



การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม



โดย
นางสาวแสงเทียน แนนสนิท

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์ซึ่งก่ออวกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

CHARACTERIZATION OF Pd-DOPED ZnO SENSOR FILMS



By
Miss Sangtian Nabsanit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การหาลักษณะเฉพาะ
ของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ” เสนอโดย นางสาวแสงเทียน แนบสนิท เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.มนตรี เอี่ยมพนากิจ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.โชคชัย พุทธิรักษา)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์)

...../...../.....



57306210 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์/แพลเลเดียม/เฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส/การศึกษาลักษณะเฉพาะ
แสงเทียน แบบสไนท : การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย
แพลเลเดียม. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์. 72 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิงก์-
ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ คือ 0.25, 0.50,
0.75 และ 1.0 mol% ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (Flame spray
pyrolysis; FSP) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ ในการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคทาง
สัณฐานวิทยา เฟสของผลึกและขนาดของอนุภาค ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และ
เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) อีกทั้งได้ใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
(AFM) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ
ของฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากเทคนิคสปินโคตติง (spin coating) จากการศึกษาพบว่า อนุภาค
ซิงก์ออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม มีขนาดอยู่ระหว่าง 8 ถึง 34 นาโนเมตร แบบหกเหลี่ยม มี
ขนาดอยู่ระหว่าง 7 ถึง 37 นาโนเมตร และยังพบอนุภาคซิงก์ออกไซด์แบบแท่ง มีความกว้างและ
ความยาวอยู่ในช่วง 10 ถึง 31 นาโนเมตร และ 20 ถึง 66 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า
ฟิล์มมีค่าความขรุขระเฉลี่ยอยู่ที่ 16.1 นาโนเมตร



ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

57306210 : MAJOR : PHYSICS

KEY WORD : ZINC OXIDE NANOPARTICLES/Pd/ FLAME SPRAY PYROLYSIS
(FSP)/CHARACTERIZATIONS

SANGTIAN NABSANIT : CHARACTERIZATION OF Pd-DOPED ZnO SENSOR FILMS.

THESIS ADVISOR : CHAWARAT SIRIWONG, Ph.D. 72 pp.

Pure ZnO and Palladium (Pd)-doped ZnO nanoparticles containing 0.25, 0.50, 0.75 and 1.0 mol% of Pd were successfully produced by flame spray pyrolysis (FSP) technique and characterized for gas sensing applications. The crystalline phase, morphology and size of these nanoparticles were characterized by X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (TEM). The sensing films were fabricated by spin coating technique. Film morphologies of gas sensors were characterized by atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM). The particle sizes of hexagonal ZnO were found to be ranging from 7-37 nm and spheroidal ZnO were found to be ranging from 8-34 while ZnO nanorods were found to be ranging from 10-31 nm in width and 20-66 in length. Moreover, The roughness average of sample film is 16.1 nm.



Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจากอาจารย์ ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย รวมทั้งอาจารย์ ดร.มนตรี เอี่ยมพนากิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.โชคชัย พุทธรักษา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะ ที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาหลักสูตรทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำและประสบการณ์อันมีค่าแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณเจ้าของหนังสือ วารสาร เอกสาร และวิทยานิพนธ์ทุกเล่มที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.อนุรัตน์ วิสิทธิ์สรอรรถ และบุคลากร จากศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่อำนวยความสะดวก ทั้งสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัย

คุณค่าหรือประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาแต่พระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ที่อบรมสั่งสอน แนะนำ ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	9
แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์	10
การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	10
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	11
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน	12
รูปแบบการเลี้ยวเบนแบบเลือกพื้นที่	14
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	17
กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	18
หลักการของเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	18
วิธีการทำงานของเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่นำมาใช้งานทางด้าน วิทยาศาสตร์ระดับนาโน	19
แบบสั้มผัส	19

บทที่	หน้า
แบบไม่สัมผัส	19
แบบแพทพิง	19
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	27
สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย แพลเลเดียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส.....	27
วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	27
การสังเคราะห์อนุภาค	28
การเตรียมตัวเชื่อมประสาน	30
วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	30
ขั้นตอนการเตรียมตัวเชื่อมประสาน	30
เตรียมฟิล์มเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสปินโคตติง	31
วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	31
ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มเซนเซอร์	32
หลักขณะเฉพาะของอนุภาคที่เตรียมโดยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส	36
วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	36
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาหลักขณะเฉพาะของอนุภาค และเซนเซอร์ที่ เตรียมได้	36
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโน ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%....	40
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	40
ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	41
ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้	61
ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	61

บทที่	หน้า
ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	63
ผลของปริมาณสารเจือปนในปริมาณต่าง ๆ ที่มีต่อการตรวจวัดไอเอทานอล	65
5 สรุปลผลการทดลอง.....	66
รายการอ้างอิง.....	68
ประวัติผู้วิจัย	72

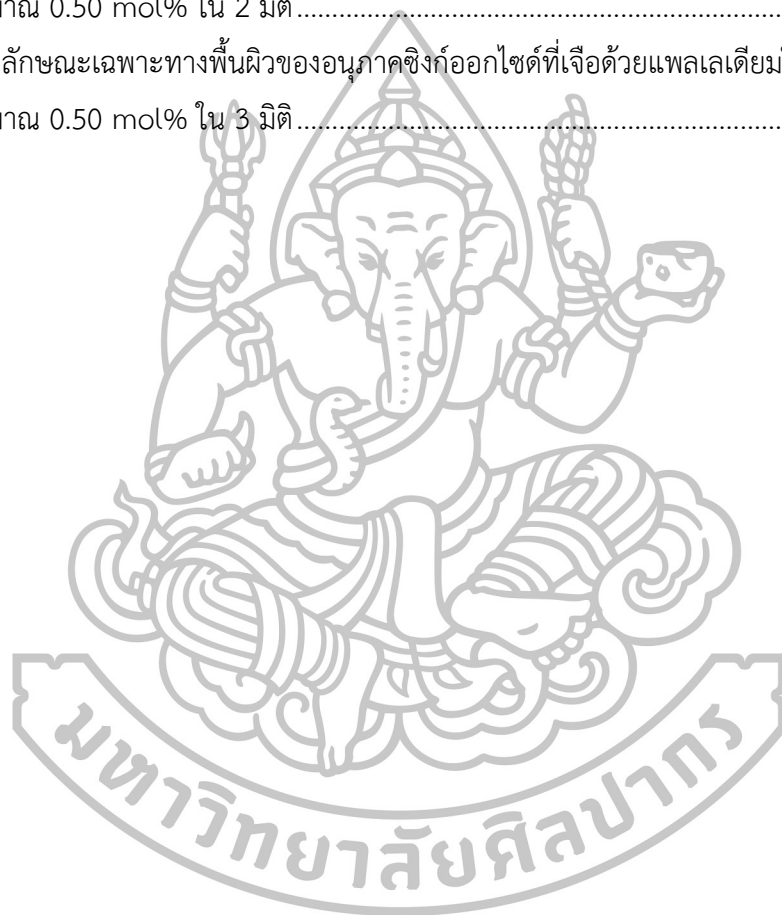


สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผงสีขาวของซิงก์ออกไซด์.....	4
2	รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบผลึกเดี่ยว	14
3	รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบพหุผลึก	14
4	อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ	29
5	สารเคมีแอลฟา-เทอไพนิออล	30
6	สารเคมีเอทิลเซลลูโลส	31
7	ตัวเชื่อมประสาน	31
8	ซัพสเตรทที่พิมพ์ลายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทองคำบริสุทธิ์	33
9	อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการติดเทปใสแล้ว	33
10	ไมโครปิเปตต์	33
11	เครื่องซั่งสารเคมี	34
12	โถรงบดสาร.....	34
13	เครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง	34
14	เตาความร้อน	35
15	เตาเผา	35
16	เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	36
17	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	37
18	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	38
19	กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	38
20	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ที่กำลังขยาย 50000 เท่า.....	42
21	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ที่กำลังขยาย 100000 เท่า.....	43
22	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า.....	44

ภาพที่		หน้า
23	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol% ที่กำลังขยาย 100000 เท่า.....	44
24	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า.....	45
25	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่กำลังขยาย 100000 เท่า.....	46
26	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า.....	47
27	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% ที่กำลังขยาย 100000 เท่า.....	47
28	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า.....	48
29	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 mol% ที่กำลังขยาย 100000 เท่า.....	49
30	รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์.....	50
31	รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol%.....	52
32	รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol%.....	54
33	รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol%.....	56
34	รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 mol%.....	58
35	องค์ประกอบต่าง ๆ ของเซนเซอร์จากภาพถ่ายภาคตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	61
36	โครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่ได้จากการเตรียมโดยการสปินโคตติงจำนวน 1 ครั้ง	62

ภาพที่		หน้า
37	โครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่ได้จากการเตรียมโดยการสปินโคตติงจำนวน 2 ครั้ง	62
38	โครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่ได้จากการเตรียมโดยการสปินโคตติงจำนวน 3 ครั้ง	63
39	ภาพแสดงลักษณะเฉพาะทางพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมใน ปริมาณ 0.50 mol% ใน 2 มิติ	64
40	ภาพแสดงลักษณะเฉพาะทางพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมใน ปริมาณ 0.50 mol% ใน 3 มิติ	64



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	โครงสร้างของซิงก์ออกไซด์แบบ Wurtzite (Hexagonal).....	5
2	โครงสร้างแบบ cubic close-packed ของแพลเลเดียม.....	5
3	แถบช่องว่างของพลังงานของสารไดอิเล็กทริก สารกึ่งตัวนำ และโลหะ.....	6
4	ไพรมิทีฟเวกเตอร์ และมุมระหว่างแกน.....	7
5	โครงข่ายผลึก 14 แบบ.....	8
6	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ในผลึก.....	11
7	ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM).....	13
8	การเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบน.....	15
9	การเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบพหุผลึกและการวัดระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบน กับจุดส่องผ่าน ที่ปรากฏบนฟิล์มรับภาพ.....	16
10	ค่ามาตรฐานข้อมูล JCPDS ที่หมายเลข 89-0510.....	16
11	ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM).....	17
12	องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM).....	19
13	รูปที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงาน ในเทคนิคแบบต่าง ๆ.....	20
	(ก) Contact mode.....	20
	(ข) Non-Contact mode.....	20
	(ค) Tapping mode.....	20
14	ขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย แพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส.....	29
15	การเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง.....	35
16	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และซิงก์ออกไซด์ที่ เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25-1.0 mol%.....	41

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน วัสดุกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์มีบทบาทอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ด้านความปลอดภัย ด้านการแพทย์ ทางด้านเกษตรกรรม และทางด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น สำหรับงานทางด้านอุตสาหกรรม สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำคัญที่นิยมนำมาประยุกต์เป็น อุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้า วาริสเตอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา และแก๊สเซนเซอร์ เป็นต้น สารกึ่งตัวนำของโลหะออกไซด์ มีพฤติกรรมเหมือนกับสารกึ่งตัวนำทั่วไปแต่จะมีแถบพลังงาน (energy gap) ที่กว้างกว่า คือประมาณ 2 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป จึงต้องให้อุณหภูมิกับสารกึ่งตัวนำของโลหะออกไซด์สูงถึง 100–600 องศาเซลเซียส เพื่อให้โลหะออกไซด์พวกนี้นำไฟฟ้าได้ ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำของโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และทินไดออกไซด์ (SnO_2) เป็นต้น

ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เป็นหนึ่งในวัสดุหลายชนิดที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิจัย ในยุคปัจจุบันทั้งที่อยู่ในรูปของฟิล์มบางและผงที่มีความละเอียดหรือผงที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน-เมตร มีการนำซิงก์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ แผงโซลาร์-เซลล์ แก๊สเซนเซอร์ และอุปกรณ์ทางแสง เนื่องจากมีสมบัติที่ดีในด้านการดูดซับแสง ด้านการเร่งปฏิกิริยา และนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์-ออกไซด์ มีหลากหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกัน โดยสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้ เช่น การควบคุมขนาดของอนุภาค ควบคุมความบริสุทธิ์ของอนุภาค ควบคุมความเป็นผลึกของอนุภาคได้ เป็นต้น วิธีการที่นิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ มีอยู่ 4 วิธี คือ วิธีการตกตะกอน (Coprecipitation) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) โซล-เจล (Sol-gel) เฟลมสเปร์ย์-ไพโรลิซิส (Flame spray Pyrolysis) [1] โดยเทคนิคเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิสเป็นเทคนิคใหม่ ที่สามารถผลิตอนุภาคระดับนาโนที่มีความบริสุทธิ์สูง มีความเป็นผลึกสูง สามารถผลิตผลึกที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีการกระจายตัวของโลหะมีตระกูลบนวัสดุรองรับได้ดี อีกทั้งยังสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้ภายในขั้นตอนเดียว [2]

ฟิล์มเซนาเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เป็นที่สนใจอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดแก๊ส เนื่องจาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีเกรนขนาดเล็ก มีค่าการตอบสนองต่อแก๊สสูง และสามารถตรวจวัดแก๊สภายใต้อุณหภูมิดำเนินการต่ำ ๆ ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีหลายวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สของเซนาเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เช่น การลดขนาดเกรนให้อยู่ในระดับนาโนเมตร และการเพิ่มสารเจือ หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม ชนิดของสารเจือที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แพลเลเดียม (Pd), ทองคำ (Au) และแพลทินัม (Pt) เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า มีหลากหลายตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มในการตรวจวัดแก๊ส เช่น ขนาดของเกรน ความเป็นผลึก และชนิดของสารเจือ ดังนั้น กระบวนการการหาลักษณะเฉพาะของวัสดุและพื้นผิวฟิล์ม มีความสำคัญอย่างมากกับงานทางด้าน การตรวจวัดแก๊ส

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% ด้วยเทคนิคเฟลมสปเรย์ไพโรลิซิส
2. เพื่ออธิบายลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เพื่อประดิษฐ์ฟิล์มเซนาเซอร์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอธิบายลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนาเซอร์ดังกล่าวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างผลึกหรือโมเลกุลของสารโดยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
2. ศึกษาและวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
3. ศึกษาโครงสร้างภาคตัดขวางของเซนาเซอร์และหาความหนาของฟิล์มเซนาเซอร์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
4. ศึกษาและหาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเซนาเซอร์ในระดับนาโนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ประโยชน์ที่ได้รับ

ผลที่ได้จากการศึกษาการหาลักษณะเฉพาะต่างๆ ทั้งของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม และฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนางานทางด้านการตรวจวัดแก๊ส ที่ดีและมีคุณภาพในอนาคต และเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป



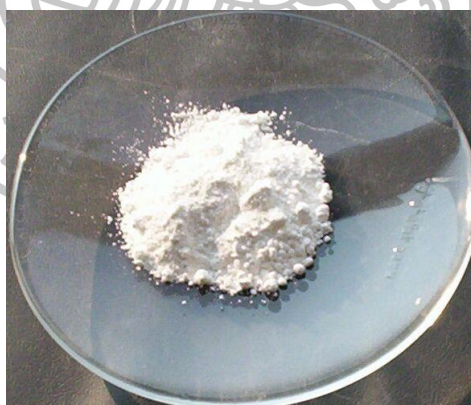
บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้กล่าวถึง คุณสมบัติ โครงสร้างต่าง ๆ ของวัสดุ และหลักการของเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ได้แก่ โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์เจือด้วยแพลเลเดียมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) รูปแบบและขนาดของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์เจือด้วยแพลเลเดียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) คุณสมบัติภาคตัดขวางของฟิล์มเซนเซอร์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเซนเซอร์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

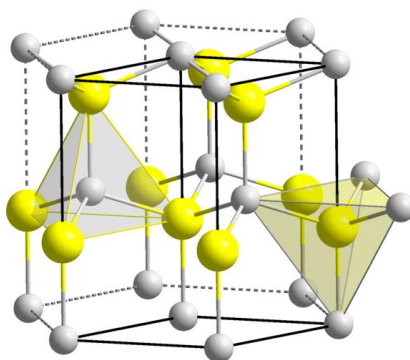
ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide)

ซิงก์ออกไซด์ [3] มีสัญลักษณ์คือ ZnO มีลักษณะเป็นผงสีขาว (ภาพที่ 1) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานอยู่ที่ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ อนุกรมมิกซ์ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal structure) ภายในโครงสร้างมีออกซิเจนไอออน (Oxygen ions; O^{2-}) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่าง ซิงก์ไอออน (Zinc ions; Zn^{2+}) ซึ่งทำพันธะกันแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เรียกว่า วิกซ์ไซต์ (Wurtzite structure) ดังรูปที่ 1



ภาพที่ 1 ผงสีขาวของซิงก์ออกไซด์

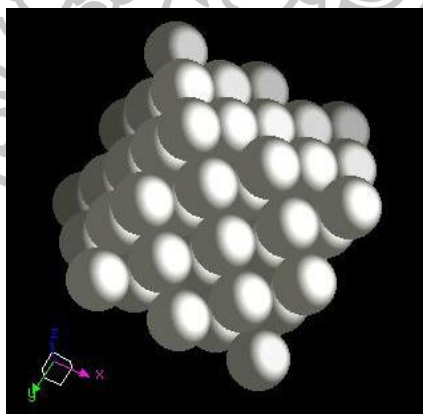
ที่มา: กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์, “วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (nano-ZnO) และการประยุกต์ใช้” (เอกสารการอบรมนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี เสนอที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 5 มีนาคม 2558).



รูปที่ 1 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์แบบ Wurtzite (Hexagonal)
ที่มา: กิตติพงศ์ อำนวยสวัสดิ์, “วัสดุ nano ซิงค์ออกไซด์ (nano-ZnO) และการประยุกต์ใช้” (เอกสาร
การอบรมนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี เสนอที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 5
มีนาคม 2558).

แพลเลเดียม (Palladium)

แพลเลเดียม [4] มีสัญลักษณ์คือ Pd เป็นธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 46 แพลเลเดียมเป็นโลหะ
ทรานซิชันหายาก มีโครงสร้างแบบ cubic close-packed (CCP structure) ดังรูปที่ 2 เป็นโลหะมี
ตระกูล คือ จะไม่ทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นหรือทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมที่มี
ความชื้นได้ยาก ทนทานต่อการกัดกร่อน แพลเลเดียมมีสีขาวยเงิน สามารถสกัดได้จากแร่ทองแดงและ
นิกเกิล ใช้ประโยชน์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



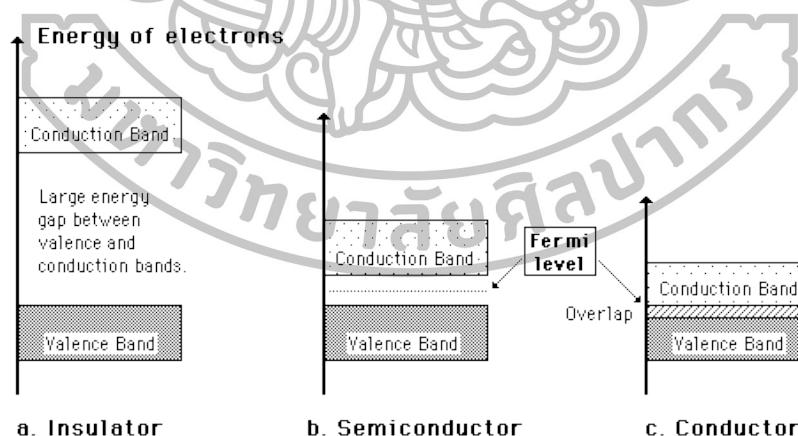
รูปที่ 2 โครงสร้างแบบ cubic close-packed ของแพลเลเดียม
ที่มา: ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, Palladium. เข้าถึงเมื่อ 3 กันยายน 2558, เข้าถึงได้จาก
<https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Pd.html>

สารกึ่งตัวนำ (semiconductors)

สารกึ่งตัวนำ [5] เป็นวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าไดอิเล็กทริก แต่ต่ำกว่าตัวนำ ความเป็นตัวนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความไม่บริสุทธิ์ที่เจือปนอยู่ในวัสดุ ซึ่งอาจเป็นธาตุหรือสารประกอบ เช่น ธาตุเจอร์เมเนียม ซิลิคอน ซีลีเนียม และตะกั่วเทลลูไรด์ เป็นต้น โดยวัสดุกึ่งตัวนำจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์สารกึ่งตัวนำเหล่านี้จะไม่ยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่าน เพราะวัสดุเป็นผลึกโควาเลนต์ เป็นพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมซึ่งอิเล็กตรอนถูกตรึงอยู่ในพันธะทั้งหมด แต่เมื่อวัสดุเหล่านี้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนมีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกจากพันธะโควาเลนต์ จึงทำให้เกิดที่ว่างขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกเป็นสาเหตุให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อมีสนามไฟฟ้ามาต่อเข้ากับสารนี้ ลักษณะแถบพลังงาน (Energy band) ของสารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปประกอบด้วย แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) และมีแถบช่องว่างของพลังงานกั้นอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง (รูปที่ 3)

สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (metal oxide semiconductors)

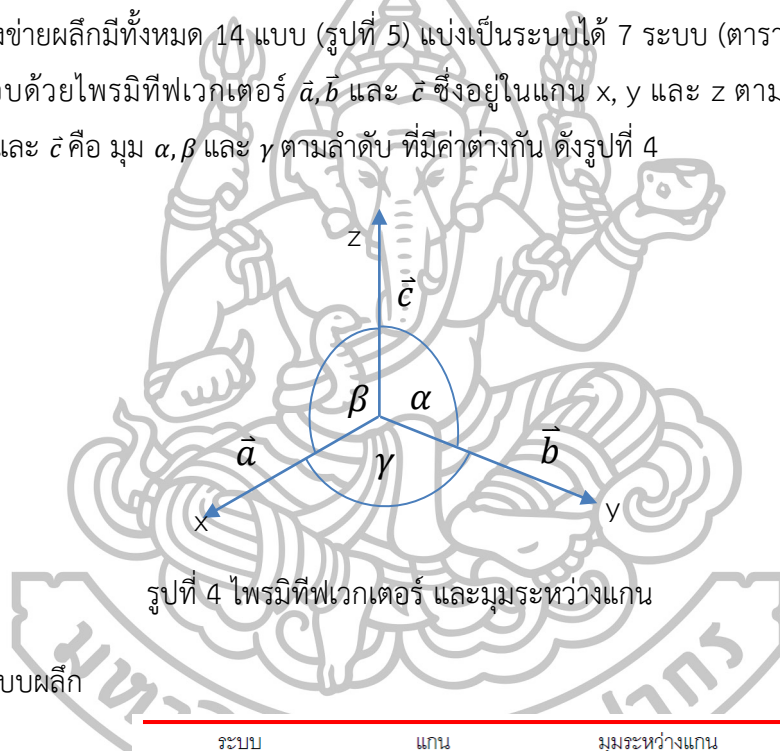
มีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำทั่วไป แต่มีแถบช่องว่างของพลังงานที่กว้างกว่า คือ มีค่าประมาณ 2 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป เพื่อให้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์นำไฟฟ้าได้ จำเป็นต้องให้อุณหภูมิกับสารกึ่งตัวนำของโลหะออกไซด์สูงถึง 100–600 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำของโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง คือ TiO_2 , ZnO และ SnO_2 เป็นต้น [6]



รูปที่ 3 แถบช่องว่างของพลังงานของ (a) สารไดอิเล็กทริก (b) สารกึ่งตัวนำ และ (c) โลหะ
 ที่มา: เฉลิม, Energy Band Model ของโลหะและอโลหะ, เข้าถึงเมื่อ 3 กันยายน 2558, เข้าถึงได้จาก http://elec.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/chaptor_5/energyband.html

โครงสร้างผลึก [7]

วัสดุ ประกอบไปด้วยการรวมตัวกันของอะตอมเล็ก ๆ ของธาตุต่าง ๆ การรวมตัวกันนี้แบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ การรวมตัวกันอย่างมีระบบ มีรูปแบบที่ชัดเจนเรียกว่า ผลึก (crystal) ส่วนการรวมตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนเรียกว่า ออสถุฐาน (amorphous) วัสดุที่มีการเรียงตัวเหมือนกันทั้งก้อนเรียกว่า ผลึกเดี่ยว (single crystal) สำหรับผลึกพหุ (poly-crystal) คือ วัสดุที่ประกอบไปด้วยผลึกเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งผลึกเล็ก ๆ เหล่านี้เรียกว่า เกรน (grain) การเขียนโครงสร้างผลึกนั้นจะใช้จุดแทนตำแหน่งอะตอมเรียกว่า จุดแลตทิซ (lattice point) การเรียงตัวของจุดแลตทิซที่เป็นระเบียบในลักษณะซ้ำ ๆ กันเรียกว่า โครงข่ายผลึก (lattice net work) หรือ แลตทิซ (lattice) โครงข่ายผลึกมีทั้งหมด 14 แบบ (รูปที่ 5) แบ่งเป็นระบบได้ 7 ระบบ (ตารางที่ 1) ในแต่ละระบบประกอบด้วยไพรมิตีฟเวกเตอร์ \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} ซึ่งอยู่ในแกน x, y และ z ตามลำดับ และมุมระหว่าง \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} คือ มุม α , β และ γ ตามลำดับ ที่มีค่าต่างกัน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไพรมิตีฟเวกเตอร์ และมุมระหว่างแกน

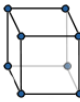


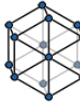
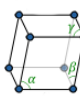






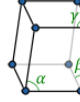
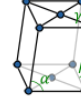
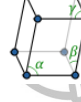
ตารางที่ 1 ระบบผลึก

ระบบ	แกน	มุมระหว่างแกน
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Hexagonal	$a = a \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Rhombohedral	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

ที่มา: ฟิสิกส์ราชชมงคล, โครงสร้างผลึก, เข้าถึงเมื่อ 3 กันยายน 2558, เข้าถึงได้จาก www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/2/material/3.pdf

7 Kafes Sistemi

14 Bravais Kafes Yapı

	Temel yapılar	Hacim merkezli yapılar	Yüzey merkezli yapılar	Taban merkezli yapılar
Kübik				
Hegzagonal (altgen)				
Rombohedral				
Tetragonal				
Ortorombik				
Monoklinik				
Triklinik				

รูปที่ 5 โครงข่ายผลึก 14 แบบ

ที่มา: Muhendishane, **Metallerin Kristal yapisi**, accessed September 3, 2015, available from <http://muhendishane.org/kutuphane/temel-malzeme-bilgisi/metallerin-kristal-yapisi>

ทิศทางของผลึก [8]

ทิศทางใด ๆ ในผลึกที่ขนานกันจะมีดัชนีทิศทาง (indices of directions) ที่เหมือนกัน ในการระบุทิศทางผลึกนั้น ทำได้โดยการลากเส้นจากจุดกำเนิดไปยังพิกัด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในผลึก และเขียนด้วยเลขจำนวนเต็มน้อยที่สุดไว้ในวงเล็บเป็น $[uvw]$ เมื่อ u , v และ w เป็นสัมประสิทธิ์ ซึ่งมาจากพิกัดของตำแหน่งในผลึก

ระนาบผลึก

การเรียกระนาบใด ๆ [8] ในผลึกสามารถบอกได้ด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ซึ่งค่าดัชนีมิลเลอร์เป็นตัวบอกลักษณะของระนาบ โดยเรียกเป็นค่าตัวเลขที่ได้มาจากส่วนกลับของจุดตัด (Intercept) ของระนาบนั้น กับแกนอ้างอิงของผลึกที่กำหนดขึ้น ถ้าระนาบหนึ่ง ๆ ในผลึกเดียวกันขนานกัน และมีระยะห่างระนาบ (Interplanar Spacing) เท่า ๆ กันในช่วงเซลล์หน่วย จะมีดัชนีมิลเลอร์เหมือนกัน ซึ่งระยะห่างระนาบแทนด้วยสัญลักษณ์ d_{hkl} มีสมการดังนี้

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (1)$$

ซึ่ง d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบที่ใกล้ที่สุดที่ขนานกันในหน่วยเซลล์

a คือ ขนาดของหน่วยเซลล์ (Lattice constant)

h, k, l คือ ค่าของดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่ขนานกัน

2.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

ในปี ค.ศ. 1895 เรินต์เกน (W.C. Rontgen) ได้ค้นพบ รังสีเอกซ์ (X-ray) [9] ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง มีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-100 อังสตรอม หรือ 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร รังสีเอกซ์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ หลากๆ อย่าง ต่อมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติและการเกิดอันตรกิริยาของรังสีต่อสาร การเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสารนั้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การเปล่งแสง (Emission) การดูดกลืน (Absorbance) การกระเจิง (Scattering) หรือเกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละสารที่สามารถนำมาวิเคราะห์ทางเคมีได้ ดังนี้คือ

1. ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ในสารทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative)
2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี (chemical bonding)
3. ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึก (crystal structure) หรือโมเลกุลของสาร ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

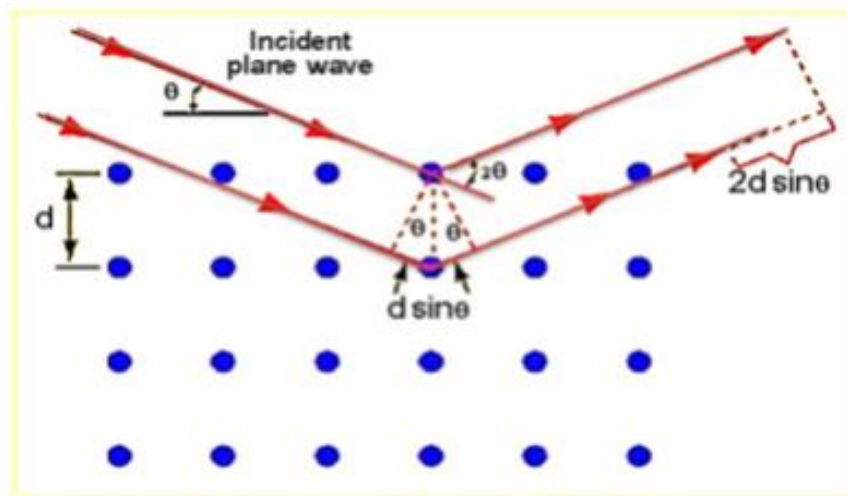
2.1.1 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์มีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และมนุษย์สร้างขึ้นจากกลไกอิเล็กทรอนิกส์ กล่าวคือ เมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้น (Excite) ด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงวิ่งชนอะตอมทำให้เกิดอันตรกิริยา ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนชั้นวงโคจรต่าง ๆ ของอะตอมมีค่าสูงขึ้น เกิดภาวะไม่เสถียร (Unstable) ดังนั้น อิเล็กตรอนชั้นวงโคจรดังกล่าวจำเป็นต้องลดระดับพลังงานเข้าสู่ภาวะปกติ โดยมวลของอะตอมไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นพลังงานจากการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าโพตอนออกมา ในลักษณะพัลส์ (Pulse) ซึ่งจะเกิดขึ้นทุกครั้งที่อะตอมได้รับการกระตุ้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้ เรียกว่า “รังสีเอกซ์”

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นการวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในสารประกอบ การวิเคราะห์สารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่รวดเร็วและตรวจสอบได้ง่าย ใช้สารปริมาณน้อย

2.1.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เมื่อฉายลำรังสีเอกซ์ไปยังผลึก รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการเลี้ยวเบน บางส่วนก็ผ่านไปยังระนาบต่อ ๆ ไปแล้วค่อยสะท้อนออกมา ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกมาอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน (in phase) คลื่นก็จะเสริมกันหรือรวมกัน แต่ถ้าเป็นกรณีต่างวัฏภาค (out of phase) คลื่นที่ออกมาก็จะหักล้างกัน ดังรูปที่ 6 เมื่อฉายรังสีเอกซ์ลงไปยังสารตัวอย่างโดยมีค่าความยาวคลื่นที่แน่นอน โดยกำหนดมุมที่รังสีตกกระทบกับสารตัวอย่าง พบว่ามุมที่รังสีสะท้อนออกมาจะเกิดการแทรกสอดเกิดขึ้นที่มุมสะท้อนค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถวัดออกมาโดยใช้ฟิล์มถ่ายภาพหรือต่อกับเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (diffractometer) นำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาและมุมที่เลี้ยวเบนจากแนวเดิม ซึ่งจะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่างมา จากค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมา ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ และค่ามุมที่เลี้ยวเบนนำมาคำนวณหาค่าความหนาของชั้นผลึกของสารที่รังสีเอกซ์ไปตกกระทบแล้วสะท้อนกลับหรือค่า d-spacing ได้



รูปที่ 6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก

ที่มา: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction), เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน 2558, เข้าถึงได้จาก <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>

จากรูปที่ 6 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ (2) ของ Bragg's Law คือ

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (2)$$

โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots$

λ = ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (นาโนเมตร)

d = ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (นาโนเมตร)

θ = มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์กับระนาบผลึก (องศา)

2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)

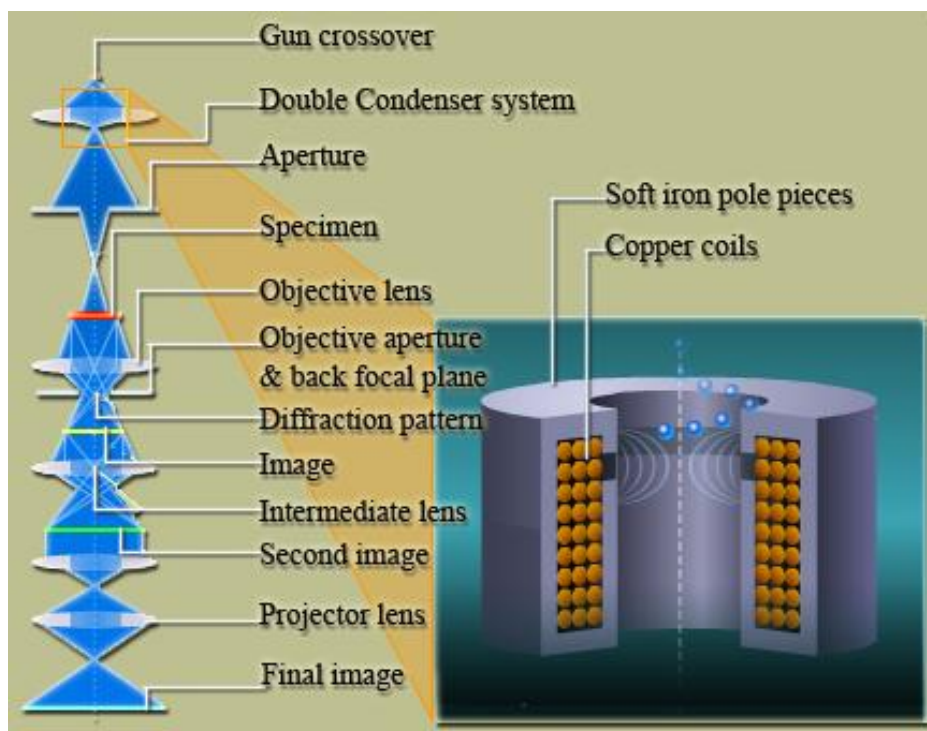
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [10, 11] ประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2475 ในประเทศเยอรมนี โดยนักวิทยาศาสตร์ 2 คนคือ แมกซ์ นอลล์ และเอิร์นท รุสกา เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงในการตรวจสอบวัตถุแทนแสงธรรมดา เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพของกำลังขยาย และการแจกแจงรายละเอียดต่าง ๆ ได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยสามารถแยกกระจายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะแจกแจงรายละเอียดได้ประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscope; TEM) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์แก้วในกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดพันรอบแท่งเหล็ก เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้ลำแสงอิเล็กตรอนเข้มข้นขึ้น เพื่อไปตกอยู่ที่วัตถุที่ต้องการศึกษา เลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนั้นประกอบด้วย เลนส์รวมแสง (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ และโปรเจกเตอร์เลนส์ โดยโปรเจกเตอร์เลนส์มีหน้าที่ฉายภาพ จากตัวอย่างที่ต้องการศึกษาลงบนจอภาพ ซึ่งจอภาพจะฉาบด้วยสารเรืองแสง เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนตกบนจอภาพจะทำให้เกิดการเรืองแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นผู้ศึกษาจึงสามารถมองเห็นภาพบนจอและสามารถบันทึกภาพนั้นด้วยกล้องถ่ายรูปซึ่งประกอบอยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้

2.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน

(Transmission Electron microscope; TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน [10, 11] ซึ่งคิดค้นโดย เอิร์นส์ท รุสกา ในปี พ.ศ. 2475 ใช้ศึกษาโครงสร้างภายในของเซลล์ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องผ่านเซลล์หรือตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งต้องเตรียมตัวอย่างให้ได้ขนาดบางเป็นพิเศษ อยู่ในช่วงระหว่าง 1–100 นาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้มีราคาแพงมาก และการใช้งานจะซับซ้อนมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง และอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่งนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objectivir lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพไปสู่จอร์บ (projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงประมาณ 0.1 นาโนเมตร) ภาพที่ได้เป็นภาพ 2 มิติ ซึ่งส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านแสดงดังรูปที่ 7



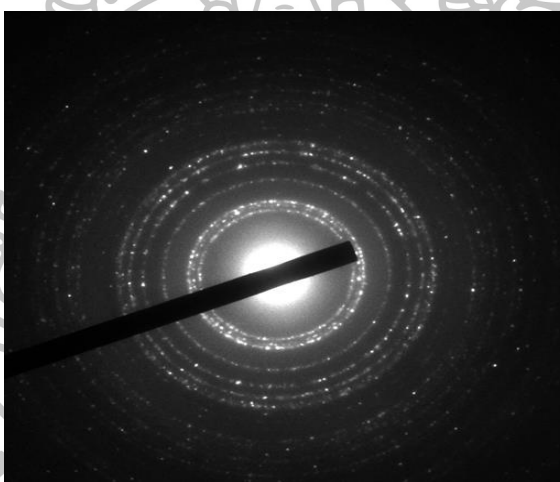
รูปที่ 7 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM) ที่มา: สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน, เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน 2558, เข้าถึงได้จาก <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>

ข้อมูลที่ได้จากเทคนิค TEM จะให้ข้อมูลภาพ 2 ลักษณะ คือ ภาพขยาย (image) และรูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) จะให้รายละเอียดของโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในวัสดุ ซึ่งวัสดุที่มีโครงสร้างแบบผลึกจะเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบน 2 ชนิด คือ วัสดุแบบผลึกเดี่ยว (single crystalline) (ภาพที่ 2) และ วัสดุแบบพหุผลึก (polycrystalline) (ภาพที่ 3)

การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (electron diffraction) ใน TEM เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบระนาบหนึ่ง ๆ ในแผ่นชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนเป็นมุมเท่า ๆ กัน เป็นไปตามสมการของแบรกก์ (สมการที่ 2) สำหรับภาพการเลี้ยวเบนในกล้อง TEM จะใช้ค่า $n=1$



ภาพที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบผลึกเดี่ยว



ภาพที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบพหุผลึก

2.2.1.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนแบบเลือกพื้นที่

(selected area diffraction pattern; SADP)

เมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบน มุมของลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบนเทียบกับลำอิเล็กตรอนที่ส่องผ่านเท่ากับ 2θ ซึ่งปกติจะมีค่าน้อยมากสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ซึ่ง L คือ ระยะเสมือนในแนวตั้งจากชิ้นงานจนถึงแนวรับภาพ และ r คือ ระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่าน (จุดสว่างกลาง)

จากรูปที่ 8 จะได้

$$r_{hkl}/L = \tan 2\theta \quad (3)$$

และจากเงื่อนไขของแบรกก์ จะได้

$$\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (4)$$

ปกติ θ จะมีค่าน้อยมากสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ดังนั้น $\tan 2\theta \approx 2\theta$ และ $\sin\theta \approx \theta$

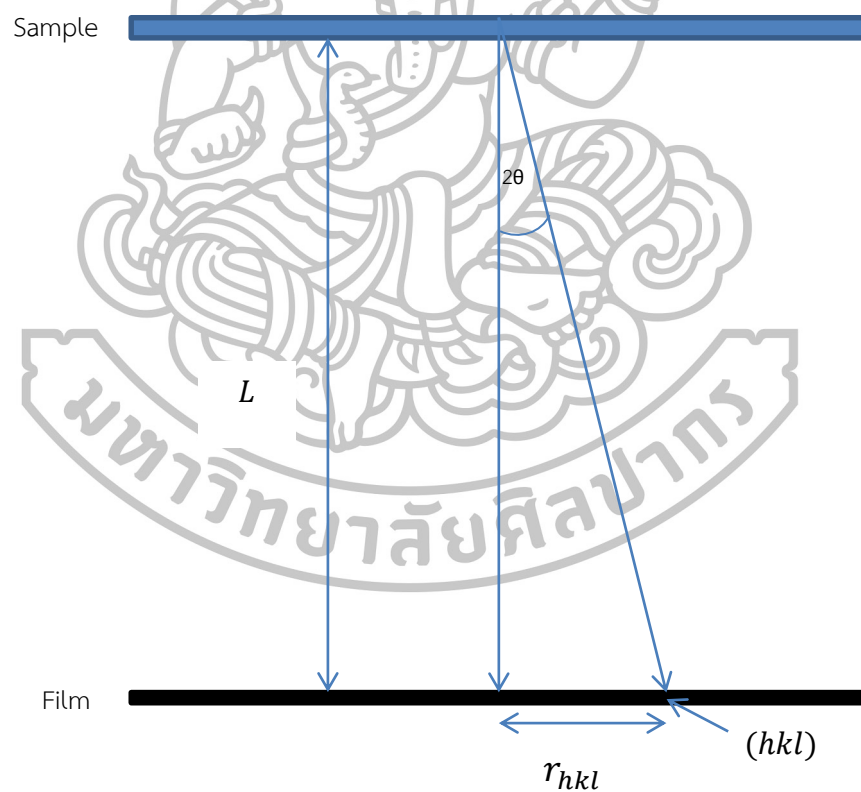
และจากสมการ (3) และ (4) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (5)

$$L\lambda = r_{hkl}d_{hkl} \quad (5)$$

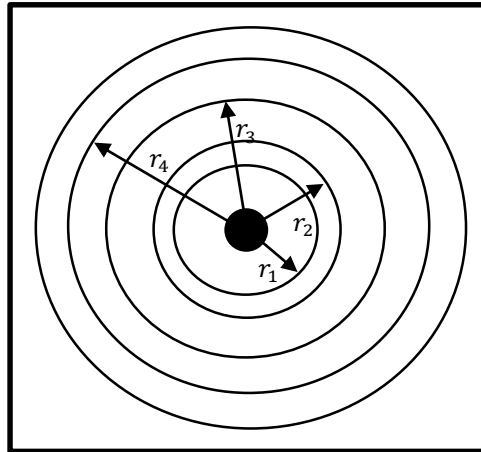
โดยที่ $L\lambda$ คือ camera constant

และความสัมพันธ์ระหว่างแลตทิซพารามิเตอร์ (a) กับ ระยะระนาบ (d_{hkl}) เป็นดังสมการที่ (1)

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (1)$$



รูปที่ 8 การเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบน

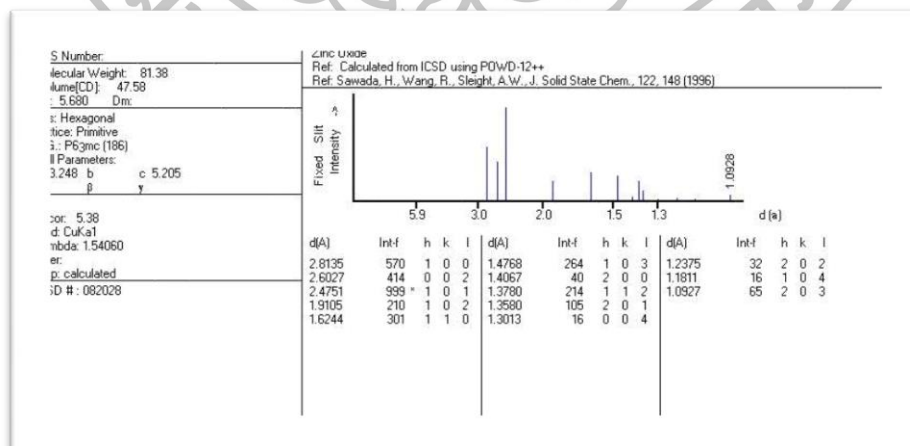


รูปที่ 9 การเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของวัสดุแบบพหุผลึกและการวัดระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่าน ที่ปรากฏบนฟิล์มรับภาพ

สำหรับการหาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุที่มีโครงสร้างพหุผลึก โดยการหาอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่าน (รูปที่ 9) บนจอรับภาพหรือฟิล์มรับภาพ ซึ่งจะเท่ากับอัตราส่วนของส่วนกลับของระยะระนาบแสดงดังสมการ (6)

$$\frac{r_{h'k'l'}}{r_{hkl}} = \frac{d_{hkl}}{d_{h'k'l'}} = \frac{\sqrt{h'^2+k'^2+l'^2}}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) สามารถหาโครงสร้างทางจุลภาคโดยวิธีการเทียบอัตราส่วนระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่าน แล้วนำระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่าน ไปคำนวณหาระยะระนาบ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS (รูปที่ 10) ซึ่งจะทำให้ทราบว่า โครงสร้างอนุภาคนั้นเป็นแบบใด

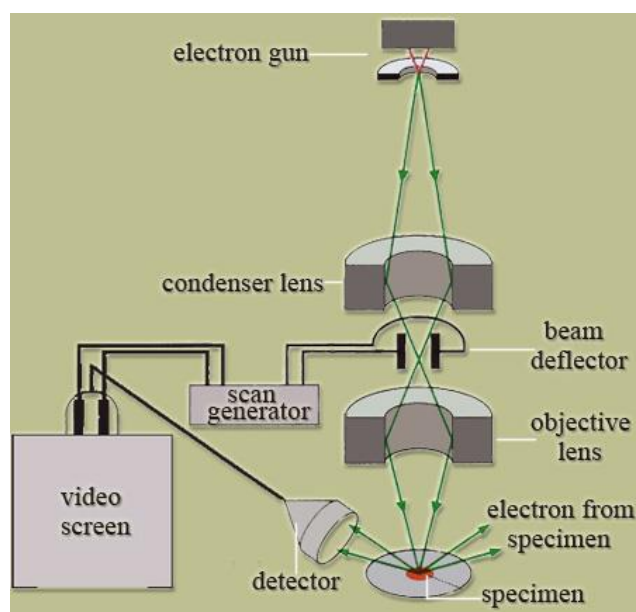


รูปที่ 10 ค่ามาตรฐานข้อมูล JCPDS ที่หมายเลข 89-0510

2.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

(Scanning Electron microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด [10, 11] ซึ่งคิดค้นโดยเอ็ม วอน เอนเดนนี้ สร้างสำเร็จในปีพ.ศ. 2481 ใช้ศึกษาโครงสร้างของผิวเซลล์หรือผิววัตถุ การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะศึกษานั้น ตัวอย่างไม่จำเป็นต้องมีขนาดบางเท่ากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง แต่ลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ซึ่งลำแสงอิเล็กตรอนจะตกกระทบเฉพาะผิวด้านนอกของวัตถุ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกบันทึกและแปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ แล้วถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และบันทึกภาพ ซึ่งภาพที่ได้เป็น 3 มิติ กล้องชนิดนี้มีความสามารถในการเห็นภาพต่ำกว่า หรือมีกำลังขยายไม่สูงเท่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เหมาะสำหรับศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

ที่มา: สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อหวิทยาลัยมหิดล, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน, เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน 2558, เข้าถึงได้จาก

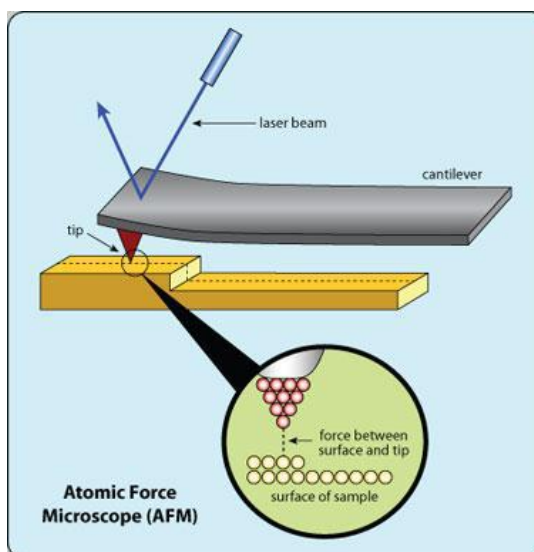
<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>

2.3 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy; AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม [12, 13] จัดอยู่ในกลุ่มเครื่องมือจำพวก Scanning Probe Microscopy (SPM) โดยเครื่องมือในกลุ่มนี้จะใช้ปลายแหลมที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ซึ่งเปรียบเสมือนปลายนิ้วขนาดเล็กมาก ๆ ลากไปบนพื้นผิวและตรวจสอบคุณสมบัติของพื้นผิวนั้น ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ เช่น วัดแรงกระทำระหว่างอะตอมที่ปลายเข็มกับอะตอมหรือโมเลกุลบนพื้นผิว หรือวัดเกี่ยวกับการลอดผ่านได้แบบควอนตัมของอิเล็กตรอน เนื่องจากใช้ปลายแหลมที่มีขนาดเล็กมากนั่นเอง จึงทำให้สามารถที่จะวัดได้อย่างละเอียดทั้งในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้สามารถศึกษาวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้เป็นอย่างดี

2.3.1 หลักการของเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

เครื่อง AFM เป็นเครื่องมือที่ใช้งานด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน ที่มีความละเอียดมากถึง 0.1 นาโนเมตร ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับหรือหัววัด (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก ทำจากวัสดุซิลิกอนไนไตรด์ (Silicon nitride; Si_3N_4) ซึ่งติดอยู่กับคานยื่นที่โก่งงอได้ เรียกว่า แคนทิลเวอร์ (cantilever) โดยโพรบหรือ AFM tip นั้นจะมีรัศมีที่ปลายเข็ม (end radius) อยู่ในระดับเพียงไม่กี่นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดประมาณ 5-20 นาโนเมตร เมื่อเครื่อง AFM ลากส่วนปลายเข็มแหลมนี้ไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง จะมีแรงกระทำระหว่างอะตอมที่ปลายเข็มแหลมกับอะตอมหรือโมเลกุลบนพื้นผิวเกิดขึ้น เช่น แรงวันเดอร์วาลส์ (Van de Waals) และแรงพันธะเคมีอื่น ๆ แรงกระทำนี้สามารถทำให้คานยื่นโก่งงอ (Bending) และถูกตรวจวัดได้ด้วยแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านไปกระทบที่ส่วนปลายของคานยื่นและสะท้อนมายังจูดรีบแสง (photodiodes หรือ laser detector) ถึงแม้ว่าแรงกระทำจะมีขนาดน้อยมากในระดับพิโคนิวตัน (picoNewton; pN) ก็ตาม แต่เครื่อง AFM ก็สามารถตรวจวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายเข็มแหลมกับพื้นผิวของวัตถุในขณะที่สแกนบนพื้นผิวได้ด้วยความช่วยเหลือของอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric tube) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพสามมิติของพื้นผิวที่มีกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพ (monitor) ทำให้สามารถศึกษาลักษณะเชิงโครงสร้างของพื้นผิวในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ขนาดและการจัดเรียงตัวได้ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

ที่มา: จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, “การวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Atomic force microscopy.” (เอกสารประกอบการสอนรายวิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541), 1.

2.3.2 วิธีการทำงานของเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ได้แก่

2.3.2.1 แบบสัมผัส (Contact mode)

เป็นการวัดรูปทรงของสภาพผิวชิ้นงาน (Topography) โดยการขยับให้เข็มโกล (Slide) ไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้มีแรงผลักรเกิดขึ้น เนื่องจากว่า เข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก ประมาณ 1-2 อังสตรอม ซึ่งแรงผลักรนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของผิวงาน (รูปที่ 13 ก) จะทำให้คานที่มีปลายเข็มแหลมเกาะอยู่เกิดการโค้งงอ โดยมีขนาดของการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะรูปทรงของผิวงาน เทคนิคแบบสัมผัสนี้มีข้อเสีย คือ ในการที่จะลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่โกลข้ามไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน อาจจะทำให้เกิดตำหนิ หรือสภาพพื้นผิววัสดุที่ต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง (Artifact) และเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้

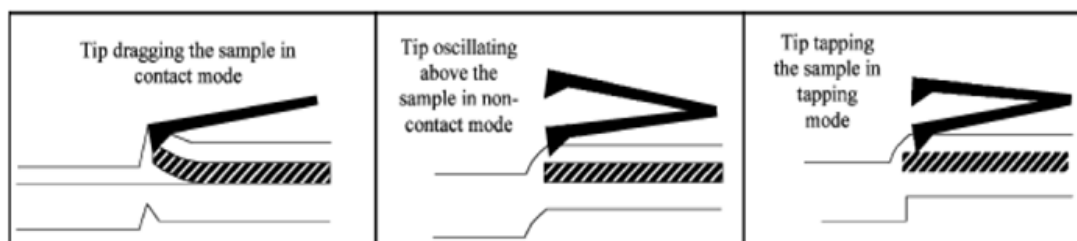
2.3.2.2 แบบไม่สัมผัส (Non-Contact mode)

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาที่ผิวงานถูกทำลาย จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบไม่สัมผัสขึ้นมา โดยในที่นี้ ตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้น คือประมาณ

10-100 อังสตรอม จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายผิวงาน แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงาน จะเป็นลักษณะแรงดึงดูด ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวงาน เช่นเดียวกัน (รูปที่ 13 ข) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะมีข้อจำกัดที่เกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้น คือ แรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ ที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มปลายแหลม กับ ผิวงาน จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักที่เกิดขึ้นในกรณีของแบบสัมผัส ดังนั้น สัญญาณการเปลี่ยนแปลงจึงอาจจาง (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน อย่างเช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิว

2.3.2.3 แบบแทพพิง (Tapping Mode)

Tapping Mode เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของ Contact mode และ Non-Contact mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือ ยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานใน ระยะที่ใกล้กันมาก เหมือนกับกรณีของ Contact Mode เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะที่เดียวกัน ก็ยังมีการสั่นหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน ดังนั้น (รูปที่ 13 ค) จึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไกลเข็มปลายแหลม ซึ่งจะ ทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวงานได้



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 13 รูปที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มปลายแหลมไปบนผิวงาน ในเทคนิคแบบต่าง ๆ

(ก) Contact mode (ข) Non-Contact mode และ (ค) Tapping mode

ที่มา: จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, “การวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Atomic force microscopy.”

(เอกสารประกอบการสอนรายวิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis คณะ

พลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541), 3.

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาลักษณะเฉพาะของซิงก์ออกไซด์และลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากซิงก์ออกไซด์ต่อไป ตัวอย่างของงานวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

ในปี ค.ศ. 1999 M. Aslam และคณะ [14] ได้ประดิษฐ์เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยรูทีเนียมในปริมาณต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์มีขนาดเกรนเป็น 500 นาโนเมตร ในขณะที่เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยรูทีเนียมในปริมาณ 0.17, 0.48 และ 2.74 at.% พบการกระจายตัวของรูทีเนียมขนาดเล็กอยู่ระหว่างเกรนของซิงก์ออกไซด์ ซึ่งมีขนาดประมาณ 200 นาโนเมตร ผลจากการตรวจวัดแก๊สพบว่า เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยรูทีเนียม (S=440) มีค่าการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีกว่าเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ (S=1.5) โดยปริมาณสารเจือรูทีเนียม ที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดแก๊สนี้คือ 0.48 at.%

ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 F. Chaabouni และคณะ [15] ได้เตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF magnetron sputtering) ผลจากวิเคราะห์ด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่า ฟิล์มมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 100-250 นาโนเมตร เมื่อให้ความร้อนกับซัพสเตรทที่อุณหภูมิเริ่มต้น คือ อุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ในปีเดียวกัน X.L. Cheng และคณะ [16] ได้เตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล (sol-gel dip coating) เพื่อใช้ในการตรวจวัดแก๊สเมทานอล (methanol) เอทานอล (ethanol) และโพรพิลแอลกอฮอล์ (propyl alcohol) ที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาลักษณะเฉพาะพบว่า ขนาดของอนุภาคมีขนาด 10 นาโนเมตร ผลการตรวจวัดแก๊สพบว่า ที่ความเข้มข้นของแก๊สเท่ากับเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อโพรพิลแอลกอฮอล์ดีที่สุด และรองลงมาคือเมทานอล และเอทานอล ตามลำดับ ตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้นที่ 10 ppm มีค่าการตอบสนองต่อโพรพิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 18.1 เมทานอลเท่ากับ 5.1 และเอทานอลเท่ากับ 2.1 นอกจากนี้ เซนเซอร์ที่เตรียมได้ยังมีเวลาในการตอบสนองต่อโพรพิลแอลกอฮอล์ (5 ppm) เมทานอล (15 ppm) และเอทานอล (30 ppm) เป็น 25, 18 และ 28 วินาที ในส่วนของเวลาการกลับคืนสู่สภาพเดิมมีค่าเป็น 62, 51 และ 49 วินาที ตามลำดับ

ต่อมาในปี ค.ศ. 2005 A. Og. Dikovska และคณะ [17] ได้เตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ด้วยเทคนิคพัลส์ เลเซอร์ (Pulsed laser deposition) โดยได้ศึกษาผลของอุณหภูมิของซับสเตรทและความดันของแก๊สออกซิเจนที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ โดยแปรค่าอุณหภูมิซับสเตรทระหว่าง 150 ถึง 400 องศาเซลเซียส และความดันแก๊สออกซิเจนระหว่าง 0.05 ถึง 0.3 มิลลิบาร์ พบว่า ขนาดของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของซับสเตรทเพิ่มขึ้น และจะมีขนาดของเกรนลดลงเมื่อความดันแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น และในปีเดียวกัน Ying Liu และคณะ [18] ได้สร้างเซนเซอร์จากแผ่นผลึกเดี่ยวซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงเคมี (chemical vapor deposition process; CVD) ลงบนซับสเตรทซิลิกอน แผ่นซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีความหนาน้อยกว่า 200 นาโนเมตร และมีความกว้างอยู่ในช่วง 10 ถึง 20 ไมโครเมตร ผู้วิจัยได้ทดสอบไอเอทานอลที่ 2 ความเข้มข้น ผลจากการตรวจวัดไอเอทานอล เซนเซอร์ดังกล่าวแสดงค่าสภาพความไวเท่ากับ 7.8 และ 14.3 ที่ 300 และ 500 ppm ตามลำดับ และใช้เวลาในการตอบสนองต่อไอเอทานอลที่รวดเร็ว ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 400 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ B.L. Zhu และคณะ [19] ได้สังเคราะห์ผงนาโนซิงก์ออกไซด์ ด้วยวิธีการระเหยสาร (vapor-phase oxidation) พบว่า รูปร่างของผงซิงก์ออกไซด์มีลักษณะเป็นก้านสี่ก้าน โดยแต่ละก้านมีความยาวประมาณ 150 นาโนเมตร และมีความกว้างประมาณ 10 นาโนเมตร นอกจากนี้ จากผลของโครงสร้างระดับนาโนของฟิล์ม แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มมีความพรุนสูง และภายหลังจากการเผา (sintering) ฟิล์มเซนเซอร์ ขนาดของเกรนมีค่าอยู่ระหว่าง 200-400 นาโนเมตร

ในปี ค.ศ. 2006 Zhi-Peng Sun และคณะ [20] ได้สร้างแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (solid state reaction) ผลการศึกษา พบว่า แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์มีความยาวอยู่ในช่วง 150-250 นาโนเมตร และมีความกว้างประมาณ 10-30 นาโนเมตร ภายหลังจากการอบตัวอย่าง พบว่า แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์มีความยาวเพิ่มขึ้นจากเดิมจนมีค่าเท่ากับ 300 นาโนเมตร

ในปี ค.ศ. 2008 Jiaqiang Xu และคณะ [21] ได้สังเคราะห์ซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย Ru, Mn, Pd และ Na ด้วยวิธีการเปียกชุ่ม (Impregnation method) เพื่อใช้ในการประดิษฐ์เป็นแก๊สเซนเซอร์ ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ พบว่า ซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอลเวทไรท์ (Wurtzite-Hexagonal structure) มีความเป็นผลึกสูง และมีรูปร่างเป็นแบบแท่งนาโน โดยมีความกว้างอยู่ระหว่าง 40 ถึง 80 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 1 ไมโครเมตร

ปี ค.ศ. 2009 Liu และคณะ [22] ได้เตรียมเซนเซอร์จากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ลงบนชั้น-สเตรทอะลูมินาที่พิมพ์ลายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยแพททินัม พบว่า ความยาวของแท่งนาโนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.0 ถึง 1.78 ไมโครเมตร เมื่ออุณหภูมิในการปลูกฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 90 ถึง 110 องศาเซลเซียส และมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 33 นาโนเมตร ทุก ๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม ในปีเดียวกัน Tong Zhang และคณะ [23] ได้ทดสอบการตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ โดยใช้เซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทินไดออกไซด์และทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแพลเลเดียม ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล สารดังกล่าวถูกเคลือบลงบนชั้นสเตรทอะลูมินาที่มีแพททินัมเป็นอิเล็กทรอนิกส์ จากการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของอนุภาค พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทินไดออกไซด์และที่เจือด้วยอินเดียมและแพลเลเดียม มีค่าเท่ากับ 30 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า การเจือสารเจือดังกล่าวส่งผลให้ขนาดของอนุภาคมีค่าลดลง ในขั้นตอนการตรวจวัดแก๊สได้ทดสอบภายใต้ความเข้มข้นทั้งหมด 5 ค่า คือ 1, 10, 50, 100 และ 200 ppm ที่อุณหภูมิดำเนินการ 140 องศาเซลเซียส พบว่า เซนเซอร์ที่เจือด้วยอินเดียมและแพลเลเดียม มีค่าการตอบสนองสูงกว่าเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และมีค่าการตอบสนองที่สูง อีกทั้งยังใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สและเวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิมอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าการตอบสนองต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1, 10, 50, 100 และ 200 ppm เป็น 3, 5, 20, 40 และ 63 ตามลำดับ โดยเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สและเวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ 1 ppm คือ 15 และ 20 วินาที สำหรับเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สและเวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิมที่ 200 ppm มีค่าเป็น 15 และ 22 วินาที

ปี ค.ศ. 2011 Viruntachar Kruefu และคณะ [24] ได้สร้างเซนเซอร์ด้วยเทคนิคสปินโคตติงจากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม (Nb) ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 mol.% ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (FSP) เพื่อนำไปตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 ถึง 4 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคพบว่า เมื่อสารเจือเพิ่มขึ้นจาก 0.25 และ 1.0 mol.% ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคมีค่าลดลง โดยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคที่เตรียมได้มีลักษณะเป็น ทรงกลม หกเหลี่ยม และแบบแท่ง ขนาดของผลึกของอนุภาคของทรงกลมและหกเหลี่ยม มีค่าอยู่ในช่วง 5 ถึง 20 นาโนเมตร สำหรับแบบแท่งมีความกว้างและความยาวอยู่ในช่วง 5 ถึง 20 นาโนเมตร และ 20 ถึง 40 นาโนเมตร ตามลำดับ ความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าเท่ากับ 10 ไมโครเมตร ผลจากการตรวจวัดแก๊สพบว่า ปริมาณสารเจือไนโอเบียมที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์คือ 0.5 mol.% ถึงให้ค่าการตอบสนอง

สูงถึง 1640 และใช้เวลาในการตอบสนองที่สั้นเพียง 27 วินาที ภายใต้ความเข้มข้นของแก๊ส 4 ppm ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ในปี ค.ศ. 2012 Chougule และคณะ [25] ได้เตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล สปินโคตติง ลงบนซับสเตรทแก้วพบว่า ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้นจาก 40 ถึง 52 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเซอรั่มมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส

ในปี ค.ศ. 2013 Ozturk และคณะ [26] ได้เตรียมแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) โดยใช้ $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ hexamethylenetetramine เป็นสารตั้งต้น ผลจากการสังเคราะห์พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น (0.001 M, 0.01 M และ 0.1 M)

ในปี ค.ศ. 2014 Chang และคณะ [27] ได้ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์มต่อโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยซีเรียม (Ce) โดยได้ใช้เวลาในการปลูกฟิล์มเป็น 2, 4 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยพบว่าความยาวของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์มีค่าเป็น 915, 955 และ 1915 นาโนเมตร อีกทั้งยังมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 97 ถึง 137 นาโนเมตร ในปีเดียวกัน R. Siddheswarana และคณะ [28] ได้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยนิกเกิล (Ni) ในปริมาณ 3.5, 4 และ 6 at% โดยใช้เทคนิคสปัตเตอร์แบบรีแอกทีฟ (reactive magnetron sputtering) ในการสร้างฟิล์มบางลงบนซับสเตรทซิลิกอนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่า ฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นคอลัมน์ และขนาดของเกรนมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของสารเจือนิกเกิลเพิ่มขึ้น โดยขนาดเกรนของเซอรั่มที่เจือด้วยนิกเกิลในปริมาณ 3.5% และ 4% มีค่าอยู่ในช่วง 5 ถึง 85 นาโนเมตร และมีค่าเท่ากับ 10 ถึง 55 นาโนเมตร สำหรับเซอรั่มที่เจือด้วยนิกเกิลในปริมาณ 6% ค่าความหนาของฟิล์มมีค่าเป็น 600, 650 และ 580 นาโนเมตร สำหรับเซอรั่มที่เจือด้วยนิกเกิลในปริมาณ 3.5, 4 และ 6% ตามลำดับ นอกจากนี้ Volkan Senay และคณะ [29] ได้สร้างฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ลงบนซับสเตรทแก้วด้วยเทคนิคสปัตเตอร์แบบรีแอกทีฟ โดยได้ศึกษาฟิล์มบางที่ 2 ความหนา คือ 80 และ 190 นาโนเมตร จากการศึกษาพบว่า เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ฟิล์มบางมีค่าดัชนีการหักเหเป็น 2.03 และ 2.05 อีกทั้งยังมีค่าความขรุขระพื้นผิวเฉลี่ยเป็น 1.5 นาโนเมตร สำหรับฟิล์มที่มีความหนา 80 นาโนเมตร และมีค่าเท่ากับ 2 นาโนเมตร สำหรับฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่มีความหนา 190 นาโนเมตร ในปี 2014 H. Shokry Hassan และคณะ [30] ได้สร้างเซอรั่มซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมด้วยอัตราส่วนน้ำหนัก 1, 5 และ 10% เพื่อใช้ในการทดสอบแก๊ส

ไฮโดรเจน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ในการศึกษาลักษณะเฉพาะพบว่า โครงสร้างของซิงก์-ออกไซด์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของอินเดียม สำหรับซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์จะได้ออกมาเป็นรูปแบบแท่งที่มีความยาวเฉลี่ยเป็น 5 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 300 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มสารเจือเป็น 1% พบว่าแท่งซิงก์ออกไซด์จะมีความยาวลดลงแต่จะมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ในขณะที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณ 5% รูปร่างของซิงก์ออกไซด์จะเริ่มกลายเป็นอนุภาควงรี และจะกลายเป็นวงกลมเมื่อปริมาณสารเจืออินเดียมมีค่าเป็น 10% สำหรับผลการตรวจวัดแก๊สพบว่า เซนเซอร์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณ 5% ให้ค่าการตอบสนองออกซิเจนได้ดี ที่อุณหภูมิระหว่าง 150-250 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันกับการตอบสนองต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสภาพความไวเท่ากับ 16% และเซนเซอร์ได้แสดงค่าการตอบสนองที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสภาพความไวเท่ากับ 93%

ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 Snehal D. Patil และคณะ [31] ได้ศึกษาผลของขนาดซิงก์ออกไซด์ต่อการตรวจวัดแก๊สของเซนเซอร์ โดยการนำผงซิงก์ออกไซด์ และแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO nanorods) มาสร้างเป็นแอมโมเนียเซนเซอร์ ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าขนาดอนุภาคของผงซิงก์ออกไซด์เฉลี่ย มีค่าประมาณ 500 นาโนเมตร ในขณะที่ ขนาดเกรนเฉลี่ยที่ได้จากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ มีค่าอยู่ระหว่าง 12-20 นาโนเมตร หลังจากการทดสอบแก๊ส พบว่าเซนเซอร์ที่เตรียมจากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ มีการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีกว่าเซนเซอร์ที่เตรียมจากผงซิงก์ออกไซด์ โดยขนาดของอนุภาคที่เหมาะสม ที่ส่งผลให้เซนเซอร์มีการตอบสนองต่อแก๊สได้ดีที่สุด คือ 12 นาโนเมตร

ในปีเดียวกัน Wei Tang และคณะ [32] ได้ประดิษฐ์เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สอะซิโตน จากเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์และทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 ถึง 2.0 mol% ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning process) ขนาดผลึกเฉลี่ยของอนุภาคทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมมีค่าอยู่ในช่วง 28 ถึง 36 นาโนเมตร อนุภาคที่เจือด้วย 1.5 mol% มีลักษณะเป็นรูปทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 16 ถึง 22 นาโนเมตร จากผลการตรวจวัดแก๊สพบว่า ปริมาณสารเจือแพลเลเดียมที่เหมาะสมคือ 1.5 mol% ซึ่งแสดงค่าการตอบสนองสูงสุดที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส เท่ากับ 23.8 นอกจากนี้ เซนเซอร์ทินไดออกไซด์และทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1 และ 2 mol% ได้แสดงค่าการตอบสนอง ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการที่เหมาะสม (300, 300 และ 325 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) เป็น 11.6, 19.2 และ 13.42 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า การเจือแพลเลเดียมในปริมาณที่

เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สของเซนเซอร์ ในขณะที่อุณหภูมิดำเนินการมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 2 mol% ให้ค่าสภาพความไวที่ลดลง



บทที่ 3

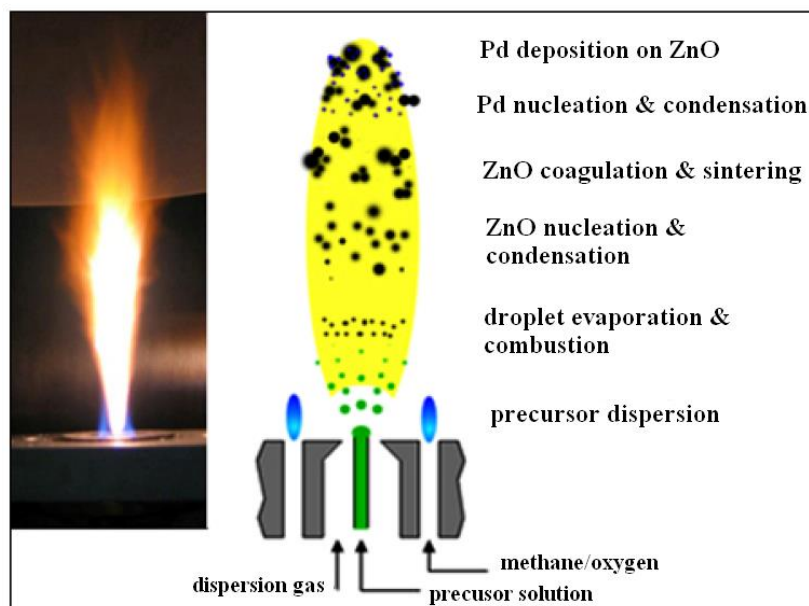
วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส
 2. การเตรียมตัวเชื่อมประสาน (binder)
 3. เตรียมฟิล์มเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสปินโคตติง
 4. หาลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่เตรียมโดยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสและการหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์
1. สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส
- 1.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี
- 1.1.1 วัสดุอุปกรณ์
- 1.1.1.1 ปีมไชรินจ์
 - 1.1.1.2 หัวฉีด
 - 1.1.1.3 แคมป์ฟิลลารี
 - 1.1.1.4 กระจดาชกรอง (Whatmann GF/A, 25.7 cm in diameter)
 - 1.1.1.5 ปีมสูญญากาศ (Busch, Seco SV 1040C)
- 1.1.2 สารเคมี
- 1.1.2.1 Zinc naphthenate (Aldrich, 8 wt%Zn)
 - 1.1.2.2 palladium (II) acetylacetonate (Aldrich, 99%Pd)
 - 1.1.2.3 toluene (Lab-scan analytical science, 99.7%)
 - 1.1.2.4 acetonitrile (Lab-scan analytical science, 99.7%)
 - 1.1.2.5 แก๊สออกซิเจน
 - 1.1.2.6 แก๊สมีเทน

1.2 การสังเคราะห์อนุภาค

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และเจือด้วยโลหะมีตระกูล แพลเลเดียม (0.25-1.0 mol%) ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส องค์ประกอบของเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์ และขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาค แสดงดังรูปที่ 14 โดยสารละลายผสมตั้งต้นเตรียมได้จากการนำสารละลายตั้งต้นชนิด Zinc naphthenate (Aldrich, 8 wt%Zn) ผสมกับสารตั้งต้นสารเจือชนิด palladium (II) acetylacetonate (Aldrich, 99%Pd) แล้วนำมาละลายในตัวทำละลาย toluene (Lab-scan analytical science, 99.7%)/acetonitrile (Lab-scan analytical science, 99.7%) ในอัตราส่วน 80:20 โดยปริมาตร สารละลายผสมตั้งต้นจะถูกป้อนเข้าไปในหัวฉีด โดยปั๊มไซรินจ์ เพื่อควบคุมให้อัตราการไหลของสารละลายผสมมีค่าคงที่เป็น 5 มิลลิลิตรต่ออนาที สารละลายผสมตั้งต้นบริเวณปลายหัวฉีดจะถูกทำให้กลายเป็นละอองฝอย โดยแก๊สออกซิเจน (O_2 dispersion) ที่มีอัตราการปล่อยเป็น 5 ลิตรต่ออนาที ทำการปรับระดับช่องว่างของหัวฉีด เพื่อให้ความดันที่ปลายหัวฉีดคงที่เป็น 1.5 บาร์ ตลอดการทดลอง โดยแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการควบคุมและรักษาเสถียรภาพของเฟลมสเปรย์ มีอัตราการปล่อยเป็น 3.92 ลิตรต่ออนาที ทำการจุดเปลวไฟซัพพอร์ต (supporting flamelets) โดยใช้แก๊สออกซิเจน (2.46 L/min) และมีเทน (1.19 L/min) เพื่อช่วยในการติดไฟ ลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นมีความสูงประมาณ 10-12 เซนติเมตร หลังจากการระเหยจนกลายเป็นไอ (evaporation) และการเผาไหม้ (combustion) ของละอองหยดสารตั้งต้นแล้ว จะมีการก่อตัวของอนุภาคเกิดขึ้น ตามขั้นตอนดังนี้ การเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) การควบแน่น (condensation) เกิดกระบวนการแข็งในลักษณะที่เป็นก้อน (coagulation) การเกิดลักษณะของการเกาะรวมตัวกันของอนุภาคเป็นก้อนหยาบ (coalescence) และเกิดการเกาะของสารเจือแพลเลเดียมบนซิงก์ออกไซด์ ภายหลังจากการสังเคราะห์ได้อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% (ภาพที่ 4) โดยอนุภาคเหล่านี้จะถูกเก็บไว้บนกระดาษกรอง (Whatmann GF/A, 25.7 cm in diameter) โดยมีปั๊มสุญญากาศเป็นตัวช่วย (Busch, Seco SV 1040C) [33]



รูปที่ 14 ขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



ภาพที่ 4 อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ (ก) ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ (ข) 0.25 (ค) 0.50 (ง) 0.75 และ (จ) 1.0 mol%

2. การเตรียมตัวเชื่อมประสาน (binder)

2.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

2.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 2.1.1.1 ปิเปตต์ (pipette)
- 2.1.1.2 ปีกเกอร์ (beaker)
- 2.1.1.3 ฟอยล์อะลูมินา (alumina foil)
- 2.1.1.4 ช้อนตักสาร (spatula)
- 2.1.1.5 แม่เหล็กบาร์ทรงกระบอก (Cylindrical magnetic bar)
- 2.1.1.6 ตู้ดูดไอสารเคมี (fume hood)
- 2.1.1.7 เครื่องชั่งสารเคมี (balance)
- 2.1.1.8 เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer)

2.1.2 สารเคมี

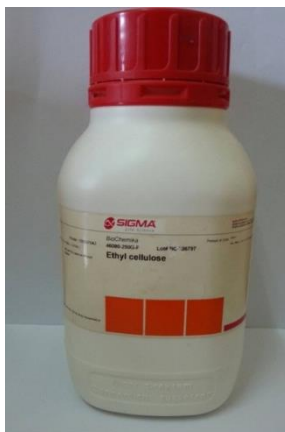
- 2.1.2.1 แอลฟา-เทอไพเนอล (α - terpineol)
- 2.1.2.2 เอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose)

2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวเชื่อมประสาน

- 2.2.1 ชั่งแอลฟา-เทอไพเนอล (ภาพที่ 5) และเอทิลเซลลูโลส (ภาพที่ 6) ในปริมาณ 18 กรัม และ 480 มิลลิกรัม ตามลำดับ
- 2.2.2 นำแม่เหล็กบาร์ทรงกระบอกและสารที่เตรียมได้ใส่ในปีกเกอร์ แล้วนำไปวางบนเครื่องกวนสารละลาย เพื่อทำการผสมสารให้สารทั้งสองชนิดกลายเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง หลังจากนั้น ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเก็บตัวเชื่อมประสานที่ได้ใส่ภาชนะบรรจุ (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 5 สารเคมีแอลฟา-เทอไพเนอล



ภาพที่ 6 สารเคมีเอทิลเซลลูโลส



ภาพที่ 7 ตัวเชื่อมประสาน

3. เตรียมฟิล์มเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสปินโคตติง

3.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

3.1.1.1 อิเล็กโทรด (electrode)

3.1.1.2 กระจกสไลด์ (microscope slides)

3.1.1.3 ไมโครปิเปตต์ (micro pipette)

3.1.1.4 ฟอยล์อะลูมินา (alumina foil)

3.1.1.5 ช้อนตักสาร (spatula)

3.1.1.6 โกร้งบดสาร (a mortar and pestle)

3.1.1.7 เตาความร้อน (hot plate)

3.1.1.8 เต้าเผา (horizontal three)

3.1.1.9 เครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (spin coater)

3.1.1.10 เครื่องชั่งสารเคมี (balance)

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 ตัวเชื่อมประสาน

3.1.2.2 อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์

3.1.2.3 อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มเซนเซอร์

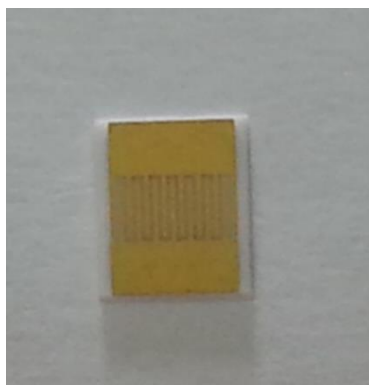
3.2.1 นำอิเล็กโทรดที่พิมพ์ด้วยทองคำบริสุทธิ์ (ภาพที่ 8) มาติดบนกระจกสไลด์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ด้วยเทปกาวใส ซึ่งเทปกาวใสจะติดบนขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองข้าง (ภาพที่ 9)

3.2.2 เตรียมสารผสมหนืด โดยการผสมสารละลายตัวเชื่อมประสาน ในปริมาณ 0.45 มิลลิลิตร ด้วยไมโครปิเปตต์ (ภาพที่ 10) กับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% ในปริมาณ 60 มิลลิกรัม โดยเครื่องชั่งสารเคมี (ภาพที่ 11) ผสมให้เข้ากันด้วยโกรงบดสาร (ภาพที่ 12) เป็นเวลาประมาณ 30 นาที

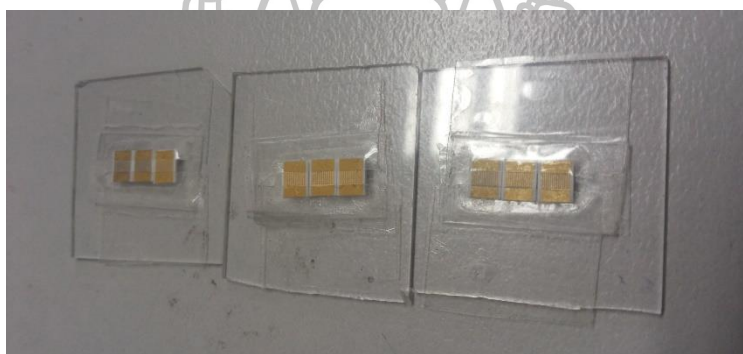
3.2.3 นำสารผสมหนืดที่เตรียมได้หยดลงบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 3.2.1 ซึ่งอยู่บนเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (ภาพที่ 13) และเริ่มทำการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง (รูปที่ 15) ซึ่งใช้ความเร็วในการหมุนเป็น 700 rpm เป็นเวลา 10 วินาที และ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ตามลำดับ ในการสร้างเป็นชั้นฟิล์ม เพื่อใช้ในการตรวจวัดแก๊ส

3.2.4 หลังจากนั้นนำไปอบบนเตาความร้อน (ภาพที่ 14) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะได้เซนเซอร์ที่ความหนาที่หนึ่ง ส่วนความหนาที่สองและสามจะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งในการเคลือบสาร

3.2.5 นำเซนเซอร์ที่เตรียมได้ออกจากกระจกสไลด์ เพื่อนำไปเผาในเตาเผา (ภาพที่ 15) ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยอัตราการเผา 1 องศาเซลเซียส ต่อนาที เพื่อกำจัดสารยึดเหนี่ยวออกไปก่อนที่จะทำการทดสอบแก๊ส



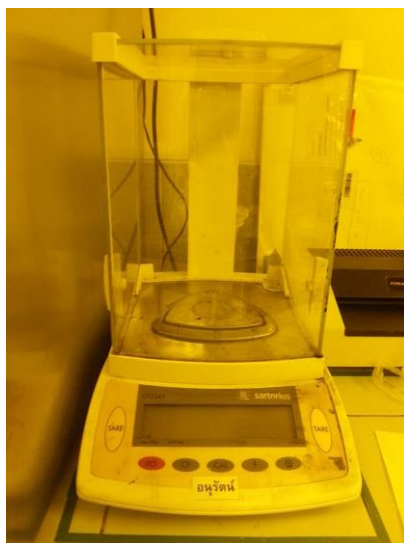
ภาพที่ 8 ซับสเตรทที่พิมพ์ลายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทองคำบริสุทธิ์



ภาพที่ 9 อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการติดเทปใส



ภาพที่ 10 ไมโครปิเปตต์



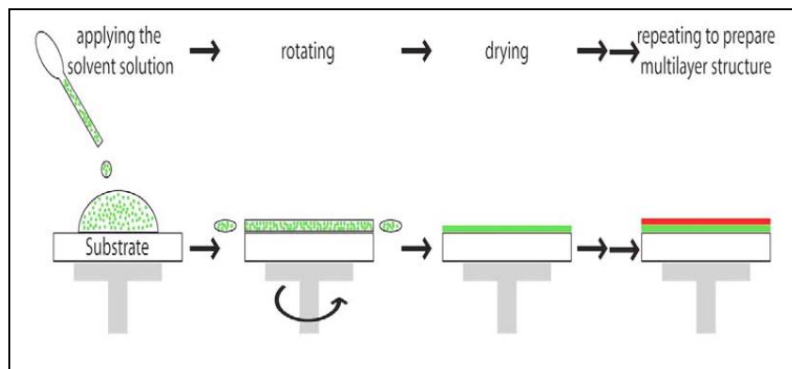
ภาพที่ 11 เครื่องชั่งสารเคมี



ภาพที่ 12 โกร่งบดสาร



ภาพที่ 13 เครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง

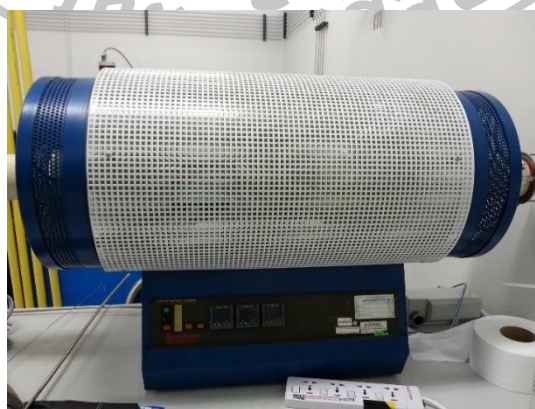


รูปที่ 15 การเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยง

ที่มา: ณัฐพงศ์ ม่วงไตรรัตน์, “การพัฒนาสารเคลือบไทเทเนียมออกไซด์ระดับนาโนบนเหล็กกล้าไร้สนิม” (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์, 2552), 16.



ภาพที่ 14 เต้าความร้อน



ภาพที่ 15 เต้าเผา

4. ลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่เตรียมโดยเทคนิคเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิสและการหา ลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์

4.1 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

4.1.1 วัสดุอุปกรณ์

4.1.1.1 เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD : Philip X' Pert PRO PW 3719)

4.1.1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM : JSM-2010, JEOL)

4.1.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM : Hitachi S-3400N)

4.1.1.4 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM : Bruker Malti: Mode 8)

4.1.1.5 ฟิล์มเซนเซอร์

4.1.2 สารเคมี

4.1.2.1 อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย
แพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%

4.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาค และเซนเซอร์ที่เตรียมได้

4.2.1 เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทำได้โดยการนำอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของแข็งที่เป็นผงขนาดเล็ก ไปอัดให้แน่น โดยอัดด้วยแรงกระทำสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง ให้ระนาบพื้นผิวเรียบเสมอกัน แล้วนำเข้าเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ภาพที่ 16) เพื่อทำการวิเคราะห์ผล [34]



ภาพที่ 16 เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ที่มา: ศูนย์บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, X-ray diffraction [XRD], เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน 2558, เข้าถึงได้จาก

<http://www.stsc.science.cmu.ac.th/thai/analyzation-tools-detail.php?id=345>

4.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคที่เตรียมได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ภาพที่ 17) เริ่มจากนำอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ทำให้อนุภาคกระจายในเอทานอล โดยให้ความถี่สูง ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นนำสารที่เตรียมได้หยดลงบนกริดทองแดง รอให้แห้ง ก่อนนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ผล



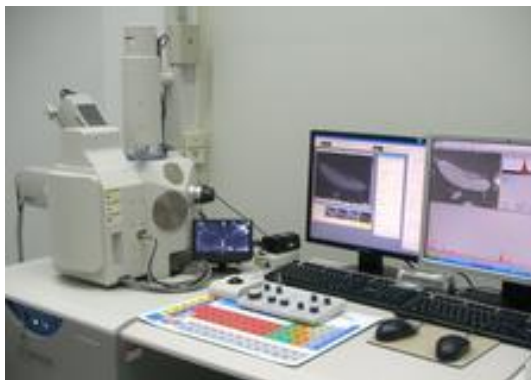
ภาพที่ 17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์, เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน 2558 เข้าถึงได้จาก

<https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/en/service>

4.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาโครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาพที่ 18) เริ่มจากนำเซนเซอร์ที่เตรียมได้มาติดบนสตัป (stub) หลังจากนั้นทำการเคลือบด้วยทองคำ เพื่อช่วยให้เกิดการสะท้อนของอิเล็กตรอน ก่อนนำเซนเซอร์ไปวิเคราะห์ผล



ภาพที่ 18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและจุลวิเคราะห์, เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน 2558 เข้าถึงได้จาก

<https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/index.php/en/service>

4.2.4 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

การเตรียมตัวอย่างสำหรับหาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มเซนเซอร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (ภาพที่ 19) สามารถนำเซนเซอร์ไปวิเคราะห์ได้เลย



ภาพที่ 19 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ที่มา: Monash University Malaysia, Nano-analytical platform (NAP), accessed September 10, 2015, available from

<http://www.eng.monash.edu.my/research/infrastructure/nano-analytical-platform>

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส โดยการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนที่เตรียมได้ ไปประดิษฐ์เซนเซอร์ เพื่อการศึกษา ลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์ ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM)

4.2 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope; SEM)

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy; AFM)

4.3 ผลของปริมาณสารเจือแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ที่มีต่อการตรวจวัดไอเอทานอล

4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

รูปที่ 16 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25-1 mol% เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า มีความเป็นผลึกสูงและเฟสที่ปรากฏเป็นเฟสของซิงก์ออกไซด์ ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งตรงกับค่ามาตรฐานจากข้อมูล *JCPDS* ที่หมายเลข 89-0510 อย่างไรก็ตาม พบว่า ไม่ปรากฏพีคของสารเจือแพลเลเดียมแต่อย่างใด ในงานวิจัยนี้ พบว่า การเติมสารเจือแพลเลเดียมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ เนื่องจากแพลเลเดียมมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าขนาดของซิงก์ออกไซด์อยู่มาก ดังนั้นจึงไม่เกิดการเข้าไปแทนที่ โดยสามารถอธิบายได้จากกฎของฮูม-โรเทอร์รี่ (Hume-Rothery rules) คือทฤษฎีการละลายของแข็งแบบแทนที่ [33] ดังนี้

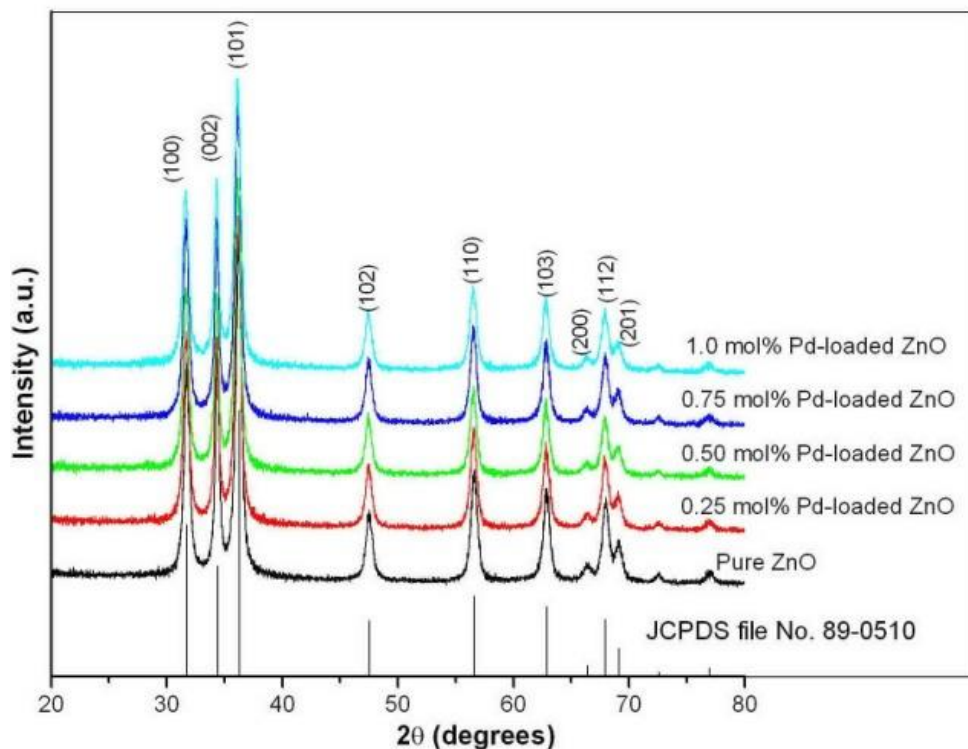
พิจารณารัศมีของอะตอม ตามหลักทฤษฎี รัศมีของอะตอมของตัวทำละลายและตัวถูกละลายที่ใกล้เคียงกัน หรือเท่ากันจึงจะเข้าไปแทนที่ในช่องว่างของผลึกได้ อีกทั้ง ร้อยละในการเข้าไปแทนที่นั้น ต้องมีอัตราส่วนร้อยละน้อยกว่า 15% ซึ่งในงานวิจัยนี้ รัศมีอะตอม Pd=140 pm, Zn=135 pm และค่าร้อยละการแทนที่เป็น 19.22%

พิจารณาค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ต้องมีค่าเท่ากัน หรือใกล้เคียงกันมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี Zn มีค่าเท่ากับ 1.65 และ Pd มีค่าเท่ากับ 2.20

พิจารณาอิเล็กตรอนวงนอก และเลขสถานะออกซิเดชัน ซึ่งถ้ามีค่าเท่ากันก็สามารถที่จะเข้าไปแทนที่ได้

พิจารณาลักษณะของโครงผลึกทางสัณฐานวิทยา ซึ่งถ้ามีโครงสร้างแบบเดียวกันก็สามารถเข้าไปแทนที่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ อนุภาคซิงก์มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล ในขณะที่ อนุภาคแพลเลเดียมมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก

จากทฤษฎีการละลายของแข็งแบบแทนที่ พบว่า ค่าร้อยละการแทนที่มีค่าเท่ากับ 19.22% ซึ่งมีค่ามากกว่า 15% ส่วนค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีนั้นมีค่าต่างกันอยู่มาก ลักษณะของโครงผลึกทางสัณฐานวิทยาทั้งของอนุภาคซิงก์และอนุภาคแพลเลเดียมมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้นอนุภาคแพลเลเดียมไม่สามารถเข้าไปแทนที่ในโครงผลึกของซิงก์ออกไซด์ได้ ในการเติมสารเจือแพลเลเดียมจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์

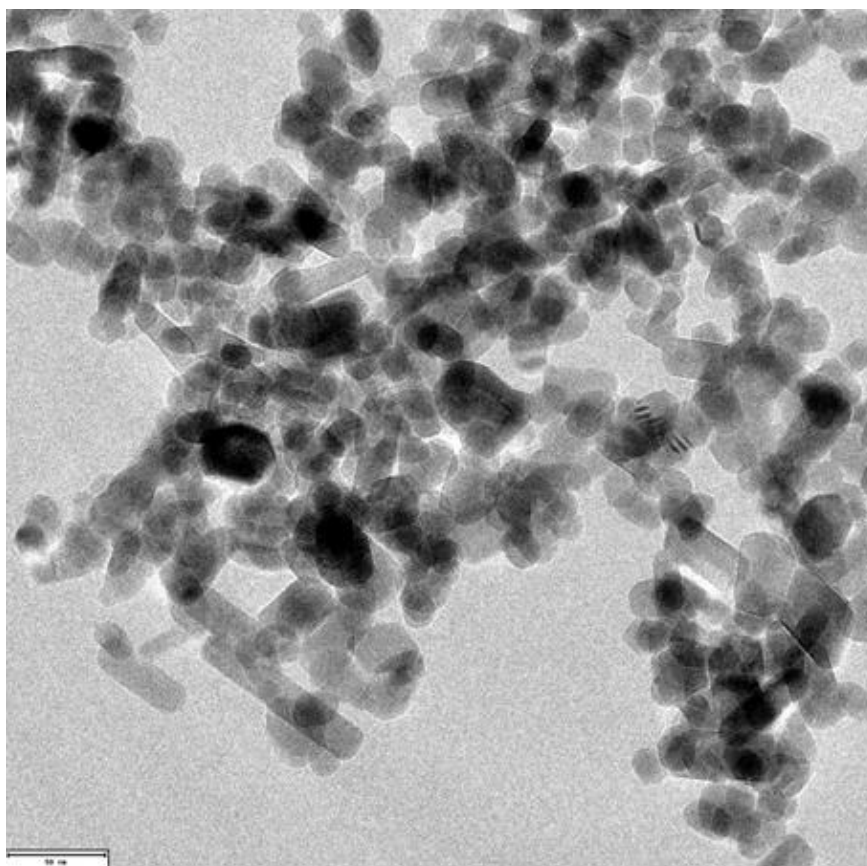


รูปที่ 16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25-1.0 mol%

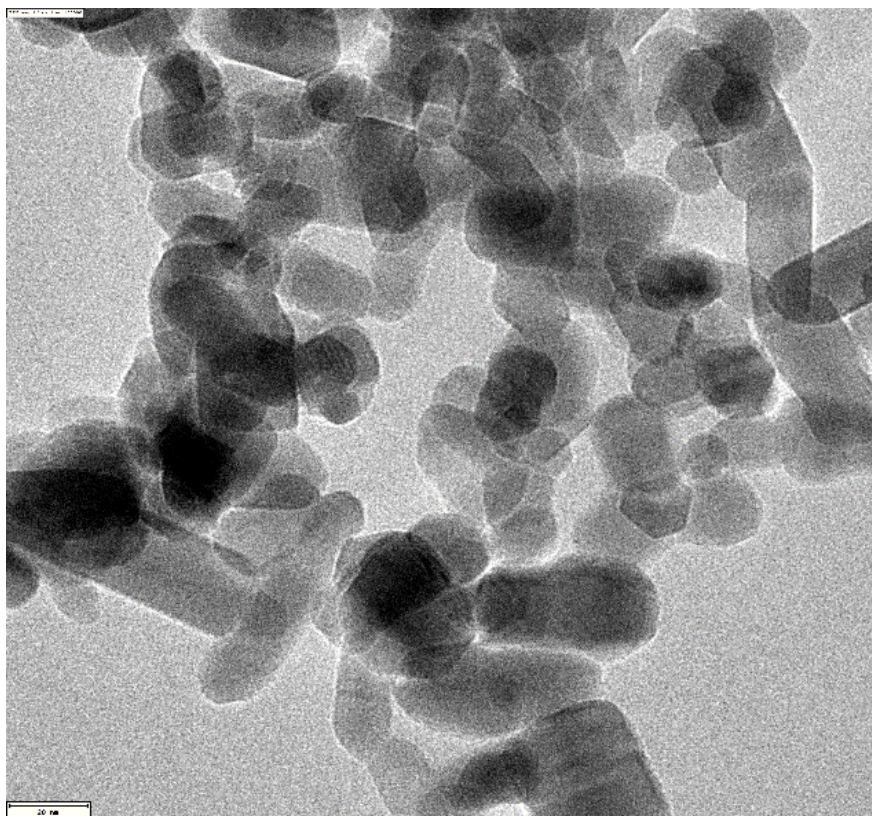
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM)

ภาพที่ 20-29 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25-1 mol% โดยมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนดังภาพที่ 30-34 จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแบบจุด ทำให้ทราบว่า อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณวิทยาของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ พบว่า อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มี 3 รูปแบบ ดังนี้ แบบทรงกลม มีขนาดอยู่ระหว่าง 8-34 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 15.3 นาโนเมตร หกเหลี่ยม มีขนาดอยู่ระหว่าง 7-37 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 17.4 นาโนเมตร และแบบแท่ง ความกว้างประมาณ 10-31 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 20-66 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค ความกว้าง 16.8 นาโนเมตร ความยาว 41.42 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 แบบ มีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่ม นอกจากนี้ ยังไม่พบอนุภาคแพลเลเดียมในภาพถ่าย TEM เนื่องจากอนุภาคแพลเลเดียมมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของซิงก์-

ออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chawarat Siriwong และคณะ [35] ซึ่งทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทังสเตนออกไซด์ในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 และ 3.0 mol% พบว่าอนุภาคซิงก์ออกไซด์มี 3 รูปแบบ คือแบบทรงกลมและแบบหกเหลี่ยม มีขนาดอยู่ระหว่าง 5-25 นาโนเมตร และแบบแท่ง มีความกว้างอยู่ระหว่าง 5-10 นาโนเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 10-25 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังไม่พบอนุภาคทังสเตนออกไซด์เช่นกัน

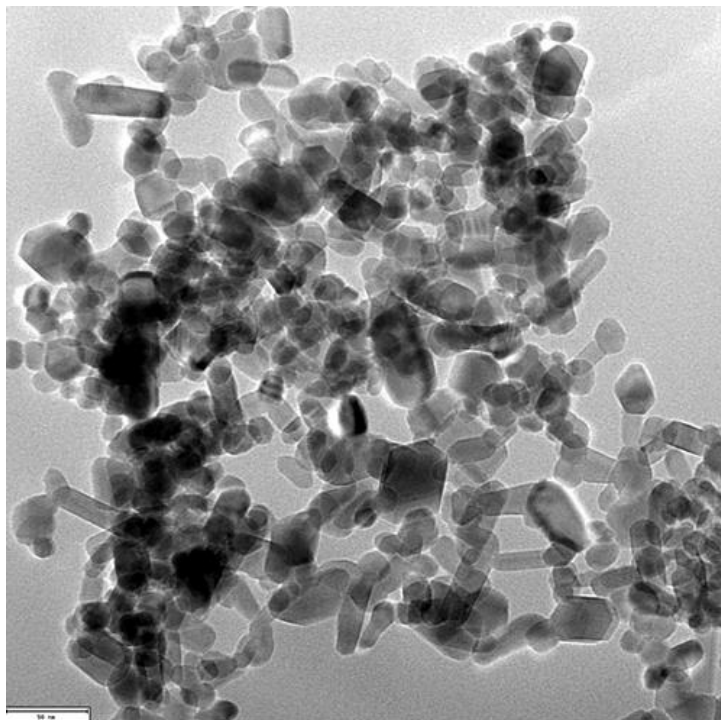


ภาพที่ 20 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ ที่กำลังขยาย 50000 เท่า

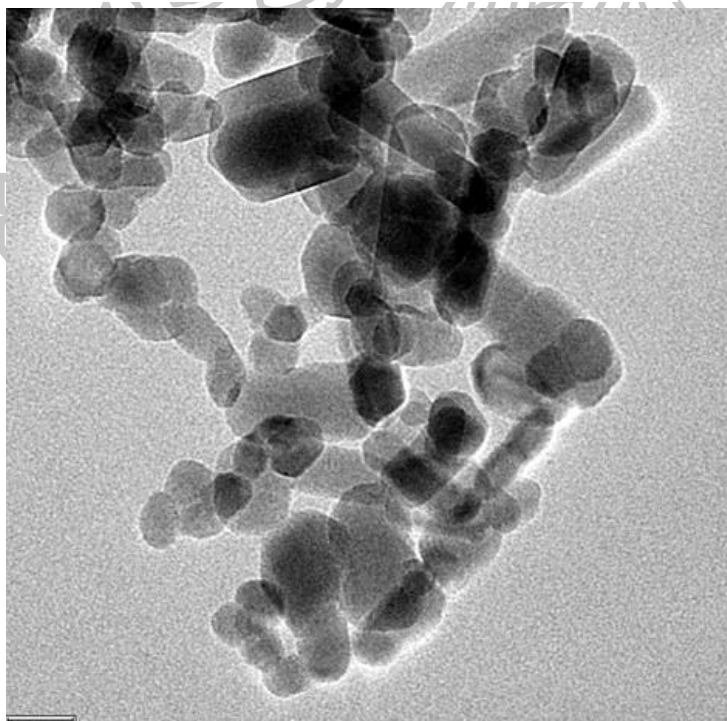


ภาพที่ 21 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์
บริสุทธิ์ ที่กำลังขยาย 100000 เท่า

ภาพที่ 20 และ 21 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ที่กำลังขยาย 50000 เท่า และ 100000 เท่า ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค พบว่า อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มี 3 รูปแบบ ดังนี้ แบบทรงกลมหกเหลี่ยม และแบบแท่ง สำหรับที่กำลังขยาย 100000 เท่า พบว่า มีอนุภาคแบบทรงกลมประมาณ 20 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 12-26 นาโนเมตร ทำการหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค พบว่า มีค่าเท่ากับ 16.1 นาโนเมตร อนุภาคแบบหกเหลี่ยมมีประมาณ 30 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 11-33 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 19.2 นาโนเมตร และอนุภาคแบบแท่งมีจำนวน 9 อนุภาค มีความกว้างอยู่ระหว่าง 12-25 นาโนเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 36-47 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค ความกว้าง 19.4 นาโนเมตร ความยาว 43.7 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่ม

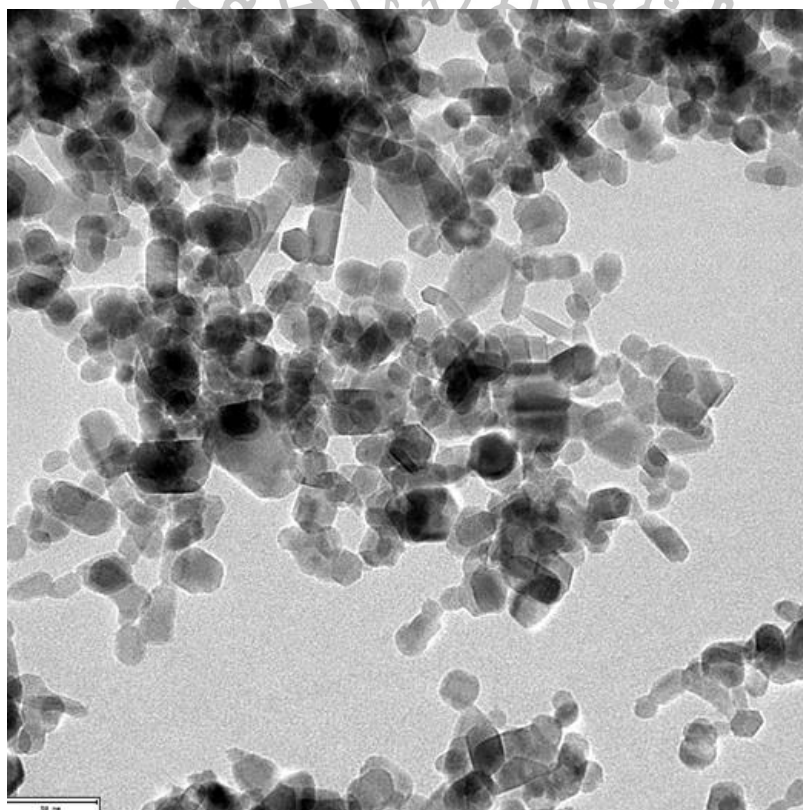


ภาพที่ 22 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า

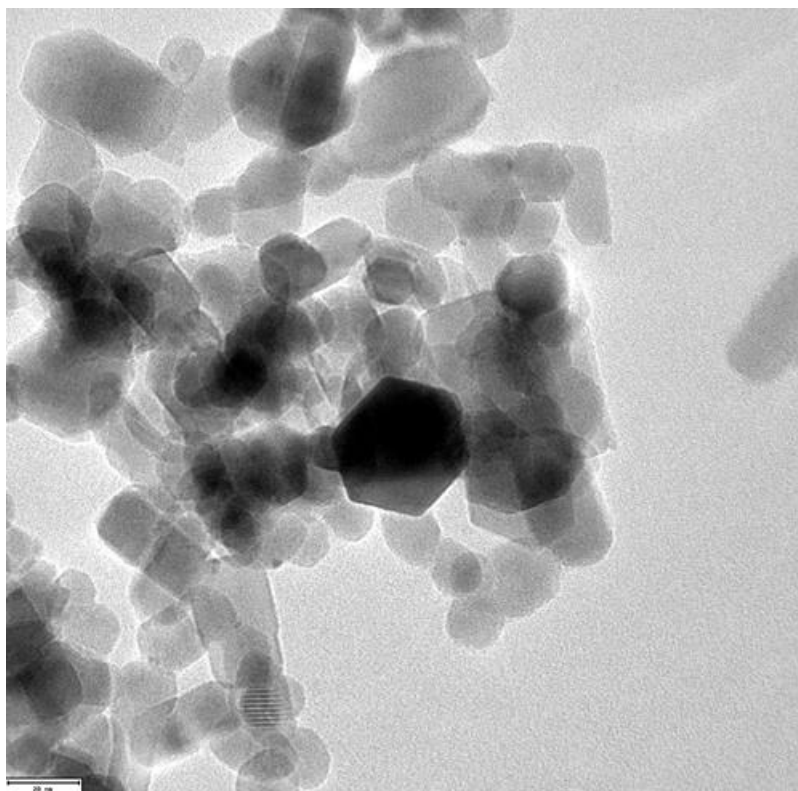


ภาพที่ 23 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol% ที่กำลังขยาย 100000 เท่า

ภาพที่ 22 และ 23 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า และ 100000 เท่า ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค พบว่า อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มี 3 รูปแบบ ดังนี้ แบบทรงกลม หกเหลี่ยม และแบบแท่ง สำหรับที่กำลังขยาย 100000 เท่า พบว่า มีอนุภาคแบบทรงกลมประมาณ 30 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 10-27 นาโนเมตร ทำการหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค พบว่า มีค่าเท่ากับ 15.8 นาโนเมตร อนุภาคแบบหกเหลี่ยมมีประมาณ 21 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 7-37 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 17 นาโนเมตร และอนุภาคแบบแท่งมีจำนวน 10 อนุภาค มีความกว้างอยู่ระหว่าง 11-23 นาโนเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 25-66 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค ความกว้าง 15.1 นาโนเมตร ความยาว 39.9 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่ม

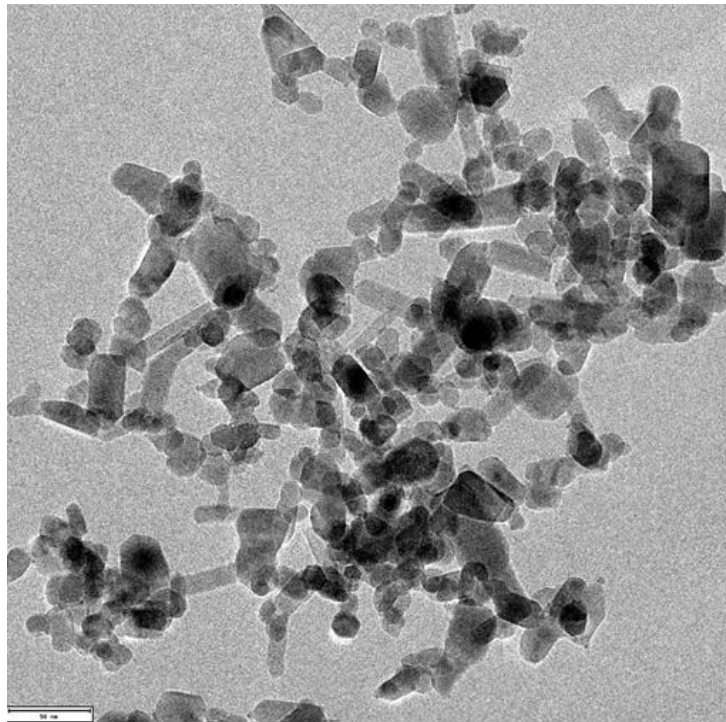


ภาพที่ 24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า

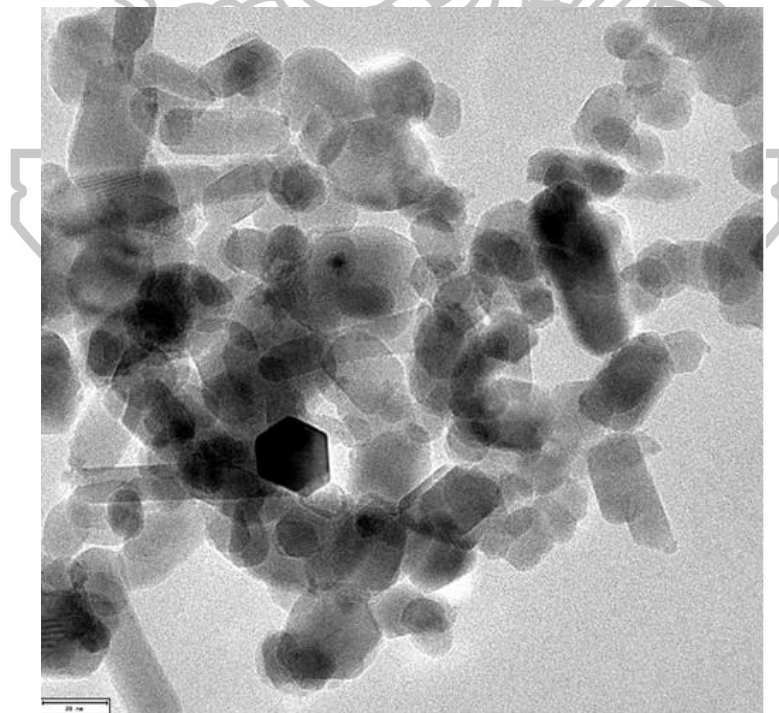


ภาพที่ 25 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่กำลังขยาย 100000 เท่า

ภาพที่ 24 และ 25 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า และ 100000 เท่า ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค พบว่า อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มี 3 รูปแบบ ดังนี้ แบบทรงกลม หกเหลี่ยม และแบบแท่ง สำหรับที่กำลังขยาย 100000 เท่า พบว่า มีอนุภาคแบบทรงกลมประมาณ 30 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 11-21 นาโนเมตร ทำการหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค พบว่า มีค่าเท่ากับ 15.6 นาโนเมตร อนุภาคแบบหกเหลี่ยมมีประมาณ 26 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 10-36 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 19 นาโนเมตร และอนุภาคแบบแท่งมีจำนวน 11 อนุภาค มีความกว้างอยู่ระหว่าง 14-29 นาโนเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 28-50 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค ความกว้าง 17.7 นาโนเมตร ความยาว 37.8 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่ม

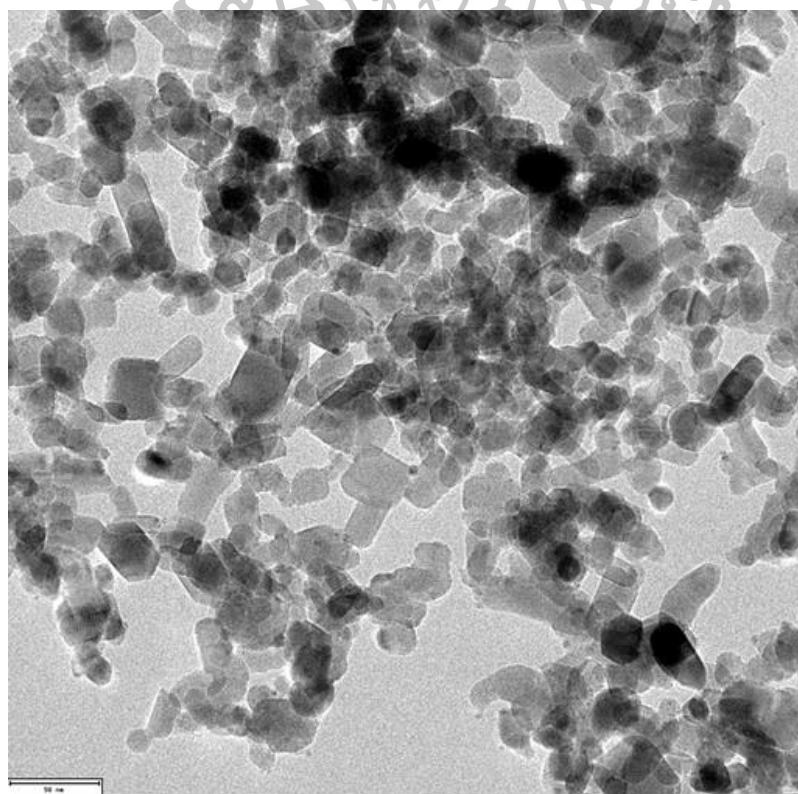


ภาพที่ 26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า

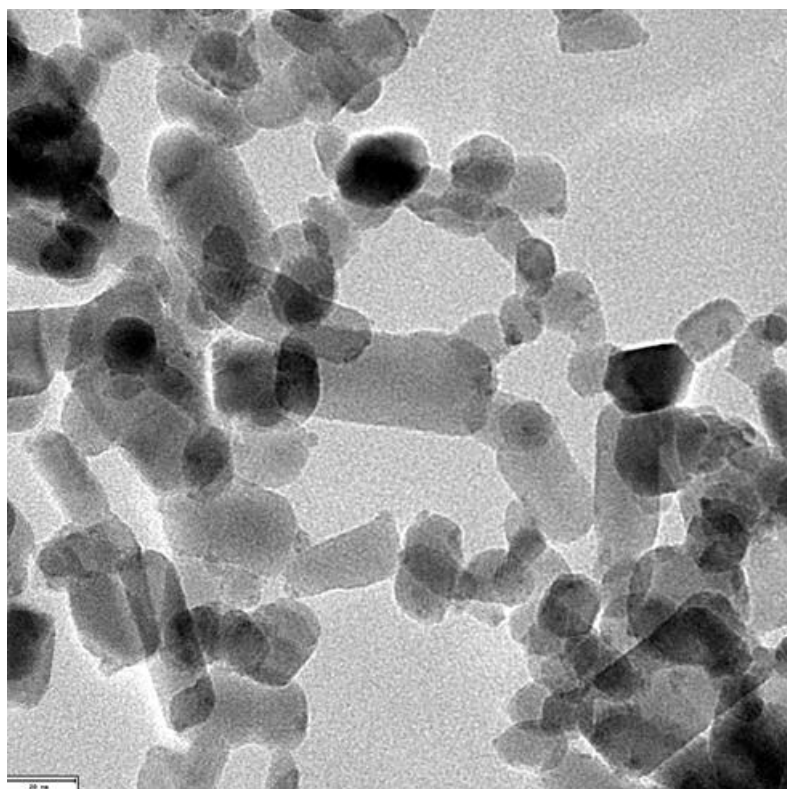


ภาพที่ 27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% ที่กำลังขยาย 100000 เท่า

ภาพที่ 26 และ 27 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า และ 100000 เท่า ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค พบว่า อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มี 3 รูปแบบ ดังนี้ แบบทรงกลม หกเหลี่ยม และแบบแท่ง สำหรับที่กำลังขยาย 100000 เท่า พบว่า มีอนุภาคแบบทรงกลมประมาณ 45 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 9-29 นาโนเมตร ทำการหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค พบว่า มีค่าเท่ากับ 13.8 นาโนเมตร อนุภาคแบบหกเหลี่ยมมีประมาณ 30 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 8-31 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 16.2 นาโนเมตร และอนุภาคแบบแท่งมีจำนวน 12 อนุภาค มีความกว้างอยู่ระหว่าง 10-22 นาโนเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 26-46 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค ความกว้าง 13.1 นาโนเมตร ความยาว 46 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่ม

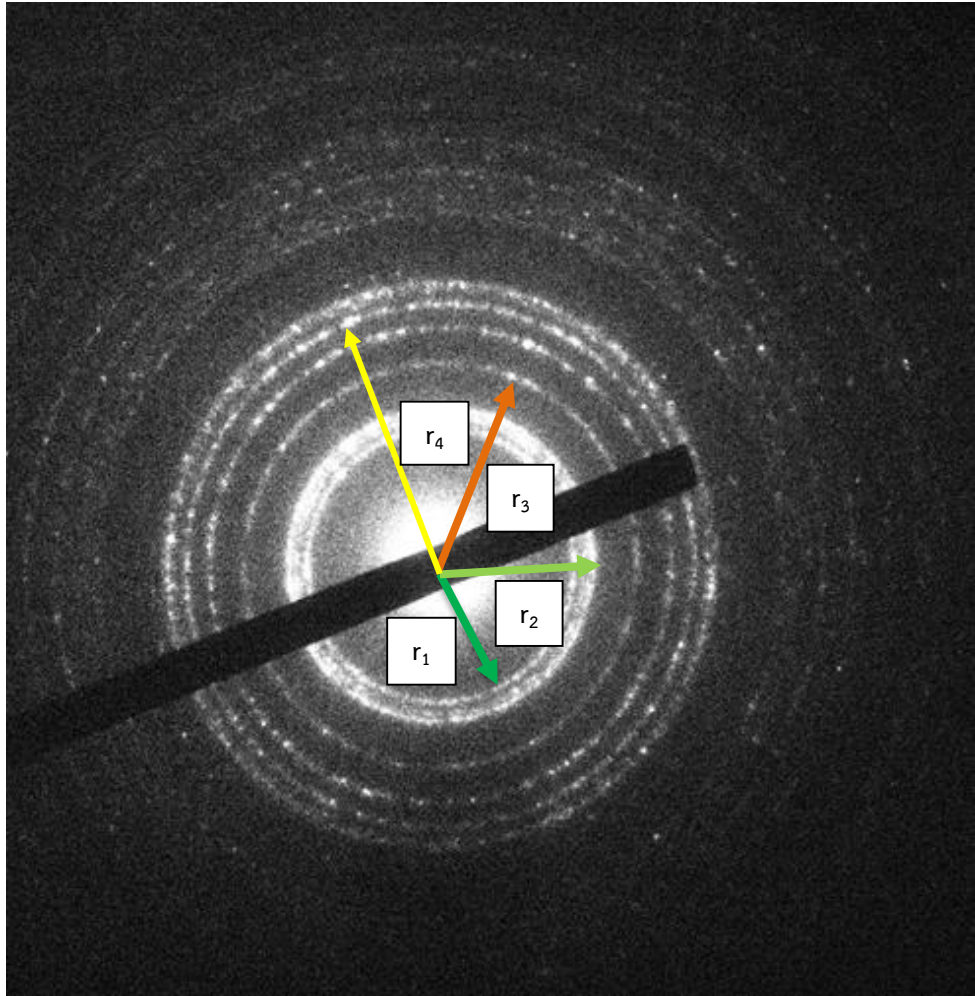


ภาพที่ 28 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า



ภาพที่ 29 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 mol% ที่กำลังขยาย 100000 เท่า

ภาพที่ 28 และ 29 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 mol% ที่กำลังขยาย 50000 เท่า และ 100000 เท่า ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค พบว่า อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มี 3 รูปแบบ ดังนี้ แบบทรงกลม หกเหลี่ยม และแบบแท่ง สำหรับที่กำลังขยาย 100000 เท่า พบว่า มีอนุภาคแบบทรงกลมประมาณ 40 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 8-34 นาโนเมตร ทำการหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค พบว่า มีค่าเท่ากับ 15.2 นาโนเมตร อนุภาคแบบหกเหลี่ยมมีประมาณ 16 อนุภาค มีขนาดอยู่ระหว่าง 10-24 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 15.6 นาโนเมตร และอนุภาคแบบแท่งมีจำนวน 14 อนุภาค มีความกว้างอยู่ระหว่าง 11-31 นาโนเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 20-57 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค ความกว้าง 18.5 นาโนเมตร ความยาว 39.7 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่ม



ภาพที่ 30 รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังภาพที่ 30 ทำการวัดค่าระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่านของวัสดุ (r_1, r_2, r_3, r_4) เพื่อนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนของระยะระนาบ d_{hkl} ดังสมการที่ (6)

$$\frac{r_{h'k'l'}}{r_{hkl}} = \frac{d_{hkl}}{d_{h'k'l'}} = \frac{\sqrt{h'^2 + k'^2 + l'^2}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

เมื่อได้ค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r แล้วทำการหาค่าระยะระนาบที่มีความสอดคล้องกัน

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนของระยะห่าง r แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{r_2}{r_1} = 1.224745$$

$$\frac{r_3}{r_1} = 1.581139$$

$$\frac{r_4}{r_1} = 1.936492$$

ระยะระนาบ d_{hkl} ซึ่งได้จากการสุ่มที่มีความสอดคล้องกับระยะห่าง r ได้ดังนี้

$$\frac{d_{200}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.224745$$

$$\frac{d_{112}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.581139$$

$$\frac{d_{103}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.581139$$

$$\frac{d_{200}}{d_{104}} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 4^2}}{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.936492$$

จากการวิเคราะห์ พบว่า ระยะห่าง r_1 ตรงกับระยะระนาบ d_{200}

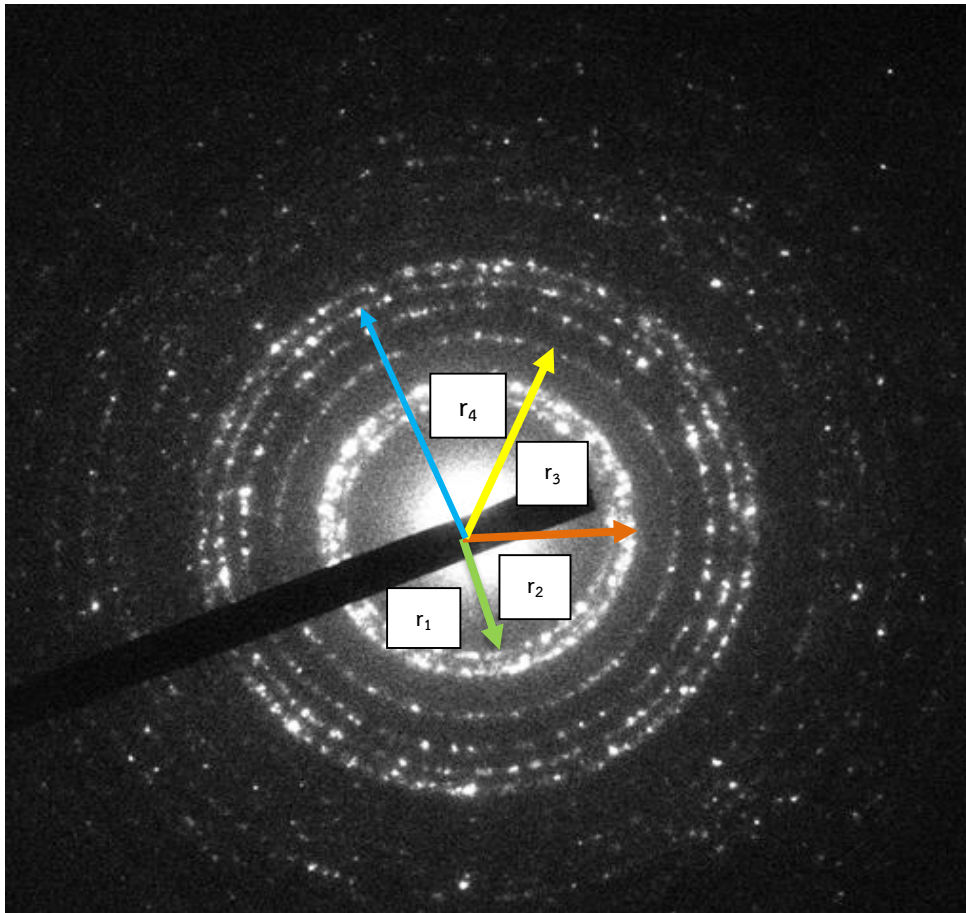
ระยะห่าง r_2 ตรงกับระยะระนาบ d_{112}

ระยะห่าง r_3 ตรงกับระยะระนาบ d_{103}

ระยะห่าง r_4 ตรงกับระยะระนาบ d_{104}

นำระยะระนาบที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS พบว่า ระยะระนาบที่ได้ตรงกับโครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ แบบเฮกซะโกนอล ที่ฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 89-0510





ภาพที่ 31 รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย
แพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol%

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังภาพที่ 31 ทำการวัดค่าระยะห่างระหว่างจุด
เลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่านของวัสดุ (r_1, r_2, r_3, r_4) เพื่อนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r ซึ่งค่าที่
ได้มีความสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนของระยะระนาบ d_{hkl} ดังสมการที่ (6)

$$\frac{r_{h'k'l'}}{r_{hkl}} = \frac{d_{hkl}}{d_{h'k'l'}} = \frac{\sqrt{h'^2 + k'^2 + l'^2}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

เมื่อได้ค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r แล้วทำการหาค่าระยะระนาบที่มีความสอดคล้องกัน

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนของระยะห่าง r แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{r_2}{r_1} = 1.095445$$

$$\frac{r_3}{r_1} = 1.264911$$

$$\frac{r_4}{r_1} = 1.414214$$

ระยะระนาบ d_{hkl} ซึ่งได้จากการสุ่มที่มีความสอดคล้องกับระยะห่าง r ได้ดังนี้

$$\frac{d_{102}}{r_1} = \frac{\sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2}}{r_1} = 1.095445$$

$$\frac{d_{112}}{r_1} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 2^2}}{r_1} = 1.095445$$

$$\frac{d_{102}}{r_1} = \frac{\sqrt{2^2 + 0^2 + 2^2}}{r_1} = 1.264911$$

$$\frac{d_{202}}{r_1} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 2^2}}{r_1} = 1.095445$$

$$\frac{d_{102}}{r_1} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 3^2}}{r_1} = 1.414214$$

$$\frac{d_{103}}{r_1} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 2^2}}{r_1} = 1.095445$$

จากการวิเคราะห์ พบว่า ระยะห่าง r_1 ตรงกับระยะระนาบ d_{102}

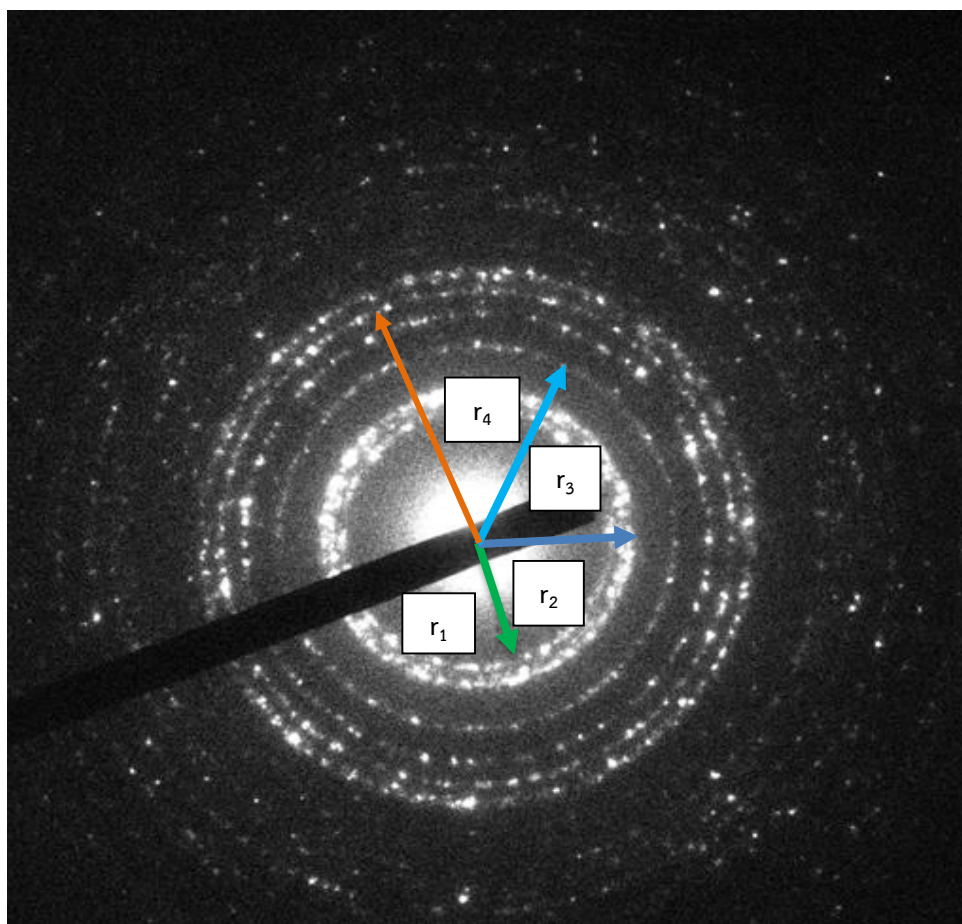
ระยะห่าง r_2 ตรงกับระยะระนาบ d_{112}

ระยะห่าง r_3 ตรงกับระยะระนาบ d_{202}

ระยะห่าง r_4 ตรงกับระยะระนาบ d_{103}

นำระยะระนาบที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS พบว่า ระยะระนาบที่ได้ตรงกับโครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ แบบเฮกซะโกนอล ที่ฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 89-0510





ภาพที่ 32 รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย
แพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol%

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังภาพที่ 32 ทำการวัดค่าระยะห่างระหว่างจุด
เลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่านของวัสดุ (r_1, r_2, r_3, r_4) เพื่อนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r ซึ่งค่าที่
ได้มีความสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนของระยะระนาบ d_{hkl} ดังสมการที่ (6)

$$\frac{r_{h'k'l'}}{r_{hkl}} = \frac{d_{hkl}}{d_{h'k'l'}} = \frac{\sqrt{h'^2 + k'^2 + l'^2}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

เมื่อได้ค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r แล้วทำการค้นหาค่าระยะระนาบที่มีความสอดคล้องกัน

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนของระยะห่าง r แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{r_2}{r_1} = 1.224745$$

$$\frac{r_3}{r_1} = 1.581139$$

$$\frac{r_4}{r_1} = 1.936492$$

ระยะระนาบ d_{hkl} ซึ่งได้จากการสุ่มที่มีความสอดคล้องกับระยะห่าง r ได้ดังนี้

$$\frac{d_{002}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.224745$$

$$\frac{d_{112}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{0^2 + 0^2 + 2^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.581139$$

$$\frac{d_{103}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{0^2 + 0^2 + 2^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.581139$$

$$\frac{d_{104}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 4^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.936492$$

จากการวิเคราะห์ พบว่า ระยะห่าง r_1 ตรงกับระยะระนาบ d_{002}

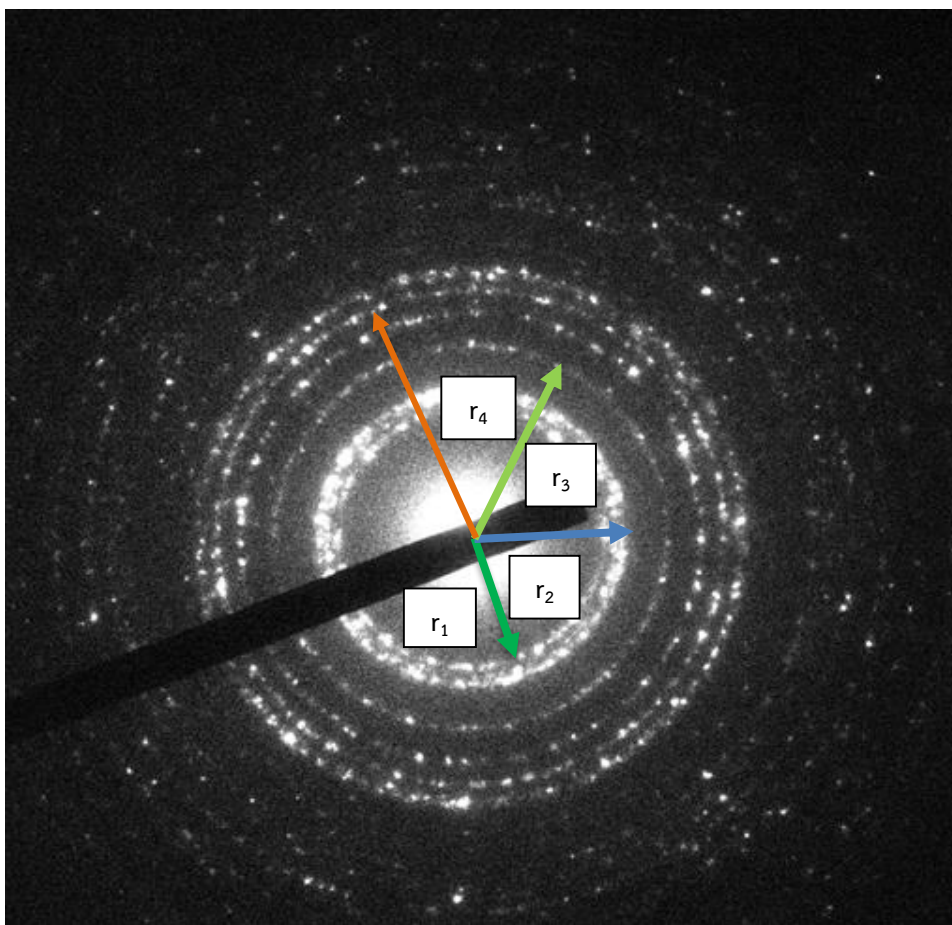
ระยะห่าง r_2 ตรงกับระยะระนาบ d_{112}

ระยะห่าง r_3 ตรงกับระยะระนาบ d_{103}

ระยะห่าง r_4 ตรงกับระยะระนาบ d_{104}

นำระยะระนาบที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS พบว่า ระยะระนาบที่ได้ตรงกับโครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ แบบเฮกซะโกนอล ที่ฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 89-0510





ภาพที่ 33 รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol%

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังภาพที่ 33 ทำการวัดค่าระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่านของวัสดุ (r_1, r_2, r_3, r_4) เพื่อนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนของระยะระนาบ d_{hkl} ดังสมการที่ (6)

$$\frac{r_{h'k'l'}}{r_{hkl}} = \frac{d_{hkl}}{d_{h'k'l'}} = \frac{\sqrt{h'^2 + k'^2 + l'^2}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

เมื่อได้ค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r แล้วทำการค้นหาค่าระยะระนาบที่มีความสอดคล้องกัน

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนของระยะห่าง r แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{r_2}{r_1} = 1.224745$$

$$\frac{r_3}{r_1} = 1.581139$$

$$\frac{r_4}{r_1} = 1.936492$$

ระยะระนาบ d_{hkl} ซึ่งได้จากการสุ่มที่มีความสอดคล้องกับระยะห่าง r ได้ดังนี้

$$\frac{d_{200}}{d_{112}} = \frac{\sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2}}{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.224745$$

$$\frac{d_{200}}{d_{103}} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 3^2}}{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.581139$$

$$\frac{d_{200}}{d_{104}} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 4^2}}{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.936492$$

จากการวิเคราะห์ พบว่า ระยะห่าง r_1 ตรงกับระยะระนาบ d_{200}

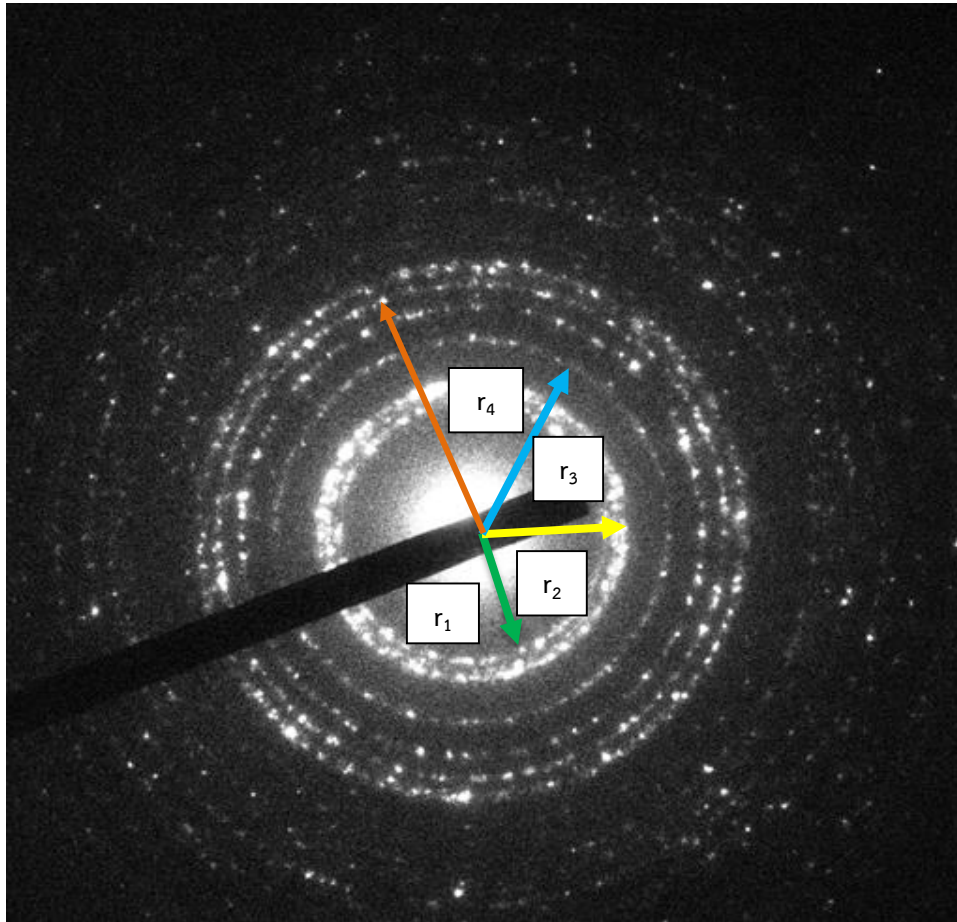
ระยะห่าง r_2 ตรงกับระยะระนาบ d_{112}

ระยะห่าง r_3 ตรงกับระยะระนาบ d_{103}

ระยะห่าง r_4 ตรงกับระยะระนาบ d_{104}

นำระยะระนาบที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS พบว่า ระยะระนาบที่ได้ตรงกับโครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ แบบเฮกซะโกนอล ที่ฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 89-0510





ภาพที่ 34 รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 mol%

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ดังภาพที่ 34 ทำการวัดค่าระยะห่างระหว่างจุดเลี้ยวเบนกับจุดส่องผ่านของวัสดุ (r_1, r_2, r_3, r_4) เพื่อนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r ซึ่งค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนของระยะระนาบ d_{hkl} ดังสมการที่ (6)

$$\frac{r_{h'k'l'}}{r_{hkl}} = \frac{d_{hkl}}{d_{h'k'l'}} = \frac{\sqrt{h'^2 + k'^2 + l'^2}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

เมื่อได้ค่าอัตราส่วนของระยะห่าง r แล้วทำการสุ่มหาค่าระยะระนาบที่มีความสอดคล้องกัน

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนของระยะห่าง r แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{r_2}{r_1} = 1.224745$$

$$\frac{r_3}{r_1} = 1.581139$$

$$\frac{r_4}{r_1} = 1.936492$$

ระยะระนาบ d_{hkl} ซึ่งได้จากการสุ่มที่มีความสอดคล้องกับระยะห่าง r ได้ดังนี้

$$\frac{d_{200}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.224745$$

$$\frac{d_{112}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.581139$$

$$\frac{d_{103}}{d_{100}} = \frac{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}}{\sqrt{1^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.581139$$

$$\frac{d_{200}}{d_{104}} = \frac{\sqrt{1^2 + 0^2 + 4^2}}{\sqrt{2^2 + 0^2 + 0^2}} = 1.936492$$

จากการวิเคราะห์ พบว่า ระยะห่าง r_1 ตรงกับระยะระนาบ d_{200}

ระยะห่าง r_2 ตรงกับระยะระนาบ d_{112}

ระยะห่าง r_3 ตรงกับระยะระนาบ d_{103}

ระยะห่าง r_4 ตรงกับระยะระนาบ d_{104}

นำระยะระนาบที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS พบว่า ระยะระนาบที่ได้ตรงกับโครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ แบบเฮกซะโกนอล ที่ฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 89-0510



ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่าง (r) กับระยะระนาบ (d_{hkl}) ของรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25-1.0 mol%

รูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน	ระยะห่าง (r)			
	r_1	r_2	r_3	r_4
อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์	d_{200}	d_{112}	d_{103}	d_{104}
อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol%	d_{102}	d_{112}	d_{202}	d_{103}
อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol%	d_{002}	d_{112}	d_{103}	d_{104}
อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol%	d_{200}	d_{112}	d_{103}	d_{104}
อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 1.0 mol%	d_{200}	d_{112}	d_{103}	d_{104}

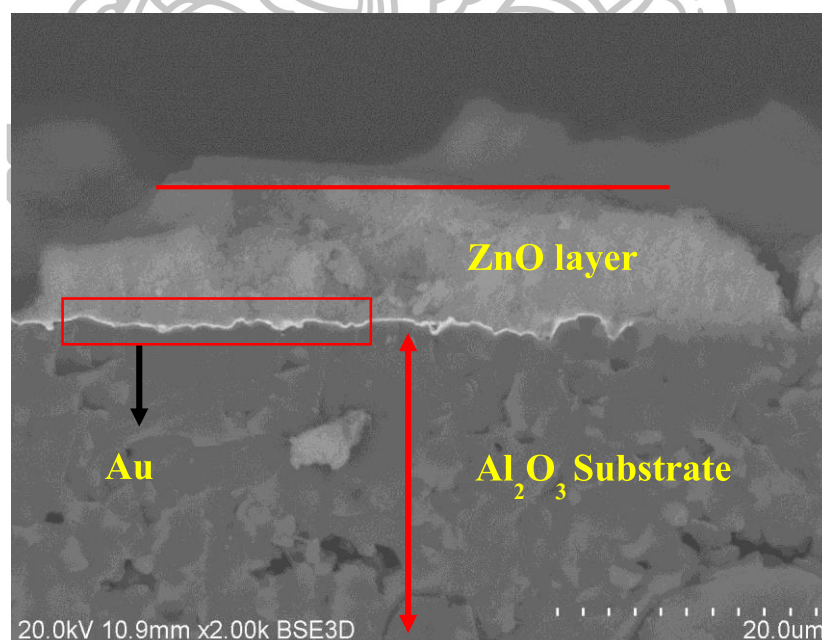
จากตารางที่ 2 ค่าระยะระนาบ (d_{hkl}) ที่ได้ในแต่ละระยะห่าง (r_1, r_2, r_3, r_4) ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25-1.0 mol% พบว่า ระยะระนาบที่ได้ทั้งหมดตรงกับโครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ แบบเฮกซะโกนอล ที่ฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 89-0510

4.2 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้

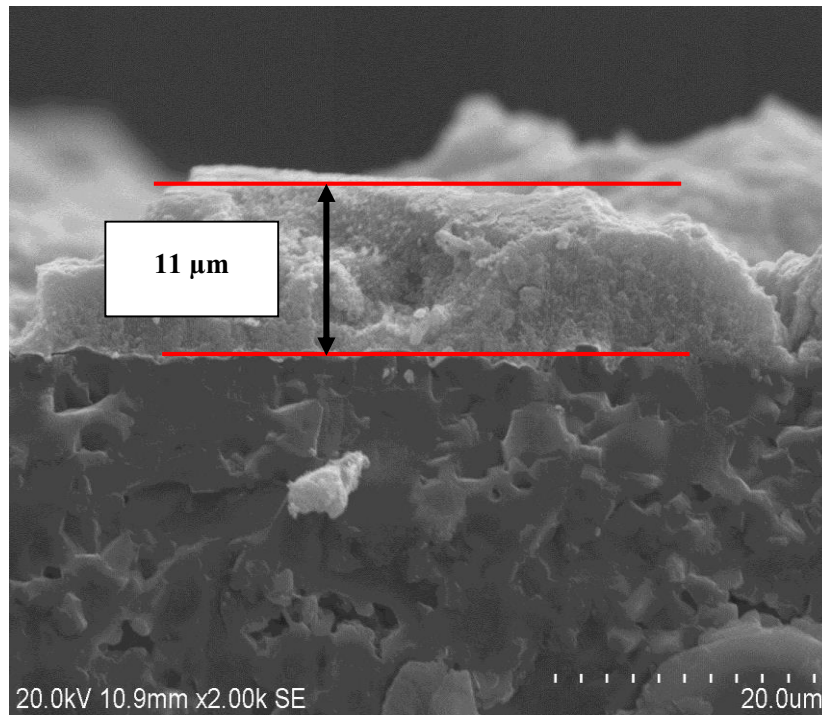
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron microscope; SEM)

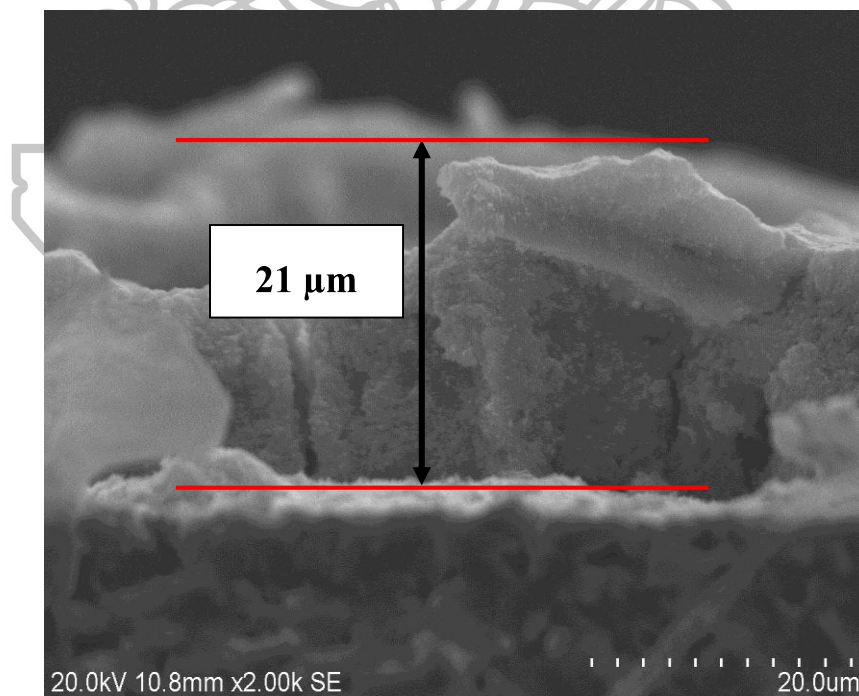
งานวิจัยนี้ ได้ใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในการวิเคราะห์โครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ และหาความหนาของฟิล์ม โดยภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ภาพที่ 35 แสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ของเซนเซอร์ ที่ประกอบไปด้วย ชั้นสเตรทอะลูมินาซึ่งอยู่ชั้นล่างสุดของเซนเซอร์ ชั้นต่อมาคือชั้นของอิเล็กโทรดที่พิมพ์ลายด้วยทองคำจะเห็นว่าชั้นนี้มีความสว่างมากกว่าชั้นอื่นเนื่องจากทองคำเป็นโลหะ ซึ่งจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากกว่าบริเวณอื่น ๆ และชั้นบนสุดของเซนเซอร์คือชั้นของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ ซึ่งความหนาของชั้นนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการสปินโคตติง ส่วนภาพที่ 36, 37 และ 38 แสดงภาคตัดขวางของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่เตรียมได้จากการสปินโคตติงจำนวน 1, 2 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ พบว่า ความหนาของชั้นฟิล์มเซนเซอร์ที่ได้แสดงในภาพที่ 36, 37 และ 38 มีค่าเป็น 11, 21 และ 26 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากความหนาของชั้นฟิล์มจะเห็นว่าเมื่อจำนวนครั้งในการสปินโคตติงมากขึ้น ความหนาของชั้นฟิล์มก็มากขึ้นด้วย



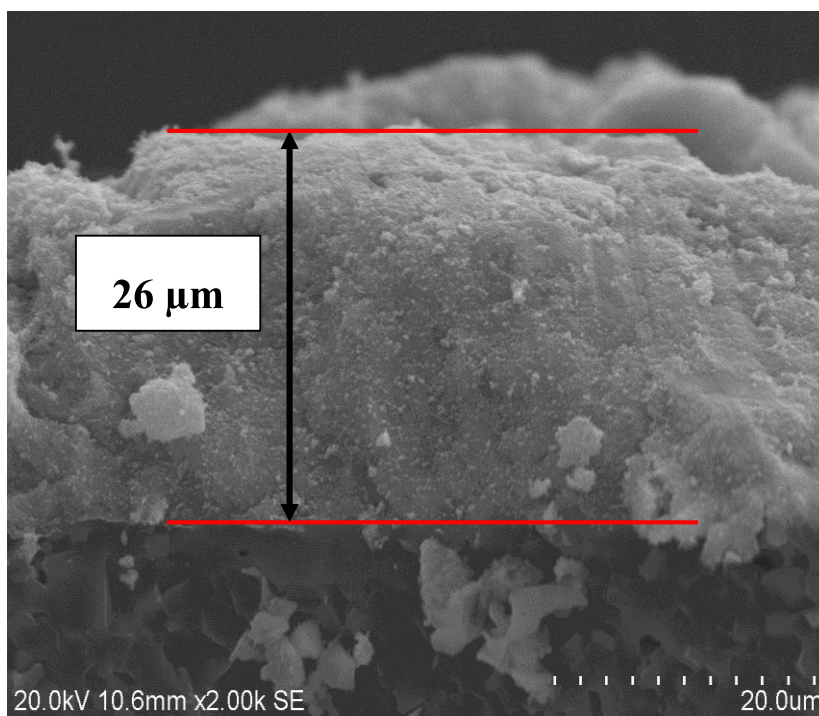
ภาพที่ 35 องค์ประกอบต่าง ๆ ของเซนเซอร์จากภาพถ่ายภาคตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 36 โครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่ได้จากการเตรียมโดยการสปินโคตติงจำนวน 1 ครั้ง



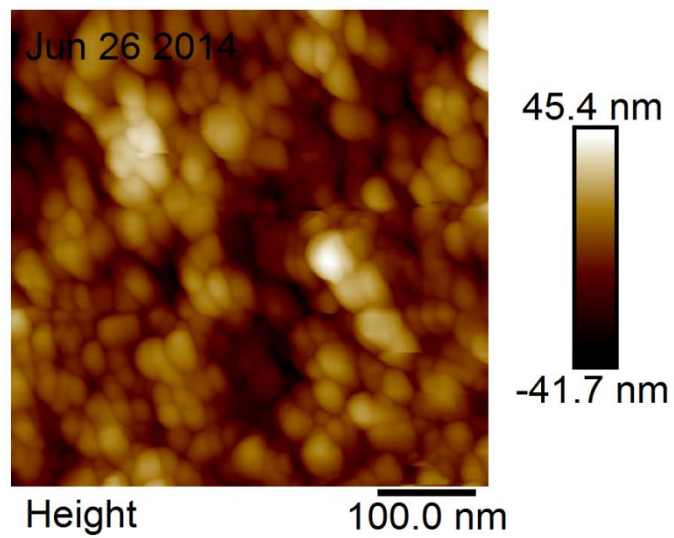
ภาพที่ 37 โครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่ได้จากการเตรียมโดยการสปินโคตติงจำนวน 2 ครั้ง



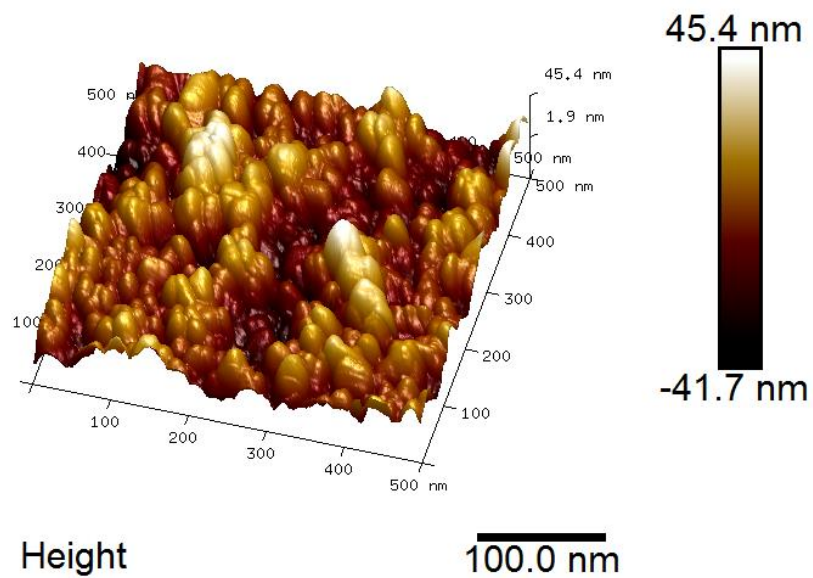
ภาพที่ 38 โครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ที่ได้จากการเตรียมโดยการสปินโคตติงจำนวน 3 ครั้ง

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy; AFM)

ภาพที่ 39 และ 40 แสดงลักษณะเฉพาะทางพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ใน 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ กำหนดให้ ระดับของสี่แทนเกรเดียนของความสูง โดยบริเวณที่มีความสว่างมากที่สุด แทนตำแหน่งที่อยู่สูงกว่าตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 45.4 นาโนเมตร และบริเวณที่มืดที่สุด แทนตำแหน่งที่อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งอ้างอิงเป็น 41.7 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ผล พบว่า ค่าผลต่างของความสูงระหว่างบริเวณที่สว่างและมืดที่สุด มีค่าเป็น 87.1 นาโนเมตร ซึ่งทำการหาค่าเฉลี่ยความขรุขระของฟิล์ม พบว่า ค่าเฉลี่ยความขรุขระของฟิล์มมีค่าเป็น 16.1 นาโนเมตร



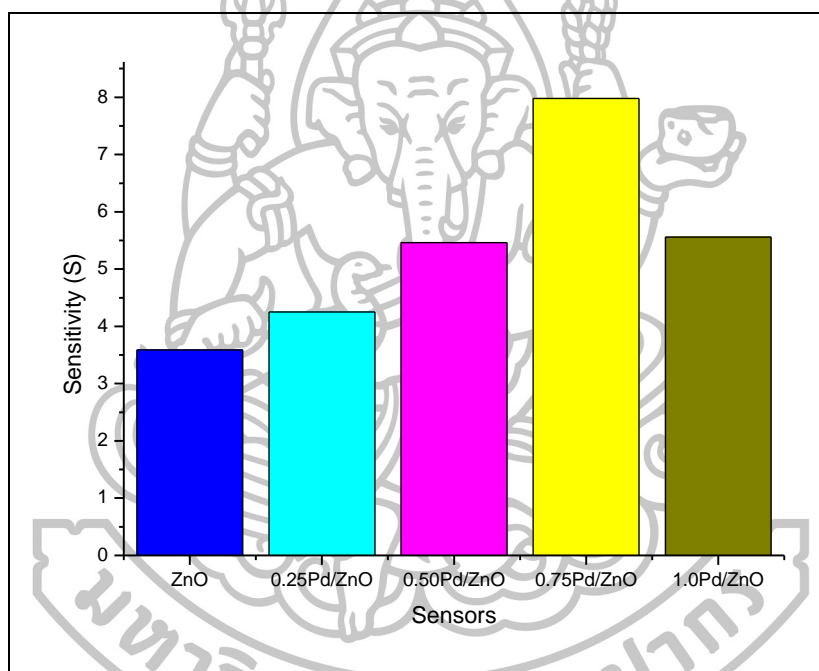
ภาพที่ 39 ลักษณะเฉพาะทางพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ใน 2 มิติ



ภาพที่ 40 ลักษณะเฉพาะทางพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% ใน 3 มิติ

4.3 ผลของปริมาณสารเจือปนในปริมาณต่าง ๆ ที่มีต่อการตรวจวัดไอเอทานอล

แผนภูมิที่ 1 แสดงค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25-1.0 mol% ที่ความหนา 11 μm ที่ได้จากการเตรียมโดยการสปินโคตติงจำนวน 1 ครั้ง เพื่อใช้ในการตรวจวัดไอเอทานอล ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 200 ppm ที่อุณหภูมิดำเนินการ 300 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ผล พบว่า ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% มีค่าเท่ากับ 3.59, 4.25, 5.46, 7.98 และ 5.56 ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณสารเจือปนที่ต่างกันก็ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์มีค่าที่แตกต่างกัน



แผนภูมิที่ 1 ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25-1.0 mol% ที่ความหนา 11 μm ที่ได้จากการเตรียมโดยการสปินโคตติงจำนวน 1 ครั้ง ตรวจวัดไอเอทานอล (200 ppm) ที่ 300 องศาเซลเซียส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% โดยใช้เทคนิคเฟลมสเปร์รี่ไฟโรลิซิส
2. การวิเคราะห์อนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ มีความเป็นผลึกสูง และมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล อีกทั้ง ยังไม่ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของอนุภาคแพลเลเดียม นอกจากนี้ ข้อมูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มีหลากหลายรูปแบบ ดังนี้ แบบทรงกลม มีขนาดอยู่ระหว่าง 8-34 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 15.3 นาโนเมตร แบบหกเหลี่ยม มีขนาดอยู่ระหว่าง 7-37 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเท่ากับ 17.4 นาโนเมตร และแบบแท่ง มีความกว้างอยู่ระหว่าง 10-31 นาโนเมตร ความยาวอยู่ระหว่าง 20-66 นาโนเมตร มีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาค ความกว้าง 16.8 นาโนเมตร ความยาว 41.42 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 แบบ มีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่ม จากข้อมูลที่ได้ยังไม่พบอนุภาคแพลเลเดียมในภาพถ่าย TEM เนื่องจากอนุภาคแพลเลเดียมมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของซิงก์ออกไซด์ แต่จากสีของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์และซิงก์ออกไซด์เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ สามารถยืนยันได้ว่ามีอนุภาคแพลเลเดียมอยู่จริง เนื่องจากอนุภาคที่เตรียมได้มีความเข้มของสีเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารเจือแพลเลเดียมเพิ่มขึ้น จากรูปแบบของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน ทำให้ทราบว่าอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในการวิเคราะห์โครงสร้างภาคตัดขวางของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50 mol% และหาความหนาของฟิล์ม พบว่า ความหนาของชั้น

ฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากการสปินโคตติงจำนวน 1, 2 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ มีค่าเป็น 11, 21 และ 26 ไมโครเมตร ตามลำดับ ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พบว่า ค่าเฉลี่ยความขรุขระมีค่าเท่ากับ 16.1 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ผลของปริมาณสารเจือปนในปริมาณต่าง ๆ ที่มีต่อการตรวจวัดไอเอทานอล พบว่า ปริมาณสารเจือปนที่ต่างกันก็ส่งผลให้ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์มีค่าแตกต่างกัน



รายการอ้างอิง

- [1] Nano materials technology Co., Ltd. (2015). **The source of nano, microfined zince oxide**. Accessed September 3. Available from <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=3>
- [2] ชัยกานต์ เลี้ยวหิรัญ. (2011). “การผลิตวัสดุนาโน ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส.” *Bio & Nano* 38, 220 (ธันวาคม): 33-35.
- [3] กิตติพงษ์ อำนวยสวัสดิ์. (2015.). “วัสดุนาโนซิงค์ออกไซด์ (nano-ZnO) และการประยุกต์ใช้.” เอกสารการอบรมนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี เสนอที่วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- [4] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. (2015). **Palladium**. เข้าถึงเมื่อ 3 กันยายน. เข้าถึงได้จาก <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Pd.html>
- [5] อัครพงศ์ พันธุ์พุกษ์. (2016). “สมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ.” เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 09416461 Semiconductor Physics.
- [6] ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธุ์. (2013). “การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคคลื่นไมโครเวฟ” รายงานผลการวิจัย
- [7] นรินทร์ สิริกุลรัตน์. (2015). **โครงสร้างและสมบัติของวัสดุ**. เข้าถึงเมื่อ 3 กันยายน. เข้าถึงได้จาก physics.science.cmu.ac.th/physics/images/.../บทที่%201%20โครงสร้างในวัสดุ.pdf
- [8] Muhendishane. (2015). **Metallerin Kristal yapisi**. Accessed September 3. Available from <http://muhendishane.org/kutuphane/temel-malzeme-bilgisi/metallerin-kristal-yapisi>
- [9] ศราวุธ ยงประพัฒน์. (2015). **การหาแลตทิซผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์**. เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน. เข้าถึงได้จาก <http://www.tu.ac.th/org/science/chemistry/data/Event/solid/topiceleven.html>
- [10] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อินเทอร์เน็ตมหาวิทยาลัยมหิดล. (2558). **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน**. เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน. เข้าถึงได้จาก <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>

- [11] (2558). **กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)**. เข้าถึงเมื่อ 10 กันยายน. เข้าถึงได้จาก <http://sor-por-chor.blogspot.com/2012/01/electron-microscope.html>
- [12] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. (2541). “การวิเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Atomic force microscopy.” เอกสารประกอบการสอนรายวิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [13] Atomic Force Microscope in Nano-Scale Research. (2555). เอกสารรายงานผลการเข้าร่วมอบรมเชิงปฏิบัติการ เสนอที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 27 กันยายน.
- [14] Aslam, M., and others. (1999). “A highly selective ammonia gas sensor using surface-ruthenated zinc oxide.” **Sensors and Actuators** 75, 2 (May): 162-167
- [15] F Chaabouni, M Abaab, and B Rezig. (2004). “Effect of the substrate temperature on the properties of ZnO films grown by RF magnetron sputtering.” **Materials Science and Engineering:B** 109, 1-3 (June): 236-240.
- [16] Cheng, X.L., and others. (2004). “ZnO nanoparticles thin films : preparation, characterization and gas-sensing property.” **Sensors and Actuators B** 102: 248-252.
- [17] Dikovska, A.Og., and others. (2005). “Thin ZnO films produced by pulsed laser deposition.” **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials** 7, 3 (June): 1329-1334.
- [18] Ying Liu, and others. (2005). “Synthesis and gas sensing properties of ZnO crystal flakes.” **Journal of Materials Chemistry** 15: 2316-2320.
- [19] Zhu, B.L., and others. (2005). “The gas-sensing properties of thick film based on tetrapod shaped ZnO nanopowders.” **Materials Letters** 59, 8-9 (April): 1004-1007
- [20] Zhi-Peng Sun., and others. (2006). “Rapid synthesis of ZnO nano-rods by one-step, room-temperature, solid-state reaction and their gas-sensing properties.” **Institute of physics publishing** 17, 9: 2266-2270.
- [21] Jiaqiang Xu., and others. (2008). “Studies on alcohol sensing mechanism of ZnO based gas sensors.” **Sens. Actuators B**. 132: 334-339.

- [22] Liu, F.-T., and others. (2009). "ZnO nanorod gas sensor for NO₂ detection." **Chem. E.** 40, 5: 528-532.
- [23] Tong Zhang, and others. (2009). "Development of microstructure In/Pd-doped SnO₂ sensor for low-level CO detection." **Sensors and Actuators B** 139, 2 (June): 287-291.
- [24] Viruntachar Kruefu, and others. (2011). "Selectivity of flame-spray-made Nb/ZnO thick films towards NO₂ gas." **Sensors and Actuators B: Chemical** 156, 1 (August): 360-367.
- [25] Chougule, M.A., S. Sen, and V.B. Patil. (2012). "Fabrication of nanostructured ZnO thin film sensor for NO₂ monitoring." **Ceram. Int.** 38, 4: 2685-2692.
- [26] Ozturk, S., N. Kilinc, and Z.Z. Ozturk. (2013). "Fabrication of ZnO nanorods for NO₂ sensor applications: effect of dimensions and electrode position." **J. Alloys Compd.** 581: 196-201.
- [27] Chang, C.-J., and others. (2014). "Ce-doped ZnO nanorods based low operation temperature NO₂ gas sensors." **Ceram. Int.** 40, 7: 10867-10875.
- [28] Siddheswaran, R., and others. (2014). "Highly c-axis oriented ZnO:Ni thin film nanostructure by RF magnetron sputtering: Structural, morphological and magnetic studies." **Applied Surface Science** 316 (October): 524-531.
- [29] Volkan Senay, and others. (2014). "ZnO thin film synthesis by reactive radio frequency magnetron sputtering." **Applied Surface Science** 318 (November): 2-5.
- [30] Hassan H. Shokry, and others. (2014). "Synthesis, characterization and fabrication of gas sensor devices using ZnO and ZnO:In nanomaterials." **Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences** 3, 3 (September): 216-221.
- [31] Patil, Snehal D., and others. (2015). "Particle size dependent gas sensing performance of ZnO Nanorods based thick film resistors." **Intern. J. on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication** 3, 8 (August): 5063-5068.

- [32] Wei Tang, and others. (2015). “Mechanism for acetone sensing property of Pd-loaded SnO₂ nanofibers prepared by electrospinning: Fermi-level effects.” **Journal of Materials Science** 50, 6 (March): 2605-2615.
- [33] Liewhiran, C., and others. (2009). “H₂ Sensing Response of Flame-Spray-Made Ru/SnO₂ Thick Films Fabricated from Spin - Coated Nanoparticles.” **Sens.** 9,11: 8996-9010.
- [34] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. (2558). “ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์.” **กรมวิทยาศาสตร์บริการ** 63, 197 (มกราคม): 38-40.
- [35] Chawarat Siriwong, and Sukon Phanichphant. (2013). “Flame-made tungsten loaded zinc oxide nanoparticles in hybrid photovoltaic application.” **J. Sci.** 40, 2: 281-288.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นางสาวแสงเทียน แนบสนิท
ที่อยู่	29/2 หมู่ 9 ตำบลหัวเขา อำเภอเดิมบางนางบวช จังหวัดสุพรรณบุรี
ที่ทำงาน	-
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2556	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2557	ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม
ประวัติการทำงาน	-

