



การศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อประสิทธิภาพของ
แก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่ใช้วัสดุเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำเป็นฐานเซนเซอร์



โดย

นางสาวชุตีมา นาคमुख

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อประสิทธิภาพของ
แก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่ใช้วัสดุเซรามิกเผาพร้อมอนุภาคนำเป็นฐานเซนเซอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY ON THE IMPACT OF DETECTION LAYER THICKNESS ON
THE PERFORMANCE OF TIN DIOXIDE GAS SENSORS
USING LOW-TEMPERATURE CO-FIRED CERAMIC SUBSTRATES



By
MISS Chutima NAKMUK

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science PHYSICS
Department of PHYSICS
Academic Year 2023
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อ
ประสิทธิภาพของ
แก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่ใช้วัสดุเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ
เป็นฐานเซนเซอร์

โดย นางสาวชุตินา นาคमुख

สาขาวิชา ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวรัตน์ ศิริวงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีวิตา สุวรรณขวลิต

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรงค์ ฉิมพาลี)

พิจารณาเห็นชอบโดย
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิสระ มะศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวรัตน์ ศิริวงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีวิตา สุวรรณขวลิต)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี เอี่ยมพนากิจ)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(มนฤดี เลี้ยงรักษา)

650720002 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์, การตกตะกอนอย่างง่าย, สารยึดเกาะ, แก๊สเซ็นเซอร์, เซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ

นางสาว ชุติมา นาคमुख: การศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อประสิทธิภาพของ แก๊สเซ็นเซอร์ทินไดออกไซด์ที่ใช้วัสดุเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำเป็นฐานเซ็นเซอร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวรัตน์ ศิริวงษ์

งานวิจัยนี้ใช้อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เป็นวัสดุตรวจจับแก๊ส โดยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนอย่างง่ายและเติมเครื่องเติมวิตามินซีที่ทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะในปริมาณ 2%, 5% และ 10% เพื่อปรับขนาดของอนุภาค จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าทุกตัวอย่างมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วย FE-SEM และ TEM ทุกตัวอย่างมีลักษณะคล้ายทรงกลม องค์ประกอบทางเคมีที่ได้จาก FT-IR และ EDS แสดงให้เห็นว่าสารยึดเกาะมีผลต่อการลดขนาดของอนุภาคและยืนยันว่าทุกตัวอย่างเป็นอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ในการศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซ็นเซอร์ ได้มีการปรับความหนาของทินไดออกไซด์ตั้งแต่ 1-3 ชั้นด้วยวิธีการหยดสาร และใช้วัสดุเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำเป็นฐานเซ็นเซอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้พลังงานน้อยแต่มีค่าการตอบสนองสูง ประสิทธิภาพของแก๊สเซ็นเซอร์พิจารณาจากค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง เวลาการคืนสภาพ ความเสถียร ความไว ความจำเพาะ ชัดจำกัดการตรวจจับ และแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยทดสอบต่อแก๊ส 5 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย แอซิโตน ไนตริกออกไซด์ และเอทานอล ผลการทดลองพบว่า แก๊สเซ็นเซอร์ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$ เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีความจำเพาะต่อแก๊สเอทานอล มีค่าการตอบสนองสูงถึง 94 และใช้เวลาการตอบสนองสั้นเพียง 2 วินาที ต่อแก๊สเอทานอล ที่ความเข้มข้น 100 ppm ที่แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 3.2 โวลต์และสามารถตรวจจับแก๊สเอทานอล ได้ที่ความเข้มข้นต่ำถึง 2 ppm

650720002 : Major PHYSICS

Keyword : Tin dioxide nanoparticles, simple precipitation method, capping agent, gas sensor, Low-Temperature Co-fired Ceramic

MISS Chutima NAKMUK : Study on the Impact of Detection Layer Thickness on the Performance of Tin Dioxide Gas Sensors Using Low-Temperature Co-fired Ceramic Substrates Thesis advisor : Assistant Professor Chawarat Siriwong

This research utilizes tin dioxide nanoparticles as gas detection materials, synthesized through a simple precipitation process, and added vitamin C as a capping agent in varying amounts of 2%, 5%, and 10% to adjust particle size. XRD analysis revealed that all samples have a tetragonal structure. Physical characteristics examined by FE-SEM and TEM indicated that all samples exhibit spherical-like shapes. Chemical composition analysis using FT-IR and EDS showed that the capping agents reduced particle size and confirmed that all samples are tin dioxide nanoparticles. To study the impact of the detection layer thickness on gas sensor performance, the thickness of the tin dioxide was adjusted from 1 to 3 layers using the drop-casting method. The sensor base used low-temperature co-fired ceramic material, which is energy-efficient yet highly responsive. The performance of the gas sensors was evaluated based on response, response time, recovery time, stability, sensitivity, selectivity, detection limit, and optimal voltage, tested against five gases: hydrogen sulfide, ammonia, acetone, nitric oxide, and ethanol. The experimental results showed that the 10-SnO₂-3 gas sensor had the best performance, with high selectivity to ethanol, a response value 94, and a response time of only 2 seconds for ethanol at a concentration of 100 ppm. The optimal voltage was 3.2 volts, and the sensor could detect ethanol at concentrations as low as 2 ppm.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคำแนะนำเกี่ยวกับการทำงานวิจัย การตรวจสอบแก้ไข ตลอดจนการให้คำปรึกษาจาก ผศ.ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชีวิตา สุวรรณชวลิต อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มนตรี เอี่ยมพานากิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง ดร. มลฤดี เลี้ยงรักษา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำแก้ไขส่งผลให้ งาน ส่งผลให้วิทยานิพนธ์นี้มีความถูกต้อง และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบคุณดร.คทา จารุงศ์รังสี นางสาว มนัสวี ศรีรักษ์ และบุคลากรจากศูนย์นาโน เทคโนโลยีแห่งชาติ (นาโนเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่อำนวยความสะดวกสำหรับการใช้อุปกรณ์รับรู้แก๊ส และการวิเคราะห์สัญญาณจากอุปกรณ์ดังกล่าว ตลอดจนการให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัยในช่วงระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยซัพพอร์ตค่าใช้จ่ายในการดำรงชีวิต ความห่วงใย กำลังใจและอาหารที่แสนอร่อยของย่าเสมอมา และที่ขาดไม่ได้ขอขอบคุณ นายณัฐวุฒิ ใจอารีย์ ที่คอยช่วยเหลือทุก ๆ อย่างในการทำงานวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่คอยเป็นกำลังใจและเป็นแรงใจสำคัญ ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



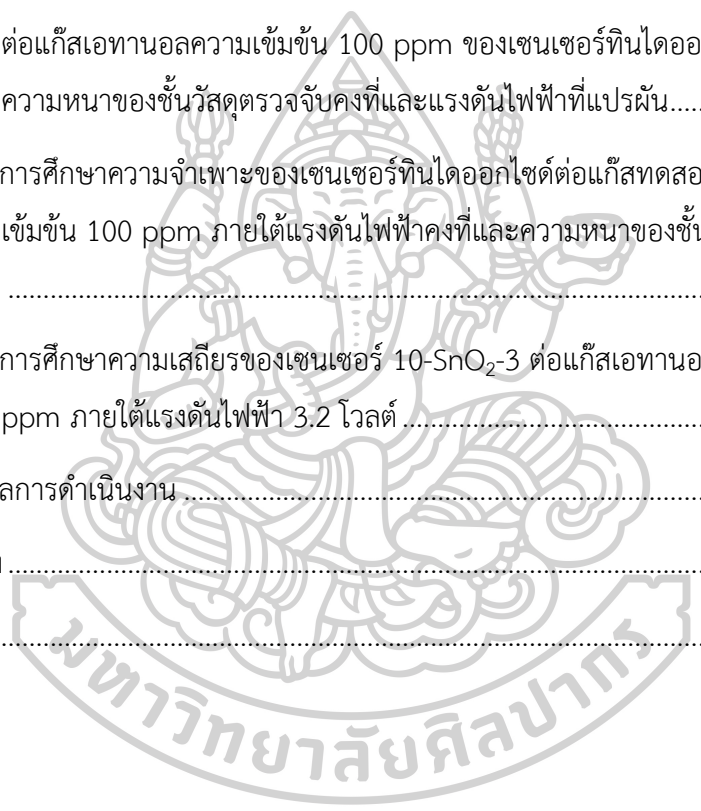
ชุตินา นาคมุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 ทินไดออกไซด์.....	5
2.1.2 สารกึ่งตัวนำ.....	7
2.1.3 สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์.....	9
2.1.4 สารยึดเกาะ.....	9
2.1.5 แก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์.....	10
2.1.6 หลักการทำงานของแก๊สเซนเซอร์.....	10
2.1.7 กลไกการตรวจจับแก๊สเอทานอล.....	13
2.1.8 ประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์.....	14

2.1.9	แก๊สทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย	16
2.1.10	เทคโนโลยีเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ.....	18
2.1.11	LTCC-GASSET	19
2.1.12	เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์	20
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.2.1	ตัวอย่างงานวิจัยที่สังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยใช้สารยึดเกาะร่วมด้วย.....	25
2.2.2	ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ทินไดออกไซด์เป็นวัสดุตรวจจับแก๊ส	27
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงาน.....	30
3.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.2	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย.....	31
3.3	การเตรียมตัวเชื่อมประสาน.....	34
3.4	การเตรียมอุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส.....	34
3.5	การทดสอบประสิทธิภาพแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์.....	37
บทที่ 4	ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน.....	40
4.1	การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์	40
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพ	40
4.1.2	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	41
4.1.3	การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	42
4.1.4	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	44
4.1.5	การคำนวณช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน.....	46
4.2	ลักษณะพื้นผิวและความหนาของวัสดุตรวจจับแก๊สบนฐานเซนเซอร์	48
4.3	การศึกษาประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์	50
4.3.1	การตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน	51

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สเอทานอลและการตอบสนองของเซนเซอร์ใน เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่างกันและแรงดันไฟฟ้าคงที่	53
4.3.3 เวลาการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน	55
4.3.4 เวลาการคืนสภาพของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน	56
4.3.5 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนสภาพ ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ภายใต้เงื่อนไข ความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับคงที่และแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน.....	58
4.3.6 การศึกษาความจำเพาะของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สทดสอบ 5 ชนิดที่ความ เข้มข้น 100 ppm ภายใต้แรงดันไฟฟ้าคงที่และความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่างกัน	59
4.3.7 การศึกษาความเสถียรของเซนเซอร์ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์	61
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	63
รายการอ้างอิง	65
ประวัติผู้เขียน.....	74



สารบัญตาราง

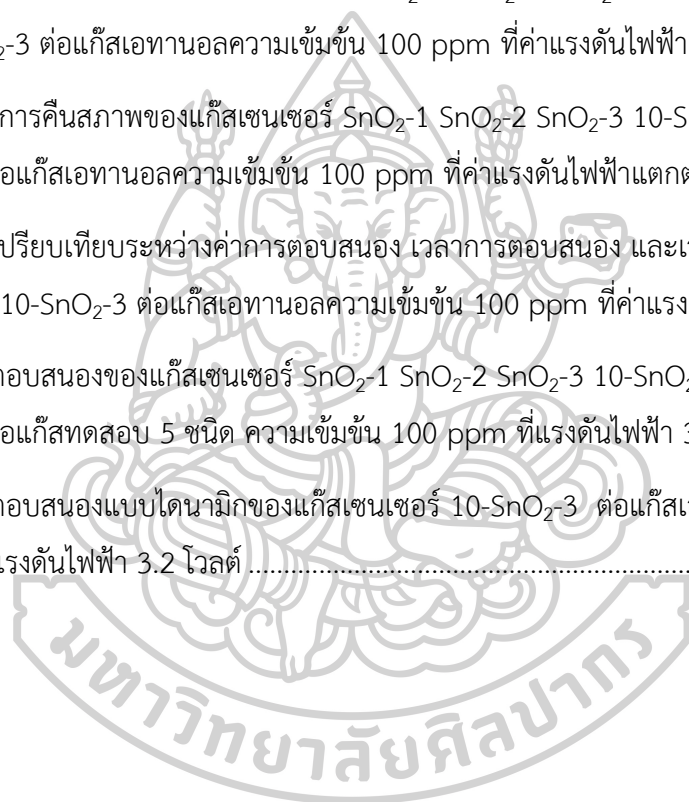
	หน้า
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของทินไดออกไซด์	6
ตารางที่ 2 การตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและพีเมื่อสัมผัสกับแก๊สที่อยู่ในหมวดการออกซิไดซ์และการรีดิวซ์.....	13
ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีผลกับร่างกายมนุษย์	16
ตารางที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์.....	44
ตารางที่ 5 เปอร์เซนต์น้ำหนักและเปอร์เซนต์อะตอมของดีบุก ออกซิเจนและคาร์บอน ที่อยู่ในอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์จาก EDS สเปกตรัม.....	44
ตารางที่ 6 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์.....	47
ตารางที่ 7 ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน	52
ตารางที่ 8 ค่าการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์ และความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่างกัน.....	54
ตารางที่ 9 เวลาการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน	55
ตารางที่ 10 เวลาการคืนสภาพของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน	57
ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนสภาพต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ของเซนเซอร์ 10-SnO ₂ -3 ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าแปรผัน	58
ตารางที่ 12 ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สทดสอบ 5 ชนิดที่ความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้แรงดันไฟฟ้าคงที่และความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่างกัน.....	60
ตารางที่ 13 คุณสมบัติการตรวจจับแก๊สเอทานอลของทินไดออกไซด์ในงานวิจัยอื่น ๆ.....	62

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 หน่วยเซลล์ของทินไดออกไซด์ที่มีดีบุกและออกซิเจน [34].....	6
รูปที่ 2 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของโลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน [44].....	7
รูปที่ 3 โครงสร้างตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี [45].....	8
รูปที่ 4 กลไกการก่อตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ [30].....	9
รูปที่ 5 กลไกของแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและพี ต่อแก๊สทดสอบที่อยู่ในหมวดของการรีดิวซ์ [18].....	12
รูปที่ 6 การแสดงแผนผังของการกำหนดค่าทางไฟฟ้าของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ใน (a) อากาศ และ (b) สภาพแวดล้อมเอทานอลตามลำดับ [49].....	14
รูปที่ 7 แก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น เมื่อสัมผัสกับแก๊สทดสอบที่อยู่ในหมวดของการรีดิวซ์.....	15
รูปที่ 8 ลักษณะของแผ่นเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ [56].....	18
รูปที่ 9 การใช้ประโยชน์ของแก๊สเซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์.....	19
รูปที่ 10 เครื่องเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน [58].....	20
รูปที่ 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [60].....	21
รูปที่ 12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [62].....	22
รูปที่ 13 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดแบบฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม [63].....	23
รูปที่ 14 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-Vis [65].....	25
รูปที่ 15 ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย.....	33
รูปที่ 16 แผนผังรวมขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์.....	33
รูปที่ 17 ภาพจำลองลักษณะของฐานเซนเซอร์.....	35
รูปที่ 18 ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส.....	35
รูปที่ 19 แผนผังรวมขั้นตอนการเตรียมฐานเซนเซอร์ของกลุ่ม SnO ₂	36

รูปที่ 20	แผนผังรวมขั้นตอนการเตรียมฐานเซนเซอร์ของกลุ่ม 10-SnO ₂	36
รูปที่ 21	การเชื่อมต่อฐานเซนเซอร์เข้ากับขั้วไฟฟ้าภายในอุปกรณ์รับรู้แก๊ส	37
รูปที่ 22	การติดตั้งอุปกรณ์รับรู้แก๊ส เครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องควบคุมปริมาณความเข้มข้นของแก๊สทดสอบ	38
รูปที่ 23	แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์รับรู้แก๊ส เครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องควบคุมปริมาณความเข้มข้นของแก๊สทดสอบ.....	38
รูปที่ 24	การตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า ความเข้มข้นแก๊สทดสอบ เวลาการปล่อยและหยุดแก๊สทดสอบ ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณ	39
รูปที่ 25	ลักษณะทางกายภาพของผงนาโนทินไดออกไซด์ก่อนและหลังเผา	40
รูปที่ 26	การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์	41
รูปที่ 27	SEM ของ (a) SnO ₂ (b) 2-SnO ₂ (c) 5-SnO ₂ และ (d) 10-SnO ₂ ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า.....	42
รูปที่ 28	TEM ของ (a)-(b) SnO ₂ (c)-(d) 2-SnO ₂ (e)-(f) 5-SnO ₂ และ (g)-(h) 10-SnO ₂ และกราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ที่กำลังขยาย 135,000 เท่า.....	43
รูปที่ 29	EDS สเปกตรัมของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ของตัวอย่าง (a) SnO ₂ (b) 2-SnO ₂ (c) 5-SnO ₂ และ (d) 10-SnO ₂	45
รูปที่ 30	FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ (a) ก่อนเผาและ (b) หลังเผา ของตัวอย่าง SnO ₂ 2-SnO ₂ 5-SnO ₂ และ 10-SnO ₂	46
รูปที่ 31	การเปรียบเทียบกราฟทอคสำหรับการหาช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์.....	47
รูปที่ 32	กราฟทอคสำหรับการหาช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ของ (a) SnO ₂ (b) 2-SnO ₂ (c) 5-SnO ₂ และ (d) 10-SnO ₂	48
รูปที่ 33	SEM ด้านบนของ (a) SnO ₂ -1 (b) SnO ₂ -2 (c) SnO ₂ -3 (d) 10-SnO ₂ -1 (e) 10-SnO ₂ -2 และ (f) 10-SnO ₂ -3 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า	49
รูปที่ 34	SEM ด้านตัดขวางของ (a) SnO ₂ -1 (b) SnO ₂ -2 (c) SnO ₂ -3 (d) 10-SnO ₂ -1 (e) 10-SnO ₂ -2 และ (f) 10-SnO ₂ -3 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	49

รูปที่ 35 การตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO ₂ -1 SnO ₂ -2 SnO ₂ -3 10-SnO ₂ -1 10-SnO ₂ -2 และ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน	52
รูปที่ 36 การตอบสนองแบบไดนามิกของแก๊สเซนเซอร์ SnO ₂ -1 SnO ₂ -2 SnO ₂ -3 10-SnO ₂ -1 10-SnO ₂ -2 และ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้นต่างกันและแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3.2 โวลต์....	53
รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ของแก๊สเซนเซอร์ SnO ₂ -1 SnO ₂ -2 SnO ₂ -3 10-SnO ₂ -1 10-SnO ₂ -2 และ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้นต่างกันและแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3.2 โวลต์	54
รูปที่ 38 เวลาการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO ₂ -1 SnO ₂ -2 SnO ₂ -3 10-SnO ₂ -1 10-SnO ₂ -2 และ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน	56
รูปที่ 39 เวลาการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์ SnO ₂ -1 SnO ₂ -2 SnO ₂ -3 10-SnO ₂ -1 10-SnO ₂ -2 และ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน	57
รูปที่ 40 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน	59
รูปที่ 41 การตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO ₂ -1 SnO ₂ -2 SnO ₂ -3 10-SnO ₂ -1 10-SnO ₂ -2 และ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สทดสอบ 5 ชนิด ความเข้มข้น 100 ppm ที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์.....	60
รูปที่ 42 การตอบสนองแบบไดนามิกของแก๊สเซนเซอร์ 10-SnO ₂ -3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์	61



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

แก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแก๊สหรือสารระเหยต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อม [1] มีบทบาทสำคัญอย่างมากสำหรับการรักษาความปลอดภัยในภาคอุตสาหกรรมที่ใช้แก๊สเป็นส่วนประกอบหลักและการใช้งานในพื้นที่ปิด เช่น ห้องน้ำ ห้องครัว โรงงาน และโรงพยาบาล การตรวจจับแก๊สอันตราย แก๊สรั่ว หรือควัน จะช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุในที่ทำงานหรือสถานที่ต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ แก๊สเซนเซอร์ยังมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการผลิตเพื่อรักษาคุณภาพและป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ของผลิตภัณฑ์ [2] แก๊สเซนเซอร์จึงมีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยใช้เทคโนโลยีที่สูงขึ้น [3] เช่น นำเทคโนโลยีเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Co-fired Ceramics, LTCC) ใช้เป็นฐานเซนเซอร์ [4-6] โดยเทคโนโลยีนี้สามารถผลิตเซนเซอร์ที่มีความไวต่อการตอบสนองต้นทุนต่ำ และมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ทำให้สามารถใช้งานที่ต้องการความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูงได้

สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้รับความสนใจอย่างมากในยุคปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างฉนวนและตัวนำ มีความสามารถในการควบคุมสภาพการนำไฟฟ้าได้ โดยการเพิ่มหรือลดปริมาณของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า จึงมักใช้ในการผลิตแผงวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ของภาคอุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักร และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor, MOS) ยังเป็นที่นิยมของการใช้เป็นวัสดุตรวจจับแก๊ส (Gas-sensing material) เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [7-9] ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) [10, 11] ทังสเตนออกไซด์ (WO₃) [12, 13] คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) [14-16] และดีบุกไดออกไซด์ (SnO₂) [17] เรียกแก๊สเซนเซอร์ชนิดนี้ว่า แก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor Gas Sensor, MOSs) โดยจะมีหลักการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรือค่าการนำไฟฟ้าจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนไอออน (O⁻) กับแก๊สทดสอบบนพื้นผิวของวัสดุตรวจจับ [18-20] ข้อดีหลักคือ มีความไวต่อแก๊สทดสอบ ความแม่นยำในการตรวจจับแก๊ส มีราคาที่เป็นมิตรและง่ายต่อการผลิต แต่ก็มีข้อจำกัด เช่น มีการตอบสนองต่ำต่อแก๊สทดสอบบางชนิด อาจทำให้มีปัญหาในการระบุแก๊สที่แตกต่างกันได้ [21] แต่ในขณะเดียวกันก็มีความสามารถในการตรวจจับแก๊สได้หลากหลาย เช่น แก๊สหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas, LPG) [22] ไฮโดรเจน (Hydrogen, H₂)

[23] คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) [5] และกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) [24] ทำให้มีการประยุกต์ใช้งานได้ในหลายอุตสาหกรรม

ทินไดออกไซด์ (SnO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductors) มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap, E_g) เท่ากับ 3.6 อิเล็กตรอนโวลต์ [25] โดยปริมาณของการทำงานเป็นวัสดุตรวจจับแก๊สยังคงน้อยอยู่เมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดอื่น ๆ [3] การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ (SnO_2 nanoparticle) ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย (Simple precipitation method) นั้นเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด [26] ซึ่งในการทบทวนงานวิจัยก่อนหน้านี้ มีการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์โดยใส่สารยึดเกาะ (Capping agent) เช่น กลูโคส (Glucose) [27] วิตามินซี (Vitamin C) [28] สารสกัดเปลือกส้ม (Citrus sinensis) [29] สารสกัดจากต้นชา (Camellia sinensis) [30] และ สารสกัดจากเมล็ดเกรพฟรุต (Citrus paradisi) [31] เพื่อชะลอการเกิดปฏิกิริยา ยับยั้งการเติบโตของผลึก ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง มีการกระจายตัวมากขึ้น และอาจมีรูปร่างที่เปลี่ยนไป ผลลัพธ์ดังกล่าวจะส่งผลให้อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้มีพื้นผิวสัมผัสมากขึ้น และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ เพราะการมีพื้นผิวสัมผัสของวัสดุตรวจจับมากขึ้นนั้น ทำให้ออกซิเจนไอออนมีปริมาณที่มากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยากับแก๊สทดสอบได้ในปริมาณมาก แก๊สเซนเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานหรือค่าการนำไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัด นำไปสู่ค่าการตอบสนอง (Response) สูง เวลาการตอบสนอง (Response time) สั้น และกล่าวได้ว่าเป็นแก๊สเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพ [19, 23, 32]

งานวิจัยนี้เลือกการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่ายและใช้เครื่องตีมันดับเบิลซีรสเลมอนและมะนาว (Double C Shot Vitamin C 200% Lemon Lime) เป็นสารยึดเกาะ มีการปรับอัตราส่วนต่อปริมาตรที่ต่างกัน 4 ค่า เครื่องตีมันดับเบิลซีรสเลมอนและมะนาวมีส่วนประกอบสำคัญคือ น้ำเลมอน (จากน้ำเลมอนเข้มข้น) 20% น้ำมะนาว (จากน้ำมะนาวเข้มข้น) 1% วิตามินซี 0.075% น้ำตาล 4% และกรดซิตริก (Citric acid) ที่ได้จากน้ำเลมอนและมะนาว ในเครื่องตีมัน โดยงานวิจัยก่อนหน้ามีการใช้ส่วนผสมข้างต้นบางตัวเพื่อทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะในขั้นตอนการสังเคราะห์สาร ผลลัพธ์ที่ได้คืออนุภาคมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร มีโครงสร้างแบบรูทูลและไม่มีเฟสอื่นผสม อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้จะถูกวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยาผ่านเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) และฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด

สเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) และคำนวณช่องว่างแถบพลังงานโดยใช้ผลจากเครื่องวัดการดูดกลืนแสงยูวี-วิส (UV-Vis spectrophotometer)

นอกจากการลดขนาดของอนุภาคที่สามารถทำให้มีพื้นผิวสัมผัสมากขึ้น การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับแก๊สก็ทำได้เช่นกัน เพราะเป็นการเพิ่มปริมาณสารที่ใช้เป็นวัสดุตรวจจับโดยตรง และจะส่งผลต่อค่าการตอบสนองที่สูงขึ้น การทดลองจะมีการปรับระดับความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับให้ความหนาตั้งแต่ 1-3 ชั้น ด้วยวิธีการหดยาสาร เพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ โดยใช้เทคโนโลยีเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำเป็นฐานเซนเซอร์ เพราะเป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานน้อยแต่มีค่าการตอบสนองสูง ประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์พิจารณาจาก ค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง เวลาการคืนสภาพ (Recovery time) ความเสถียร (Stability) ความไว (Sensitivity) ความจำเพาะ (Selectivity) ขีดจำกัดการตรวจจับ (Limit Of Detection) และแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม (Operating Voltage) ต่อแก๊สทดสอบทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) แอมโมเนีย (Ammonia) แอซีโตน (Acetone) ไนตริกออกไซด์ (Nitric Oxide) และเอทานอล (Ethanol) โดยใช้ อุปกรณ์รับรู้แก๊ส กระบวนการสร้าง และวิเคราะห์สัญญาณจากอุปกรณ์ดังกล่าว สิทธิบัตรการประดิษฐ์ไทย (คำขอเลขที่ 1801005900-2561 และ 2301005878-2566) ผลิตขึ้นโดย ดร.คทา จารวงศ์รังสี และคณะ จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอนอย่างง่าย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเติมสารยึดเกาะในขั้นตอนการสังเคราะห์เพื่อลดขนาดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบจากความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

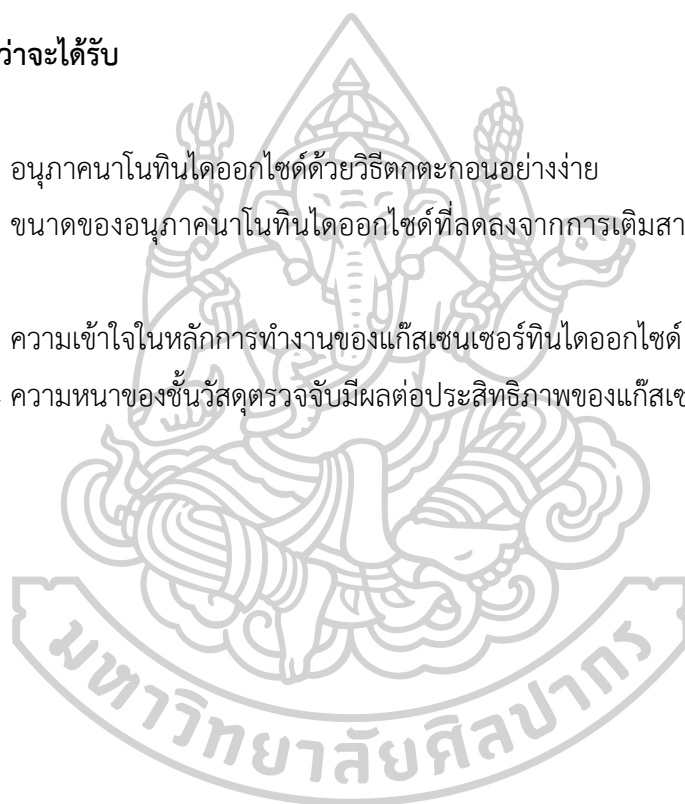
งานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์รับรู้แก๊ส กระบวนการสร้าง และวิเคราะห์สัญญาณจากอุปกรณ์ดังกล่าว ซึ่งได้ขอจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ไทย จากกรมทรัพย์สินทางปัญญาแล้ว (คำขอเลขที่ 1801005900-

2561 และ 2301005878-2566) ผลิตขึ้นโดย ดร.คทา จารุงศ์รังสีและคณะ จากศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ (สวทช.)

เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาต่อแก๊สเซนเซอร์ ผู้วิจัยได้ทำการปรับระดับความหนาของ ชั้นวัสดุตรวจจับด้วยวิธีการหยดสาร ให้มีความหนาตั้งแต่ 1-3 ชั้น โดยมีแก๊สทดสอบทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย แอซีโตน ไนตริกออกไซด์และเอทานอล ที่ความเข้มข้นของแก๊ส ทดสอบ 2-100 ppm และแรงดันไฟฟ้า 2.0-3.6 โวลต์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอนอย่างง่าย
- 1.4.2 ขนาดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่ลดลงจากการเติมสารยึดเกาะในขั้นตอนการสังเคราะห์
- 1.4.3 ความเข้าใจในหลักการทำงานของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์
- 1.4.4 ความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับมีผลต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์



บทที่ 2

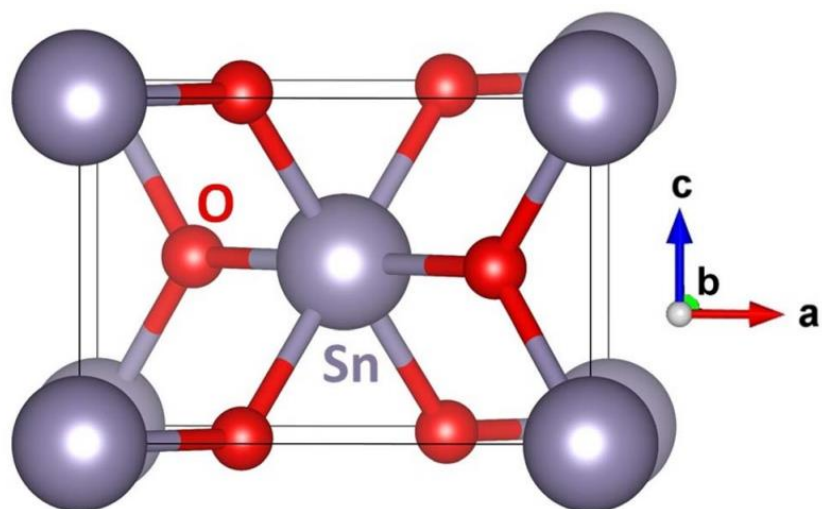
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทินไดออกไซด์

อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ (SnO_2 nanoparticle) มีคุณสมบัติหลายอย่าง เช่น มีระดับความโปร่งใสสูงในช่วงแสงที่มองเห็นได้ ซึ่งอยู่ในตระกูลออกไซด์นำไฟฟ้าแบบโปร่งใส (Transparent Conducting Oxide, TCO) และเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap, E_g) 3.6-3.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ 330 เคลวิน [33] มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวเหลืองไปจนถึงสีเทา คุณสมบัติทางผลึกศาสตร์ของ SnO_2 คือมีโครงสร้างแบบรูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) มีค่าพารามิเตอร์ $a = b = 4.737$ และ $c = 3.138$ อังสตรอม แต่ละหน่วยเซลล์ประกอบด้วยหน่วยสูตร SnO_2 สองหน่วย คือ ดีบุก (Sn) 2 อะตอม และออกซิเจน (O) 4 อะตอม [34] มีมวลโมเลกุลประมาณ 150.69 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นประมาณ 6.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเนื่องจากมีจุดเดือดประมาณ 1800-1900 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวประมาณ 1500-1630 องศาเซลเซียส ทำให้มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่หลากหลายได้ [35]

อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น วิธีการโซล-เจล (Sol-Gel Method) [36] วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Method) [37] วิธีการตกตะกอนอย่างง่าย (Simple Precipitation Method) [38-40] เป็นต้น มีการประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ฟิล์มบางของ SnO_x ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบความถี่กว้างแบบโพสิทีฟคริสตัลไลน์ มีความน่าสนใจอย่างมากสำหรับการใช้งานใน TCO อิเล็กโทรด หรือเป็นวัสดุของสัญญาณแบบแอคทีฟในทรานซิสเตอร์ฟิล์มบาง (Thin Film Transistors, TFTs) สำหรับจอแสดงผลแบบยืดหยุ่น (Bendable/Flexible display) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) และไดโอดเปล่งแสงอินทรีย์ (Organic Light Emitting Diodes, OLED) ฟิล์มบาง SnO_2 เป็นวัสดุที่มีการศึกษามากที่สุดสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุตรวจจับแก๊ส (Gas-sensing materials) [4, 17, 19] เช่น เซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal-oxide semiconductor sensors) ที่ใช้ SnO_x นั้นมีการผลิตในภาคอุตสาหกรรมที่หลากหลาย นอกจากนี้ SnO_2 ยังน่าสนใจสำหรับการใช้งานในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion batteries) [41, 42] และเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric material)



รูปที่ 1 หน่วยเซลล์ของทินไดออกไซด์ที่มีติบุกและออกซิเจน [34]

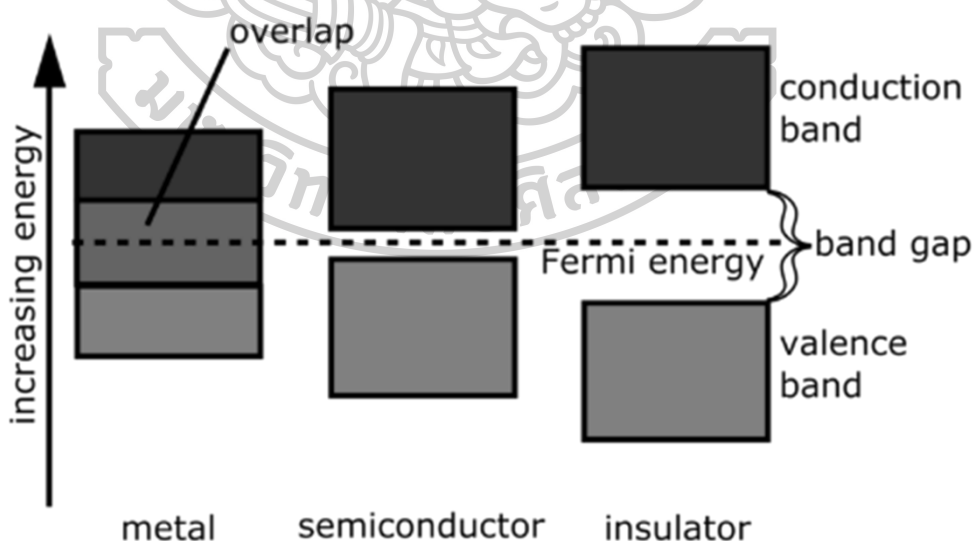
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของทินไดออกไซด์

ชื่ออื่น	Stannic oxide
สูตรทางเคมี	SnO_2
ความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน	3.6-3.8 eV
โครงสร้างผลึก	Rutile tetragonal
ความหนาแน่น	6.95 g/cm^3
น้ำหนักโมเลกุล/มวลโมเลกุล	150.71 g/mol
ค่า pH	(6-12)
จุดหลอมเหลว	$1,630^\circ\text{C}$
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ลักษณะทางกายภาพ	ผงสีเหลืองหรือสีเทาอ่อน
พันธะโคเวเลนต์	2
อนุภาคขนาดหนัก	3
พันธะไฮโดรเจน	2
ความสามารถในการละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ

2.1.2 สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างความเป็นตัวนำและฉนวน เช่น เจอร์เมเนียม (Germanium, Ge) ซีลีเนียม (Selenium, Se) และซิลิคอน (Silicon, Si) ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน วัสดุเหล่านี้จะไม่ยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านเลย เนื่องจากอิเล็กตรอนถูกตรึงไว้ด้วยพันธะโควาเลนต์ แต่ในอุณหภูมิปกติหากอิเล็กตรอนบางส่วนได้รับพลังงานเนื่องจากความร้อนมากพอ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากพันธะและทำให้เกิดที่ว่างที่เรียกว่า โฮล (Hole) ขึ้น อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงอิเล็กตรอนจะไปอยู่ในแถบนำมาก ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำอิเล็กตรอนอยู่ในแถบนำน้อยก็จะนำไฟฟ้าได้ไม่ดี

เมื่ออิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมทำให้เกิดโฮลขึ้น อิเล็กตรอนจากที่อื่นสามารถเคลื่อนที่เข้ามาแทนได้ อิเล็กตรอนข้างเคียงของอิเล็กตรอนที่เข้ามาแทนที่ก็จะเกิดโฮลขึ้น คล้ายกับว่าโฮลเคลื่อนที่จากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียง และถ้าอิเล็กตรอนยังคงเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่โฮลต่อเนื่องกันหลาย ๆ อะตอม จะดูเหมือนว่าโฮลกำลังเคลื่อนที่ไปตามอะตอมเหล่านั้น และเนื่องจากอะตอมที่เกิดโฮลมีสภาพเป็นบวกเพราะขาดอิเล็กตรอน โฮลจึงเป็นตัวพาประจุบวกในสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะมีตัวพาประจุ 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนทำหน้าที่เป็นตัวพาประจุลบ และโฮลทำหน้าที่เป็นตัวพาประจุบวก โดยสารกึ่งตัวนำที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ [43]

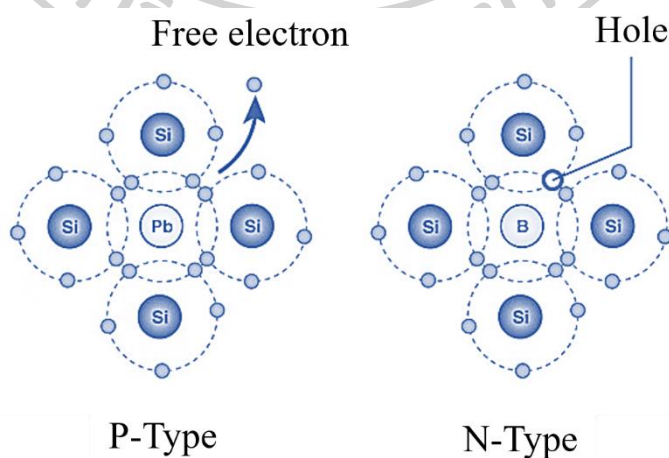


รูปที่ 2 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของโลหะ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน [44]

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ เป็นผลจากการเจือปนสารอื่นเข้าไป เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าให้เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductors) เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการผสมสารเจือปนโดเนอร์ (Donor) กับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สารเจือปนโดเนอร์จะมีบทบาทในการให้อิเล็กตรอนอิสระและเป็นธาตุในหมู่ 5 เช่น ฟอสฟอรัส (P) อาร์เซนิก (As) และแอนติโมนี (Sb) หลังจากเติมโดเนอร์ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่เป็นธาตุหมู่ 4 จะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) เกินมา 1 ตัว โดยสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในผลึกของสารกึ่งตัวนำ ส่งผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และเนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระเกินมา 1 ตัว ทำให้มีประจุลบมากกว่าประจุบวก ดังนั้น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจึงมีอิเล็กตรอนทำหน้าที่เป็นพาหะประจุลบ และมักจะมีการใช้งานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการผลิตแก๊สเซนเซอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type Semiconductors) เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการผสมสารเจือปนแอกเซปเตอร์ (Acceptor) กับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สารเจือปนแอกเซปเตอร์จะมีบทบาทในการรับอิเล็กตรอนอิสระและเป็นธาตุในหมู่ 3 เช่น โบรอน (B) แกลเลียม (Ga) อลูมิเนียม (Al) และอินเดียม (In) หลังจากเติมแอกเซปเตอร์ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่เป็นธาตุหมู่ 4 จะทำให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำหายไป 1 ตัว ส่งผลให้เกิดช่องว่างหรือโฮล (Hole) ขึ้นในสารกึ่งตัวนำ และเนื่องจากมีอิเล็กตรอนในผลึกหายไป 1 ตัว ทำให้ประจุลบน้อยกว่าประจุบวก ดังนั้น สารกึ่งตัวนำชนิดพีจึงมีโฮลทำหน้าที่เป็นพาหะประจุบวก และถูกใช้ในงานวิจัยและพัฒนาการผลิตแก๊สเซนเซอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [45]



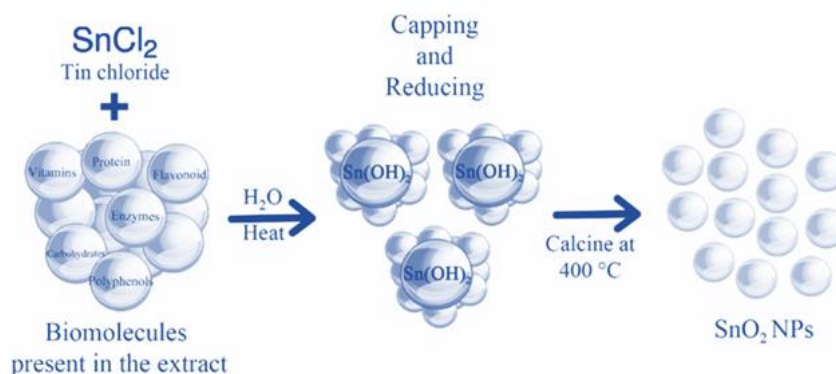
รูปที่ 3 โครงสร้างตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี [45]

2.1.3 สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal-oxide semiconductor, MOS) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเฉพาะเพราะสมบัติการขนส่งประจุทางอิเล็กทรอนิกส์ของมันต่างจากสารกึ่งตัวนำทั่วไป เป็นสารประกอบที่มีพันธะไอออนิกสูง ประกอบด้วยโลหะและออกซิเจนเป็นส่วนหลัก สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์สามารถถูกเจือเป็น สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น (N-type MOS) หรือสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดพี (P-type MOS) ได้ และสามารถถูกเจือลงอย่างหนักเพื่อทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความต้านทานต่ำ มีค่าการนำไฟฟ้าสูง บางชนิดรู้จักกันด้วยชื่อออกไซด์นำไฟฟ้าที่โปร่งใส (Transparent Conducting Oxide, TCO) [46] โดยตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น เช่น อินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ ทินไดออกไซด์ (SnO_2) และสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นพี เช่น นิกเกิลออกไซด์ (NiO) และคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu_2O)

2.1.4 สารยึดเกาะ

สารยึดเกาะ (Capping agent หรือ Stabilizer) เป็นสารที่มีหน้าที่ในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน ทำหน้าที่ชะลอหรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคนั้น ๆ มีส่วนช่วยในการลดขนาดของอนุภาคในทางอ้อม คือ ป้องกันการเติบโตของอนุภาคในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ทำให้สามารถสังเคราะห์อนุภาคที่มีขนาดและคุณสมบัติตามที่ต้องการได้ เนื่องจากอนุภาคนาโนมีพลังงานที่พื้นผิวมากและมีแนวโน้มที่จะเชื่อมต่อกันหรือจับกลุ่มกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ สารยึดเกาะจึงถูกนำมาใช้เพื่อช่วยป้องกันการรวมกลุ่มกันของอนุภาคเล็ก ๆ นั้น เมื่ออนุภาคนาโนไม่สามารถสะสมกันเป็นก้อนใหญ่ได้ก็จะเกิดการกระจายของอนุภาคระหว่างขั้นตอนการสังเคราะห์ที่มีความสมดุลขึ้น โดยสารยึดเกาะที่มีการนำมาใช้ในขั้นตอนการสังเคราะห์ [27] เช่น กลูโคส (Glucose) [27] วิตามินซี (Vitamin C) [28] สารสกัดเปลือกส้ม (Citrus sinensis) [29] สารสกัดจากต้นชา (Camellia sinensis) [30] และ สารสกัดจากเมล็ดเกรฟฟรุต (Citrus paradisi) [31]



รูปที่ 4 กลไกการก่อตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ [30]

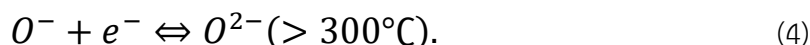
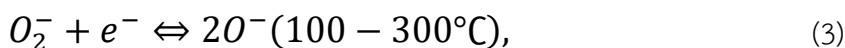
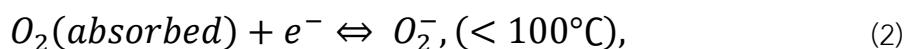
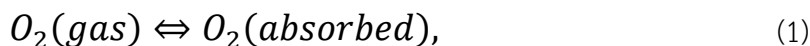
2.1.5 แก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาเซนเซอร์ประเภทต่าง ๆ ได้รับการพัฒนาโดยใช้วัสดุตรวจจับที่หลากหลายและขั้นตอนการรับสัญญาณที่แตกต่างกัน แก๊สเซนเซอร์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะโดดเด่นจากเซนเซอร์อื่น ๆ เนื่องจากมีกลไกพื้นฐานที่ใช้งานง่ายและต้นทุนที่ต่ำกว่ามีความสามารถในการตรวจจับแก๊สอันตราย [47] เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แอมโมเนีย (NH₃) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) โอโซน (O₃) แก๊สหุงต้ม (LPG) และ มีเทน (CH₄) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่มักใช้เป็นวัสดุตรวจจับจะมี ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทินไดออกไซด์ (SnO₂) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ทังสเตนออกไซด์ (WO₃) โครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยมีเทคนิคในการสังเคราะห์สารที่หลากหลาย เช่น การตกตะกอนอย่างง่าย (Precipitation method) วิธีการโซล-เจล (Sol-Gel method) และการระเหยด้วยความร้อน (Vaporization method)

แก๊สเซนเซอร์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์หลัก ๆ สองชนิด คือ สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น ซึ่งมีพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน เช่น ทินไดออกไซด์ (SnO₂) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดพี ซึ่งมีโฮลเป็นพาหะส่วนมาก เช่น โคบอลต์ออกไซด์ (CoO) และนิกเกิลออกไซด์ (NiO) แก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะมีหลักการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า หรือค่าการนำไฟฟ้าจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนไอออน (O⁻) กับแก๊สทดสอบบนพื้นผิวของวัสดุตรวจจับ กลไกการตรวจจับแก๊ส เช่น ปฏิกิริยาแก๊ส อัตราการเกิดปฏิกิริยา และความจำเพาะ ได้รับผลกระทบจากพื้นผิว ความพรุน โครงสร้างจุลภาคของวัสดุตรวจจับ และอุณหภูมิการทำงาน อย่างมีนัยสำคัญ โดยทั่วไปอุณหภูมิในการทำงานและความหนาของฟิล์มจะส่งผลต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ อย่างไรก็ตาม การซ้อนกันที่ไม่จำเป็นอาจทำให้การตอบสนองลดลง ความไวและความจำเพาะยังได้รับผลกระทบจากขนาดเกรนอีกด้วย เนื่องจากขอบเขตของเกรนทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการกระเจิงของอิเล็กตรอน

2.1.6 หลักการทำงานของแก๊สเซนเซอร์

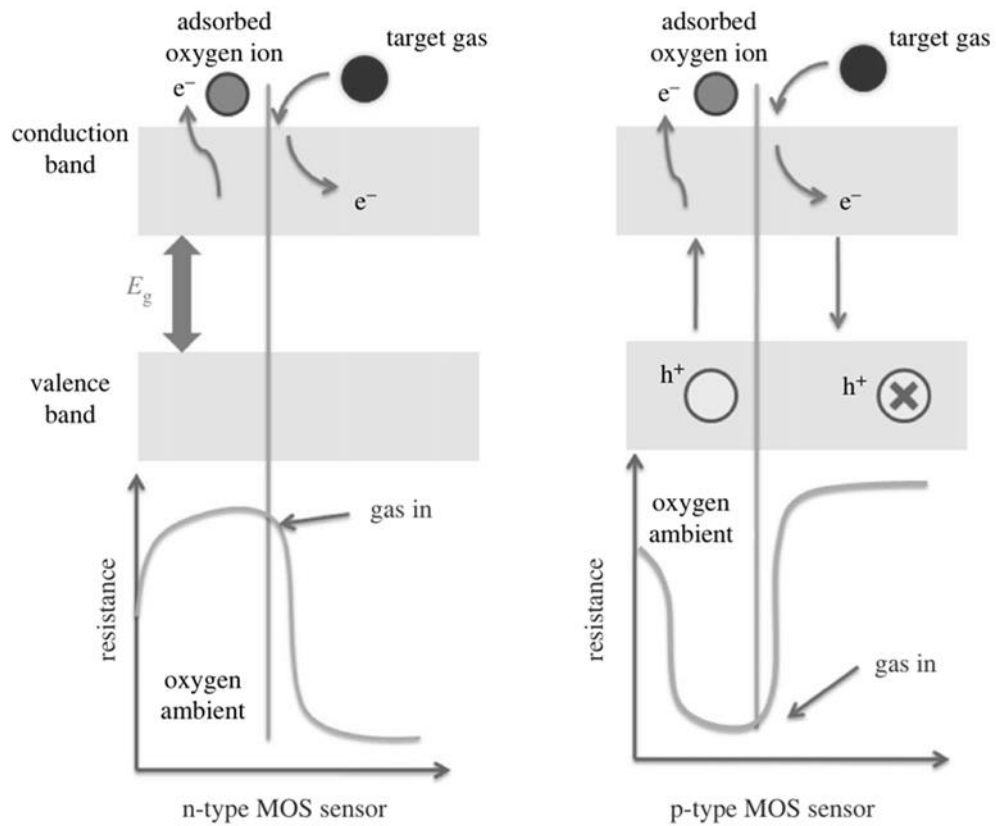
การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าหรือความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์เป็นหลักการพื้นฐานของการตรวจจับแก๊ส สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติจะมีออกซิเจนไอออน O₂⁻, O⁻ และ O²⁻ ที่ด้านบนของพื้นผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ เมื่อแก๊สทดสอบสัมผัสพื้นผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สทดสอบกับออกซิเจนไอออนและเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในชั้นสารโลหะออกไซด์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน หรือค่าการนำไฟฟ้า และอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะเรียกว่าค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ ขั้นตอนของปฏิกิริยาต่อไปนี้จะแสดงจลนศาสตร์ของการดูดซับ [18]



ประเภทของไอออนออกซิเจนที่เกิดการเคมีดูดซับกับเซนเซอร์แก๊ส จะถูกกำหนดโดยอุณหภูมิการทำงานของเซนเซอร์ สำหรับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ไอออนออกซิเจนจะเป็น O_2^- , สำหรับอุณหภูมิระหว่าง 100 และ 300 องศาเซลเซียส ไอออนออกซิเจนจะเป็น O^- , และสำหรับอุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส ไอออนออกซิเจนจะเป็น O^{2-} ตามลำดับ

แก๊สที่ไม่ปลอดภัยตามธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทตามผลกระทบทางการออกซิไดซ์ (Oxidizing) และการรีดิวซ์ (Reducing) แก๊ส NO_2 , NO , N_2O และ CO_2 อยู่ในหมวดของการออกซิไดซ์ ในขณะที่ H_2S , CO , NH_3 , CH_4 และ SO_2 อยู่ในหมวดของการรีดิวซ์ โดยเมื่อแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะชนิดเอ็น (N-type MOSs) สัมผัสกับแก๊สทดสอบที่มีการออกซิไดซ์ จะเกิดการตอบสนองของแก๊สทดสอบกับออกซิเจนไอออนและรับอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของวัสดุตรวจจับ ทำให้ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนใน MOSs ลดลง และเนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากของ N-type MOSs ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของ N-type MOSs จะลดลง และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ในกรณีของแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะชนิดพี (P-type MOSs) มีโฮลเป็นพาหะส่วนมาก ความเข้มข้นของโฮลใน MOSs จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงออก ดังนั้นเมื่อสัมผัสกับแก๊สทดสอบที่มีการออกซิไดซ์ ค่าการนำไฟฟ้าของ P-type MOSs จะเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลง

และในทางกลับกันเมื่อ N-type MOSs สัมผัสกับแก๊สทดสอบที่มีการรีดิวซ์ แก๊สทดสอบจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออนและปล่อยอิเล็กตรอนสู่พื้นผิว ทำให้ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนใน MOSs เพิ่มขึ้น และเนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมากของ N-type MOSs ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของ N-type MOSs จะเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลง ในกรณีของแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะชนิดพี (P-type MOSs) มีโฮลเป็นพาหะส่วนมาก ความเข้มข้นของโฮลใน MOSs จะลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอน ดังนั้นเมื่อสัมผัสกับแก๊สทดสอบที่มีการรีดิวซ์ ค่าการนำไฟฟ้าของ P-type MOSs จะลดลง และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 กลไกของแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและพี
ต่อแก๊สทดสอบที่อยู่ในหมวดของการรีดิวซ์ [18]

สำหรับแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะชนิดเอ็น (N-type MOSs) สัมผัสกับแก๊สทดสอบที่มีการออกซิไดซ์ ค่าการตอบสนองสามารถกำหนดได้โดยสมการต่อไปนี้

$$S_n = \frac{R_g}{R_a} \quad (5)$$

สำหรับแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะชนิดพี (P-type MOSs) สัมผัสกับแก๊สทดสอบที่มีการออกซิไดซ์ ค่าการตอบสนองสามารถกำหนดได้โดยสมการต่อไปนี้

$$S_p = \frac{R_a}{R_g} \quad (6)$$

โดย R_a และ R_g คือความต้านทานไฟฟ้าของแก๊สเซนเซอร์ในอากาศปกติและความต้านทานไฟฟ้าของแก๊สเซนเซอร์เมื่อสัมผัสกับแก๊สทดสอบ ตามลำดับ ค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและพี เมื่อสัมผัสกับแก๊สออกซิไดซ์และแก๊สรีดิวซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 2

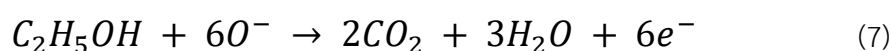
ตารางที่ 2 การตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและพีเมื่อสัมผัสกับแก๊สที่อยู่ในหมวดการออกซิไดซ์และการรีดิวซ์

สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	แก๊สทดสอบ	การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน	ค่าการตอบสนอง
ชนิดเอ็น	แก๊สออกซิไดซ์	เพิ่มขึ้น	$S = R_g/R_a$
ชนิดเอ็น	แก๊สรีดิวซ์	ลดลง	$S = R_a/R_g$
ชนิดพี	แก๊สออกซิไดซ์	ลดลง	$S = R_a/R_g$
ชนิดพี	แก๊สรีดิวซ์	เพิ่มขึ้น	$S = R_g/R_a$

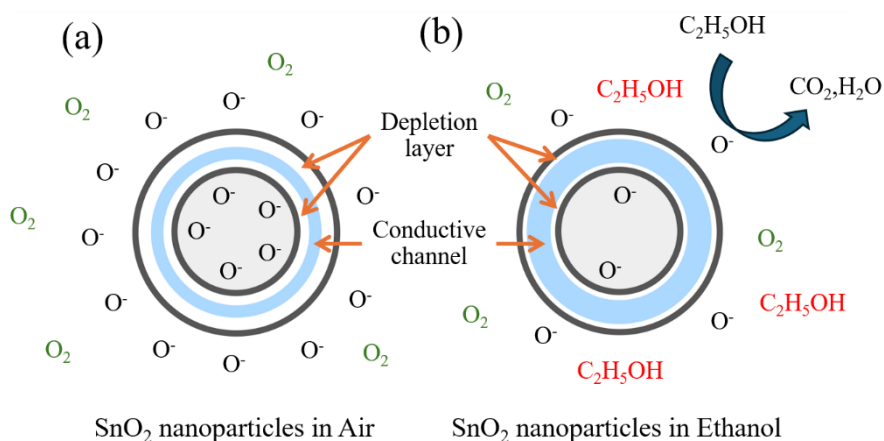
2.1.7 กลไกการตรวจจับแก๊สเอทานอล

ในงานวิจัยนี้ใช้แรงดันไฟฟ้า 2.0-3.6 โวลต์ สำหรับการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งจะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 150 ถึง 400 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า โมเลกุลของ O_2 ที่เกาะติดกับพื้นผิวของอนุภาคนาโน SnO_2 จึงแปลงเป็น O^- เป็นหลัก ตามที่ระบุโดยสมการ (3) การแยกอิเล็กตรอนออกจากพื้นผิวของอนุภาคนาโน SnO_2 จะทำให้ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนภายในอนุภาคลดลง และเนื่องจากอนุภาคนาโน SnO_2 มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนมาก ความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์จึงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 (a)

ในทางกลับกัน เมื่อแก๊สเอทานอลสัมผัสกับอนุภาคนาโน SnO_2 แก๊สเอทานอลจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออนบนพื้นผิวของวัสดุตรวจจับ ส่งผลให้เกิดการผลิต CO_2 และ H_2O ตามที่อธิบายไว้ในสมการต่อไปนี้ [48]



จากปฏิกิริยานี้ อิเล็กตรอนที่จับกับออกซิเจนไอออนในตอนแรกจะถูกปล่อยออกมา ทำให้ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนภายในอนุภาคนาโน SnO_2 จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ดังที่ปรากฏในรูปที่ 6 (b) ส่งผลให้ความต้านทานลดลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของอนุภาคนาโน SnO_2 เป็นผลมาจากการดูดซับและการคายของออกซิเจนไอออน



รูปที่ 6 การแสดงแผนผังของการกำหนดค่าทางไฟฟ้าของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ใน

(a) อากาศและ (b) สภาพแวดล้อมเอทานอลตามลำดับ [49]

2.1.8 ประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์

การเลือกใช้แก๊สเซนเซอร์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น ชนิดแก๊สที่ต้องการวัด ความเข้มข้นของแก๊ส และสภาพแวดล้อม เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ จะพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

การตอบสนอง (Response) คือ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์สัมผัสกับแก๊สทดสอบ โดยคำนวณจากอัตราส่วนของความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์ในอากาศและความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์ในแก๊สทดสอบ โดยสมการแบ่งตามชนิดของวัสดุตรวจจับและชนิดของแก๊สทดสอบ ตามตารางที่ 2

เวลาการตอบสนอง (Response time) คือ ความสามารถในการตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว ในทันทีที่แก๊สเซนเซอร์สัมผัสกับแก๊สทดสอบ คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแก๊สทดสอบเป็นแก๊สพิษ หรือเป็นแก๊สไวไฟ โดยจะมีค่าเท่ากับเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า จากจุดปล่อยแก๊สทดสอบจนมีค่าเท่ากับ 90% ของ $\Delta R = R_a - R_g$ ในกรณีของวัสดุตรวจจับชนิดเอ็นและแก๊สทดสอบเป็นแก๊สรีดิวซ์ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงเมื่อสัมผัสกับแก๊สทดสอบดังรูปที่ 7

เวลาการคืนสภาพ (Recovery time) คือ เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติ ในกรณีของวัสดุตรวจจับชนิดเอ็นและแก๊สทดสอบเป็นแก๊สรีดิวซ์ เมื่อนำแก๊สทดสอบออกจากเซนเซอร์แล้ว ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงภาพที่ โดยจะมีค่าเท่ากับเวลาที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 90% ของ $\Delta R = R_a - R_g$

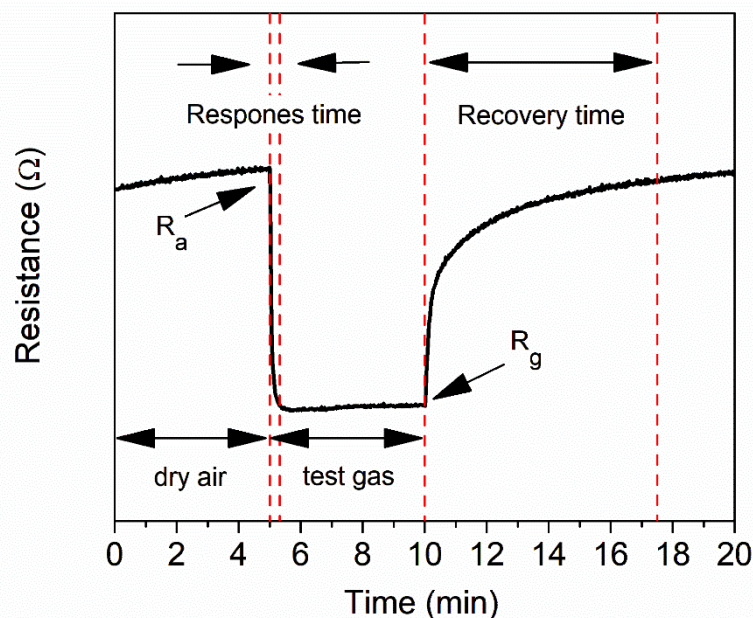
ความเสถียร (Stability) คือ การบอกถึงความสามารถในการทำซ้ำโดยที่ค่าพารามิเตอร์สามอันแรก ได้แก่ ค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนองและเวลาการคืนสภาพ ที่วัดได้จะต้องมีค่าเท่าเดิมหรือใกล้เคียงกับค่าเดิมแม้ว่าจะมีการทำซ้ำหลาย ๆ รอบ

ความไว (Sensitivity) คือ ขนาดของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากชนิดของแก๊สทดสอบ โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของแก๊สทดสอบ ซึ่งจะบอกได้ว่าแก๊สเซนเซอร์นี้มีความไวต่อแก๊สชนิดใดบ้าง และสามารถวัดได้ที่ความเข้มข้นต่ำถึงเท่าไร

ความจำเพาะ (Selectivity) คือ สมบัติที่จะให้ข้อมูลว่าแก๊สเซนเซอร์นั้น มีความจำเพาะและเหมาะสมกับการตรวจวัดแก๊สทดสอบชนิดใด โดยจะสัมพันธ์กับค่าการตอบสนองและความไวที่สูงที่สุดในชนิดของแก๊สที่ทำการทดสอบ

ขีดจำกัดของการตรวจจับ (Limit of detection) คือ ความสามารถของเซนเซอร์ในการตรวจจับแก๊สทดสอบที่ความเข้มข้นน้อยที่สุดที่เป็นไปได้

แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม (Operating Voltage) คือ แรงดันไฟฟ้าที่แก๊สเซนเซอร์แสดงค่าการตอบสนองสูงสุดต่อความเข้มข้นที่แน่นอนของแก๊สทดสอบ



รูปที่ 7 แก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น เมื่อสัมผัสกับแก๊สทดสอบที่อยู่ในหมวดของการรีดิวซ์

2.1.9 แก๊สทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) พบได้ในอุตสาหกรรมกรรมการเกษตรในฟาร์มที่มีหลุมเก็บปุ๋ยหรือหลุมฝังกลบ และ เรายังพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีระบบบำบัดน้ำเสียที่ปล่อยมาจากกระบวนการผลิต รวมไปถึงสถานประกอบการอื่น ๆ ทางสรรพสินค้าและคอนโด ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไม่สามารถซึมผ่านผิวหนังได้ การสูดดมโดยตรงในระดับความเข้มข้นที่สูงมากมัก มีฤทธิ์ระคายเคืองต่อเยื่อบุทางเดินหายใจ และ ทางเดินอาหาร แต่เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงมากขึ้น จะเริ่มทำให้ประสาทรับกลิ่นไม่ทำงาน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะยับยั้งการหายใจโดยใช้ออกซิเจนที่ระดับเซลล์ทำให้หมดสติ [14, 33]

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีผลกับร่างกายมนุษย์

ความเข้มข้น (ppm)	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
0.2	เริ่มได้กลิ่น
10	ได้กลิ่นที่รุนแรงมาก
50	ระคายเคืองตาและเยื่อบุทางเดินหายใจ
150	ประสาทรับกลิ่นไม่ทำงาน
200	ไม่ได้กลิ่น ตาแดง เจ็บในคอ
250	อาจน้ำท่วมปอด ถ้าสูดดมนาน
500	½ – 1 ชั่วโมง เกิดการปวดศีรษะ คลื่นไส้ หมดสติ และหยุดหายใจ
500 – 1000	เกิดอาการจากการขาดออกซิเจน ในทุกระบบ และหยุดหายใจ

แอมโมเนีย (Ammonia) เป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์และมนุษย์เมื่อถูกสัมผัสหรือบริโภคในปริมาณมาก สารนี้มักจะพบในสารเคมีที่ใช้ในการเกษตรอย่างมาก เช่น ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และสารเคมีชนิดอื่นที่ใช้ในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช การสัมผัสกับแอมโมเนียอาจทำให้เกิดอาการอักเสบของผิวหนัง การหายใจลำบาก อาการคัดจมูก คอเจ็บ หรือการหน้ามืดและสลุดในกรณีที่สัมผัสในปริมาณมาก การสัมผัสเมื่อตกอยู่ในสายตาสสามารถทำให้เกิดอาการตาแดง แสบ บวม หรือการทำลายสายตาได้ ในกรณีที่มีการสัมผัสหรือสงสัยว่าได้รับสารพิษนี้ควรรีบพบแพทย์เพื่อรับการดูแลและรักษาอย่างทันท่วงที การดูแลรักษาที่ถูกต้องสามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ [50, 51]

แอซีโตน (Acetone) เป็นสารที่พบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น ในสารละลายสีเล็บ ละลายสีผม และสารทำความสะอาด การสัมผัสกับแอซีโตนในปริมาณมากอาจทำให้เกิดผลข้างเคียงทางสุขภาพ เช่น ผื่นหนังแห้ง แดงหรือระคายเคือง การสัมผัสเมื่อตกอยู่ในตาอาจทำให้เกิดความรุนแรงและสามารถทำให้เสียหายต่อสายตาได้ การสูดอากาศหายใจของแอซีโตนในปริมาณมากสามารถทำให้เกิดอาการเป็นพิษอย่างเช่น หายใจลำบาก แน่นหน้าอก หรืออาการเสียชีวิตได้ การป้องกันการสัมผัสกับแอซีโตนควรใช้มาตรการป้องกันเช่น การใช้เครื่องป้องกันส่วนตัว เช่น หน้ากากป้องกันก๊าซและแว่นตาป้องกันตา และใช้สารเคมีในที่ทำงานหรือสถานที่ที่มีความเสี่ยงต่อการสัมผัสแอซีโตนอย่างเหมาะสม เพื่อป้องกันอันตรายต่อสุขภาพทั้งขณะทำงานและในชีวิตประจำวัน ในกรณีที่มีการสัมผัสหรือสงสัยว่าได้รับสารพิษนี้ควรรีบพบแพทย์เพื่อรับการดูแลและรักษาอย่างทันท่วงที [46]

ไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide) เป็นก๊าซที่มีความสำคัญในระบบชีวเคมีของร่างกายมนุษย์ เป็นสารที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมและปรับปรุงการทำงานของหลอดเลือด โดยมีบทบาทสำคัญในการขยายหลอดเลือด ช่วยลดความดันเลือด และเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันในร่างกาย นอกจากนี้ไนตริกออกไซด์ยังมีบทบาทในกระบวนการการส่งสัญญาณระหว่างเซลล์ประสาท และการควบคุมการแลกเปลี่ยนของสารอาหารในร่างกาย อย่างไรก็ตาม การมีไนตริกออกไซด์ในปริมาณมากเกินไปอาจส่งผลเสียต่อร่างกายได้ หากมีปริมาณไนตริกออกไซด์มากเกินไปอาจทำให้เกิดอาการอักเสบ การทำลายเนื้อเยื่อ หรือการสร้างสารออกซิเดชันได้ นอกจากนี้ มีฤทธิ์เคลือบหลอดเลือดซึ่งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อระบบหลอดเลือด และระบบภูมิคุ้มกันในร่างกาย ทำให้เกิดภาวะเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ โรคหลอดเลือด หรือโรคอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำลายเนื้อเยื่อ [52]

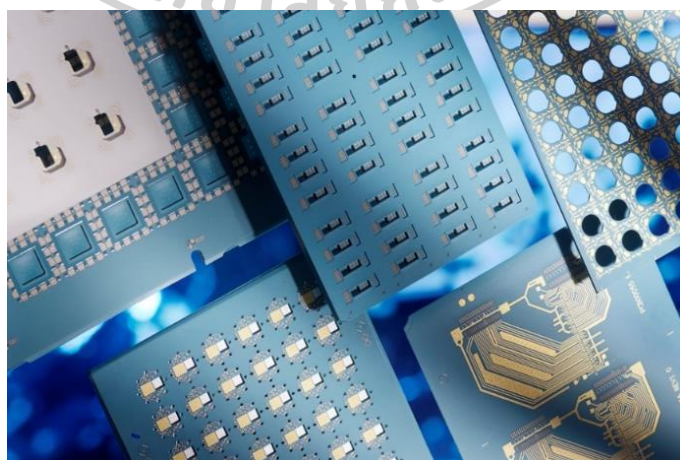
เอทานอล (Ethanol) มักพบในเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น เบียร์ ไวน์ และเหล้า นอกจากนี้เอทานอลยังมีการใช้งานในอุตสาหกรรมและงานวิจัยอื่น ๆ เช่น การใช้เป็นน้ำยาทำความสะอาด น้ำยาฆ่าเชื้อโรค น้ำยาขัดลวด และใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานอวกาศและยานบินที่ใช้ในการลอยน้ำ เป็นต้น การบริโภคเอทานอลอย่างมากมายนสามารถมีผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น เมื่อบริโภคในปริมาณมากอาจทำให้เกิดสุขภาพบุรุษ และการบริโภคมาก ๆ ในระยะยาวอาจเสี่ยงต่อโรคเรื้อรัง เช่น โรคตับ โรคหลอดเลือด และบาดเจ็บของสมอง เป็นต้น การบริโภคเอทานอลอย่างมีส่วนเสี่ยงต่อการขับชี่หรือใช้งานเครื่องจักรก็สามารถเกิดอุบัติเหตุได้ ดังนั้น การบริโภคเอทานอลควรทำอย่างมีสติและอย่างมีขนาดควบคุมที่เหมาะสม [15, 16, 53-55]

นอกจากนี้ การสูดดมเอทานอลเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจอาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองหรือปัญหาทางการหายใจรุนแรง และสามารถทำให้ระคายเคืองต่อทางเดินอาหาร ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอักเสบและแผลในทางเดินอาหาร การสัมผัสกับเอทานอลยังสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนหรือระคายเคืองต่อผิวหนัง ทำให้เกิดแผลและอาการคัน ดังนั้น การใช้เอทานอลควรมีความระมัดระวังและควบคุมอย่างเหมาะสม

2.1.10 เทคโนโลยีเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ

อุปกรณ์เซรามิกเผาพร้อม (Co-fired ceramic devices) เป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างเป็นเซรามิกที่มีวัสดุนำไฟฟ้า วัสดุต้านทานไฟฟ้า และวัสดุไดอิเล็กตริก โดยทั้งหมดจะถูกเผาพร้อมกันในเตาหลอม ตัวอย่างอุปกรณ์ทั่วไปที่ใช้เทคโนโลยีนี้ได้แก่ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวต้านทาน หม้อแปลง และวงจรรวมแบบไฮบริด นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางทหาร ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electromechanical Systems, MEMS) และไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor) อุปกรณ์เซรามิกเผาพร้อมผลิตโดยใช้วิธีการซ้อนทับกันหลายชั้น วัสดุเริ่มต้นคือเทปเซรามิกผสมคอมโพสิตที่ประกอบด้วยอนุภาคเซรามิกผสมกับโพลีเมอร์ ทำให้มีความยืดหยุ่นและสามารถแปรรูปได้ เช่น การตัด การกัด การเจาะ และการพิมพ์ลายบน โครงสร้างโลหะสามารถเพิ่มลงในชั้นต่าง ๆ ได้ การพิมพ์สกรีน จากนั้นเทปแต่ละแผ่นจะถูกยึดติดกันในกระบวนการลามิเนตก่อนที่จะนำไปเผาเพื่อให้สารโพลีเมอร์เกิดการเผาไหม้และทำให้อนุภาคเซรามิกเชื่อมติดกันกลายเป็นส่วนประกอบเซรามิกที่แข็งและหนาแน่น

อุปกรณ์เซรามิกเผาพร้อมจะแบ่งตามอุณหภูมิการเผาออกเป็น 2 แบบคือ เซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ (Low-Temperature Co-fired ceramic, LTCC) และ เซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิสูง (High-Temperature Co-fired ceramic, HTCC) คือการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส และการเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,600 องศาเซลเซียส โดย LTCC สามารถเพิ่มเฟสของแก้วลงไป ในเซรามิกได้ ซึ่งมีผลในการช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลว มีความสามารถในการรวมส่วนประกอบไฟฟ้าแบบพาสซีฟและเส้นนำไฟฟ้าภายในตัวมันเอง โดยทั่วไปจะนำไปใช้ร่วมกับเทคโนโลยีฟิล์มหนา [5, 56, 57]



รูปที่ 8 ลักษณะของแผ่นเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ [56]

2.1.11 LTCC-GASSET

LTCC-GASSET คือ เทคโนโลยีในการสร้างแก๊สเซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ที่มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานในการทำงานต่ำ เหมาะสมกับการใช้งานร่วมในอุปกรณ์แบบพกพา หรือไร้สาย รองรับการสร้างอาเรย์ของเซนเซอร์จำนวนมาก สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับวัสดุตอบสนองแก๊สได้โดยง่าย ส่งผลทำให้สามารถใช้ต่อยอดและผลักดันงานวิจัยด้านวัสดุตอบสนองแก๊สสู่ผลิตภัณฑ์เชิงนวัตกรรมของประเทศไทยได้ มีสถานภาพของผลงานวิจัย คือ เป็นต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการและได้ทดสอบในสภาวะจำลอง โดยมีคุณสมบัติและจุดเด่นของเทคโนโลยีคือ ตรวจจับแก๊สในกลุ่ม ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) แอมโมเนีย (ammonia) และกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic) สามารถสื่อสารข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านเครือข่าย IoT (Internet of Things) ใช้เทคโนโลยี LTCC (Low temperature co-fired ceramics) เป็นฐานแก๊สเซนเซอร์ แต่ละช่องวัดใช้พลังงานต่ำเพียง 40 – 70 มิลลิวัตต์ และเป็นเทคโนโลยีเซนเซอร์ตรวจจับแก๊สที่พัฒนาขึ้นภายในประเทศไทย

อุปกรณ์รับรู้แก๊ส กระบวนการสร้าง และวิเคราะห์สัญญาณจากอุปกรณ์ดังกล่าว ได้จดสิทธิบัตรการประดิษฐ์ไทย จากกรมทรัพย์สินทางปัญญาแล้ว (คำขอเลขที่ 1801005900-2561 และ 2301005878-2566) ผลิตขึ้นโดยคทา จารุงศรีรังสี และคณะ จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ



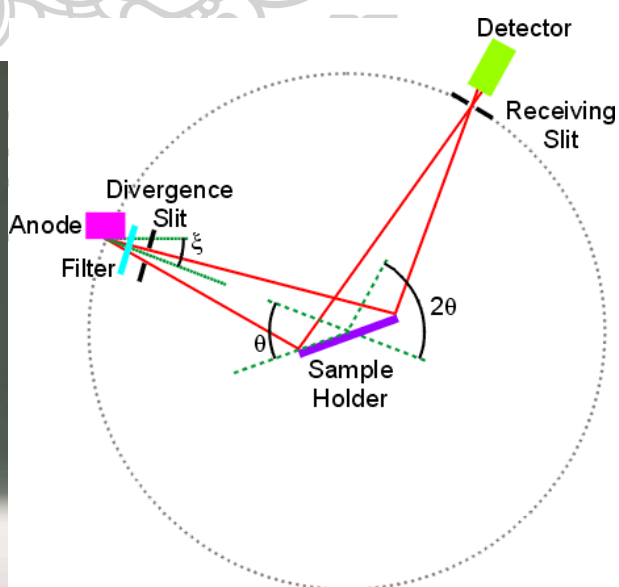
รูปที่ 9 การใช้ประโยชน์ของแก๊สเซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

2.1.12 เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุต่าง ๆ หลักการทำงานของ XRD เริ่มต้นจากการปล่อยรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีเอกซ์ไปยังตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ รังสีเอกซ์จะกระทบกับตัวอย่างและกระเจิงในทิศทางต่าง ๆ ตามกฎของบรอก ซึ่งระบุว่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ระยะระหว่างชั้นผลึก และมุมกระเจิงมีความสัมพันธ์กัน เมื่อรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับที่หมุนรอบตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้จะถูกแปลงเป็นกราฟที่เรียกว่า X-Ray Diffraction Pattern แพทเทิร์นนี้จะมีจุดพีคที่เกิดจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์ในมุมต่าง ๆ ซึ่งสามารถใช้ในการระบุโครงสร้างผลึกและส่วนประกอบของตัวอย่าง [58, 59]

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันมีประโยชน์หลากหลายในการวิจัยและการพัฒนาวัสดุ รวมถึงการระบุเฟสของวัสดุ การวิเคราะห์ความหนาแน่นและความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึก การตรวจสอบความเครียดและการบิดเบี้ยวภายในผลึก และการวิเคราะห์ขนาดเกรนของผลึก เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือที่สำคัญในสาขาวิทยาศาสตร์หลายด้าน เช่น เคมี ฟิสิกส์ วิศวกรรมวัสดุ และธรณีวิทยา ด้วยความสามารถในการให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับโครงสร้างภายในของวัสดุ เครื่องนี้จึงเป็นเครื่องมือที่ขาดไม่ได้ในการศึกษาวัสดุต่าง ๆ ทั้งในเชิงวิจัยและอุตสาหกรรม



รูปที่ 10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน [58]

การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนสนามและการวิเคราะห์ธาตุด้วยพลังงานกระจายของรังสีเอกซ์

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยการปล่อยอิเล็กตรอนสนาม (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของวัสดุต่าง ๆ ด้วยความละเอียดสูงมาก หลักการทำงานของ FE-SEM เริ่มต้นจากการปล่อยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนสนาม ซึ่งมีความสามารถในการสร้างลำอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็กและความเข้มสูง ลำอิเล็กตรอนนี้จะถูกยิงไปยังตัวอย่างและสแกนพื้นผิวของตัวอย่างอย่างละเอียดเมื่ออิเล็กตรอนชนกับตัวอย่าง มันจะสร้างสัญญาณที่สามารถแปลงเป็นภาพความละเอียดสูงของโครงสร้างพื้นผิวได้ สัญญาณนี้จะถูกตรวจจับและแปลงเป็นภาพที่แสดงบนจอคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถเห็นรายละเอียดเล็ก ๆ บนพื้นผิวของตัวอย่างได้อย่างชัดเจน [60]

การวิเคราะห์ธาตุด้วยพลังงานกระจายของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) มักใช้ร่วมกับ FE-SEM เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง การวิเคราะห์ธาตุด้วยพลังงานกระจายของรังสีเอกซ์ทำงานโดยการวิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่ถูกปล่อยออกมาเมื่ออิเล็กตรอนจาก FE-SEM กระแทกกับตัวอย่าง รังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมามีพลังงานที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ ทำให้สามารถระบุและวัดปริมาณธาตุที่อยู่ในตัวอย่างได้ การวิเคราะห์ธาตุด้วยพลังงานกระจายของรังสีเอกซ์จึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ซึ่งสามารถใช้ร่วมกับภาพความละเอียดสูงจาก FE-SEM เพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกทั้งทางกายภาพและเคมีของตัวอย่าง มีความสำคัญในหลายสาขาวิชาการและอุตสาหกรรม เช่น วิศวกรรมวัสดุ วิทยาศาสตร์เคมี ชีววิทยา และการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี [61]



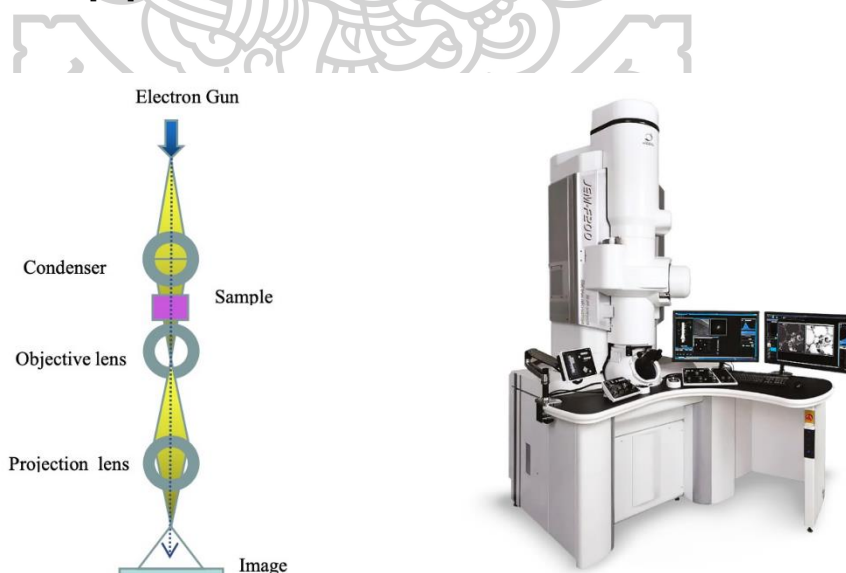
รูปที่ 11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [60]

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของวัสดุด้วยความละเอียดสูงสุด หลักการทำงานของ TEM เริ่มต้นจากการปล่อยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ลำอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งให้มีพลังงานสูงและส่องผ่านตัวอย่างที่บางมาก เมื่ออิเล็กตรอนผ่านตัวอย่าง มันจะเกิดการกระเจิง การดูดกลืน หรือการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้สร้างภาพรายละเอียดสูงของโครงสร้างภายในตัวอย่างได้ ภาพที่ได้จาก TEM จะมีความละเอียดสูงมาก ทำให้สามารถเห็นโครงสร้างระดับอะตอมของวัสดุได้

TEM ใช้ในการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุในระดับนาโน เช่น การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก การระบุความบกพร่องในผลึก และการศึกษาวัสดุในระดับอะตอม ภาพที่ได้จาก TEM สามารถแสดงรายละเอียดของโครงสร้างที่เล็กมาก ๆ เช่น ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน ความหนาและโครงสร้างของชั้นบาง ๆ หรือการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ภายในวัสดุ

การใช้ TEM มีความสำคัญอย่างยิ่งในหลายสาขาวิชาการและอุตสาหกรรม เช่น วิศวกรรมวัสดุ วิทยาศาสตร์เคมี ชีววิทยา และนาโนเทคโนโลยี ด้วยความสามารถในการให้ข้อมูลรายละเอียดสูงของโครงสร้างภายในของวัสดุ TEM จึงเป็นเครื่องมือที่ขาดไม่ได้ในการศึกษาวัสดุและการวิจัยที่ต้องการความละเอียดสูงและข้อมูลเชิงลึกทางโครงสร้าง นอกจากนี้ TEM ยังช่วยให้นักวิจัยสามารถเข้าใจพฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุในระดับอะตอม ซึ่งมีผลต่อการพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง [62]



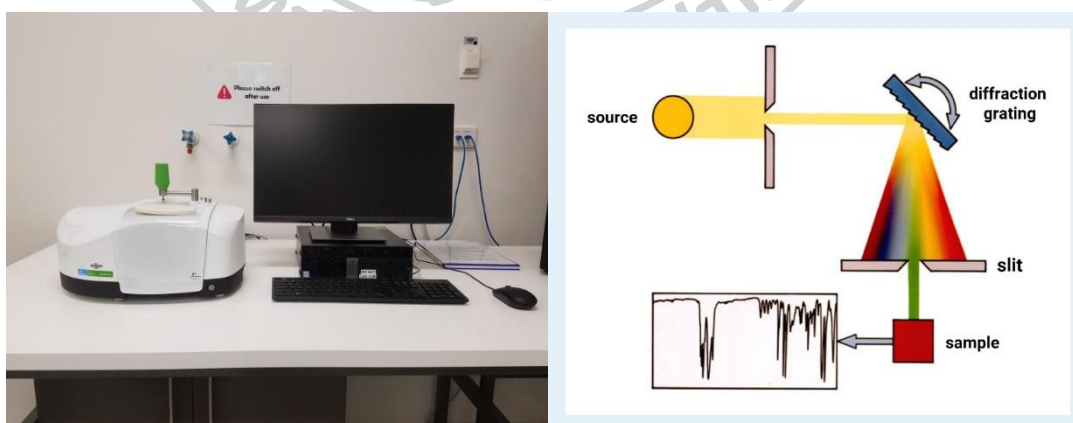
รูปที่ 12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [62]

การวิเคราะห์สเปกตรัมอินฟราเรดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของวัสดุโดยการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของแสงอินฟราเรด หลักการทำงานของ FT-IR เริ่มต้นจากการปล่อยลำแสงอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดแสง ลำแสงนี้จะผ่านไปยังตัวอย่างและบางส่วนของแสงจะถูกดูดกลืนในขณะที่บางส่วนจะผ่านไป ตัวอย่างไป แสงที่ผ่านตัวอย่างจะถูกรวบรวมและส่งไปยังเครื่องตรวจจับซึ่งจะวัดความเข้มของแสงในช่วงความถี่ต่าง ๆ

ข้อมูลที่ได้จากเครื่องตรวจจับจะถูกแปลงเป็นสเปกตรัมโดยใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) สเปกตรัมที่ได้จะแสดงถึงการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลนี้สามารถใช้ในการระบุและวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารตัวอย่างได้ สารเคมีแต่ละชนิดมีลักษณะการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เฉพาะเจาะจง ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้สามารถใช้ในการระบุหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างของสารที่อยู่ในตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ

การใช้ FT-IR มีความสำคัญในหลายสาขาวิชาการและอุตสาหกรรม เช่น เคมีวิเคราะห์ ชีวเคมี วิทยาศาสตร์วัสดุ และเภสัชกรรม FT-IR ใช้ในการระบุสารเคมี การวิเคราะห์ส่วนประกอบในสารผสม การศึกษาปฏิกิริยาเคมี และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุ ด้วยความสามารถในการให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของสารเคมี FT-IR จึงเป็นเครื่องมือที่ขาดไม่ได้ในการวิจัยและพัฒนาในหลาย ๆ ด้าน นอกจากนี้ FT-IR ยังมีความสามารถในการวิเคราะห์ตัวอย่างในสถานะต่าง ๆ เช่น ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ทำให้มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง [63]



รูปที่ 13 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม [63]

การวิเคราะห์สเปกตรัมแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่ตามองเห็นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-Vis

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-Vis (UV-Visible Spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารโดยการวัดการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และแสงที่ตามองเห็น (Visible) หลักการทำงานของ UV-Vis เริ่มต้นจากการปล่อยลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ (โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 200-800 นาโนเมตร) ลำแสงนี้จะถูกส่งผ่านตัวอย่างและตัวตรวจจับจะวัดความเข้มของแสงที่ผ่านตัวอย่างไป เมื่อสารในตัวอย่างดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น ความเข้มของแสงที่ผ่านตัวอย่างจะลดลง [64]

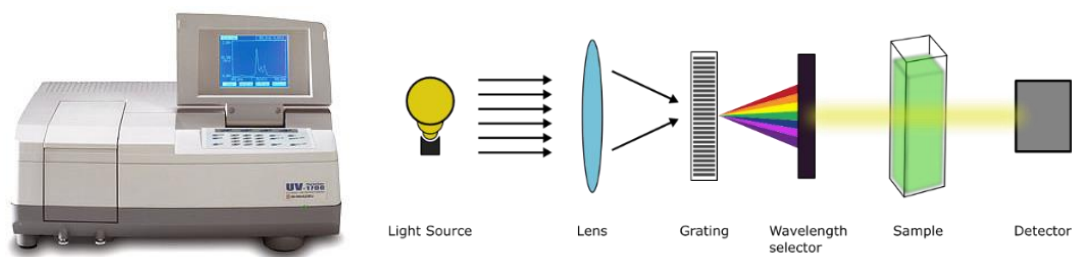
ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะถูกแปลงเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectrum) ซึ่งแสดงถึงการดูดกลืนแสงของสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ สเปกตรัมนี้สามารถใช้ในการระบุและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของสาร รวมถึงการวิเคราะห์ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของวัสดุโดยใช้แบบจำลอง Tauc เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แถบพลังงาน (band gap) ของวัสดุ โดยอาศัยการดูดกลืนแสง (optical absorption) แบบจำลองนี้ช่วยให้สามารถประมาณค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy band gap) จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectrum) ได้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และพลังงานของโฟตอน ($h\nu$) สามารถเขียนได้ดังนี้ [17, 31]

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \quad (8)$$

โดยที่

α	คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
h	คือค่าคงที่ของพลังค์
ν	คือความถี่ของโฟตอน
A	คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับวัสดุ
E_g	คือพลังงานของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap energy)
n	คือเลขชี้กำลังที่ขึ้นอยู่กับประเภทของการเปลี่ยนผ่านพลังงานในวัสดุ

การวิเคราะห์กราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^n$ กับ $h\nu$ จะสามารถหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน โดยการหาเส้นสัมผัสกับกราฟที่ตัดแกนพลังงาน ($h\nu$) จุดตัดที่ได้จะเป็นค่าประมาณช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของวัสดุ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์และเคมีเพื่อศึกษาและพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ



รูปที่ 14 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-Vis [65]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ตัวอย่างงานวิจัยที่สังเคราะห์อนุภาคนาโนโดยใช้สารยัดเกาะร่วมด้วย

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่มีการใช้สารยัดเกาะร่วมด้วยนั้นสามารถลดขนาดของอนุภาคที่ต้องการได้ และมีการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารยัดเกาะอีกด้วย ดังเช่น ตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

ในปี 2016 Jeyarani และคณะ ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) โดยการเติมสารยัดเกาะ คือ กลูโคส ที่ความเข้มข้นต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบของสารยัดเกาะต่ออนุภาคนาโนที่ได้ โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจล การวิเคราะห์ XRD แสดงให้เห็นว่าขนาดผลึกของอนุภาคนาโนที่คำนวณโดยใช้สมการเชอร์เรอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารยัดเกาะเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ของ SEM แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารยัดเกาะ ทำให้อนุภาคนาโน CuO มีแนวโน้มที่จะกระจายตัวกันมากขึ้น ซึ่งยืนยันว่ามีการยับยั้งการรวมตัวกันของอนุภาคนาโน นอกจากนี้ พบว่าขนาดอนุภาคลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารยัดเกาะเพิ่มขึ้น และ FT-IR แสดงให้เห็นผลกระทบของสารยัดเกาะต่ออนุภาคนาโน CuO ดังนั้น สามารถยืนยันได้ว่า สารยัดเกาะส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [27]

ในปี 2018 Tammina และคณะ ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนทินออกไซด์ (SnO_2) ขนาดแตกต่างกันโดยใช้กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) หรือ วิตามินซี (Vitamin C) เป็นสารยัดเกาะ โดยตั้งชื่อเป็น S1, S2 และ S3 มีขนาดที่แตกต่างกันคือ 3, 11 ± 3 และ 27 ± 11 นาโนเมตร จากผลการทดสอบ กระบวนการโฟโตแคตาไลติก (Photo catalytic process) พบว่าอนุภาคนาโนขนาดเล็กแสดงอัตราการย่อยสลายที่สูงกว่าภายในระยะเวลาเพียง 30 นาที และอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ใช้เวลา 85 นาที การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้อาจเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ที่มีศักยภาพต่อการย่อยสลายของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสีย้อมต่าง ๆ [28]

ในปี 2020 Luque และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ (SnO_2) โดยใช้สารยัดเกาะจากสารสกัดเปลือกส้ม (*Citrus sinensis*) ที่มีความเข้มข้นต่างกัน 1%, 2%, และ 4% ต่อปริมาตร ผลการวิเคราะห์จากเทคนิค XRD พบว่าอนุภาคนาโนมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (tetragonal) ในเฟสรูไทล์ (Rutile) การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพผ่าน TEM แสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 5.5, 5.2, และ 4.5 นาโนเมตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของสารยัดเกาะที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของอนุภาคลดลง ซึ่งยืนยันได้ว่าสารยัดเกาะจากธรรมชาติสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การกระจายตัวของอนุภาคยังได้รับการปรับปรุง ทำให้ได้อนุภาคนาโนที่มีความสม่ำเสมอและมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในเทคโนโลยีขั้นสูงต่อไป [29]

ในปี 2021 Luque และคณะได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ (SnO_2) โดยใช้สารสกัดจากต้นชา (*Camellia sinensis*) เป็นสารยัดเกาะที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 1%, 2%, และ 4% ต่อปริมาตร อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ทางชีวภาพนี้ได้รับการตรวจสอบลักษณะเฉพาะด้วย SEM, TEM และ XRD ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า SnO_2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 6.91, 5.2 และ 4.7 นาโนเมตร โดยมีรูปร่างกึ่งทรงกลมและมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) เฟสรูไทล์ (Rutile) แถบช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 4.02, 3.95 และ 3.79 อิเล็กตรอนโวลต์ สรุปได้ว่าขนาดของอนุภาคมีการแปรผันตรงตามความเข้มข้นของสารยัดเกาะ การใช้สารสกัดจากต้นชาช่วยให้สามารถควบคุมขนาดและโครงสร้างของอนุภาคนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีความสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ SnO_2 สำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น การตรวจจับแก๊ส [30]

ต่อมา Luque และคณะ ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ (SnO_2) อีกครั้งโดยเติมสารยัดเกาะที่ต่างจากเดิมคือใช้สารสกัด สารสกัดจากเมล็ดเกรพฟรุต (*Citrus paradisi*) ด้วยความเข้มข้นของสารสกัดที่แตกต่างกัน 1% 2% และ 4% โดยปริมาตร ผลการวิจัยพบว่าสารสกัดจากเมล็ดเกรพฟรุต เป็นตัวกลางที่ดีที่สุดสำหรับการสร้างอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ อนุภาคนาโนเหล่านี้มีลักษณะของสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคกึ่งทรงกลม โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (Rutile) ขนาดอนุภาคลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารยัดเกาะ โดยมีขนาดเท่ากับ 9.1 5.1 และ 4.7 นาโนเมตร [31]

งานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของสารยัดเกาะในการควบคุมขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน นอกจากการลดขนาดอนุภาคแล้ว สารยัดเกาะยังมีผลกระทบต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางกายภาพของอนุภาคนาโน ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติการใช้งานของวัสดุในเทคโนโลยีขั้นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ทินไดออกไซด์เป็นวัสดุตรวจจับแก๊ส

ทินไดออกไซด์ (Tin dioxide หรือ SnO_2) เป็นวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการพัฒนาเซนเซอร์สำหรับตรวจจับแก๊ส เนื่องจากมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและเคมีที่เหมาะสม ทินไดออกไซด์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแก๊สในสภาพแวดล้อม ทำให้สามารถใช้ในการตรวจจับแก๊สหลายประเภท เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2), และแอมโมเนีย (NH_3) งานวิจัยที่ใช้ทินไดออกไซด์เป็นวัสดุตรวจจับแก๊สนั้นมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงความไวและความเฉพาะเจาะจงของเซนเซอร์ โดยใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น การปรับขนาดและรูปร่างของอนุภาคทินไดออกไซด์ การปรับปรุงพื้นผิว และการใช้สารประกอบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊ส ตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงการใช้งานและประสิทธิภาพของทินไดออกไซด์ในฐานะวัสดุตรวจจับแก๊สอย่างชัดเจน

ในปี 2015 Huang และคณะ ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ที่ใช้วัสดุตรวจจับเป็นทินไดออกไซด์ไมโครคิวบ์ (SnO_2 microcubes) ระหว่างตัวอย่างที่มีและไม่มีรูพรุน โดยทดสอบคุณสมบัติการตรวจจับแก๊สด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษและระเหยได้ (Toxic Volatile Organic Compounds, VOCs) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊สจะเพิ่มขึ้นในตัวอย่างของทินไดออกไซด์ไมโครคิวบ์ที่มีรูพรุน โดยขีดจำกัดการตรวจจับฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde, CH_2O) และเอทานอลอยู่ที่ประมาณ 0.09 และ 0.12 ppm ตามลำดับ สรุปได้ว่ารูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้นซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊สของเซนเซอร์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ รูพรุนยังช่วยเพิ่มการกระจายตัวของแก๊สไปยังผิวของเซนเซอร์อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [66]

ต่อมา Shen และคณะ ได้ศึกษาสัญญาณวิทยาของวัสดุนาโนทินไดออกไซด์ (SnO_2) และอิทธิพลที่มีต่อคุณสมบัติการตรวจจับแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen) โดยเปรียบเทียบวัสดุในรูปแบบของฟิล์มบางนาโน (Nanofilms), แท่งนาโน (Nanorods) และลวดนาโน (Nanowires) ผลการทดลองพบว่าแก๊สเซนเซอร์ที่ใช้วัสดุนาโนทินไดออกไซด์มีการตอบสนองสูงสุดต่อแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยฟิล์มบางนาโนที่ 250 องศาเซลเซียส แท่งนาโนที่ 200 องศาเซลเซียส และลวดนาโนที่ 150 องศาเซลเซียส การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นตรงตามความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าสัญญาณวิทยาและโครงสร้างของวัสดุเซมิคอนดักเตอร์มีบทบาทสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติการตรวจจับแก๊ส [23]

ในปี 2019 Han และคณะ ได้ศึกษาแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors, MOSs) และทำการปรับปรุงคุณสมบัติการตรวจจับแก๊สด้วยฟิล์มบางทินไดออกไซด์ โดยใช้เทคนิคการระเหยด้วยความร้อนที่ความดันสูง มีการวิเคราะห์พื้นที่ผิวสัมผัส ลักษณะโครงสร้างจุลภาค ความเป็นผลึก ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวสัมผัส ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า

ฟิล์มทินไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นในทุก ๆ ความดันมีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันโดยมีรูพรุน ซึ่งการตอบสนองของเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นที่ความดันที่แตกต่างกันได้รับการประเมินจากการเปลี่ยนแปลงในความต้านทานไฟฟ้าต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) เซนเซอร์ที่เคลือบด้วยความดัน 0.2 ทอร์ แสดงการตอบสนองสูงและเวลาตอบสนองสั้น เนื่องจากมีความพรุนสูงถึง 97% และอนุภาคขนาดนาโน 8.4 นาโนเมตร ผลการทดลองยืนยันว่าความพรุนและขนาดอนุภาคมีบทบาทสำคัญในการตอบสนองต่อแก๊ส การเพิ่มความพรุนและการลดขนาดอนุภาคสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ในการตรวจจับแก๊สได้อย่างมีนัยสำคัญ [19]

ในปี 2020 Kulhari และคณะได้ศึกษาแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บนฐานเซรามิกเผาพร้อมอุณหภูมิต่ำ (Low-temperature Co-fired Ceramic substrate) โดยใช้วิธีการพิมพ์สกรีนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 625, 820 และ 860 องศาเซลเซียส และทดสอบการตรวจจับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาและอุณหภูมิในการทำงานมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติการตรวจจับแก๊สของแก๊สเซนเซอร์ฟิล์มหนาที่ใช้นาโนไดออกไซด์ จากการศึกษา SEM พบว่าตัวอย่างของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่ใช้เทคโนโลยี LTCC ที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียสมีการยึดเกาะที่ดีและเหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ โดยเวลาตอบสนองและเวลาฟื้นตัวของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส นั้นดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่อุณหภูมิ 625 องศาเซลเซียส และยังมีความแตกต่างอย่างมากในขีดจำกัดการตรวจจับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิการพิมพ์สกรีนของฟิล์มตรวจจับแก๊สเป็นตัวแปรสำคัญในการพัฒนาเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น [5]

ในปี 2020 Lee และคณะได้วิเคราะห์แก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ (SnO_2 gas sensor) ที่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิการเผาผนึกต่อโครงสร้างและขนาดเกรนของอนุภาคทินไดออกไซด์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยได้ทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาพื้นผิวของตัวอย่างทินไดออกไซด์ที่ถูกเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกันสามอุณหภูมิ ได้แก่ 1100, 1200, และ 1300 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงความแตกต่างที่ชัดเจนของขนาดเกรนและส่งผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric) ของวัสดุด้วย ผลการทดลองพบว่าแก๊สเซนเซอร์ที่ใช้อุณหภูมิเผาผนึกที่ 1200 องศาเซลเซียส แสดงประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊สที่ดีที่สุด โดยมีการตอบสนองสูงและขีดจำกัดการตรวจจับต่ำ ผลลัพธ์นี้สรุปได้ว่าอุณหภูมิการเผาผนึกมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติไดอิเล็กทริกและขนาดเกรน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊ส [67]

งานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความหลากหลายในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์สำหรับการตรวจจับแก๊สโดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นฐานวิทยา ความพรุน ขนาดอนุภาค และอุณหภูมิการเผาผนึก ซึ่งแต่ละปัจจัยมีบทบาทสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติการตรวจจับแก๊สของเซนเซอร์

จากการทบทวนงานวิจัยข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าการใช้สารยึดเกาะร่วมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนช่วยลดขนาดอนุภาคและเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคนาโนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเข้มข้นของสารยึดเกาะมีผลต่อขนาดและโครงสร้างของอนุภาคนาโน โดยยิ่งความเข้มข้นของสารยึดเกาะเพิ่มขึ้น ขนาดของอนุภาคนาโนจะลดลง นอกจากนี้ สารยึดเกาะที่ใช้สามารถเป็นสารเคมี เช่น กลูโคส กรดแอสคอร์บิก หรือสารสกัดจากธรรมชาติ เช่น สารสกัดจากเปลือกส้ม ต้นชา เมล็ดเกรพฟรุต ซึ่งล้วนมีผลในการปรับปรุงคุณสมบัติของอนุภาคนาโน

ทินไดออกไซด์ (SnO_2) เป็นวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการตรวจจับแก๊สต่างๆ เนื่องจากมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแก๊สในสภาพแวดล้อม การปรับปรุงความไวและความเฉพาะเจาะจงของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์สามารถทำได้โดยการปรับขนาดและรูปร่างของอนุภาค การปรับปรุงพื้นผิว และการใช้สารประกอบร่วม งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าสัญญาณวิทยาและโครงสร้างของวัสดุเซมิคอนดักเตอร์มีผลต่อคุณสมบัติการตรวจจับแก๊ส เช่น รูพรุน ขนาดอนุภาค และอุณหภูมิการเผาผนึก เซนเซอร์ที่มีรูพรุนมากขึ้นและขนาดอนุภาคที่เล็กลงมีประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊สสูงขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นและสามารถกระจายตัวของแก๊สได้ดีขึ้น

การวิจัยทั้งสองด้านชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการปรับแต่งขนาด รูปร่าง และพื้นผิวของอนุภาคนาโนและวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานในเทคโนโลยีขั้นสูง ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน หรือการพัฒนาเซนเซอร์ตรวจจับแก๊สที่มีความไวและความเฉพาะเจาะจงสูงขึ้น



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี

1. สแตนนัสคลอไรด์ (Stannous chloride dihydrate, $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH)
3. เครื่องดื่มดับเบิ้ลซีตัสวิตามินซีและมะนาว (Double C Shot Vitamin C 200%

Lemon Lime)

4. น้ำกลั่นบริสุทธิ์ (Deionized Water, DI Water)
5. เอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)
6. อัลฟาเทอร์พีนอล (Alpha-Terpineol)
7. เอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose)

อุปกรณ์

1. ปีกเกอร์ (Beaker)
2. ช้อนตักสาร (Spatula)
3. เครื่องชั่งวิทยาศาสตร์ (Scientific scales)
4. เครื่องกวนสารแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
5. เครื่องกวนสารแม่เหล็กพร้อมความร้อน (Hotplate and Magnetic stirrer)
6. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
7. พรอทวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
8. บิวเรตต์ (Burette)
9. ไมโครปิเปต (Micro-pipettes)
10. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
11. หลอดทดลอง (Test tube)
12. หลอดหยด (Dropper)
13. ถ้วยเซรามิกเข้าหลอม (Crucible ceramic cup)
14. ฐานเซนเซอร์ (LTCC micro-hotplate)

15. ตู้อบความร้อน (Hot air oven)
16. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)
17. โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle)
18. ขวดใส่สารเคมี (Reagent Bottle)
19. ปากกาสำหรับเขียนแผ่นซีดี (CD marker)
20. เทปกาวแบบกระดาษ (Masking tape)
21. ที่คีบแบบซิลิโคน (Silicone tongs)
22. ถุงมือกันความร้อน (Heat-resistant gloves)
23. ถุงมือสำหรับทำการทดลอง (Laboratory gloves)

3.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย

การคำนวณความเข้มข้นของสารละลาย

1. คำนวณมวลของ $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมล และปริมาตรน้ำ 100 มิลลิลิตร

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1,000} \quad (9)$$

$$\frac{g}{225.63} = \frac{(0.1)(100)}{1,000} \quad (10)$$

$$g = 2.256 \quad (11)$$

2. คำนวณมวลของ NaOH ที่ความเข้มข้น 0.5 โมล และปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร

$$\frac{g}{Mw} = \frac{CV}{1,000} \quad (12)$$

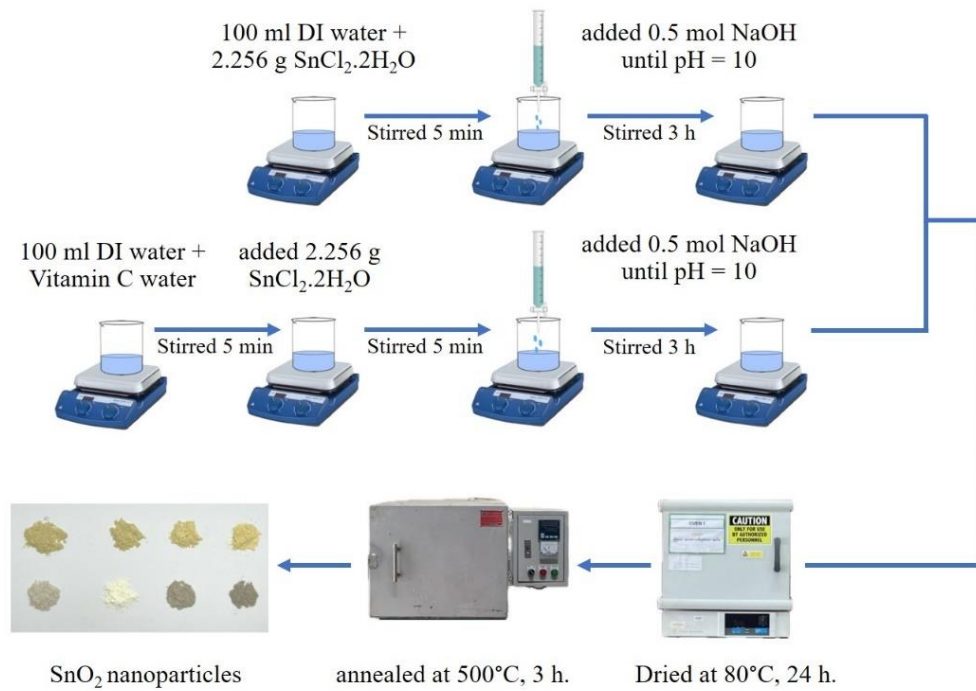
$$\frac{g}{40} = \frac{(0.5)(200)}{1,000} \quad (13)$$

$$g = 4 \quad (14)$$

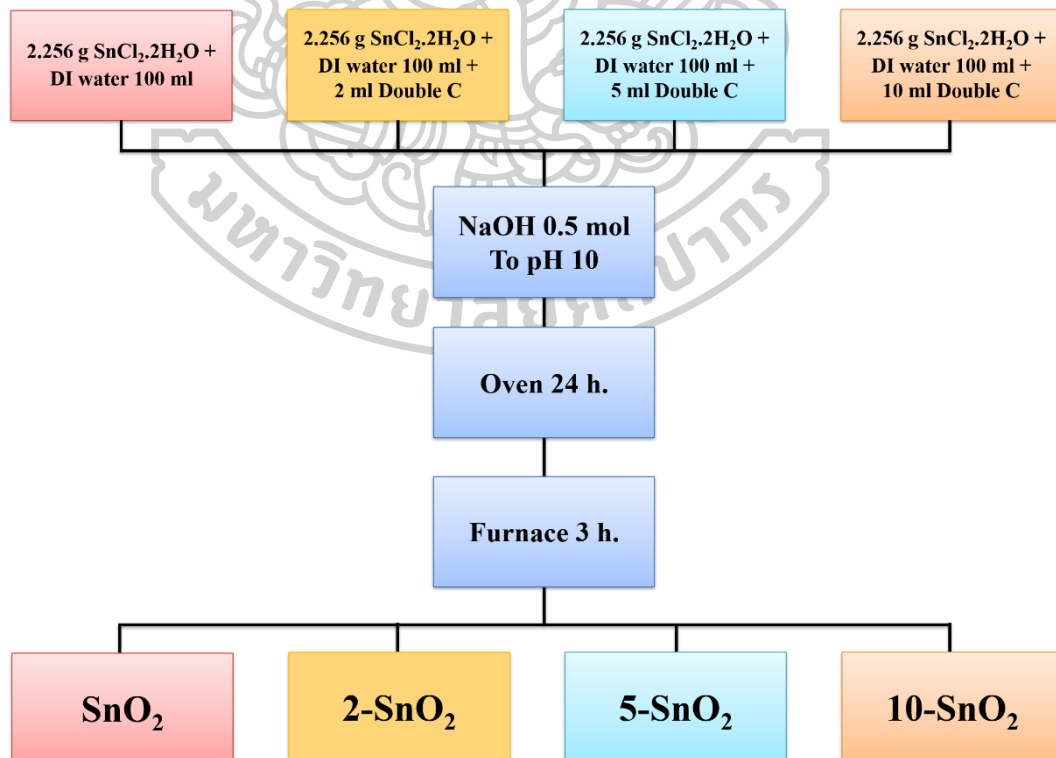
- โดยที่ g คือ มวลของสารละลายที่ต้องการ (กรัม)
 Mw คือ มวลโมลาร์ของสาร (กรัม/โมล)
 C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลิตร หรือ M)
 V คือ ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

ขั้นตอนการสังเคราะห์

- เตรียมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.5 โมล โดยการชั่ง NaOH 4 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 200 มิลลิลิตร กวนสารละลายบนเครื่องกวนสารแม่เหล็กจนเป็นเนื้อเดียวกัน
- เตรียมสารละลาย $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 0.1 โมล โดยชั่ง $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2.256 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 100 มิลลิลิตร กวนสารละลายบนเครื่องกวนสารแม่เหล็กประมาณ 10 นาที
- เมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 10 นาที ให้นำสารละลาย NaOH ที่เตรียมไว้จากข้อที่ 1 ใส่บิวเรตต์และค่อย ๆ หยดลงในบีกเกอร์ของสารละลายในขั้นตอนที่ 2 จนกว่าสารละลายจะมีค่า pH 10 จากนั้นกวนสารละลายต่อไปจนครบ 3 ชั่วโมง
- นำสารละลายในขั้นตอนที่ 3 ใส่หลอดทดลอง แล้วนำไปหมუნเหวี่ยงเพื่อให้ได้เฉพาะตะกอนของสาร ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์และเอทานอล เพื่อกำจัดไอออนคลอไรด์ และนำไปใส่ในหมუნเหวี่ยงอีกครั้ง ทำการล้างแบบนี้ประมาณ 10 รอบ จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปอบแห้งในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ขั้นตอนนี้จะมีการเติมเครื่องตีระดับเบิ้ลซีรีส์เลมอนและมะนาวที่ความเข้มข้น 2% ต่อปริมาตรของตัวทำละลาย ในขั้นตอนที่ 2 โดยทำการเตรียมตัวทำละลายใหม่ คือผสมเครื่องตีระดับเบิ้ลซีรีส์เลมอนและมะนาว 2 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 100 มิลลิลิตร ให้เข้ากันก่อน จากนั้นเติม $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2.256 กรัม กวนสารละลายบนเครื่องกวนสารแม่เหล็กประมาณ 10 นาที และทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3-5
- ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 โดยปรับความเข้มข้นของเครื่องตีระดับเบิ้ลซีรีส์เลมอนและมะนาวเป็น 5% และ 10% ต่อปริมาตรของตัวทำละลาย ซึ่งมีปริมาตร 5 และ 10 มิลลิลิตร
- เมื่อทำครบทุกขั้นตอนแล้ว ให้นำสารที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ไม่เติมเครื่องตีระดับเบิ้ลซีรีส์เลมอนและมะนาว ตัวอย่างที่เติมเครื่องตีระดับเบิ้ลซีรีส์เลมอนและมะนาว 2% 5% และ 10% โดยตั้งชื่อเป็น SnO_2 2- SnO_2 5- SnO_2 และ 10- SnO_2 ตามลำดับ



รูปที่ 15 ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย



รูปที่ 16 แผนผังรวมขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

3.3 การเตรียมตัวเชื่อมประสาน

ขั้นตอนการเตรียม

1. ชั่ง Alpha-Terpineol 18 กรัม และ Ethyl cellulose 430 มิลลิลิตร
2. ผสมสารเคมีในขั้นตอนที่ 1 ในบีกเกอร์และนำไปกวนบนเครื่องกวนสารแม่เหล็กแบบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนืดตามที่ต้องการ
3. จากนั้นพักไว้จนเย็นก่อนนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

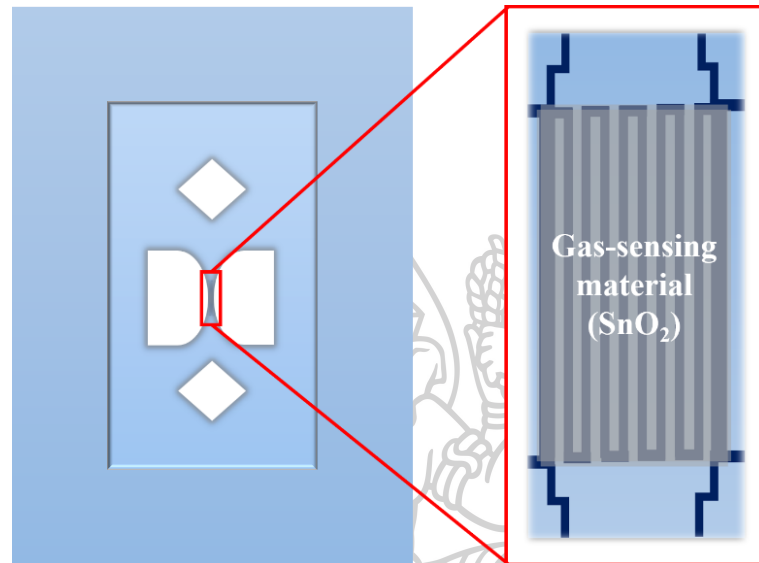
3.4 การเตรียมอุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส

ขั้นตอนการเตรียม

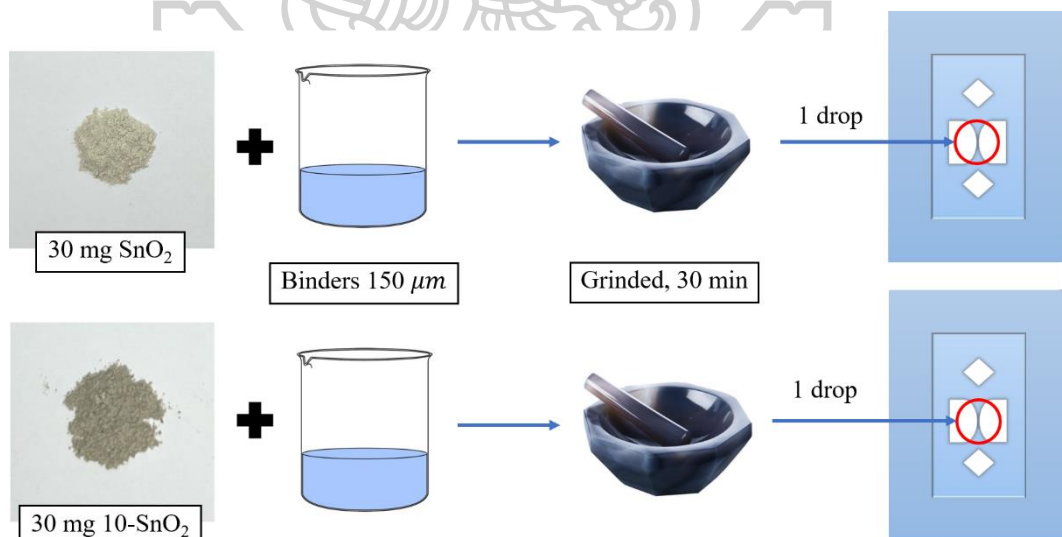
1. เตรียมอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ของตัวอย่าง SnO_2 และ 10-SnO_2 ตัวอย่างละ 30 มิลลิกรัม และตัวเชื่อมประสาน 150 ไมโครลิตร
2. ผสมตัวเชื่อมประสานกับอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ของตัวอย่าง SnO_2 และตัวอย่าง 10-SnO_2 ให้เข้ากันในโถรงบดสารขนาดเล็กเป็นเวลา 30 นาที
3. เมื่อได้อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่ผสมกับตัวเชื่อมประสานแล้ว ให้นำไปหยดลงบนฐานเซนเซอร์ 1 ครั้ง เพื่อเป็นความหนา 1 ชั้น และนำไปวางบนเตาความร้อนให้แห้ง
4. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 ทั้งหมด 6 ชั้น แบ่งเป็นตัวอย่าง SnO_2 3 ชั้น และตัวอย่าง 10-SnO_2 3 ชั้น
5. นำฐานเซนเซอร์จากขั้นตอนที่ 2 ของตัวอย่าง SnO_2 และตัวอย่าง 10-SnO_2 วางพักไว้ตัวอย่างละ 1 ชั้น และหยดสารในขั้นตอนที่ 1 บนฐานเซนเซอร์ 4 ชั้นที่เหลือ เพิ่มไปอีก 1 หยด เพื่อเป็นความหนา 2 ชั้น แบ่งเป็นตัวอย่าง SnO_2 2 ชั้น และตัวอย่าง 10-SnO_2 2 ชั้น จากนั้นนำไปวางบนเตาความร้อนให้แห้ง
6. นำฐานเซนเซอร์จากขั้นตอนที่ 3 ของตัวอย่าง SnO_2 และตัวอย่าง 10-SnO_2 วางพักไว้ตัวอย่างละ 1 ชั้น และหยดสารในขั้นตอนที่ 1 บนฐานเซนเซอร์ 2 ชั้นที่เหลือ เพิ่มไปอีก 1 หยด เพื่อเป็นความหนา 3 ชั้น แบ่งเป็นตัวอย่าง SnO_2 1 ชั้น และตัวอย่าง 10-SnO_2 1 ชั้น จากนั้นนำไปวางบนเตาความร้อนให้แห้ง
7. จากขั้นตอนที่ 2-4 จะได้ฐานเซนเซอร์ทั้งหมด 6 ชั้น โดยแต่ละตัวอย่างจะความหนา 1-3 ชั้น แบ่งเป็นตัวอย่าง SnO_2 3 ชั้น และตัวอย่าง 10-SnO_2 3 ชั้น และตั้งชื่อเป็น $\text{SnO}_2\text{-1}$, $\text{SnO}_2\text{-2}$, $\text{SnO}_2\text{-3}$, $10\text{-SnO}_2\text{-1}$, $10\text{-SnO}_2\text{-2}$ และ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$

8. นำฐานเซนเซอร์ที่ได้ไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปติดตั้งในอุปกรณ์รับรู้แก๊ส

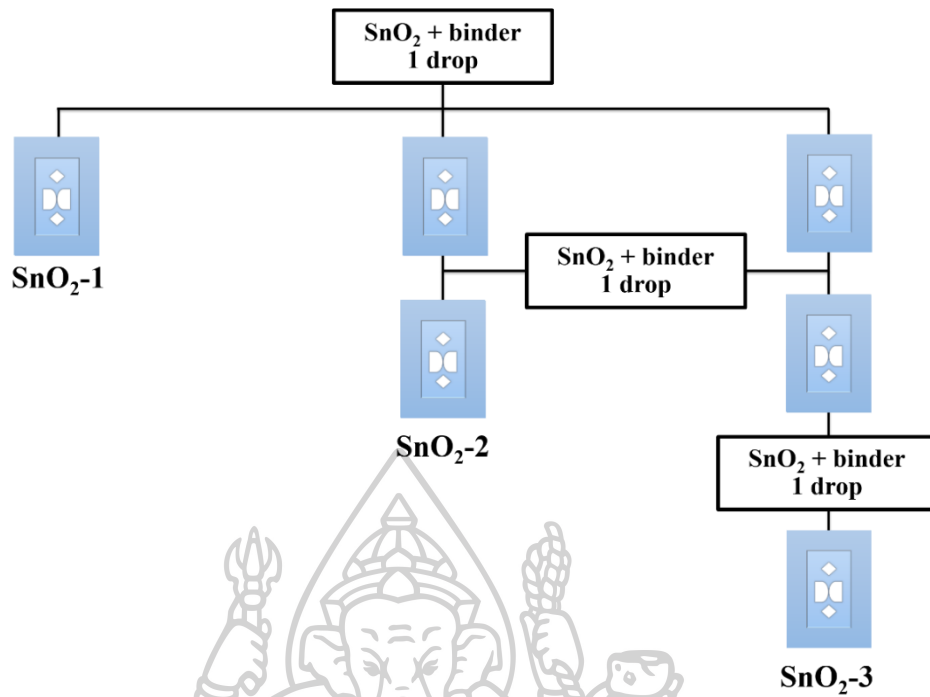
9. จากนั้นนำไปติดตั้งในอุปกรณ์รับรู้แก๊ส เครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องควบคุม ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สทดสอบ



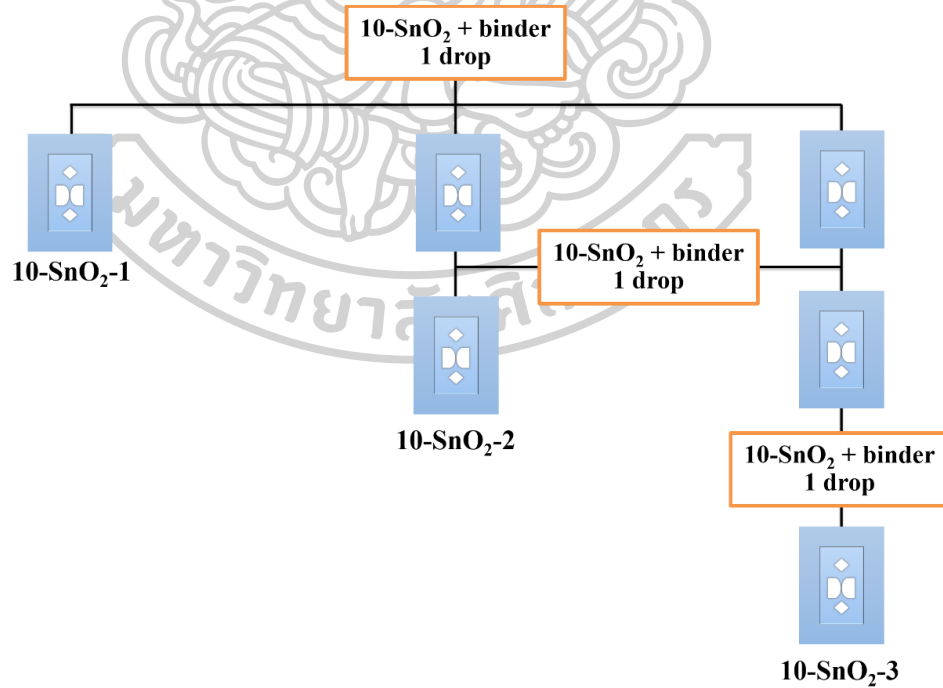
รูปที่ 17 ภาพจำลองลักษณะของฐานเซนเซอร์



รูปที่ 18 ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์ตรวจจับแก๊ส



รูปที่ 19 แผนผังรวมขั้นตอนการเตรียมฐานเซนเซอร์ของกลุ่ม SnO₂



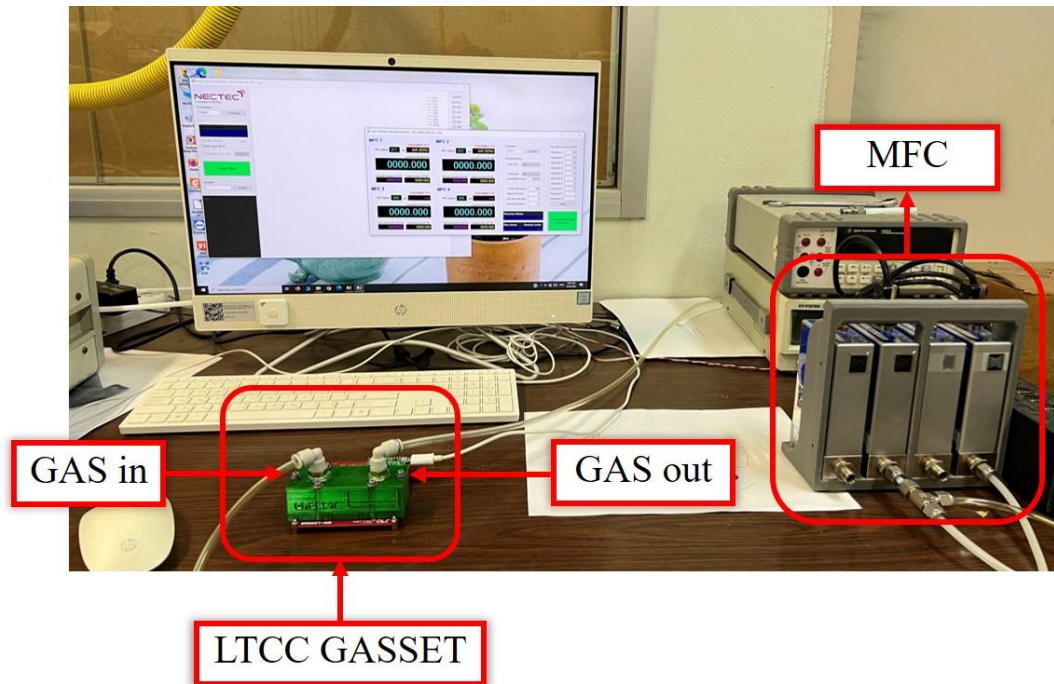
รูปที่ 20 แผนผังรวมขั้นตอนการเตรียมฐานเซนเซอร์ของกลุ่ม 10-SnO₂



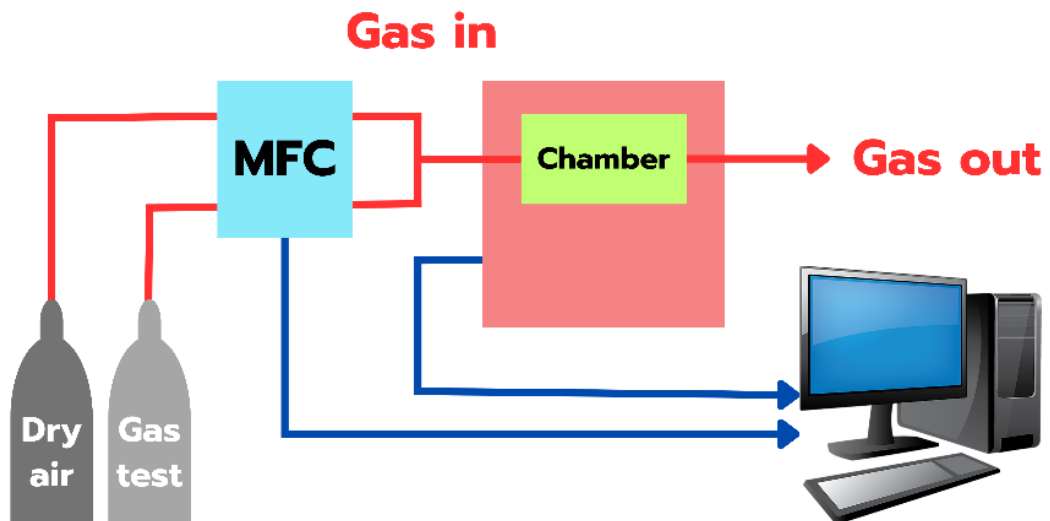
รูปที่ 21 การเชื่อมต่อฐานเซนเซอร์เข้ากับขั้วไฟฟ้าภายในอุปกรณ์รับรู้แก๊ส

3.5 การทดสอบประสิทธิภาพแก๊สเซนเซอร์ชนิดออกไซด์

การทดสอบประสิทธิภาพแก๊สเซนเซอร์จะพิจารณาการวัดค่า ค่าการตอบสนอง (Response) เวลาการตอบสนอง (Response time) เวลาการคืนสภาพ (Recovery time) ความเสถียร (Stability) ความไว (Sensitivity) ความจำเพาะ (Selectivity) ขีดจำกัดของการตรวจจับ (Limit Of Detection) และแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม (Operating Voltage) ต่อแก๊สทดสอบทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) แอมโมเนีย (Ammonia) แอซีโตน (Acetone) ไนตริกออกไซด์ (Nitric Oxide) และเอทานอล (Ethanol) เมื่อได้ฐานเซนเซอร์ครบทั้ง 6 ตัวแล้ว นำไปเชื่อมกับขั้วไฟฟ้า ต่อมาติดตั้งอุปกรณ์รับรู้แก๊ส เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส แก๊สออกซิเจน และแก๊สทดสอบ ดังรูปที่ 23 ต่อมาตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า ความเข้มข้นแก๊สทดสอบ เวลาการปล่อยและหยุดแก๊สทดสอบ ผ่านโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณ ในงานวิจัยนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 2.0-3.6 โวลต์ ความเข้มข้นแก๊สสูงสุดที่ 100 ppm และความเข้มข้นแก๊สต่ำสุดที่ 2 ppm โดยการทดสอบจะเพิ่มช่วงแรกของการตรวจจับแก๊สเข้าไปเพื่อเป็นการเตรียมพร้อมการตรวจจับแก๊สของวัสดุตรวจจับ และตัดออกในตอนท้าย เมื่อเริ่มปล่อยแก๊สทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงตามกลไกและหลักการของแก๊สเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์



รูปที่ 22 การติดตั้งอุปกรณ์รับรู้แก๊ส เครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องควบคุมปริมาณความเข้มข้นของแก๊สทดสอบ



รูปที่ 23 แผนผังแสดงการติดตั้งอุปกรณ์รับรู้แก๊ส เครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องควบคุมปริมาณความเข้มข้นของแก๊สทดสอบ



รูปที่ 24 การตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า ความเข้มข้นแก๊สทดสอบ เวลาการปล่อยและหยุดแก๊สทดสอบ
ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณ



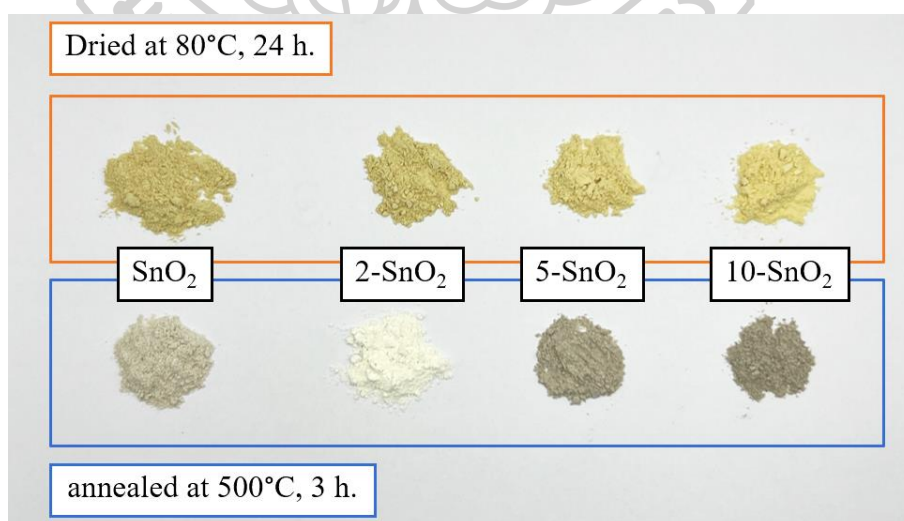
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

4.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

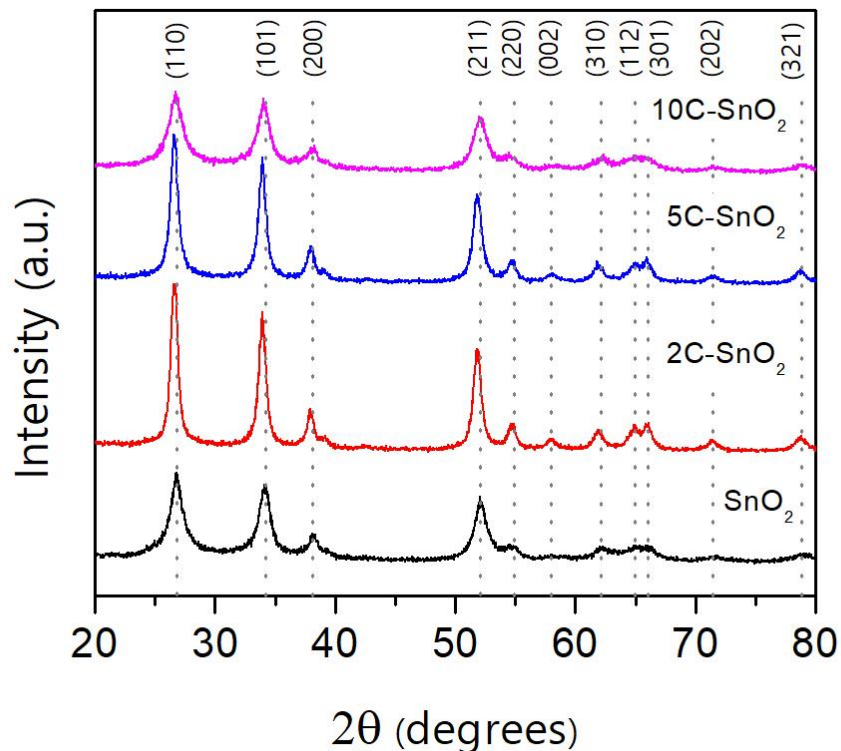
ลักษณะทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำโลหะทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ก่อนการเผาจะมีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อนทั้ง 4 ตัวอย่าง แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าผงทินไดออกไซด์ของตัวอย่าง SnO_2 2- SnO_2 5- SnO_2 และ 10- SnO_2 มีสีที่เปลี่ยนไปคือ สีเทาอ่อน สีขาวขุ่น สีเทา สีเทาเข้ม เรียงตามลำดับ การเผาที่อุณหภูมิสูงสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกได้คือการโครงสร้างผลึกจากอนาเทส (Anatase) ไปเป็นรูไทล์ (Rutile) หรือจากการไม่เป็นผลึก (Amorphous) ไปเป็นโครงสร้างผลึก การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้วัสดุมีการกระจายแสงที่แตกต่างกันและเกิดการเปลี่ยนสี นอกจากนี้การเผาที่อุณหภูมิสูงสามารถทำให้มีการปนเปื้อนจากสารอื่น ๆ ที่อาจมีอยู่ในสภาพแวดล้อม หรือสารเจือปนในตัววัสดุเอง ตัวอย่างเช่น ถ้ามีสารอินทรีย์หรือตัวเติมชนิดอื่น ๆ ที่อาจถูกเผาไหม้และเปลี่ยนแปลงสีของทินไดออกไซด์ได้ โดยงานวิจัยนี้ได้เติมเครื่องดัดเบิ้ลซีรีส์เลมอนและมะนาวในตอนการสังเคราะห์ที่ปริมาณแตกต่างกัน 4 ค่า ทำให้ส่งผลต่อสีที่เข้มขึ้นของผงทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ แต่ในตัวอย่าง 2- SnO_2 มีสีที่ค่อนข้างโดดเด่นนั้นอาจเป็นเพราะมีฟิสิกของโครงสร้างผลึกที่ชัดเจนกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ซึ่งจะวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 25 ลักษณะทางกายภาพของผงนาโนทินไดออกไซด์ก่อนและหลังเผา

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

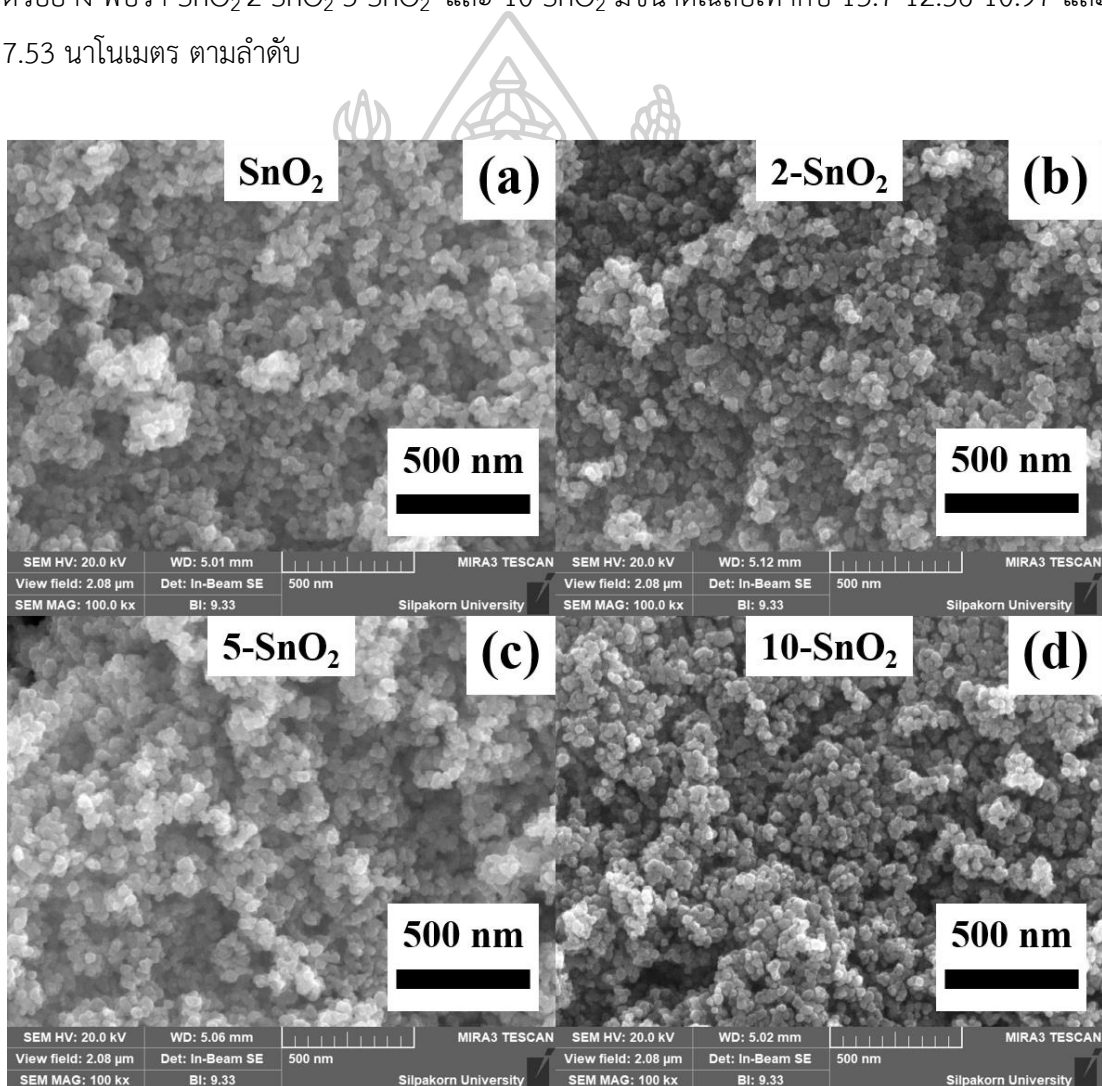
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ผ่านวิธีตกตะกอนอย่างง่ายทั้ง 4 ตัวอย่างนั้นจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยใช้รังสี $\text{CuK}\alpha$ ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.540598 อังสตรอม ระยะของ 2θ อยู่ระหว่าง 20-80 องศา พบว่า SnO_2 2- SnO_2 5- SnO_2 และ 10- SnO_2 ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.6, 34, 38, 51.8, 54.8, 57.9, 61.9, 64.6, 66, 71.3 และ 78.7 องศา ตรงกับระนาบผลึก (110), (101), (200), (211), (220), (002), (310), (112), (301), (202) และ (321) ตามลำดับ โดยผลลัพธ์ที่ได้นี้สอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 41-1445 เป็นโครงสร้างผลึกเตตระโกนอล ชนิดรูไทล์ และจะสังเกตได้ว่าไม่มีเฟสอื่น ๆ ที่ไม่สอดคล้องกับ SnO_2 [39, 68, 69] ซึ่งเป็นการยืนยันความบริสุทธิ์ของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ ในตัวอย่าง 2- SnO_2 5- SnO_2 และ 10- SnO_2 ความสูงของพีคมีขนาดลดลงตามลำดับ โดยตัวอย่าง 2- SnO_2 มีความสูงของพีคที่มากที่สุดจึงอาจเป็นสาเหตุของสีที่แตกต่างจากตัวอย่างอื่น ๆ



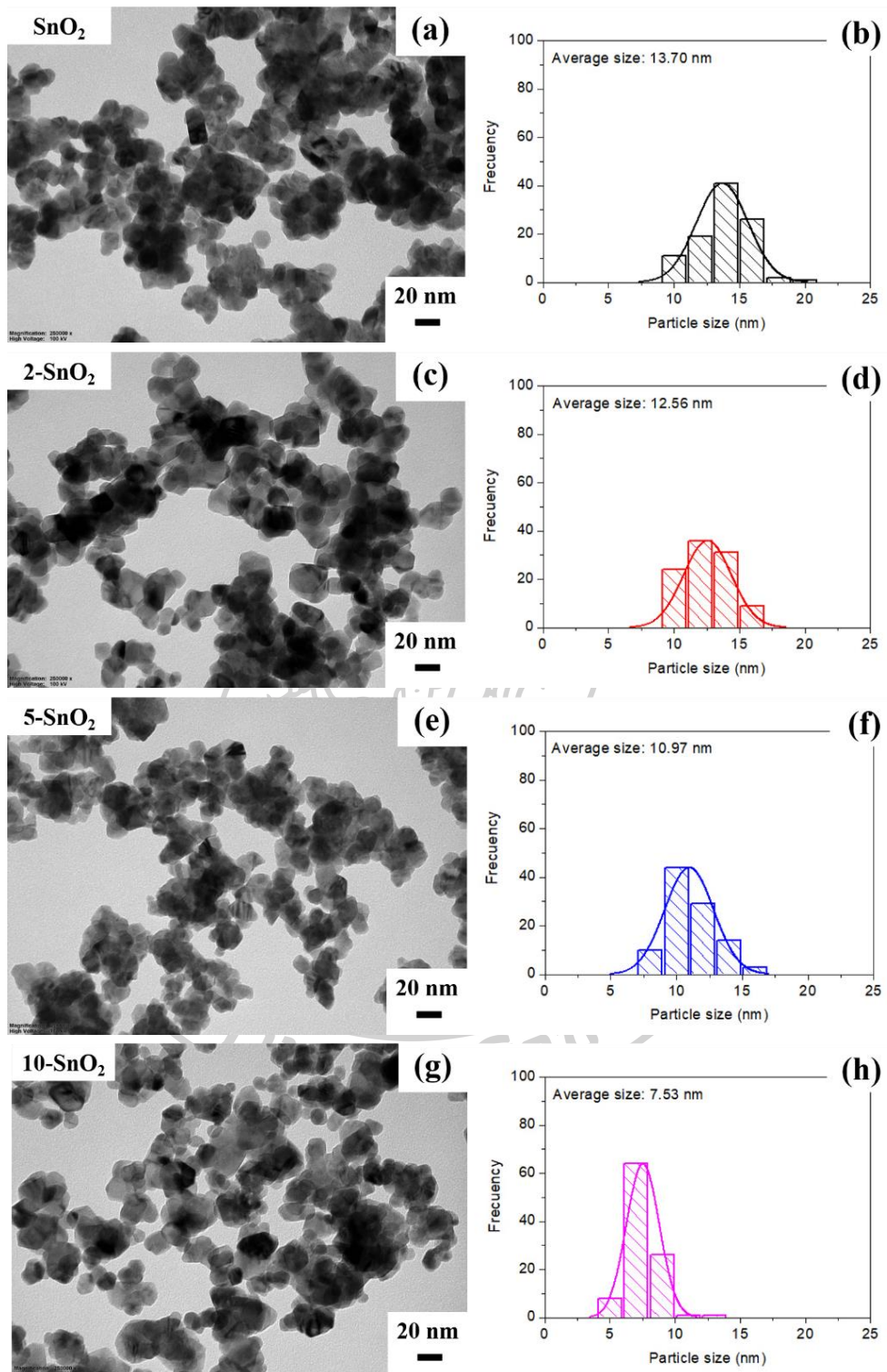
รูปที่ 26 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์จะวิเคราะห์ผ่านรูปถ่าย 3 มิติ และ 2 มิติ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิวอิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) โดยรูปถ่ายจากทั้งสองเครื่องมีความสอดคล้องกันคือ พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ มีลักษณะกึ่งทรงกลมและมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และได้ทำการวัดขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยจากการวัด 100 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่าง พบว่า SnO_2 2- SnO_2 5- SnO_2 และ 10- SnO_2 มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 13.7 12.56 10.97 และ 7.53 นาโนเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 27 SEM ของ (a) SnO_2 (b) 2- SnO_2 (c) 5- SnO_2 และ (d) 10- SnO_2 ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า



รูปที่ 28 TEM ของ (a)-(b) SnO₂ (c)-(d) 2-SnO₂ (e)-(f) 5-SnO₂ และ (g)-(h) 10-SnO₂ และกราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ที่กำลังขยาย 135,000 เท่า

ตารางที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

ตัวอย่าง	ปริมาณเครื่องตีดับเบิลซี (%)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (nm)
SnO ₂	0	13.70
2-SnO ₂	2	12.56
5-SnO ₂	5	10.97
10-SnO ₂	10	7.53

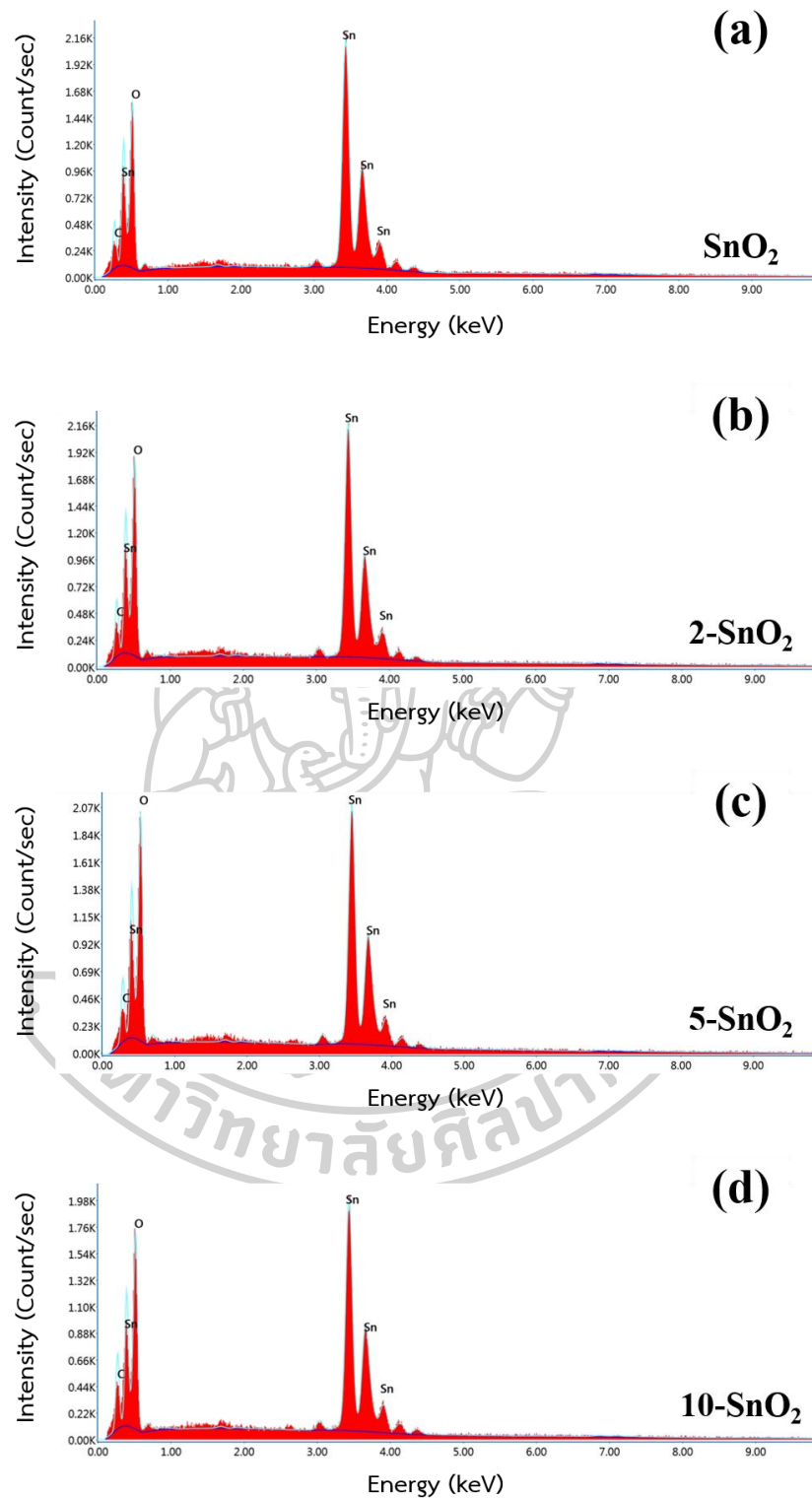
จากตารางที่ 4 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขนาดอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนอย่างง่าย และมีการปรับปริมาตรของเครื่องตีดับเบิลซีรสเลมอนและมะนาวที่ต่างกัน คือ 2% 5% และ 10% ต่อปริมาตรของสารละลาย เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคถูกวัดจากรูปถ่าย TEM จำนวน 100 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่าง ด้วยโปรแกรม ImageJ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อเติมเครื่องตีดับเบิลซีรสเลมอนและมะนาวในปริมาณที่มากขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างนี้ได้ดำเนินการโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์จุลภาคด้วยรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS) ผลการวิเคราะห์ที่แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักและเปอร์เซ็นต์อะตอมของดีบุก (Sn) ออกซิเจน (O) และคาร์บอน (C) ในทุกตัวอย่าง ดังตารางที่ 5 พบว่าทั้งเปอร์เซ็นต์น้ำหนักและเปอร์เซ็นต์อะตอมของคาร์บอน (C) มีค่าสูงขึ้น

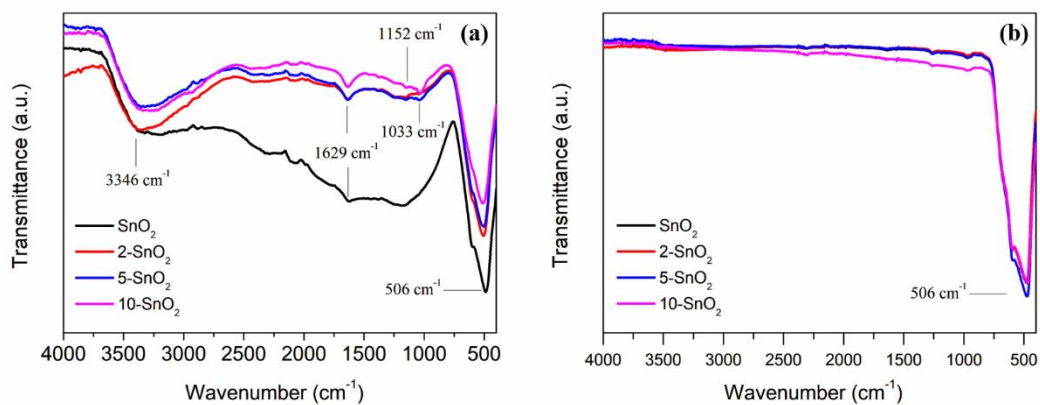
ตารางที่ 5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักและเปอร์เซ็นต์อะตอมของดีบุก ออกซิเจนและคาร์บอน ที่อยู่ในอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์จาก EDS สเปกตรัม

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก			เปอร์เซ็นต์อะตอม		
	ดีบุก (Sn)	ออกซิเจน (O)	คาร์บอน (C)	ดีบุก (Sn)	ออกซิเจน (O)	คาร์บอน (C)
SnO ₂	82.39	14.54	3.07	37.35	48.89	13.76
2-SnO ₂	80.18	16.30	3.51	34.00	51.28	14.72
5-SnO ₂	78.37	17.87	3.75	31.59	53.46	14.95
10-SnO ₂	78.77	16.56	4.67	31.79	49.59	18.62



รูปที่ 29 EDS สเปกตรัมของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ของตัวอย่าง
(a) SnO_2 (b) 2-SnO_2 (c) 5-SnO_2 และ (d) 10-SnO_2

นอกจากนี้ ยังได้มีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีโดยใช้สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) ในช่วงความยาวคลื่น $4,000-400\text{ cm}^{-1}$ เพื่อระบุกลุ่มฟังก์ชันที่มีอยู่ในตัวอย่าง ในรูปที่ 30(a) แสดงสเปกตรัม FT-IR ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ก่อนการเผา พบพีคของการสั่นสะเทือนที่ 506 cm^{-1} สอดคล้องกับพันธะ Sn-O ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ SnO_2 พีคที่ 1152 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะคู่ C=C 1033 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O บ่งบอกถึงการมีอยู่ของคาร์บอนจากการเติมเครื่องตีดับเบิลซีรอสเลมอนและมะนาว พีคที่ 1629 cm^{-1} และ 3346 cm^{-1} บ่งบอกถึงการมีอยู่ของกลุ่ม O-H รูปที่ 30(b) แสดงสเปกตรัม FT-IR ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์หลังการเผาที่อุณหภูมิ 500°C พบว่าพีคของการสั่นสะเทือนที่ 506 cm^{-1} ยังคงมีอยู่ แต่พีคอื่น ๆ ที่พบก่อนการเผาได้หายไปอย่างชัดเจนในทุกตัวอย่าง ซึ่งอาจบ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ที่เพิ่มขึ้นของสารกึ่งตัวนำโลหะทินไดออกไซด์ (SnO_2)



รูปที่ 30 FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ (a) ก่อนเผาและ (b) หลังเผาของตัวอย่าง SnO_2 2-SnO_2 5-SnO_2 และ 10-SnO_2

4.1.5 การคำนวณช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน

การคำนวณความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์จะคำนวณจากสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสง UV - Vis โดยใช้แบบจำลอง Tauc ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) และพลังงานของโฟตอน ($h\nu$) ตามสมการ (8) $(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^n$ ค่าเลขชี้กำลัง n จากกฎเบียร์-แลมเบิร์ต มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของการเปลี่ยนผ่านพลังงานในวัสดุ ซึ่งมีค่าดังนี้

$$n = \frac{1}{2} \text{ สำหรับการเปลี่ยนผ่านโดยตรง (direct transition)}$$

$n = 2$ สำหรับการเปลี่ยนผ่านโดยอ้อม (indirect transition)

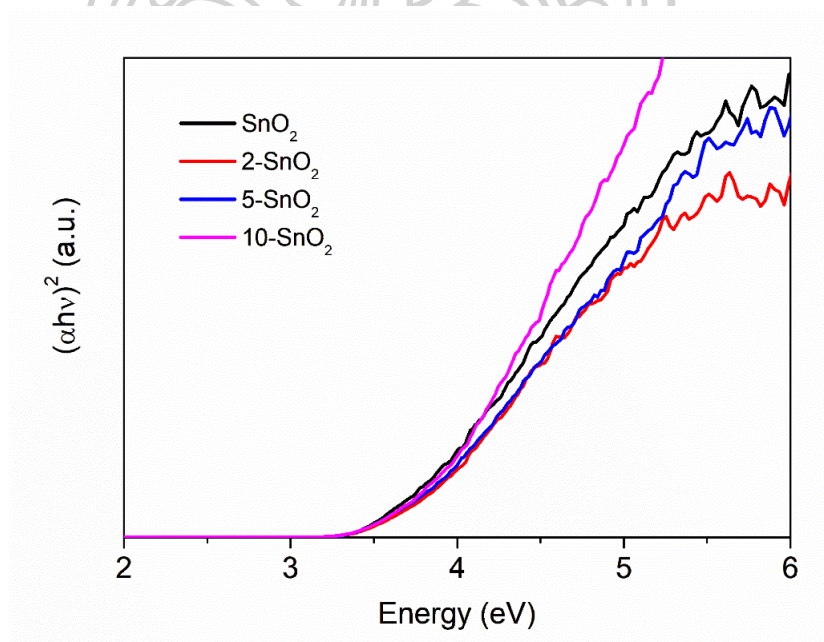
$n = \frac{3}{2}$ สำหรับการเปลี่ยนผ่านที่ต้องห้ามโดยตรง (forbidden direct transition)

$n = 3$ สำหรับการเปลี่ยนผ่านที่ต้องห้ามทางอ้อม (forbidden indirect transition)

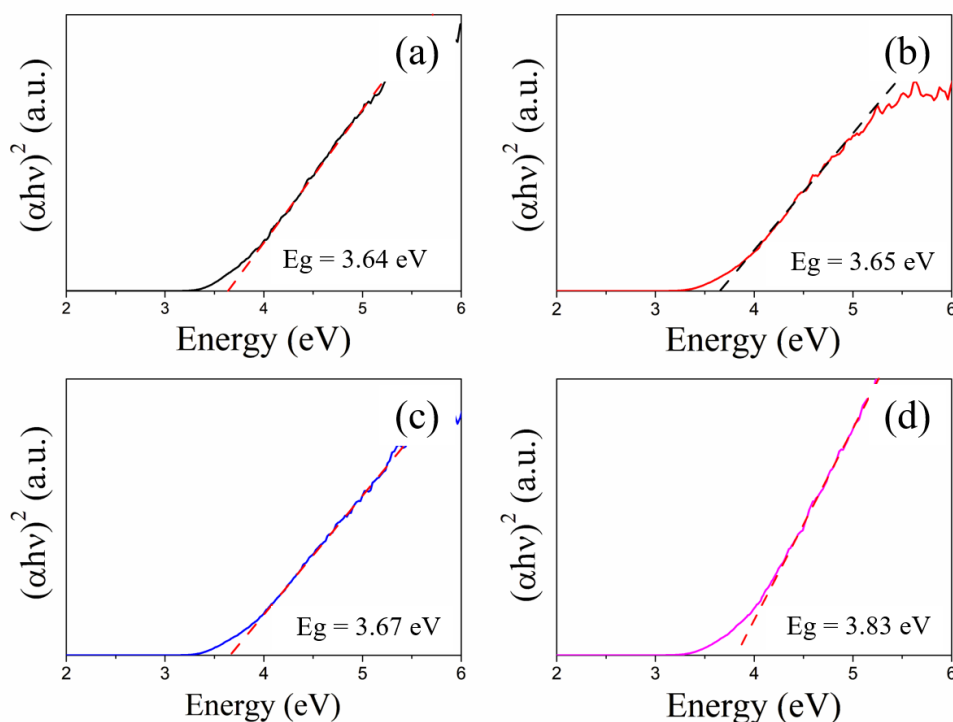
ในกรณีของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ (SnO_2) ค่าของ n คือ $1/2$ ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนผ่านโดยตรง (direct transition) เมื่อสร้างกราฟของ $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ และหาจุดตัดของส่วนเชิงเส้นของกราฟกับ แกน $h\nu$ (พลังงานของโฟตอน) จุดตัดนี้จะให้ค่าประมาณของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap energy) [31]

ตารางที่ 6 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

ตัวอย่าง	ปริมาณเครื่องดิมดับเบิลซี (%)	ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (eV)
SnO_2	0	3.64
2- SnO_2	2	3.65
5- SnO_2	5	3.67
10- SnO_2	10	3.83



รูปที่ 31 การเปรียบเทียบกราฟทอคสำหรับการหาช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

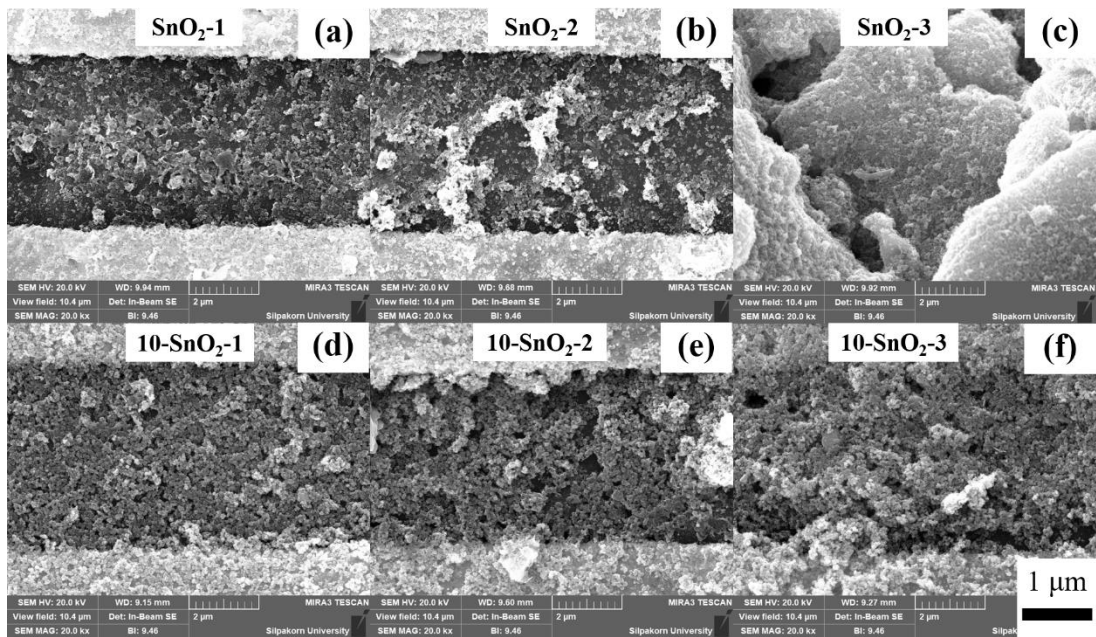


รูปที่ 32 กราฟทอคสำหรับการหาช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของ (a) SnO_2 (b) 2-SnO_2 (c) 5-SnO_2 และ (d) 10-SnO_2

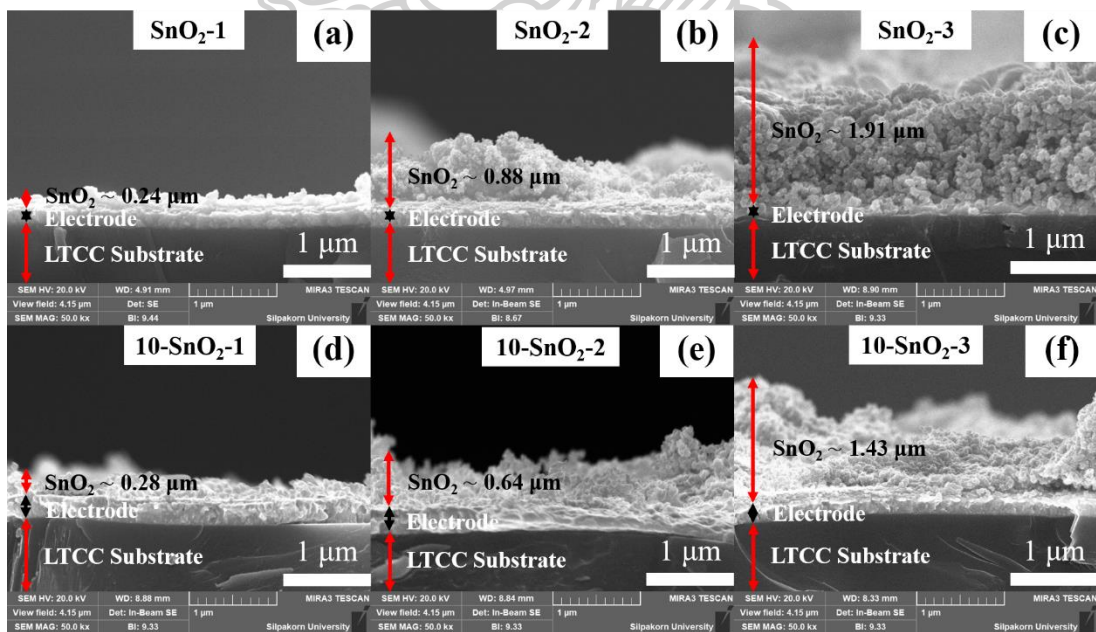
4.2 ลักษณะพื้นผิวและความหนาของวัสดุตรวจจับแก๊สบนฐานเซนเซอร์

จากการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ งานวิจัยนี้ได้เลือกตัวอย่าง SnO_2 และ 10-SnO_2 มาใช้เป็นวัสดุตรวจจับแก๊สเซนเซอร์ โดย SnO_2 เป็นตัวอย่างที่ไม่ได้เติมเครื่องตีดับเบิ้ลซีรอสเลมอนและมะนาว มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนจากรูปถ่าย TEM เท่ากับ 13.7 นาโนเมตร ส่วน 10-SnO_2 เป็นตัวอย่างที่เติมเครื่องตีดับเบิ้ลซีรอสเลมอนและมะนาว 10% มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนที่ 7.53 นาโนเมตร อนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแก๊สมากขึ้นจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ การเปรียบเทียบตัวอย่าง SnO_2 และ 10-SnO_2 ซึ่งเป็นขนาดใหญ่ที่สุดและเล็กที่สุด จะช่วยให้เข้าใจถึงผลกระทบของขนาดอนุภาคที่ต่างกันต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์

นอกจากนี้ ยังได้ปรับความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับให้มีความหนาตั้งแต่ 1-3 ชั้น โดยใช้วิธีการหยดสาร เพื่อศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ ตัวอย่างเหล่านี้ถูกตั้งชื่อว่า $\text{SnO}_2\text{-1}$, $\text{SnO}_2\text{-2}$, $\text{SnO}_2\text{-3}$, $10\text{-SnO}_2\text{-1}$, $10\text{-SnO}_2\text{-2}$ และ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$ ตามลำดับ



รูปที่ 33 SEM ด้านบนของ (a) SnO₂-1 (b) SnO₂-2 (c) SnO₂-3 (d) 10-SnO₂-1 (e) 10-SnO₂-2 และ (f) 10-SnO₂-3 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า



รูปที่ 34 SEM ด้านตัดขวางของ (a) SnO₂-1 (b) SnO₂-2 (c) SnO₂-3 (d) 10-SnO₂-1 (e) 10-SnO₂-2 และ (f) 10-SnO₂-3 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

จากรูปที่ 33 และ 34 แสดงภาพ FE-SEM ด้านบนและตัดขวางของฐานเซนเซอร์ที่เติมวัสดุตรวจจับแล้ว โดยทุกตัวอย่างถูกเผาภายใต้สภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าวัสดุตรวจจับมีการยึดเกาะที่ดีเยี่ยมกับฐานเซนเซอร์ LTCC

ภาพตัดขวางแสดงให้เห็นถึงความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของวัสดุตรวจจับ โดยความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับของแก๊สเซนเซอร์แต่ละตัวมีขนาดเท่ากับ 0.24 0.88 1.91 0.28 0.64 และ 1.43 ไมโครเมตร สำหรับแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 SnO₂-2 SnO₂-3 10-SnO₂-1 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ตามลำดับ

ในรูปที่ 33 และ 34 (a-c) กลุ่มเซนเซอร์ SnO₂ แสดงให้เห็นว่าความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-3 มีชั้นวัสดุตรวจจับหนาที่สุดและมีความหนาเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด รูปที่ 34(c) FE-SEM ยังแสดงให้เห็นเกรนของวัสดุตรวจจับที่มีลักษณะการจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ในแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-3 ส่งผลทำให้มีความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับที่มากเกินไป ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้อาจส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระไปยังขั้วอิเล็กโทรดบนพื้นผิวเซนเซอร์ที่ยากขึ้นและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์โดยตรง

รูปที่ 33 และ 34 (d-f) แสดง FE-SEM ทั้งด้านบนและตัดขวางของกลุ่มเซนเซอร์ 10-SnO₂ แสดงให้เห็นว่าความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับและมีความหนาน้อยกว่ากลุ่มเซนเซอร์ SnO₂ แต่ลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์มีความเป็นระเบียบและมีความพรุนมากกว่ากลุ่มของ SnO₂ ผู้วิจัยคาดว่าผลลัพธ์ของเซนเซอร์ 10-SnO₂ น่าจะเป็นเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่ากลุ่มของ SnO₂ เนื่องจากความพรุนและช่องว่างที่เกิดจากการเรียงตัวกันจะส่งผลให้เซนเซอร์ 10-SnO₂ มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแก๊สทดสอบที่มากขึ้น อีกทั้งช่องว่างยังทำให้อิเล็กตรอนอิสระสามารถเคลื่อนที่กลับลงมายังขั้วอิเล็กโทรดบนพื้นผิวเซนเซอร์ได้ง่ายขึ้น ซึ่งขนาดเกรนของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่แสดงในรูปไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นตรวจจับ แต่ถูกกำหนดโดยเงื่อนไขในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์

เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาต่อแก๊สเซนเซอร์ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์จะพิจารณาจากค่าการตอบสนอง (Response) เวลาการตอบสนอง (Response time) เวลาการคืนสภาพ (Recovery time) ความเสถียร (Stability) ความไว (Sensitivity) ความจำเพาะ (Selectivity) ขีดจำกัดการตรวจจับ (Limit Of Detection) และแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม (Operating Voltage) ต่อแก๊สทดสอบทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) แอมโมเนีย (Ammonia) แอซีโตน (Acetone) ไนตริกออกไซด์ (Nitric Oxide) และเอทานอล (Ethanol)

4.3.1 การตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน

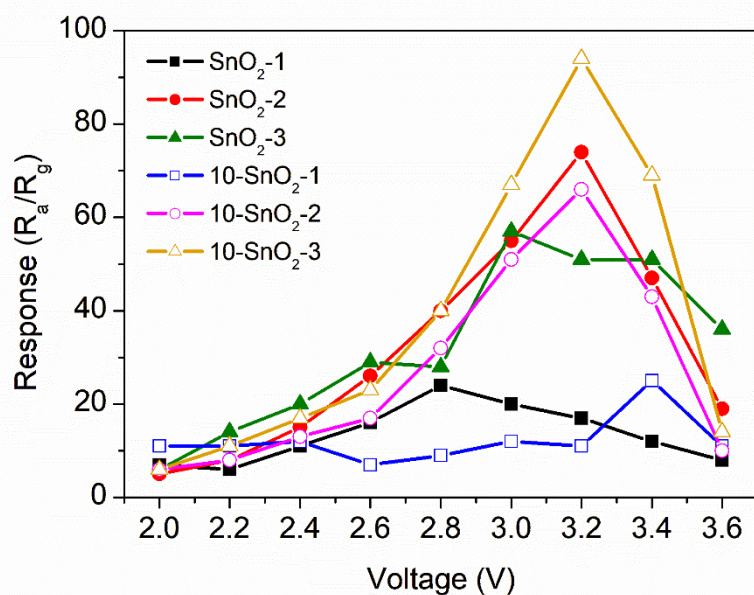
ในตารางที่ 7 แสดงค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1, SnO₂-2, SnO₂-3, 10-SnO₂-1, 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm ที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 3.2 โวลต์ จากนั้นค่าการตอบสนองจะลดลงหากแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีก การเปลี่ยนแปลงนี้บ่งชี้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ 3.2 โวลต์ เป็นแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเซนเซอร์ การลดลงของค่าการตอบสนองที่แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 3.2 โวลต์ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุตรวจจับ เช่น ในแก๊สเซนเซอร์แบบ MOS อาจมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง ทำให้ค่าความต้านทานหรือค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจส่งผลให้การตรวจวัดแก๊สไม่แม่นยำ

จากรูปที่ 35 แสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-2, 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 มีค่าการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลสูงที่สุดที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์ ขณะที่แก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 และ 10-SnO₂-1 มีค่าการตอบสนองน้อยที่สุด เนื่องจากทั้งสองเซนเซอร์มีความหนาของวัสดุตรวจจับเพียง 1 ชั้น ทำให้มีอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุตรวจจับน้อย ส่งผลให้เกิดออกซิเจนไอออนน้อย จึงตอบสนองต่อแก๊สที่เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ไม่ดีพอ

สำหรับกลุ่มแก๊สเซนเซอร์ 10-SnO₂-1, 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 พบว่าค่าการตอบสนองมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับ อย่างไรก็ตาม กลุ่มของ SnO₂ แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของความหนาที่มากเกินไป โดยแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-2 มีค่าการตอบสนองสูงกว่าแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-3 ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของกลุ่ม SnO₂ ที่ใหญ่กว่ากลุ่ม 10-SnO₂ ทำให้มีการจัดเรียงตัวบนฐานเซนเซอร์ไม่เป็นระเบียบ นอกจากนี้ แก๊สเซนเซอร์ SnO₂-3 มีความหนามากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกตัวอย่าง ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระไปยังขั้วอิเล็กโทรดบนพื้นผิวเซนเซอร์ทำได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้ เซนเซอร์ 10-SnO₂ จึงมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีกว่าเซนเซอร์ SnO₂ เนื่องจากความพรุนและการจัดเรียงตัวของอนุภาคนาโนที่เป็นระเบียบมากกว่า ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแก๊สทดสอบมากขึ้น อีกทั้งช่องว่างที่เกิดจากการจัดเรียงตัวทำให้อิเล็กตรอนอิสระสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊สของกลุ่มเซนเซอร์ 10-SnO₂ สูงกว่ากลุ่มเซนเซอร์ของ SnO₂

ตารางที่ 7 ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ค่าการตอบสนอง					
	SnO ₂ -1	SnO ₂ -2	SnO ₂ -3	10-SnO ₂ -1	10-SnO ₂ -2	10-SnO ₂ -3
2.0	7	5	6	11	6	6
2.2	6	8	14	11	8	11
2.4	11	15	20	12	13	17
2.6	16	26	29	7	17	23
2.8	24	40	28	9	32	40
3.0	20	55	57	12	51	67
3.2	17	74	51	11	66	94
3.4	12	47	51	25	43	69
3.6	8	19	36	11	10	14

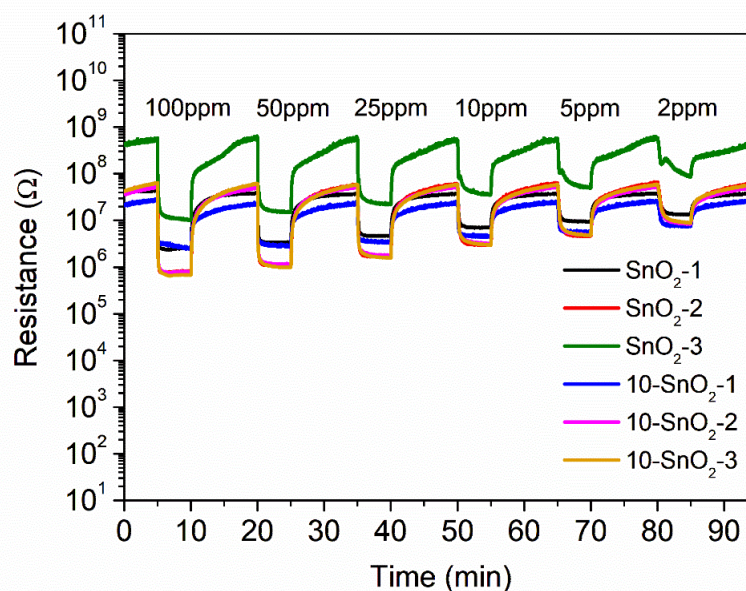


รูปที่ 35 การตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 SnO₂-2 SnO₂-3 10-SnO₂-1 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สเอทานอลและการตอบสนองของเซนเซอร์ในเงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่างกันและแรงดันไฟฟ้าคงที่

รูปที่ 36 แสดงการตอบสนองแบบไดนามิกของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1, SnO₂-2, SnO₂-3, 10-SnO₂-1, 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างกันที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์ ผลการทดลองพบว่าแก๊สเซนเซอร์ทั้งหมดมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงที่ปล่อยและหยุดแก๊สเอทานอล โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ชัดเจนแม้จะอยู่ภายใต้ความเข้มข้นต่ำถึง 2 ppm ในทุกตัวอย่าง แสดงให้เห็นถึงความไวสูงของเซนเซอร์ในการตรวจจับแก๊สเอทานอล

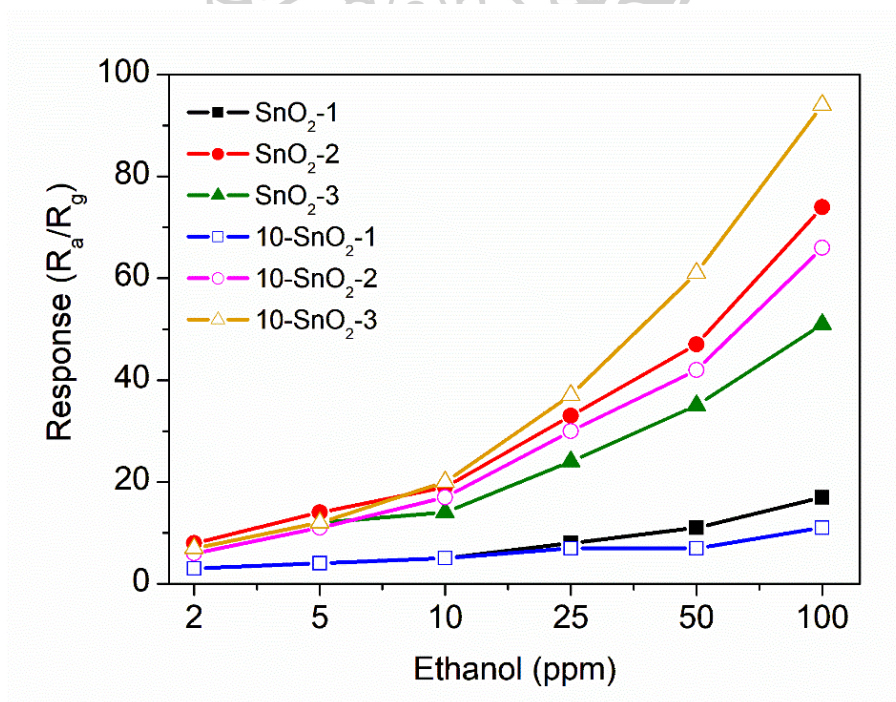
ในรูปที่ 37 แสดงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์กับความเข้มข้นของเอทานอล เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้น ค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยค่าการตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ 94 สำหรับแก๊สเซนเซอร์ 10-SnO₂-3 ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าเซนเซอร์ที่มีชั้นวัสดุตรวจจับที่บางและอนุภาคนาโนที่มีความพรุนสูงจะมีประสิทธิภาพดีกว่า นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ที่เติมวิตามินซีมีการตอบสนองที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ที่ไม่มีการเติมวิตามินซี ทำให้สามารถใช้งานในการตรวจจับแก๊สในความเข้มข้นต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 36 การตอบสนองแบบไดนามิกของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 SnO₂-2 SnO₂-3 10-SnO₂-1 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้นต่างกันและแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3.2 โวลต์

ตารางที่ 8 ค่าการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์ และความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่างกัน

แก๊สเอทานอล (ppm)	ค่าการตอบสนอง					
	SnO ₂ -1	SnO ₂ -2	SnO ₂ -3	10-SnO ₂ -1	10-SnO ₂ -2	10-SnO ₂ -3
100	17	74	51	11	66	94
50	11	47	35	7	42	61
25	8	33	24	7	30	37
10	5	19	14	5	17	20
5	4	14	12	4	11	12
2	3	8	7	3	6	7



รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 SnO₂-2 SnO₂-3 10-SnO₂-1 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้นต่างกันและแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3.2 โวลต์

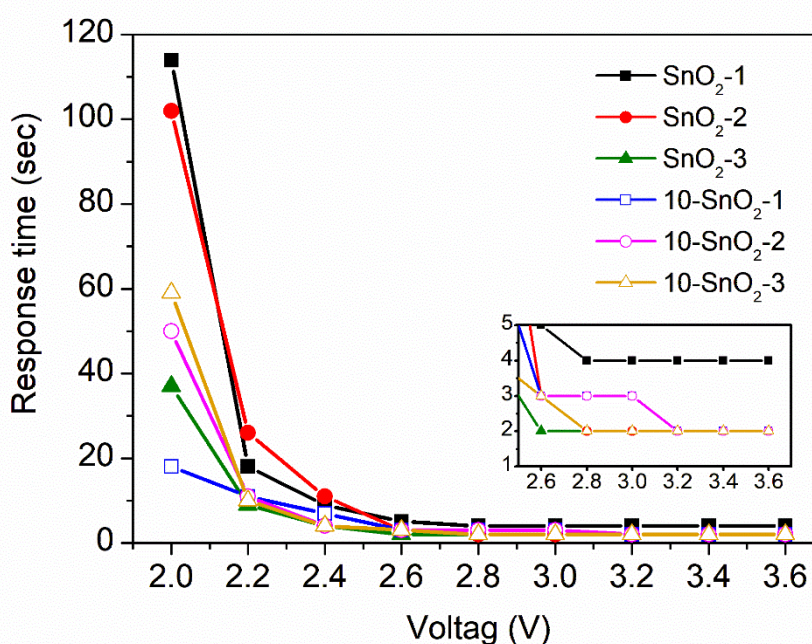
4.3.3 เวลาการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน

รูปที่ 38 แสดงเวลาการตอบสนองของเซนเซอร์ SnO_2-1 , SnO_2-2 , SnO_2-3 , $10-\text{SnO}_2-1$, $10-\text{SnO}_2-2$ และ $10-\text{SnO}_2-3$ ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเวลาการตอบสนองลดลงอย่างมากเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองพบว่าแก๊สเซนเซอร์ SnO_2-3 และ $10-\text{SnO}_2-3$ แสดงเวลาการตอบสนองเร็วที่สุดที่ 2 วินาที ที่แรงดันไฟฟ้า 2.6 และ 2.8 โวลต์ตามลำดับ ในขณะที่แก๊สเซนเซอร์ SnO_2-1 ยังคงมีเวลาการตอบสนองช้าที่สุดที่ 4 วินาที ที่แรงดันไฟฟ้าเดียวกัน การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นว่าความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับที่มากขึ้นนำไปสู่เวลาตอบสนองที่เร็วขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแก๊สเพิ่มขึ้นจากการมีเนื้อสารมากขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มจำนวนชั้นของวัสดุตรวจจับ ซึ่งทำให้มีจำนวนอนุภาคนาโนมากขึ้นที่สามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สเอทานอลได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของ $10-\text{SnO}_2-3$ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคนาโนที่เป็นระเบียบและมีความพรุนสูง ทำให้สามารถตอบสนองต่อแก๊สได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การเปรียบเทียบระหว่าง SnO_2-3 และ $10-\text{SnO}_2-3$ ยังแสดงให้เห็นถึงผลของการเติมวิตามินซีที่ช่วยลดขนาดอนุภาคนาโนและเพิ่มความพรุน ทำให้แก๊สเซนเซอร์มีความไวต่อการตรวจจับแก๊สมากขึ้น

ตารางที่ 9 เวลาการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	เวลาการตอบสนอง (วินาที)					
	SnO_2-1	SnO_2-2	SnO_2-3	$10-\text{SnO}_2-1$	$10-\text{SnO}_2-2$	$10-\text{SnO}_2-3$
2.0	114	102	37	18	50	59
2.2	18	26	9	11	11	10
2.4	9	11	4	7	4	4
2.6	5	3	2	3	3	3
2.8	3	2	1	2	2	2
3.0	4	3	2	3	3	2
3.2	4	2	2	2	2	2
3.4	3	3	2	2	2	2
3.6	5	2	3	3	3	2



รูปที่ 38 เวลาการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 SnO₂-2 SnO₂-3 10-SnO₂-1 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน

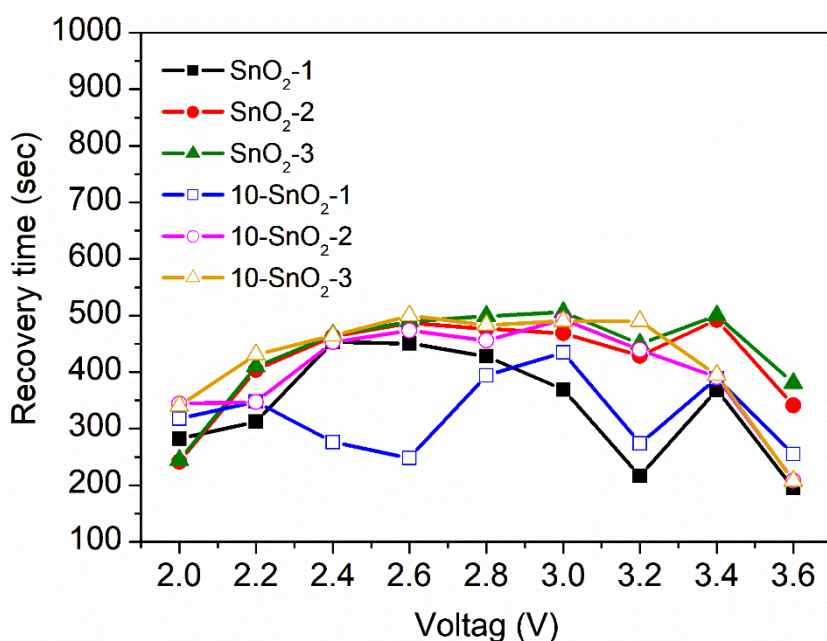
4.3.4 เวลาการคืนสภาพของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน

ในรูปที่ 39 แสดงเวลาการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1, SnO₂-2, SnO₂-3, 10-SnO₂-1, 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ทั้งหมดต้องใช้เวลาระยะหนึ่งในการกลับสู่ระดับความต้านทานเริ่มต้น โดยที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์ แก๊สเซนเซอร์ SnO₂-2, SnO₂-3, 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 มีเวลาฟื้นตัวนานกว่าแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 และ 10-SnO₂-1 เนื่องจากแก๊สเซนเซอร์ที่มีความหนา 2-3 ชั้นมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมากกว่าแก๊สเซนเซอร์ที่มีความหนา 1 ชั้น

รูปที่ 39 ยังแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแก๊สเซนเซอร์ทั้งหมดคือ 3.2 โวลต์ เนื่องจากเวลาการคืนสภาพมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่แรงดันไฟฟ้างกล่าว การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับแรงดันไฟฟ้าและการควบคุมความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์

ตารางที่ 10 เวลาการคืนสภาพของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับและแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	เวลาการคืนสภาพ (วินาที)					
	SnO ₂ -1	SnO ₂ -2	SnO ₂ -3	10-SnO ₂ -1	10-SnO ₂ -2	10-SnO ₂ -3
2.0	282	241	244	318	344	340
2.2	312	404	410	348	347	431
2.4	453	463	466	276	453	464
2.6	451	487	489	248	473	500
2.8	428	476	499	394	456	483
3.0	369	469	506	435	493	490
3.2	216	429	450	274	439	490
3.4	368	492	500	389	391	395
3.6	195	341	380	255	208	207



รูปที่ 39 เวลาการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 SnO₂-2 SnO₂-3 10-SnO₂-1 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน

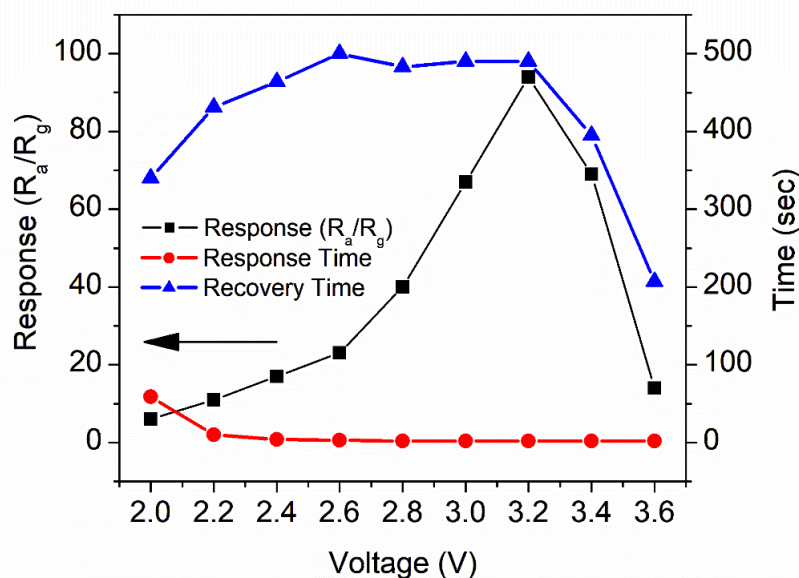
4.3.5 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนสภาพ ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับคงที่และแรงดันไฟฟ้าที่แปรผัน

รูปที่ 40 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนสภาพของแก๊สเซนเซอร์ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าค่าการตอบสนองมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับแรงดันไฟฟ้าจนถึง 3.2 โวลต์ และลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากกว่า 3.2 โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบค่าการตอบสนองกับเวลาการคืนสภาพ จะเห็นว่ามีค่าแปรผันตรงกัน คือ ถ้าหากมีค่าการตอบสนองต่ำจะใช้เวลาการคืนสภาพสั้น แต่ถ้าหากว่ามีค่าการตอบสนองสูงก็จะใช้เวลาการคืนสภาพนานขึ้น การเปรียบเทียบระหว่างค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนสภาพแสดงให้เห็นว่า เวลาการตอบสนองไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการตอบสนองและเวลาการคืนสภาพ แต่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น

นอกจากนี้ การสังเกตจากรูปที่ 40 ยังชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการปรับแรงดันไฟฟ้าในการเพิ่มประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเซนเซอร์นี้คือ 3.2 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้า และการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าจากค่านี้จะส่งผลต่อการตอบสนองและเวลาการคืนสภาพของเซนเซอร์ในทางที่ไม่พึงประสงค์

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนสภาพต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ของเซนเซอร์ 10-SnO₂-3 ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าแปรผัน

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ค่าการตอบสนอง	เวลาการตอบสนอง (วินาที)	เวลาการคืนสภาพ (วินาที)
2.0	6	59	340
2.2	11	10	431
2.4	17	4	464
2.6	23	3	500
2.8	40	2	483
3.0	67	2	490
3.2	94	2	490
3.4	69	2	395
3.6	14	2	207



รูปที่ 40 การเปรียบเทียบระหว่างค่าการตอบสนอง เวลาการตอบสนอง และเวลาการคืนสภาพของ แก๊สเซนเซอร์ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน

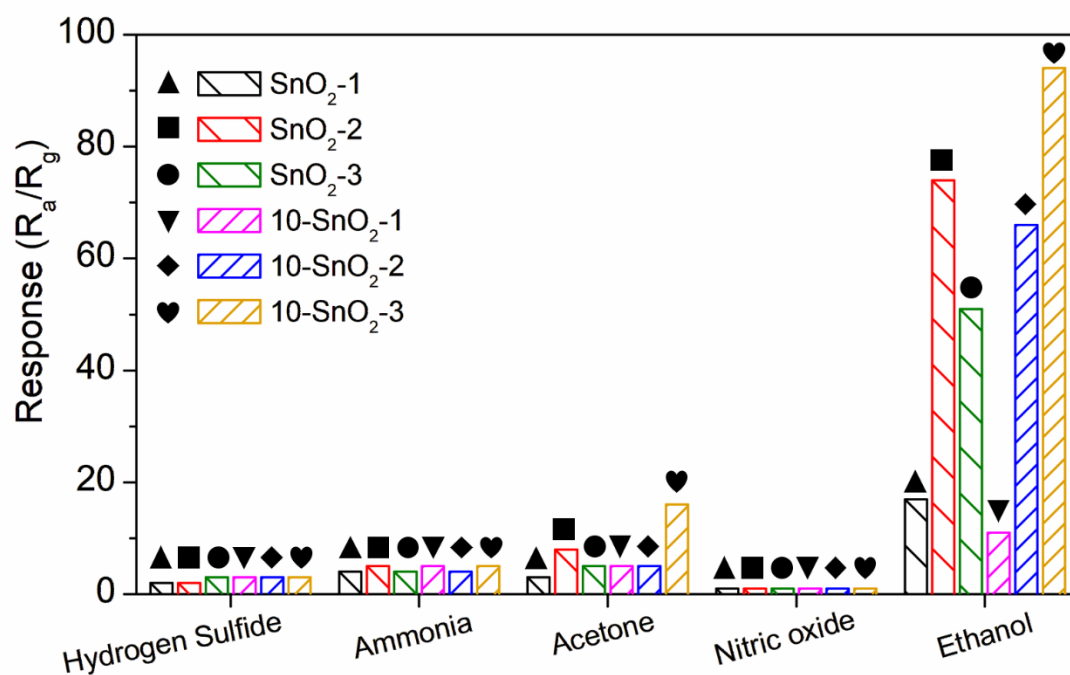
4.3.6 การศึกษาความจำเพาะของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สทดสอบ 5 ชนิดที่ความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้แรงดันไฟฟ้าคงที่และความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่างกัน

ในรูปที่ 41 แสดงการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 SnO₂-2 SnO₂-3 10-SnO₂-1 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สทดสอบ 5 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย แอซีโตน ไนตริกออกไซด์และเอทานอล ที่ความเข้มข้น 100 ppm และแรงดันไฟฟ้าคงที่ 3.2 โวลต์ ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าแก๊สเซนเซอร์ทั้ง 6 ตัวอย่างแสดงการตอบสนองที่มีประสิทธิภาพต่อแก๊สเอทานอลมากที่สุดเมื่อเทียบกับแก๊สทดสอบชนิดอื่น ๆ โดยการเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับจะช่วยเพิ่มค่าการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์

แก๊สเซนเซอร์ที่มีความหนาปานกลาง เช่น SnO₂-2 และ 10-SnO₂-2 แสดงให้เห็นค่าการตอบสนองที่ดีและมีเวลาการคืนสภาพที่เหมาะสม ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นวัสดุตรวจจับเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มความสามารถการตรวจจับและประสิทธิภาพโดยรวมของแก๊สเซนเซอร์ แต่ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์ที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กกว่า เช่น 10-SnO₂-3 มีประสิทธิภาพสูงกว่าในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้นส่งผลต่อทำปฏิกิริยากับแก๊สทดสอบได้ดีขึ้น ความพรุนและการจัดเรียงตัวของอนุภาคนาโนที่เป็นวัสดุตรวจจับยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊ส

ตารางที่ 12 ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สทดสอบ 5 ชนิดที่ความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้แรงดันไฟฟ้าคงที่และความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่างกัน

ชนิด แก๊สทดสอบ	ค่าการตอบสนอง					
	SnO ₂ -1	SnO ₂ -2	SnO ₂ -3	10-SnO ₂ -1	10-SnO ₂ -2	10-SnO ₂ -3
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	2	2	3	3	3	3
แอมโมเนีย	4	5	4	5	4	5
แอสซีโทน	3	8	5	5	5	16
ไนตริกออกไซด์	1	1	1	1	1	1
เอทานอล	17	74	51	11	66	94

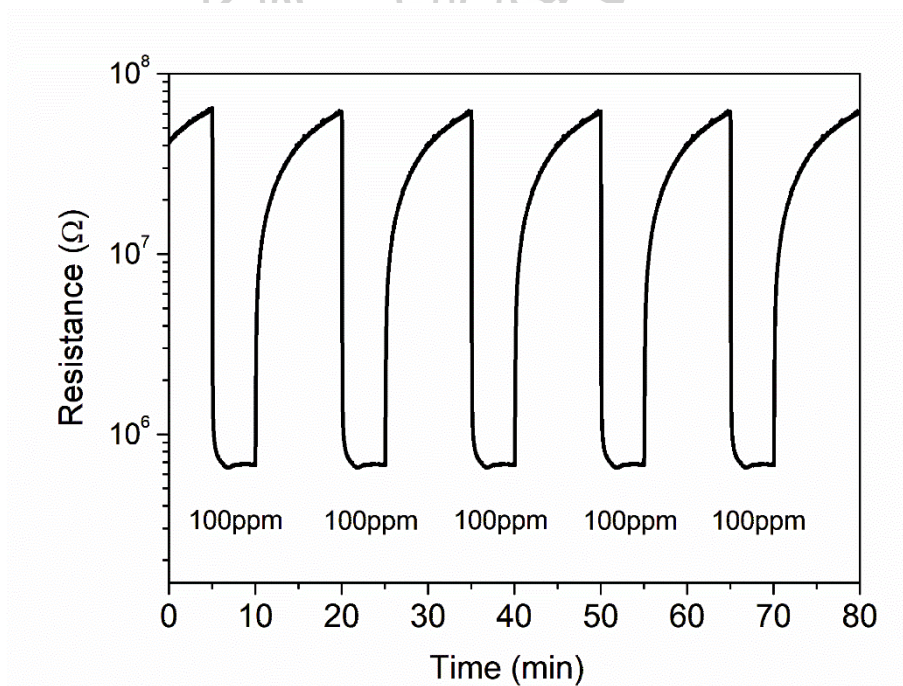


รูปที่ 41 การตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ SnO₂-1 SnO₂-2 SnO₂-3 10-SnO₂-1 10-SnO₂-2 และ 10-SnO₂-3 ต่อแก๊สทดสอบ 5 ชนิด ความเข้มข้น 100 ppm ที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์

4.3.7 การศึกษาความเสถียรของเซนเซอร์ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$ ต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm ภายใต้แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์

ในรูปที่ 42 แสดงการตอบสนองแบบไดนามิกของแก๊สเซนเซอร์ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$ ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์ ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าแก๊สเซนเซอร์ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$ มีความเสถียรมาก โดยการตรวจวัดแก๊สทั้ง 5 รอบมีค่าการตอบสนองเท่าเดิม ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความเชื่อถือได้และความเสถียรของเซนเซอร์นี้ในการใช้งาน

จากการศึกษาพบว่า วัสดุ SnO_2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างที่เหมาะสมและมีปฏิกิริยาต่อแก๊สเอทานอลได้อย่างรวดเร็ว ตารางที่ 13 แสดงประสิทธิภาพการตรวจจับเอทานอลของวัสดุ SnO_2 แบบต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ รวมถึงสัณฐานวิทยา อุณหภูมิ และขนาดอนุภาค อย่างไรก็ตาม วัสดุ SnO_2 จากงานของเราสามารถใช้เป็นเซนเซอร์ก๊าซเอทานอลได้ โดยที่มีค่าการตอบสนองมากกว่าในงานอื่น ๆ นอกจากนี้ การปรับปรุงกระบวนการผลิตและการควบคุมสภาพแวดล้อมในการใช้งานอาจเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของเซนเซอร์ได้มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 42 การตอบสนองแบบไดนามิกของแก๊สเซนเซอร์ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$ ต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 100 ppm ที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์

ตารางที่ 13 คุณสมบัติการตรวจจับแก๊สเอทานอลของทินไดออกไซด์ในงานวิจัยอื่น ๆ

วัสดุทินไดออกไซด์	อุณหภูมิ (°C)	เอทานอล (ppm)	ค่าการตอบสนอง (R_a/R_g)	Ref.
อนุภาคนาโน SnO ₂ แบบกลวงและเติม ZnO	150	100	14.8	[32]
อนุภาคไมโคร SnO ₂ แบบกลวง	320	100	33	[26]
กราฟีนออกไซด์ที่ผนวกเข้ากับอนุภาคนาโน SnO ₂ แบบกลวง	300	100	70	[55]
SnO ₂ ทรงกลมกลวงที่ประกอบขึ้นด้วยแผ่นนาโน	350	100	11	[53]
SnO ₂ ทรงกลมกลวง	250	100	46	[70]
SnO ₂ ที่มีโครงสร้างกรวยห้าเหลี่ยมแบบกลวง	220	100	55	[54]
อนุภาคนาโน SnO ₂	N/A	100	94	งานนี้

การศึกษาประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ พบว่าแรงดันไฟฟ้าและความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับมีผลต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 3.2 โวลต์ เซนเซอร์ 10-SnO₂-3 มีค่าการตอบสนองสูงสุดถึง 94 ที่แรงดันไฟฟ้านี้ ซึ่งถือเป็นเซนเซอร์ที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ แต่เกินกว่าจุดหนึ่งจะทำให้ค่าการตอบสนองลดลง เนื่องจากขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ ความหนาของวัสดุส่งผลต่อเวลาการตอบสนองและการคืนสภาพ ซึ่งเวลาการตอบสนองจะเร็วขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น แต่เวลาการคืนสภาพก็จะนานขึ้น เซนเซอร์ทั้งหมดสามารถตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้นต่ำถึง 2 ppm ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดลองยังชี้ให้เห็นถึงความไวสูงและความจำเพาะต่อแก๊สเอทานอลที่มีประสิทธิภาพมากกว่าแก๊สชนิดอื่น ความหนาที่เหมาะสมของชั้นวัสดุตรวจจับและการเติมวิตามินซีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊ส นอกจากนี้ เซนเซอร์ 10-SnO₂-3 มีความเสถียรสูงในการตรวจวัดแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 ppm โดยไม่เปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองในรอบการวัดหลายครั้ง การปรับปรุงกระบวนการผลิตและการควบคุมสภาพแวดล้อมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของเซนเซอร์ได้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ (SnO_2) โดยใช้เซรามิกเผาพร้อมอนุภาคนาโน (LTCC) เป็นฐานเซนเซอร์วัสดุประสงค์หลักของการวิจัยประกอบด้วยสารสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอนอย่างง่าย การศึกษาการเติมสารยึดเกาะเพื่อลดขนาดของอนุภาค การศึกษาหลักการทํางานของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ และการวิเคราะห์ผลกระทบของความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ได้ผลลัพธ์เป็นผงสีเหลืองอ่อนที่มีโครงสร้างผลึกเตตระโกนอลรูไทล์ (rutile) ที่มีความบริสุทธิ์สูง อนุภาคที่สังเคราะห์มีขนาดเฉลี่ยแตกต่างกัน โดยเมื่อเติมเครื่องตีระดับเบิ้ลซีรอสเลมอนและมะนาว 10% ขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงเหลือ 7.53 นาโนเมตร การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางสัณฐานวิทยายืนยันว่าอนุภาคนาโนเหล่านี้มีลักษณะกิ่งทรงกลมและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน

สำหรับการทดสอบแก๊สเซนเซอร์ การปรับความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับระหว่าง 1-3 ชั้นพบว่าความหนาที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซนเซอร์ ความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับที่หนามากเกินไปอาจลดประสิทธิภาพของเซนเซอร์เนื่องจากการเคลือบที่ของอิเล็กตรอนอิสระที่มากขึ้น

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแก๊สเซนเซอร์ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$ มีประสิทธิภาพสูงสุดในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล (Ethanol) ที่ความเข้มข้นต่ำถึง 2 ppm และมีค่าการตอบสนองสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้า 3.2 โวลต์ ทั้งนี้ เซนเซอร์ $10\text{-SnO}_2\text{-3}$ ยังมีความเสถียรและเวลาการตอบสนองที่รวดเร็วที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สเซนเซอร์อื่น ๆ ในการทดสอบกับแก๊สเอทานอล

จากการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า ความหนาของชั้นวัสดุตรวจจับมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ และการใช้อนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็ก เช่น 10-SnO_2 ซึ่งเติมเครื่องตีระดับเบิ้ลซีรอสเลมอนและมะนาว 10% จะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและประสิทธิภาพการตรวจจับแก๊สได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ ผลงานวิจัยนี้เสนอแนวทางในการพัฒนาต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ในอนาคต อีกทั้งควรนำความรู้และเทคนิคที่ได้จากการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแก๊สเซนเซอร์สำหรับการตรวจจับแก๊สในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมอาหาร และการควบคุมคุณภาพอากาศ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊สที่เป็นอันตรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

เพื่อพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ (SnO_2) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ควรมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน เพิ่มความบริสุทธิ์ของวัสดุ และพัฒนาการสร้างโครงสร้างนาโน เช่น แท่งนาโน ลวดนาโน หรือ ดอกไม้นาโน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส นอกจากนี้ ควรใช้วัสดุผสม เช่น กราฟีนหรือคาร์บอน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและความไวของเซนเซอร์ เทคนิคการเคลือบชั้นบาง เช่น CVD หรือ PLD ควรนำมาใช้เพื่อควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นวัสดุตรวจจับ การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในการใช้งาน จะช่วยให้การตรวจจับแก๊สมีความแม่นยำและเสถียรมากยิ่งขึ้น รวมถึงการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพและเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล จะช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดสัญญาณรบกวน ทำให้แก๊สเซนเซอร์ทินไดออกไซด์มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย



รายการอ้างอิง

- [1] L. Wang, X. Yao, Y. Zhang, G. Luo, B. Wang, and X. Yu, "Progress and perspectives of self-powered gas sensors," *Next Materials*, vol. 2, pp. 100092, 2024.
- [2] M. Nami, M. Taheri, I. A. Deen, M. Packirisamy, and M. J. Deen, "Nanomaterials in chemiresistive and potentiometric gas sensors for intelligent food packaging," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, pp. 117664, 2024.
- [3] S. Dhall, B. Mehta, A. Tyagi, and K. Sood, "A review on environmental gas sensors: Materials and technologies," *Sensors International*, vol. 2, pp. 100116, 2021.
- [4] C. W. Ji, J. D. Mun, C. B. Yoon, and H. C. Lee, "Low Temperature Co-Fired Ceramic-Based and Heater-Embedded Toxic Gas Sensors with Nanostructured SnO₂ Thick Films," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 19, no. 8, pp. 5227-5232, 2019.
- [5] L. Kulhari, K. Ray, N. Suri, and P. Khanna, "Detection and characterization of CO gas using LTCC micro-hotplates," *Sādhana*, vol. 45, pp. 1-6, 2020.
- [6] J. Luo, T. Dziubla, and R. Eitel, "A low temperature co-fired ceramic based microfluidic Clark-type oxygen sensor for real-time oxygen sensing," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 240, pp. 392-397, 2017.
- [7] M. A. Franco, P. P. Conti, R. S. Andre, and D. S. Correa, "A review on chemiresistive ZnO gas sensors," *Sensors and Actuators Reports*, vol. 4, pp. 100100, 2022.
- [8] V. Kumar, A. Singh, B. C. Yadav, H. K. Singh, D. P. Singh, S. K. Singh, and N. Chaurasiya, "Environment-sensitive and fast room temperature CO₂ gas sensor based on ZnO, NiO and Ni-ZnO nanocomposite materials," *Environmental Functional Materials*, 2023.
- [9] S. Ying, Y. Wang, Z. Wu, M. Huang, L. Dong, J. Zhao, and C. Peng, "Highly-sensitive NO₂ gas sensors based on three-dimensional nanotube graphene and

- ZnO nanospheres nanocomposite at room temperature,” *Applied Surface Science*, vol. 566, pp. 150720, 2021.
- [10] N. Ababii, M. Hoppe, S. Shree, A. Vahl, M. Ulfa, T. Pauporte, B. Viana, V. Cretu, N. Magariu, and V. Postica, “Effect of noble metal functionalization and film thickness on sensing properties of sprayed TiO₂ ultra-thin films,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 293, pp. 242-258, 2019.
- [11] L. Zhang, J. Ran, S.-Z. Qiao, and M. Jaroniec, “Characterization of semiconductor photocatalysts,” *Chemical Society Reviews*, vol. 48, no. 20, pp. 5184-5206, 2019.
- [12] X. Li, L. Fu, H. Karimi-Maleh, F. Chen, and S. Zhao, “Innovations in WO₃ gas sensors: Nanostructure engineering, functionalization, and future perspectives,” *Heliyon*, 2024.
- [13] H. Liu, J. Zhou, L. Yu, Q. Wang, B. Liu, P. Li, and Y. Zhang, “High-sensitivity SO₂ gas sensor based on noble metal doped WO₃ nanomaterials,” *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 16, no. 12, pp. 211240, 2021.
- [14] Q. Hu, W. Zhang, X. Wang, Q. Wang, B. Huang, Y. Li, X. Hua, G. Liu, B. Li, and J. Zhou, “Binder-free CuO nanoneedle arrays based tube-type sensor for H₂S gas sensing,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 326, pp. 128993, 2021.
- [15] A. Umar, A. A. Ibrahim, U. T. Nakate, H. Albargi, M. A. Alsaari, F. Ahmed, F. A. Alharthi, A. A. Alghamdi, and N. Al-Zaqri, “Fabrication and characterization of CuO nanoplates based sensor device for ethanol gas sensing application,” *Chemical Physics Letters*, vol. 763, pp. 138204, 2021.
- [16] S. Yu, X. Jia, J. Yang, S. Wang, Y. Li, and H. Song, “Highly sensitive ethanol gas sensor based on CuO/ZnSnO₃ heterojunction composites,” *Materials Letters*, vol. 291, pp. 129531, 2021.
- [17] A. K. Mauraya, P. Singh, S. Muthiah, S. S. Kushvaha, and S. K. Muthusamy, “Effect of post-oxidation processes and thickness of SnO₂ films prepared by vacuum evaporation on CO gas sensing characteristics,” *Ceramics International*, vol. 47, no. 9, pp. 13015-13022, 2021.
- [18] Y. K. Gautam, K. Sharma, S. Tyagi, A. K. Ambedkar, M. Chaudhary, and B. Pal Singh, “Nanostructured metal oxide semiconductor-based sensors for

- greenhouse gas detection: Progress and challenges,” *Royal Society open science*, vol. 8, no. 3, pp. 201324, 2021.
- [19] M. A. Han, H.-J. Kim, H. C. Lee, J.-S. Park, and H.-N. Lee, “Effects of porosity and particle size on the gas sensing properties of SnO₂ films,” *Applied Surface Science*, vol. 481, pp. 133-137, 2019.
- [20] Y. Sun, J. Guo, J. Qi, B. Liu, and T. Yu, “Comparisons of SnO₂ gas sensor degradation under elevated storage and working conditions,” *Microelectronics Reliability*, vol. 114, pp. 113808, 2020.
- [21] Z. Cai, and S. Park, “Fabrication of selective and highly sensitive triethylamine gas sensor using In₂O₃-SnO₂ hollow nanospheres in room temperature activated by UV irradiation,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, pp. 6581-6596, 2023.
- [22] N. Younes, A. E.-H. B. Kashyout, K. Shoueir, and M. El-Kemary, “Palladium doped tungsten oxide nanoparticle nanocomposite for sensitive detection of CO₂ and LPG gases,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 19, pp. 2633-2644, 2022.
- [23] Y. Shen, W. Wang, A. Fan, D. Wei, W. Liu, C. Han, Y. Shen, D. Meng, and X. San, “Highly sensitive hydrogen sensors based on SnO₂ nanomaterials with different morphologies,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 45, pp. 15773-15779, 2015.
- [24] W. Yuan, K. Yang, H. Peng, F. Li, and F. Yin, “A flexible VOCs sensor based on a 3D Mxene framework with a high sensing performance,” *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 6, no. 37, pp. 18116-18124, 2018.
- [25] Z. Cai, E. Goo, and S. Park, “Synthesis of tin dioxide (SnO₂) hollow nanospheres and its ethanol-sensing performance augmented by gold nanoparticle decoration,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 883, pp. 160868, 2021.
- [26] Y. Zhao, J. Liu, Q. Liu, Y. Sun, D. Song, W. Yang, J. Wang, and L. Liu, “One-step synthesis of SnO₂ hollow microspheres and its gas sensing properties,” *Materials Letters*, vol. 136, pp. 286-288, 2014.
- [27] W. J. Jeyarani, T. Tenkyong, N. Bachan, D. A. Kumar, and J. M. Shyla, “An investigation on the tuning effect of glucose-capping on the size and bandgap of

- CuO nanoparticles,” *Advanced Powder Technology*, vol. 27, no. 2, pp. 338-346, 2016.
- [28] S. K. Tammina, B. K. Mandal, and N. K. Kadiyala, “Photocatalytic degradation of methylene blue dye by nonconventional synthesized SnO₂ nanoparticles,” *Environmental nanotechnology, monitoring & management*, vol. 10, pp. 339-350, 2018.
- [29] P. Luque, O. Nava, C. Soto-Robles, M. Chinchillas-Chinchillas, H. Garrafa-Gálvez, Y. Baez-Lopez, K. Valdez-Núñez, A. Vilchis-Nestor, and A. Castro-Beltrán, “Improved photocatalytic efficiency of SnO₂ nanoparticles through green synthesis,” *Optik*, vol. 206, pp. 164299, 2020.
- [30] P. Luque, M. Chinchillas-Chinchillas, O. Nava, E. Lugo-Medina, M. Martínez-Rosas, A. Carrillo-Castillo, A. Vilchis-Nestor, L. Madrigal-Muñoz, and H. Garrafa-Gálvez, “Green synthesis of tin dioxide nanoparticles using *Camellia sinensis* and its application in photocatalytic degradation of textile dyes,” *Optik*, vol. 229, pp. 166259, 2021.
- [31] P. Luque, H. Garrafa-Gálvez, O. Nava, A. Olivas, M. Martínez-Rosas, A. Vilchis-Nestor, A. Villegas-Fuentes, and M. Chinchillas-Chinchillas, “Efficient sunlight and UV photocatalytic degradation of Methyl Orange, Methylene Blue and Rhodamine B, using *Citrusx paradisi* synthesized SnO₂ semiconductor nanoparticles,” *Ceramics International*, vol. 47, no. 17, pp. 23861-23874, 2021.
- [32] X. Ma, H. Song, and C. Guan, “Enhanced ethanol sensing properties of ZnO-doped porous SnO₂ hollow nanospheres,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 188, pp. 193-199, 2013.
- [33] Z. Song, S. Xu, M. Li, W. Zhang, H. Yu, Y. Wang, and H. Liu, “Solution-processed SnO₂ nanowires for sensitive and fast-response H₂S detection,” *Thin Solid Films*, vol. 618, pp. 232-237, 2016.
- [34] Z. Huang, J. Zhu, Y. Hu, Y. Zhu, G. Zhu, L. Hu, Y. Zi, and W. Huang, “Tin oxide (SnO₂) nanoparticles: facile fabrication, characterization, and application in UV photodetectors,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 4, pp. 632, 2022.
- [35] Y. Masuda, “Recent advances in SnO₂ nanostructure based gas sensors,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 364, pp. 131876, 2022.

- [36] D. Nandi, H. Pulikkalparambil, S. Radoor, A. Jayakumar, N. Kiatisereekul, and S. Siengchin, "Solvothermal synthesis of nickel titanate nanosphere: crystal structure determination and high-rate supercapacitor performance," *Chemical Papers*, vol. 77, no. 1, pp. 385-397, 2023.
- [37] E. Abdelkader, L. Nadjia, B. Naceur, and B. Noureddine, "SnO₂ foam grain-shaped nanoparticles: Synthesis, characterization and UVA light induced photocatalysis," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 679, pp. 408-419, 2016.
- [38] S.-z. Yang, Y.-f. Huang, X.-c. Han, and G.-h. Han, "Enhancing electrochemical performance of SnO₂ anode with humic acid modification," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 31, no. 7, pp. 2062-2073, 2021.
- [39] A. N. Kawade, P. K. Bhujbal, A. T. Supekar, H. M. Pathan, and K. M. Sonawane, "Eosin-Y sensitized tin oxide (SnO₂): Fabrication and its analysis," *Optik*, vol. 216, pp. 164968, 2020.
- [40] A. G. Habte, F. G. Hone, and F. B. Dejene, "Effect of solution pH on structural, optical and morphological properties of SnO₂ nanoparticles," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 580, pp. 411832, 2020.
- [41] X. Deng, M. Zhu, J. Ke, W. Li, D. Xiong, Z. Feng, and M. He, "SnO₂-ZnO nanoparticles wrapped in graphite nanosheets as a large-capacity, high-rate and long-lifetime anode for lithium-ion batteries," *Chemical Physics Letters*, vol. 769, pp. 138392, 2021.
- [42] C. Liang, H. Yang, K. Yu, and W. Jin, "Sunflower seed husk-derived submicron carbon spheres and SnO₂ nanoparticles composite used as an anode for high-performance lithium-ion batteries," *Diamond and Related Materials*, vol. 116, pp. 108392, 2021.
- [43] S. M. Sze, Y. Li, and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*: John wiley & sons, 2021.
- [44] จ. ต่ำ, and น. กร, "การผลิตไฮโดรเจนพร้อมกับการสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโลหะ," 2020.
- [45] L. I. Berger, *Semiconductor materials*: CRC press, 2020.

- [46] V. Amiri, H. Roshan, A. Mirzaei, G. Neri, and A. I. Ayesh, "Nanostructured metal oxide-based acetone gas sensors: A review," *Sensors*, vol. 20, no. 11, pp. 3096, 2020.
- [47] L.-Y. Gai, R.-P. Lai, X.-H. Dong, X. Wu, Q.-T. Luan, J. Wang, H.-F. Lin, W.-H. Ding, G.-L. Wu, and W.-F. Xie, "Recent advances in ethanol gas sensors based on metal oxide semiconductor heterojunctions," *Rare Metals*, vol. 41, no. 6, pp. 1818-1842, 2022.
- [48] S. Luan, J. Hu, M. Ma, J. Tian, D. Liu, J. Wang, and J. Wang, "The enhanced sensing properties of MOS-based resistive gas sensors by Au functionalization: a review," *Dalton Transactions*, 2023.
- [49] E. Cao, Z. Chu, H. Wang, W. Hao, L. Sun, and Y. Zhang, "Effect of film thickness on the electrical and ethanol sensing characteristics of LaFeO₃ nanoparticle-based thick film sensors," *Ceramics International*, vol. 44, no. 6, pp. 7180-7185, 2018.
- [50] D. Kwak, Y. Lei, and R. Maric, "Ammonia gas sensors: A comprehensive review," *Talanta*, vol. 204, pp. 713-730, 2019.
- [51] A. Liu, S. Lv, L. Jiang, F. Liu, L. Zhao, J. Wang, X. Hu, Z. Yang, J. He, and C. Wang, "The gas sensor utilizing polyaniline/MoS₂ nanosheets/SnO₂ nanotubes for the room temperature detection of ammonia," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 332, pp. 129444, 2021.
- [52] E. Salih, and A. I. Ayesh, "First principle study of transition metals codoped MoS₂ as a gas sensor for the detection of NO and NO₂ gases," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 131, pp. 114736, 2021.
- [53] B. Wang, L. Sun, and Y. Wang, "Template-free synthesis of nanosheets-assembled SnO₂ hollow spheres for enhanced ethanol gas sensing," *Materials Letters*, vol. 218, pp. 290-294, 2018.
- [54] Y. Zhao, Y. Liu, Y. Ma, Y. Li, J. Zhang, X. Ren, C. Li, J. Zhao, J. Zhu, and H. Zhao, "Hollow pentagonal-cone-structured SnO₂ architectures assembled with nanorod arrays for low-temperature ethanol sensing," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 3, no. 8, pp. 7720-7731, 2020.

- [55] C. A. Zito, T. M. Perfecto, and D. P. Volanti, "Impact of reduced graphene oxide on the ethanol sensing performance of hollow SnO₂ nanoparticles under humid atmosphere," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 244, pp. 466-474, 2017.
- [56] L. Golonka, P. Bembnowicz, D. Jurkow, K. Malecha, H. Roguszczyk, and R. Tadaszak, "Low temperature co-fired ceramics (LTCC) microsystems," *Optica Applicata*, vol. 41, no. 2, pp. 383-388, 2011.
- [57] M. Ma, H. Khan, W. Shan, Y. Wang, J. Z. Ou, Z. Liu, K. Kalantar-Zadeh, and Y. Li, "A novel wireless gas sensor based on LTCC technology," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 239, pp. 711-717, 2017.
- [58] S. Fatimah, R. Ragadhita, D. F. Al Husaeni, and A. B. D. Nandiyanto, "How to calculate crystallite size from x-ray diffraction (XRD) using Scherrer method," *ASEAN Journal of Science and Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 65-76, 2022.
- [59] H. Khan, A. S. Yerramilli, A. D'Oliveira, T. L. Alford, D. C. Boffito, and G. S. Patience, "Experimental methods in chemical engineering: X-ray diffraction spectroscopy—XRD," *The Canadian journal of chemical engineering*, vol. 98, no. 6, pp. 1255-1266, 2020.
- [60] B. Lewczuk, and N. Szyryńska, "Field-emission scanning electron microscope as a tool for large-area and large-volume ultrastructural studies," *Animals*, vol. 11, no. 12, pp. 3390, 2021.
- [61] V.-D. Hodoroaba, "Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)," *Characterization of Nanoparticles*, pp. 397-417: Elsevier, 2020.
- [62] N. Braid, A. Béchu, J. C. de Souza Terra, and G. S. Patience, "Experimental methods in chemical engineering: Transmission electron microscopy—TEM," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 98, no. 3, pp. 628-641, 2020.
- [63] G. Uribe, S. J. Salipante, L. Curtis, J. A. Lieberman, K. Kurosawa, B. T. Cookson, D. Hoogstraal, M. K. Stewart, T. Olmstead, and L. Bourassa, "Evaluation of Fourier transform-infrared spectroscopy (FT-IR) as a control measure for nosocomial outbreak investigations," *Journal of Clinical Microbiology*, vol. 61, no. 10, pp. e00347-23, 2023.

- [64] A. G. Shard, R. C. Schofield, and C. Minelli, "Ultraviolet–visible spectrophotometry," *Characterization of Nanoparticles*, pp. 185-196: Elsevier, 2020.
- [65] M. L. Passos, and M. L. M. Saraiva, "Detection in UV-visible spectrophotometry: Detectors, detection systems, and detection strategies," *Measurement*, vol. 135, pp. 896-904, 2019.
- [66] J. Huang, L. Wang, C. Gu, Z. Wang, Y. Sun, and J.-J. Shim, "Preparation of porous SnO₂ microcubes and their enhanced gas-sensing property," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 207, pp. 782-790, 2015.
- [67] K. Lee, M. Sahu, S. Hajra, K. Mohanta, and H. J. Kim, "Effect of sintering temperature on the electrical and gas sensing properties of tin oxide powders," *Ceramics International*, vol. 47, no. 16, pp. 22794-22800, 2021.
- [68] R. Paulraj, P. Ramasamy, and N. Vijayan, "One step synthesis of tin oxide nanomaterials and their sintering effect in dye degradation," *Optik*, vol. 135, pp. 434-445, 2017.
- [69] N. Horti, M. Kamatagi, N. Patil, M. Wari, and S. Inamdar, "Photoluminescence properties of SnO₂ nanoparticles: effect of solvents," *Optik*, vol. 169, pp. 314-320, 2018.
- [70] Z. Yuan, K. Zuo, F. Meng, Z. Ma, W. Xu, and H. Dong, "Microscale analysis and gas sensing characteristics based on SnO₂ hollow spheres," *Microelectronic Engineering*, vol. 231, pp. 111372, 2020.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชุตีมา นาคมข
วุฒิการศึกษา	ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2555-2561 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนศรีอยุธยา จังหวัดชุมพร พ.ศ. 2561-2565 ระดับปริญญาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2565-ปัจจุบัน ระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม
ผลงานตีพิมพ์	The 8th International Conference on Nanotechnology – NanoThailand 2023 e-Proceeding: Effects of capping agent on tin dioxide nanoparticles synthesized by a simple precipitation method

