



การศึกษาสมบัติการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์
ที่เจือด้วยแพลเลเดียม



โดย
นางสาวจินตพร ยิ้มซ้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมบัติการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์
ที่เจือด้วยแพลเลเดียม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

THE STUDY OF HYDROGEN AND ETHANOL SENSING PROPERTIES
OF Pd-DOPED ZnO SENSOR FILMS



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

Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2015

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาสมบัติการ
ตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ” เสนอโดย
นางสาวจินตพร ยิ้มซ้อย เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.มนตรี เอี่ยมพนากิจ)

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

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.โชคชัย พุทธิรักษา)

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

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์)

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



57306207 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : ซิงก์ออกไซด์/เฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส/แก๊สเซนเซอร์

จินตพร ยิ้มช้อย : การศึกษาสมบัติการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์. 59 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ (gas sensors) ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (metal oxide semiconductor) สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และเอทานอล (C_2H_5OH) โดยเลือกใช้ออกไซด์ของซิงก์ออกไซด์ และออกไซด์ของแพลเลเดียมที่เจือด้วยแพลเลเดียม ในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (flame spray pyrolysis: FSP) ในส่วนของฟิล์มเซนเซอร์เตรียมได้จากการนำส่วนผสมระหว่างอนุภาคนาโนและตัวเชื่อมประสาน (binder) โพลีเอทิลีนออกไซด์ (spin coating) ลงบนซับสเตรตอะลูมินาที่พิมพ์ลายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทอง และทำการควบคุมความหนาของฟิล์มเซนเซอร์จากจำนวนครั้งของการสปินโคตติง หลังจากนั้น ทำการทดสอบแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ (operating temperature) $200-350^\circ C$ เพื่อหาปริมาณสารเจือแพลเลเดียมและความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดแก๊สทั้งสองชนิด โดยการเปรียบเทียบค่าสภาพความไว (sensitivity) ของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ที่ความหนาต่าง ๆ

จากผลการวิจัยพบว่า เซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุดเท่ากับ $11 \mu m$ มีค่าสภาพความไวต่อแก๊สได้ดีที่สุด อีกทั้ง การเจือแพลเลเดียมในปริมาณที่เหมาะสม สามารถเพิ่มค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล โดยพบว่า เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% แสดงค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลได้สูงที่สุด

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

57306207 : MAJOR : PHYSICS

KEY WORD : ZINC OXIDE/FLAME SPRAY PYROLYSIS (FSP)/GAS SENSOR

JINTAPORN YIMCHOY : THE STUDY OF HYDROGEN AND ETHANOL SENSING PROPERTIES OF Pd-DOPED ZnO SENSOR FILMS. THESIS ADVISOR : CHAWARAT SIRIWONG, Ph.D. 59 pp.

In this research aimed to develop Hydrogen and Ethanol sensors which were fabricated from metal oxide semiconductor. Pure ZnO and Palladium (Pd) doped ZnO nanoparticles containing 0.25, 0.50, 0.75 and 1.0 mol% of Pd were successfully synthesized by flame spray pyrolysis (FSP) for hydrogen and ethanol sensing applications. The sensing films were fabricated by coating nanoparticles with organic paste composed of terpineol and ethyl cellulose as a vehicle binder on Al₂O₃ substrate interdigitated with gold electrodes. The film thicknesses were varied by controlling the numbers of coating. Moreover, response time and sensitivity of these sensors towards hydrogen and ethanol were evaluated under operating temperatures ranging from 200-350°C in dry air. Finally, the optimum amount of doping Pd and film thickness were investigated.

The results showed that the minimum film thickness (11 μm) showed the highest sensitivity. Moreover, the appropriate amount of Pd doping could greatly enhance H₂ and C₂H₅OH sensitivity of ZnO sensors. In addition, 0.75 mol% Pd doping on ZnO sensor shows the highest H₂ and C₂H₅OH sensitivities.

Department of Physics

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature

Academic Year 2015

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความเมตตากรุณาจากอาจารย์ ดร.ชวรัตน์ ศิริวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแนวความคิดการทำ วิทยานิพนธ์ ตรวจสอบแก้ไข ตลอดจนให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา รวมทั้งอาจารย์ ดร.มนตรี เอี่ยมพนากิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.โชคชัย พุทธรักษา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ กรุณาให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะ ส่งผลให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอ กราบขอบพระคุณในความกรุณาของท่านเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน คณะวิทยาศาสตร์ และมหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ ประสบการณ์ ความรู้ คำแนะนำ แก่ผู้วิจัยตั้งแต่ระดับปริญญาตรีและปริญญาโท จนถึงขณะนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าของหนังสือ วารสาร และวิทยานิพนธ์ทุกเล่ม ที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.อนรรจน์ วิสิทธิ์สรอรรถ และบุคลากร จากศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่อำนวยความสะดวก ทั้งสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัยในช่วงระยะเวลาการทำงานวิจัยครั้งนี้

และที่ขาดเสียไม่ได้ ขอกราบขอบพระคุณสำหรับกำลังใจและความห่วงใยจากครอบครัว อันเป็นที่รัก ที่คอยเป็นกำลังใจ คอยสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัย และเป็นแรงใจสำคัญจนส่งผลให้ วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
นิยามคำศัพท์	5
ประโยชน์ที่ได้รับ	5
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
ผลของสารเจือโลหะต่อกลไกการตรวจวัดแก๊สของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์	11
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วัสดุประเภทซิงก์ออกไซด์มาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซนเซอร์	13
ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วัสดุประเภทซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยสารต่าง ๆ มาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซนเซอร์	16
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	21
การเตรียมตัวเชื่อมประสาน	22
การเตรียมฟิล์มเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสปินโคตติง	23
กระบวนการการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล	26

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
ผลการศึกษาค่าความหนาของฟิล์มเซนเซอร์	31
ผลการศึกษาความสามารถในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของ ฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้ที่ความหนาต่างๆ	33
ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของ ฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ	34
ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนของฟิล์มเซนเซอร์ ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ และความหนาต่าง ๆ	38
ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ และความหนาต่าง ๆ	44
5 สรุป และอภิปรายผล	
สรุปผลการวิจัย	50
อภิปรายผลการวิจัย	51
รายการอ้างอิง	53
ประวัติผู้วิจัย	59



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าความต้านทานของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสัมผัสกับแก๊ส แต่ละประเภท	9
2	ค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (5,000 ppm) ของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ ...	35
3	ค่าสภาพความไวในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์	36
4	ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ PSS1, 0.25SS1, 0.50SS1, 0.75SS1 และ 1.0SS1 ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C	41
5	ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ PSS1, 0.25SS1, 0.50SS1, 0.75SS1 และ 1.0SS1 ในการตรวจวัดเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 350°C	47



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	อิเล็กโทรดที่เตรียมได้จากการพิมพ์ลายอิเล็กโทรดด้วยทองลงบนซับสเตรทอะลูมินา	24
2	การติดเทปใสบริเวณขั้วไฟฟ้าของอิเล็กโทรดบนกระจกสไลด์	24
3	การผสมตัวเชื่อมประสานกับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ภายในโรงแบบสาร เพื่อเตรียม สารละลายผสม	24
4	เครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (spin coater)	25
5	การอบอิเล็กโทรดบนเตาความร้อน ที่อุณหภูมิ 80°C	25
6	เตาเผา ที่ใช้ในการเผาเซาเซอร์	26
7	แชมเบอร์หรือภาชนะที่ใช้ในการทดสอบแก๊ส	27
8	หัวโพรบที่โพรบติดอยู่บริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างของอิเล็กโทรด	27
9	ภาคตัดขวางจำลองของฟิล์มเซาเซอร์ซิงก์ออกไซด์	28
10	จอแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับเวลาที่ได้จากโปรแกรม ทดสอบแก๊ส	28
11	ภาคตัดขวางและองค์ประกอบของฟิล์มเซาเซอร์ซิงก์ออกไซด์	31
12	ภาคตัดขวางของเซาเซอร์ ที่ความหนาของชั้นฟิล์มค่าต่าง ๆ	32



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์ ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล เวอร์ธไซด์	3
2	โครงสร้างผลึกของแพลเลเดียม ที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก (cubic face centered)	3
3	แบบจำลองโครงสร้างและแถบพลังงานของกลไกการนำไฟฟ้าของเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊ส ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น	7
4	การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อมีแก๊สรีดิวซิงเข้ามา ทำปฏิกิริยา และแสดงตำแหน่งของค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อ เซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีอากาศแห้ง (R_a) และตำแหน่งค่าความต้านทานไฟฟ้าของ เซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีแก๊สรีดิวซิง (R_{rs})	10
5	กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เนื่องจากการเจือ ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ	12
6	การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อมี แก๊สไฮโดรเจนเข้ามาทำปฏิกิริยา (5,000 ppm) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C	34
7	การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อมี เอทานอลเข้ามาทำปฏิกิริยา (200 ppm) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 350°C	35
8	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สแต่ละชนิดของเซนเซอร์ ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาของฟิล์มค่าต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิ $200-350^{\circ}\text{C}$	37
9	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.25SS1, 0.25SS2 และ 0.25SS3 ในการตรวจวัด แก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ $200-350^{\circ}\text{C}$	39
10	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.50SS1, 0.50SS2 และ 0.50SS3 ในการตรวจวัด แก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ $200-350^{\circ}\text{C}$	39
11	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.75SS1, 0.75SS2 และ 0.75SS3 ในการตรวจวัด แก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ $200-350^{\circ}\text{C}$	40
12	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 1.0SS1, 1.0SS2 และ 1.0SS3 ในการตรวจวัด แก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ $200-350^{\circ}\text{C}$	40
13	สภาพความไวของเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด ต่อการตรวจวัด แก๊สไฮโดรเจน ในช่วงปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 1,500-5,000 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C	42
14	การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ในปริมาณ 0.75 mol% ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อมีแก๊สไฮโดรเจนเข้ามาทำปฏิกิริยา	

รูปที่	หน้า
	(5,000 ppm) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C 43
15	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ PSS1, PSS2 และ PSS3 ในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C 45
16	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.25SS1, 0.25SS2 และ 0.25SS3 ในการตรวจวัด เอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C 45
17	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.50SS1, 0.50SS2 และ 0.50SS3 ในการตรวจวัด เอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C 46
18	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.75SS1, 0.75SS2 และ 0.75SS3 ในการตรวจวัด เอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C 46
19	การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 1.0SS1, 1.0SS2 และ 1.0SS3 ในการตรวจวัด เอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C 47
20	สภาพความไวของเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด ต่อการตรวจวัดเอทานอล ในช่วงปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 50-200 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 350°C 48
21	การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ในปริมาณ 0.75 mol% ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อมีเอทานอลเข้ามาทำปฏิกิริยา (200 ppm) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 350°C 49



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ภาวะมลพิษทางอากาศยังคงเป็นปัญหาสำคัญของหลาย ๆ ประเทศ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องควบคู่ไปกับการพัฒนาประเทศ ปัญหามลพิษดังกล่าวอาจมีที่มาจากหลายสาเหตุ อาทิเช่น เกิดจากการที่โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยแก๊สเกินปริมาณที่กำหนด การรั่วไหลของแก๊สจากเครื่องจักรกล และการปล่อยแก๊สจากรถยนต์บนท้องถนน เป็นต้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่ล้นแต่มีโอกาที่จะสัมผัสกับแก๊สที่รั่วไหลออกจากเครื่องจักรต่าง ๆ เพื่อป้องกันและควบคุมไม่ให้เกิดเครื่องจักรกล ยานพาหนะ และโรงงาน ปล่อยแก๊สและสิ่งปนเปื้อน เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ออกมาเกินปริมาณที่กำหนด จนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สจึงมีความสำคัญอย่างมาก แต่เดิมนั้นมีวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สอยู่หลายวิธี แต่ค่อนข้างมีความยุ่งยากในขั้นตอนการตรวจวัด เนื่องจาก ต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้งานและมีขนาดใหญ่ [1] ทำให้ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ (gas sensor) ขึ้น เนื่องจากมีข้อดีคือ มีขนาดเล็ก และใช้งานง่าย โดยเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สมีหลายประเภท เช่น Catalytic Sensor, Infrared Sensor, Electrochemical Sensor และ Solid State Sensor (หรือ Metal Oxide Semiconductor, MOS) เป็นต้น [2] สำหรับการเลือกใช้ชนิดของแก๊สเซนเซอร์จะพิจารณาจากความต้องการในการใช้งาน ความแม่นยำในการตรวจวัดแก๊ส อายุการใช้งาน และค่าใช้จ่ายเป็นสำคัญ ในปัจจุบันพบว่า เซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor sensor) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการตรวจจับแก๊สที่ระดับความเข้มข้นต่ำ โดยโครงสร้างภายในจะประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอาจเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) หรือ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เซนเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะตอบสนองต่อแก๊สที่ตรวจวัดโดยส่งผลให้ค่าความต้านทานของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของแก๊สที่ทำการตรวจวัด อีกทั้งยังมีข้อดีคือ มีราคาถูก มีเวลาการตอบสนอง/การคืนสภาพที่เร็ว (fast response/recovery time) มีสภาพความไวสูง (high sensitivity) ใช้งานง่าย มีขนาดเล็ก สามารถใช้งานในสถานที่ที่มีอุณหภูมิและความดันสูงได้ มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีความสามารถในการ

ตรวจวัดแก๊สปริมาณมาก ๆ ได้ [3] อย่างไรก็ตาม แก๊สเซนเซอร์ประเภทนี้ยังคงต้องทำการพัฒนาและปรับปรุงเพิ่มเติมอีกมาก เพื่อให้ได้แก๊สเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับแก๊สได้ในกรณีที่มีความเข้มข้นของแก๊สต่ำ ๆ มีการตอบสนองต่อแก๊สสูงขึ้น ใช้เวลาการตอบสนอง/คืนสภาพที่เร็วขึ้นกว่าเดิม และใช้อุณหภูมิดำเนินการ (operating temperature) ที่ต่ำลง

โดยคุณสมบัติ คุณสมบัติ และข้อควรระวังของแก๊สและสารแต่ละชนิด ที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ เป็นแก๊สทดสอบ และใช้เป็นวัสดุในการสร้างฟิล์มเซนเซอร์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

ไฮโดรเจน (Hydrogen)

แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen gas) เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้ในการผลิตแอมโมเนีย ใช้ในกระบวนการไฮโดรจีเนชันเพื่อสังเคราะห์น้ำมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนและเป็นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น การนำแก๊สไฮโดรเจนไปใช้ประโยชน์จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างมาก เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนมีความไวไฟสูง โดยจะเกิดการเผาไหม้ในอากาศที่มีช่วงความเข้มข้นระหว่างร้อยละ 4-75 โดยปริมาตร อีกทั้ง สามารถก่อตัวเป็นสารผสมกับอากาศและคลอรีน สารผสมนี้จะระเบิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อโดนประกายไฟ นอกเหนือจากนี้ สามารถเกิดปฏิกิริยาตามธรรมชาติอย่างรุนแรงกับฟลูออรีนและคลอรีน ที่อุณหภูมิห้องอีกด้วย [4, 5]

เอทานอล (Ethanol)

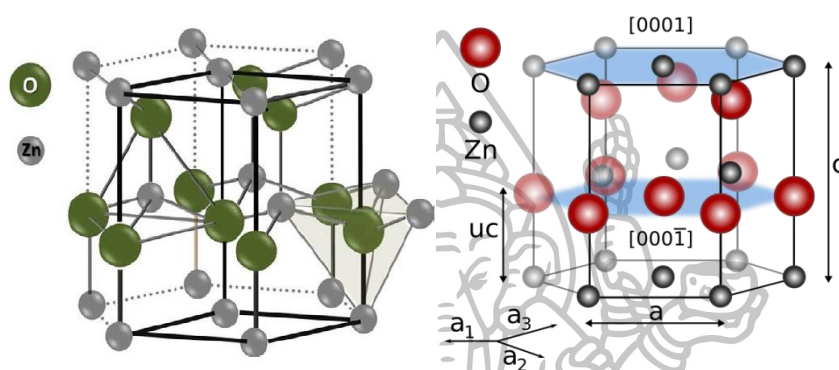
เอทานอล มีสัญลักษณ์ คือ C_2H_5OH เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว ระเหยง่าย และไวไฟสูง มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวเป็น $78.5^{\circ}C$ และ $-114^{\circ}C$ ตามลำดับ ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต ยา เครื่องสำอาง ใช้เป็นส่วนผสมของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำมาใช้งานเป็นแหล่งพลังงานสะอาดในอนาคต [6, 7]

ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide)

ซิงก์ออกไซด์ มีสัญลักษณ์เป็น ZnO มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ ละลายได้ดีในกรดและเบส เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำโดยมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.37 eV มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล เวิร์ทไซด์ (wurtzite hexagonal) (รูปที่ 1) จุดหลอมเหลวมีค่าเป็น $1975^{\circ}C$ ใช้งานได้หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมผลิตสารเร่งปฏิกิริยา และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น [8, 9]

แพลเลเดียม (Palladium)

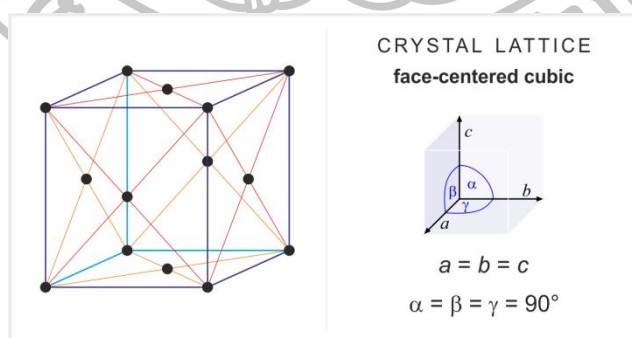
แพลเลเดียม เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมเป็น 46 โดยมีสัญลักษณ์ Pd มวลอะตอมมีค่าเป็น 106.42 กรัม/โมล มีสีขาวยเงิน สามารถสกัดได้จากนิกเกิลและทองแดง เป็นโลหะทรานซิชัน มีโครงสร้างแบบคิวบิก (cubic face centered) (รูปที่ 2) นิยมนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและโทรคมนาคม ใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น [10, 11]



รูปที่ 1 โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์ ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล เวิร์ตไซต์

ที่มา: Gul Amin, **White LEDs printed on paper**, accessed August 7, 2015, available from <http://m.eet.com/media/1168320/gulfig2.gif>

ที่มา: Lehrstuhl für Theoretische Chemie and Ruhr-Universität Bochum, **A neural network potential for Zinc oxide**, accessed August 7, 2015, available from <http://www.theochem.ruhr-uni-bochum.de/~joerg.behler/zno.htm#pagetop>



รูปที่ 2 โครงสร้างผลึกของแพลเลเดียม ที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก (cubic face centered)

ที่มา: Chemistry glossary, **Face-centered cubic lattice**, accessed August 7, 2015, available from <http://glossary.periodni.com/glossary.php?en=face-centered+cubic+lattice>

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาสมบัติการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่สร้างจากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ซิงก์ออกไซด์เป็นวัสดุที่สามารถตรวจวัดแก๊สต่างๆ ได้ดี เช่น แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สแอมโมเนีย และแก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น นอกเหนือจากนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แพลเลเดียมมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการใช้อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ มาสร้างเป็นแก๊สเซนเซอร์ โดยคาดหวังว่าแพลเลเดียมจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซนเซอร์ในการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ธาตุในกลุ่มโลหะมีตระกูลสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซนเซอร์ในการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลได้ดี

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลโดยใช้ฟิล์มซิงก์ออกไซด์และฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและเปรียบเทียบค่าสภาพความไวต่อแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มซิงก์ออกไซด์และฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ที่ความหนาต่าง ๆ

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ โดยได้กำหนดขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1. สร้างแก๊สเซนเซอร์ด้วยเทคนิคสปินโคตติง (spin coating) จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ระหว่างร้อยละ 0.25 ถึงร้อยละ 1.0 โดยโมล ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (Flame Spray Pyrolysis: FSP) โดยควบคุมปัจจัยในการสร้างแก๊สเซนเซอร์ให้เหมือนกัน ดังนี้ อัตราเร็วในการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง และอุณหภูมิในการเผาเซนเซอร์เพื่อกำจัดสารยึดเหนี่ยว
2. ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของเซนเซอร์ ดังนี้ ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส ศึกษาผลของปริมาณสารเจือแพลเลเดียม ศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์ม และผลของปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล
3. ศึกษาสมบัติของแก๊สเซนเซอร์ ดังนี้ ค่าสภาพความไว (Sensitivity, S) เวลาการตอบสนองต่อแก๊ส (Response time, T_{res}) พิสัยการวัด (Dynamic range) และอุณหภูมิดำเนินการ (operating temperature)

นิยามคำศัพท์

สภาพความไว (Sensitivity)

สภาพความไว คือ ความสามารถของตัวเซนเซอร์ที่จะบอกความแตกต่างของปริมาณแก๊สที่จะทำการวัด เช่น เซนเซอร์บางชนิดไม่สามารถบอกความแตกต่างของแก๊สในปริมาณน้อย ๆ ได้ ดังนั้น เมื่อนำไปวัดแก๊สในสองบริเวณที่มีแก๊สแตกต่างกันน้อยมาก ก็จะทำให้เกิดความเข้าใจผิดได้ว่า บริเวณทั้งสองมีแก๊สในปริมาณเท่ากัน คุณสมบัติชนิดนี้จะมีความสำคัญในกรณีแก๊สที่วัดมีปริมาณน้อย หรือ ต้องการความถูกต้องในการวัดสูง [2]

เวลาการตอบสนอง (Response time)

เวลาการตอบสนอง คือ ความสามารถในการตอบสนองได้อย่างรวดเร็วในทันทีที่แก๊สที่ทำการวัดมาสัมผัสเข้ากับตัวเซนเซอร์ คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแก๊สที่ทำการวัดเป็นแก๊สพิษ หรือ แก๊สไวไฟ เพื่อจะได้หลีกเลี่ยงและแก้ไขได้อย่างทันที่ก่อนที่จะได้รับอันตรายหรือเกิดเหตุการณ์ร้ายแรงในบริเวณที่ทำการวัดแก๊ส หากเกิดกรณีแก๊สรั่วไหลออกมา [2]

พิสัยการวัด (Dynamic range)

พิสัยการวัด คือ ช่วงกว้างของการวัดของเซนเซอร์ โดยเซนเซอร์บางตัวสามารถวัดแก๊สปริมาณตั้งแต่ 100-10,000 ppm แต่บางตัวมีพิสัยการวัดในช่วง 10-50 ppm เท่านั้น [2]

ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้พัฒนาเซนเซอร์ซึ่งทำจากวัสดุผสมระหว่างแพลเลเดียมและซิงก์ออกไซด์ที่มีค่าสภาพความไวต่อการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลที่ดี ซึ่งเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% แสดงค่าสภาพความไวได้ดีกว่าเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยแพลเลเดียม

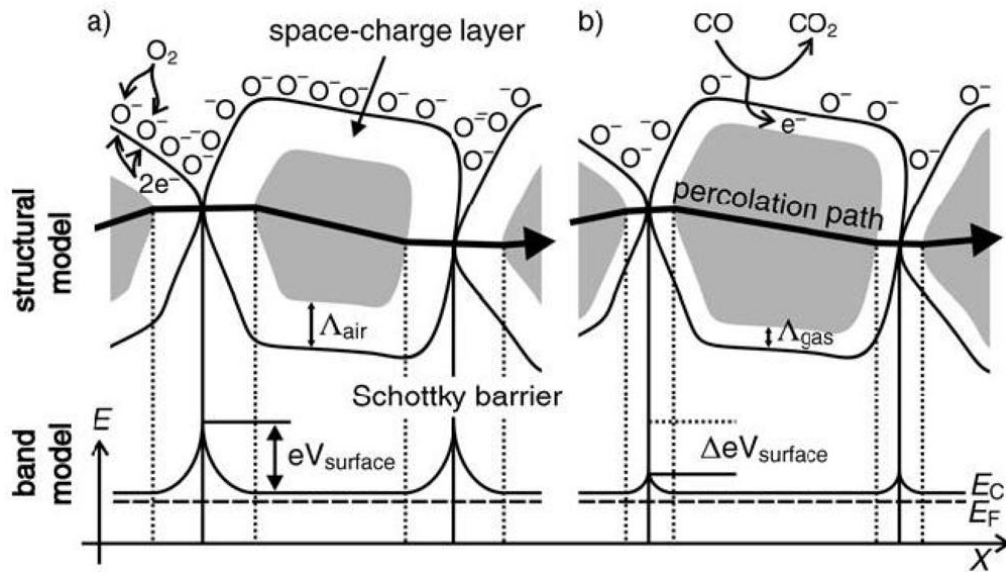
บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง [12, 13]

โดยทั่วไปกลไกที่สำคัญสำหรับการตรวจวัดแก๊สของเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากโลหะออกไซด์ คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของออกซิเจนสปีชีส์ (oxygen species) บริเวณพื้นผิวของฟิล์มโลหะออกไซด์ (อาทิเช่น O^{2-} และ O^-) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี 2 ส่วน ส่วนแรก คือ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะออกไซด์กับโมเลกุลของออกซิเจน เมื่อเซนเซอร์อยู่ภายใต้ภาวะบรรยากาศ และส่วนที่สอง คือ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สเป้าหมายกับออกซิเจนสปีชีส์บนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ โดยแบบจำลองกลไกการตรวจวัดแก๊สแสดงได้ดังรูปที่ 3

กลไกการเกิดออกซิเจนสปีชีส์บนผิวฟิล์มโลหะออกไซด์ เกิดจากการที่เซนเซอร์อยู่ภายใต้สภาวะที่ถูกให้ความร้อนและภายใต้บรรยากาศที่ล้อมรอบไปด้วยแก๊สออกซิเจน จากสภาวะดังกล่าวทำให้เกิดกระบวนการดูดซับออกซิเจน กล่าวคือ โมเลกุลของออกซิเจนจะเข้ามาดูดซับอยู่บริเวณพื้นผิวของฟิล์ม โดยการดึงอิเล็กตรอนออกจากแถบพลังงานชั้นนำ (conduction band) ของโลหะออกไซด์ ส่งผลให้เกิดกำแพงศักย์ชอตกี (Schottky potential barriers) บริเวณรอยต่อระหว่างเกรนขึ้นในกรณีของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น อาทิเช่น ซิงก์ออกไซด์และทินไดออกไซด์ อิเล็กตรอนที่ถูกดึงออกจากแถบพลังงานชั้นนำ จะทำให้ความหนาแน่นของเขตปลอดพาหะ (depletion layer) ในแต่ละเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของประจุพาหะ (อิเล็กตรอน) บนผิวฟิล์มมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้กำแพงศักย์บริเวณรอยต่อระหว่างเกรนมีค่าสูงขึ้น จากกระบวนการที่ได้กล่าวมาทำให้เซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น เมื่อเซนเซอร์อยู่ภายใต้บรรยากาศที่ล้อมรอบไปด้วยแก๊สออกซิเจน แต่ค่าความต้านทานของเซนเซอร์จะลดลง ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เนื่องจากพาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ คือ โฮล (holes) เมื่อเกิดกระบวนการดึงอิเล็กตรอนออกจากแถบพลังงานชั้นนำเนื่องจากออกซิเจน จะทำให้พาหะข้างมากมีปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ชนิดนี้จึงมีค่าลดลง โดยประเภทของออกซิเจนสปีชีส์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ คือ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า $150^{\circ}C$ จะเป็น O_2^- อุณหภูมิระหว่าง $150-400^{\circ}C$ เป็น O^- และที่อุณหภูมิสูงกว่า $400^{\circ}C$ จะเป็น O^{2-}



รูปที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างและแถบพลังงานของกลไกการนำไฟฟ้าของเซนเซอร์ตรวจวัดแก๊สของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็น

(a) กรณีที่ไม่มีแก๊สรีดิวซิงเข้ามาทำปฏิกิริยา (b) กรณีที่มีแก๊สรีดิวซิงเข้ามาทำปฏิกิริยา

ที่มา: Chengxiang Wang and others, "Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors," *Sensors* 10, 3 (March 2010): 2088-2106.

การเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของออกซิเจนกับผิวฟิล์มโลหะออกไซด์ แสดงได้ดังสมการที่ 1-4 [14, 15, 16]

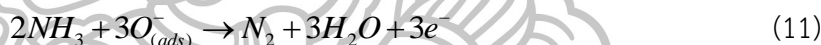
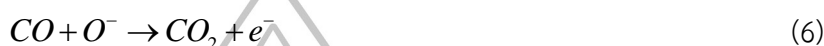


ในการตรวจวัดแก๊ส สามารถแบ่งประเภทของแก๊สออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

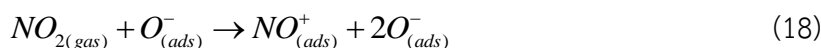
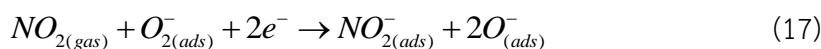
กลุ่มแรก คือ แก๊สชนิดรีดิวซิง (reducing gas) และกลุ่มที่สอง คือ แก๊สชนิดออกซิไดซ์ซิง (oxidizing gas) สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สเป้าหมาย เริ่มแรกแก๊สเป้าหมายจะเข้ามาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสปีชีส์ หรือออกซิเจนไอออนบนผิวของฟิล์มเซนเซอร์ หากเป็นแก๊สชนิดรีดิวซิง ผลของการเกิดปฏิกิริยาจะได้เป็นแก๊สชนิดใหม่กับอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนดังกล่าวจะกลับคืนสู่แถบพลังงานชั้นนำของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ แต่ถ้าหากเป็นแก๊สชนิดออกซิไดซ์ซิง แก๊สดังกล่าวจะเข้า

ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออน และดึงอิเล็กตรอนออกจากผิวฟิล์มเซนเซอร์ขณะเกิดปฏิกิริยา ซึ่งผลของการเกิดปฏิกิริยาจะได้เป็นแก๊สชนิดใหม่

1. แก๊สชนิดรีดิวซิง เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) แอมโมเนีย (NH₃) เอทานอล (C₂H₅OH) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) เป็นต้น อันตรกิริยาระหว่างโลหะออกไซด์กับแก๊สรีดิวซิง แสดงได้ดังสมการ 5-15 [17, 18, 19, 20, 21, 22]



2. แก๊สชนิดออกซิไดซ์ซิง เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) และออกซิเจน (O₂) เป็นต้น อันตรกิริยาระหว่างโลหะออกไซด์กับแก๊สออกซิไดซ์ซิง แสดงได้ดังสมการ 16-18 [23]



การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เมื่อสัมผัสกับแก๊สแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสัมผัสกับแก๊สแต่ละประเภท

ชนิดของสารกึ่งตัวนำ	แก๊สชนิดรีดิวซิง	แก๊สชนิดออกซิไดซ์ซิง
n-type	ลดลง	เพิ่มขึ้น
p-type	เพิ่มขึ้น	ลดลง

ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและพีต่อแก๊สออกซิไดซ์ซิง จะเป็นไปตามสมการที่ (19) และ (20) ตามลำดับ

$$S_{ox}^N = \frac{R_{og}}{R_a} \quad (19)$$

$$S_{ox}^P = \frac{R_a}{R_{og}} \quad (20)$$

เมื่อ R_{og} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีแก๊สออกซิไดซ์ซิง

และ R_a คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีอากาศแห้ง (dry air)

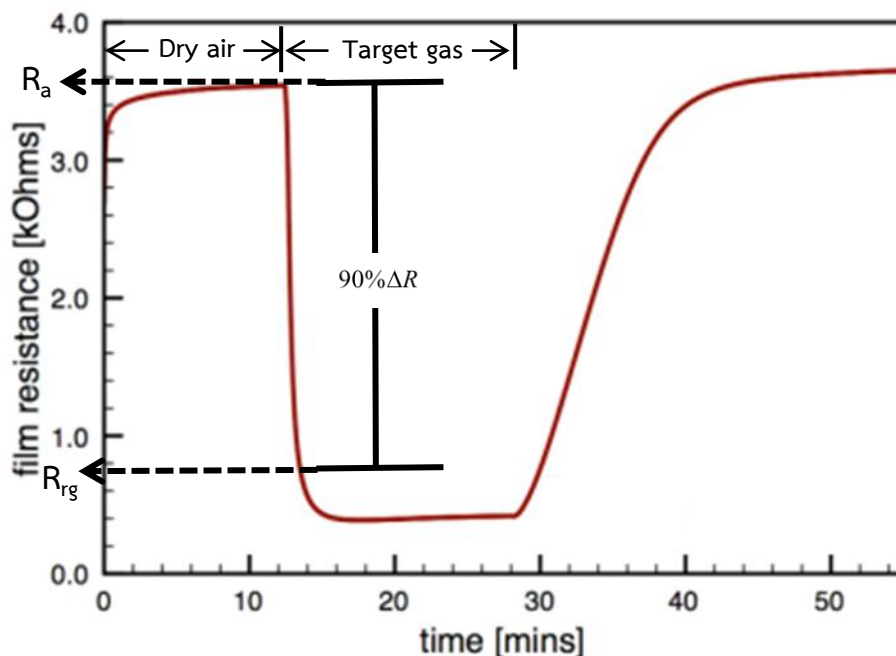
สำหรับค่าสภาพความไวของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและพีต่อแก๊สรีดิวซิง จะเป็นไปตามสมการที่ (21) และ (22) ตามลำดับ

$$S_{rd}^N = \frac{R_a}{R_{rg}} \quad (21)$$

$$S_{rd}^P = \frac{R_{rg}}{R_a} \quad (22)$$

เมื่อ R_{rg} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีแก๊สรีดิวซิง และ R_a คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีอากาศแห้ง

ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อมีแก๊สชนิดรีดิวซิ่งเข้ามาทำปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อมีแก๊สรีดิวซิ่งเข้ามาทำปฏิกิริยา และแสดงตำแหน่งของค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีอากาศแห้ง (R_a) และตำแหน่งค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีแก๊สรีดิวซิ่ง (R_{rg})

จากหลักการการทำงานของเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [24] สามารถคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้าพื้นผิว (surface conductivity: $\Delta\sigma_s$) ได้จากสมการที่ 23

$$\Delta\sigma_s = e\mu_s\Delta n_s \quad (23)$$

เมื่อ μ_s คือ สภาพความคล่องตัวของอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิว (electron mobility)

Δn_s คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะส่วนเกินในบริเวณสเปซชาร์จ (the excess density of charge carriers)

ค่า Δn_s คำนวณหาได้จากการอินทิเกรตผลต่างระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในบริเวณสเปซชาร์จกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสาร แสดงได้ดังสมการที่ 24

$$\Delta n_s = \int_0^d (n_z - n_b) dz \quad (24)$$

การเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าพื้นผิว (surface conductance) คำนวณได้จากสมการที่ 25

$$\Delta G_s = \Delta \sigma_s \frac{W}{L} \quad (25)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หากมีความหนาแน่นของตัวให้อิเล็กตรอน (เช่น ไฮโดรเจน) บริเวณพื้นผิวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน หากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี สภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลง

ความนำไฟฟ้าของสาร (bulk conductance: G_b) คำนวณได้ดังสมการที่ 26

$$G_b = n_b e \mu_b \frac{Wd}{L} \quad (26)$$

เมื่อ b คือ ปริมาณสาร (bulk quantities)

d คือ ความหนาแน่นทั้งหมดของชั้นออกไซด์ (total thickness of the oxide layer)

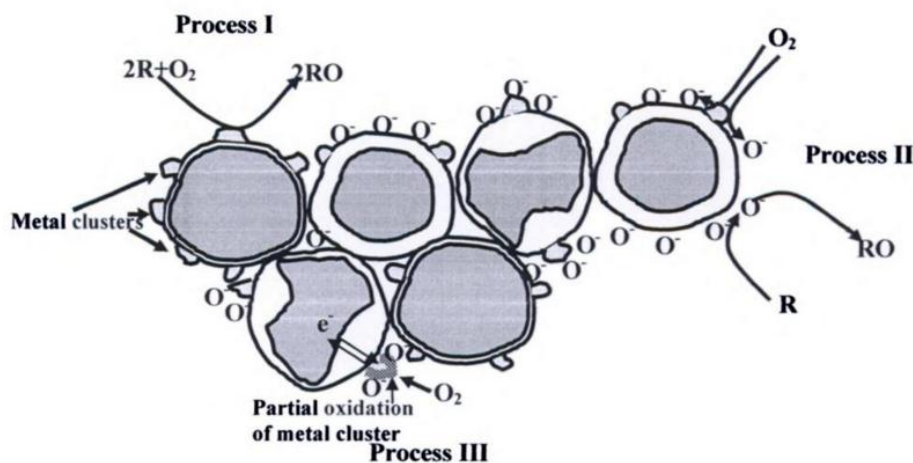
จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (23), (25) และ (26) จะได้ผลลัพธ์เป็น ค่าการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ของอุปกรณ์ทั้งหมด แสดงได้ดังสมการที่ 27 โดย $\mu_b \sim \mu_s$

$$\frac{\Delta G_s}{G} = \frac{\Delta n_s}{n_b d} \quad (27)$$

จากสมการที่ 27 ถ้าค่าการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าสัมพัทธ์มีค่าสูง (สภาพความไวสูง) นั้นหมายความว่า เนื้อสารต้องมีความหนาแน่นพาหะที่ต่ำ และความหนาของฟิล์มจะต้องมีค่าน้อย

ผลของสารเจือโลหะต่อกลไกการตรวจวัดแก๊สของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ [25]

ผลของสารเจือโลหะบนสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ สามารถอธิบายได้ด้วย 3 กระบวนการแสดงดังรูปที่ 5 คือ ผลของการเร่งปฏิกิริยา (Catalytic effect) ผลของการเกิดสปินโอเวอร์ (Spillover effect) และผลของการควบคุมพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy control) โดยกระบวนการทั้งสามสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เนื่องจากการเจือตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ

ที่มา: Dinesh K. Aswal and Shiv K. Gupta, *Science and Technology of Chemiresistor Gas Sensors* (New York: Nova Science Publishers, 2007), 54.

กระบวนการที่ 1 แสดงให้เห็นการปรากฏตัวของกลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวของสารกึ่งตัวนำ โดยกลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สชนิดรีดิวซิงและออกซิเจนในบรรยากาศเกิดได้ง่ายขึ้น แต่กระบวนการนี้จะไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

กระบวนการที่ 2 เป็นการเกิดสปินโอเวอร์ (spill-over effect) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาบนผิวของสารกึ่งตัวนำ มีความสามารถที่จะกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สบางโมเลกุลให้แยกออกจากกัน อาทิเช่น ออกซิเจน หรือไฮโดรเจน โดยอะตอมของแก๊สแต่ละชนิดที่ถูกทำให้แยกออกจากกันจะเคลื่อนที่ไปบนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ แล้วเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตามลำดับ การเกิดสปินโอเวอร์สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้สภาพความไวมีค่าสูงขึ้น และระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดลง

กระบวนการที่ 3 เป็นผลเนื่องมาจากระดับพลังงานเฟอร์มิ บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะออกไซด์กับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งรอยต่อนี้มีความคล้ายคลึงกับรอยต่อชอตกี (Schottky barrier) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยออกซิเจนไอออนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะดึงอิเล็กตรอนออกจากโลหะออกไซด์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร ทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะและทำให้เกิดแบนด์เบนดิง (band bending) จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของเนื้อสารมีค่าลดลง จากกระบวนการดังกล่าว อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะจึงเปรียบเสมือนตัวออกซิไดซ์ภายใต้สภาวะที่ล้อม

รอปไปด้วยบรรยากาศ โดยปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometry) ของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอากาศที่ล้อมรอบ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วัสดุประเภทซิงก์ออกไซด์มาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซนเซอร์

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ตัวหนึ่งที่มีความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ ดังเช่น ตัวอย่างของงานวิจัยต่อไปนี้

ในปี 1998 P. Mitra และคณะ [26] ได้ศึกษาสมบัติการตรวจวัดแก๊สของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ ที่เตรียมโดยวิธีเคลือบแบบเคมี (chemical deposition process) โดยฟิล์มนี้สามารถตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนได้ที่ 3 vol% ซึ่งแสดงค่าการตอบสนองได้สูงมากกว่า 90% ที่อุณหภูมิ 150°C อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้มีค่าเวลาการตอบสนอง/คืนสภาพที่แย่มาก แต่เซนเซอร์นี้จะมีการตอบสนองที่ดีขึ้นเมื่อนำไปทดสอบกับแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่ความเข้มข้น 0.4-1.6 vol% โดยมีค่าการตอบสนองเท่ากับ 50-75% ที่ค่าการตอบสนองเป็น 75% เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบแก๊สที่อุณหภูมิ 300°C เซนเซอร์ใช้เวลาในการตอบสนองเพียง 12 วินาที และใช้เวลาในการกลับคืนสู่สภาวะเดิมเท่ากับ 4.5 นาที

ในปี 2005 Chu Xiangfeng และคณะ [27] ได้ประดิษฐ์เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ จากซิงก์ออกไซด์เตตระพอด ภายใต้บรรยากาศ 4 ค่า ที่แตกต่างกันคือ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและไนโตรเจนที่ไม่มีความชื้นและที่มีความชื้น พบว่า การเตรียมซิงก์ออกไซด์ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่ไม่มีความชื้นซาเตระพอดจะมีความยาวประมาณ 300 ถึง 600 นาโนเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 ถึง 100 นาโนเมตร และความยาวจะมีค่าลดลงเมื่อเตรียมซิงก์ออกไซด์ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่มีความชื้น นอกจากนี้ การเตรียมซิงก์ออกไซด์ภายใต้ไนโตรเจนก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการเตรียมในอาร์กอน นักวิจัยได้นำเซนเซอร์ที่เตรียมได้ไปทดสอบเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 130-400°C จากผลการตรวจวัดเอทานอล พบว่า เซนเซอร์ที่เตรียมได้ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่ไม่มีความชื้นมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สสูงสุดเท่ากับ 14.3 ที่อุณหภูมิ 130°C เซนเซอร์ที่เตรียมได้ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนที่มีความชื้นมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สสูงสุดเท่ากับ 130.7 ที่อุณหภูมิ 300°C เซนเซอร์ที่เตรียมได้ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ไม่มีความชื้นมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สสูงสุดเท่ากับ 108.4 ที่อุณหภูมิ 380°C และเซนเซอร์ที่เตรียมได้ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีความชื้นไม่ตอบสนองต่อเอทานอล ที่อุณหภูมิระหว่าง 150-400°C และในปีเดียวกัน P.P. Sahay และคณะ [28] ได้ใช้ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ ในการตรวจวัดเอทานอลที่อุณหภูมิดำเนินการต่างๆ กัน พบว่า ฟิล์มเซนเซอร์นี้ตรวจวัดเอทานอลได้ที่ความเข้มข้นค่อนข้างสูงประมาณ 1,000 ถึง

5,000 ppm ที่อุณหภูมิดำเนินการ 150-350°C และยังคงสังเกตเห็นว่าค่าการตอบสนองต่อแก๊สของ เซนเซอร์จะดีขึ้น เมื่ออุณหภูมิดำเนินการเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล ค่าการตอบสนองจะเพิ่มขึ้นให้เห็นอย่างชัดเจน

ในปี 2006 J X Wang และคณะ [29] ได้เตรียมเซนเซอร์เพื่อใช้ในการทดสอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แอมโมเนีย และแก๊สไฮโดรเจน จากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal method) แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้มีขนาดอยู่ระหว่าง 30 ถึง 100 นาโนเมตร จากการวิจัย พบว่า เซนเซอร์มีการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองแก๊สที่ได้รับการทดสอบ และแสดงค่าการตอบสนองที่สูงที่สุดที่อุณหภูมิ 250°C ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 20 ppm อย่างไรก็ตาม ยังพบว่า แก๊สเซนเซอร์ที่เตรียมได้มีความสามารถในการตรวจจับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแอมโมเนียได้เป็นอย่างดี

ในปี 2007 มีผู้วิจัยหลายคณะได้เลือกใช้แท่งซิงก์ออกไซด์ในการนำมาประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์ตรวจจับแก๊ส อาทิเช่น L. Liao และคณะ [30] ได้ศึกษาผลของขนาดแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ต่อค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ในการตรวจจับเอทานอลและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยเลือกใช้เทคนิค reactive vapor deposition ในการเตรียมแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ ผู้วิจัยได้เลือกเซนเซอร์สำหรับนำไปทดสอบแก๊สทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งเซนเซอร์แต่ละตัวมีขนาดของแท่งนาโนเฉลี่ยเท่ากับ 100, 200, 400 และ 800 นาโนเมตร จากผลการทดสอบแก๊สได้ข้อสรุปว่า เซนเซอร์ที่มีขนาดของแท่งนาโนเท่ากับ 100 นาโนเมตร ให้ค่าสภาพความไวที่ดีและใช้เวลาในการตอบสนองต่อเอทานอลได้น้อยกว่าเซนเซอร์ที่มีขนาดของแท่งนาโนเท่ากับ 800 นาโนเมตร เช่นเดียวกันกับการตรวจจับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ต่อมา Yuzhen Lv และคณะ [31] ได้เผยแพร่งานวิจัยเกี่ยวกับการตรวจจับแก๊สด้วยเซนเซอร์แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์จากเทคนิคซิมเพิล รูท (simple route) ซึ่งขนาดโดยเฉลี่ยของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์มีค่าประมาณ 95 นาโนเมตร ในขั้นตอนการตรวจจับได้เลือกสารทดสอบ 4 ชนิด คือ เอทานอล เบนซีน โทลูอิน และอะซิโตน เพื่อวิเคราะห์ค่าการตอบสนอง (R_s/R_0) และทดสอบหาความจำเพาะของเซนเซอร์ ผลการทดสอบ พบว่า เซนเซอร์แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์แสดงค่าการตอบสนองที่สูงและมีความจำเพาะของเซนเซอร์ที่ดีต่อการตรวจจับแก๊สเอทานอลและเบนซีน ซึ่งมีค่าการตอบสนองต่อเบนซีนที่ความเข้มข้น 0.01 ppm และเอทานอลที่ความเข้มข้น 1 ppm เท่ากับ 6.8 และ 3.2 ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับ Li-Jian Bie และคณะ [32] ได้ศึกษาการตรวจจับแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล โดยเลือกใช้เซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ พบว่า แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 10-30 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 1.4 ไมโครเมตร ผลการตรวจจับแก๊ส พบว่า เซนเซอร์แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นเส้นตรง มีค่าการตอบสนอง (R_s/R_0) ต่อเอทานอลและแก๊สไฮโดรเจน ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 100

ppm สูงถึง 18.29 และ 10.41 ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เซนเซอร์มีค่าการตอบสนองต่อแก๊สได้ดี เป็นผลมาจากแท่งนาโนที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงนั้นให้ค่าพื้นที่ผิวที่สูง นอกเหนือจากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในปี 2007 มีผู้วิจัยอีกหลายคณะที่เลือกใช้แก๊สเซนเซอร์ที่สร้างจากซิงก์ออกไซด์ เช่นตัวอย่างดังต่อไปนี้

Chaikarn และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาผลของความหนาของฟิล์มต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ โดยใช้เทคนิคด็อกเตอร์เบลด (doctor-blade technique) และทำการแปรค่าความหนาฟิล์มซิงก์ออกไซด์ ทั้งหมด 3 ความหนา คือ 5, 10 และ 15 ไมโครเมตร โดยความหนาที่มีการตอบสนองและมีความไวต่อแก๊สเอทานอลดีที่สุดคือ 5 ไมโครเมตร ซึ่งมีความหนาน้อยที่สุด อีกทั้งยังพบว่า การตอบสนองมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น

George และคณะ [34] สร้างเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ ด้วยเทคนิค Aqueous chemical growth ที่อุณหภูมิ 95°C สำหรับนำไปตรวจวัดไอโซนที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลาในการสร้างเซนเซอร์ต่างกันเป็น 1, 5, 10 และ 20 ชั่วโมง หลังจากการตรวจวัดไอโซน พบว่า เซนเซอร์ที่สร้างโดยใช้เวลา 5 ชั่วโมง มีการตอบสนองได้รวดเร็ว เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูง

Camelia Matei Ghimbeu และคณะ [35] ได้เตรียมเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ เพื่อใช้ในการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยเทคนิคการพ่นฝอยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic spray deposition: ESD) โดยเวลาที่ใช้ในการสร้างฟิล์มเป็น 1 และ 2 ชั่วโมง และอัตราการไหลของสารตั้งต้นเป็น 1-2 ml/h สำหรับการตรวจวัดแก๊สที่อุณหภูมิต่างกัน การตอบสนองต่อแก๊สทั้งสองชนิดได้ดี เนื่องจากโครงสร้างมีรูพรุนและประกอบไปด้วยอนุภาคทรงกลมที่มีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ โดยส่วนใหญ่เซนเซอร์แสดงค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำ (1 ppm) ได้สูงกว่าการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 12 ppm

Samarasekara และคณะ [36] ได้สร้างคาร์บอนไดออกไซด์เซนเซอร์ จากซิงก์ออกไซด์ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (D.C. sputtering method) โดยใช้เวลาในการสปัตเตอริง 18 ชั่วโมง แปรค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 130-153°C ใช้ความดันภายในแชมเบอร์ 8.5 มิลลิบาร์ ผลการตรวจวัดแก๊สพบว่า เซนเซอร์ที่ใช้อุณหภูมิในการสปัตเตอริงเป็น 130°C มีค่าสภาพความไวที่ดีกว่าเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิอื่น ๆ โดยมีค่าสภาพความไว เวลาการตอบสนองและเวลาการกลับคืนสู่สภาพเดิม เท่ากับ 2.17, 5 วินาที และ 10 นาที ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ สรุปได้ว่าผลึกจะมีขนาดเล็กกลง เมื่อลดอุณหภูมิที่ใช้ในการสปัตเตอริง ส่งผลให้เซนเซอร์มีค่าพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น

ในปี 2008 Yu-Jin Chen และคณะ [37] ได้สร้างเอทานอลเซนเซอร์ จากท่อนาโนซิงก์ออกไซด์ ที่เตรียมด้วยวิธีโซโนเคมีคอล (sonochemical method) เซนเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้ ให้ค่าสภาพความไวแก๊สสูง ที่อุณหภูมิ 300°C โดยสามารถตรวจวัดแก๊สเอทานอลได้ที่มีความเข้มข้นต่ำถึง 1 ppm ต่อมา Qi Qi และคณะ [38] ได้ประดิษฐ์เซนเซอร์จากผลึกไมโครซิงก์ออกไซด์รูปทรงดัมเบล ด้วยเทคนิค facile solution สำหรับทดสอบอะซีโตนและเอทานอล โดยได้ทดสอบแก๊สภายใต้อุณหภูมิตำเนินการ 260 และ 300°C พบว่า เซนเซอร์ที่เตรียมได้มีการตอบสนองต่ออะซีโตนได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิตำเนินการมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าการตอบสนองต่ออะซีโตนและเอทานอล ที่ความเข้มข้น 50 ppm ภายใต้อุณหภูมิ 260°C เท่ากับ 5.9 และ 8.1 ตามลำดับ สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าเท่ากับ 16.0 และ 4.0 ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า เซนเซอร์มีเวลาในการตอบสนองและเวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิมที่รวดเร็ว คือ ที่อุณหภูมิ 300°C เซนเซอร์ใช้เวลาในการตอบสนองต่ออะซีโตนและเวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิมเพียง 1.5 และ 3 วินาที ตามลำดับ

ในปี 2009 N. Al-Hardan และคณะ [39] ได้ทำการวิจัยโดยการประดิษฐ์ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคดีซีสเปตเตอริง (DC Sputtering) ลงบนอิเล็กโทรด Ti/Pt เพื่อตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน พบว่า ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์มีค่าการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนได้ดีที่อุณหภูมิ 400°C และตอบสนองได้ดียิ่งขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วัสดุประเภทซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยสารต่าง ๆ มาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซนเซอร์

คุณสมบัติของแก๊สเซนเซอร์สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการเจือสารลงในเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ ดังเช่น ตัวอย่างงานวิจัยดังต่อไปนี้

ในปี 1998 N. Jayadev Dayan และคณะ [40] ได้นำเสนองานวิจัยทางด้าน การตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทน จากเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ (pure ZnO) และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยพลวง (ZnO: Sb) จากผลการทดสอบแก๊ส พบว่า เซนเซอร์ที่เจือด้วยพลวง แสดงค่าสภาพความไวสูงกว่าเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น

ในปี 1999 G.S.T. Rao และคณะ [41] ได้ใช้ฟิล์มหนาจากซิงก์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือ และเจือด้วยโลหะแพลเลเดียม เหล็ก (Fe) และรูทีเนียม (Ru) เพื่อใช้ตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย ค่าการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 30 ppm เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือแพลเลเดียม เหล็ก และรูทีเนียม มีค่าประมาณ 35, 60, 25 และ 10% ตามลำดับ โดยจากการทดลองนี้พบว่า เซนเซอร์ของซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ให้ค่าความไวและค่าเวลาการตอบสนอง/คืน

สภาพที่เร็ว ต่อแก๊สแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งใช้เวลาในการตอบสนองเพียง 4 วินาที ในช่วงความเข้มข้นของแอมโมเนียเป็น 30 ppm

ในปี 2000 F. Paraguay D. และคณะ [42] ได้เลือกตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ชนิด ในการนำมาเจือซิงก์ออกไซด์ เพื่อสร้างฟิล์มบางสำหรับวัดไอเอทานอล คือ อะลูมิเนียม (Al) อินเดียม (In) ทองแดง (Cu) เหล็ก และดีบุก (Sn) โดยเจือสารแต่ละชนิดในปริมาณตั้งแต่ 1, 3, 5, 7 และ 15 at.% ในการทดสอบแก๊สที่อุณหภูมิดำเนินการ 675 K พบว่า ที่ปริมาณสารเจือเหมาะสมและความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 100 ppm เซนเซอร์แสดงค่าสภาพความไวจากมากไปน้อย เป็นดังนี้ ZnO:Sn 0.4 at.%, ZnO:Al 1.8 at.%, ZnO:Fe 1.1 at.%, ZnO:In 6.5 at.%, ZnO และ ZnO:Cu 3.6 at.%

ในปี 2002 J.F. Chang และคณะ [43] สร้างเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม โดยใช้ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงในการปลูกฟิล์มลงบนซับสเตรท SiO_2/Si สำหรับใช้ในการตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของความหนาของฟิล์มบางต่อคุณสมบัติในการตรวจวัดแก๊สของเซนเซอร์ โดยความหนาของฟิล์มแต่ละค่าสามารถควบคุมจากเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม ฟิล์มที่เตรียมได้มีทั้งหมด 4 ความหนา คือ 65, 188.5, 280 และ 390 นาโนเมตร ภายหลังการทดสอบการตรวจวัดแก๊สภายใต้อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 °C พบว่า เมื่อความหนาของฟิล์มเซนเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าสภาพความไวจะมีค่าลดลง โดยเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเป็น 65 นาโนเมตร ให้ค่าสภาพความไว (S%) สูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 61.6% ที่อุณหภูมิ 400 °C นอกจากนี้ ยังพบว่า เวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิดำเนินการมีค่าเพิ่มขึ้น

ในปี 2005 Sergiu T. Shishyanu และคณะ [44] ได้ศึกษาชนิดและปริมาณของสารเจือที่เหมาะสมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นไนโตรเจนไดออกไซด์เซนเซอร์ โดยได้เลือกใช้ทฤษฎีซัคเซสซิฟไอออนิกเลเยอร์แอดซอร์ปชันและรีแอคชัน (successive ionic layer adsorption and reaction method) ในการประดิษฐ์ฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ และฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย ดีบุก อะลูมิเนียม คอปเปอร์ และแพลเลเดียม ในปริมาณ 10 at% ตามลำดับ แล้วนำไปทดสอบแก๊สที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า เซนเซอร์ที่เจือด้วยดีบุกแสดงค่าสภาพความไวได้ดีที่สุด นักวิจัยจึงได้ศึกษาปริมาณของสารเจือดีบุกที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยการสร้างเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุกในปริมาณ 5 ถึง 10 at% ผลการตรวจวัดแก๊สแสดงให้เห็นว่า ปริมาณสารเจือดีบุกที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดแก๊สดังกล่าวคือ 5 at% โดยให้ค่าสภาพความไวสูงสุดที่อุณหภูมิ 150 °C ประมาณ 10.5 ในขณะที่เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยดีบุกในปริมาณ 10 at% มีค่าประมาณ 5.5

ในปี 2006 B.L. Zhu และคณะ [45] ได้ประดิษฐ์เซนเซอร์ฟิล์มหนาจากอนุภาคนาโนซิงก์-ออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วย พลัง อินเดียม บิสมัท (Bi) อินเดียม-พลัง และ อินเดียม-บิสมัท ที่เตรียมได้จากวิธี renovate hybrid induction and laser heating (HILH) เพื่อนำไปทดสอบการตรวจวัดเบนซีน โทลูอิน และไซลีน จากผลการทดสอบ พบว่า ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเจือพลัง อินเดียม และบิสมัท อีกทั้ง การเจือสารอินเดียม พลัง และอินเดียม-พลัง สามารถเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มซิงก์ออกไซด์และค่าสภาพความไวต่อการตรวจวัดสารทั้งสามชนิดอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่า ฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัท และอินเดียม-บิสมัท มีค่าสภาพความไว้น้อยกว่าฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือสารใด ๆ แต่ส่งผลให้อุณหภูมิที่ฟิล์มแสดงค่าสภาพความไวที่ดีที่สุดมีค่าลดลง เวลาที่ใช้ในการตอบสนองและคืนสู่สภาวะเดิมของฟิล์มต่อการตรวจวัดเบนซีน โทลูอิน และไซลีน มีค่าน้อยกว่า 20 วินาที โดยฟิล์มที่มีพลัง เป็นองค์ประกอบได้ใช้เวลาในการกลับคืนสู่สภาวะเดิมนานที่สุด ต่อมา H. Gong และคณะ [46] ได้ประดิษฐ์ฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยคอปเปอร์ลงบนซับสเตรทแก้ว ด้วยเทคนิคโคสปัตเตอริง (co-sputtering) จากการศึกษาลักษณะของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยคอปเปอร์ ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบคอลลิมน์ของผลึกขนาดเล็ก มีขนาดเกรนเฉลี่ยประมาณ 5 นาโนเมตร ผู้วิจัยได้ทดสอบแก๊สที่อุณหภูมิดำเนินการ 150, 300, 350 และ 400 °C พบว่า เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยคอปเปอร์ แสดงค่าสภาพความไวต่อการตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุดเท่ากับ 2.7 ภายใต้อุณหภูมิ 350 °C และที่ความเข้มข้นของแก๊ส 20 ppm หลังจากนั้น M.T. Mohammad และคณะ [47] ได้ศึกษาผลของการเจือสารอะลูมิเนียม ลงในซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 0.3% และ 0.5% เพื่อเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าต่อการตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สชีวเทน พบว่าฟิล์มที่เจือด้วยอะลูมิเนียมให้ค่าการนำไฟฟ้าสำหรับแก๊สทั้งสองสูงกว่าฟิล์มซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ และฟิล์มซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมในปริมาณ 0.3% ที่มีความหนาเท่ากับ 0.2 μm ให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ $0.3 (\Omega\text{cm})^{-1}$

ในปี 2007 Rout CS และคณะ [48] ได้เผยแพร่งานวิจัย เกี่ยวกับการตรวจวัดแก๊สจากฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีส (Mn) และโคบอลต์ (Co) ตามลำดับ เซนเซอร์ดังกล่าวมีการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนได้ดี โดยใช้เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนสู่สภาวะเดิม ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการน้อยกว่า 10 วินาที ที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 1,000 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 125 °C ต่อมา O.I. Lupan และคณะ [49] ได้ประดิษฐ์ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยสารเจืออีกสองชนิด คือ ดีบุกและทองแดง ด้วยทฤษฎีซึคเซสตีฟไอออนิกเลเยอร์แอดซอร์บชันและรีแอดซัน (successive ionic layer adsorption and reaction method) เพื่อใช้ในการทดสอบแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์และแอมโมเนีย จากผลการศึกษา พบว่า ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือสาร

โดยเลย มีค่าการตอบสนองต่อแอมโมเนียได้ดีกว่าแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ แต่ยังมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สทั้งสองชนิดที่ต่ำมาก นอกจากนี้ ยังพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้โดยการเจือซิงก์ออกไซด์ด้วยดีบุก และเพิ่มค่าการตอบสนองต่อเอทานอลให้สูงขึ้นได้โดยการเจือซิงก์ออกไซด์ด้วยทองแดง หลังจากนั้น A.Z. Sabek และคณะ [50] ได้สร้างเซนเซอร์ SAW (surface acoustic wave sensors) จากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ลงบนซับสเตรท 2 ชนิด คือ LiNbO_3 และทองคำ (Au) เพื่อใช้ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการระหว่าง 200 และ 300 °C ผลจากการศึกษาลักษณะเฉพาะพบว่า แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์มีขนาดประมาณ 100 และ 400 นาโนเมตร สำหรับการปลูกฟิล์มบน LiNbO_3 และทองคำ ตามลำดับ ผลจากการตรวจวัดแก๊สพบว่า เซนเซอร์มีการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิดำเนินการ 200 °C และเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากคลื่นความถี่เท่ากับ 274 kHz ใช้เวลาในการตอบสนองและเวลาในการกลับคืนสู่สภาพเดิมต่อการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนเป็น 28 และ 36 วินาที ตามลำดับ

ในปี 2008 N. Hongsith และคณะ [51] ได้ประดิษฐ์เอทานอลเซนเซอร์จากเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์และเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ (1 wt%) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการระหว่าง 220-280 °C จากการวิเคราะห์ผลแสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ทั้งสองชนิดขึ้นกับอุณหภูมิดำเนินการและความเข้มข้นของแก๊ส โดยเซนเซอร์ทั้งสองใช้เวลาในการตอบสนองอยู่ในช่วงวินาที และที่อุณหภูมิ 240 °C เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ แสดงค่าสภาพความไวสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 27 และ 37 ตามลำดับ

ในปี 2009 T. Nittaya และคณะ [52] ได้ศึกษาผลของการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนของฟิล์มนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลทินัม (Pt) ในปริมาณ 0.2-2.0% ที่เตรียมด้วยเทคนิคสปินโคตติง (Spin coating) ลงบนซับสเตรทอะลูมินา และได้ทดสอบแก๊สไฮโดรเจน ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200-350 °C จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มหนา 0.2 at.% Pt/ZnO ให้ค่าการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนที่ดีที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณ 164 ที่ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนในอากาศเป็น 1 volume% และที่อุณหภูมิดำเนินการ 300 °C

ในปี 2011 Q.G. Al-zaidi และคณะ [53] ได้เตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรลิซิสแบบเคมี (chemical spray pyrolysis) บนซับสเตรทแก้ว เพื่อใช้เป็นไฮโดรเจนเซนเซอร์ ผลการวิจัยพบว่า เซนเซอร์ใช้เวลาในการตอบสนองเพียง 2 ถึง 3 วินาที ซึ่งมีค่าการตอบสนองที่ดีกว่าเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ในกรณีที่ไม่ได้เติมสารเจือ

ในปี 2014 Kanika และคณะ [54] ได้ศึกษาการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ด้วยเซนเซอร์ที่เตรียมจากวัสดุผสมระดับนาโน (0, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5) กราฟีน/ซิงก์ออกไซด์ (graphene/ZnO) เพื่อผลการตรวจวัดแก๊ส เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มหนาซิงก์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 100-450°C จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าฟิล์มหนาที่เป็นวัสดุผสมระดับนาโนของกราฟีน/ซิงก์ออกไซด์ นั้นมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สได้ดีที่อุณหภูมิต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มหนาซิงก์ออกไซด์ โดยปริมาณกราฟีนที่ดีที่สุดที่เซนเซอร์ให้ค่าการตอบสนองสูงที่สุดคือ 1.2wt% มีค่าการตอบสนองประมาณ 3.5 ที่อุณหภูมิดำเนินการ 150°C ในขณะที่ฟิล์มหนาซิงก์ออกไซด์มีค่าการตอบสนองสูงสุดประมาณ 2.2 ที่อุณหภูมิดำเนินการ 400°C



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวเชื่อมประสาน (binder) ส่วนที่สอง วัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสปินโคตติง และส่วนที่สาม วัสดุที่ใช้ในกระบวนการการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวเชื่อมประสาน (binder)

- 3.1.1.1 เครื่องชั่งสารเคมี (balance)
- 3.1.1.2 ฟอยล์อะลูมินา (alumina foil)
- 3.1.1.3 ช้อนตักสาร (spatula)
- 3.1.1.4 ปิเปตต์ (pipette)
- 3.1.1.5 บีกเกอร์ (beaker)
- 3.1.1.6 เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
- 3.1.1.7 แท่งแม่เหล็กทรงกระบอก (Cylindrical magnetic bar)
- 3.1.1.8 ตู้ดูดไอสารเคมี (fume hood)
- 3.1.1.9 สารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้แก่
 - 3.1.1.9.1 แอลฟา-เทอร์ไพเนอล (α - terpineol)
 - 3.1.1.9.2 เอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose)

3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสปินโคตติง

- 3.1.2.1 เครื่องชั่งสารเคมี (balance)
- 3.1.2.2 ฟอยล์อะลูมินา (alumina foil)
- 3.1.2.3 ช้อนตักสาร (spatula)
- 3.1.2.4 ไมโครปิเปตต์ (micro pipette)

- 3.1.2.5 โกร่งบดสาร (a mortar and pestle)
- 3.1.2.6 อิเล็กโทรด (electrode)
- 3.1.2.7 กระจกสไลด์ (microscope slides)
- 3.1.2.8 เตาความร้อน (hot plate)
- 3.1.2.9 เตาเผา (horizontal three)
- 3.1.2.10 เครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (spin coater)
- 3.1.2.11 สารเคมีต่าง ๆ ได้แก่
 - 3.1.2.11.1 ตัวเชื่อมประสาน
 - 3.1.2.11.2 อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์
 - 3.1.2.11.3 อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%

3.1.3 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล

- 3.1.3.1 เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม
- 3.1.3.2 แคมเบอร์ทดสอบแก๊ส
- 3.1.3.3 แก๊สที่ต้องการทดสอบ (test gas)
- 3.1.3.4 อากาศแห้ง (dry air)
- 3.1.3.5 ฮีทเตอร์
- 3.1.3.6 เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส
- 3.1.3.7 พิคโอแอมมิเตอร์
- 3.1.3.8 ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการตรวจวัดแก๊ส

3.2 การเตรียมตัวเชื่อมประสาน

ตัวเชื่อมประสานสามารถเตรียมได้จากการนำสารเคมี 2 ชนิด คือ แอลฟา-เทอไพนิออลและเอทิลเซลลูโลส ในปริมาณ 18 g และ 480 mg ตามลำดับ ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีแม่กเนติกบาร์บรรจุอยู่ หลังจากนั้น นำบีกเกอร์ไปวางบนเครื่องกวนสารละลาย เพื่อผสมให้สารทั้งสองชนิดกลายเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน โดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 80°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้น วางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและเก็บใส่ภาชนะบรรจุ ตามลำดับ

3.3 การเตรียมฟิล์มเซนเซอร์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสปินโคตติง

การเตรียมตัวตรวจวัดแก๊สด้วยเทคนิคสปินโคตติง จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 ทำการล้างกระจกสไลด์ให้สะอาด นำอิเล็กโทรดที่มีขนาดความกว้างและความยาว 0.3x0.4 ตารางเซนติเมตร (ภาพที่ 1) วางบนกระจกสไลด์ แล้วใช้เทปใสติดบริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง โดยไม่ให้อิเล็กโทรดและกระจกสไลด์หลุดออกจากกัน (ภาพที่ 2)

3.3.2 เตรียมสารละลายผสมภายในห้องปลอดเชื้อ (clean room) โดยชั่งอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และดวงตัวเชื่อมประสานในปริมาณ 60 mg และ 0.45 ml ตามลำดับ นำสารทั้งสองชนิดใส่ลงในโกร่งบดสาร ทำการผสมตัวเชื่อมประสานกับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ให้เข้ากันโดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที (ภาพที่ 3)

3.3.3 นำกระจกสไลด์ที่ติดด้วยอิเล็กโทรดที่เตรียมได้วางลงบนเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (ภาพที่ 4) หลังจากนั้นหยุดสารละลายผสมลงบนอิเล็กโทรดและเริ่มทำการเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง ซึ่งจะใช้ความเร็วในการหมุน 2 ค่า คือ 700 rpm และ 3000 rpm เป็นเวลา 10 วินาที และ 30 วินาที ตามลำดับ

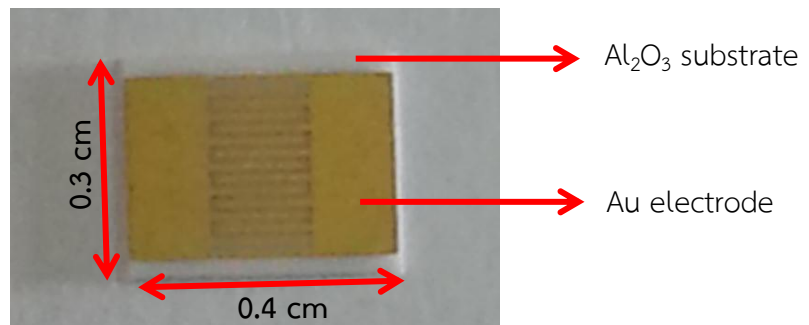
3.3.4 หลังจากนั้นนำไปอบบนเตาความร้อน (ภาพที่ 5) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้อิเล็กโทรดเย็นตัวลง แล้วแกะออกจากกระจกสไลด์เพื่อนำไปเผาในเตาเผา (ภาพที่ 6) ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.5 จะได้เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มที่น้อยที่สุด

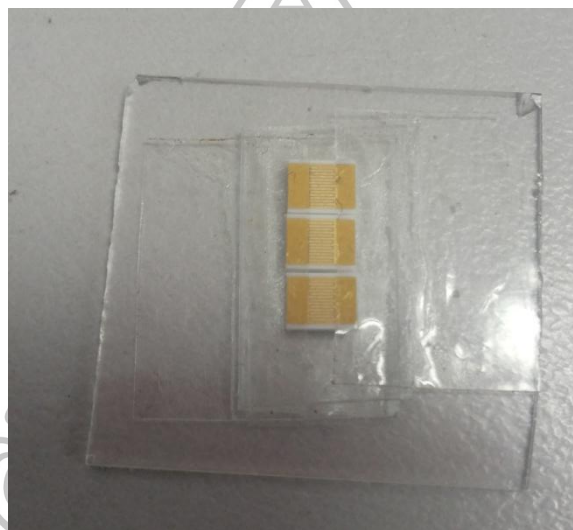
3.3.6 ทำซ้ำตามข้อที่ 3.3.2-3.3.4 อีกครั้ง แต่เพิ่มจำนวนครั้งในการสปินโคตติงเป็น 2 และ 3 ครั้ง เพื่อสร้างเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น

3.3.7 ในส่วนของการเตรียมเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% และที่ความหนาของชั้นฟิล์มค่าต่าง ๆ สามารถเตรียมได้ ตามขั้นตอนที่ 3.3.1-3.3.4 และ 3.3.6 แต่เปลี่ยนจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์เป็นอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%

3.3.8 นำเซนเซอร์ที่เตรียมได้หลังจากการเผา ไปทดสอบการตรวจวัดแก๊สเป็นลำดับต่อไป



ภาพที่ 1 อิเล็กโทรดที่เตรียมได้จากการพิมพ์ลายอิเล็กโทรดด้วยทองลงบนชั้นสเตรทอะลูมินา



ภาพที่ 2 การติดเทปใสบริเวณขั้วไฟฟ้าของอิเล็กโทรดบนกระจกสไลด์



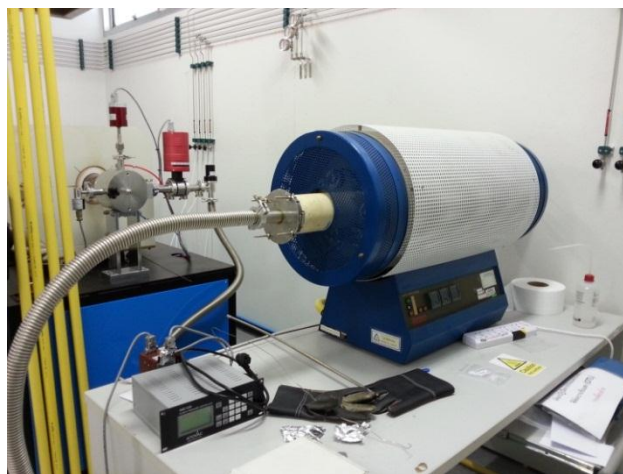
ภาพที่ 3 การผสมตัวเชื่อมประสานกับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ภายในโถรงบดสาร เพื่อเตรียมสารละลายผสม



ภาพที่ 4 เครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (spin coater)



ภาพที่ 5 การอบอิเล็กทรอนิกส์ที่อุณหภูมิ 80°C



ภาพที่ 6 เต้าเผา ที่ใช้ในการเผาเซนเซอร์

3.4 กระบวนการการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล

3.4.1 โพรบเซนเซอร์ที่เตรียมได้กับหัวโพรบภายในแฮมเบอร์ (ภาพที่ 7) โดยให้หัวโพรบ อยู่บริเวณหัวไฟฟ้าทั้งสองข้างของอิเล็กทรอนิกส์ (ภาพที่ 8 และภาพที่ 9)

3.4.2 หลังจากนั้นปิดฝาภาชนะทดสอบแก๊ส แล้วตรวจสอบเครื่องควบคุมอัตราการไหลของ แก๊สว่ามี การเชื่อมต่อเข้าภายในภาชนะทดสอบแก๊สเป็นที่เรียบร้อย

3.4.3 เปิดวาล์วถึงแก๊สอากาศแห้งและแก๊สที่ต้องการทดสอบตามลำดับ

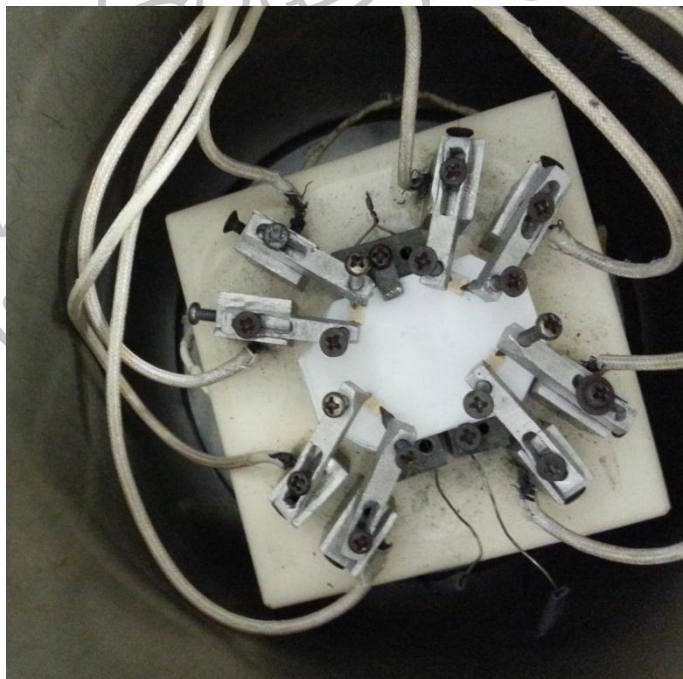
3.4.4 เปิดโปรแกรม Smart dde. และโปรแกรม Lab view national instruments หลังจากนั้น บันทึกข้อมูลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ค่าความต่างศักย์รวมของวงจรร อุณหภูมิดำเนินการ ช่วง ความเข้มข้นของแก๊ส ช่วงเวลาการตอบสนองต่อแก๊สที่ต้องการทดสอบ (10 นาที) และช่วงเวลาในการ กลับคืนสู่สภาพเดิมของเซนเซอร์ (25 นาที) ลงในโปรแกรมหดงกล่าว และกดปุ่มเริ่มการทำงานของ โปรแกรม ผลที่ได้จากการตรวจวัดแก๊สจะแสดงออกมาในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความต้านทานกับเวลา (ภาพที่ 10)

3.4.5 ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สไฮโดรเจน สามารถปฏิบัติได้ตาม ข้อ 3.4.1-3.4.4 โดยเลือกโปรแกรมสำหรับตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน เลือกค่าความต่างศักย์รวมของวงจรร เป็น 10 V อุณหภูมิดำเนินการในช่วง 200 ถึง 350°C และช่วงความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนเป็น 1,500-5,000 ppm

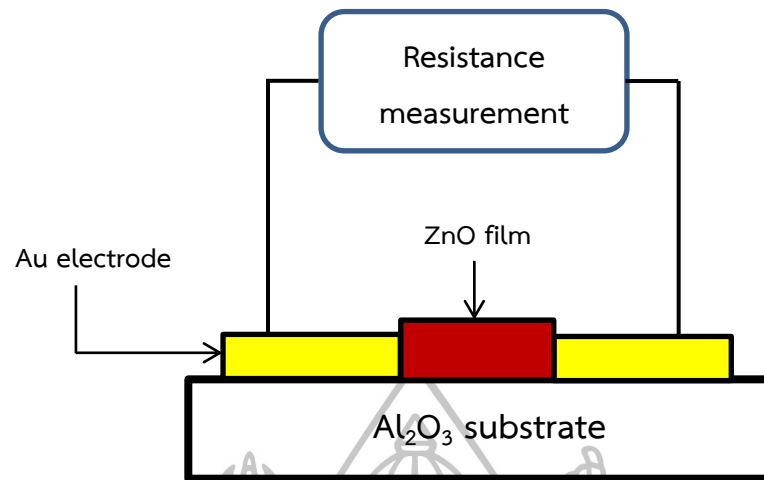
3.4.6 ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อเอทานอล สามารถปฏิบัติได้ตามข้อ 3.4.1-3.4.4 เช่นเดียวกัน แต่เลือกโปรแกรมสำหรับตรวจวัดเอทานอล เลือกค่าความต่างศักย์รวมของ วงจรรเป็น 10 V อุณหภูมิดำเนินการในช่วง 200 ถึง 350°C และช่วงความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 50-200 ppm ระบบตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล แสดงดังแผนภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



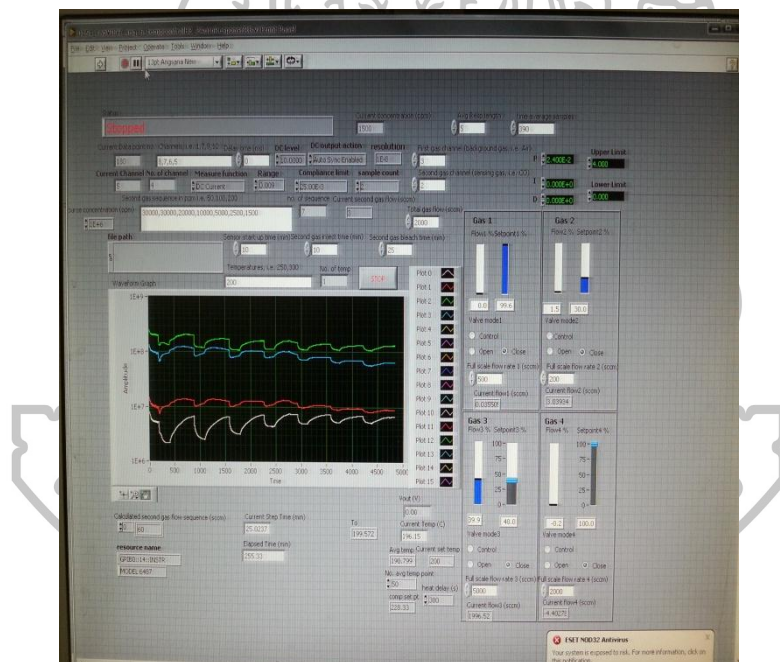
ภาพที่ 7 แคมเบอร์หรือภาชนะที่ใช้ในการทดสอบแก๊ส



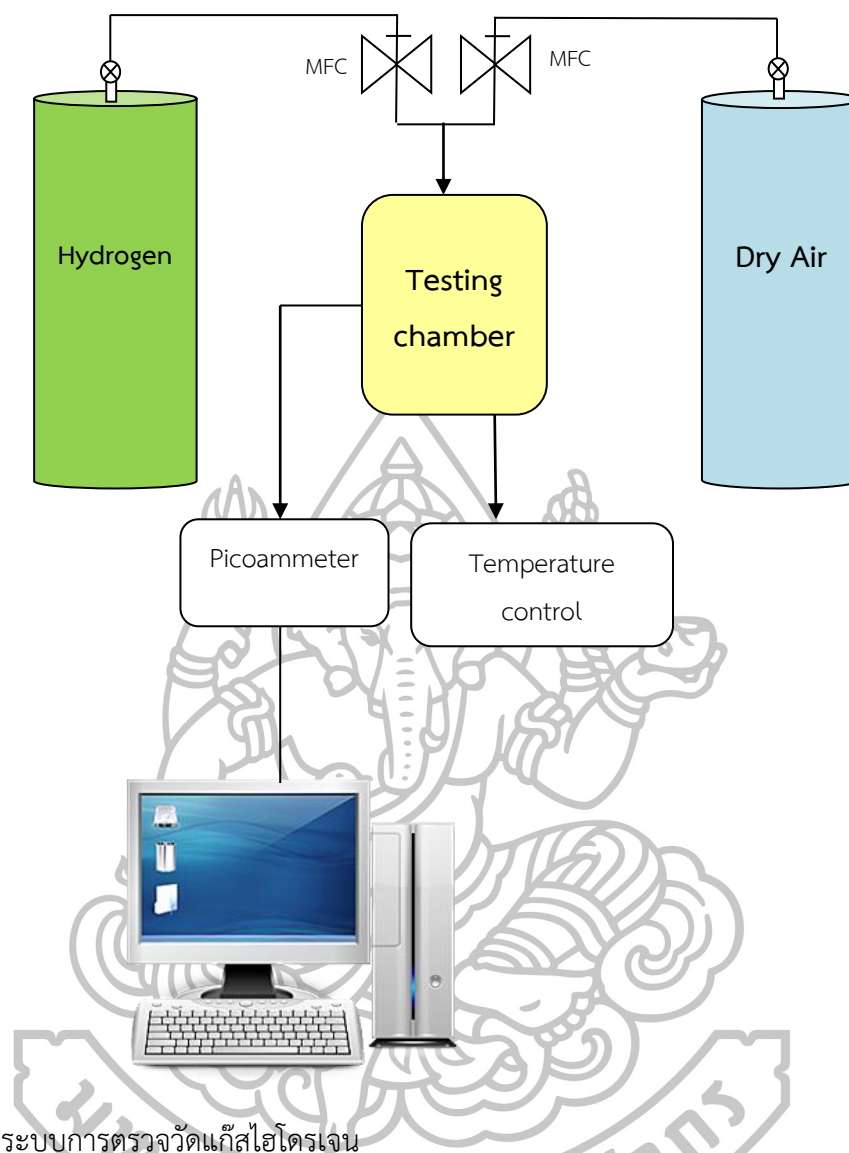
ภาพที่ 8 หัวโพรบที่โพรบติดอยู่บริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างของอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 9 ภาคตัดขวางจำลองของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์

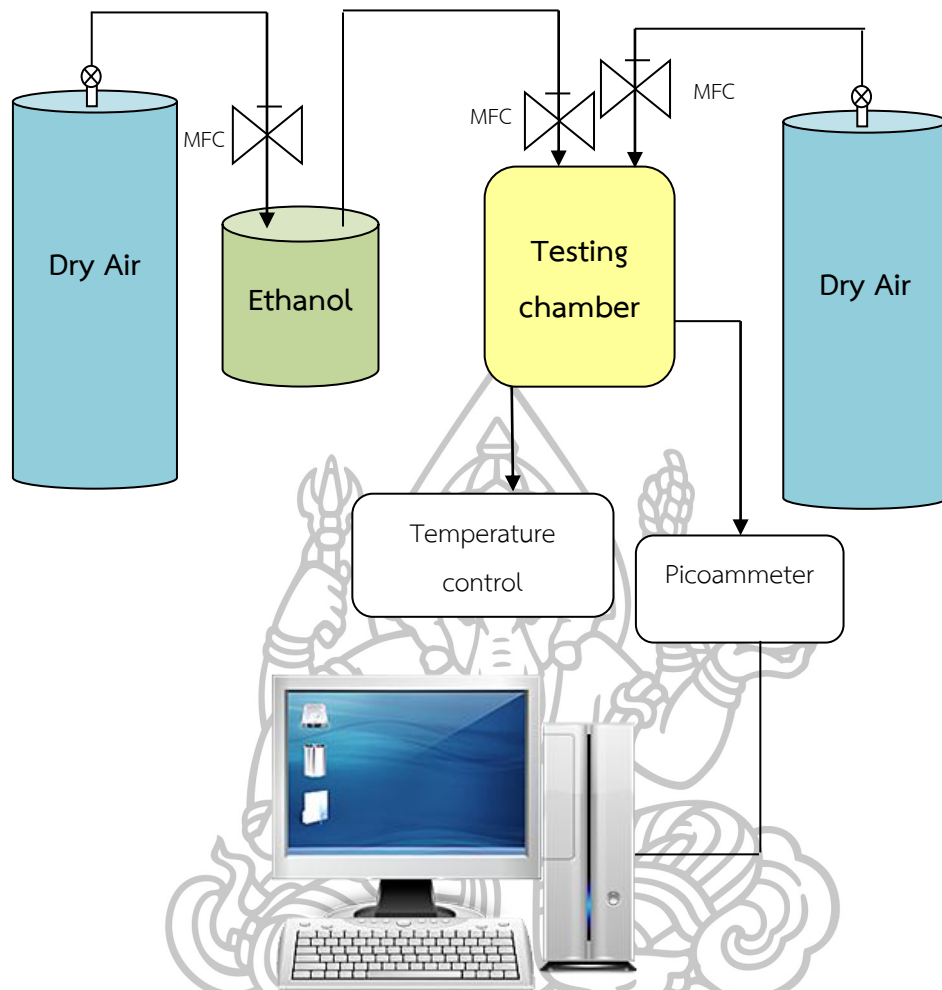


ภาพที่ 10 จอแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับเวลาที่ได้จากโปรแกรมทดสอบ
แก๊ส



แผนภาพที่ 1 ระบบการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน

แผนภาพที่ 1 เป็นแผนภาพแสดงระบบที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ประกอบไปด้วย อุปกรณ์ดังต่อไปนี้ ถึงแก๊สไฮโดรเจน ถึงอากาศแห้ง เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส แคมเบอร์ทดสอบแก๊ส พิโคแอมมิเตอร์ ฮีทเตอร์ควบคุมอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์และโปรแกรมควบคุมกระบวนการทดสอบแก๊ส ระหว่างกระบวนการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน อากาศแห้งและแก๊สไฮโดรเจนจะถูกส่งผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเข้าสู่ภาชนะทดสอบแก๊ส ภายในแคมเบอร์ทดสอบแก๊สจะประกอบไปด้วยหลอดนิกลี-โครเมียม เพื่อให้ความร้อนสำหรับการปรับค่าอุณหภูมิดำเนินการ (200-350°C) การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์สามารถวัดได้โดยเครื่องพิโคแอมมิเตอร์ ซึ่งจะส่งเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ตามลำดับ



แผนภาพที่ 2 ระบบการตรวจวัดเอทานอล

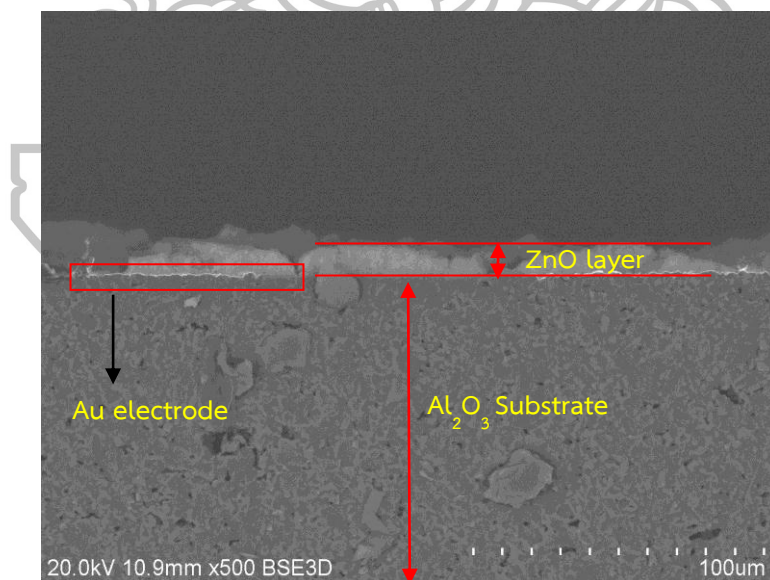
แผนภาพที่ 2 เป็นแผนภาพแสดงระบบที่ใช้ในการตรวจวัดเอทานอล ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้ ภาชนะบรรจุเอทานอล ถึงอากาศแห้ง เครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส แคมเบอร์ทดสอบแก๊ส พิโคแอมมิเตอร์ ฮีตเตอร์ควบคุมอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์และโปรแกรมควบคุมกระบวนการทดสอบแก๊ส สำหรับขั้นตอนการตรวจวัดเอทานอล อากาศแห้งจะถูกส่งผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเข้าสู่ภาชนะบรรจุเอทานอล หลังจากนั้น เอทานอลจะถูกส่งผ่านทางสายส่งแก๊สเข้าสู่แคมเบอร์ทดสอบแก๊ส ที่ภายในประกอบไปด้วยลวดนิกเกิล-โครเมียม เพื่อให้ความร้อนสำหรับการปรับค่าอุณหภูมิดำเนินการ (200-350 °C) เช่นเดียวกันกับกระบวนการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของแก๊สเซนเซอร์สามารถวัดได้โดยเครื่องพิโคแอมมิเตอร์ ซึ่งจะส่งเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผลลัพธ์ออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ตามลำดับ

บทที่ 4

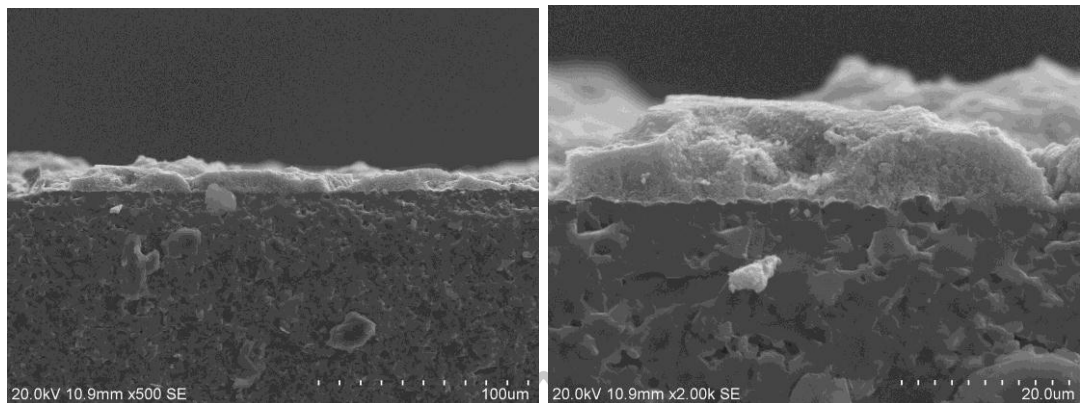
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาค่าความหนาของฟิล์มเซนเซอร์

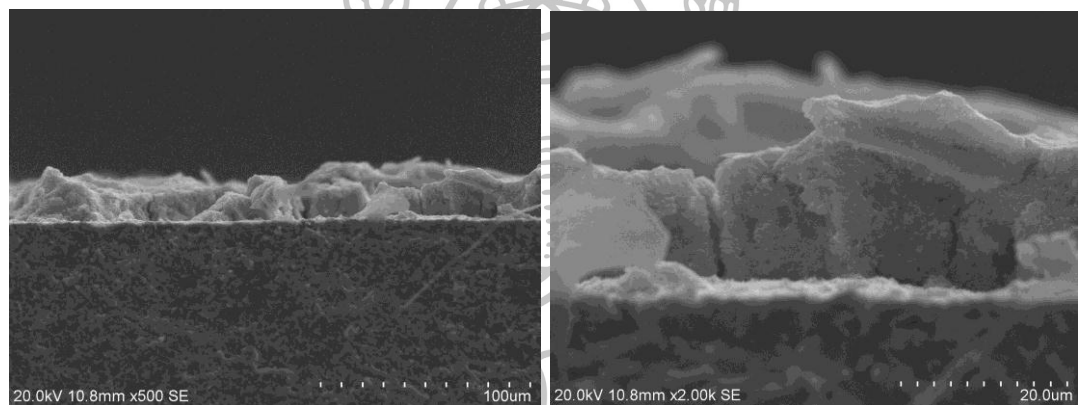
ภายหลังจากการเตรียมฟิล์มเซนเซอร์ผู้วิจัยได้นำเซนเซอร์ที่เตรียมได้มาศึกษาหาความหนาของชั้นฟิล์มที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (scanning electron microscope: SEM) ในการถ่ายภาพภาคตัดขวางของเซนเซอร์ โดยองค์ประกอบของเซนเซอร์ที่เตรียมได้แสดงดังภาพที่ 11 ซึ่งจะประกอบไปด้วยชั้นซับสเตรตอะลูมินา (Al_2O_3 substrate layer) อยู่บริเวณด้านล่างของภาพ สำหรับในบริเวณด้านบนของภาพเป็นชั้นของฟิล์มซิงก์ออกไซด์ (ZnO layer) ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มประมาณ 11 ไมโครเมตร และสุดท้ายเป็นชั้นของอิเล็กโทรดที่ทำจากทอง (Au electrode layer) อยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้นฟิล์มเซนเซอร์กับชั้นซับสเตรตอะลูมินา ในชั้นนี้มีความหนาประมาณ 0.75 ไมโครเมตร จากการวิเคราะห์เพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์ม พบว่าความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนครั้งของการสปินโคตติงเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังภาพที่ 12



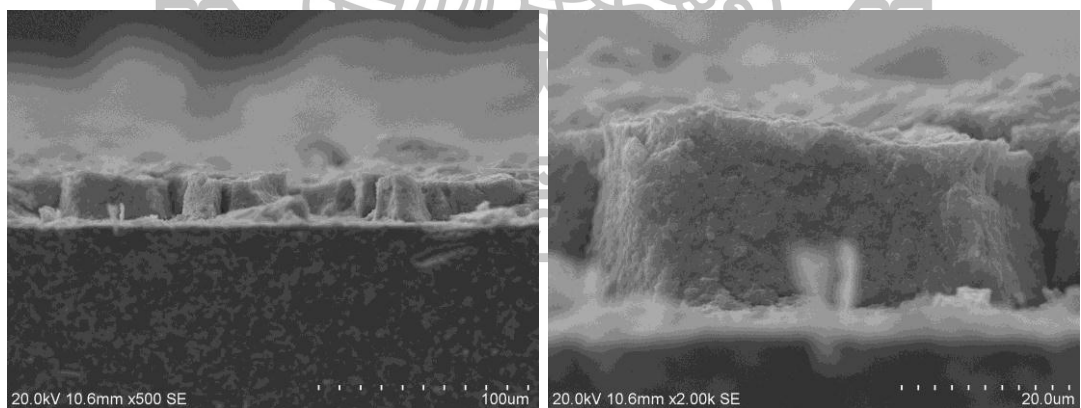
ภาพที่ 11 ภาคตัดขวางและองค์ประกอบของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 12 ภาคตัดขวางของเซนเซอร์ ที่ความหนาของชั้นฟิล์มค่าต่าง ๆ

(ก) ภาคตัดขวางของเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากการสปินโคตติง 1 ครั้ง (11 ไมโครเมตร)

(ข) ภาคตัดขวางของเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากการสปินโคตติง 2 ครั้ง (21 ไมโครเมตร)

(ค) ภาคตัดขวางของเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากการสปินโคตติง 3 ครั้ง (26 ไมโครเมตร)

ภาพที่ 12 (ก) (ข) และ (ค) แสดงภาคตัดขวางของเซนเซอร์ที่เตรียมจากการสปินโคตติง 1, 2 และ 3 ครั้ง ตามลำดับ ภาพทางด้านซ้ายมือได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 20kv กำลังขยาย x500 เท่า สเกล 100 μm สำหรับภาพทางด้านขวามือได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน 20kv กำลังขยาย x2000 เท่า สเกล 20 μm จากการวิเคราะห์ลักษณะของชั้นฟิล์มพบว่า เซนเซอร์ที่เตรียมจากการสปินโคตติง 1 ครั้ง ชั้นฟิล์มค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ เนื้อฟิล์มแนบชิดติดกัน สำหรับเซนเซอร์ที่เตรียมจากการสปินโคตติง 2 ครั้ง พบว่า ชั้นของฟิล์มบางบริเวณเริ่มเกิดการแยกออกจากกันของเนื้อฟิล์ม และพบว่าชั้นฟิล์มจะมีการแยกออกจากกันของเนื้อฟิล์มเพิ่มมากขึ้นในเซนเซอร์ที่เตรียมได้จากการสปินโคตติง 3 ครั้ง

4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ที่เตรียมได้ที่ความหนาต่าง ๆ

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการตรวจวัดแก๊ส โดยใช้เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และเซนเซอร์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% ของเซนเซอร์ทั้ง 3 ความหนา โดยได้ทดสอบการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ที่ความเข้มข้น 1,500-5,000 ppm และเอทานอล ที่ความเข้มข้น 50-200 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200, 250, 300 และ 350 °C กำหนดให้

เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ที่เตรียมได้จากการสปินโคตติง 1, 2 และ 3 ครั้ง แทนด้วยสัญลักษณ์ PSS1, PSS2 และ PSS3 ตามลำดับ ในส่วนของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% ที่ความหนาต่าง ๆ แทนได้ด้วย 0.25SS1, 0.25SS2, 0.25SS3/ 0.50SS1, 0.50SS2, 0.50SS3/ 0.75SS1, 0.75SS2, 0.75SS3 และ 1.0SS1, 1.0SS2, 1.0SS3 ตามลำดับ

ผลการตรวจวัดแก๊สของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

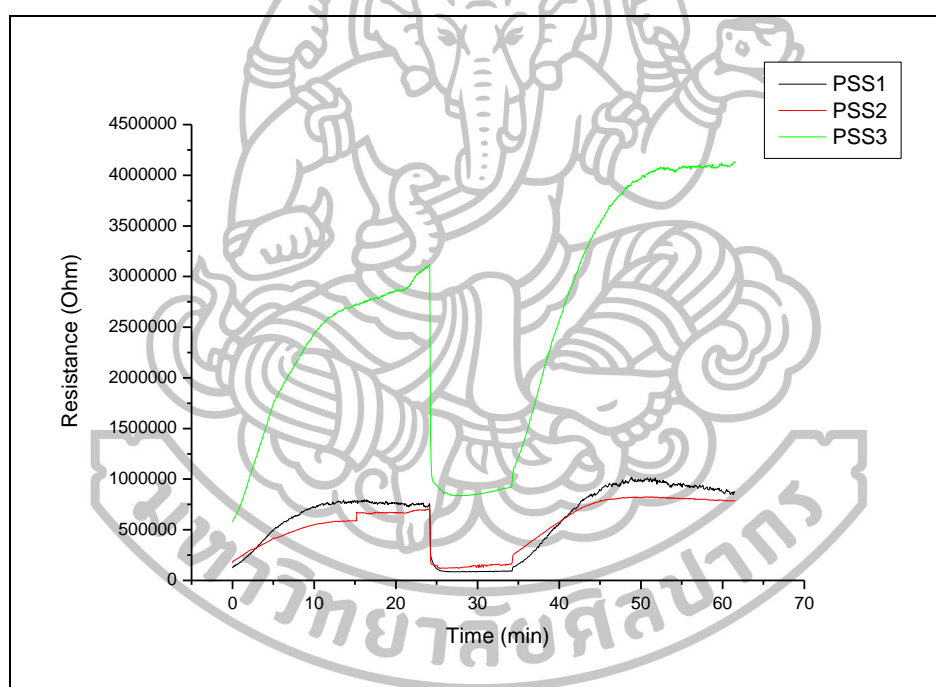
4.2.1 ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ

4.2.2 ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ และความหนาต่าง ๆ

4.2.3 ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ และความหนาต่าง ๆ

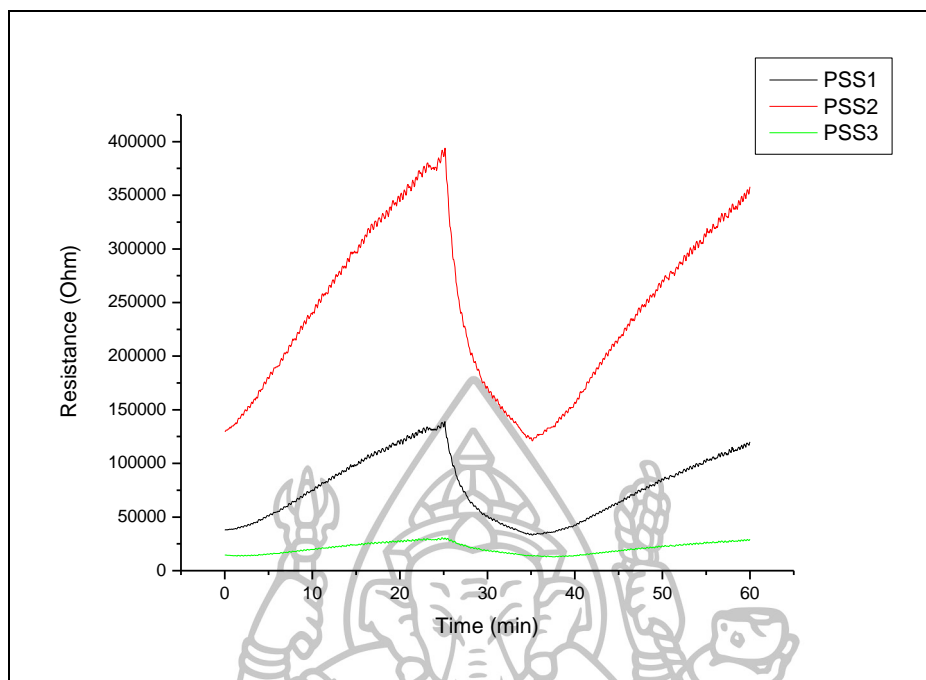
4.2.1 ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ

ผลการศึกษา พบว่า ค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ มีค่าลดลงทุก ๆ อุณหภูมิดำเนินการ ภายหลังจากการปล่อยแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลเข้าสู่ระบบ เนื่องจาก แก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลเป็นแก๊สชนิดรีดิวซิ่ง เมื่อแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออนบนผิวฟิล์ม จะเกิดการคายอิเล็กตรอนกลับสู่ชั้นฟิล์ม จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิงก์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จึงส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น หรือค่าความต้านทานของเซนเซอร์มีค่าลดลง ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ ต่อการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (5,000 ppm) ที่อุณหภูมิ 250 °C แสดงได้ดัง รูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อมีแก๊สไฮโดรเจนเข้ามาทำปฏิกิริยา (5,000 ppm) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250 °C

ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ ต่อการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ภายใต้อุณหภูมิ 350 °C แสดงได้ดัง รูปที่ 7



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อมีเอทานอลเข้ามาทำปฏิกิริยา (200 ppm) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 350°C

ในส่วนของคุณสมบัติความไวของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล แสดงได้ดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ พบว่า เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์มีค่าสมบัติความไวเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของฟิล์มลดลง และให้ค่าสูงสุด ที่อุณหภูมิ 250°C สำหรับการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน และที่อุณหภูมิ 350°C สำหรับการตรวจวัดเอทานอล โดยมีค่าสมบัติความไวเป็น 8.03 และ 4.02 ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ค่าสมบัติความไวของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิต่างกัน มีค่าแตกต่างกันนั้น เนื่องจาก อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนและอัตราการดูดซับออกซิเจนไอออนบนผิวฟิล์มเซนเซอร์

ตารางที่ 2 ค่าสมบัติความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (5,000 ppm) ของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์

เซนเซอร์	สมบัติความไว (Sensitivity)											
	อุณหภูมิดำเนินการ											
	200°C			250°C			300°C			350°C		
	ความหนา			ความหนา			ความหนา			ความหนา		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PSS	2.74	2.23	2.08	8.03	4.33	3.38	4.33	3.23	2.93	3.92	2.73	2.46

ตารางที่ 3 ค่าสภาพความไวในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์

เซนเซอร์	สภาพความไว (Sensitivity)											
	อุณหภูมิดำเนินการ											
	200 °C			250 °C			300 °C			350 °C		
	ความหนา			ความหนา			ความหนา			ความหนา		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PSS	1.78	1.42	1.15	1.81	1.67	1.42	3.59	2.67	2.22	4.02	3.14	2.12

ตัวอย่าง การคำนวณค่าสภาพความไวของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปिनโคตติงสองครั้ง ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (5,000 ppm) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200 °C แสดงได้ดังต่อไปนี้

ค่าสภาพความไวสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 21

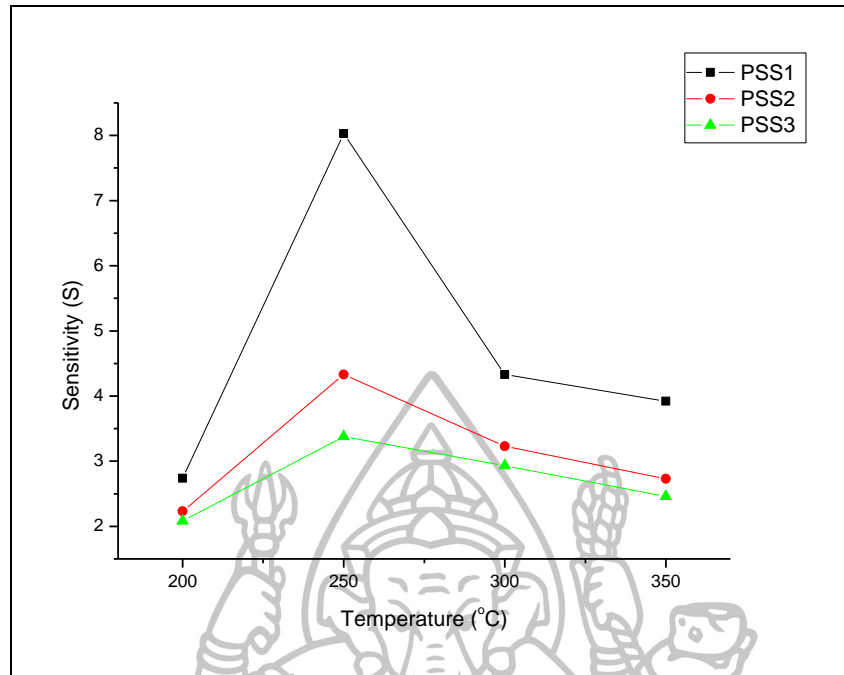
$$S_{rd}^N = \frac{R_a}{R_{rg}}$$

เมื่อ R_a คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีอากาศแห้ง ในที่นี้มีค่าประมาณ 7.39×10^5 โอห์ม

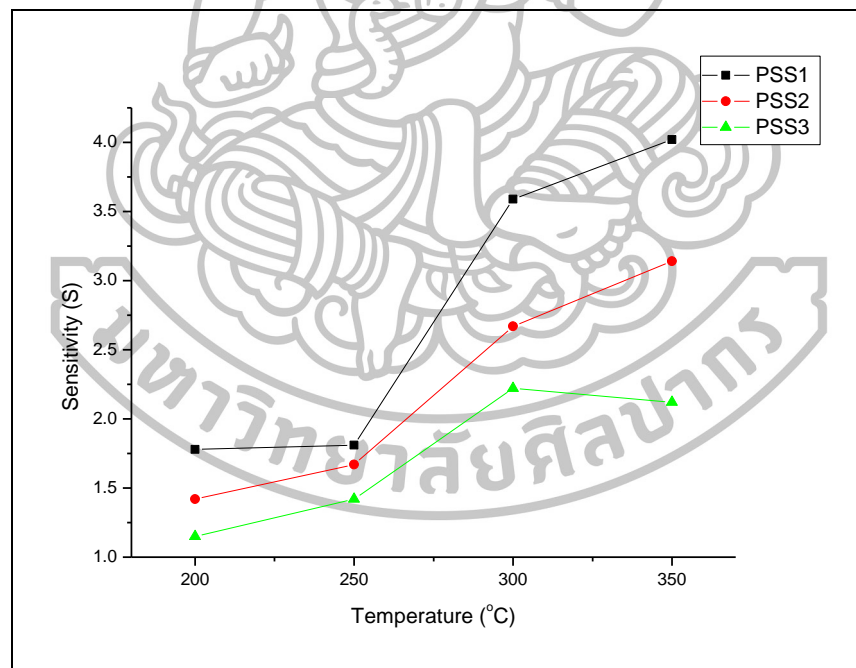
และ R_{rg} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่วัดได้ เมื่อเซนเซอร์อยู่ในบริเวณที่มีแก๊สรีดิวซิง (แก๊สไฮโดรเจน) ในที่นี้มีค่าประมาณ 3.33×10^5 โอห์ม

ดังนั้น ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนา SS2 เมื่อมีไฮโดรเจนเข้ามาทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 200 °C มีค่าประมาณ 2.23

รูปที่ 8 (ก) และ (ข) เป็นรูปที่แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล ตามลำดับ ของเซนเซอร์ PSS1, PSS2 และ PSS3 ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200-350 °C พบว่า เซนเซอร์ที่มีความหนาน้อยที่สุด (PSS1) แสดงค่าสภาพความไวต่อการตรวจวัดแก๊สทั้งสองชนิดได้ดีกว่า PSS2 และ PSS3 อย่างเห็นได้ชัดทุก ๆ อุณหภูมิดำเนินการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สแต่ละชนิดของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ความหนาของฟิล์มค่าต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิ 200-350°C

(ก) ตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (5,000 ppm)

(ข) ตรวจวัดเอทานอล (200 ppm)

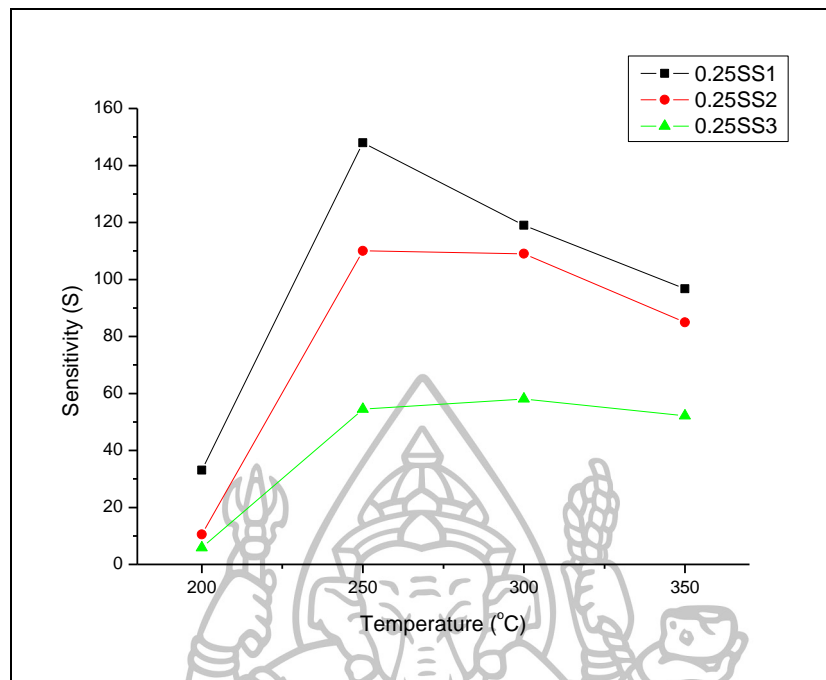
4.2.2 ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ และความหนาต่าง ๆ

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการที่จะพัฒนาเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ จึงได้เลือกศึกษาผลของความหนาของฟิล์มเซนเซอร์และปริมาณสารเจือแพลเลเดียมที่มีผลต่อความสามารถของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ในการตรวจวัดแก๊ส โดยจะทดสอบการตรวจวัดแก๊สโดยใช้ฟิล์มเซนเซอร์ทั้งหมด 3 ความหนา และใช้เซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์ เพื่อหาปริมาณสารเจือแพลเลเดียมและความหนาของฟิล์มเซนเซอร์ที่เหมาะสม

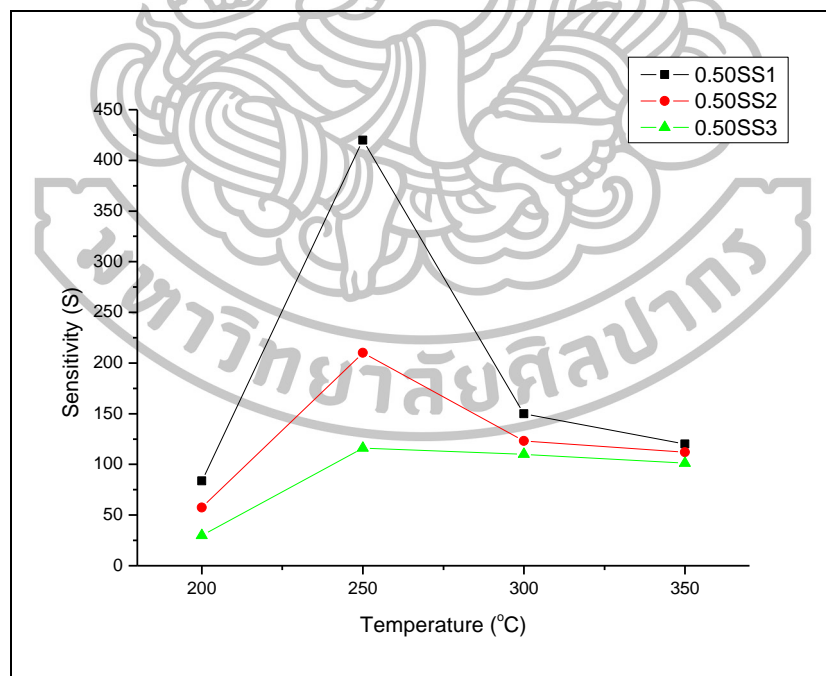
ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% ที่ความหนาต่าง ๆ สำหรับการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 9-12 จากการวิเคราะห์ผลในส่วนของคุณค่าความไวของเซนเซอร์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25 mol% พบว่า เซนเซอร์ที่มีความหนาน้อยที่สุด (0.25SS1) แสดงค่าสภาพความไวได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 0.25SS2 และ 0.25SS3 และมีค่าสภาพความไวต่อแก๊สสูงสุด ที่อุณหภูมิ 250°C เช่นเดียวกันกับ เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% อีกทั้ง เมื่อพิจารณาปริมาณสารเจือแพลเลเดียมต่อสภาพความไวของเซนเซอร์ พบว่า เซนเซอร์ที่มีการเจือแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% แสดงค่าสภาพความไวได้สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณอื่น ๆ โดยให้ค่าสภาพความไวสูงถึง 3,080 โดยใช้เวลาในการตอบสนองเท่ากับ 56.9 วินาที สังเกตได้ว่าการเติมสารเจือควรเติมในปริมาณที่เหมาะสม ถ้าเจือสารในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลเสียได้ เช่นเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดสอบแก๊สไฮโดรเจนของฟิล์มเซนเซอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.25SS1, 0.25SS2 และ 0.25SS3 ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ที่ความเข้มข้น 5,000 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200-350°C จากรูปแสดงให้เห็นว่า 0.25SS1 แสดงค่าสภาพความไวที่ดีกว่า 0.25SS2 และ 0.25SS3 ทุกอุณหภูมิดำเนินการ โดยค่าสภาพความไวของ 0.25SS1 ที่อุณหภูมิ 200, 250, 300 และ 350°C มีค่าเป็น 33.1, 148, 119 และ 96.7 ตามลำดับ ซึ่งคล้ายคลึงกับผลการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ที่ความเข้มข้น 5,000 ppm ของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%

รูปที่ 10 แสดงค่าสภาพความไวของ 0.50SS1, 0.50SS2 และ 0.50SS3 ค่าสภาพความไวของ 0.50SS1 ภายใต้อุณหภูมิ 200, 250, 300 และ 350°C มีค่าดังต่อไปนี้ 83.3, 420, 150 และ 120 ตามลำดับ

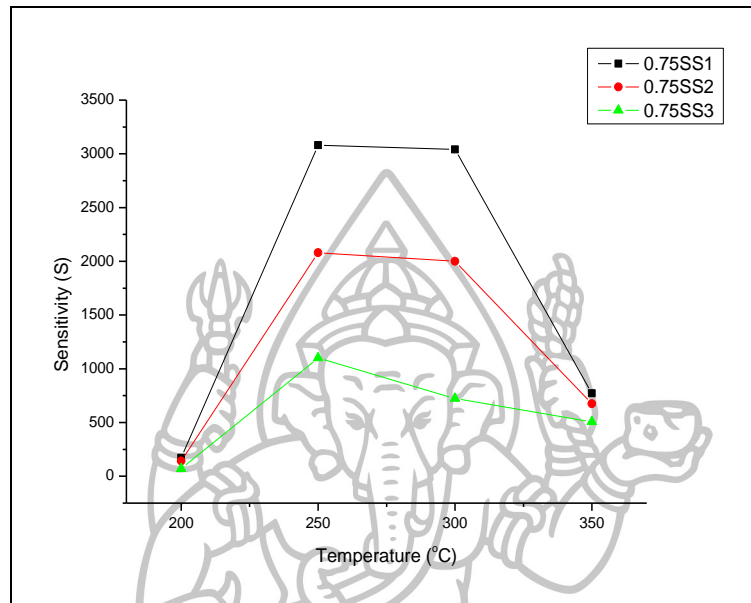


รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.25SS1, 0.25SS2 และ 0.25SS3 ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 200-350°C

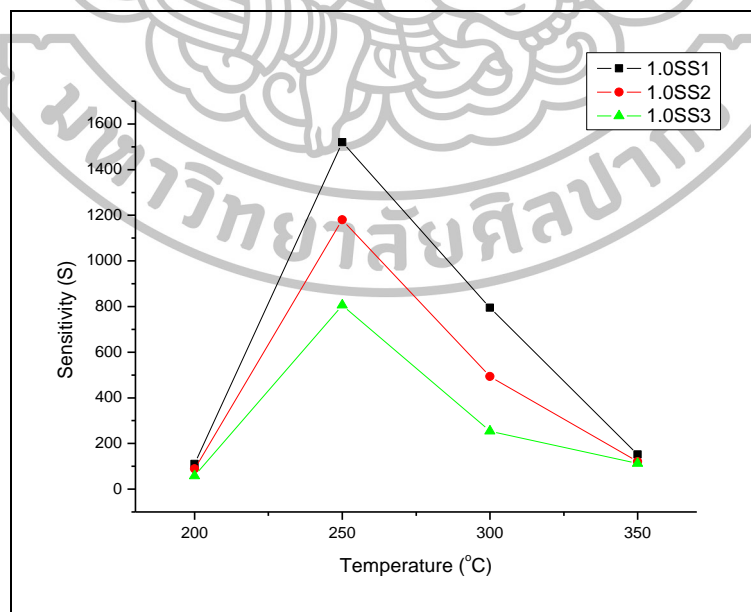


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.50SS1, 0.50SS2 และ 0.50SS3 ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 200-350°C

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.75SS1, 0.75SS2 และ 0.75SS3 โดยค่าสภาพความไวของ 0.75SS1 ที่ดีที่สุดแต่ละอุณหภูมิดำเนินการ (200-350°C) มีค่าเท่ากับ 172, 3080, 3040 และ 771 ตามลำดับ



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.75SS1, 0.75SS2 และ 0.75SS3 ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 200-350°C



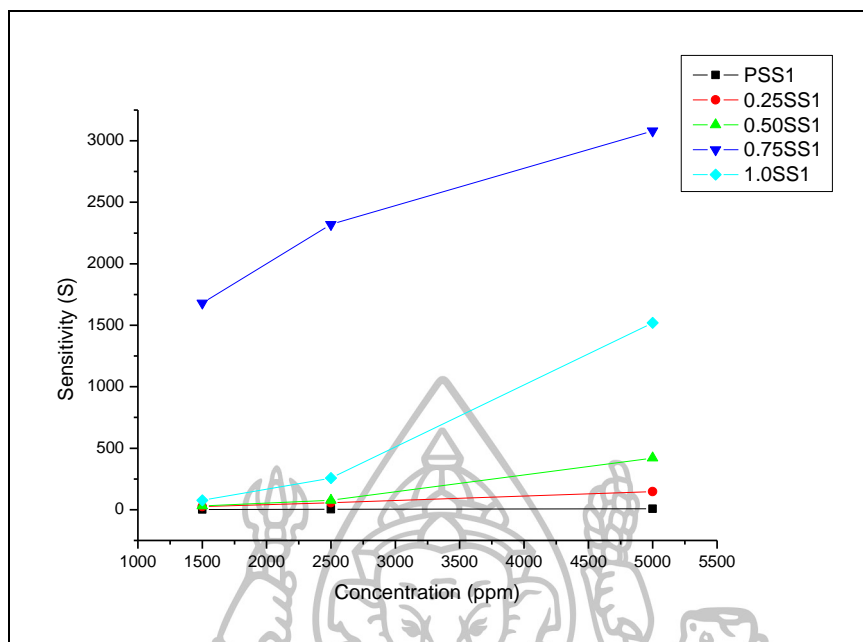
รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 1.0SS1, 1.0SS2 และ 1.0SS3 ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 200-350°C

รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 1.OSS1, 1.OSS2 และ 1.OSS3 ซึ่ง 1.OSS1 เป็นเซนเซอร์ที่แสดงค่าสภาพความไวสูงกว่าเซนเซอร์ที่ความหนาอื่น ๆ ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ (200-350°C) โดยมีค่าสภาพความไวเท่ากับ 110, 1520, 795 และ 152 ตามลำดับ

นอกเหนือจากที่ได้กล่าวมาแล้ว ผู้วิจัยได้พิจารณาผลของปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนต่อค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ โดยได้รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ที่ความหนาที่น้อยที่สุด (ได้จากการสปินโคตติง 1 ครั้ง) ไว้ในตารางที่ 4 พบว่า ค่าสภาพความไวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความไวที่ความเข้มข้นของแก๊สค่าต่าง ๆ (1,500-5,000 ppm) แสดงดังรูปที่ 13

ตารางที่ 4 ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ PSS1, 0.25SS1, 0.50SS1, 0.75SS1 และ 1.OSS1 ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C

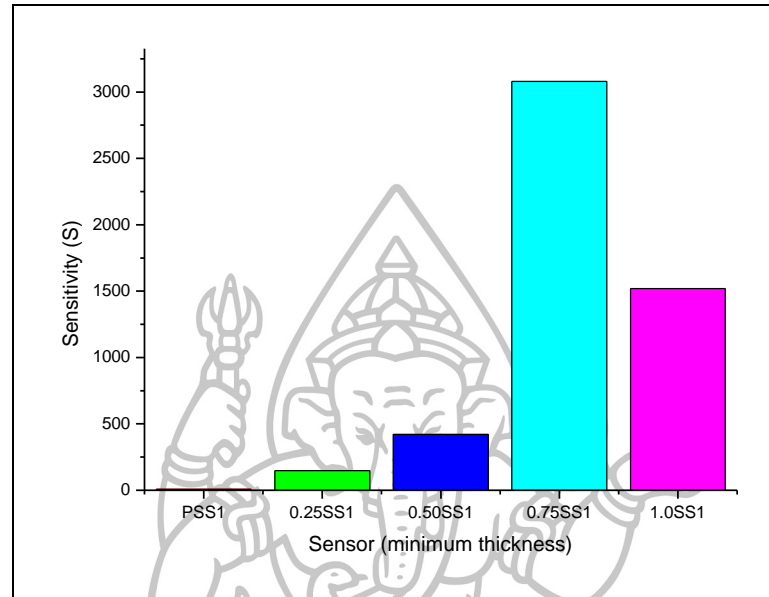
เซนเซอร์	สภาพความไว (Sensitivity)		
	อุณหภูมิ 250 °C		
	ตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน		
	ความเข้มข้นของแก๊ส (ppm)		
	5000	2500	1500
PSS1	8.03	3.04	2.36
0.25SS1	148	56.3	25.5
0.50SS1	420	77.3	30.5
0.75SS1	3080	2320	1680
1.OSS1	1520	257	76.9



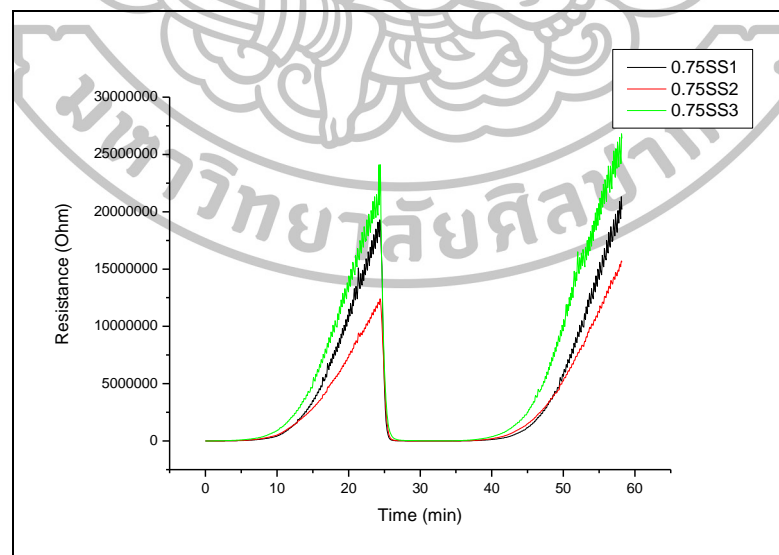
รูปที่ 13 สภาพความไวของเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด ต่อการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนในช่วงปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 1,500-5,000 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C

จากผลการทดลอง การศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ และความหนาต่าง ๆ พบว่า เซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด มีความสามารถในการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มค่าต่าง ๆ อย่างเห็นได้ชัด โดยให้ค่าสภาพความไวสูงสุดที่อุณหภูมิดำเนินการ 250°C ผู้วิจัยจึงได้รวบรวมค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C ให้แสดงออกมาอยู่ในรูปแผนภูมิที่ 1 จากแผนภูมิดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณสารเจือแพลเลเดียมที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน คือ 0.75 mol% โดยเซนเซอร์ดังกล่าว แสดงค่าสภาพความไวได้ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์

ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปินโคตติง
หนึ่งครั้ง ต่อการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น 5,000 ppm ภายใต้อุณหภูมิ 250°C แสดงได้
ดังรูปที่ 14



แผนภูมิที่ 1 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด ที่มี
การเจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (5,000 ppm)
ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C



รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมใน
ปริมาณ 0.75 mol% ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อมีแก๊สไฮโดรเจนเข้ามาทำปฏิกิริยา (5,000
ppm) ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 250°C

4.2.3 ผลการศึกษาค่าสภาพความไวในการตรวจวัดเอทานอลของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์-ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ และความหนาต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้ได้ทำการพิจารณาค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น หลังจากการนำไปทดสอบไอเอทานอล โดยรูปที่ 15-19 แสดงค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200, 250, 300 และ 350°C ที่ความหนาต่าง ๆ จากการวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละรูป พบว่า เซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด แสดงค่าสภาพความไวได้ดีที่สุดทุก ๆ อุณหภูมิดำเนินการ และให้ค่าสภาพความไวในการตรวจวัดเอทานอลดีที่สุด ที่อุณหภูมิ 350°C โดยเซนเซอร์ที่ให้ค่าสภาพความไวสูงสุดในการตรวจวัดเอทานอล คือเซนเซอร์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ในปริมาณ 0.75 mol% ที่อุณหภูมิ 350°C โดยมีค่าสภาพความไวเท่ากับ 11 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อเอทานอลประมาณ 3 นาที

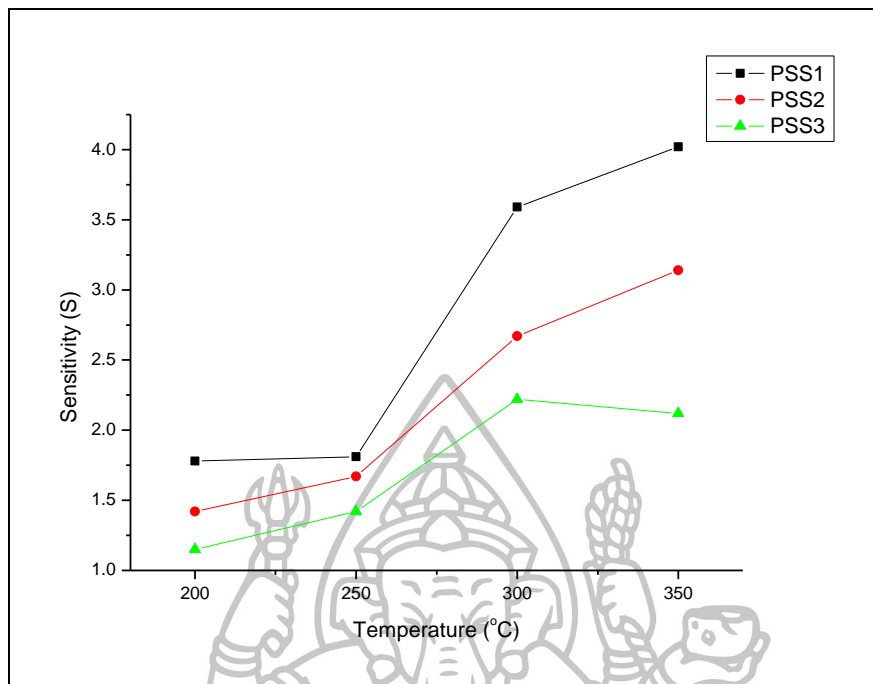
รูปที่ 15 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ PSS1, PSS2 และ PSS3 ในการตรวจวัดเอทานอล ที่ความเข้มข้น 200 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200-350°C จากรูปแสดงให้เห็นว่า PSS1 แสดงค่าสภาพความไวที่ดีกว่า PSS2 และ PSS3 ทุกอุณหภูมิดำเนินการ โดยค่าสภาพความไวของ PSS1 ที่อุณหภูมิ 200, 250, 300 และ 350°C มีค่าเป็น 1.78, 1.81, 3.59 และ 4.02 ตามลำดับ เช่นเดียวกับกับผลการตรวจวัดเอทานอล ที่ความเข้มข้น 200 ppm ของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.50, 0.75 และ 1.0 mol%

รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.25SS1, 0.25SS2 และ 0.25SS3 ค่าสภาพความไวของ 0.25SS1 ภายใต้อุณหภูมิ 200, 250, 300 และ 350°C มีค่าดังต่อไปนี้ 1.78, 2.27, 4.25 และ 5.71 ตามลำดับ

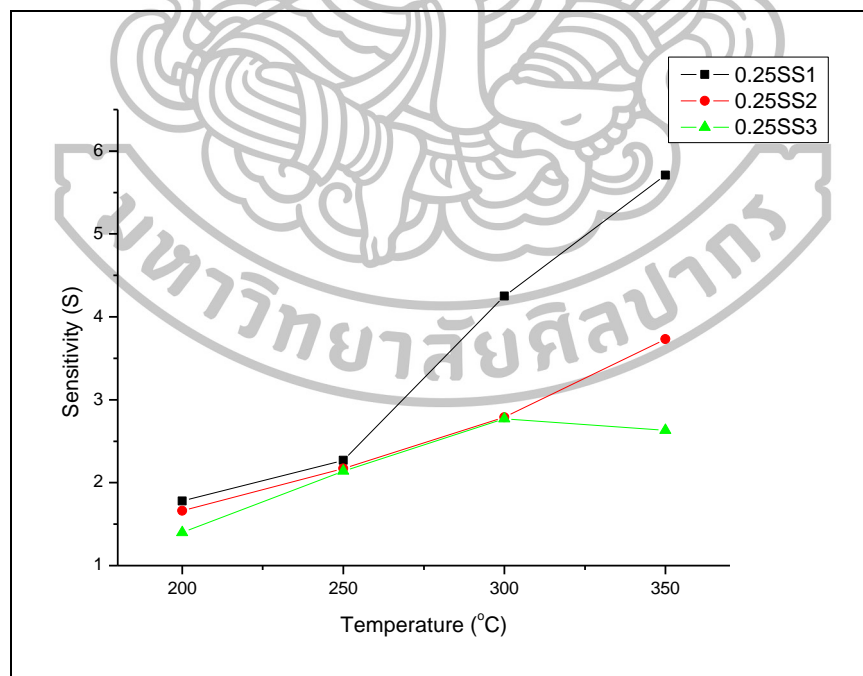
รูปที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.50SS1, 0.50SS2 และ 0.50SS3 ค่าสภาพความไวของ 0.50SS1 ภายใต้อุณหภูมิ 200, 250, 300 และ 350°C มีค่าดังต่อไปนี้ 1.80, 2.85, 5.46 และ 7.19 ตามลำดับ

รูปที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.75SS1, 0.75SS2 และ 0.75SS3 โดยค่าสภาพความไวของ 0.75SS1 ที่ดีที่สุดแต่ละอุณหภูมิดำเนินการ (200-350°C) มีค่าเท่ากับ 3.40, 4.94, 7.98 และ 11.0 ตามลำดับ

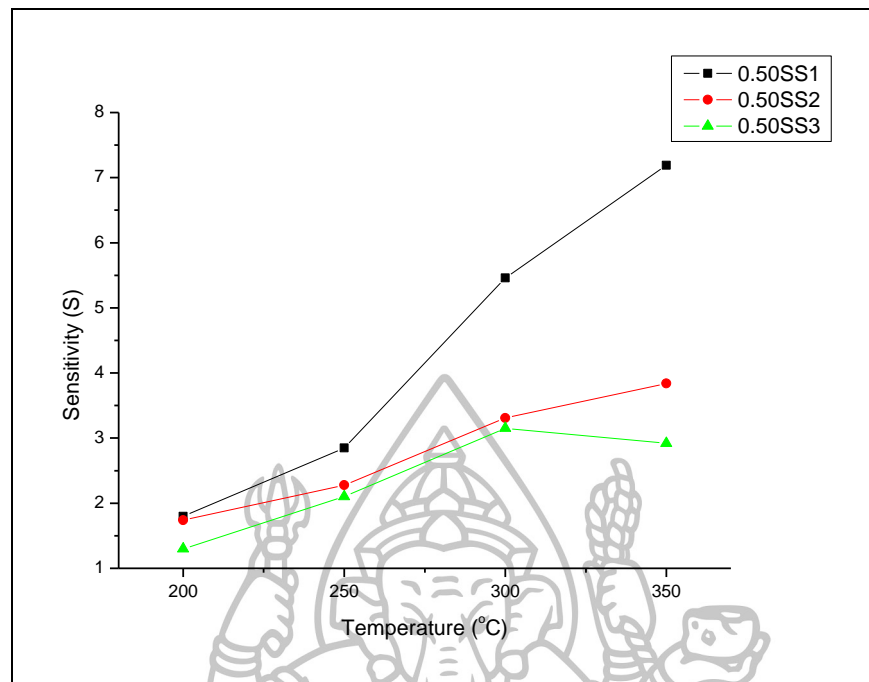
รูปที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 1.0SS1, 1.0SS2 และ 1.0SS3 ซึ่ง 1.0SS1 เป็นเซนเซอร์ที่แสดงค่าสภาพความไวสูงกว่าเซนเซอร์ที่มีความหนาอื่น ๆ ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ (200-350°C) โดยมีค่าสภาพความไวเท่ากับ 2.09, 4.27, 5.56 และ 10.0 ตามลำดับ



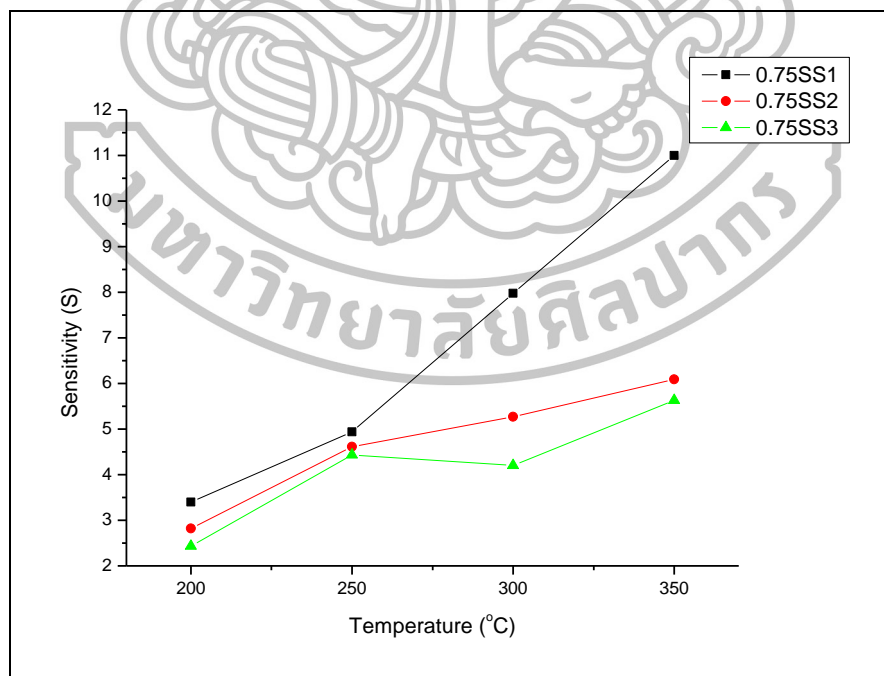
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ PSS1, PSS2 และ PSS3 ในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C



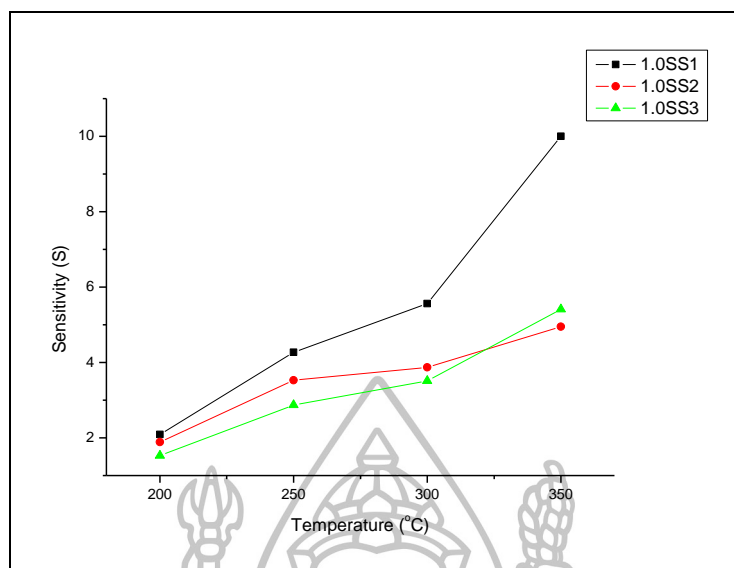
รูปที่ 16 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.25SS1, 0.25SS2 และ 0.25SS3 ในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.50SS1, 0.50SS2 และ 0.50SS3 ในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 0.75SS1, 0.75SS2 และ 0.75SS3 ในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350°C

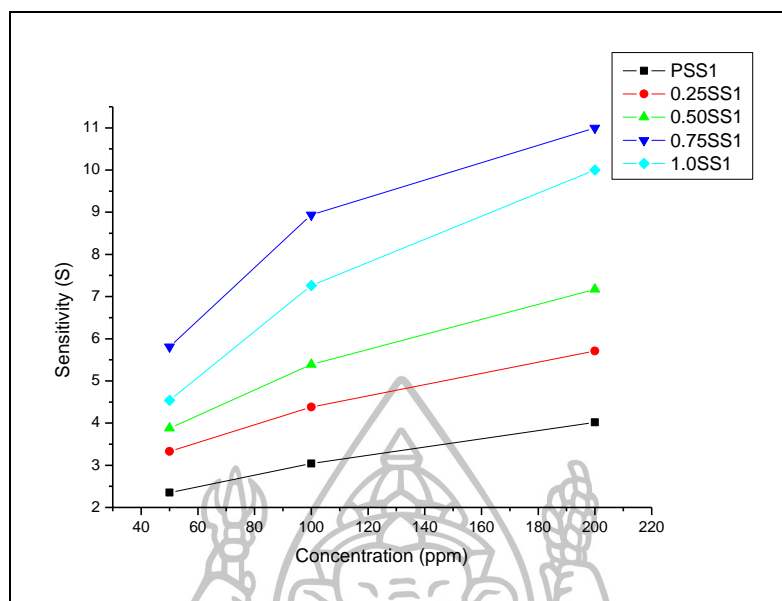


รูปที่ 19 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของ 1.0SS1, 1.0SS2 และ 1.0SS3 ในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ที่อุณหภูมิ 200-350 °C

รูปที่ 20 แสดงค่าสภาพความไวในการตรวจวัดเอทานอลของเซนเซอร์แต่ละตัวที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการทดสอบเอทานอลในช่วงความเข้มข้น 50-200 ppm ที่อุณหภูมิ 350 °C พบว่าเซนเซอร์จะมีค่าสภาพความไวเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้น แสดงข้อมูลเชิงตัวเลขได้ดังตารางที่ 5 สามารถสันนิษฐานได้ว่า เมื่อปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดอันตรกิริยาในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนบริเวณผิวฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เซนเซอร์มีค่าสภาพความไวที่สูงขึ้น

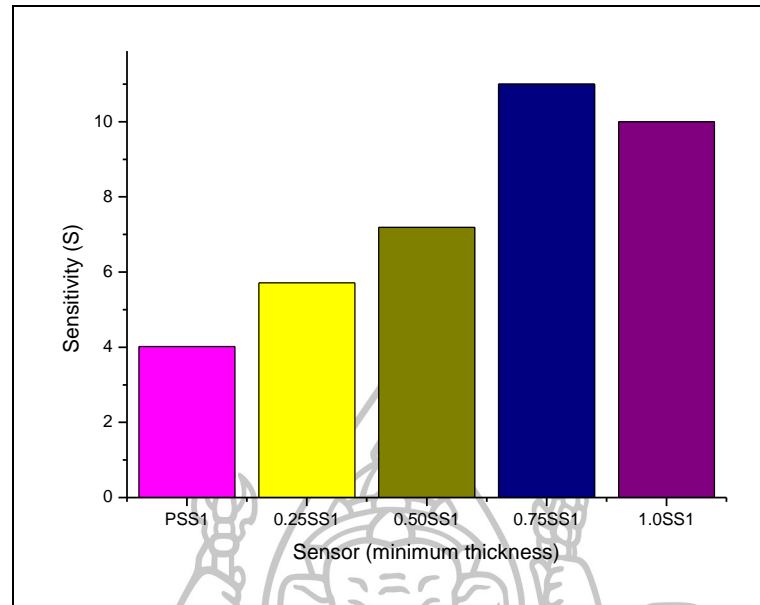
ตารางที่ 5 ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ PSS1, 0.25SS1, 0.50SS1, 0.75SS1 และ 1.0SS1 ในการตรวจวัดเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 350 °C

เซนเซอร์	สภาพความไว (Sensitivity)		
	อุณหภูมิ 350 °C		
	ตรวจวัดเอทานอล		
	ความเข้มข้นของแก๊ส (ppm)		
	200	100	50
PSS1	4.02	3.04	2.35
0.25SS1	5.71	4.38	3.33
0.50SS1	7.19	5.39	3.88
0.75SS1	11.0	8.94	5.81
1.0SS1	10.0	7.26	4.54



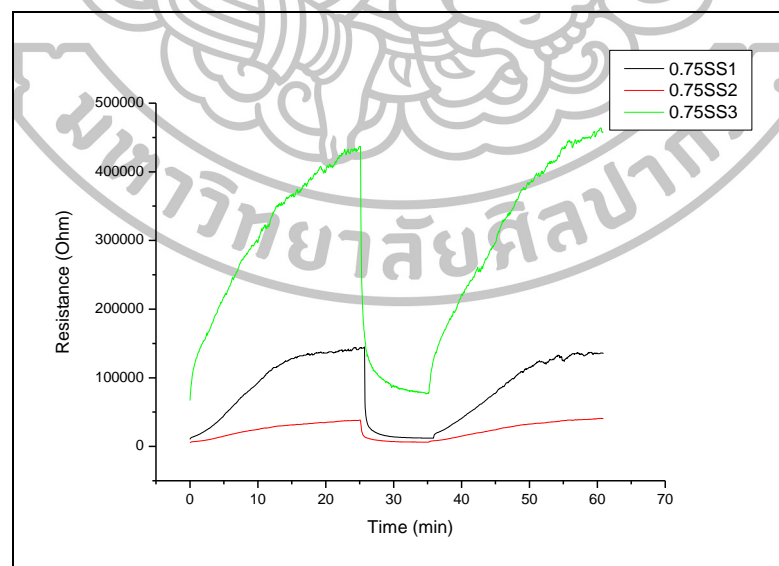
รูปที่ 20 สภาพความไวของเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด ต่อการตรวจวัดเอทานอล ในช่วงปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 50-200 ppm ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 350°C

เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ที่ความหนาของฟิล์มที่น้อยที่สุดได้อย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงได้รวบรวมค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ที่มีความหนาน้อยที่สุด ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 350°C ที่ได้จากการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ให้แสดงออกมาอยู่ในรูปของแผนภูมิที่ 2 จากแผนภูมิดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเจือแพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% สามารถปรับปรุงและพัฒนาเซนเซอร์ เพื่อใช้ในการตรวจวัดเอทานอลได้ดีที่สุด โดยเซนเซอร์ดังกล่าว แสดงค่าสภาพความไวได้สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ไม่มีการเจือด้วยแพลเลเดียม แต่สภาพความไวที่เซนเซอร์แสดงออกมานั้น ยังไม่แตกต่างจากเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์เท่าใดนัก



แผนภูมิที่ 2 การเปรียบเทียบค่าสภาพความไวของเซนเซอร์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด ที่มี การเจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ ในการตรวจวัดเอทานอล (200 ppm) ภายใต้ อุณหภูมิดำเนินการ 350°C

ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการสปินโคตติง หนึ่งครั้ง ต่อการตรวจวัดเอทานอล ความเข้มข้น 200 ppm ที่อุณหภูมิ 350°C แสดงได้ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียมใน ปริมาณ 0.75 mol% ที่ความหนาต่าง ๆ เมื่อมีเอทานอลเข้ามาทำปฏิกิริยา (200 ppm) ภายใต้ อุณหภูมิดำเนินการ 350°C

บทที่ 5

สรุป และอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาแก๊สเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ โดยจะพิจารณาตัวแปรที่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการตรวจวัดแก๊สของเซนเซอร์ 2 ตัวแปร คือ ความหนาของชั้นฟิล์มเซนเซอร์ และปริมาณสารเจือปนพลเลเดียม โดยใช้เทคนิคสปินโคตติงในการเตรียมฟิล์มเซนเซอร์ จากอนุภาคซิงก์ออกไซด์และอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0 mol% ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ในส่วนของความหนาของชั้นฟิล์มทั้ง 3 ความหนา ควบคุมจากจำนวนรอบของการสปินโคตติง คือ สปินโคตติง 1, 2 และ 3 รอบ ตามลำดับ ภายหลังจากการเตรียมฟิล์มเซนเซอร์ ได้นำเซนเซอร์ไปทดสอบแก๊ส 2 ชนิด คือ ไฮโดรเจน และเอทานอล ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200, 250, 300 และ 350°C จากการศึกษาค่าของผลของฟิล์มเซนเซอร์ พบว่า เซนเซอร์ที่มีความหนาของฟิล์มน้อยที่สุดให้ค่าสภาพความไวสูงที่สุด ทุกอุณหภูมิดำเนินการและทุกความเข้มข้นของแก๊ส ค่าสภาพความไวที่ได้จากการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลของเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยพลเลเดียมในปริมาณต่าง ๆ มีค่าสูงกว่าเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือพลเลเดียมทุก ๆ อุณหภูมิดำเนินการ อีกทั้ง ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มขึ้นจาก 0.25-0.75 mol% และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารเจือมีค่าเป็น 1.0 mol% โดยปริมาณสารเจือพลเลเดียมที่เหมาะสมที่ส่งผลให้เซนเซอร์มีค่าสภาพความไวที่ดีที่สุดคือ 0.75 mol% จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า เซนเซอร์ที่เจือด้วยพลเลเดียมในปริมาณนี้จะแสดงค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์และที่เจือด้วยพลเลเดียมในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.0 mol% ทุกๆ อุณหภูมิดำเนินการ นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสภาพความไวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความเข้มข้นของแก๊สสูงขึ้น โดยเซนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยพลเลเดียมในปริมาณ 0.75 mol% ที่มี ความหนาของชั้นฟิล์มน้อยที่สุด มีค่าการตอบสนองต่อแก๊สได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 250°C สำหรับการตรวจวัดไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น 5,000 ppm โดยมีค่าสภาพความไวเป็น 3080 และใช้เวลาในการตอบสนองเท่ากับ 56.9 วินาที และที่ 350°C สำหรับการตรวจวัดเอทานอลที่ความเข้มข้น 200 ppm มีค่าสภาพความไวเป็น 11 และใช้เวลาในการตอบสนองประมาณ 3 นาที

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากสรุปผลการวิจัยมีประเด็นที่น่าสนใจที่นำมาอภิปรายได้ดังนี้

1. จากสรุปผลการวิจัยในหัวข้อเรื่องผลการพิจารณาผลของความหนาของฟิล์มเซโนเซอร์ ที่ส่งผลต่อค่าสภาพความไวในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอล พบว่า ฟิล์มเซโนเซอร์ที่มีความหนาที่น้อยที่สุด (11 ไมโครเมตร) ให้ค่าสภาพความไวสูงสุด ในการตรวจวัดแก๊สทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J.F. Chang และคณะ [43] ที่พบว่า เซโนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียม ให้ค่าสภาพความไว (S%) ต่อการตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด เท่ากับ 61.6% เมื่อความหนาของฟิล์มเซโนเซอร์มีค่าเป็น 65 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความหนาของชั้นฟิล์มที่น้อยที่สุด ที่ผู้วิจัยได้ใช้ในการทดสอบแก๊สดังกล่าว
2. จากผลการวิจัยในเรื่องปริมาณสารเจือแพลเลเดียมต่อค่าสภาพความไวของเซโนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ พบว่า การเจือแพลเลเดียมในปริมาณที่เหมาะสม สามารถเพิ่มค่าสภาพความไวของเซโนเซอร์ในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนและเอทานอลได้จริง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสภาพความไวของเซโนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยแพลเลเดียม นับว่าเป็นผลลัพธ์ที่ประสบความสำเร็จตามที่คาดหวังไว้ โดยผลลัพธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือ การเจือตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะสามารถเพิ่มค่าสภาพความไวให้กับเซโนเซอร์ได้ เนื่องมาจาก ผลของการเกิดสปินโอเวอร์และผลของระดับพลังงานเฟอร์มี บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะออกไซด์กับตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ C. Liewhiran และคณะ [55] ที่ได้ศึกษาผลของการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้ฟิล์มทินไดออกไซด์ และฟิล์มทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแพลเลเดียม ในปริมาณ 0.2-2 wt% ซึ่งพบว่าฟิล์มที่เจือด้วยแพลเลเดียมในปริมาณ 0.2 wt% มีค่าการตอบสนองต่อไฮโดรเจนได้สูง โดยคณะผู้วิจัยได้ให้เหตุผลว่า การที่ฟิล์ม 0.2wt%Pd/SnO₂ มีค่าการตอบสนองที่ดี สามารถอธิบายได้จากการเกิดสปินโอเวอร์เนื่องมาจากอนุภาคของแพลเลเดียม ที่มีการกระจายตัวได้ดีบนทินไดออกไซด์ ซึ่งอาจจะมีความเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองของฟิล์มที่เตรียมได้ที่มีความเข้มข้นสารเจือค่าต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กับขนาดของแพลเลเดียม โดยสถานะออกซิเดชันของแพลเลเดียมจะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาเอง หากปริมาณสารเจือแพลเลเดียมมีค่าเพิ่มขึ้น แพลเลเดียมจะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกลไกในการสปินโอเวอร์ลดลง ค่าการตอบสนองของฟิล์มต่อแก๊สไฮโดรเจนจึงลดลง
3. ผลของการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200-350°C เซโนเซอร์มีค่าสภาพความไวที่ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200°C และมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อไฮโดรเจนสูงสุดที่อุณหภูมิ 250°C ซึ่งเมื่ออุณหภูมิดำเนินการมีค่าสูงกว่า 250°C พบว่า ค่าสภาพความไวของไฮโดรเจนมีค่าลดลง โดยผลลัพธ์ดังกล่าวได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ J X Wang และคณะ [29] ที่ได้ตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนด้วยเซโนเซอร์ซิงก์ออกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิ 25-400°C ซึ่งเซโนเซอร์ดังกล่าว มีค่าสภาพ

ความไวเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิดำเนินการมีค่าตั้งแต่ 25-250°C และจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงกว่า 250°C

4. ผลของการตรวจวัดเอทานอลภายใต้อุณหภูมิดำเนินการ 200-350°C เซนเซอร์มีค่าสภาพความไวในการตรวจวัดเอทานอลได้ดี เมื่อเซนเซอร์อยู่ภายใต้อุณหภูมิดำเนินการที่มีค่าสูง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jean-Jacques Delaunay และคณะ [56] ที่ใช้เซนเซอร์ซิงก์-ออกไซด์เตตระพอท ในการตรวจวัดเอทานอล ที่อุณหภูมิดำเนินการระหว่าง 200-500°C พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อเอทานอลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 200°C จนถึง 400°C และจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิ 500°C



รายการอ้างอิง

- [1] จักรพิชญ์ อัตโน และอุดม ทิพรราช. (2553). “จมูกอิเล็กทรอนิกส์ ยามเฝ้าคุณภาพอากาศ.” **วารสารสิ่งแวดล้อม** 13, 3:28-33.
- [2] ศิริพร วันพูน. (2558). **ระบบตรวจจับก๊าซอันตราย**. เข้าถึงเมื่อ 7 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก <http://thailandindustry.com/guru/view.php?id=19024§ion=9&rcount=Y>
- [3] Xiao Liu, and others. (2012). “A survey on gas sensing technology.” **Sensors** 12 (July): 9635-9665.
- [4] Lenntech. (2015). **Hydrogen**. Accessed August 7. Available from <http://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>
- [5] วิกีพีเดีย. (2558). **ไฮโดรเจน**. เข้าถึงเมื่อ 7 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%AE%E0%B9%82%E0%B8%94%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%88%E0%B8%99>
- [6] National Pollutant inventory. (2015). **Ethanol (ethyl alcohol)**. Accessed August 7. Available from <http://www.npi.gov.au/resource/ethanol-ethyl-alcohol>
- [7] สิทธิณี เสียมภักดี. (2558). **อุตสาหกรรมเอทานอลไทย ปัญหาอุปสรรค และแนวทางการส่งเสริมพัฒนา**. เข้าถึงเมื่อ 7 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก http://www.thaitapiocastarch.org/article16_th.asp
- [8] Zhong Lin Wang. (2004). “Zinc oxide nanostructure: growth, properties and applications.” **Journal of Physics: Condensed Matter** 16, 25: 829-858.
- [9] มหาวิทยาลัยนครสวรรค์. **สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม**. (2558). **ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)**. เข้าถึงเมื่อ 7 สิงหาคม. เข้าถึงได้จาก http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info_index.php?cat_id=2
- [10] Chemistry foundations and explained applications. (2015). **Palladium**. Accessed August 7. Available from <http://www.chemistryexplained.com/elements/L-P/Palladium.html>
- [11] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. (2015). **Palladium**. Accessed August 7. Available from <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Pd.html>

- [12] Alexander Vergara, and Eduard Llobet. (2012). "Sensor selection and chemo-sensory optimization: toward an adaptable chemo-sensory system." In **Bioinspired solutions to the challenges of chemical sensing**, 143-163. Edited by Ramon Huerta and Thomas Nowotny.
- [13] Supab Choopun, Niyom Hongsith, and Ekasiddh Wongrat. (2012). "Metal-oxide nanowires for gas sensors." In **Nanowires-Recent Advances**, 3-23. Edited by Xihong Peng. Croatia: InTech.
- [14] Shinde, V.R., T.P. Gujar, and C.D. Lokhande. (2007). "LPG sensing properties of ZnO films prepared by spray pyrolysis method: Effect of molarity of precursor solution." **Sensors and Actuators B** 120, 2: 551-559.
- [15] Ting-Jen Hsueh, and others. (2007). "ZnO nanowire-based CO sensors prepared on patterned ZnO:Ga/SiO₂/Si templates." **Sensors and Actuators B** 125, 2: 498-503.
- [16] Dhivya, P., A.K. Prasad, and M. Sridharan. (2014). "Magnetron sputtered nanostructured cadmium oxide films for ammonia sensing." **Journal of Solid State Chemistry** 214: 24-29.
- [17] Haoshuang Gu, Zhao Wang, and Yongming Hu. (2012). "Hydrogen gas sensors based on semiconductor oxide nanostructures." **Sensors** 12, 5: 5517-5550.
- [18] Liao, L., and others. (2007). "Size dependence of gas sensitivity of ZnO nanorods" **Journal of Physical Chemistry C** 111, 5: 1900-1903.
- [19] Ting-Jen Hsueh, and Cheng-Lieng Hsu. (2008). "Fabrication of gas sensing devices with ZnO nanostructure by the low-temperature oxidation of zinc particles." **Sensors and Actuators B** 131, 2: 572-576.
- [20] Ning Zhang, and others. (2008). "Investigation of electrical and ammonia sensing characteristics of schottky barrier diode based on a single ultra-long ZnO nanorod." **Applied Surface Science** 254, 18: 5736-5740.
- [21] Chang, J.F., and others. (2002). "The effect of thickness and operation temperature on ZnO:Al thin film CO gas sensor." **Sensors and Actuators B** 84, 2: 258-264.

- [22] Chaikarn Liewhiran, and others. (2012). "The monitoring of H₂S and SO₂ noxious gases from industrial environment with sensors based on flame-spray-made SnO₂ nanoparticles." **Engineering Journal** 16, 3: 123-134.
- [23] Camelia Matei Ghimbeu, and others. (2007). "Electrostatic spray deposited zinc oxide films for gas sensor applications." **Applied Surface Science** 253, 18: 7483-7489.
- [24] Janata, Jira. (2009). **Principles of Chemical Sensors**. 2nd ed. New York: Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- [25] Aswal, Dinesh K., and Shiv K. Gupta. (2007). **Science and Technology of Chemiresistor Gas Sensors**. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- [26] Mitra, P., A.P. Chatterjee, and H.S. Maiti. (1998). "ZnO thin film sensor." **Mater. Lett.** 35, 1-2 (April): 33-38.
- [27] Chu Xiangfeng, and others. (2005). "Gas-sensing properties of thick film based on ZnO nano-tetrapods." **Chemical Physics Letters** 401, 4-6 (January): 426-429.
- [28] Sahay, P. P., and others. (2005). "Sprayed ZnO thin films for ethanol sensor." **J. Mater. Sci.** 40, 18 (September): 4791-4793.
- [29] J X Wang, and others. (2006). "Hydrothermally grown oriented ZnO nanorod arrays for gas sensing applications." **Institute of Physics Publishing** 17: 4995-4998.
- [30] Liao, L., and others. (2007). "Size dependence of gas sensitivity of ZnO nanorods." **J. Phys. Chem. C** 111: 1900-1903.
- [31] Yuzhen Lv, and others. (2007). "Gas-sensing properties of well-crystalline ZnO nanorods grown by a simple route." **Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures** 36, 1 (January): 102-105.
- [32] Li-Jian Bie, and others. (2007). "Nanopillar ZnO gas sensor for hydrogen and ethanol." **Sensors and Actuators B: Chemical** 126, 2 (October): 604-608.
- [33] Chaikarn Liewhiran, and Sukon Phanichphant. (2007). "Influence of thickness on ethanol sensing characteristics of doctor-bladed thick film from flame-made ZnO nanoparticles." **Sensors** 7, 2: 185-201.

- [34] George Kenanakis, and others. (2007). "Ozone sensing properties of ZnO nanostructures grown by the aqueous chemical growth technique." **Sensors and Actuators B** 124, 1: 187-191.
- [35] Camelia Matei Ghimbeu, Joop Schoonman, Martine Lumbreras, and Maryam Siadat. (2007). "Electrostatic spray deposited zinc oxide films for gas sensor applications." **Applied Surface Science** 253, 18: 7483-7489.
- [36] P SAMARASEKARA, and others. (2007). "CO₂ gas sensitivity of sputtered zinc oxide thin films." **Bull. Mater. Sci.** 30, 2: 113-116.
- [37] Yu-Jin Chen, Chun-Ling Zhu, and Gang Xiao. (2008). "Ethanol sensing characteristics of ambient temperature sonochemically synthesized ZnO nanotubes." **Sensors and Actuators B: Chemical** 129, 2: 639-642.
- [38] Qi Qi, and others. (2008). "Selective acetone sensor based on dumbbell-like ZnO with rapid response and recovery." **Sensors and Actuators B: Chemical** 134, 1 (August): 166-170.
- [39] Al-Hardan, N., M.J. Abdullah, and A.A. Aziz. (2009). "The gas response enhancement from ZnO film for H₂ gas detection." **Applied Surface Science** 255, 17 (June): 7794-7797.
- [40] Dayan, N. Jayadev, and others. (1998). "Formulation and characterization of ZnO:Sb thick-film gas sensors." **Thin Solid Films** 325, 1-2: 254-258.
- [41] Rao, G.S.T., and D.T. Rao. (1999). "Gas sensitivity of ZnO based thick film sensor to NH₃ at room temperature." **Sensors and Actuators B: Chemical** 55, 2-3 (May): 166-169.
- [42] F. Paraguay D., and others. (2000). "Influence of Al, In, Cu, Fe and Sn dopants on the response of thin film ZnO gas sensor to ethanol vapour." **Thin Solid Films** 373, 1-2: 137-140.
- [43] Chang, J.F., and others. (2002). "The effects of thickness and operation temperature on ZnO:Al thin film CO gas sensor." **Sensors and Actuators B: Chemical** 84, 2-3 (May): 258-264.

- [44] Shishiyanu , Sergiu T., Teodor S. shishiyanu, and Oleg I. Lupan. (2005). "Sensing characteristics of tin-doped ZnO thin films as NO₂ gas sensor." **Sensors and Actuators B: Chemical** 107, 1 (May): 379-386.
- [45] Zhu, B.L., and others. (2006). "Influence of Sb, In and Bi dopants on the response of ZnO thick films to VOCs." **Materials Chemistry and Physics** 96, 2-3 (April): 459-465.
- [46] Gong, H., and others. (2006). "Nano-crystalline Cu-doped ZnO thin film gas sensor for CO." **Sensors and Actuators B: Chemical** 115, 1 (May): 247-251.
- [47] Mohammad, M.T., A.A. Hasim, and Al-Maamory. (2006). "Highly conductive and transparent ZnO thin films prepared by spray pyrolysis technique." **Mater. Chem. Phys.** 99, 2-3 (October): 382-387.
- [48] Rout CS, and others. (2007). "Ethanol and hydrogen sensors based on ZnO nanoparticles and nanowires." **Journal of Nanoscience and Nanotechnology** 7, 6: 1923-1929.
- [49] Lupan, O.I., S.T. Shishiyanu, and T.S. Shishiyanu. (2007). "Nitrogen oxides and ammonia sensing characteristics of SILAR deposited ZnO thin film." **Superlattices and Microstructures** 42, 1-6 (July-December): 375-378.
- [50] Sadek, A.Z., and others. (2007). "A ZnO nanorod based layered ZnO/64° YX LiNbO₃ SAW hydrogen gas sensor." **Thin Solid Films** 515: 8705-8708.
- [51] Hongsith, N., and others. (2008). "Ethanol sensor based on ZnO and Au-doped ZnO nanowires." **Ceramics International** 34, 4: 823-826.
- [52] Tamaekong, N., and others. (2009). "Sensing characteristics of flame-spray-made Pt/ZnO thick films as H₂ gas sensor." **Sensors** 9, 9: 6652-6669.
- [53] Al-zaidi, Q.G., Abdulla. M. Suhail, and Wasan R. Al-azawi. (2011). "Palladium-doped ZnO film hydrogen gas sensor." **Applied Physics Research** 3, 1: 89-99.
- [54] Anand, K., and others. (2014). "Hydrogen sensor based on grapheme/ZnO nanocomposite." **Sensors and Actuators B: Chemical** 195: 409-415.
- [55] Liewhiran, C., and others. (2013). "Ultra-sensitive H₂ sensors based on flame-spray-made Pd-loaded SnO₂ sensing." **Sensors and Actuators B** 176, 893-905.

- [56] Jean-Jacques Delaunay, Noaki Kakoiyama, and Ichiro Yamada. (2007). "Fabrication of three-dimensional network of ZnO tetrapods and its response to ethanol." *Materials Chemistry and Physics* 104, 141-145.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นางสาวจินตพร ยิ้มช้อย
ที่อยู่	18/1 หมู่ 7 ตำบลศาลเจ้าโรงทอง อำเภอวิเศษชัยชาญ จังหวัดอ่างทอง
ที่ทำงาน	-
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2556	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม
พ.ศ. 2557	ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม
ประวัติการทำงาน	-

