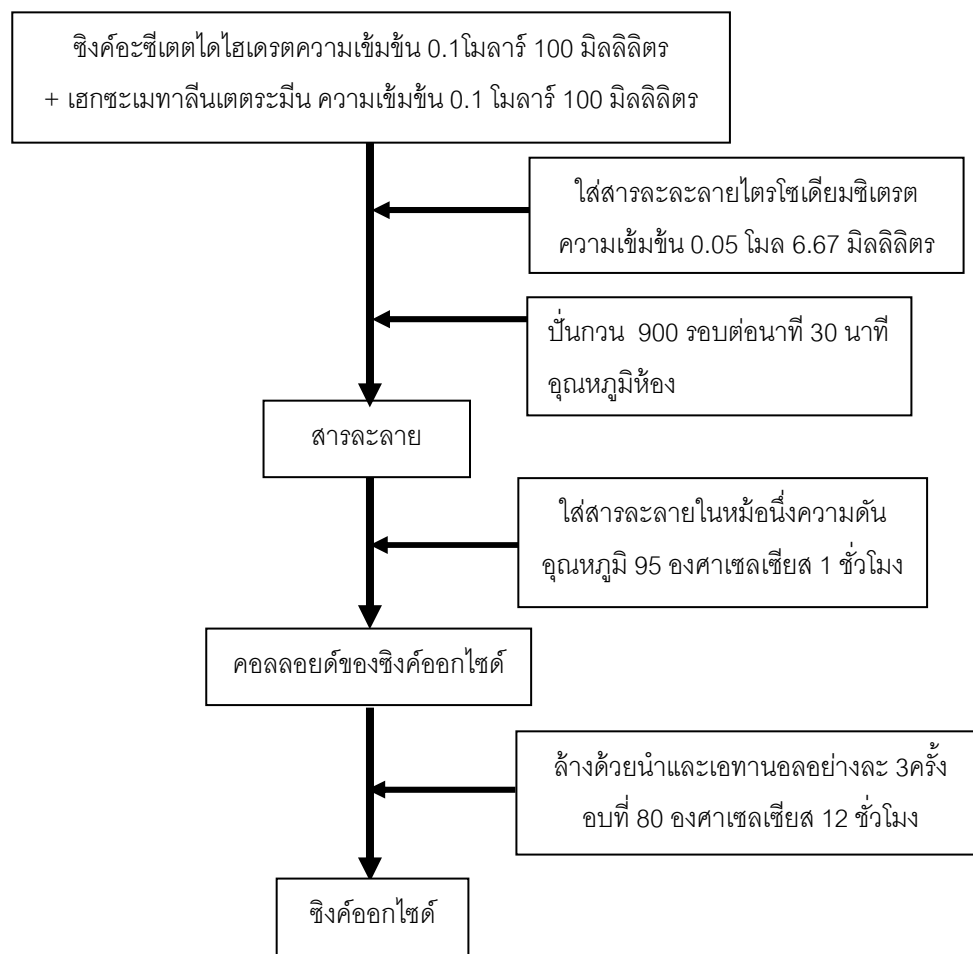


รูปที่ 3.9 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สังฐานลวด

ในรูปที่ 3.9 เริ่มต้นโดยนำซิงค์ซัลเฟต 0.347 มิลลิโมลและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ 10 มิลลิลิตร ไปทำละลายในน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ปั่นกวนสารละลายที่ได้และนำไปใส่ในหม้อหนึ่งอัดความดันอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 20 ชั่วโมงจะได้คอลลอยด์ของซิงค์ออกไซด์ แยกตะกอนของซิงค์ออกไซด์ออกจากสารละลายได้ด้วยเครื่องปั่นแยก ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลอบที่ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง จะได้ซิงค์ออกไซด์สังฐานลวดดอกไม้แห้งต้น



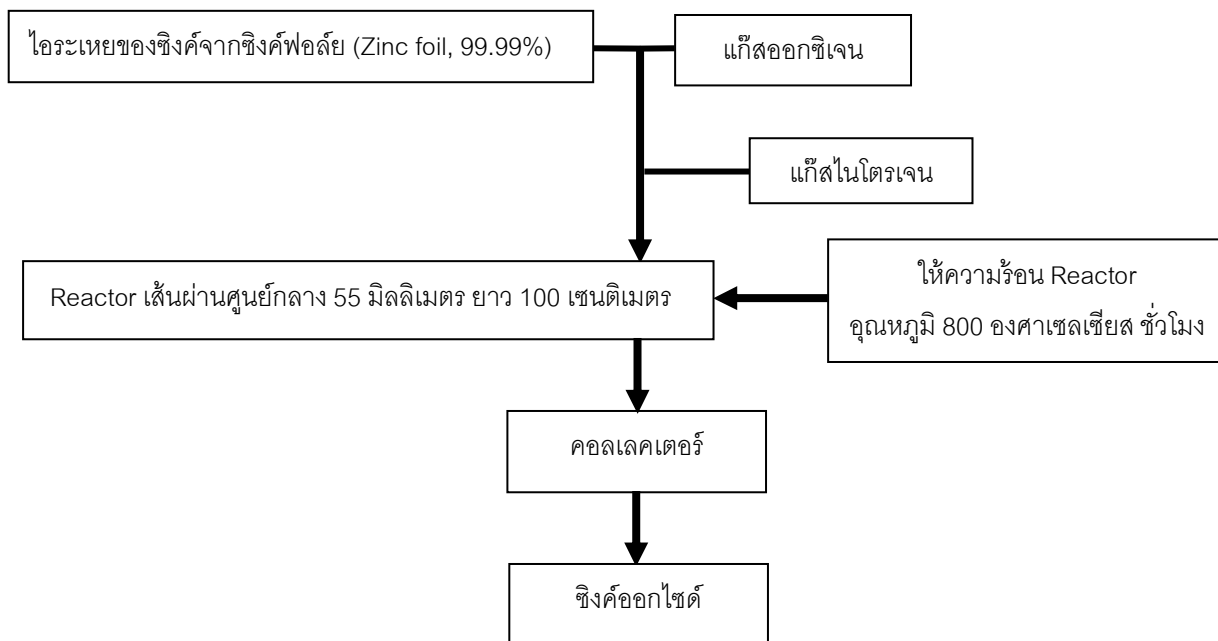
3.3.1.9 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่เกิดจากการซ้อนกันของแผ่นซีท [38]



รูปที่ 3.10 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่เกิดจากการซ้อนกันของแผ่นซีท [38]

จากรูปที่ 3.10 นำซิงค์อะซีเตตไดไฮเดรตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ผสมกับ เฮกซะเมทาลีนเตตระมีนความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ใส่สารละลายไตรโซเดียมซิเตรตความเข้มข้น 0.05 โมล 6.67 มิลลิลิตรความเข้มข้น 0.05 โมล 6.67 มิลลิลิตรตามลงไป ปั่นกวนและใส่สารละลายในหม้อหนึ่งความดันอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงล้างด้วยน้ำและเอทานอลอย่างละ 3 ครั้ง อบที่ 80 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมงจะได้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการเรียงกันของแผ่นซีท

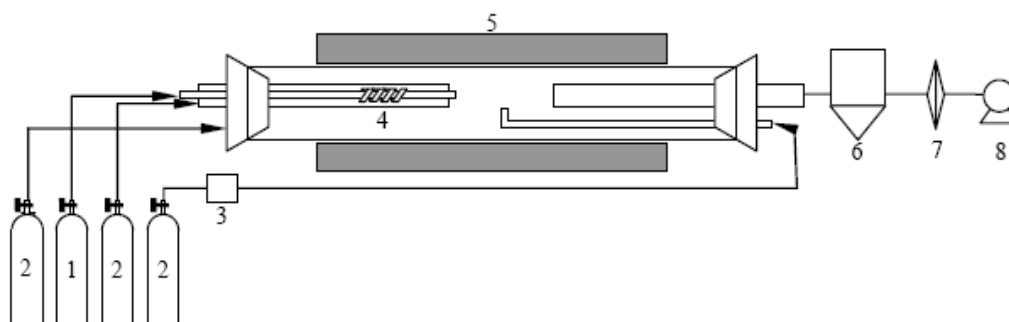
## 3.3.1.10 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงสี่หน้า [39]



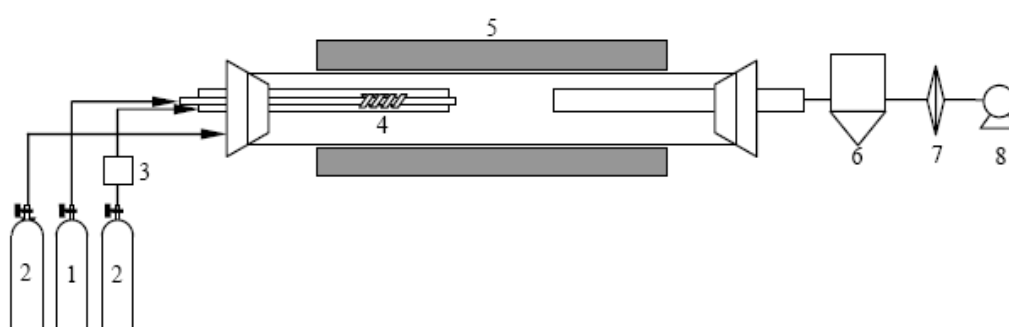
รูปที่ 3.11 การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงสี่หน้า [39]

จากรูปที่ 3.11 เป็นการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงสี่หน้าที่มีความยาวขาแตกต่างกันสามความยาวขาได้แก่ ทรงสี่หน้าขาสั้น ทรงสี่หน้าขาปานกลาง และทรงสี่หน้าขายาวโดยใช้วิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน โดยตัวอย่างซิงค์ออกไซด์ทรงสี่หน้าความยาวขาต่างกัน 3 ตัวจะได้จาก ดร.บุษราคัม ชาญหัตถกร ซึ่งมีวิธีการสังเคราะห์ดังนี้ ก่อนเริ่มการทดลอง จะทำการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในระบบเพื่อเอาอากาศออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เริ่มการสังเคราะห์จากโลหะซิงค์ (Zinc foil) ที่ความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์โดยโลหะซิงค์จะพันอยู่ที่พื้นผิวด้านนอกของท่อด้านในซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีและมีก๊าซไนโตรเจนไหลในด้านในท่อตลอดเวลาเพื่อป้องกันการเกิดซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ต้องการ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 800 องศาเซลเซียส แก๊สทั้งหมดจะถูกปล่อยเข้าสู่ระบบโดยระบบจะถูกทำให้ความดันเท่ากับ 1 บรรยากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ หลังจากผ่านไป 1 ชั่วโมงจะหยุดปล่อยแก๊สทุกชนิดเข้าสู่ระบบยกเว้นแก๊สไนโตรเจนที่ส่งผ่านไปยังระบบผ่านทางท่อด้านนอก และหลังจากนั้นจะปล่อยให้เตาเผาเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ที่ใช้ในการพ่นไนโตรเจนคือ พ่น 1 วินาที และหยุดพ่น 1 วินาที เงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกันทั้งสามการทดลองจะทำให้ได้ซิงค์ออกไซด์ความยาวขาแตกต่างกันสามตัว ได้แก่ ทรงสี่หน้าขาสั้น (Short legs) เกิดจากการพ่นไนโตรเจนที่อัตราการพ่น 1.25 ลิตรต่อนาทีในทิศทางเดียวกับระบบ ทรงสี่หน้าขาปานกลาง (Medium legs) เกิดจากการพ่นไนโตรเจนที่อัตราการพ่น 1.25 ลิตรต่อนาทีในทิศทางขวางระบบ โดยตำแหน่งที่ทำ

การรบกวนระบบด้วยการพ่นก๊าซไนโตรเจนจะห่างจากปลายท่อที่ใช้ในการปล่อยก๊าซเป็นระยะทาง 3 เซนติ-



*Cross flow configuration*



*Co flow configuration*

รูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพการจัดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง 1) ถังบรรจุอากาศ 2) ถังบรรจุแก๊สไนโตรเจน 3) วาล์วควบคุมการพ่นของแก๊สไนโตรเจน 4) โลหะซิงค์ (Zinc foil) 5) เต้าเผา 6) ภาชนะกักเก็บผงซิงค์ออกไซด์ 7) ฟิลเตอร์ 8) บั๊มสุญญากาศ [39]

เมตร และขายาว (Long legs) เกิดจากการพ่นไนโตรเจนที่อัตราการพ่น 0.1 ลิตรต่อนาทีในทิศทางขวางระบบ โดยตำแหน่งที่ทำกรรบกวนระบบด้วยการพ่นก๊าซไนโตรเจนจะห่างจากปลายท่อที่ใช้ในการปล่อยก๊าซเป็นระยะทาง 6 เซนติเมตร เมื่อไอระเหยของซิงค์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเรียบร้อยแล้ว ซิงค์ออกไซด์จะเก็บอยู่ที่ภาชนะกักเก็บ

### 3.3.2 การศึกษาลักษณะและสมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์

1. ลักษณะโครงสร้างของวัสดุที่เตรียมได้นั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JSM-5800LV, JSM-6510, JEOL) โดยสารที่จะนำมาศึกษาต้องอยู่ในสภาพ ผงละเอียดที่แห้ง ปราศจากน้ำหรือความชื้น โดยนำตัวอย่างมาเคลือบผิวด้วยทองโดยใช้เครื่อง Mini Sputter Coater เพื่อรักษาการทำงานของวงจรรังสีอิเล็กตรอนกับชิ้นตัวอย่างให้สมบูรณ์ หลังจากเคลือบทองแล้ว วางในช่องว่างสำหรับใส่ตัวอย่าง (Chamber) และมีอากาศออกเพื่อให้ระบบเป็นสุญญากาศ ความดันจะอยู่ที่ประมาณ 5-10 มิลลิบาร์ และความต่างศักย์ที่ใช้เท่ากับ 15 กิโลโวลต์

2. โครงร่างผลึกและเฟสของตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) (X'Pert PRO MPD model pw3040/60, PANalytical) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างในรูปของแท่ง โดยบดตัวอย่างให้เป็นผงละเอียด จากนั้นอัดใส่แผ่นกระจกสำหรับใส่ตัวอย่าง โดยผิวหน้าของตัวอย่างต้องมีลักษณะเรียบก่อนนำเข้าเครื่อง ใช้หลอดทองแดงเป็นแหล่งกำเนิดของรังสีเอกซ์ ความยาวคลื่น 1.54 อังสตรอม สแกนด้วยอัตราเร็ว  $5^{\circ}$  (2 $\theta$ ) ต่อนาที โดยสแกนขั้นละ  $0.02^{\circ}$  (2 $\theta$ ) จากช่วง  $20^{\circ}$  ถึง  $80^{\circ}$  (2 $\theta$ ) ณ อุณหภูมิห้อง

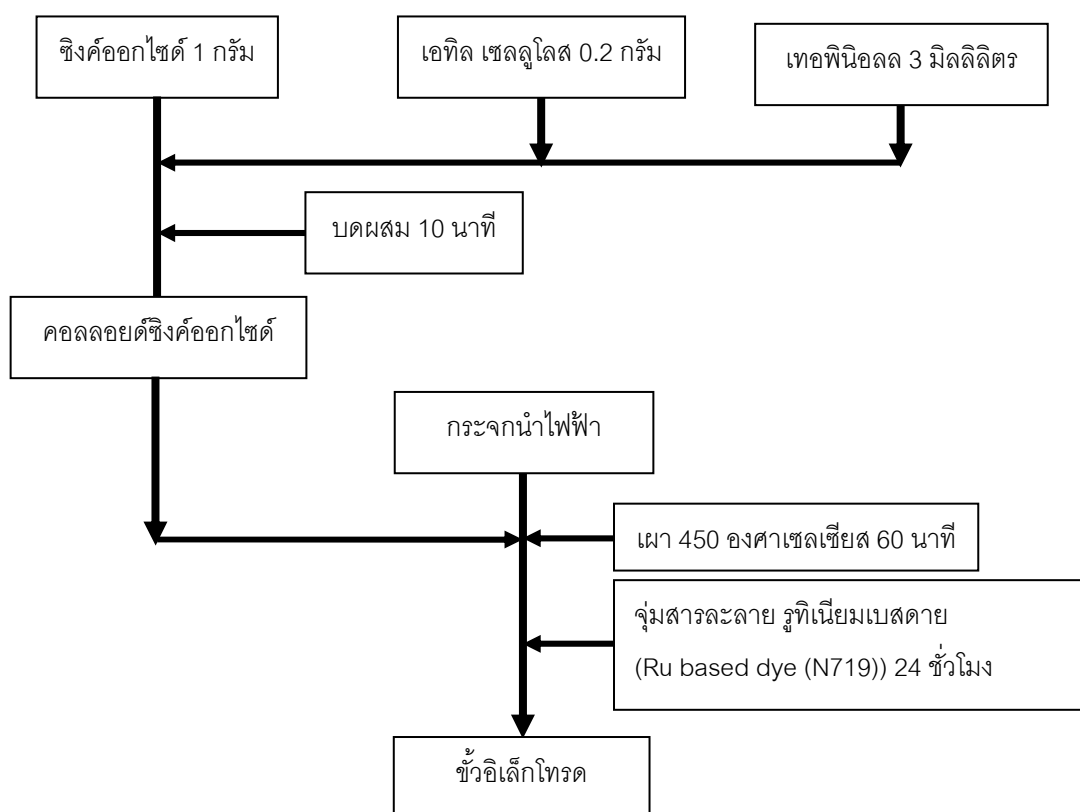
3. สำหรับพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุนของตัวอย่างนั้นจะถูกวิเคราะห์โดยเครื่องวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธีการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$  adsorption-desorption measurement) (BELSORP-Mini, Rubotherm) พื้นที่ผิวจำเพาะสามารถคำนวณได้จากวิธีการของ The Brunauer-Emmett-Teller (BET) จากข้อมูลในช่วงระหว่างอัตราส่วนความดันต่อความดันเริ่มต้น ( $P/P_0$ ) ในช่วง 0.05-0.35 ก่อนการวิเคราะห์สารตัวอย่างจะถูกนำไปให้ความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน ( $N_2$  adsorption-desorption measurement) โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน

4. วิเคราะห์หาความกว้างแถบพลังงานของสารตัวอย่างได้โดยอาศัยความสามารถในการสะท้อนของแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรสโคปี (UV-visible Spectroscopy) (UV-1700, SHIMADZU) ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างในรูปของแท่ง โดยบดตัวอย่างให้เป็นผงละเอียด จากนั้นอัดใส่แผ่นกระจกสำหรับใส่ตัวอย่าง โดยผิวหน้าของตัวอย่างต้องมีลักษณะเรียบก่อนนำเข้าเครื่อง ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 200-800 นาโนเมตร

5. วิเคราะห์หาความไม่สมบูรณ์ของผลึกได้โดยอาศัยความสามารถในการเปล่งแสงของสารตัวอย่างด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซน (Photoluminescence) (Model Perkin Elmer LS55) นำผงตัวอย่างใส่ภาชนะของเครื่องรูปทรงกลม หลอดขึ้นนอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงกระตุ้นความยาวคลื่น 325 นาโนเมตร วัดการเปล่งแสงในช่วง 300-800 นาโนเมตร

### 3.3.3 การทดลองประยุกต์ใช้ในเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

#### 3.3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมขั้วอิเล็กโทรด



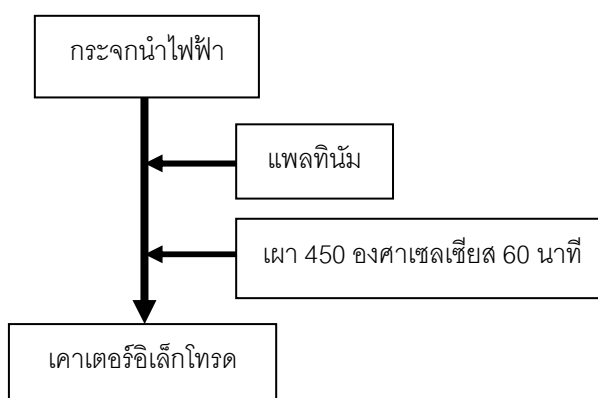
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด

นำผงซิงค์ออกไซด์ผสมกับเอทิล เซลลูโลส (Ethyl cellulose) และเทอพิเนอล (Terpineol) ในอัตราส่วน 1 กรัม: 0.2กรัม: 3มิลลิลิตร บดผสม 10 นาทีจนกระทั่งเกิดคอลลอยด์ของซิงค์ออกไซด์ นำคอลลอยด์ของซิงค์ออกไซด์ที่ได้เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าเคลือบทินออกไซด์โดปฟลูออไรด์(FTO) ด้วยวิธีซิลค์สกรีน จากนั้นให้ความร้อนที่เตาเผาโดยใช้อุณหภูมิ 450 °C เป็น เวลา 60 นาที จะได้กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์ นำกระจก นำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์จุ่มลงในสารละลายเอทานอลของ 0.5 mM Ru-based dye (N719) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะได้ขั้วอิเล็กโทรด

### 3.3.3.2 การหาปริมาณการดูดซับสีของซึ่วิเล็กโทรด

ในงานวิจัยนี้ ทำการหาปริมาณการดูดซับสีของซึ่วิเล็กโทรดที่สังเคราะห์ได้ แต่ละสัณฐานที่ถูกใช้เป็นซึ่วิเล็กโทรดด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรสโคปี (UV-visible Spectroscopy) (UV-1700, SHIMADZU) จากความเข้มข้นของสีที่ย้อมที่ติดอยู่บนพื้นผิวซึ่วิเล็กโทรดที่ใช้เป็นซึ่วิเล็กโทรดโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในเอทานอลความเข้มข้น 0.1 โมลาร์เป็นตัวทำละลาย

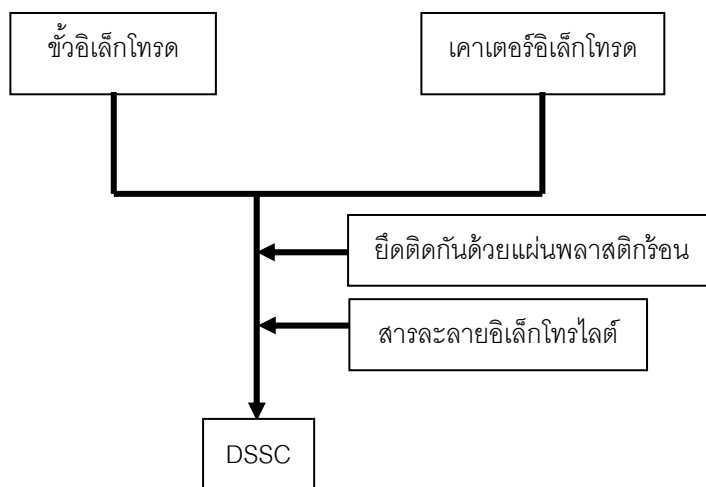
### 3.3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด



รูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนการเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด

เตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดโดยนำกระแสไฟฟ้าเคลือบทินออกไซด์ โดปฟลูออไรด์ (FTO) ไปเคลือบแพลตตินัมด้วยวิธีซิลค์สกรีน จากนั้นให้ความร้อนที่เตาเผาโดยใช้ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะได้เคาน์เตอร์อิเล็กโทรดซึ่งใช้เป็นซึ่วิเล็กโทรด

### 3.3.3.4 ขั้นตอนการเตรียม DSSC



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการเตรียม DSSC

ในงานวิจัยนี้ ทำการเตรียมเซลล์ไฟฟ้า โดยประกบขั้วอิเล็กโทรดเข้ากับเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด ใช้แผ่นพลาสติกกั้นขอบโดยเว้นรูไว้เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์  $I^-/I_3^-$  ตรงกลางเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์จากนั้นปิดรูให้สนิทจะได้ DSSC จากนั้นนำ DSSC ที่ได้ไปวัดประสิทธิภาพด้วยเครื่อง I-V Tester

### 3.3.3.5 การวัดค่าประสิทธิภาพของ DSSC

การวัดประสิทธิภาพวัดโดยใช้เครื่องวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วยหลอดไฟซีนอน กำลังไฟฟ้า 1,000 วัตต์ (Xe Short Arc Lamp XBO) เป็นแหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์วัดประสิทธิภาพด้วย I-V Tester (Keithley 2400 digital multimeter) โดยจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0.2 ถึง 0.9 โวลต์ ทำการวัดตัวอย่างละ 2 ครั้ง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 12 สัณฐานจะมีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาดเล็ก นำซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์ได้ผลดังนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะและโครงสร้างทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ด้วย SEM การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการทางแก๊สเฟส เทอร์มอล ออกซิเดชัน (Thermal oxidation) จะทำให้ได้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้า (Tetrapod) โดยเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกันทั้งในเรื่องของอัตราการพ่นไนโตรเจนและทิศทางในการพ่นไนโตรเจนทั้งสามการทดลองจะทำให้ได้ซิงค์ออกไซด์ความยาวขาแตกต่างกันสามตัวได้แก่ ทรงสี่หน้าขาสั้น (Short legs) เกิดจากการพ่นไนโตรเจนที่อัตราการพ่น 1.25 ลิตรต่อนาทีในทิศทางเดียวกับระบบ ทรงสี่หน้าความยาวขาปานกลาง (Medium legs) เกิดจากการพ่นไนโตรเจนที่อัตราการพ่น 1.25 ลิตรต่อนาทีในทิศทางขวางระบบ และขายาว (Long legs) เกิดจากการพ่นไนโตรเจนที่อัตราการพ่น 0.1 ลิตรต่อนาทีในทิศทางขวางระบบ โดยแต่ละสัณฐานมีเส้นผ่านศูนย์กลางความยาวขาประมาณ 70 นาโนเมตรและความยาวขา 300, 500 และ 700 นาโนเมตรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 a) b) และ c) [39]

สำหรับการสังเคราะห์ด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลจะได้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิงค์ออกไซด์ดังรูปที่ 4.1 d-k) รูป 4.1 d) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สัณฐานท่อกลวง (Tube) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 600 นาโนเมตร และยาวประมาณ 2-3 ไมโครเมตร โดยท่อกลวงที่ได้เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม (Commercial) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ที่ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญโดยเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสูงขึ้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน ซึ่งแก๊สทั้งสองตัวนี้จะไปปนระบบให้ขาดความสมดุล (Unequilibrium) และออกซิเจนที่มีมากพอจะทำปฏิกิริยากับซิงค์ออกไซด์เกิดนิวเคลียส (Nuclei) ใหม่ได้เป็นสัณฐานท่อกลวง [37]

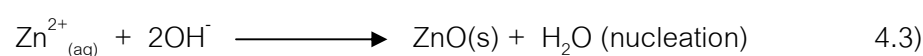
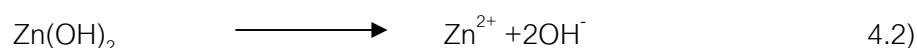
รูป 4.1 e) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน (Rod) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 700 นาโนเมตร และยาวประมาณ 1-2 ไมโครเมตร โดยสมการการเกิดปฏิกิริยาของซิงค์ออกไซด์



สัณฐานแท่งตันแสดงได้ดังสมการที่ 4.1) 4.2) และ 4.3) โดยสมการที่ 4.1) เกิดเมื่อ  $Zn^{2+}$  ทำปฏิกิริยากับ  $OH^-$  เกิดเป็นคอลลอยด์ของ  $Zn(OH)_2$



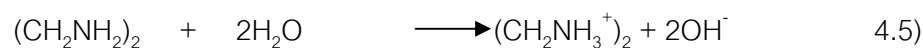
เมื่ออุณหภูมิของไฮโดรเทอร์มอลเพิ่มขึ้น คอลลอยด์ของ  $Zn(OH)_2$  จะละลายกลับลงในสารละลาย อีกครั้งดังสมการที่ 4.2) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงจนถึงระดับอิ่มตัวยิ่งยวด (super-saturation) ของซิงค์ออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์นิวคลีไอจะเกิดขึ้น ดังสมการที่ 4.3)

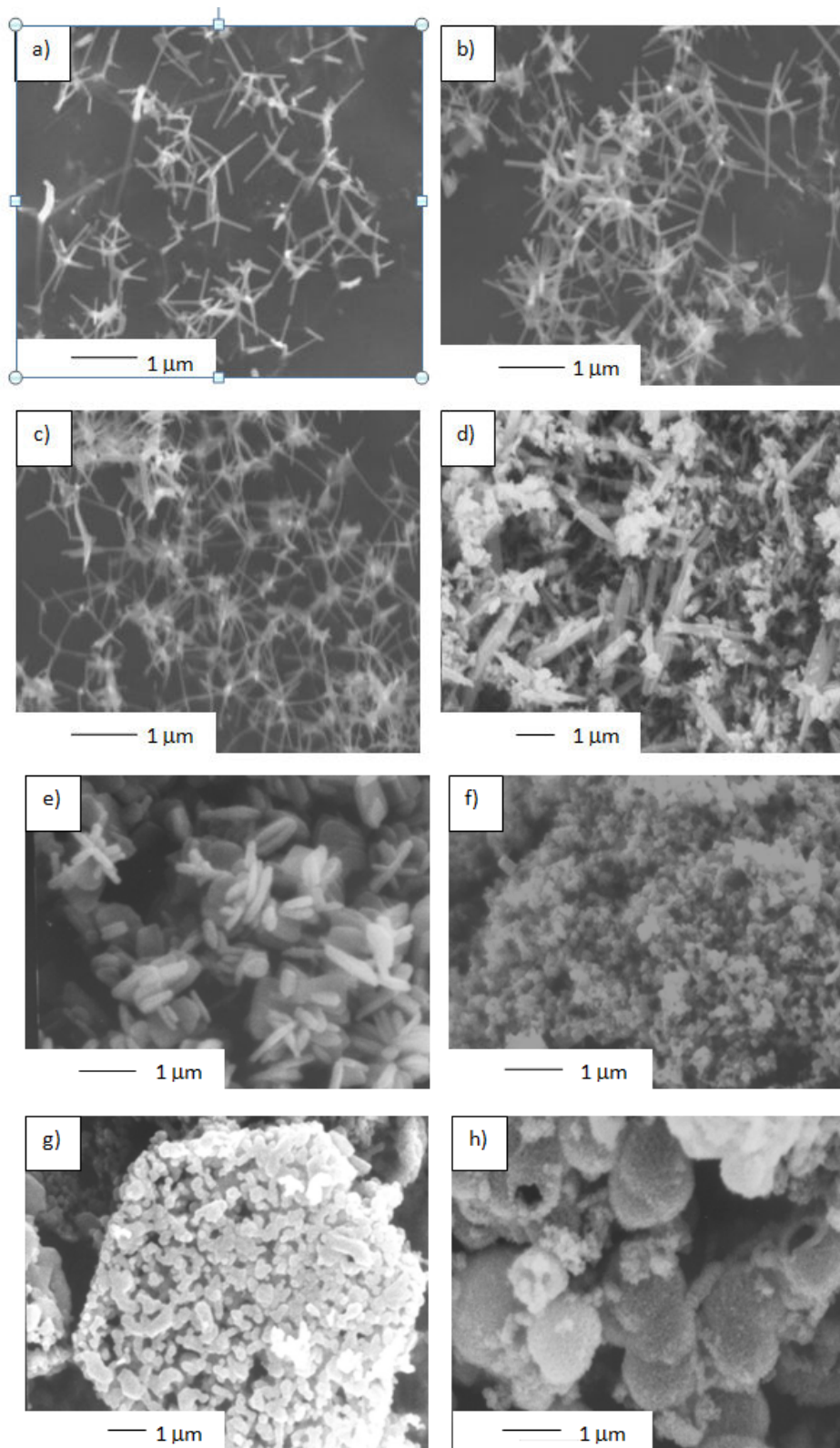


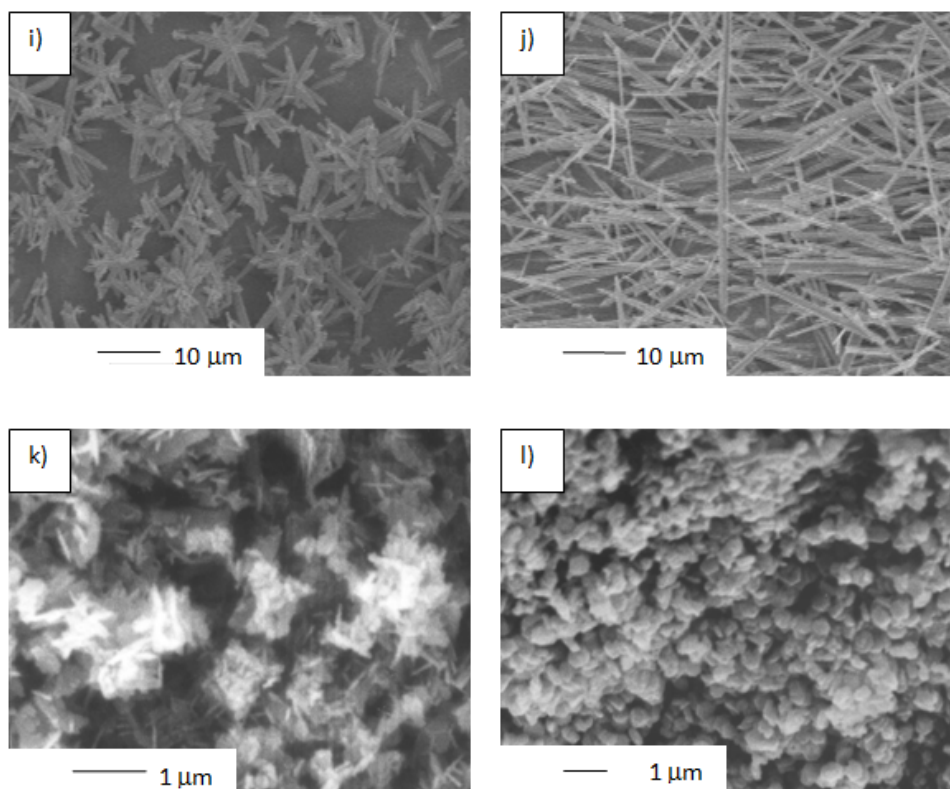
เมื่ออุณหภูมิของไฮโดรเทอร์มอลสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ส่วนที่จะทำปฏิกิริยา (Active site) จะเกิดรอบๆนิวคลีไอ แต่เนื่องจากผลึกซิงค์ออกไซด์ชอบที่จะโตในแนวแกน (001) จึงเกิดเป็นซิงค์ออกไซด์แท่งตันขึ้น [14]

รูป 4.1 f) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่ซื้อมาจากบริษัท ซิกมา ออเดริช (Sigma Aldrich) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 นาโนเมตร

รูป 4.1 g) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นประมาณ 4 ไมโครเมตร โดยลักษณะของแผ่นเสมือนประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์ทรงกลมเล็กๆหลายๆอัน หลักการในการเกิดของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุนคือ สารตั้งต้นซิงค์คลอไรด์ทำปฏิกิริยากับเอทิลีนไดเอมีน  $((CH_2NH_2)_2)$  ดังสมการที่ 4.4) โดย  $OH^-$  จะได้จากเอทิลีนไดเอมีนทำปฏิกิริยากับน้ำที่อธิบายไว้ในสมการที่ 4.5) [17]

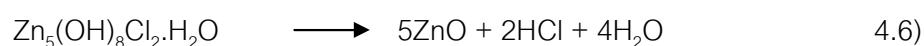




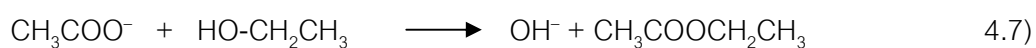


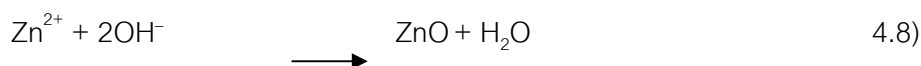
รูปที่ 4.1 รูปจากกล้อง SEM แสดงลักษณะทางสัณฐานของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน a) ทรงสี่หน้ายาว b) ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง c) ทรงสี่หน้าขาสั้น d) ท่อกลวง e) แท่งตัน f) ทรงกลม (commercial) g) แผ่นมีรูพรุน h) ทรงกลมกลวง i) ดอกไม้ที่เกิดจากกรวมของแท่งตัน j) ลวด k) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท และ l) ทรงกลม (สังเคราะห์)

จากสมการที่ 4.6) เนื่องจาก  $\text{OH}^-$  ที่ได้มีค่าน้อยกว่า  $\text{Zn}^{2+}$  มากจึงทำให้ไม่เกิด  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  แต่เกิดเป็น ซิงค์ไฮดรอกไซด์คลอไรด์ไฮเดรต ( $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) กระบวนการที่ทำให้  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  กลายเป็นซิงค์ออกไซด์แผ่นมีรูพรุนเกิดเมื่อนำ  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  จะสลายกลายเป็นซิงค์ออกไซด์ดังสมการที่ 4.6)

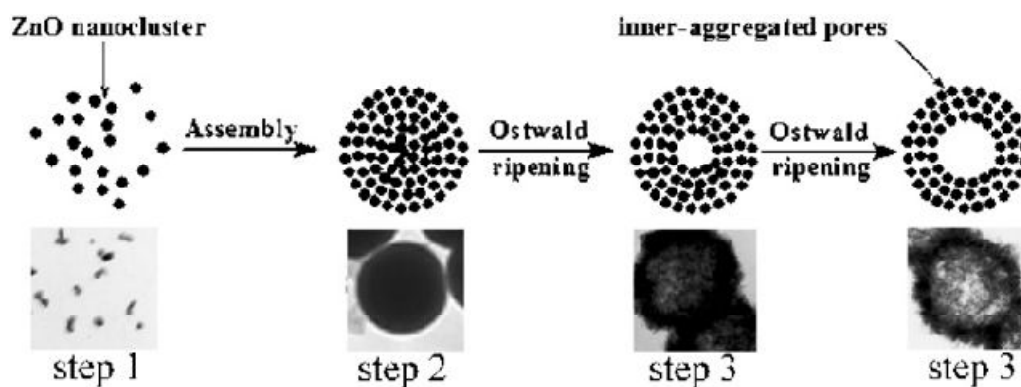


รูป 4.1 h) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมมีรูกลวง (Hollow spheres) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 800 นาโนเมตร และมีผนังหนาประมาณ 200 นาโนเมตร โดยกระบวนการเกิดซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวงเกิดจากการเริ่มต้นด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์และประจําอะซิเตตและได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเตอรืตามสมการที่ 4.7)





จากสมการที่ 4.7) เอสเตอร์จะค่อยสลาย  $\text{OH}^-$  ออกมาและทำปฏิกิริยากับ  $\text{Zn}^{2+}$  เกิดเป็น  $\text{ZnO}$  แต่เมื่อใส่ทั้งสโตฟอสฟอริก แอซิดเข้าไปด้วย จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา เอสเตอริฟิเคชัน นำไปสู่การปลดปล่อย  $\text{OH}^-$  ออกมาอย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้คือมวลของกลุ่มก้อน ซิงค์ออกไซด์ขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นตาม Step 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 กระบวนการเกิดของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง [13]

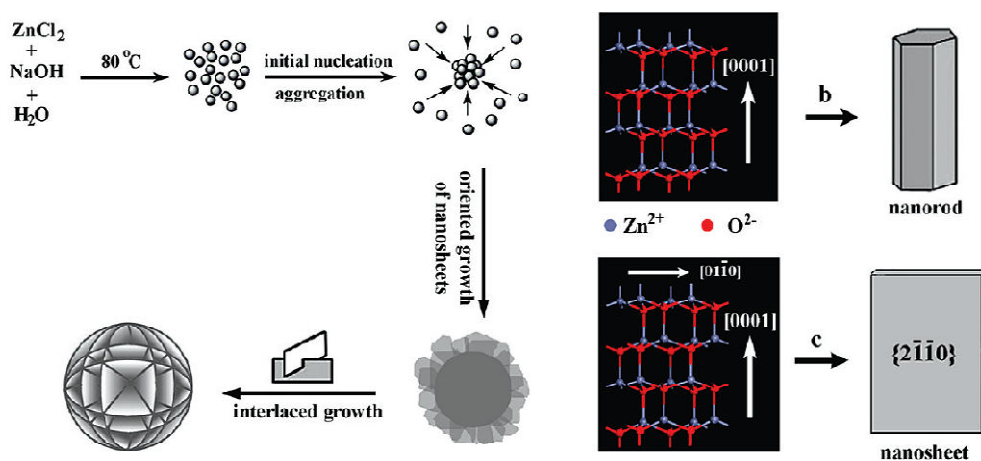
จาก Step 1 กลุ่มก้อนของซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเริ่มเกาะกลุ่มกันและรวมตัวกันเป็นเกิดเป็นทรงกลมกึ่งเสถียร (Metastable sphere) ทั้งนี้เพื่อลดพลังงานพื้นผิวทั้งหมด (Total surface energy) และใน Step 3-4 ทรงกลมกึ่งเสถียรที่เกิดขึ้นจะถูกพัฒนากลายเป็นทรงกลมกลวงตามกระบวนการของ Ostwald ripening ซึ่งได้อธิบายถึงการเกิดรูกลวงข้างในโครงสร้างโดยกระบวนการที่บวมและการละลาย (Deposition–Dissolution process) ภายในทรงกลมของแข็งกึ่งเสถียรโดยเริ่มต้นจะเกิดจากการอัตราการบวมของไปพร้อมกับอัตราการละลายของของแข็งในสารละลายเกิดเป็นทรงกลมกลวงขึ้น [13]

รูป 4.1 i) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สัณฐานคล้ายดอกไม้ที่ดูเหมือนเกิดจากการรวมกันของแท่งต้นหลายๆแท่ง (Flower-like rod) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมโครเมตร แต่ละแท่งต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร ยาวประมาณ 5 ไมโครเมตร [14]

รูป 4.1 j) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวด (Wire) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร ยาวประมาณ 15 ไมโครเมตร โดยที่ทั้งสัณฐานคล้ายดอกไม้ที่ดูเหมือนเกิดจากการรวมกันของแท่งต้นหลายๆแท่งและสัณฐานลวดนี้เกิดขึ้นจากสภาวะการสังเคราะห์เดียวกันคือ ใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและใช้สารตั้งต้นเป็นซิงค์ซัลเฟตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้นโดยใช้อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แต่ต่างกันที่เวลาในการทำปฏิกิริยาคือสัณฐานดอกไม้แท่งต้นใช้เวลา 6 ชั่วโมง สัณฐานลวดใช้เวลา 20 ชั่วโมง ที่เวลา 6 ชั่วโมงสามารถสังเคราะห์ได้สัณฐาน

ดอกไม้แห่งต้นเนื่องจากหลังจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของนิวคลีโอ ซึ่งแห่งต้นหลายๆแห่งที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการรวมกันของนิวคลีโอ หลังจากการเกิดของสัณฐานดอกไม้แห่งต้น ซิงค์ออกไซด์จะโตต่อไปด้วยสารตั้งต้นที่เหลืออยู่ในสารละลายไปในทิศทาง [001] เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาถึง 20 ชั่วโมงจึงได้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวด [14]

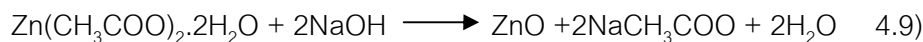
รูป 4.1 k) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สัณฐานคล้ายดอกไม้ (Flower-like) เส้นผ่านศูนย์กลาง 500 นาโนเมตร เกิดจากการรวมกันระหว่าง ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นที่มีขนาดในระดับนาโน (Nanosheet) หลายๆแผ่นประกอบกันขึ้น เนื่องจากกระบวนการเกิดซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้จากแผ่นซีทที่ไม่ได้สังเคราะห์ด้วยเทมเพลต สารออกแกนิค หรือสารลดแรงตึงผิว ดังนั้น ตัวแปรสำคัญจึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ  $Zn^{2+}$  และ  $OH^-$  ในสารละลาย ซึ่งการเกิดรูปร่างดอกไม้ที่เกิดจากการซ้อนกันของแผ่นซีท สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 การเกิดของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการซ้อนของแผ่นซีท [18]

แรงขับเคลื่อนในการเกิดของผลึกซิงค์ออกไซด์คือความเข้มข้นของ  $Zn^{2+}$  (หรือ  $ZnO_2^{2-}$ ) ในการเกิดปฏิกิริยาสารละลายประกอบด้วยซิงค์คลอไรด์ 2 มิลลิโมลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิโมลจะนำไปสู่ขั้นตอนการเกิดนิวคลีโอและการรวมกันของนิวคลีโอของซิงค์ออกไซด์เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปความเข้มข้นของโมโนเมอร์ของ  $ZnO_2^{2-}$  จะน้อยลง และบางส่วนของพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาของซิงค์ออกไซด์ที่รวมตัวกันในตอนแรกจะโตตามทิศทางตามธรรมชาติของสารเคมีที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในกรณีนี้มีทิศทาง [0001] และ [01-10] ภายในระนาบ {2-1-10} ที่เป็นทิศในการขยายขนาดผลึก (รูปที่ 4.3) จะทำให้เกิดซิงค์ออกไซด์นาโนซีทขึ้นบนพื้นผิวของซิงค์ออกไซด์ที่รวมตัวกันในตอนต้น แผ่นนาโนซีทหลายแผ่นที่โตในระนาบ {2-1-10} จะมีผิวหน้าที่ทับซ้อนกันและเกิดเป็น ซิงค์ออกไซด์ดอกไม้ที่เกิดจากการเรียงกันของแผ่นซีทขึ้น [18]

รูป 4.1 I) แสดงถึงซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการตกตะกอน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 600 นาโนเมตร โดยสมการในการเกิดปฏิกิริยาของซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์ที่สังเคราะห์ได้ดังสมการที่ 4.9)



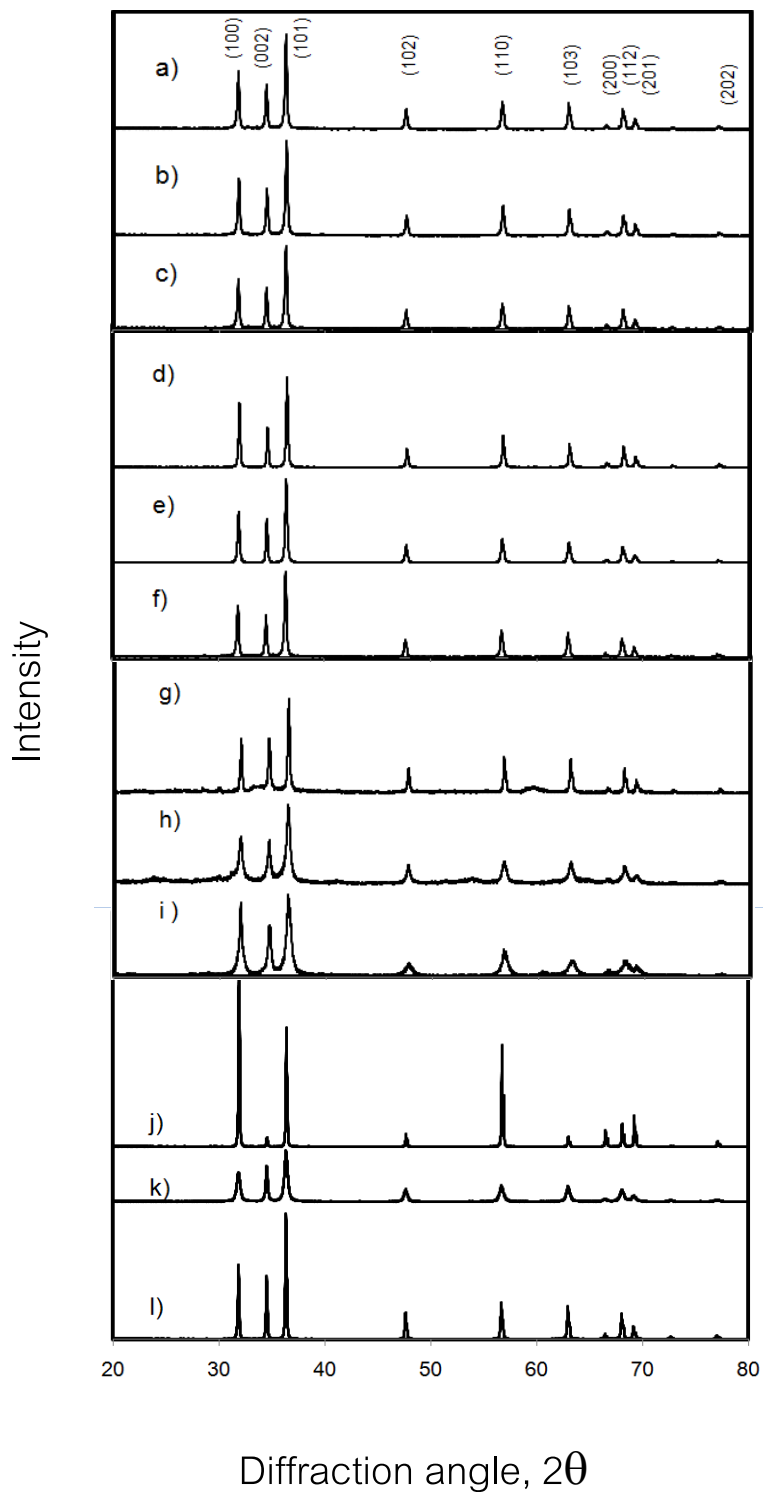
ซิงค์อะซิเตตทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลาย ผลลัพธ์จะได้ซิงค์ออกไซด์ที่ตกตะกอนอยู่ในสารละลายที่ประกอบโซเดียมอะซิเตตละลายอยู่น้ำ [16]

4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction, XRD)

ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงกราฟ XRD ของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สันฐานเกิดพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $32^\circ$ ,  $34.5^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $47.5^\circ$ ,  $56.75^\circ$ ,  $63^\circ$ ,  $66.5^\circ$ ,  $68^\circ$  และ  $69^\circ$  ซึ่งแสดงถึงค่าความสะท้อน (reflection) จากระนาบ (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201) และ (202) ตามลำดับ โดยแต่ละพีคระบุถึงลักษณะของซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล เวิร์ทไซด์ (hexagonal wurtzite) โดยได้มาตรฐานการตรวจวัดจาก JCPD (file No. 79-0206) [16]

ความสูงของพีคของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 9 สันฐานประกอบด้วยสันฐาน ทรงสี่หน้าขาสั้น a) ทรงสี่หน้าขายาวปานกลาง b) ทรงสี่หน้าขายาว c) ท่อกลวง d) แท่งตัน e) แผ่นมีรูพรุน g) ทรงกลมกลวง h) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมของแท่งตัน i) ลวด j) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท k) และทรงกลมสังเคราะห์ k) ใกล้เคียงกันกับ ซิงค์ออกไซด์ตัวอย่างที่สังเคราะห์จากบริษัท Sigma Aldrich f)

พีคที่สูงที่สุดคือพีคที่อยู่ในระนาบ (101) ซึ่งสามารถระบุได้ว่าทุกตัวอย่างที่ทำกรวัดประกอบด้วยวิธีการเรียงตัวของผลึกแบบสุ่ม (Randomly oriented crystals) และพีคมีลักษณะแหลมซึ่งแสดงถึงซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีความเป็นผลึกที่ดี (good quality crystals) [8] แต่มีบางสันฐานที่มีลักษณะพีคที่กว้างซึ่งแสดงความเป็นผลึกที่ไม่ดี ได้แก่สันฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมของแท่งตัน i) ซึ่งผลที่ได้เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 6 ชั่วโมง ซึ่งน้อยเกินกว่าที่ผลึกจะเกิดการเรียงตัวกันเป็นระเบียบ โดยสามารถเปรียบเทียบได้กับการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์สันฐานลวด j) ซึ่งใช้สภาวะในการสังเคราะห์เดียวกันกับสันฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งตัน แต่เพิ่มเวลาในการสังเคราะห์เป็น 20 ชั่วโมง ซึ่งกราฟ XRD จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 j) กราฟที่ได้จะแสดง



รูปที่ 4.4 กราฟ XRD ของซิงค์ออกไซด์ a) ทรงสี่หน้าขาดัน b) ทรงสี่หน้าขายาวปานกลาง c) ทรงสี่หน้าขายาว d) ท่อกลวง e) แท่งตัน f) ทรงกลม (commercial) g) แผ่นมีรูพรุน h) ทรงกลมกลวง i) ดอกไม้ที่เกิดจากกรรมของแท่งตัน j) ลวด k) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท และ l) ทรงกลม (สังเคราะห์)

ถึงความเป็นผลึกที่สูงกว่าซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งต้น เนื่องจากมีพีคที่สูงและแหลมกว่าในแต่ละระนาบ มีเพียงระนาบ (002) เท่านั้นที่มีความสูงพีคต่ำกว่าซึ่งผลที่ได้เกิดจากการที่เวลาในการสังเคราะห์ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ที่ซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้แท่งต้นเปลี่ยนสัณฐานไปเป็นสัณฐานลวดส่งผลให้มีการลดของพีคระนาบ (002) และเพิ่มการโตของพีคในระนาบ (100) ซึ่งแสดงถึงการโตในแกน c (c-axis)

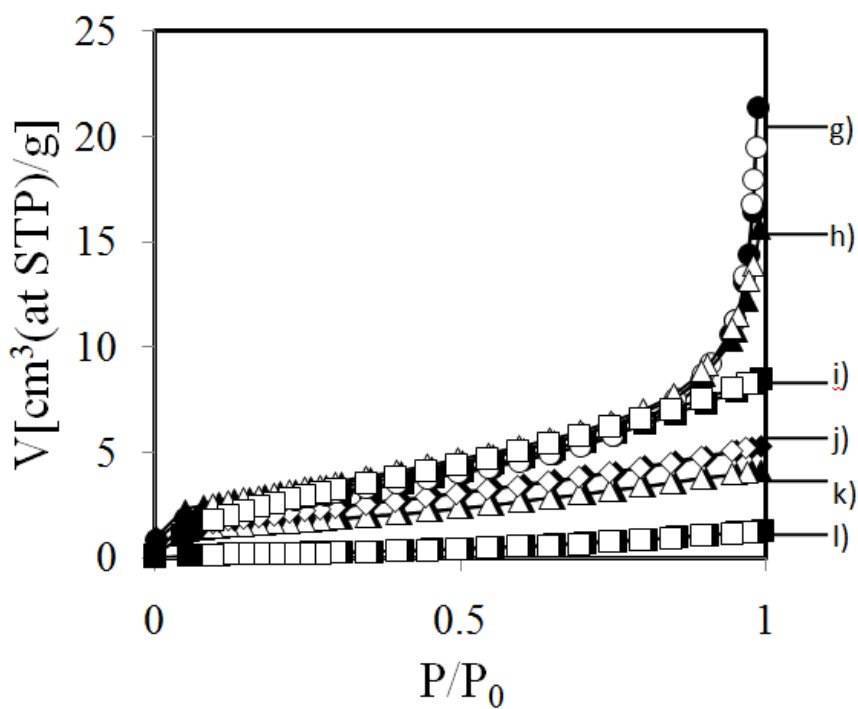
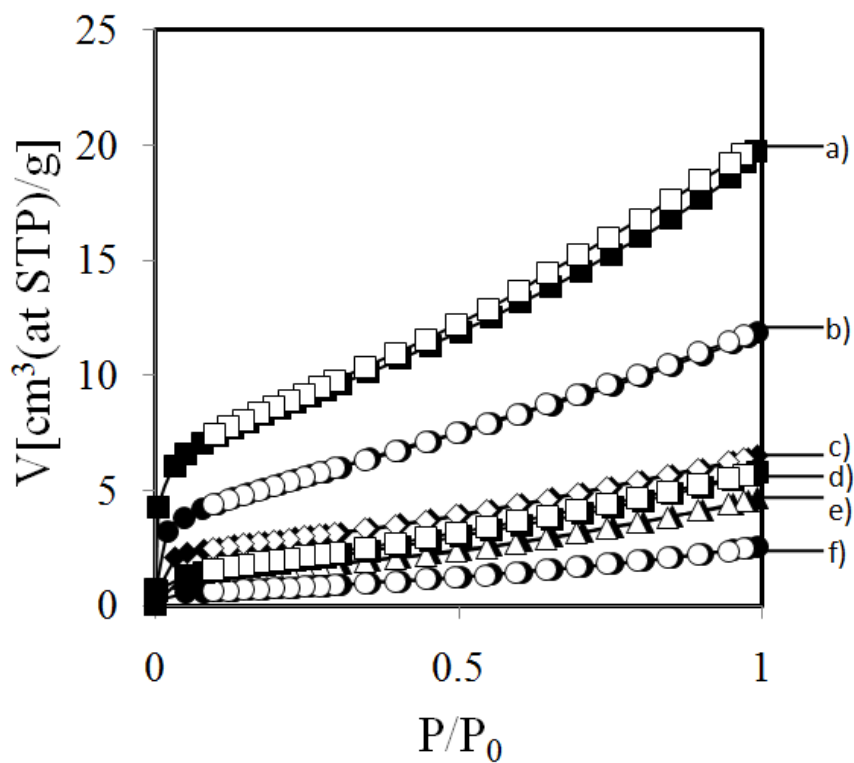
สำหรับซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม l) จะมีความสูงพีคที่ทุกๆระนาบใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะเป็นผลจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนซึ่งมีอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องและเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานถึง 1 อาทิตย์ จึงทำให้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยการตกตะกอนนี้มีความเป็นผลึกที่สูง [16]

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีดูดซับคายซับไนโตรเจน ( $N_2$  absorption desorption)

ในการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 12 สัณฐาน ทำการวัดด้วยวิธีดูดซับคายซับไนโตรเจน ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยสัณฐานที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุดได้แก่สัณฐานทรงกลมกลวง a) มีค่าเท่ากับ 36.28 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม รองลงมาคือสัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันระหว่างซิงค์ออกไซด์นาโนซีท b) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 21.16 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม โดยทั้งสองสัณฐานนี้มีกราฟการดูดซับคายซับไนโตรเจนอยู่ในประเภทที่ 4 (Type IV) ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นซิงค์ออกไซด์ที่มีรูพรุนในระดับเมโซพอร์ (Mesoporous materials) [40] โดยรูพรุนของซิงค์ออกไซด์ทรงกลมกลวงเกิดจากช่องว่างระหว่างซิงค์ออกไซด์ทรงกลมเล็กๆ ที่รวมกัน เกิดเป็นซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวง และรูพรุนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากแผ่นซีทเกิดจากรูระหว่างแผ่นซีทที่เรียงซ้อนกันจนเกิดเป็นสัณฐานดอกไม้ขึ้น ซึ่งผลทั้งสองสอดคล้องกับรูปจาก SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.1 k)

จากรูปที่ 4.5 c)-l) แสดงได้ว่า ซิงค์ออกไซด์สัณฐานที่เหลือทั้ง 10 สัณฐานได้แก่ สัณฐานทรงกลม (commercial) แท่งต้น ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งต้น แผ่นมีรูพรุน ทรงสี่หน้าขายาว ทรงสี่หน้าขายาวปานกลาง ทรงสี่หน้าขาสั้น ทรงกลม (สังเคราะห์) ท่อกลวง และลวด มีกราฟการดูดซับคายซับไนโตรเจนอยู่ในประเภทที่ 2 (Type II) ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นวัสดุที่ไม่มีรูพรุน โดยที่ซิงค์ออกไซด์แบบแผ่นมีรูพรุนมีลักษณะของกราฟการดูดซับคายซับไนโตรเจนอยู่ในประเภทที่ไม่มีรูพรุน อาจเนื่องมาจากการเผาไล่สารไม่บริสุทธิ์ที่ทำให้สภาวะอุณหภูมิค่อนข้างสูง (800 องศาเซลเซียส) จึงอาจส่งผลให้ซิงค์ออกไซด์บางส่วนเกิดการหลอมติดกันส่งผลให้คุณสมบัติความเป็นรูพรุนลดลง





รูปที่ 4.5 กราฟการดูดซับคายซับไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน a) ทรงกลมกลวง b) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท c) ทรงกลม (Commercial) d) แท่งตัน e) ดอกไม้ที่เกิดจากแท่งตัน f) แผ่นมีรูพรุน g) ทรงสี่หน้ายาว h) ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง i) ทรงกลม (สังเคราะห์) j) ทรงสี่หน้าสั้น k) ท่อกลวง l) และหลอด

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์แต่ละสัณฐาน

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	พื้นที่ผิวจำเพาะ(ตารางเมตรต่อกรัม)
ทรงกลมกลวง	36.28
ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท	21.16
ทรงสี่หน้ายาว	10.40
ทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์	10.00
ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง	9.21
ทรงกลม(commercial)	9.00
ทรงสี่หน้าสั้น	7.18
แท่งตัน	6.85
ดอกไม้ที่เกิดจากแท่งตัน	5.48
ท่อกลวง	5.28
แผ่นมีรูพรุน	2.81
ลวด	1.00

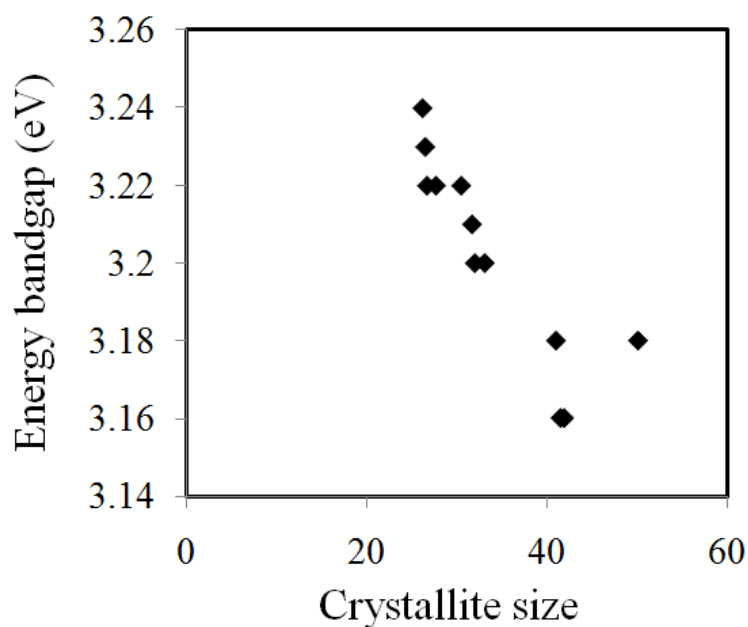
ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าลดลงด้วย สามารถสรุปพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์แต่ละสัณฐานได้ดังตารางที่ 4.1

4.1.4 ผลการวิเคราะห์หาค่าช่องว่างของแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโคปี (UV-visible Spectroscopy)

ในการศึกษาค่าช่องว่างของแถบพลังงานโดยอาศัยค่าความสะท้อนแสง (Diffuse reflectance spectra) ด้วยเทคนิค UV-Vis โดยอาศัยความสัมพันธ์ของขนาดของผลึก (Crystallite size) ของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 12 สัณฐาน ซึ่งหาได้จากกราฟของ XRD และสมการของเชอร์วอด และสามารถแสดงผลค่าช่องว่างของแถบพลังงานได้จากตารางที่ 4.2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผลึกและช่องว่างระหว่างแถบพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.2 ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์และเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 12 สัณฐาน

สัณฐานวิทยา	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)	ช่องว่างของแถบพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
ทรงกลม(commercial)	25.7	3.24
ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง	26.3	3.23
ทรงสี่หน้าขาสั้น	27.0	3.22
ทรงสี่หน้ายาว	27.8	3.22
ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท	30.3	3.22
ทรงกลมกลวง	32.2	3.21
ท่อกลวง	31.2	3.20
แท่งตัน	33.2	3.20
ดอกไม้ที่เกิดจากแท่งตัน	41.2	3.18
ทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์	51.5	3.18
แผ่นมีรูพรุน	42.9	3.16
ลวด	42.4	3.16



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของผลึกและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

จากรูปที่ 4.6 ทำให้ทราบได้ว่า แนวโน้มค่าช่องว่างของแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลจากแนวโน้มของขนาดผลึก (crystallite size) ของซิงค์ออกไซด์ที่ลดลง โดยขนาดของผลึกสามารถหาได้จากสมการของ sherrer ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.10 [41]

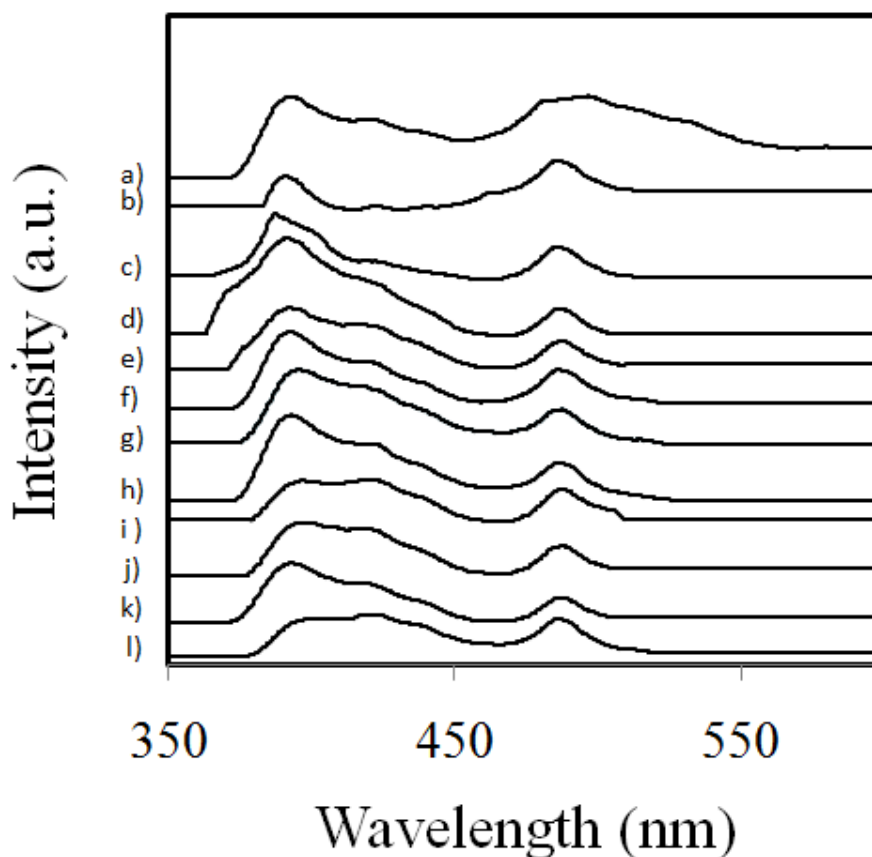
$$g = 0.94\lambda/\Delta(2\theta)\cos\theta \quad 4.10$$

โดยที่  $\lambda$  คือค่าความยาวคลื่นของเอ็กซ์เรย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.54056 อังสตรอม  $\theta$  และ  $\Delta(2\theta)$  คือมุมในการเลี้ยวเบนของ Bragg และความกว้างที่มากที่สุดระหว่างจุดกึ่งกลางของพีคที่สูงที่สุด (The full width at half maximum (In radian)) ที่ระนาบ (101) ของซิงค์ออกไซด์ 11 สัณฐาน ได้แก่ ทรงสี่หน้ายาว ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง ทรงสี่หน้าชาสั้น ท่อกลวง แท่งตัน ทรงกลม (Commercial) แผ่นมีรูพรุน ทรงกลมกลวง ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งตัน ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท และทรงกลม (สังเคราะห์)

ที่ระนาบ (002) ของสัณฐานลวด โดยขนาดของผลึกซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานมีขนาดอยู่ในช่วง 26.2-50.1 นาโนเมตร ในส่วนของแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.16-3.24 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยปกติแล้วค่าแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ จะเกิดจากความต่อเนื่องกันของระดับพลังงาน (Continuous energy state) ดังนั้น ถ้าขนาดของ ซิงค์ออกไซด์มีขนาดเล็ก จะทำให้ความต่อเนื่องของระดับพลังงานลดลง ส่งผลให้ค่าแถบพลังงานมีค่าที่กว้างมากขึ้น [42-44] โดยซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม (Commercial) มีค่าช่องว่างของแถบพลังงานมากที่สุดเท่ากับ 3.24 eV รองลงมาคือสัณฐานทรงสี่หน้ายาวปานกลาง ทรงสี่หน้าชาสั้น ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท ทรงสี่หน้ายาว ทรงกลมกลวง ท่อกลวง แท่งตัน ดอกไม้ที่เกิดจากแท่งตัน ทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์ แผ่นมีรูพรุน และสัณฐานลวด โดยมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

#### 4.1.5 ผลการวิเคราะห์หาความไม่สมบูรณ์ของผลึก (Defect) ของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซน (Photoluminescence, PL)

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นลักษณะทั่วไปของเส้นโค้งจำเพาะโฟโตลูมิเนสเซนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน



รูปที่ 4.7 เส้นโค้งโฟโตลูมิเนสเซนของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน a) ทรงสี่หน้าขาสั้น b) ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง c) ลวด d) ทรงกลมกลวง e) ทรงกลม (สังเคราะห์) f) ทรงสี่หน้ายาว g) แท่งตัน h) ทรงกลม (Commercial) i) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งตัน j) ท่อกลวง k) ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท และ l) แผ่นมีรูพรุน

ในการศึกษาหาความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน จากรูปที่ 4.7 แสดงการปลดปล่อยรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 390 นาโนเมตร โดยช่วงของการปลดปล่อยรังสียูวีแสดงถึงการรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนอิสระในชั้นของแถบการนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ สำหรับแสงสีม่วงและแสงสีเขียวที่ถูกปล่อยออกมาที่ความยาวคลื่น 420 และ 490 นาโนเมตรจะเป็นผลจากการรวมกันของโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง (photogenerated hole) กับอิเล็กตรอนในชั้นของซิงค์อินเตอร์สตีเชียล (Zn interstitial) และ ช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancy)

ตามลำดับ [45] เมื่อนำค่าพื้นที่ใต้กราฟฟิคของแสงสีเขียวและแสงสีม่วง หารด้วยพื้นที่ใต้กราฟฟิค รังสียูวี จะได้ค่าอัตราส่วนออกมาโดยค่าอัตราส่วนที่ได้จะแสดงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซิงค์ออกไซด์ อัตราส่วนที่มีค่ามากที่สุดจะแสดงถึงซิงค์ออกไซด์จะมีความไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์มากที่สุด [19, 46] โดยค่าอัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและรังสียูวี และแสงสีเขียวและรังสียูวีนี้สามารถแสดงได้ดัง ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน

ตัวอย่าง	สัณฐานวิทยา	ความไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคระหว่างช่วงแสงสีเขียวและรังสียูวี)	ความไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนพื้นที่ใต้พีคระหว่างช่วงแสงสีม่วงและรังสียูวี)
a)	ทรงสี่หน้าขาสั้น	10.12	0.76
b)	ทรงสี่หน้าขายาว ปานกลาง	5.62	0.76
c)	ทรงสี่หน้าขายาว	0.45	0.70
d)	ท่อกลวง	2.74	2.05
e)	แท่งตัน	1.06	3.35
f)	ทรงกลม (commercial)	0.81	2.59
g)	แผ่นมีรูพรุน	3.99	6.77
h)	ทรงกลมกลวง	0.13	0.59
i)	ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมของแท่งตัน	1.39	3.94
j)	ลวด	0.39	0.44
k)	ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมของแผ่นซีท	2.77	1.11
l)	ทรงกลม (สังเคราะห์)	0.41	1.45

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ค้ำแสงสีเขียวต่อรังสียูวี จะเป็นอัตราส่วนที่สนใจในการใช้อธิบายความไม่สมบูรณ์ของผลึกมากที่สุด[39] สำหรับซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ในเฟสแก๊ส จะได้ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงสี่หน้าขาสั้นที่มีความไม่สมบูรณ์จากช่องว่างของออกซิเจน (Oxygen vacancy) มากที่สุด รองลงมาคือทรงสี่หน้าขายาวปานกลางและทรงสี่หน้าขายาว เนื่องจากในขั้นตอนการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานทรงสี่หน้าขาสั้นนั้น ได้ให้การปนของไนโตรเจน ในทิศทางเดียวกับระบบที่อัตราการปนไนโตรเจน 1.25 ลิตรต่ออนาที ซึ่งถือว่าการปนของระบบมากที่สุดจึงส่งผลให้เกิดออกซิเจนทำปฏิกิริยากับไอระเหยของซิงค์ได้น้อย ทำให้นิวเคลียสของขาที่ได้มีความยาวที่สั้นที่สุดและเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกมากที่สุดโดยมีอัตราส่วนระหว่างความสูงพีคระหว่างช่วงแสงยูวีและแสงสีเขียวเท่ากับ 10.12

รองลงมาคือพื้นฐานขายาวปานกลาง มีการปนระบบรองลงมาคือมีอัตราการปนของไนโตรเจน 1.25 ลิตรต่ออนาที แต่ทิศทางการปนเป็นแบบขวางระบบจึงทำให้เกิดการปนของระบบที่น้อยกว่าแบบปนทิศทางเดียวกับระบบ ส่งผลให้เกิดออกซิเจนทำปฏิกิริยากับไอระเหยของซิงค์มากขึ้นโดยมีอัตราส่วนระหว่างความสูงพีคระหว่างช่วงแสงยูวีและแสงสีเขียวเท่ากับ 5.62 ทำให้นิวเคลียสของขาที่ได้มีความยาวมากขึ้นและมีความสมบูรณ์ของผลึกมากขึ้น

พื้นฐานทรงสี่หน้าขายาวที่มีความยาวขามากที่สุดเนื่องจากการปนของระบบที่น้อยที่สุด คือมีอัตราการปนของไนโตรเจน 0.1 ลิตรต่ออนาที ในทิศทางขวางระบบ จึงส่งผลให้เกิดออกซิเจนทำปฏิกิริยากับไอระเหยของซิงค์ได้มากที่สุด ส่งผลให้ความยาวที่ได้ยาวมากที่สุดและมีความสมบูรณ์ของผลึกมากที่สุดโดยมีอัตราส่วนระหว่างความสูงพีคระหว่างช่วงแสงยูวีและแสงสีเขียวเท่ากับ 0.45

สำหรับซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ในเฟสของเหลว ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานแผ่นมีรูพรุนมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกมากที่สุดโดยมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ค้ำแสงสีเขียวและรังสียูวีเท่ากับ 3.99 เนื่องจากการสังเคราะห์ที่ใช้สารตั้งต้นทำให้เกิดซิงค์ไอออนในสารละลาย ซิงค์คลอไรด์ 10 มิลลิโมล และสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน เอทิลีนไดอามีน 5 มิลลิโมล เนื่องจากปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนน้อยกว่าซิงค์ไอออน จึงส่งผลให้ผลึกของซิงค์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีความไม่สมบูรณ์

รองลงมาคือซิงค์ออกไซด์พื้นฐานท่อกวางใช้สารตั้งต้นคือซิงค์ออกไซด์ (commercial) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยสาเหตุที่ซิงค์ออกไซด์พื้นฐานท่อกวางมีค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกมากกว่าซิงค์ออกไซด์ (commercial) (อัตราส่วนระหว่างความสูงพีคระหว่างช่วงแสงยูวีและแสงสีเขียวเท่ากับ 2.74 และ 0.81 สำหรับพื้นฐานท่อกวางและทรงกลม (commercial)) เนื่องจาก

เมื่อซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์จากทองคำทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่สูงขึ้นทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนแก๊สสองตัวนี้จะไปปนระบบจนทำให้ซิงค์ออกไซด์เกิดนิวคลีโอใหม่ได้เป็นสังเคราะห์ออกไซด์ ซึ่งการปนระบบของแก๊สทั้งสองนี้อาจจะทำให้ผลึกของสังเคราะห์ออกไซด์อาจจะไม่สมบูรณ์เท่ากับซิงค์ออกไซด์ (commercial)

สำหรับซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์จากไม้แห้งต้น แ่งต้นและลวด จะทำการสังเคราะห์ที่สภาวะเดียวกันคือสารตั้งต้นซิงค์ซัลเฟต โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิในการสังเคราะห์เท่ากับ 200 องศาเซลเซียส แต่มีความสมบูรณ์ของผลึกที่แตกต่างกันเนื่องจาก ซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์จากไม้แห้งต้นใช้เวลาในการสังเคราะห์ 6 ชั่วโมง โดยที่เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่น้อยกว่าซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์จากต้นและลวดนี้อาจส่งผลให้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า ส่งผลให้คุณสมบัติของผลึกของซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์จากไม้แห้งต้นมีค่าน้อยที่สุด โดยมีอัตราส่วนระหว่างความสูงพีคระหว่างช่วงแสงยูวีและแสงสีเขียวกว่าเท่ากับ 1.39 รองลงมาคือซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์จากต้น โดยใช้อุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์เท่ากับ 200 องศาเซลเซียสและ 20 ชั่วโมง แต่สารตั้งต้นซิงค์ซัลเฟตที่ใช้มีปริมาณมากกว่าซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์จากลวด ส่งผลให้ปริมาณซิงค์ไอออนที่อยู่ในสารละลายในระหว่างทำปฏิกิริยามากกว่า จึงส่งผลให้ได้คุณสมบัติของผลึกของสังเคราะห์จากลวดมากกว่าสังเคราะห์จากลวด โดยมีอัตราส่วนระหว่างความสูงพีคระหว่างช่วงแสงยูวีและแสงสีเขียวกว่าเท่ากับ 1.06 และ 0.39 ตามลำดับ

เนื่องจากความพยายามที่จะควบคุมลักษณะทางสังเคราะห์ให้ได้หลากหลายสังเคราะห์สารตั้งต้นที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทั้งที่เกิดซิงค์ไอออนหรือไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย อาจจะไม่เหมาะสมพอที่ให้เกิดความเป็นผลึกที่สมบูรณ์แต่สังเคราะห์จากทองคำกลวง มีค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกน้อยที่สุด ซึ่งผลที่ได้ อาจเกิดจากการที่มีสารทั้งสโตฟอสฟอริก แอซิดอยู่ในสารตั้งต้นซึ่งช่วยในการจัดเรียงตัวของผลึกซิงค์ออกไซด์ให้เป็นระเบียบ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองในสภาวะที่ไม่มีสารทั้งสโตฟอสฟอริก แอซิดซึ่งซิงค์ออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะทางสังเคราะห์เป็นทองคำกลมในระดับนาโนเมตรที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (irregular nanoparticles) [13]

ในส่วนของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ได้พีคแสงสีม่วงต่อพื้นที่ได้พีครังสียูวีจะแสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของผลึกจากซิงค์ อินเตอร์สติเชียล (Zn interstitial) สำหรับซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ในเฟสแก๊ส จะได้ซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์ที่หน้าขาสั้นมีความไม่สมบูรณ์จากซิงค์ อินเตอร์สติเชียล (Zn interstitial) มากที่สุด รองลงมาคือทรงสี่หน้ายาวปานกลางและทรงสี่หน้ายาว เนื่องจากสภาวะในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ทิศทาง อัตราการไหล และระยะห่างของแก๊ส



ไนโตรเจนที่ใช้ในการป้อนระบบกับปลายปากกระบอในการให้แก๊สออกซิเจน จะส่งผลให้ได้ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีม่วงที่แตกต่างกัน ดังที่วิเคราะห์ไว้ในความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีเขียว โดยสัดส่วนทรงสี่หน้าข้างขึ้นและยาวปานกลาง จะมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีม่วงมากที่สุดเท่ากับ 0.76 และซิงค์ออกไซด์ทรงสี่หน้าข้างขึ้นจะมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีม่วงน้อยที่สุดเท่ากับ 0.70

สำหรับซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ในเฟสของเหลว สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ปริมาณสารตั้งต้น อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาของซิงค์ออกไซด์ที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน จะส่งผลให้ได้ความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีม่วงที่แตกต่างกันดังที่วิเคราะห์ไว้ในความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีเขียว โดยซิงค์ออกไซด์สัดส่วนแผ่นมีรูพรุนจะมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีม่วงที่สังเคราะห์ในเฟสของเหลวมากที่สุดเท่ากับ 6.77 เนื่องจากสารตั้งต้น เอทิลีนไดเอมีน ที่น้อยกว่าสารตั้งต้น ซิงค์คลอไรด์มาก จึงส่งผลให้ไดมิลไฮดรอกไซด์ไอออนน้อยกว่าซิงค์ไอออนมาก ส่งผลให้มีความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีม่วงที่มากที่สุด

รองลงมาคือสัดส่วนดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งต้น แท่งต้น และลวด มีค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกเท่ากับ 3.94 3.35 และ 0.44 ตามลำดับ เนื่องจากสภาวะในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันทั้งในเรื่องเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ ที่ซิงค์ออกไซด์สัดส่วนดอกไม้แท่งต้นใช้เวลาในการสังเคราะห์ 6 ชั่วโมง ในขณะที่สัดส่วนแท่งต้นใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 ชั่วโมง จึงส่งผลให้สัดส่วนแท่งต้นมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกน้อยกว่าสัดส่วนดอกไม้แท่งต้น และในเรื่องของปริมาณสารตั้งต้นที่ สัดส่วนแท่งต้นใช้ซิงค์ซัลเฟตในการสังเคราะห์ที่มากกว่าสัดส่วนลวด จึงส่งผลได้ความไม่สมบูรณ์ของผลึกมากกว่าสัดส่วนลวดดังที่วิเคราะห์ไว้ในความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีเขียว

และซิงค์ออกไซด์สัดส่วนทรงกลมกลวงมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกน้อยเนื่องจาก การใช้สารทังสโตฟอสฟอริค แอซิดที่ช่วยในการจัดเรียงตัวของผลึกซิงค์ออกไซด์ให้มีความเป็นระเบียบมากขึ้น จึงส่งผลสัดส่วนทรงกลมกลวงมีความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีม่วงน้อยเท่ากับ 0.59

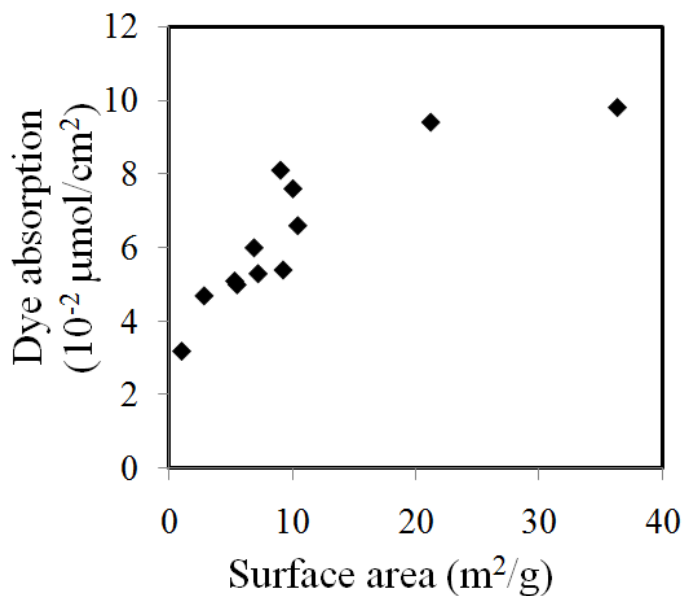
#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่ดูดซับได้จากซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัดส่วนที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด

หลังจากวิเคราะห์รูปร่างและลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์แล้ว นำผงซิงค์ออกไซด์ที่ได้มาขึ้นรูปเป็นขั้วอิเล็กโทรดด้วยวิธีสกรีน ปริ้นต์ติ้ง (Screen printing) จากนั้นนำขั้วอิเล็กโทรด

รดน้ำในสีย้อมของสารประกอบเชิงซ้อนของรูทีเนียมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และสกัดสีย้อมออกด้วยสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และจากตารางที่ 4.4 สามารถนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณสีย้อมที่ได้จากซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด

สัณฐานวิทยา	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	ปริมาณการดูดซับสีย้อม (ไมโครโมลต่อตาราง เซนติเมตร)
ทรงกลมกลวง	36.28	$9.8 \times 10^{-2}$
ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกัน ของแผ่นซีท	21.16	$9.4 \times 10^{-2}$
ทรงกลม(commercial)	10.40	$6.6 \times 10^{-2}$
ทรงกลมที่เกิดจากการ สังเคราะห์	10.00	$7.6 \times 10^{-2}$
ทรงสี่หน้ายาว	9.21	$5.4 \times 10^{-2}$
แท่งตัน	9.00	$8.1 \times 10^{-2}$
ทรงสี่หน้ายาวปานกลาง	7.18	$5.3 \times 10^{-2}$
ทรงสี่หน้าขาสั้น	6.85	$6.0 \times 10^{-2}$
ท่อกลวง	5.48	$5.0 \times 10^{-2}$
ดอกไม้ที่เกิดจากแท่งตัน	5.28	$5.1 \times 10^{-2}$
แผ่นมีรูพรุน	2.81	$4.7 \times 10^{-2}$
ลวด	1.00	$3.2 \times 10^{-2}$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน

จากรูปที่ 4.8 ทำให้ทราบได้ว่า แนวโน้มของปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดใน DSSC จะขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์ [36, 47, 48] จากตารางที่ 4.4 แสดงผลซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวงที่นำมาใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดจะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าการดูดซับสีย้อมมากที่สุดเท่ากับ 36.28 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมและ  $9.8 \times 10^{-2}$  ไมโครโมลต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ รองลงมาคือสัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการเรียงซ้อนกันของแผ่นซีท มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าการดูดซับสีย้อมรองลงมาจากซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวงเท่ากับ 21.16 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมและ  $9.4 \times 10^{-2}$  ไมโครโมลต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ และเนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีรูพรุนในระดับเมโซ จึงทำให้สีย้อมบางส่วนสามารถเข้าสู่และติดอยู่ในรูระดับเมโซของซิงค์ออกไซด์ ส่งผลความชันของกราฟในช่วงที่ใช้ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมกลวงและสัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมตัวของแผ่นซีทมีค่าลดลง

นอกจากปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดใน DSSC จะขึ้นอยู่กับปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะแล้ว ยังขึ้นอยู่กับผิวหน้าของซิงค์ออกไซด์แต่ละสัณฐานด้วย [28] ยกตัวอย่างเช่น ซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม (commercial) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเป็นลำดับที่ 3 เท่ากับ 10.40 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม แต่มีปริมาณการดูดซับสีย้อมอยู่ในลำดับที่ 5 เท่ากับ  $6.6 \times 10^{-2}$  ไมโครโมลต่อตารางเซนติเมตร และ ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเป็นลำดับที่ 6 เท่ากับ 9.00 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม แต่มีปริมาณการดูดซับสีย้อมอยู่ในลำดับที่ 3

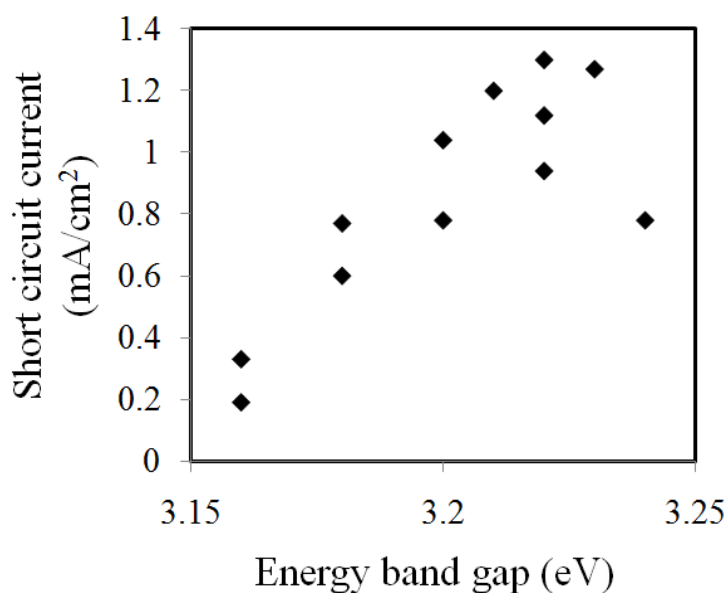
เท่ากับ  $8.1 \times 10^{-2}$  ไมโครโมลต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้อาจเกิดจากความขรุขระของพื้นที่ผิวของซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดฐานหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการยึดเกาะของสีย้อมมากกว่าซิงค์ออกไซด์อีกฐานหนึ่ง แต่จากข้อมูลโดยรวมแล้วปริมาณการดูดซับสีย้อมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้น โดยซิงค์ออกไซด์ฐานทรงกลมกลวงและดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีทมีการดูดซับสีย้อมมากที่สุดเนื่องมาจากเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากและมีรูพรุน

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพที่ได้จากซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 ฐานฐานที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด

หลังจากประกอบเซลล์แสดงอาทิตย์ DSSC จากขั้วแอโนด (ซิงค์ออกไซด์อิเล็กโทรด) และขั้วแคโทด (แพลทินัม) ใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์และนำเซลล์ที่ได้ไปวัดค่าประสิทธิภาพด้วยเครื่อง IV-tester แล้ว จะได้ค่าประสิทธิภาพดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความกว้างแถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) ค่าความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC

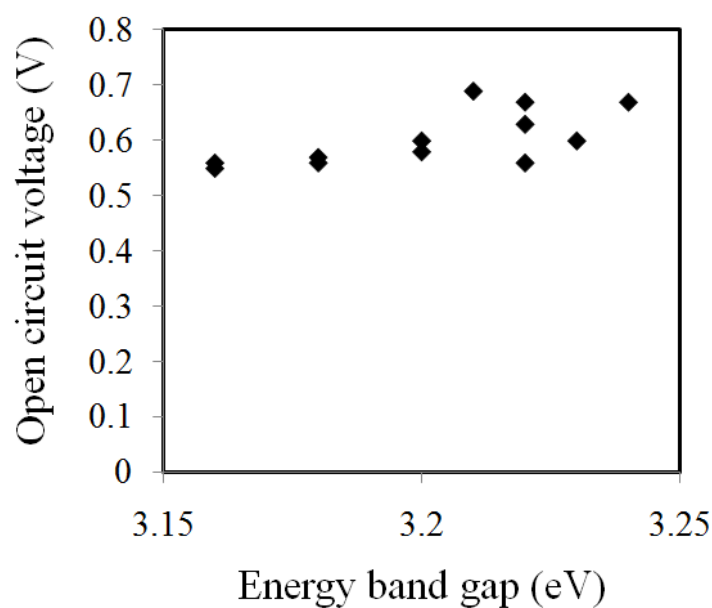
ผลการวิเคราะห์ค่าความกว้างแถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน (Energy band gap) และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด (Short circuit current,  $J_{sc}$ )

จากรูปที่ 4.9 ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าความกว้างแถบพลังงานจะทำให้แนวโน้มของค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดมีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณอิเล็กตรอนที่ส่งผ่านไปยังขั้วแอโนด ถ้าเพิ่มค่าปริมาณความกว้างแถบพลังงานโดยสมมติให้พลังงานชั้นวาเลนซ์มีค่าคงที่และชั้นพลังงานแถบการนำของซิงค์ออกไซด์มีค่าต่ำกว่าชั้น LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital) จะทำให้อิเล็กตรอนจากสีย้อมในชั้นแถบการนำของซิงค์ออกไซด์ มีพลังงานที่สูงขึ้น จึงลดการกลับไปรวมตัวกันของอิเล็กตรอนในชั้นแถบการนำกับสีย้อมที่ถูกรีดิวซ์และอิเล็กโทรไลต์ทำให้อิเล็กตรอนแต่สีย้อมที่ถูกรีดิวซ์ไป จึงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดมีค่าสูงขึ้น [49]

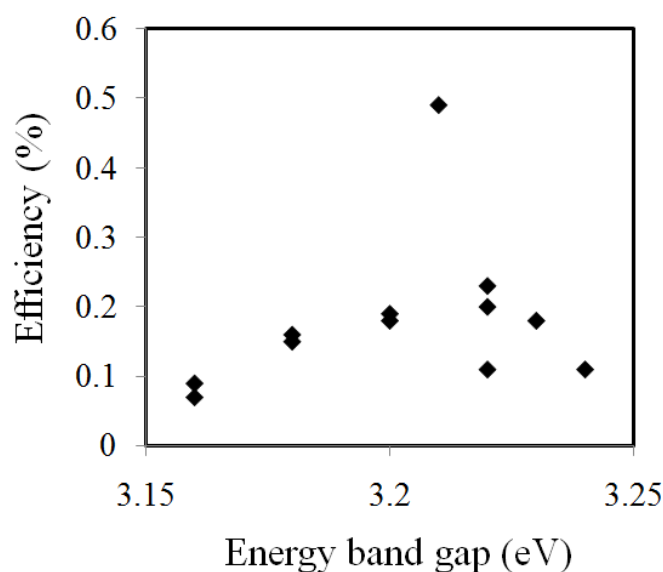
ผลการวิเคราะห์ค่าความกว้างแถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อค่าความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน (Energy band gap) และค่าความต่างศักย์วงจรถัด (Open circuit voltage,  $V_{oc}$ )

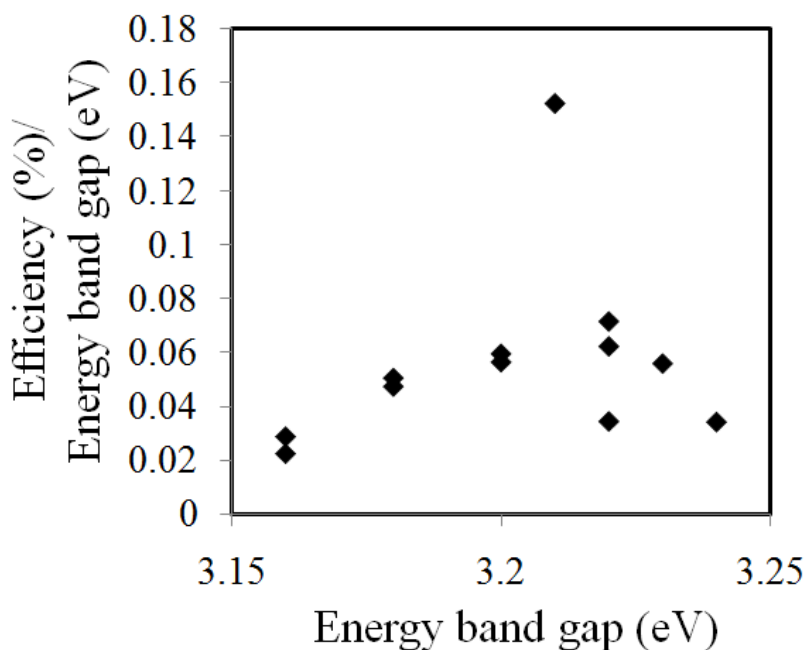
จากรูปที่ 4.10 ทำให้ทราบได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าความกว้างแถบพลังงานจะทำให้แนวโน้มของค่าความต่างศักย์วงจรถัดมีค่ามากขึ้น เนื่องจากค่า  $V_{oc}$  เกิดจากความสัมพันธ์ของความต่างระหว่าง Fermi level ของ ซิงค์ออกไซด์และปฏิกิริยารีดอกซ์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การเพิ่มระดับพลังงานในชั้นการนำในซิงค์ออกไซด์จะลดการกลับไปรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกรีดิวซ์และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์วงจรถัดมีค่ามากขึ้นด้วย [2, 25]

ผลการวิเคราะห์ค่าความกว้างแถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพของ DSSC แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน (Energy band gap) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%)

การทดลองที่ได้จากรูปที่ 4.11 ให้ทราบได้ว่าค่าความกว้างแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าประสิทธิภาพของ DSSC เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างแถบพลังงานและค่าอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพต่อค่าความกว้างแถบพลังงานดังรูปที่ 4.12 พบว่า ค่าแนวโน้มที่ได้มีค่ามากขึ้นซึ่งแสดงถึง ค่าประสิทธิภาพของ DSSC ที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ค่าแถบวาเลนซ์มีค่าคงที่ เมื่อเพิ่มความกว้างแถบการนำ จะทำให้อิเล็กตรอนจากสีย้อมในชั้นแถบการนำของซิงค์ออกไซด์ มีพลังงานที่สูงขึ้น จึงลดการกลับป้อนตัวกันของอิเล็กตรอนในชั้นแถบการนำกับสีย้อมที่ถูกรีดิวซ์และอิเล็กโทรไลต์ที่ให้อิเล็กตรอนแต่สีย้อมที่ถูกรีดิวซ์ไป ดังที่วิเคราะห์ในรูปที่ 4.9 แต่มีซิงค์ออกไซด์ 3 สัณฐานที่มีค่าไม่เกินไปตามแนวโน้มของกราฟจากรูปที่ 4.12 ได้แก่สัณฐาน ทรงกลมที่ซื้อมาจากบริษัท ชิกมา ออดริช สัณฐานทรงสี่หน้าขาด้าน และขยาวปานกลาง ทั้งนี้เนื่องจากทั้ง 3 สัณฐานที่มีค่าความกว้างแถบพลังงานที่มาก จึงส่งผลให้ค่าแถบพลังงานในชั้นการนำมีค่าสูงเกินระดับชั้น LUMO จึงส่งผลให้มีอิเล็กตรอนที่ส่งไปยังขั้วแอโนดมีปริมาณลดลงและค่าประสิทธิภาพลดลงด้วย

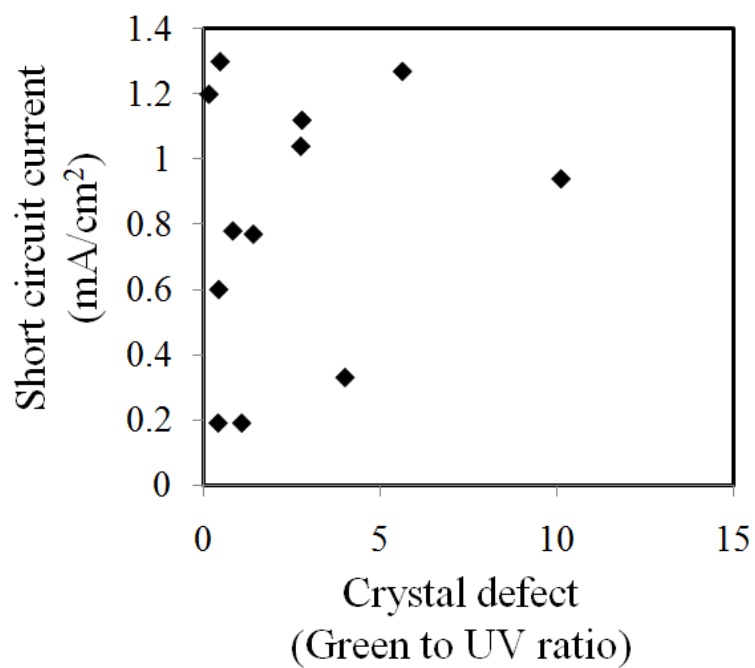


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน (Energy band gap) และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและค่าความกว้างแถบพลังงาน

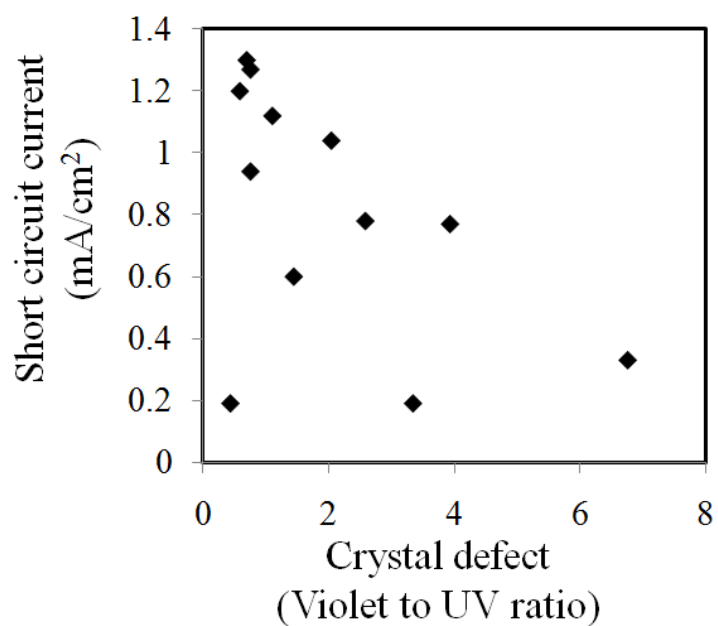
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) ค่าความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC

ผลการวิเคราะห์ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14

จากรูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ได้ฟิคของแสงสีเขียวหารด้วยพื้นที่ได้ฟิคของการปลดปล่อยรังสียูวี และค่าประสิทธิภาพของ DSSC ของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน ทำให้ทราบได้ว่าแนวโน้มของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีเขียวที่แสดงถึงช่องว่างของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น อาจจะมีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดให้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น จึงได้มีการทำการศึกษาขั้นต่อไป โดยทำการศึกษาค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ได้ฟิคของแสงสีม่วงหารด้วยพื้นที่ได้ฟิคของการปลดปล่อยรังสียูวี ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี) และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมัด (Short circuit current,  $J_{sc}$ )

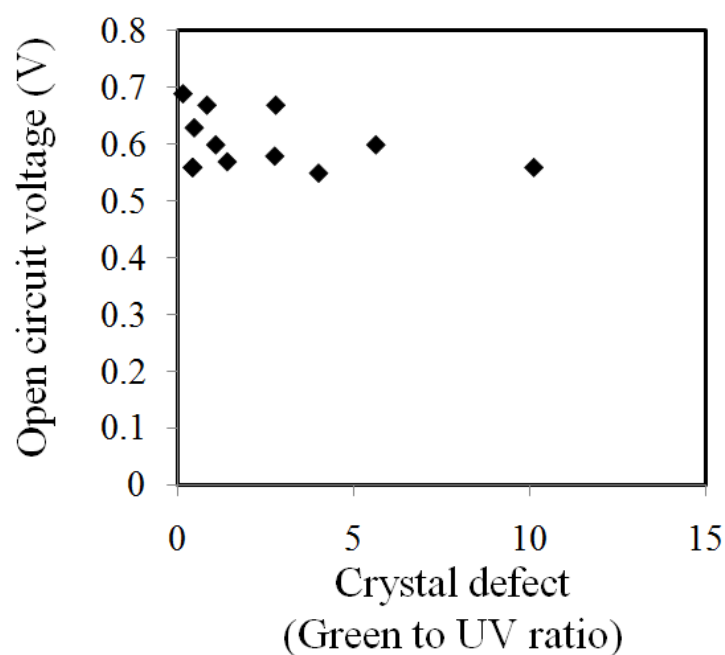


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและรังสียูวี) และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมัด (Short circuit current,  $J_{sc}$ )

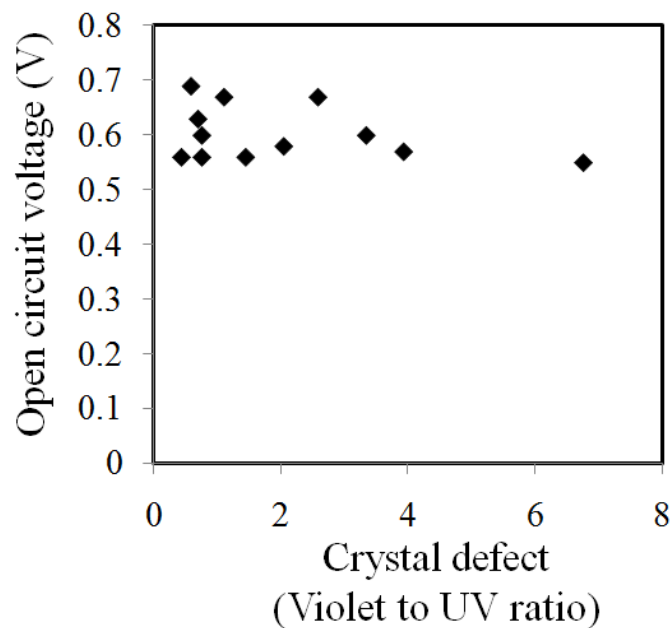


จากรูปที่ 4.14 ทำให้ทราบได้ว่าแนวโน้มความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีม่วงที่น้อยลงจะทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะความสมบูรณ์ของผลึกที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เส้นทางในการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากขั้วออกไซด์ไปสู่ขั้วแอโนดของ DSSC ดีขึ้นและมากขึ้น ส่งผลให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

ผลการวิเคราะห์หาค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีเขียวและแสงสีม่วงที่มีอิทธิพลต่อค่าความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16



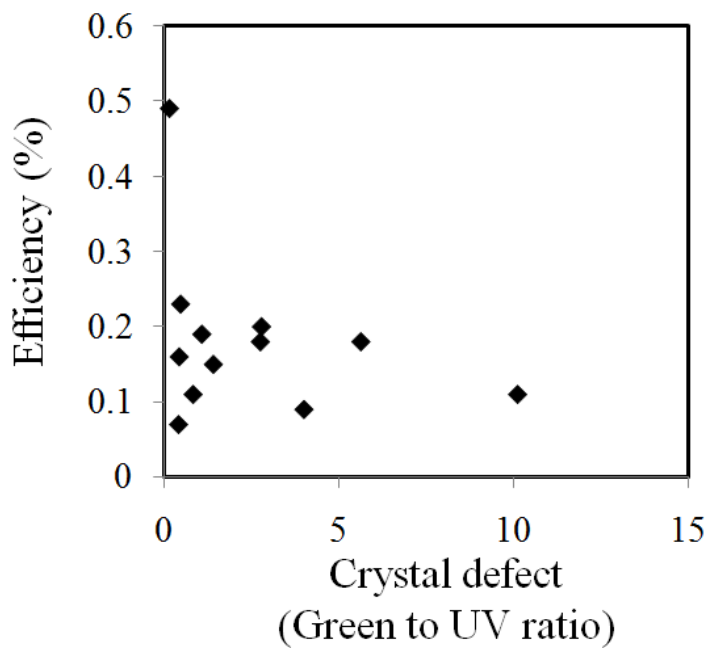
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี) และค่าความต่างศักย์วงจรถัด (Open circuit voltage, V)



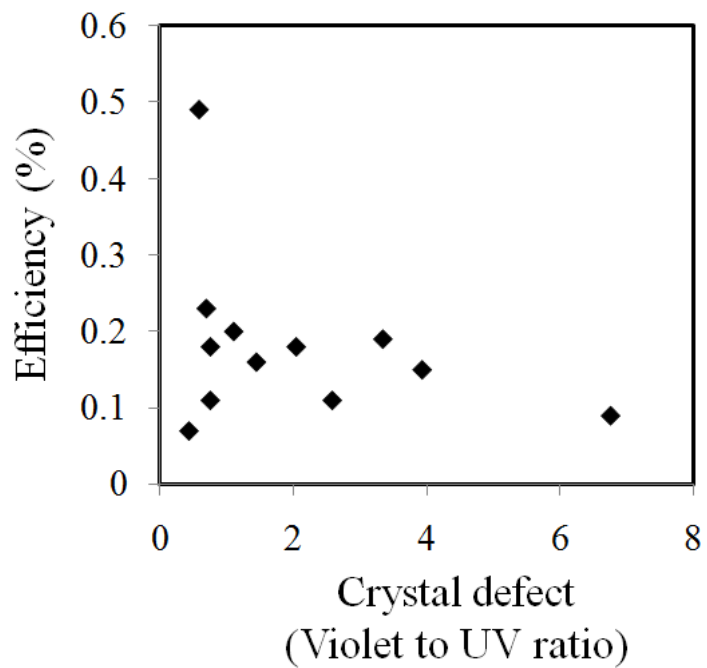
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและรังสียูวี) และค่าความต่างศักย์วงจรถัด (Open circuit voltage, V)

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 ทำให้ทราบได้ว่า แนวโน้มค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกจะไม่ส่งผลต่อแนวโน้มของค่าความต่างศักย์วงจรถัด ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $V_{oc}$  เกิดจากความสัมพันธ์ของความต่างระหว่าง Fermi level ของ ซิงค์ออกไซด์และปฏิกิริยารีดอกซ์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังที่วิเคราะห์ไว้ในรูปที่ 4.10 ดังนั้นค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกจึงไม่น่าจะมีอิทธิพลต่อค่าความต่างศักย์วงจรถัด

ผลการวิเคราะห์ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกในช่วงแสงสีเขียวและแสงสีม่วงที่มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพ (Eff%) แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18

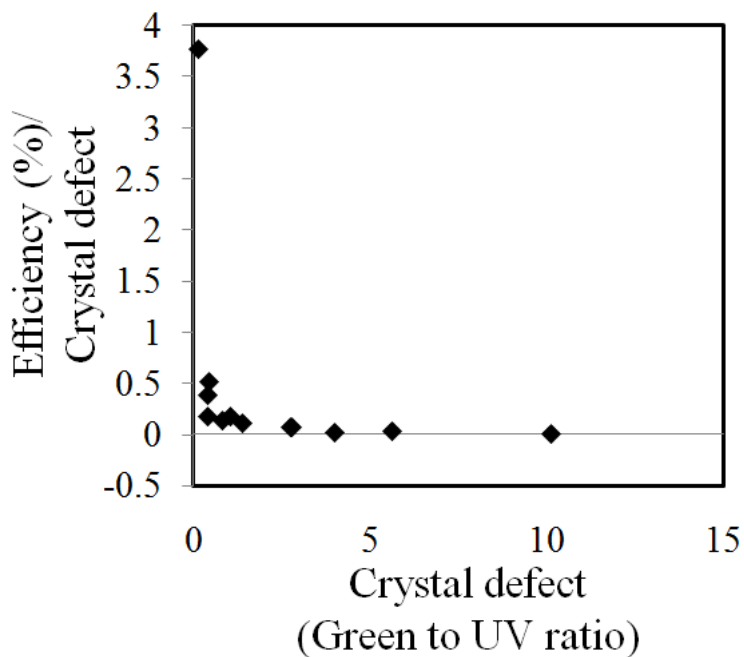


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงเขียวและรังสียูวี) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%)

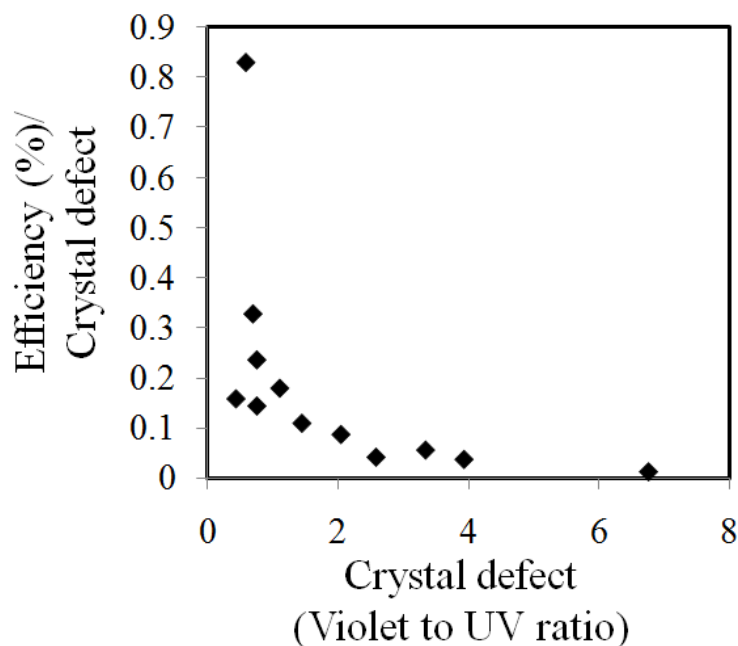


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและรังสียูวี) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%)

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 ทำให้ทราบได้ว่าค่าแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพอาจจะขึ้นอยู่กับค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของทั้งแสงสีเขียวและแสงสีม่วง ดังนั้นจึงทำการพล็อตกราฟระหว่างความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่แสงสีเขียวต่ออัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพ (รูปที่ 4.19) และกราฟระหว่างความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่แสงสีเขียวยต่ออัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและความไม่สมบูรณ์ของผลึกของแสงม่วง (รูปที่ 4.20) เพื่อตรวจสอบว่า ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกมีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพหรือไม่

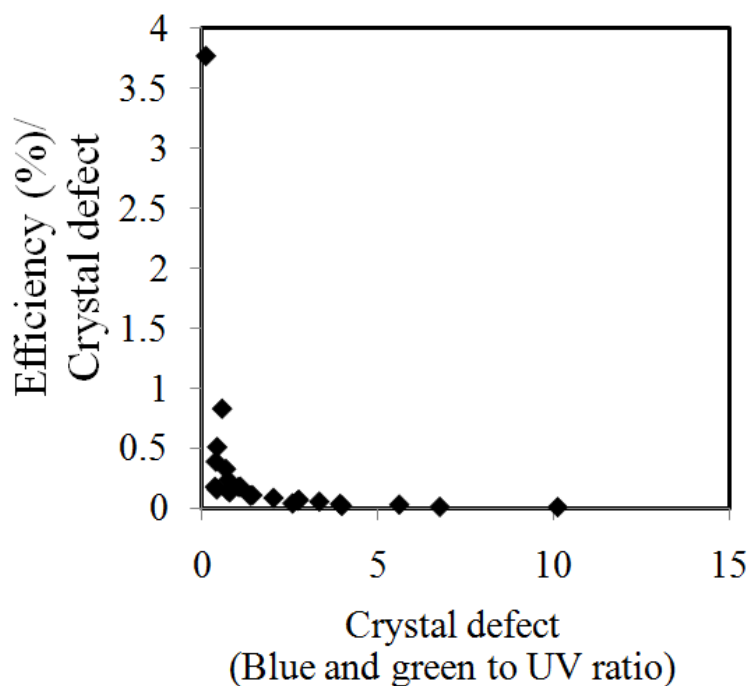


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี) และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและความไม่สมบูรณ์ของผลึกของแสงเขียว



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวยและรังสียูวี) และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและความไม่สมบูรณ์ของผลึกของแสงสีม่วง

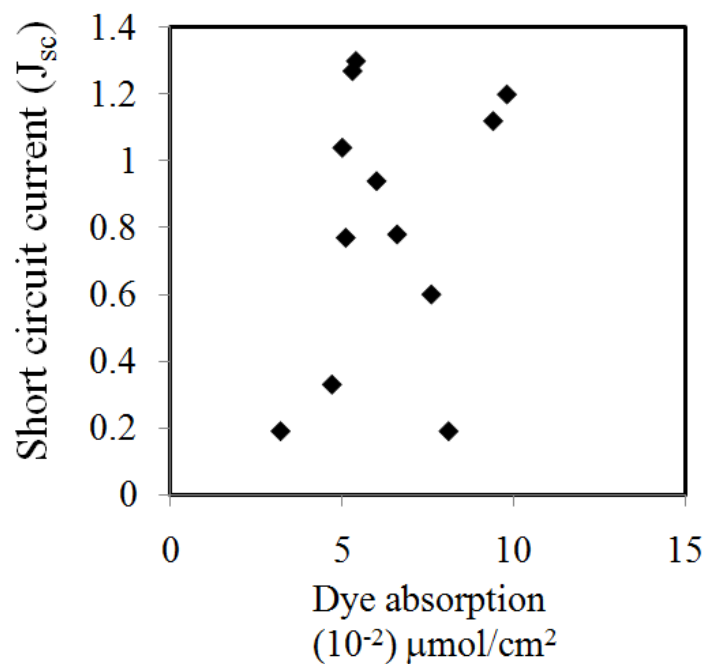
จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 ทำให้ทราบได้ว่า แนวโน้มของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของทั้งแสงสีเขียวยและแสงสีม่วงที่ลดลงจะทำให้ได้อัตราส่วนของค่าประสิทธิภาพต่อความไม่สมบูรณ์ของผลึกของแสงสีเขียวยและแสงสีม่วงเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าค่าแนวโน้มความสมบูรณ์ของผลึกที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะความสมบูรณ์ของผลึกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นทางในการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากซิงค์ออกไซด์ไปสู่ขั้วแอโนดของ DSSC ดีขึ้นและมากขึ้น ส่งผลให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมืดที่เพิ่มมากขึ้น ดังที่วิเคราะห์ไว้ที่รูป 4.14 จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของ DSSC เพิ่มขึ้นด้วย และแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแนวโน้มของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกทั้งในช่วงแสงสีเขียวยและแสงสีม่วงที่เพิ่มขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก (อัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วงและแสงสีเขียวต่อรังสียูวี) และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพและความไม่สมบูรณ์ของผลึกของแสงสีม่วงและแสงสีเขียว

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณการดูดซับสีเข้มของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ประยุกต์เป็นขั้วแอโนดที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) ค่าความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC

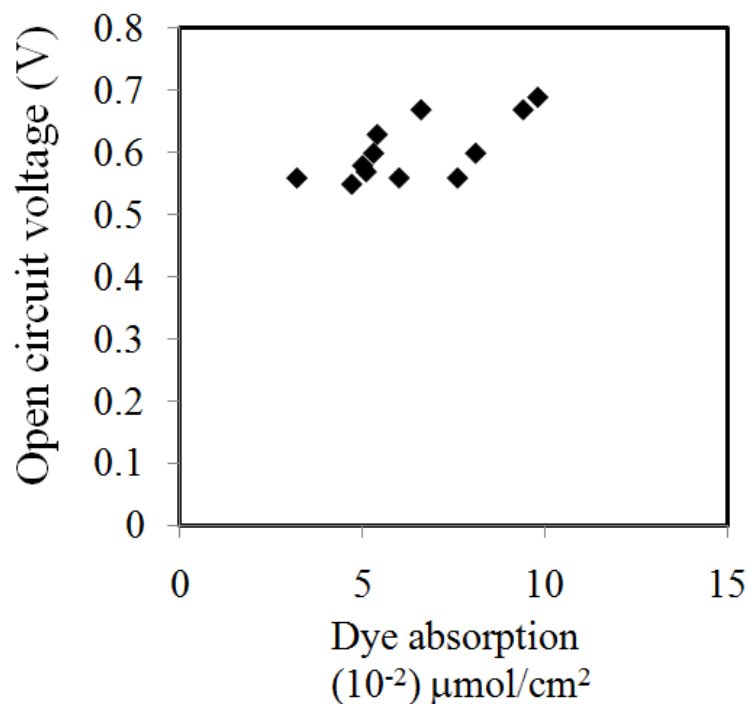
ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณการดูดซับสีเข้มของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ประยุกต์เป็นขั้วแอโนดที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับสีของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมัด (Short circuit current,  $J_{sc}$ )

จากรูปที่ 4.22 ทำให้ทราบได้ว่าแนวโน้มปริมาณค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมัดจะเพิ่มเมื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับสีของสสารประกอบเชิงซ้อน รูทีเนียม (N719) เป็นแหล่งรวมของอิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงจากดวงอาทิตย์จะทำให้มีอิเล็กตรอนจากสีที่ถูกกระตุ้นจากสถานะพื้น (Ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited state) มากขึ้น และตกลงบนชั้นแถบการนำ (Conduction band) ของซิงค์ออกไซด์มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรมัด ( $J_{sc}$ ) เพิ่มมากขึ้น [32, 34]

ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณการดูดซับสีของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ประยุกต์เป็นขั้วแอโนดที่มีอิทธิพลต่อค่าความต่างศักย์วงจรมัด ( $V_{oc}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.23

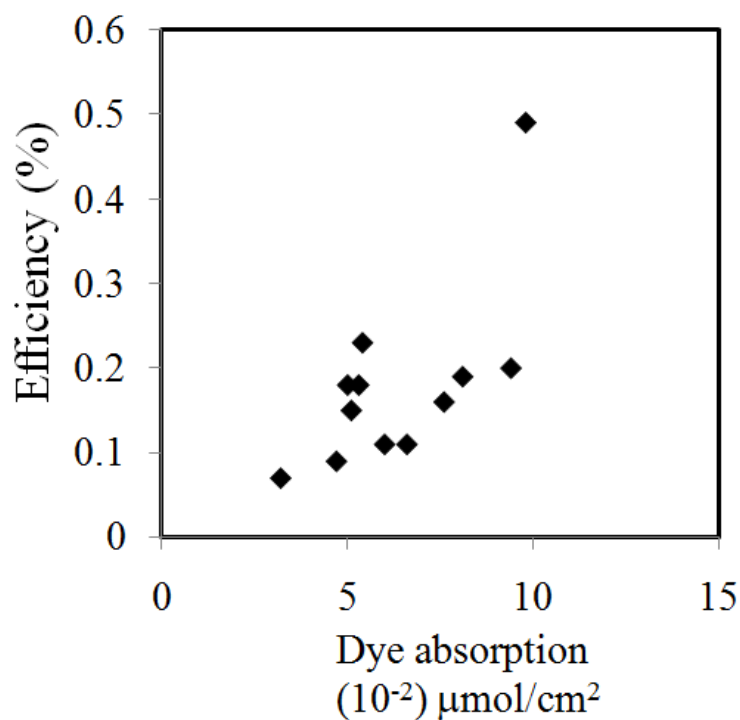


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด และค่าความต่างศักย์วงจรมืด (Open circuit voltage,  $V_{oc}$ )

จากรูปที่ 4.23 ทำให้ทราบได้ว่าแนวโน้มของค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ได้ค่าความต่างศักย์วงจรมืดเพิ่มขึ้นด้วย นั้นเป็นเพราะสีย้อมเบสรูทีเนียม (Ruthinium based dye) เป็นแหล่งรวมของอิเล็กตรอน เมื่อมีปริมาณสีย้อมในขั้วอิเล็กโทรดมากขึ้นจะส่งผลให้มีอิเล็กตรอนไปสู่ขั้วแอโนดมากขึ้น ซึ่งอาจจะช่วยในการลดการกลับป้อนรวมตัวกันของอิเล็กตรอนในสีย้อมที่ถูกรีดิวซ์และอิเล็กโทรไลต์ที่ทำให้อิเล็กตรอนแก่สีย้อมที่ถูกรีดิวซ์ ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์วงจรมืดมีค่ามากขึ้น [36, 47]

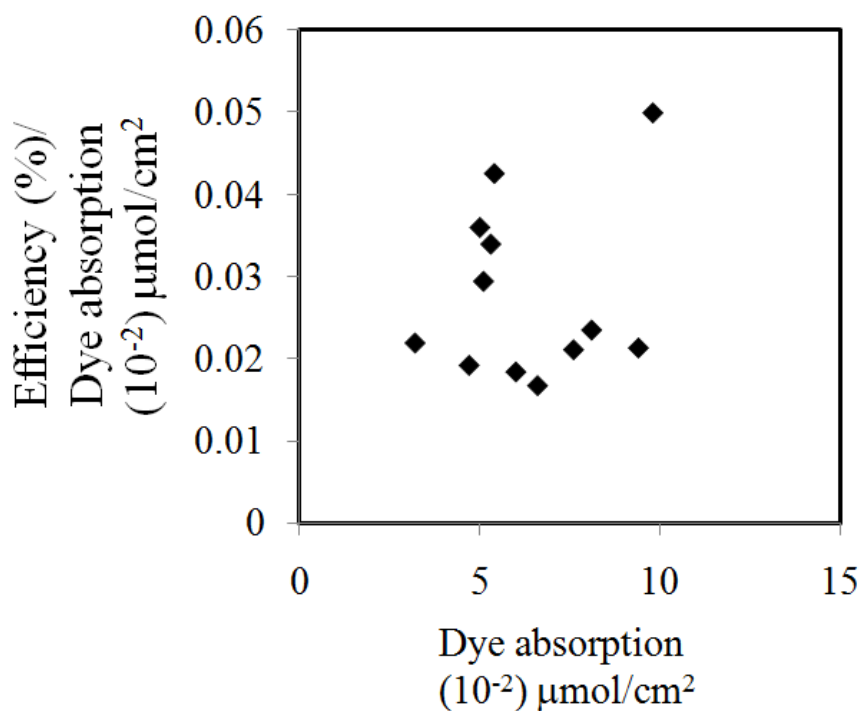
ผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดที่มีอิทธิพลต่อค่าประสิทธิภาพ (Eff%) แสดงได้ดังรูปที่ 4.24





รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด และค่าประสิทธิภาพ (Eff%)

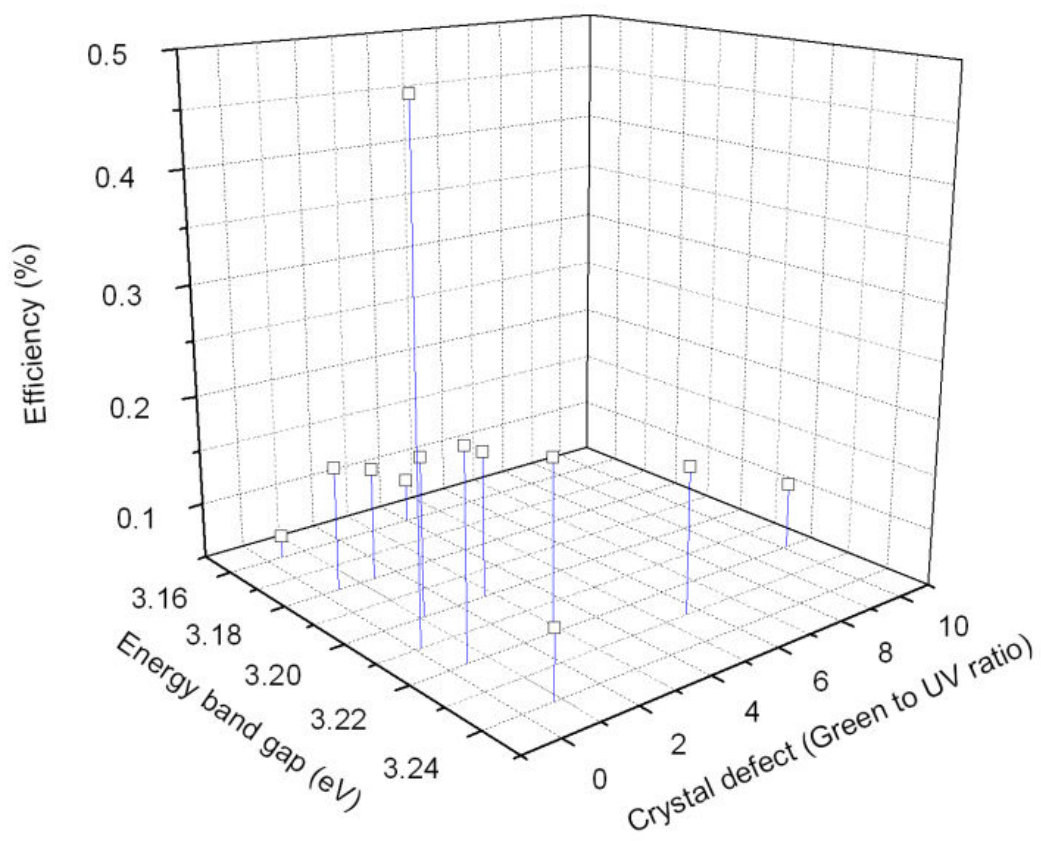
จากรูปที่ 4.24 ทำให้ทราบได้ว่าค่าแนวโน้มปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วแอโนดอิเล็กทรอนิกส์ที่มากขึ้นจะทำให้แนวโน้มค่าประสิทธิภาพที่ได้เพิ่มมากขึ้น จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดอิเล็กทรอนิกส์และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพต่อปริมาณการดูดซับสีย้อม (รูปที่ 4.25) เพื่อดูว่าค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มค่าประสิทธิภาพได้อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่



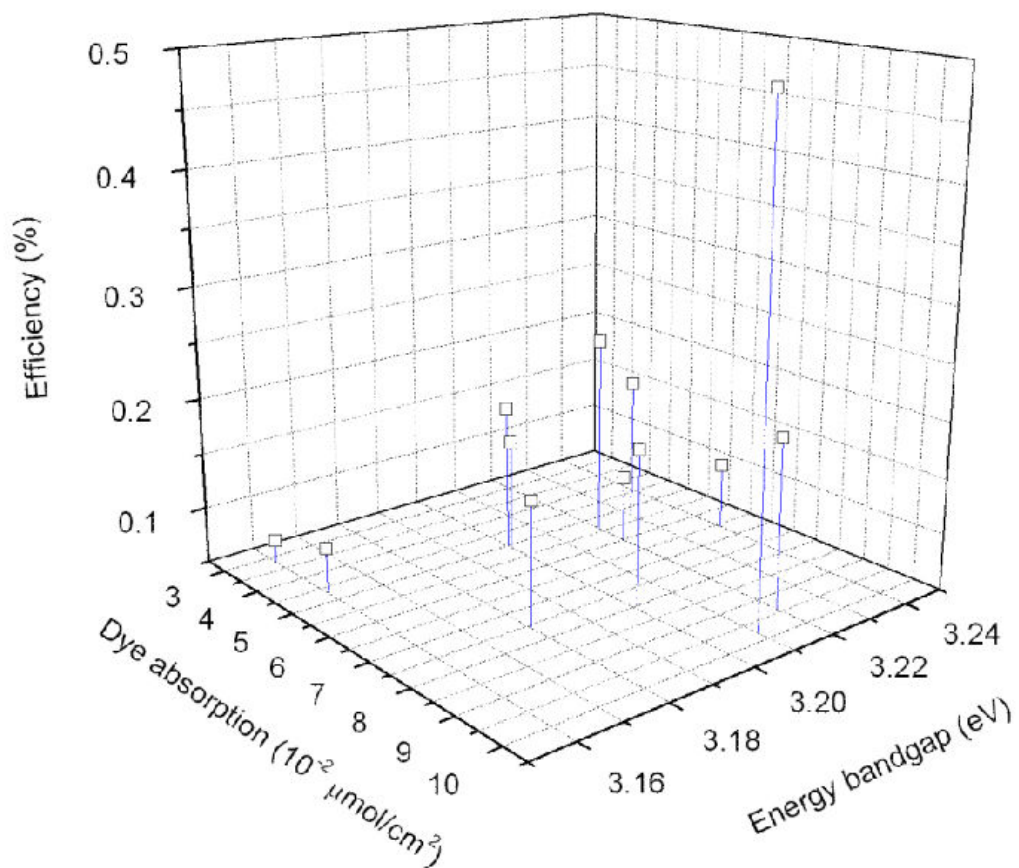
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด และอัตราส่วนระหว่างค่าประสิทธิภาพต่อปริมาณการดูดซับสีย้อม

จากรูปที่ 4.25 ทำให้ทราบได้ว่าปริมาณการดูดซับสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มค่าประสิทธิภาพของ DSSC อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอาจเป็นเพราะ สีย้อมรูธเรเนียมเป็นแหล่งรวมของอิเล็กตรอน ค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด และค่าความต่างศักย์วงจรถัดที่เพิ่มมากขึ้น ดังอธิบายไว้ในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มทั้งค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดและความต่างศักย์วงจรถัดนี้จะสามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพโดยรวมของ DSSC ด้วย

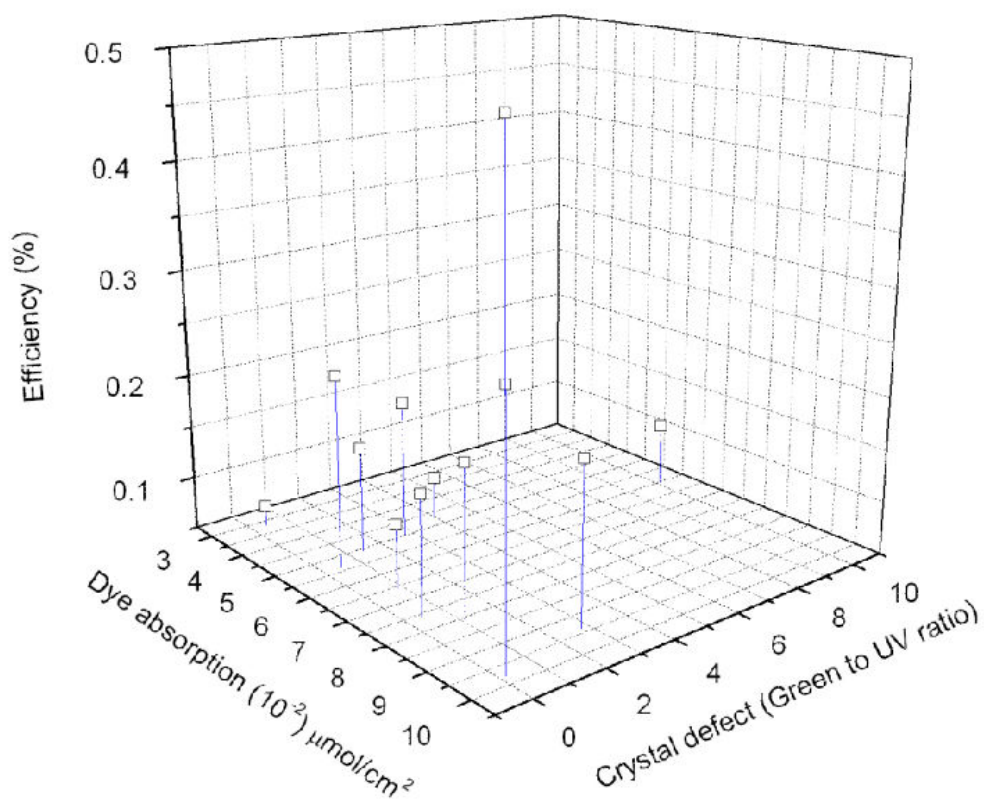
จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดจะทำให้ทราบได้ว่า ค่าประสิทธิภาพของ DSSC จะขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัวซึ่งได้แก่ ค่าความกว้างแถบพลังงาน ค่าความไม่สมมาตรของผลึก และค่าปริมาณการดูดซับสีย้อม ซึ่งสามารถพล็อตกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างแถบพลังงาน ค่าความไม่สมมาตรของผลึก และค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมได้ดังรูปที่ 4.26 4.27 และ 4.28 ดังนี้



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของค่าความกว้างแถบพลังงาน ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของอัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวี และค่าประสิทธิภาพโดยรวม



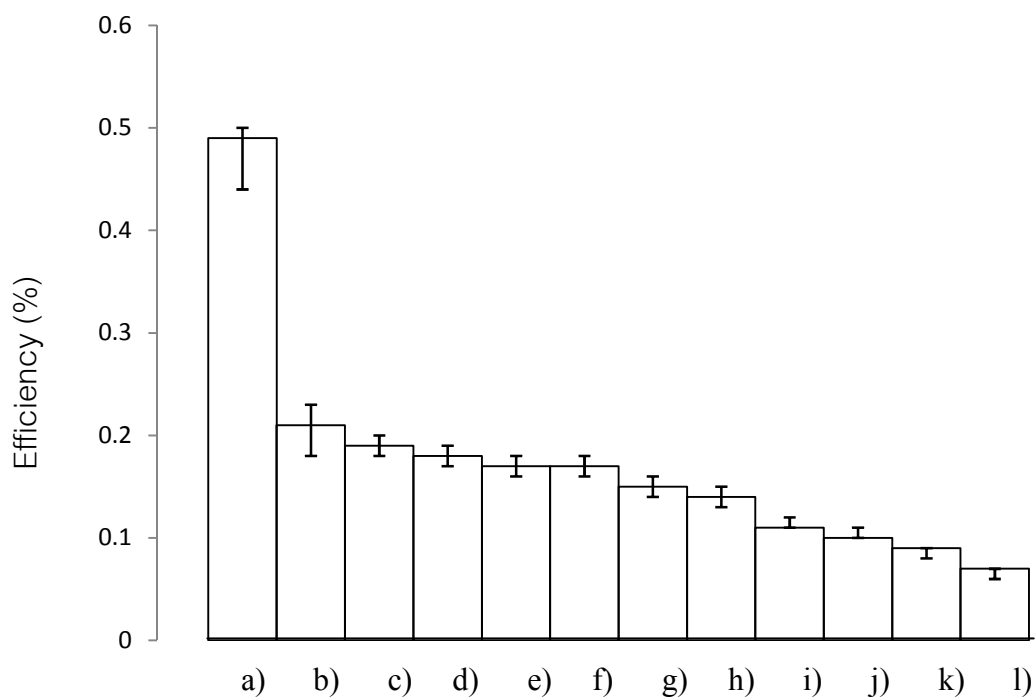
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการดูดซับสีย้อม ค่าความกว้างแถบพลังงาน และค่าประสิทธิภาพโดยรวม



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณการดูดซับสีเขียว ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของอัตราส่วนระหว่างแสงสีเขียวและรังสียูวีและค่าประสิทธิภาพโดยรวม

โดยเซลล์ DSSC ของซิงค์ออกไซด์แต่ละสัณฐานจะทำการประกอบเซลล์ 3 เซลล์ และทำการวัดค่าประสิทธิภาพโดยรวมเซลล์ละ 1 ครั้ง ซึ่งสามารถแสดงผลของกราฟแท่งที่มีผลของประสิทธิภาพโดยรวมของ DSSC ที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนด อิเล็กโทรดทั้ง 3 ค่า โดยค่าที่ประสิทธิภาพที่มากที่สุด และค่าประสิทธิภาพที่น้อยสุดในแต่ละสัณฐาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังแท่งแสดงความผิดพลาด (Error bar) ได้ดังรูปที่ 4.28 โดยเรียงลักษณะทางสัณฐานที่ได้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมมากที่สุดไปยังค่าประสิทธิภาพโดยรวมที่น้อยที่สุดได้แก่ a) ทรงกลมกลวงมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.48 เปอร์เซ็นต์ b) ทรงสี่หน้ายาวมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.21 เปอร์เซ็นต์ c) ดอกไม้แผ่นซีมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.19 เปอร์เซ็นต์ d) แท่งตันมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.18 เปอร์เซ็นต์ e) ท่อกลวงมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.17 เปอร์เซ็นต์ f) ทรงสี่หน้ายาวปานกลางมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.17 เปอร์เซ็นต์ g) ดอกไม้แท่งตัน มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.15 เปอร์เซ็นต์ h) ทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์มีค่า

ประสิทธิภาพเท่ากับ 0.14 เปอร์เซ็นต์ i) ทองกลม (Commercial) มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.11 เปอร์เซ็นต์ j) ทรงสี่หน้าขาสั้นมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.10 เปอร์เซ็นต์ k) แผ่นมีรูพูนมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.09 เปอร์เซ็นต์ และ l) ลวดมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.07 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.29 กราฟแท่งแสดงค่าประสิทธิภาพโดยรวมที่ใช้ซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดอิเล็กโทรดใน DSSC โดยทำการประกอบเซลล์สัณฐานละ 3 ตัวอย่าง a) ทองกลมกลวง b) ทรงสี่หน้าขายาว c) ดอกไม้แผ่นซีท d) แท่งตัน e) ท่อกลวง f) ทรงสี่หน้าขายาวปานกลาง g) ทองกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์ h) ดอกไม้แท่งตัน i) ทรงสี่หน้าขาสั้น j) ทองกลม (Commercial) k) แผ่นมีรูพูน l) ลวด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์ให้ได้สี่ฐานที่แตกต่างกัน และทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สี่ฐาน จากผลการวัดหาโครงสร้างเฟสของผลึกซิงค์ออกไซด์ทำให้ทราบว่า ซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สี่ฐานมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล เวิร์ทไซด์ (hexagonal wurtzite)

ผลการศึกษาลักษณะทางสี่ฐานวิทย์ด้วยกล้อง SEM ทำให้ทราบว่าซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะทางสี่ฐานที่แตกต่างกัน 12 สี่ฐาน ได้แก่ สี่ฐานทรงสี่เหลี่ยมที่มีความยาวแตกต่างกัน 3 ความยาว ทรงกลมกลวง ทรงกลมขนาดนาโนเมตร ท่อกลวง แท่งตัน ลวด ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีท ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งตัน และแผ่นมีรูพรุน โดยลักษณะทางสี่ฐานของซิงค์ออกไซด์ที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ วิธีการสังเคราะห์ สารตั้งต้นและความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ สภาพวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา ปัจจัยทั้งหลายนี้จะส่งผลให้ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะทางสี่ฐานที่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์ ทำให้ทราบว่า ซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีทั้งลักษณะที่ไม่มีรูพรุนและมีรูพรุนในระดับเมโซพอร์ โดยซิงค์ออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุดได้แก่ ซิงค์ออกไซด์สี่ฐานทรงกลมกลวง มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 36.28 ตารางเมตรต่อกรัมและมีรูพรุนในระดับเมโซพอร์

ผลการศึกษาค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ ทำให้ทราบว่า ค่าแนวโน้มความกว้างของแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้อยลง โดยซิงค์ออกไซด์ที่มีความกว้างของแถบพลังงานมากที่สุดและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคน้อยที่สุดได้แก่ สี่ฐานทรงกลมที่สั่งซื้อจากบริษัทซิกมา ออเดริช มีค่าเท่ากับ 3.24 อิเล็กตรอนโวลต์และ 50 นาโนเมตร ตามลำดับ

ผลการศึกษาค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ ทำให้ทราบว่า ค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกจะขึ้นอยู่กับวิธีในการสังเคราะห์ สารตั้งต้นและความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ สภาพวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ เช่น อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดย

ซิงค์ออกไซด์ที่มีค่าความไม่สมมาตรของผลึกของอัตราส่วนระหว่างแสงสีม่วง แสงสีเขียวและรังสียูวีมากที่สุดได้แก่ ซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน และทรงสี่หน้าขาสั้น มีค่าเท่ากับ 6.77 และ 10.12 ตามลำดับ

ผลการศึกษาค่าปริมาณการดูดซับสียอมทำให้ทราบได้ว่า ปริมาณการดูดซับสียอมของซิงค์ออกไซด์จะขึ้นอยู่กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซิงค์ออกไซด์มากที่สุด โดยสัณฐานที่มีค่าการดูดซับสียอมมากที่สุดได้แก่สัณฐาน ทรงกลมกลวง มีปริมาณการดูดซับสียอมและพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ  $9.8 \times 10^{-8}$  โมลต่อตารางเซนติเมตรและ 36.28 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ

ผลการศึกษาค่าความกว้างแถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) ค่าความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC ทำให้ทราบได้ว่า เมื่อเพิ่มค่าความกว้างแถบพลังงาน โดยทำการสมมติให้แถบวาเลนซ์มีค่าคงที่และแถบการนำมีค่าน้อยกว่าพลังงานในชั้น LUMO ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นของสียอม จะทำให้แนวโน้มของค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ค่าความต่างศักย์วงจรถัด และค่าประสิทธิภาพโดยรวมของ DSSC มีค่ามากขึ้น

ผลการศึกษาค่าความไม่สมมาตรของผลึกที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) ค่าความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC ทำให้ทราบได้ว่า ค่าความไม่สมมาตรของผลึกที่น้อยลงของแสงสีเขียวและแสงสีม่วงจะส่งผลให้แนวโน้มของค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดมีค่ามากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มของค่าความไม่สมมาตรของผลึกของแสงสีเขียวและแสงสีม่วงจะไม่มีอิทธิพลต่อค่าความต่างศักย์วงจรถัด

ผลการศึกษาค่าปริมาณการดูดซับสียอมของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ประยุกต์เป็นขั้วแอโนดที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) ค่าความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพ (Eff%) ของ DSSC ทำให้ทราบได้ว่า ปริมาณการดูดซับสียอมของซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดใน DSSC ที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แนวโน้มของค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ค่าความต่างศักย์วงจรถัด และค่าประสิทธิภาพโดยรวมของ DSSC มีค่ามากขึ้นด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าผลของค่าความกว้างแถบพลังงานที่มากขึ้น ค่าความไม่สมมาตรของผลึกที่น้อยลง และพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากขึ้น จะส่งผลให้ได้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมของ DSSC ที่มากขึ้นด้วย โดยงานวิจัยในอนาคตสามารถที่จะนำองค์ความรู้ที่ได้ไปทำการสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ใน DSSC ยกตัวอย่างเช่น



ทำการรวมกันของซิงค์ออกไซด์สองสัณฐาน (Hybrid cell) โดยผสมซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมลงในช่องว่างของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับสีย้อม ทำการผสมซิงค์ออกไซด์กับคาร์บอนนาโนทิว เพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า หรือทำการเพิ่มความหนาของซิงค์ออกไซด์ในระหว่างการขึ้นรูปเป็นขั้วอิเล็กโทรดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้น ซึ่งการประยุกต์ทั้งหลายนี้ จะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และเป็นองค์ความรู้ที่จะพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไปในอนาคต

## รายการอ้างอิง

- [1] Energy, U.S.D.o. Basic research needs for solar energy utilization in Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization. 2005.
- [2] Gratzel, M. Dye-sensitized solar cells. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 4 (2003): 145-153.
- [3] Wikipedia. Zinc oxide [online]. 2011. Available from: [http:// en.wikipedia.org /wiki/ Zinc\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide). [1 September 2011].
- [4] Wang, Z.L. Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. Journal of physics: condensed matter. 16 (2004): 829-858.
- [5] Özgür, Ü., et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices. Journal of applied physics. 98 (2005): 1-103.
- [6] YANG, L. Synthesis and characterization of ZnO nanostructures. 2010.
- [7] Li, F.M., et al. Zinc Oxide Nanostructures and High Electron Mobility Nanocomposit Thin Film Transistors. IEEE Transactions on electron devices. 55 (2008): 3001-3011.
- [8] Delaunay, J.-J., N. Kakoiyama, and I. Yamada. Fabrication of three-dimensional network of ZnO tetrapods and its response to ethanol. Materials Chemistry and Physics. 104 (2007): 141-145.
- [9] Fan, Z. and J.G. Lu. Zinc Oxide Nanostructures: Synthesis and Properties. Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 5 (2005): 1561-1573.
- [10] Baruah, S. and J. Dutta. Hydrothermal growth of ZnO nanostructures. Science and technology of advanced materials. 10 (2009): 1-18.
- [11] Charoenrat, P., S. Pavasupree, and N. Tonanon. Preparation, characterization and photovoltaic properties of nanotube titanate from low cost materials. 2010.
- [12] Baruwati, B., D.K. Kumar, and S.V. Manorama. Hydrothermal synthesis of highly crystalline ZnO nanoparticles: A competitive sensor for LPG and EtOH. Sensors and Actuators B. 119 (2006): 676–682.
- [13] Li, Q., et al. Template-free polyoxometalate-assisted synthesis for ZnO hollow spheres. Journal of Solid State Chemistry. 182 (2009): 1149-1155.

- [14] Nagaraju, G., et al. Surfactant free hydrothermally derived ZnO nanowires, nanorod, microrods and their characterization. Materials Science in Semiconductor Processing. 13 (2010): 21-28.
- [15] Li, P.G., S.L. Wang, and W.H. Tang. Low-temperature synthesis and photoluminescence of ZnO nanostructures by a facile hydrothermal process. Journal of Alloys and Compounds. 489 (2010): 566–569.
- [16] Alias, S.S., A.B. Ismail, and A.A. Mohamad. Effect of pH on ZnO nanoparticle properties synthesized by sol–gel centrifugation. Journal of Alloys and Compounds. 499 (2010): 231–237.
- [17] Zhong, Q., et al. Preparation and characterization of ZnO porous plates. Materials Letter. 2 (2008): 188-190.
- [18] Li, B. and Y. Wang. Facile Synthesis and Enhanced Photocatalytic Performance of Flower-like ZnO Hierarchical Microstructures. The Journal of Physical Chemistry C. 2 (2009): 890-896.
- [19] Djuris, A.B., A.M.C.Ng, and X.Y.Chen. ZnO nanostructures for optoelectronics : Material properties and device applications. Progress in Quantum Electronics. 34 (2010): 191–259.
- [20] Wikipedia. Dye-sensitized solar cell [online]. 2011. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized\\_solar\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell). [1 September 2011]
- [21] Wei, D. Dye Sensitized Solar Cells. International Journal of Molecular Sciences. 11 (2010): 1103-1113.
- [22] Lenzmann, F.O. and J.M. Kroon. Recent Advances in Dye-Sensitized Solar Cells. Advances in OptoElectronics. (2007): 1-10.
- [23] Zhang, Q., et al. ZnO Nanostructures for Dye-Sensitized Solar Cells. Advance Materials. 21 (2009): 4087–4108.
- [24] LMGP. ZnO nanostructures based dye sensitive solar cells. 2010.
- [25] Thavasi, V., et al. Controlled electron injection and transport at materials interfaces in dye sensitized solar cells. Materials Science and Engineering. 63 (2009): 81–99.
- [26] Zhang, Q. and G. Cao. Nanostructured photoelectrodes for dye-sensitized solar cells. Nano Today. 6 (2010): 91—109.

- [27] KMUTT. หลักสูตรการฝึกอบรมเทคนิคการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำหรับประชาชนทั่วไป [online]. 2009. Available from: <http://www.are101.org/forum/index.php?PHPSESSID=454b6b3354cff0a8cb65f3314f6b54f2&topic=2277.msg11871#msg11871>. [1 September 2011]
- [28] Elkhidir Suliman, A., Y. Tang, and L. Xu. Preparation of ZnO nanoparticles and nanosheets and their application to dye-sensitized solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells. 91 (2007): 1658-1662.
- [29] Choopun, S., et al. Zinc oxide nanostructures for applications as ethanol sensors and dye-sensitized solar cells. Applied Surface Science. 256 (2009): 998-1002.
- [30] Liu, Z., et al. Preparation of ZnO nanoparticles and characteristics of dye-sensitized solar cells based on nanoparticles film. Solid State Sciences. 12 (2010): 111-114.
- [31] Pradhan, B., S.K. Batabyal, and A.J. Pal. Vertically aligned ZnO nanowire arrays in Rose Bengal-based dye-sensitized solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells. 91 (2007) 769-773.
- [32] Suh, D.I., et al. The fabrication and characterization of dye-sensitized solar cells with a branched structure of ZnO nanowires. Chemical Physics Letters. 442 (2007): 348-353.
- [33] Tung-Te, C., et al. Grain size effect of nanocrystalline ZnO on characteristics of dye-sensitized solar cells. Microelectron. J. 40 (2009): 50-52.
- [34] Umar, A., et al. Rapid synthesis and dye-sensitized solar cell applications of hexagonal-shaped ZnO nanorods. Electrochimica Acta. 54 (2009): 5358-5362.
- [35] Hossain, M.F., T. Takahashi, and S. Biswas. Nanorods and nanolipsticks structured ZnO photoelectrode for dye-sensitized solar cells. Electrochemistry Communications. 11 (2009): 1756-1759.
- [36] Baxter, J.B. and E.S. Aydil. Dye-sensitized solar cells based on semiconductor morphologies with ZnO nanowires. Solar Energy Materials & Solar Cells. 90 (2006): 607-622.
- [37] Wang, C., et al. Solution synthesis of ZnO nanotubes via a template-free hydrothermal route. Solid State Communications. 141 (2007): 620-623.

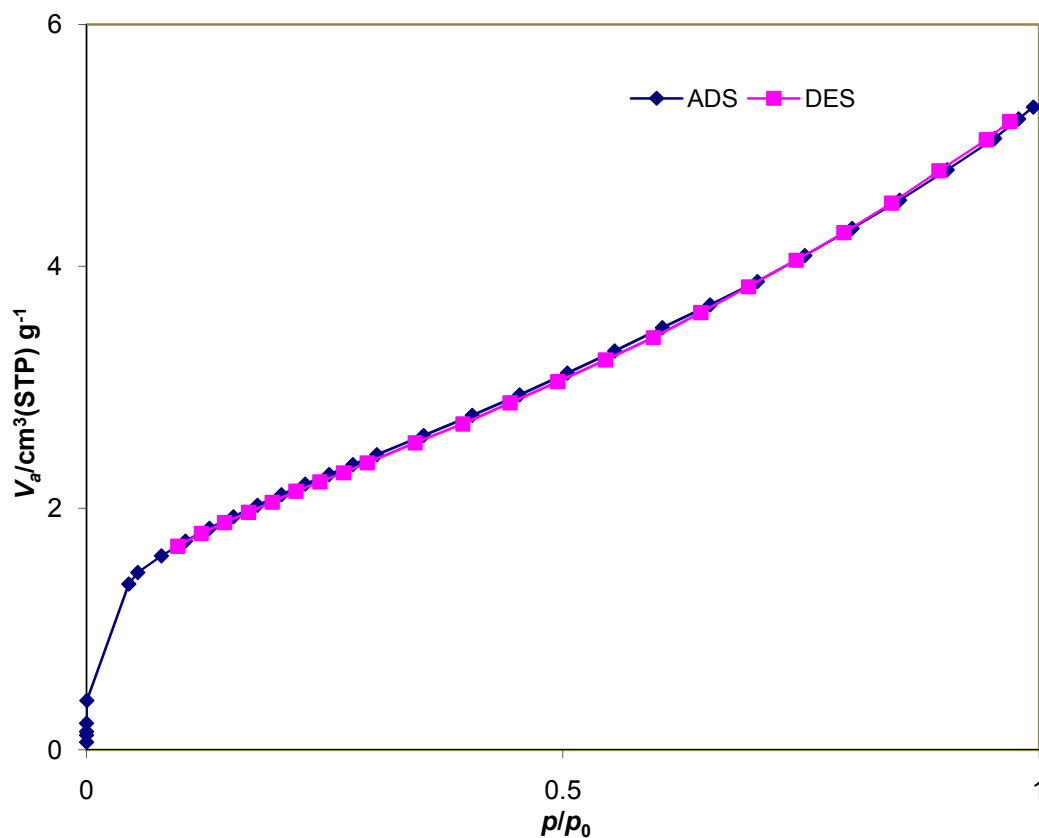
- [38] Li, B. and Y. Wang. Facile Synthesis and Enhanced Photocatalytic Performance of Flower-like ZnO Hierarchical Microstructures. J. Phys. Chem. C. 114 (2010): 890–896.
- [39] Charnhattakorn, B., et al. Synthesis of Zinc Oxide nanoparticles via pulsed thermal oxidation process. 2010.
- [40] Kakiuchi, K., M. Saito, and S. Fujihara. Fabrication of ZnO films consisting of densely accumulated mesoporous nanosheets and their dye-sensitized solar cell performance. Thin Solid Films. 516 (2008): 2026-2030.
- [41] GÜMÜS, C., et al. Structural and optical properties of zinc oxide thin films prepared by spray pyrolysis method. Journal of optoelectronics and advanced materials. 8 (2006): 299 - 303.
- [42] Suwanboon, S., S. Chukamnerd, and U. Anglong. Morphological control and optical properties of nanocrystalline ZnO powder from precipitation method. Songklanakarin J. Sci. Technol. 29 (2007): 1563-1570.
- [43] A.Sakthivelu et al. Structural, morphological and optical studies of molarity based ZnO thin films. Journal of Ovonic Research. 7 (2011): 1-7.
- [44] Fu-Chun, Z., et al. First-principles study of the electronic and optical properties of ZnO nanowires. Chinese Physics B. 18 (2009): 2508-2516.
- [45] Zhua, Y.F. and W.Z.Shena. Synthesis of ZnO compound nanostructures via a chemical route for photovoltaic applications. AppliedSurfaceScience. 2010.
- [46] Gupta, J., K.C. Barick, and D. Bahadur. Defect mediated photocatalytic activity in shape-controlled ZnO nanostructures. Journal of Alloys and Compounds. 509 (2011): 6725–6730.
- [47] Xu, F., et al. Hierarchical ZnO Nanowire-Nanosheet Architectures for High Power Conversion Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells. J. Phys. Chem. C. 114 (2010): 2776–2782.
- [48] Baxter, J.B. and E.S. Aydil. Dye-sensitized solar cells based on semiconductor morphologies with ZnO nanowires. Solar Energy Materials and Solar Cells. 90 (2006): 607-622.

- [49] Bandara, J. and H.C. Weerasinghe. Enhancement of photovoltage of dye-sensitized solid-state solar cells by introducing high-band-gap oxide layers. Solar Energy Materials & Solar Cells. 88 (2005): 341-350.

ภาคผนวก

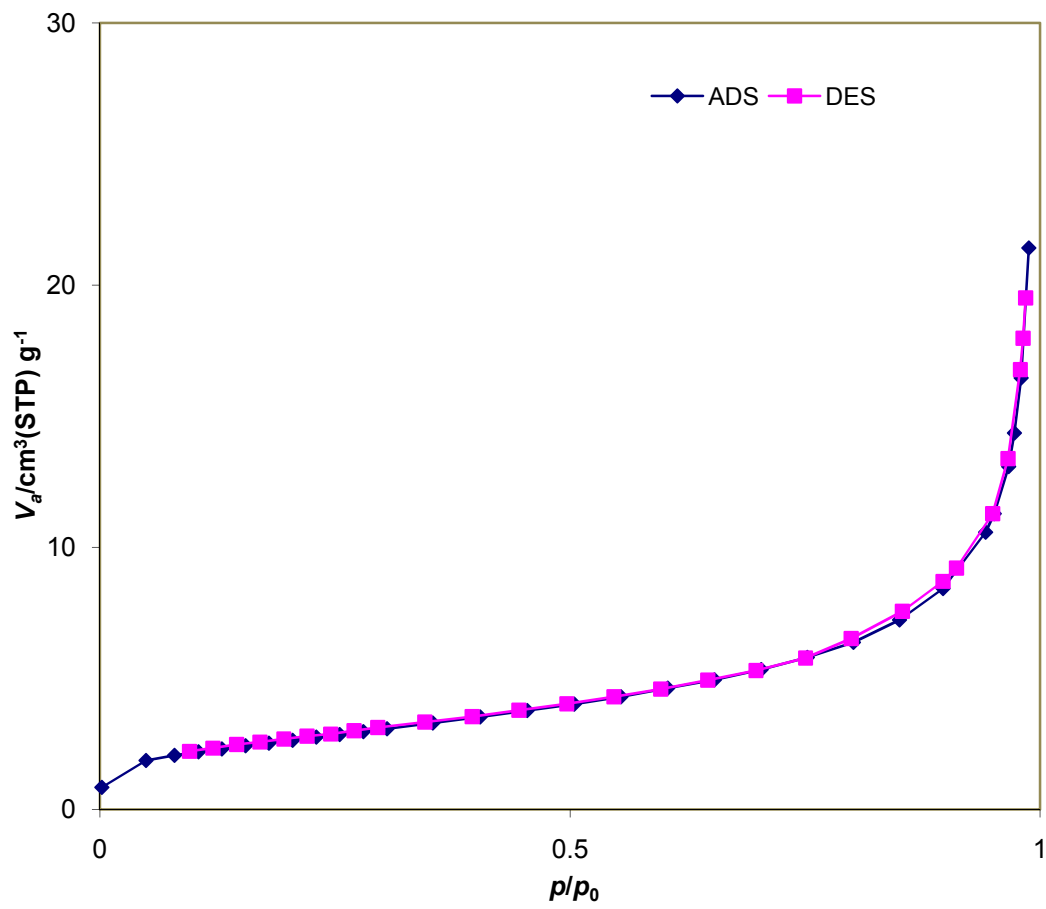
### ภาคผนวก ก

กราฟวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจน( $N_2$  adsorption-desorption measurement)

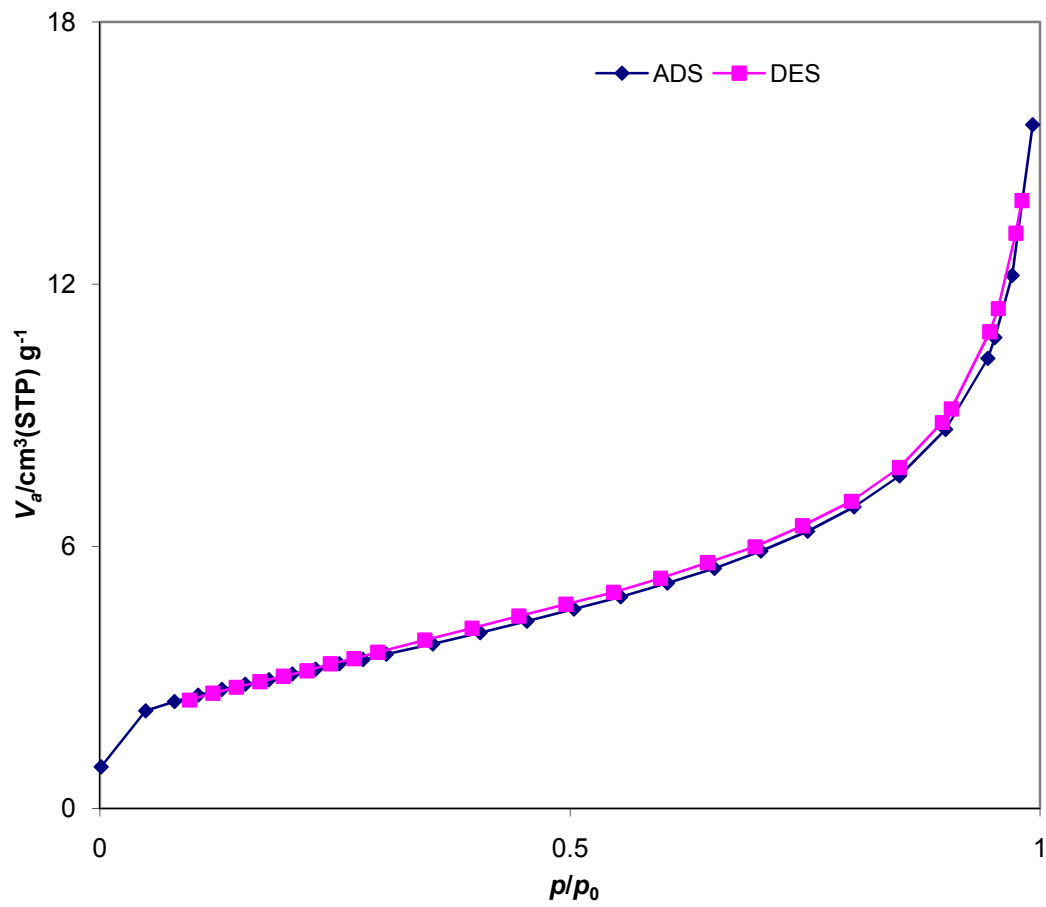


รูปที่ ก-1 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สังเคราะห์ที่หน้าขาสินสังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสแก๊ส

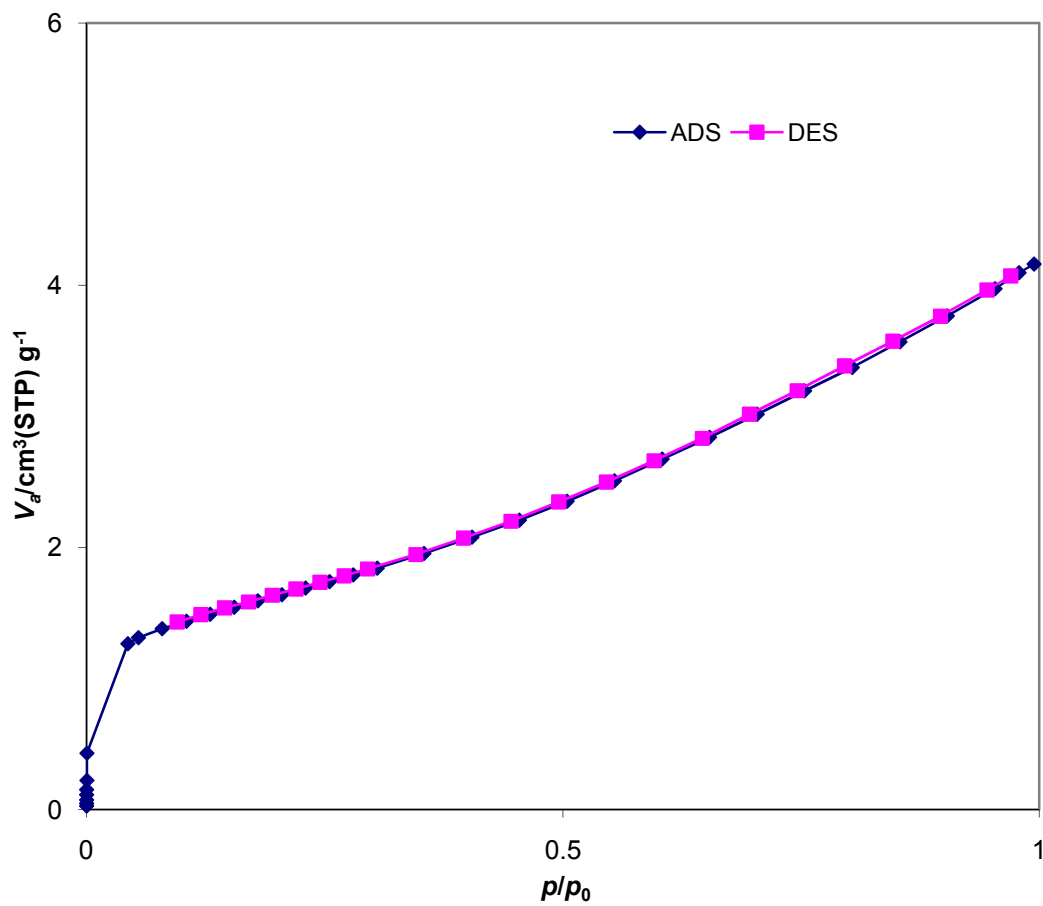




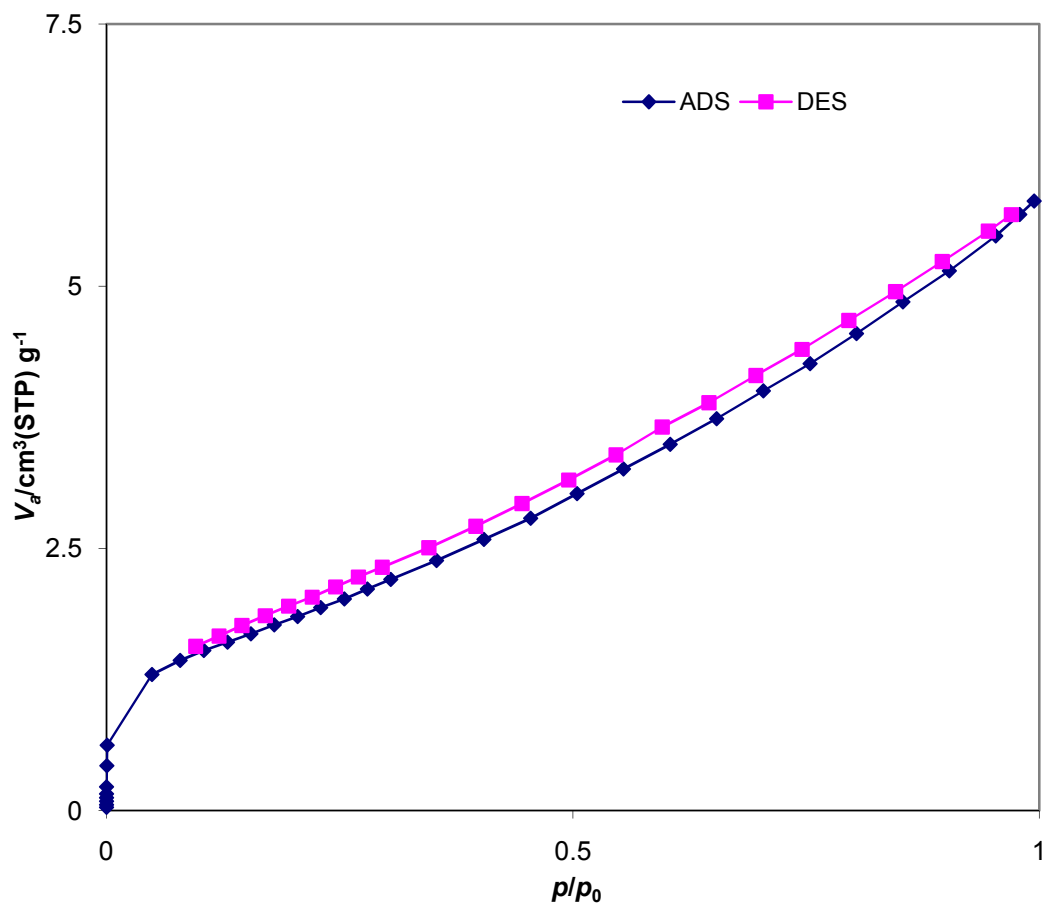
รูปที่ ก-2 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้าขาวปานกลาง สังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสแก๊ส



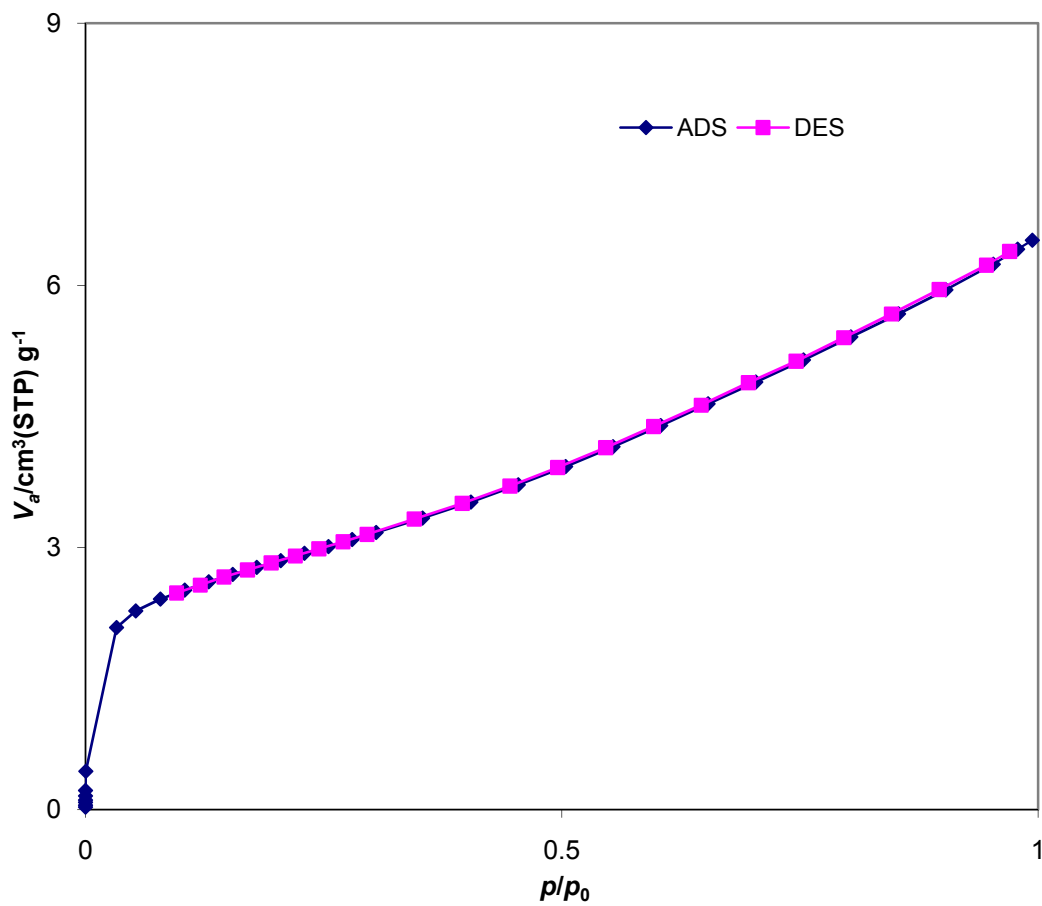
รูปที่ ก-3 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้าขาว สังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสแก๊ส



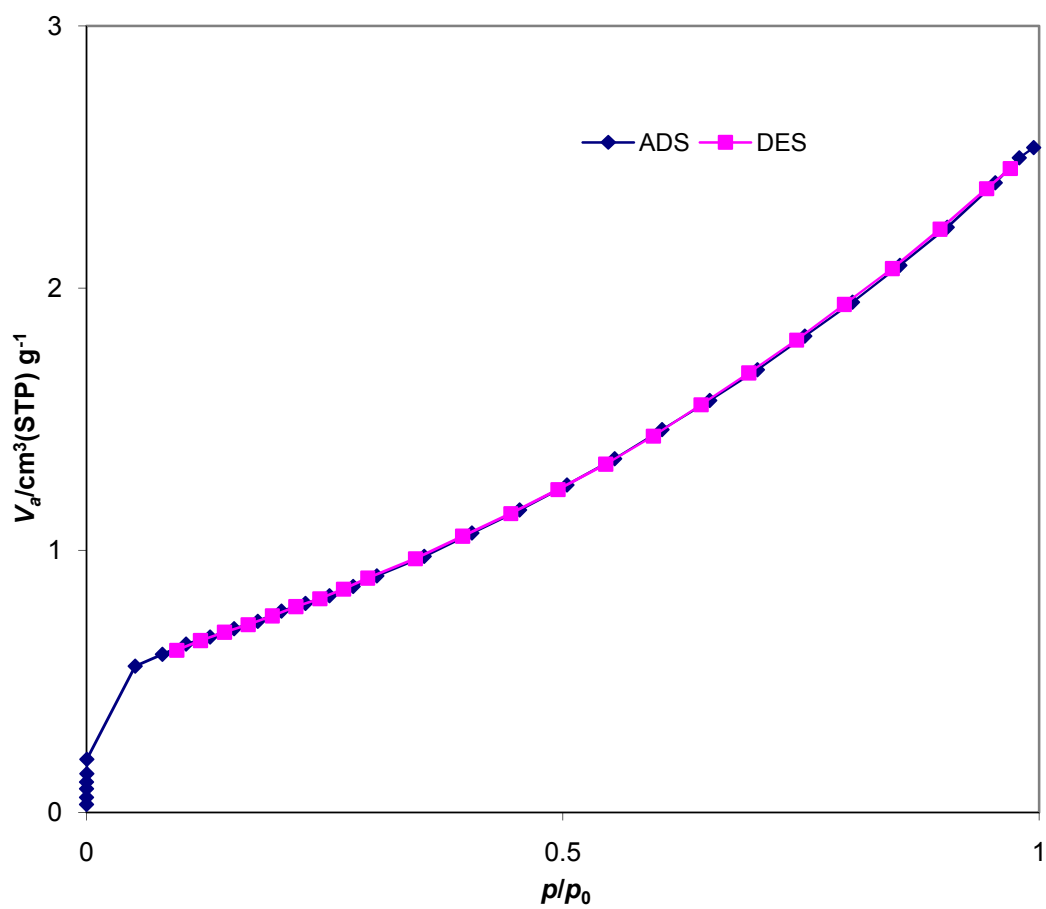
รูปที่ ก-4 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานท่อกลวงสังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสของเหลว



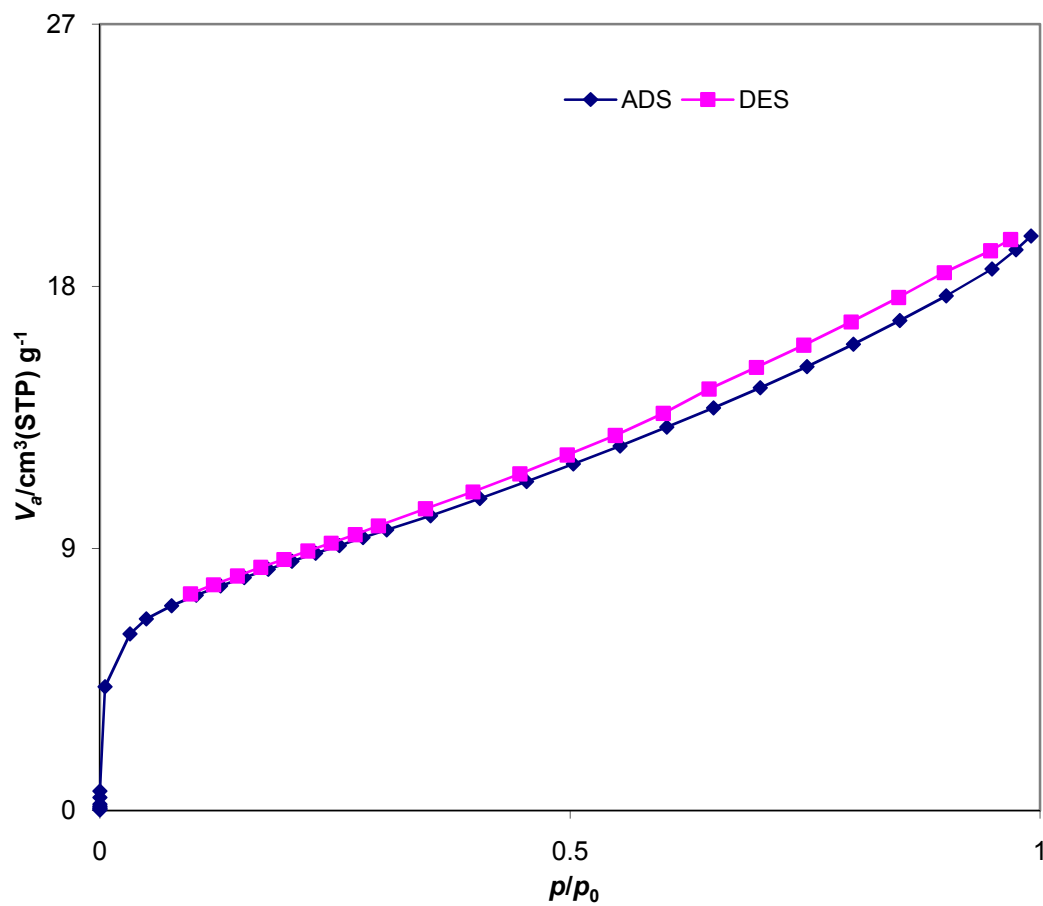
รูปที่ ก-5 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัญญาณแท่งต้น  
สังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสของเหลว



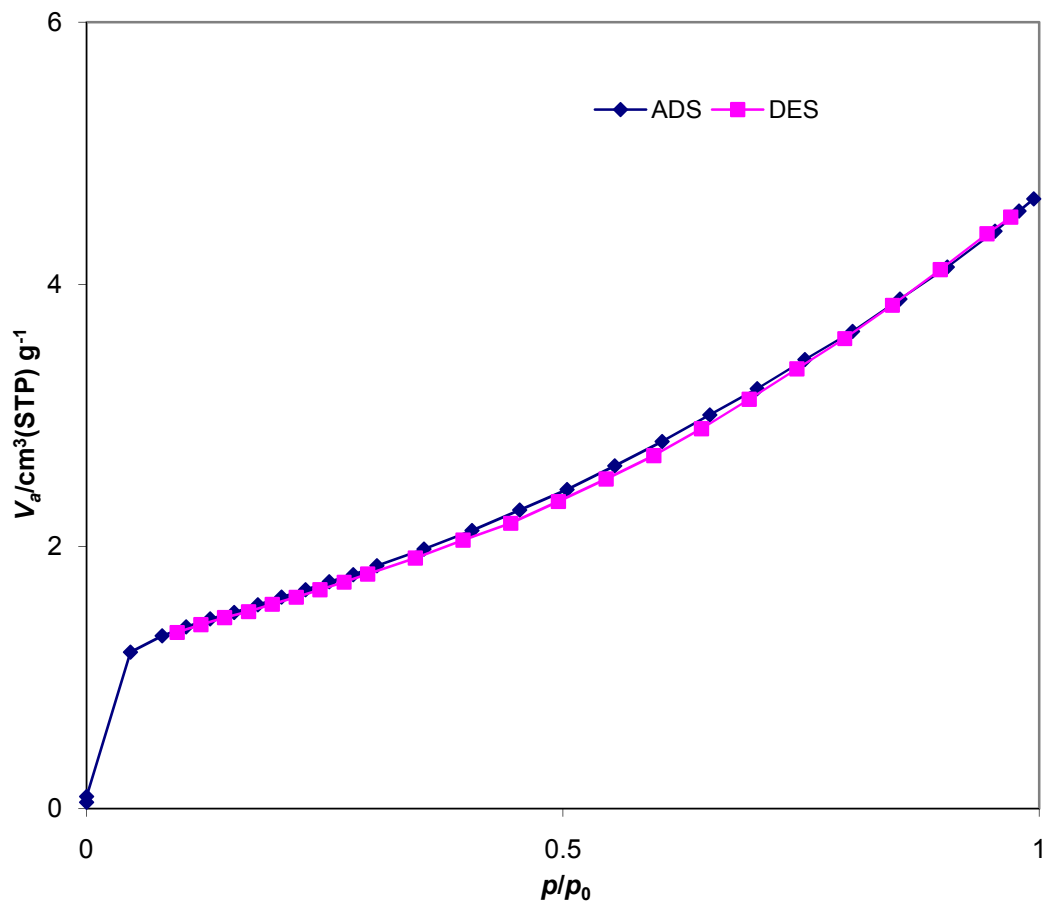
รูปที่ ก-6 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่ซื้อ  
มาจากบริษัท ซิกมา ออลดริช (Sigma Aldrich)



รูปที่ ก-7 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุนสังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสของเหลว

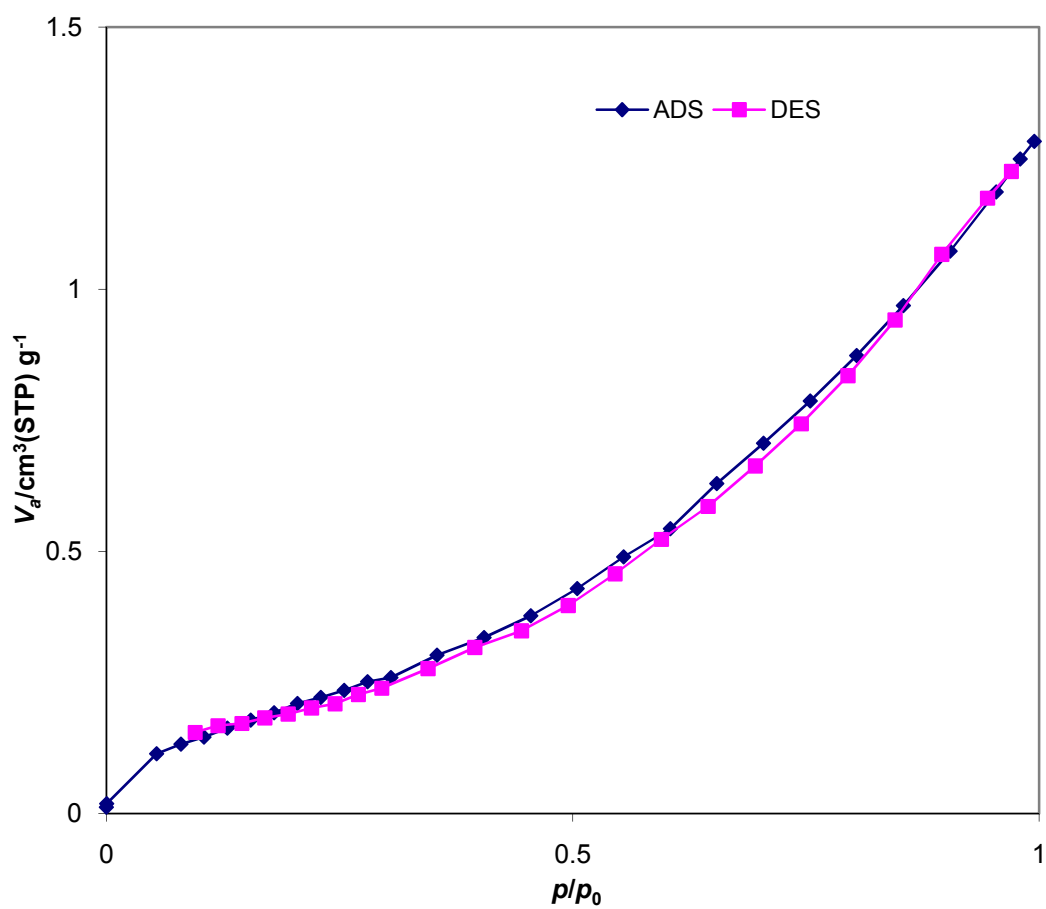


รูปที่ ก-8 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม  
กลวง สังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสของเหลว

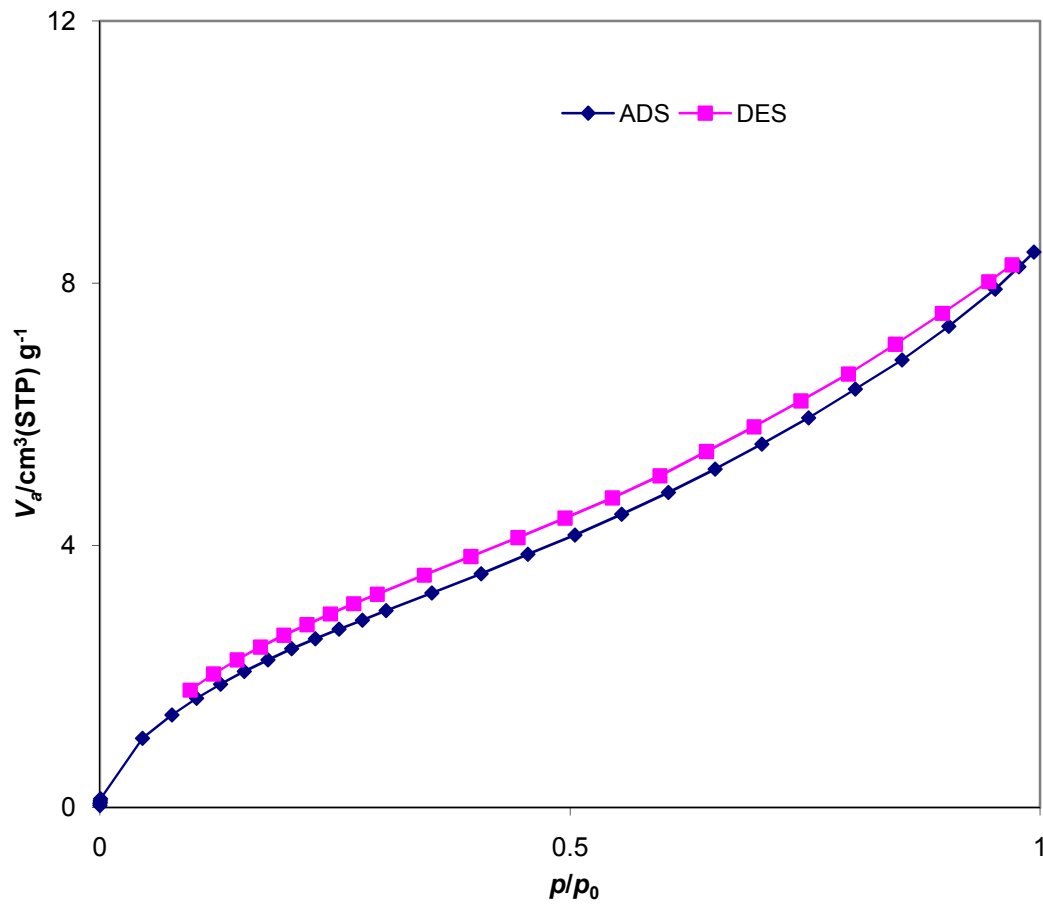


รูปที่ ก-9 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมตัวของแท่งตัน สังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสของเหลว

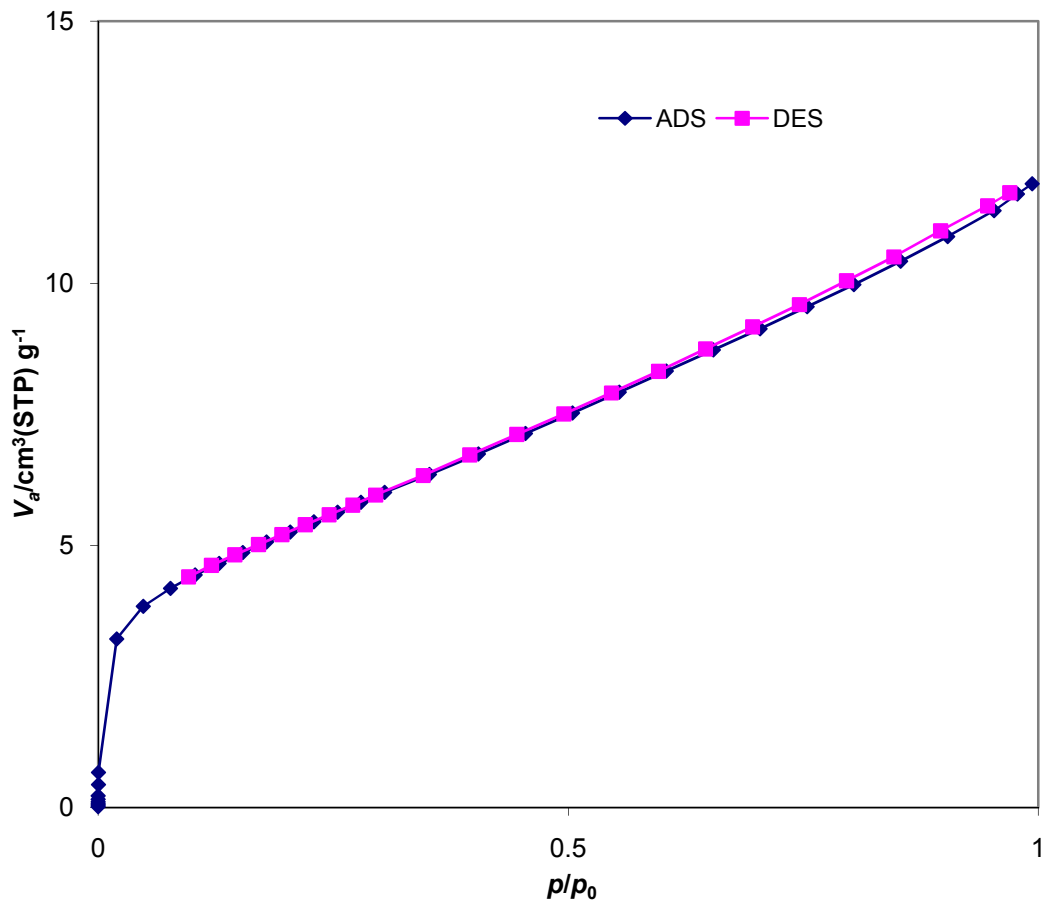




รูปที่ ก-10 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานลวด  
สังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสของเหลว



รูปที่ ก-11 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุนสังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสของเหลว



รูปที่ ก-12 รูปแบบกราฟการดูดซับคายซับของแก๊สไนโตรเจนของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมสังเคราะห์ด้วยวิธีเฟสของเหลว

## ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณหาค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน สามารถคำนวณได้จากค่ากราฟการสะท้อน (Reflectance) และสมการของ Kubelka-Munk เริ่มต้นการคำนวณโดยนำค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนที่ได้จากกราฟค่าการสะท้อน มาแทนลงในสมการที่ ข-1) เพื่อหาค่า Kubelka-Munk function หรือ  $(F(R_{\infty}))$

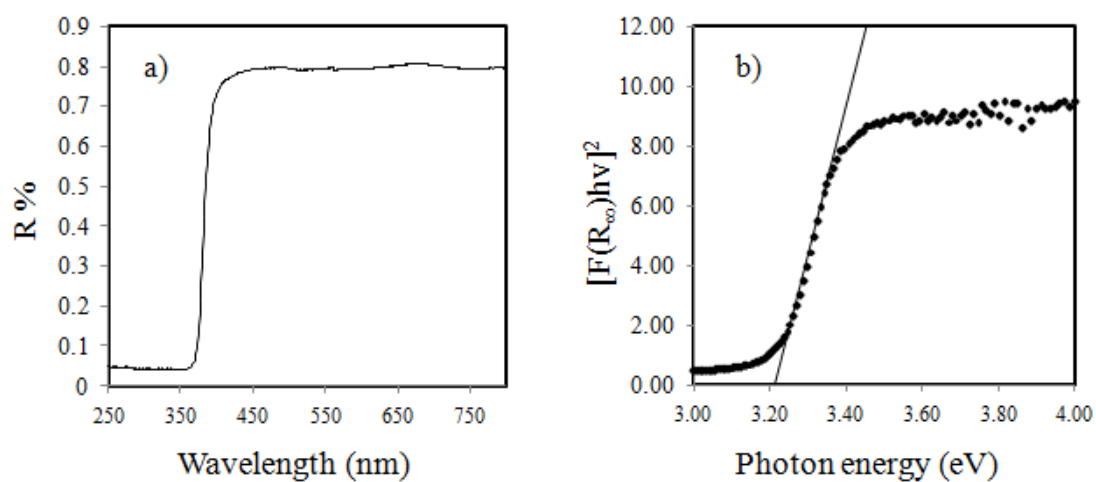
$$F(R_{\infty}) = \frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} \quad \text{ข-1)}$$

จากนั้น นำค่า  $(F(R_{\infty}))$  ที่ได้มาแทนลงในฝั่งซ้ายในสมการที่ 2

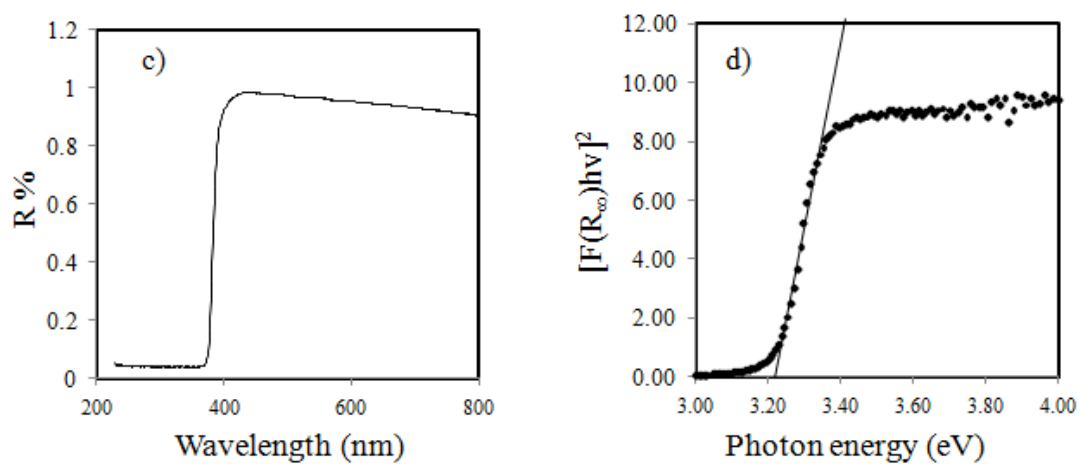
$$[F(R_{\infty})hv]^2 = C'(hv - E_g) \quad \text{ข-2)}$$

พล็อตค่าที่ได้จากฝั่งซ้ายในสมการที่ 2 (แกน y) กับค่าพลังงานโฟตอน (แกน x) และลากเส้นตามความชันของกราฟตัดกราฟโฟตอนที่แกน x จะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานงานดังแสดงได้ดังรูปที่ ข

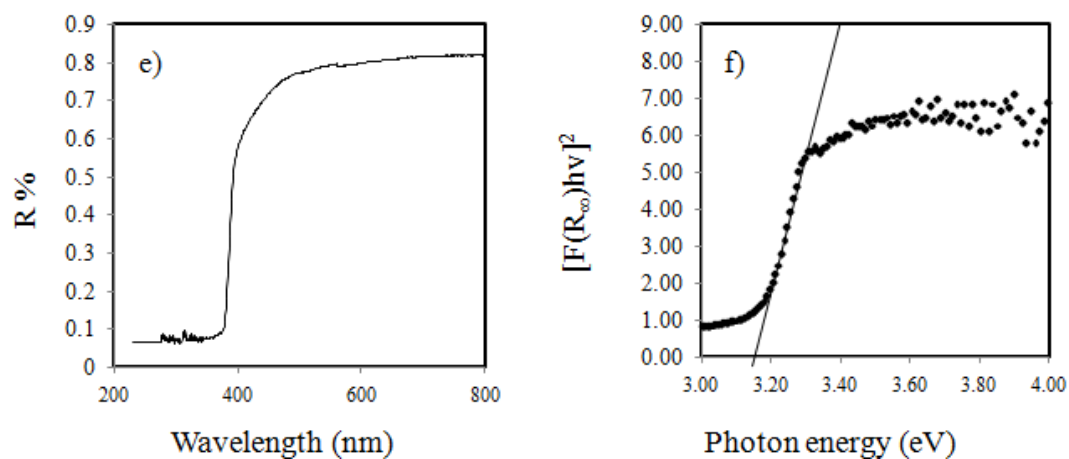
กราฟค่าการสะท้อน (Reflectance) และกราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน



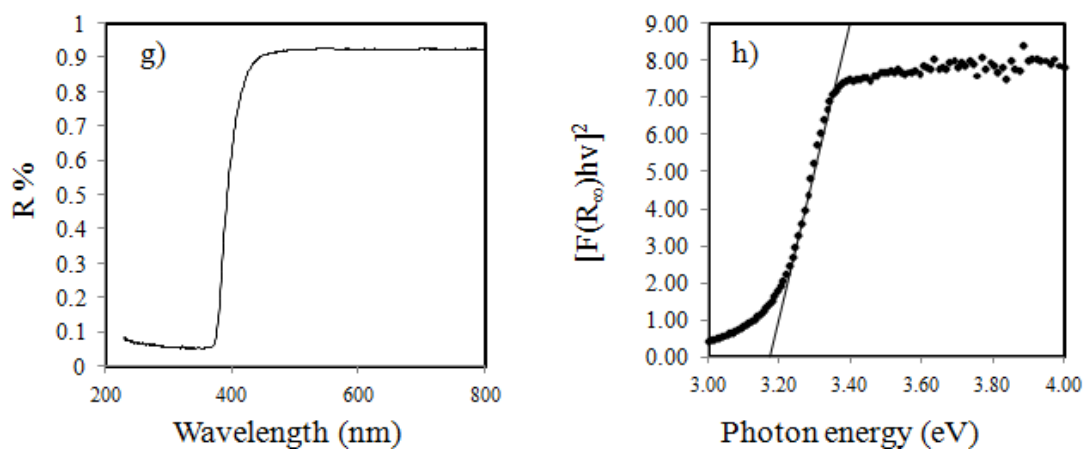
รูปที่ ข-1 a) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ b) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแผ่นซีที



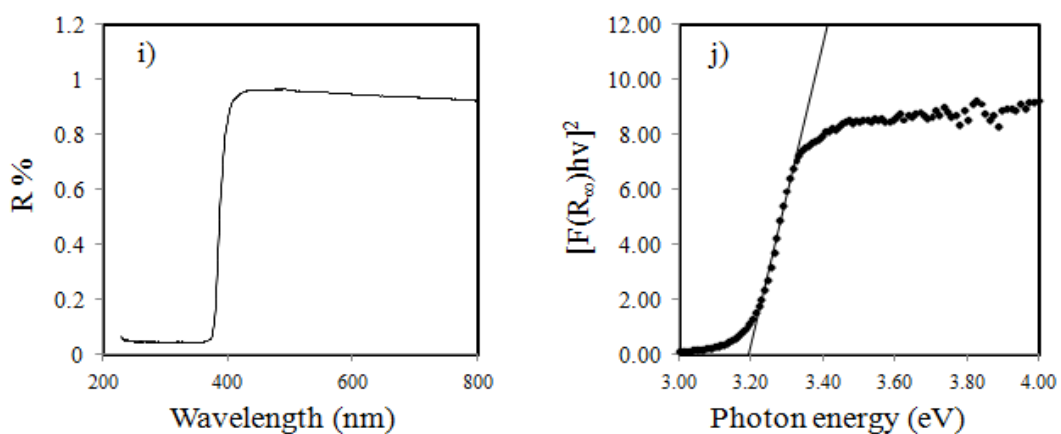
รูปที่ ข-2 c) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ d) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลม (Commercial)



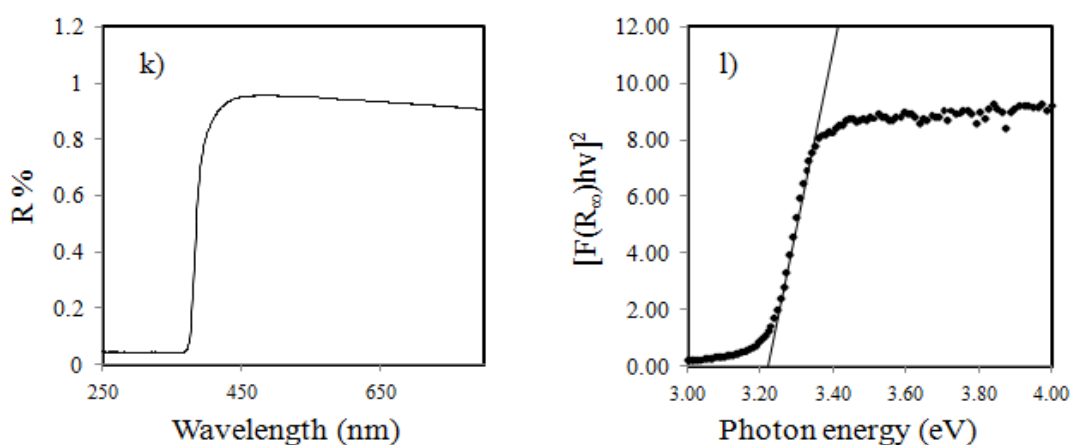
รูปที่ ข-3 e) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ f) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานลวด



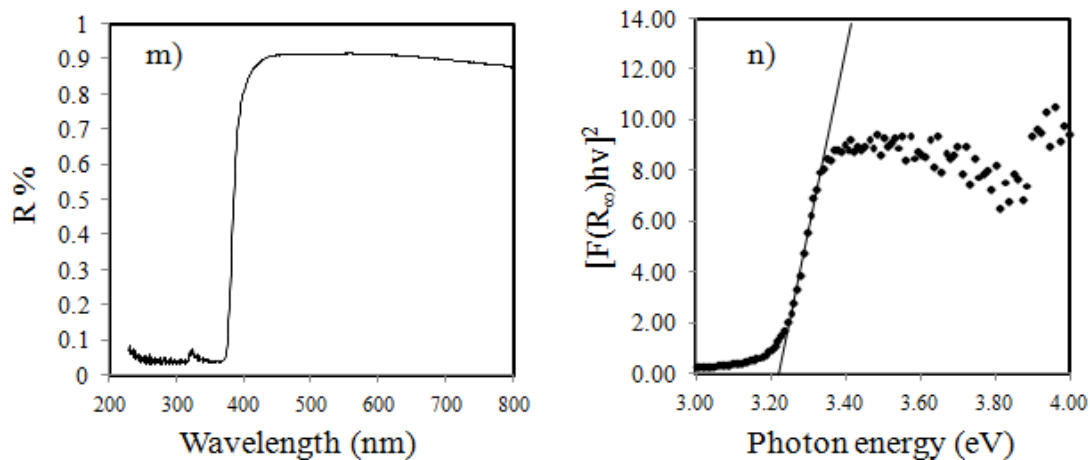
รูปที่ ข-4 g) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ h) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งต้น



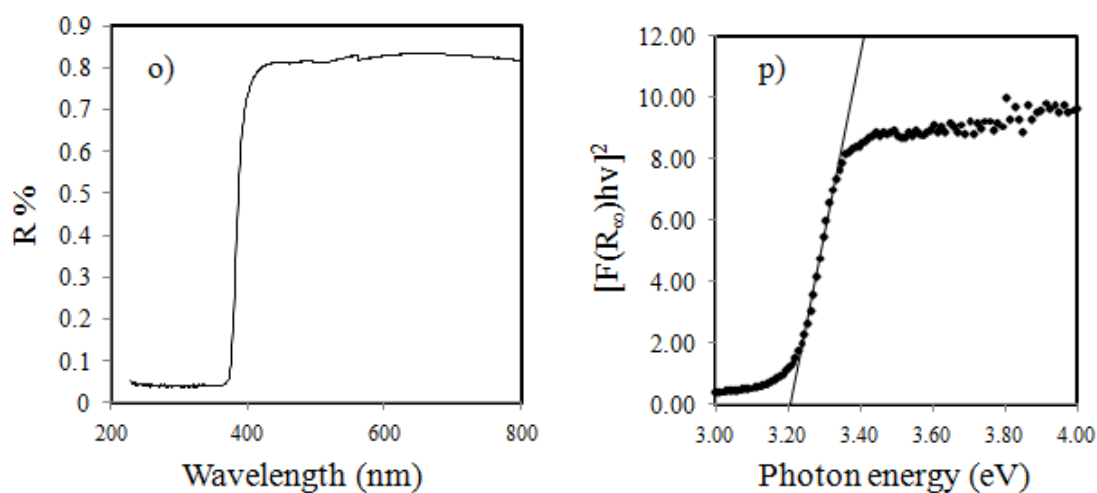
รูปที่ ข-5 i) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ j) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานแท่งตัน



รูปที่ ข-6 k) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ l) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทรงสี่หน้าชาลัน

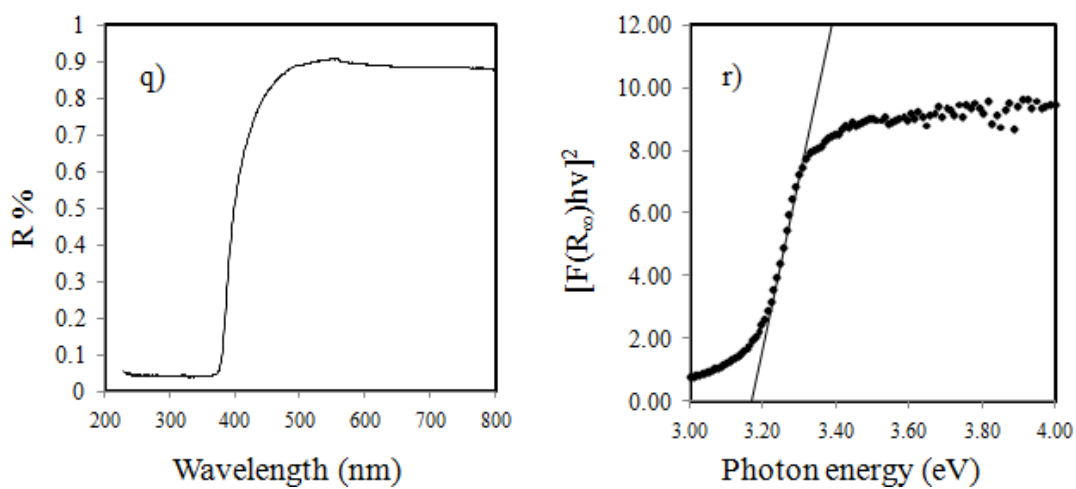


รูปที่ ๗-7 m) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ n) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทรงสี่หน้ายาวปานกลาง

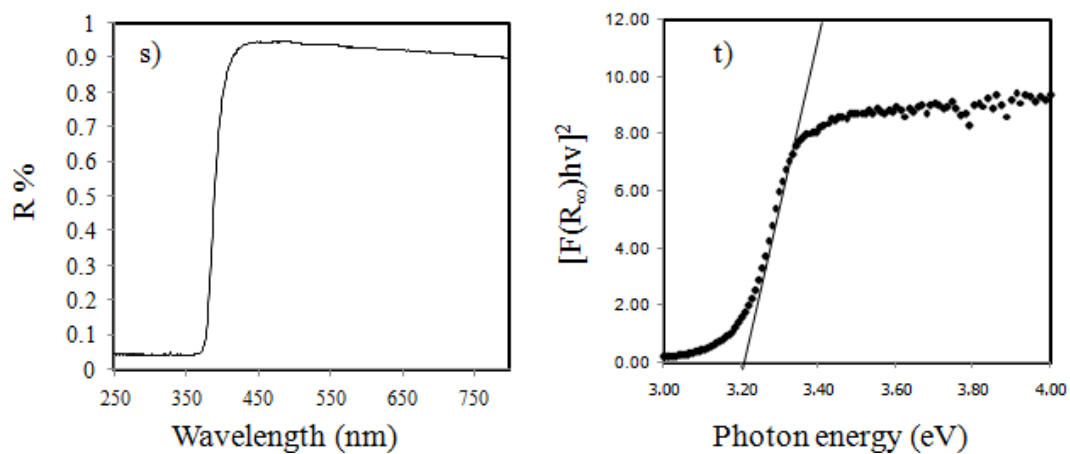


รูปที่ ๗-8 o) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ p) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทรงสี่หน้ายาว

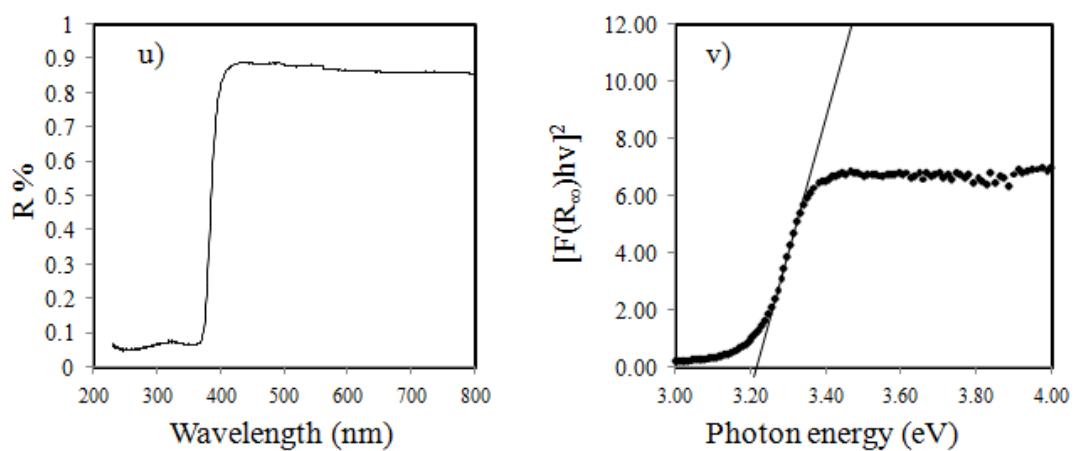




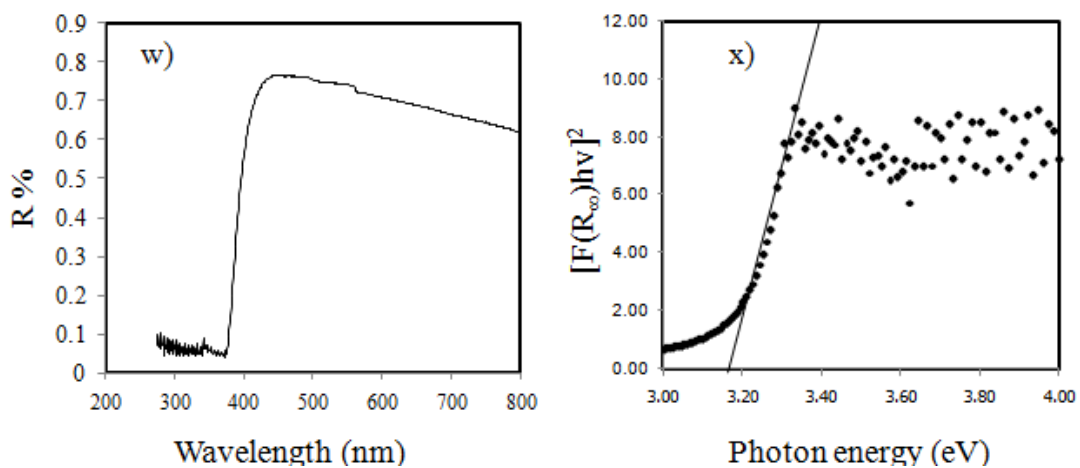
รูปที่ ข-9 q) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ r) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานแผ่นมีรูพรุน



รูปที่ ข-10 s) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ t) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานท่อกลวง



รูปที่ ข-11 u) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ v) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทรงกลมกลวง



รูปที่ ข-12 w) กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อน และ x) กราฟพล็อตแสดงค่าความกว้างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์

### ภาคผนวก ค

วิธีการหาขนาดของผลึก (Crystallite size) สามารถหาได้จากความกว้างของกราฟ XRD และสูตรของ เซอร์เรอร์ (Sherrer formula) โดยขนาดของผลึกที่คำนวณได้จะต้องมีขนาดที่น้อยกว่า 100 นาโนเมตร เริ่มแรกการคำนวณขนาดของผลึกคำนวณได้จากการหา ความกว้างที่มากที่สุดระหว่างจุดกึ่งกลางของพีคที่สูงที่สุด (Full width at Half Maximum, FWHM (In radian)) จากกราฟ XRD หลังจากนั้น ตามสูตรของเซอร์เรอร์ สามารถคำนวณขนาดของผลึกได้จากสมการที่ ค-1)

$$g = \frac{0.94\lambda}{\Delta(2\theta)\cos\theta} \quad \text{ค-1)}$$

โดยที่  $g$  คือ ขนาดของผลึกที่คำนวณได้ในหน่วยอังสตรอม

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์เรย์ มีค่าเท่ากับ 1.54056 อังสตรอม

$\Delta(2\theta)$  คือ ความกว้างที่มากที่สุดระหว่างจุดกึ่งกลางของพีคที่สูงที่สุด

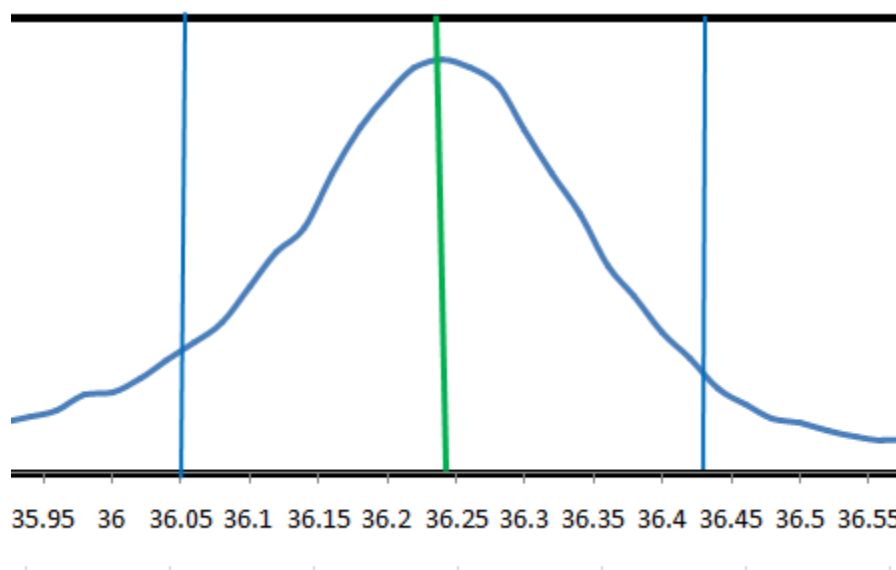
$\theta$  คือ มุมในการเลี้ยวเบนของ Bragg

สำหรับตัวอย่างในการคำนวณขนาดของผลึกของซิงค์ออกไซด์สัณฐานสี่หน้าข้างต้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ ค-1 โดยค่า  $\Delta(2\theta)$  คือค่าความกว้างที่มากที่สุดระหว่างจุดกึ่งกลางของพีคที่สูงที่สุดในมุมแบบเรเดียน (In radian) มีค่าเท่ากับ

$$\Delta(2\theta) = (36.43 - 36.05) \times \frac{\pi}{180}$$

$$\Delta(2\theta) = 6.63225 \times 10^{-3} \text{ เรเดียน}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการเซอร์เรอร์ (สมการ ค-1)) จะได้ค่าขนาดของผลึกดังนี้



รูปที่ ค-1 แสดงกราฟ XRD ที่ใช้ในการคำนวณขนาดของผลึกของซิงค์ออกไซด์ทรงสี่หน้า  
 ฟ้าสั้น

$$g = \frac{0.94\lambda}{4(2\theta)\cos\theta}$$

$$g = \frac{0.94 \times 1.54056}{6.63225 \times 10^{-3} \cos 36.24}$$

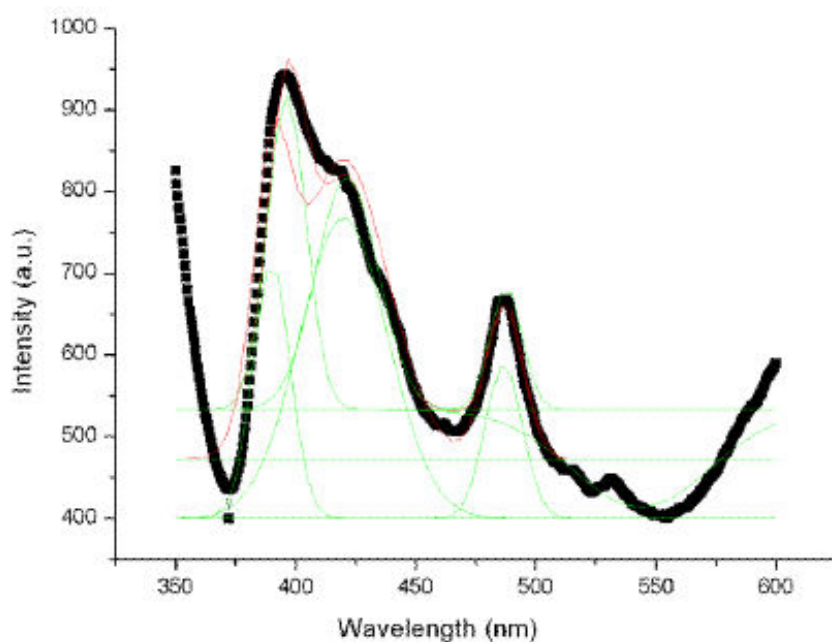
$$g = 270 \text{ อังสตรอม}$$

$$g = 27 \text{ นาโนเมตร}$$

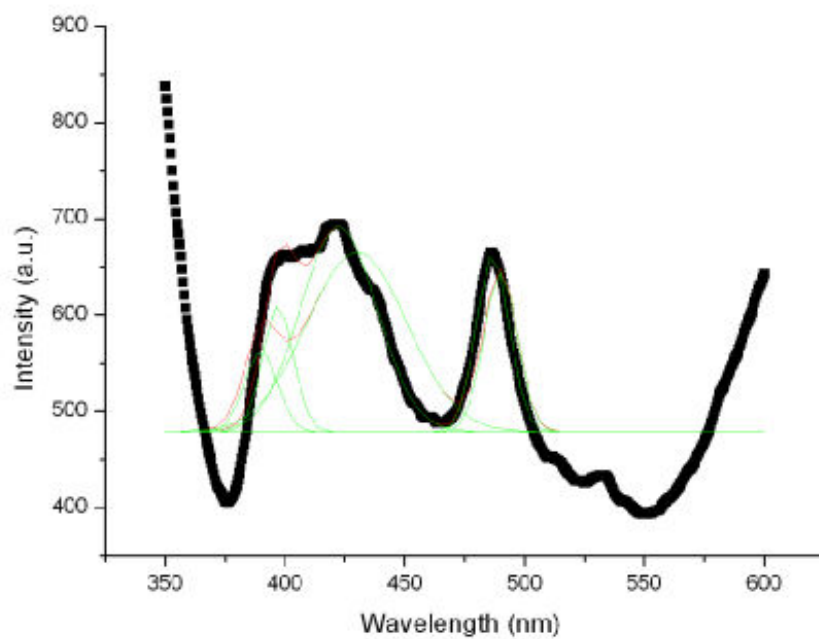
จะสามารถคำนวณหาขนาดของผลึกของซิงค์ออกไซด์สี่หน้าทรงสี่หน้าฟ้าสั้นได้เท่ากับ  
 27 นาโนเมตร

## ภาคผนวก ง

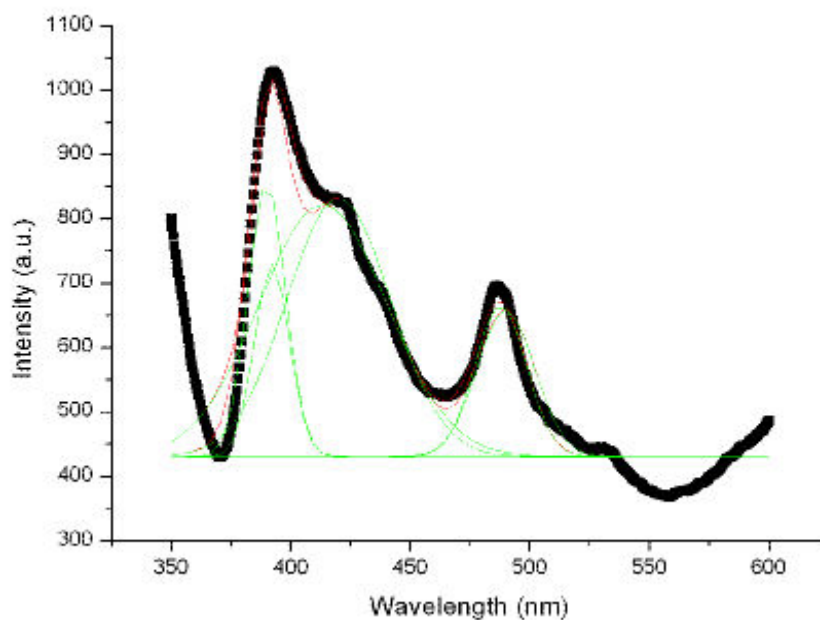
กราฟวิเคราะห์หาความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานโดยอาศัยอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้พีคของแสงสีเขียว (ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร) และพื้นที่ใต้พีคแสงสีม่วง (ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร) หาด้วยพื้นที่ใต้พีคในช่วงการปลดปล่อยรังสียูวี (ความยาวคลื่น 390 นาโนเมตร) โดยอาศัยวิธีการพล็อตกราฟแบบเกาส์เซียน (Gaussian fitting) ด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 ซึ่งสามารถแสดงกราฟการพล็อตหาความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 ได้ดังรูปที่ ค



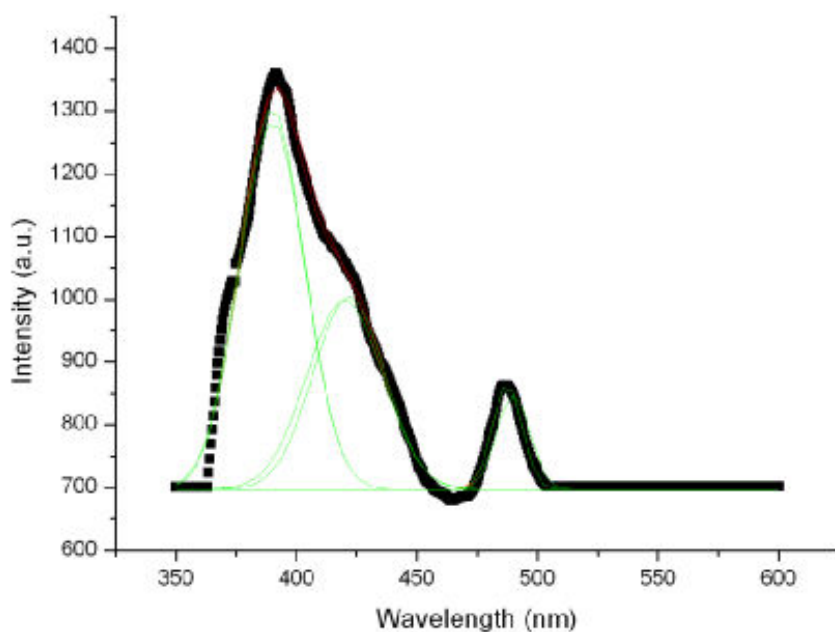
รูปที่ ค-1 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแท่งตัน



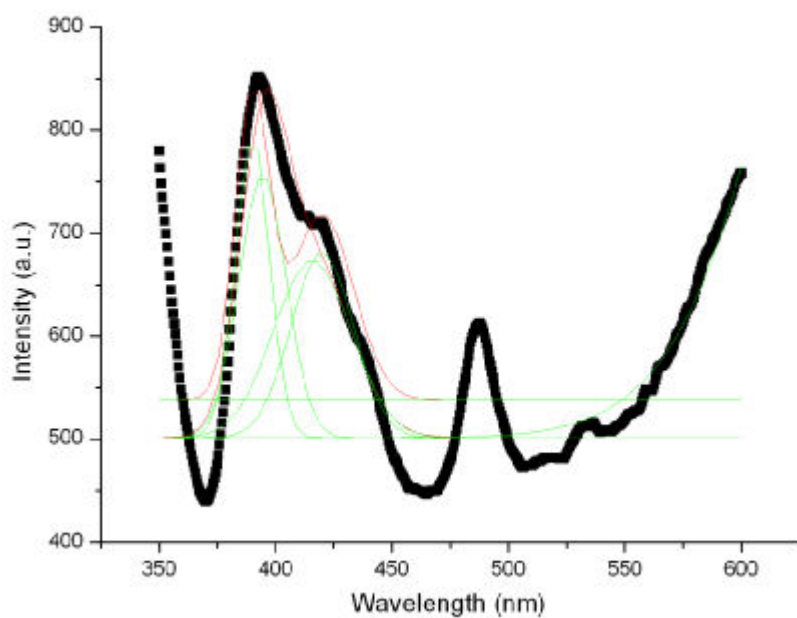
รูปที่ ค-2 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์สัณฐานแผ่นมีรูพรุน



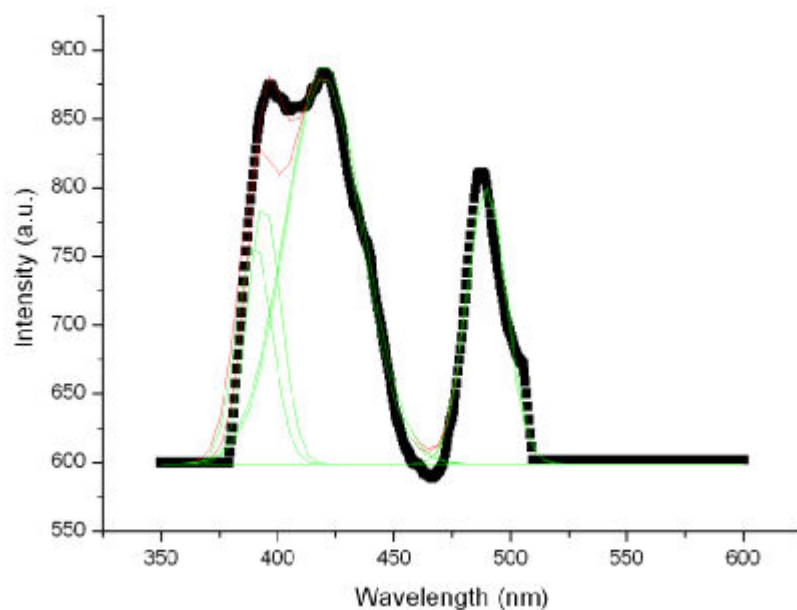
รูปที่ ค-3 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงกลมที่ซื้อมาจากบริษัทซิกมา ออดริช



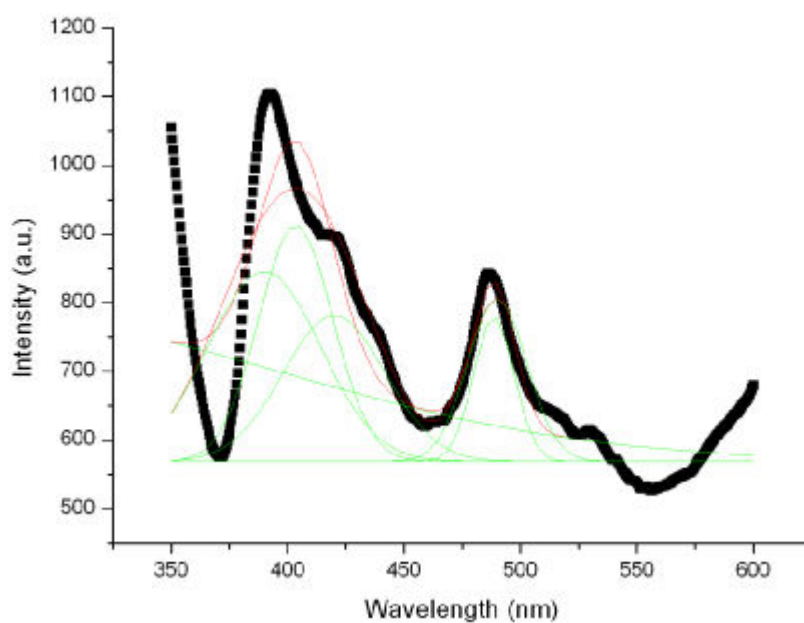
รูปที่ ค-4 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทรงกลมกลวง



รูปที่ ค-5 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานดอกไม้ที่เกิดจากการซ้อนกันของแผ่นซีท

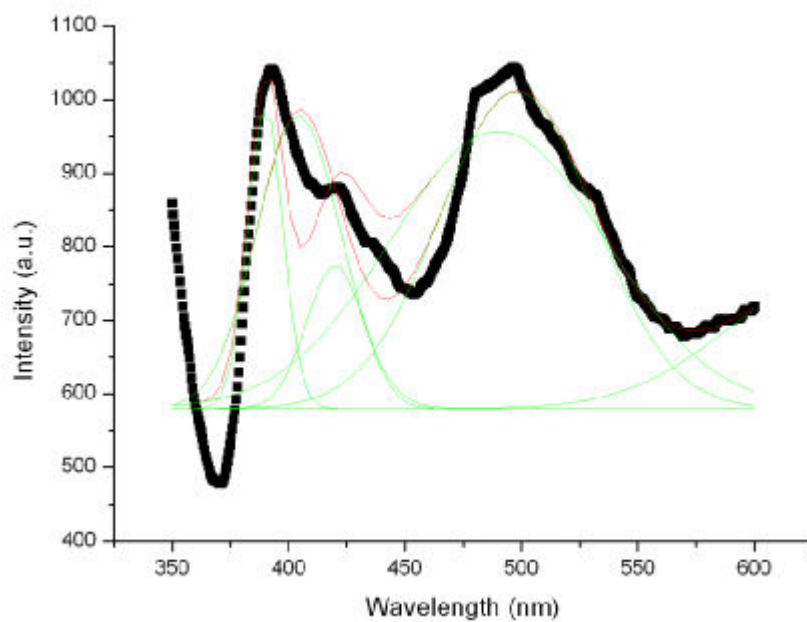


รูปที่ ค-6 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์สัณฐานดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกันของแท่งตัน

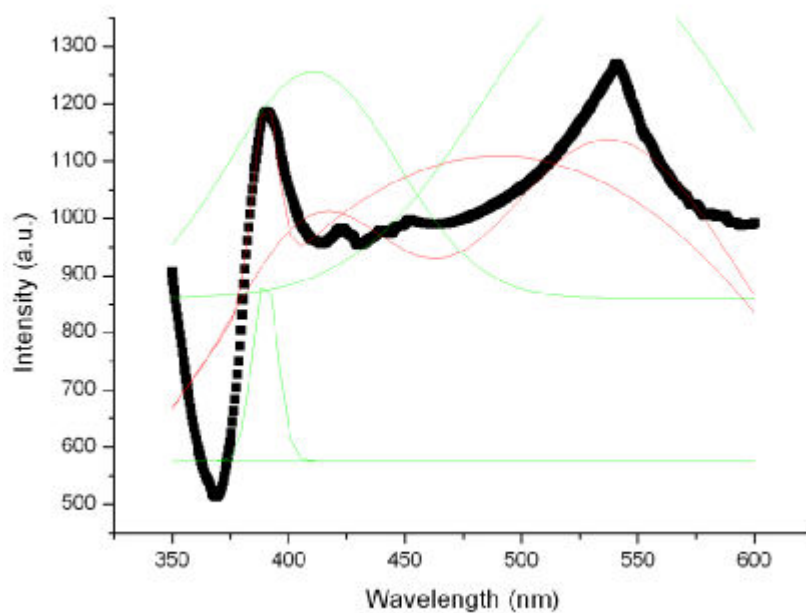


รูปที่ ค-7 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์สัณฐานทรงสี่หน้าขาว

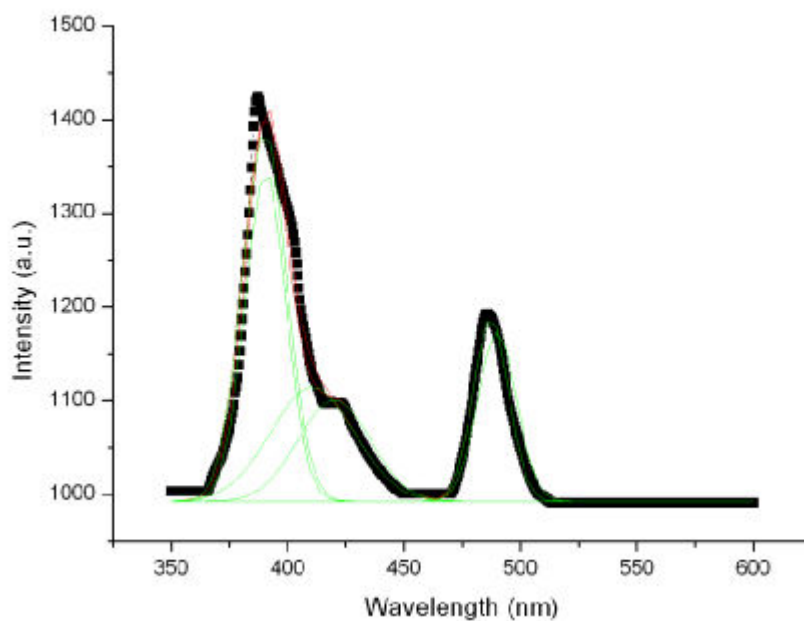




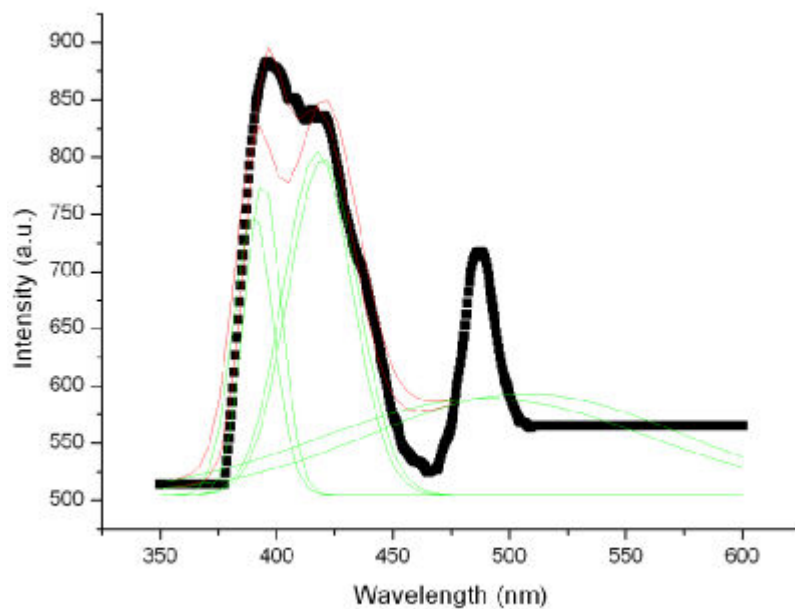
รูปที่ ค-8 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทรงสี่หน้ายาวปานกลาง



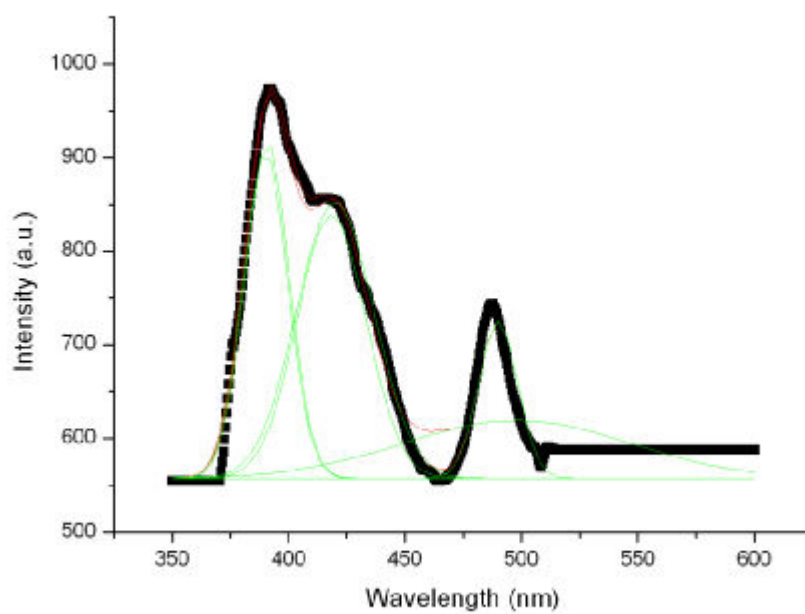
รูปที่ ค-9 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตรของผลึกของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทรงสี่หน้าขนาดเล็ก



รูปที่ ค-10 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตร  
ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานลวด



รูปที่ ค-11 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมมาตร  
ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทอกลวง



รูปที่ ค-12 แสดงกราฟการพล็อตด้วยโปรแกรม Origin Ver.7 เพื่อคำนวณหาค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึกของซิงค์ออกไซด์ชั้นฐานทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์

## ภาคผนวก จ

วิธีการหาปริมาณการดูดซับสีของที่ติดอยู่บนซิงค์ออกไซด์ที่ประยุกต์ใช้เป็นหัวอิเล็กโทรด  
หาได้โดยเริ่มต้น ทำการเตรียมน้ำล้าง 0.1 M NaOH + Ethanol (อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร)

NaOH ปริมาณ 1 โมล มี NaOH	40	กรัม
NaOH ปริมาณ 0.1 โมล จะมี NaOH	4	กรัม
สารละลาย NaOH ในน้ำกลั่น ปริมาตร 1000 โมล มี NaOH	4	กรัม
สารละลาย NaOH ในน้ำกลั่น ปริมาตร 50 โมล มี NaOH	0.4	กรัม

และทำการปรับปริมาตรโดยการเติม Ethanol 50 ml จะได้สารละลาย 0.1 M NaOH + Ethanol  
(อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร) ปริมาตร 100 ml ที่ใช้เป็นน้ำล้าง

หาปริมาณสารละลายสีของมูนิเนียมโดยเริ่มต้น ซึ่งสีของปริมาณ 0.001 กรัม และหา  
ความเข้มข้นของสารละลายสีของได้จากมวลโมเลกุลสีของ (1188.55 กรัมต่อโมล)

$$\text{โมล} = \text{กรัม} / \text{มวลโมเลกุล}$$

$$\text{โมล} = 1 \text{ มิลลิกรัม} / 1188.55 \text{ กรัมต่อโมล}$$

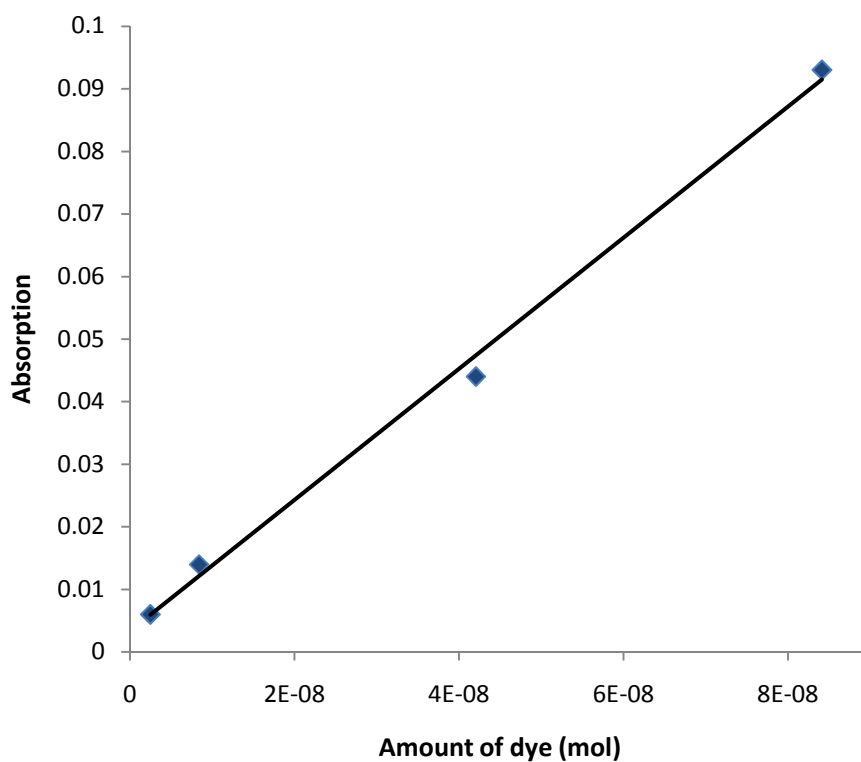
$$\text{โมล} = 8.414 \times 10^{-7} \text{ โมล}$$

ในสารละลายสีของ 1,000 ml จะมีปริมาณสีของ  $8.414 \times 10^{-8}$  โมล

นำสารละลายสีของความเข้มข้น  $8.414 \times 10^{-8}$  M ปริมาณ 10 ml มาทำการเจือจาง  
สารละลายสีของเพื่อหาเส้นโค้งคาลิเบรชัน (Calibration curve) โดยใช้สมการ  $C_1V_1 = C_2V_2$   
ได้ผลดังตารางที่ ง-1 จากนั้นนำสารละลายสีของที่เจือจางแล้วแต่ละความเข้มข้นไปวัดด้วยเครื่อง  
UV-Visible spectroscopy เพื่อหาปริมาณของสีของดังแสดงได้ดังรูปที่ ง-1

ตารางที่ ง-1 ตารางแสดงค่าปริมาณสีย้อม (โมล) และปริมาณสารละลายสีย้อม

ปริมาณสารละลายสีย้อม (ml)	ปริมาณสีย้อม (โมล)
10	$8.414 \times 10^{-8}$
5	$4.207 \times 10^{-8}$
1	$8.414 \times 10^{-9}$
0.3	$2.524 \times 10^{-9}$



รูปที่ ง-1 กราฟเส้นโค้งคาลิเบรชัน (Calibration curve) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับแสงในสารละลายสีย้อมในแต่ละความเข้มข้นและปริมาณสีย้อม

จากรูปที่ ง-1 ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับแสงในสารละลายสีย้อมในแต่ละความเข้มข้นและปริมาณสีย้อมซึ่งไปดังสมการที่ ง-1)

$$Y = (X - 0.003) / (1 \times 10^6)$$

ง-1)

โดยค่า X จะแสดงถึงปริมาณการดูดซับแสงของสารละลายสีย้อมที่ติดอยู่บนข้าวโอ๊ตของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน และค่า Y จะแสดงถึงปริมาณสีย้อมที่ได้จากข้าวโอ๊ตของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ ง-2

ตารางที่ ง-2 ตารางแสดงสัณฐาน ปริมาณการดูดซับแสง และปริมาณสีย้อมของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐาน

สัณฐาน	ปริมาณการดูดซับแสง	ปริมาณสีย้อม (ไมลต่อตารางเซนติเมตร)
ทรงกลมกลวง	0.101	$9.8 \times 10^{-8}$
ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมกัน ของแผ่นซีท	0.097	$9.4 \times 10^{-8}$
แท่งตัน	0.084	$8.1 \times 10^{-8}$
ทรงกลมที่เกิดจากการ สังเคราะห์	0.079	$7.6 \times 10^{-8}$
ทรงกลม(commercial)	0.069	$6.6 \times 10^{-8}$
ทรงสี่หน้าขาสั้น	0.063	$6.0 \times 10^{-8}$
ทรงสี่หน้าขายาว	0.057	$5.4 \times 10^{-8}$
ทรงสี่หน้าขายาวปานกลาง	0.056	$5.3 \times 10^{-8}$
ดอกไม้ที่เกิดจากแท่งตัน	0.054	$5.1 \times 10^{-8}$
ท่อกลวง	0.053	$5.0 \times 10^{-8}$
แผ่นมีรูพรุน	0.050	$4.7 \times 10^{-8}$
ลวด	0.035	$3.2 \times 10^{-8}$

### ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ-1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) ความต่างศักย์วงจรถัด ( $V_{oc}$ ) และค่าประสิทธิภาพโดยรวม (Eff%) ของซิงค์ออกไซด์ทั้ง 12 สัณฐานที่ประยุกต์ใช้ใน DSSC

ลักษณะทางสัณฐาน	ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้า			
	( $J_{sc}$ , mA/cm <sup>2</sup> )	( $V_{oc}$ , V)	(FF)	(Eff%)
ทรงกลมกลวง	1.20	0.69	0.59	0.49
ทรงสี่หน้าขาว	1.30	0.63	0.28	0.23
ดอกไม้ที่เกิดจากการรวมของแผ่นซีท	1.12	0.67	0.27	0.20
แท่งตัน	1.22	0.60	0.27	0.19
ท่อกลวง	1.04	0.58	0.30	0.18
ทรงสี่หน้าขาวปานกลาง	1.27	0.60	0.24	0.18
ทรงกลมที่เกิดจากการสังเคราะห์	0.60	0.67	0.41	0.16
ดอกไม้ที่เกิดจากการแท่งตัน	0.77	0.57	0.35	0.15
ทรงสี่หน้าขาวสั้น	0.94	0.56	0.20	0.11
ทรงกลม (commercial)	0.78	0.56	0.24	0.11
แผ่นมีรูพรุน	0.33	0.55	0.48	0.09
ลวด	0.19	0.56	0.69	0.07

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิกรม ศรีสุรگانต์ เกิดวันที่ 16 พฤศจิกายน 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนเล็กของนายพงษ์วิรัตน์ ศรีสุรگانต์ และนางกรรณิการ์ ศรีสุรگانต์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2551 จากนั้นเข้าศึกษาต่อระดับโทในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2554 ในหัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง การเตรียมขั้วอิเล็กโทรดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวงจรวางแสง โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ที่มีสัณฐานที่แตกต่างกัน