



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ลักษณะเฉพาะของแก๊สเซนเซอร์และเซนเซอร์ความชื้นที่เตรียมจาก
แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตที่เจือด้วยแมงกานีส
Characteristics of gas and humidity sensors based on Manganese
doped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

ชื่อนิสิต นางสาวชนิสรา ผลาวรรณ **เลขประจำตัว** 5833409723

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2561

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

หัวข้อโครงการ	ลักษณะเฉพาะของแก๊สเซนเซอร์และเซนเซอร์ความชื้นที่เตรียมจาก แคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตที่เจือด้วยแมงกานีส
ชื่อนิสิต	ชนิสรา ผลารธรรม รหัสประจำตัวนิสิต 58&3409723
ภาควิชา	ภาควิชาฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สตรีรัตน์ ไชด้ค

โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบได้ตรวจและรับชมรายงานฉบับนี้แล้ว



..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์)

..... รังสิมา ขาอภานา

..... กรรมการสอบ
(อาจารย์ ดร.รังสิมา ขาอภานา)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สตรีรัตน์ ไชด้ค)

หัวข้อโครงการ	ลักษณะเฉพาะของแก๊สเซนเซอร์และเซนเซอร์ความชื้นที่เตรียมจากแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตเจือด้วยแมงกานีส
ชื่อนิสิต	ชนิสรา ผลาวรรณ
ภาควิชา	ภาควิชาฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สตรีรัตน์ โยต์ค

บทคัดย่อ

โครงการวิทยาศาสตร์นี้ทำการศึกษาการตอบสนองต่อแก๊ส (แก๊สอะซิทีลีน แก๊สอะซิโตน และแก๊สเอทานอล) และความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบางแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตบริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 0.41 wt% -2.08 wt% ซึ่งปลูกบนแผ่นรองรับอะลูมินาและซิลิกอนด้วยวิธีการโซลเจล ผลการศึกษาพบว่าค่าการตอบสนองต่อแก๊สทั้งสามชนิดนั้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่าการตอบสนองได้ดีกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt% -2.08 wt% โดยผลการศึกษาการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่าการตอบสนอง 5.5 ส่วนที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% มีค่า 1.5 และที่เจือแมงกานีส 1.24 wt% มีค่า 1.25 สำหรับการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่าการตอบสนอง 4 และที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% มีค่า 1.24 wt% และ 1.24 wt% มีค่า 1.4 และสำหรับการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่า 2.7 ส่วนที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% มีค่า 1.45 และ 1.20 ตามลำดับ ในส่วนของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% นั้นไม่มีการตอบสนองใดๆ เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของทั้งสามแก๊สนั้นพบว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO สามารถตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนได้ดีที่สุด ตามด้วยแก๊สอะซิโตน และสุดท้ายคือแก๊สเอทานอล ในส่วนของการทดสอบความชื้นที่ความเข้มข้น 80 RH% - 30 RH% นั้นก็เช่นเดียวกันคือเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่บริสุทธิ์มีการตอบสนองได้ดีกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีสที่ทุกความเข้มข้น และเมื่อทดสอบการตอบสนองต่อความชื้นที่ความเข้มข้นสูงสามารถตอบสนองได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ สามารถสรุปได้ว่าการที่เจือแมงกานีสเข้าไปในโครงสร้าง CCTO ไม่มีผลต่อการช่วยเร่งปฏิกิริยาการตอบสนองต่อความชื้น ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าเป็นเพราะอะตอมแมงกานีสเข้าไปแทนอะตอมของทองแดงในฟิล์ม CCTO ทำให้การตอบสนองต่อแก๊สและความชื้นลดลง แต่ในทางกลับกันการเจือแมงกานีสลงไปโครงสร้าง CCTO มีส่วนช่วยให้เวลาในการฟื้นฟูสภาพของเซนเซอร์ไวขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่บริสุทธิ์ และงานวิจัยอื่น ๆ

คำสำคัญ : ฟิล์มบาง/ CCTO/ การตอบสนองต่อแก๊สและความชื้น

Project title	Characteristics of gas and humidity sensors based on Manganese doped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$
Name	Chanitsara Phalawan
Department	Department of Physics
Academic year	2018
Advisor	Associate Professor Dr. Satreerat Hodak

Abstract

This research project aims to conduct an experiment on the sensor response of acetylene acetone, ethanol gas and humidity of undoped and 0.41–2.08 wt% manganese doped calcium copper titanate ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: CCTO) which is planted on the alumina and silicon substrate by sol-gel method were studied. The results showed that all the three gas response valves of the pure CCTO sensor had a better response than 0.41–2.08 wt% manganese doped CCTO sensor. The results of the response to the acetylene gas of pure CCTO thin film shows a response rate of 5.5 in the 0.41 wt% manganese doped of CCTO have a response rate 1.5 and 1.24 wt% film doped of 1.25. For the response of pure CCTO thin film sensor to acetone, it has a response rate 1.24 and 1.24wt% manganese doped of CCTO have a response rate 1.4. As for the response to ethanol gas of pure CCTO thin film sensor has a response rate of 2.7 for 0.41 wt% and 1.24 wt% manganese doped of CCTO have a response rate 1.45 and 1.20 respectively. As for 2.08 wt% manganese doped of CCTO thin film sensor, there is no response. Comparing the response of three gases, the CCTO thin film sensor response best to acetylene gas, followed by acetone gas and lastly ethanol gas. In the test of humidity concentration at 80 RH% - 30 RH%, the results are the same as gas response tests is pure CCTO thin film sensor, which are more responsive than manganese doped thin film sensor at every concentration. Later, testing the response to humidity at a higher concentration, the results shows that pure CCTO thin film sensor has a better response comparing with its response to lower concentration. It can be concluded that adding manganese doped into the CCTO structure does not accelerate its effect upon humidity response catalytic activity because the manganese atom replace copper atoms in the thin film sensor which consequently make its response to gas and humidity decrease. On the other hand that adding manganese doped into the CCTO structure has a better recovery time comparing with pure CCTO and other research

Keyword : Thin film/ CCTO/ Sensor response

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สตรีรัตน์ โสด้ค อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่ให้ความรู้ ความเข้าใจ คำแนะนำ รวมทั้งคำปรึกษาต่าง ๆ จนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.อนุรัตน์ วิศิษฐ์สรอรรถ แห่งศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ความช่วยเหลือในกระบวนการทำอิเล็กทรอนิกส์ และการทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น

ขอขอบคุณ พี่บอล นายสุริยงค์ พงศ์ไพบุลย์กุล ผู้ช่วยงานวิจัยของรองศาสตราจารย์ ดร.สตรีรัตน์ โสด้ค ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการปรับปรุงคุณภาพและทำความสะอาดเซนเซอร์ฟิล์มบาง

ขอขอบคุณเพื่อนนิสิตร่วมชั้นปีและน้อง ๆ ภาควิชาฟิสิกส์ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการปฏิบัติงานมาโดยตลอด

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบโครงการวิทยาศาสตร์ทุกท่านอันได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์ และอาจารย์ ดร.รังสิมา ชาญพนา ที่ช่วยชี้แนะแนวทางในการทำโครงการ และช่วยแก้ไขข้อบกพร่องในโครงการ

ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้ความสำคัญด้านการศึกษา สนับสนุนทั้งด้านทุนทรัพย์และด้านกำลังใจกันเสมอมา

นางสาวชนิสรา ผลาวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลการทดสอบเดิม	5
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) ในรูปแบบฟิล์มบาง	5
2.1.1 คุณสมบัติและการนำไปประยุกต์ใช้ของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO)	5
2.1.2 การเตรียมฟิล์มฟิล์มด้วยวิธีโซล-เจล	6
2.2 ทฤษฎีการทดสอบแก๊สและความชื้น	9
2.2.1 เทคนิคการทดสอบการตรวจจับแก๊สและความชื้น	9
2.2.2 กลไกการการตรวจจับแก๊ส	10
2.2.3 กลไกการตรวจจับความชื้น	13
2.3 ผลการทดสอบของนายเพชร โจล์ตสาร์ทกุล	15
2.3.1 ฟิล์มที่ได้จากการปลูกฟิล์มด้วยวิธีโซล-เจล	15
2.3.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ	16
2.3.3 ผลการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์	18
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการ	24
3.1 วัสดุอุปกรณ์	24
3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง	27
3.2.1 การตรวจสอบการลัดวงจรของเซนเซอร์	27
1 การทดสอบด้วยมัลติมิเตอร์	27
2 การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์	28
3.2.2 การนำเซนเซอร์ไปทดสอบการตอบสนองต่อแก๊ส	29
1 การต่อขั้วไฟฟ้า (การโพรบ)	29

2 การใช้โปรแกรม Labview สำหรับการทดสอบแก๊ส	31
3.2.3 การนำเซนเซอร์ไปทดสอบการตอบสนองต่อแก๊ส	34
3.2.3.1 การต่อขั้วไฟฟ้า (การโพรบ)	34
3.2.3.2 การใช้โปรแกรม Labview สำหรับการทดสอบความชื้น	35
3.2.4 การทำความสะอาดเซนเซอร์ฟิล์มบาง	36
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการศึกษา	38
4.1 ผลการทดสอบการตรวจจับแก๊สต่าง ๆ ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO	38
4.1.1 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีน	38
4.1.2 ผลการทดสอบการตรวจจับแก๊สอะซิโตน	41
4.1.3 ผลการทดสอบการตรวจจับแก๊สเอทานอล	44
4.2 ผลการทดสอบการตรวจจับความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO	48
4.2.1 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อการตรวจจับความชื้น (humidity)	48
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	60
5.1 ผลการตอบสนองต่อแก๊สของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO	60
5.2 ผลการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	62
บรรณานุกรม	63
ภาคผนวก	66

สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 2.1	แสดงโครงสร้างของ CCTO	5
รูปที่ 2.2	การเคลือบแบบสปิน	8
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วในการหมุน (ซ้าย) และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับระยะเวลาที่ใช้ในการหมุน (ขวา)	8
รูปที่ 2.4	แบบจำลองแก๊สเซนเซอร์	9
รูปที่ 2.5	สัญญาณที่วัดได้จากเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ที่ผ่านแก๊ส (a) ประเภทรีดิวซ์ (reduction) (b) ประเภทให้ออกซิเดชัน (oxidation)	10
รูปที่ 2.6	การทำปฏิกิริยาบนผิวสารกึ่งตัวนำประเภทต่าง ๆ	12
รูปที่ 2.7	แผนภาพกลไกการตรวจจับความชื้นของฟิล์มบาง CCTO	14
รูปที่ 2.8	ฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นรองรับซิลิคอน	15
รูปที่ 2.9	ฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นรองรับอลูมินา	16
รูปที่ 2.10	สเปกตรัมของ EDX ที่ได้จาก (a) ฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ (b) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วย แมงกานีส 3.77 wt%	17
รูปที่ 2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแมงกานีสที่เตรียมเป็นสารละลายกับ ความเข้มข้นของแมงกานีสที่วัดได้	17
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความไวต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 10 ppm กับ อุณหภูมิ	18
รูปที่ 2.13	ความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10 ppm ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ในฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์	18
รูปที่ 2.14	ความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10 ppm ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ในฟิล์ม CCTO (a) เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% (b) เจือด้วยแมงกานีส 2.91 wt%	19
รูปที่ 2.15	ความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10 ppm ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ในฟิล์ม CCTO เจือด้วยแมงกานีส 3.77 wt%	20
รูปที่ 2.16	เวลาการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 10 ppm กับอุณหภูมิ ของฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์	21
รูปที่ 2.17	เวลาการฟื้นคืนต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 10 ppm กับอุณหภูมิ ของฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์	21
รูปที่ 2.18	สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์บนผิวของฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 3.77 wt%	22

รูปที่ 2.19	แสดงสเปกตรัมอย่างละเอียดของสัญญาณทองแดงในฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 3.77% โดยน้ำหนัก	23
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างของเซนเซอร์แก๊สที่ผลิตจาก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ โดยมีขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร และขนาดความกว้างของช่องว่างที่เป็นผิวหน้าของฟิล์มบาง 100 ไมโครเมตร โดยเคลือบผิวด้วย เงิน (Au) และ โครเมียม (Cr)	25
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า	25
รูปที่ 3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยท่อปิดภายในมีตัวให้ความร้อนอยู่และโวลมิเตอร์ปรับค่าความต่างศักย์เพื่อควบคุมความร้อน ขั้วไฟฟ้าและแผงวงจรต่าง ๆ	26
รูปที่ 3.4	การตรวจสอบการลัดวงจรด้วยมัลติมิเตอร์ที่เซนเซอร์ฟิล์มบาง	27
รูปที่ 3.5	(a) กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้สำหรับดูพื้นผิวเซนเซอร์ฟิล์ม (b) ลักษณะฟิล์มที่สามารถสังเกตได้	28
รูปที่ 3.6	การการต่อขั้วไฟฟ้าโดยแตะที่ตัวเซนเซอร์ในท่อปิด	29
รูปที่ 3.7	(a) การต่อขั้วไฟฟ้าเข้าสู่แผงวงจร และ (b) แผงวงจร	30
รูปที่ 3.8	(a) ระบุตำแหน่งการต่ออุปกรณ์ใช้ควบคุมการไหลของแก๊สเข้าสู่ท่อปิดและท่อนำแก๊ส และ (b) อุปกรณ์ใช้ควบคุมการไหลของแก๊ส (mass flow controller)	31
รูปที่ 3.9	การติดตั้งเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าและระบบคอมพิวเตอร์	32
รูปที่ 3.10	การตั้งค่าโปรแกรม labview ในส่วนต่าง ๆ ของการทดสอบแก๊ส	32
รูปที่ 3.11	ขวดใส่น้ำเพื่อผลิตไอน้ำ	34
รูปที่ 3.12	การตั้งค่าโปรแกรม labview ในส่วนต่าง ๆ ของการทดสอบความชื้น	35
รูปที่ 3.13	การตากแห้งของเซนเซอร์ฟิล์มบางบนแผ่นเซรามิก	36
รูปที่ 3.14	ภายในตู้อบอุณหภูมิสูง และ แสดงตู้อบและหน้าจอการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 450 องศาเซลเซียส	37
รูปที่ 4.1	การตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีน (acetylene) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ	38
รูปที่ 4.2	การตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตน (acetone) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%	41
รูปที่ 4.3	การตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล (ethanol) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%	44
รูปที่ 4.4	การเปรียบเทียบค่าการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีน แก๊สอะซิโตน และแก๊สเอทานอลของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt%	47
รูปที่ 4.5	การตอบสนองต่อความชื้น (humidity) ที่ความเข้มข้น 80 RH% ถึง 20 RH% ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	48

รูปที่ 4.6	อัตราการตอบสนองต่อการตรวจจับความชื้นความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	49
รูปที่ 4.7	เวลาในการตอบสนองต่อการตรวจจับความชื้น (humidity) ที่ความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	52
รูปที่ 4.8	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ต่อความชื้นที่ความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH%	54
รูปที่ 4.9	เวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% หลังได้รับความชื้นความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 4.10	กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ต่อความชื้นที่ความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH%	57
รูปที่ 6.1	การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ	66
รูปที่ 6.2	การตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ	67
รูปที่ 6.3	การตอบสนองต่อแก๊สมีเทน (Methane) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ	68
รูปที่ 6.4	การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%	69
รูปที่ 6.5	การตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (nitrogen dioxide) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%	70
รูปที่ 6.6	การตอบสนองต่อแก๊สมีเทน (methane) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%	71

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	แสดงค่าความเป็นพิษของแก๊สชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณต่าง ๆ	1
ตารางที่ 4.1	เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สอะซิทีลีน (acetylene)	39
ตารางที่ 4.2	เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สอะซิโตน (acetone)	42
ตารางที่ 4.3	เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สเอทานอล (ethanol)	45
ตารางที่ 4.4	อัตราการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ในการทดสอบการตรวจจับความชื้น	53
ตารางที่ 4.5	เวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับความชื้น	56
ตารางที่ 4.6	เวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับความชื้น	60
ตารางที่ 6.1	เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen)	66
ตารางที่ 6.2	เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide)	67
ตารางที่ 6.3	เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สมีเทน (Methane)	68

บทที่ 1

บทนำ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากในปัจจุบันเราประสบปัญหาเกี่ยวกับมลพิษทางอากาศอันเนื่องมาจากแก๊สต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น แก๊สเรือนกระจก แก๊สพิษ เป็นต้น โดยตารางที่ 1 แสดงการรวบรวมของงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งแสดงถึงแหล่งที่มา ความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงปริมาณสูงสุดที่สามารถสัมผัสได้โดยไม่เกิดอันตรายขึ้นรุนแรงของแก๊สชนิดต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความเป็นพิษซึ่งเป็นแก๊สที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติหรือเกิดจากอุตสาหกรรม เช่น การผลิตปิโตรเลียมการทำเหมืองแร่

ตารางที่ 1.1 แสดงค่าความเป็นพิษของแก๊สชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณต่าง ๆ [1]

แก๊ส	แหล่งที่มา	ความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม	ปริมาณสูงสุดที่สามารถสัมผัสได้โดยไม่เกิดอันตรายรุนแรง
H ₂ S	เหมืองแร่ ปิโตรเลียม ธรรมชาติ	ปวดศีรษะ 2 ppm ตาระคายเคือง 10-20 ppm อันตรายต่อปอด 100 ppm หลอดเลือดอุดตัน 800 ppm (รับนานกว่า 5 นาที)	10 ppm
H ₂	แก๊สธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน น้ำ	ความเสี่ยงต่อการหมดสติหรือเสียชีวิต (ความเข้มข้นสูง) อันตรายสำหรับการขนส่งและการเก็บรักษา (ระเบิด ~ 15,000 ppm)	ไม่มีข้อมูล
NH ₃	อุตสาหกรรมเกษตร สารทำความสะอาดและ สารเคมี	การระคายเคืองตา เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ปอดบวม (มากกว่า 1000 ppm)	35 ppm
NO ₂	ควันจากโรงงาน เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง	โรคปอดและระบบทางเดินหายใจ	3 ppm
Ethanol vapor	หมักน้ำตาลโดยยีสต์หรือ โดยกระบวนการปิโตรเคมี	ระคายเคืองตา	1000 ppm

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาแก๊สเซนเซอร์สำหรับการตรวจจับโมเลกุลของแก๊สได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยที่เป้าหมายของการวิจัยแก๊สเซนเซอร์คือ การสร้างการตรวจจับด้วยกลุ่มของแก๊สหรือแก๊สชนิดใดชนิดหนึ่ง การตรวจจับปริมาณแก๊สเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการควบคุมความปลอดภัยและคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานหลายอย่างเช่นการแปรรูปอาหาร การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมการเกษตร การวินิจฉัยทางการแพทย์ และการป้องกันอันตรายจากการรั่วซึมของแก๊สพิษ [2] จากงานวิจัยที่ผ่านมารายงานว่าเซนเซอร์ตรวจจับแก๊สประเภทโลหะออกไซด์เช่น ZnO, SnO₂, TiO₂ และ WO₃ มีประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊สพิษทั่วไปได้เป็นอย่างดี อีกทั้งมีการประดิษฐ์ได้ง่าย ใช้ต้นทุนต่ำ และทนทาน [3] นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อตรวจจับแก๊สที่ติดไฟหรือออกซิไดซ์ได้ โดยมีประสิทธิภาพการรับรู้และการตอบสนองต่อแก๊สชนิดนั้น ๆ เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อวัสดุโลหะออกไซด์ถูกเจือด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ

วัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจจับแก๊สสามารถอยู่ในรูปของฟิล์มบาง ผงเซรามิก หรือ อื่น ๆ จากการค้นพบในห้องปฏิบัติการของเราเมื่อไม่นานที่ผ่านมา พบว่าแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CaCu₃Ti₄O₁₂ : CCTO) ซึ่งมีไอออนของทองแดงอยู่ในโครงสร้างสามารถทำพันธะกับอะตอมซัลเฟอร์ (S) ได้ง่าย ดังนั้นจึงอาจคาดว่า การเปลี่ยนแปลงทางสมบัติไฟฟ้าของ CCTO สามารถเกิดขึ้นได้โดยการดูดซับแก๊สซัลไฟด์ (SO₂) ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าฟิล์มบาง CCTO ชนิดเอ็น (n-type) แบบเฟสเดียวเตรียมด้วยสารตั้งต้นของพอลิเมอร์บนพื้นผิวอลูมินา มีการตอบสนองต่อแก๊ส และมีความสามารถในการคัดเลือกใช้แก๊สออกซิเดชันสูง [4] จากงานวิจัยของนายพชร โล่ตสาร์ทกุล นิสิตชั้นปีที่ 4 [5] เป็นการเตรียมเซนเซอร์ฟิล์มบางจาก CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส (Mn) นั้นผลที่ได้คือไม่สามารถตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ซึ่งยังเป็นข้อกังขาว่าเป็นเพราะเหตุใด แต่ในเบื้องต้นจากการตรวจสอบด้วย XPS พบว่าแมงกานีสที่เจือเข้าไปนั้นได้เข้าไปแทนที่อะตอมของทองแดงทำให้ปริมาณของทองแดงในโครงสร้างของ CCTO ลดลงซึ่งอาจมีผลต่อการทดสอบแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้เมื่อเจือเหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และ ซิลเวอร์ (Ag) เข้าไปในโครงสร้างของ CCTO พบว่ามีความจำเพาะต่อการตอบสนองแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เป็นอย่างดี โดยใช้เวลาในการตอบสนองค่อนข้างไวแต่เวลาที่ใช้ในการฟื้นคืนสภาพนั้นยังคงช้าอยู่ ดังนั้นจึงเป็นแนวคิดที่ว่า ถ้าหากนำเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีสมาทดสอบกับกลุ่มแก๊สอื่น ๆ อาจมีผลในเกิดความแตกต่างต่อความไวในการตอบสนองและความไวในการฟื้นคืนสภาพหลังการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ทั้งนี้ในการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคโซล-เจลในห้องปฏิบัติการของเราสามารถควบคุมการแทนที่ของสารเจือโดยลดปริมาณสารเคมีที่ประกอบด้วยธาตุที่ต้องการให้สารเจือแทนที่ตำแหน่งระหว่างการเตรียมสารละลาย

สำหรับปฏิกิริยาที่ให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยปกติแล้วจะมีความชื้น (Humidity) เป็นส่วนประกอบ เนื่องจากแหล่งที่เกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่วนใหญ่จะเป็นแหล่งที่มีความชื้น เช่น ท่อบำบัดน้ำเสีย บ่ขี้วัวภาพ เป็นต้น และเมื่อศึกษาเกี่ยวกับการตรวจจับความชื้นเพิ่มเติมนั้นพบว่ามีปฏิกิริยาของโลหะออกไซด์ในการประดิษฐ์แก๊สเซนเซอร์ ปัจจุบันยังมีการรายงานว่าโลหะออกไซด์ยังสามารถประดิษฐ์เป็นตัวตรวจจับความชื้นได้อีกด้วย ความชื้นเป็นองค์ประกอบที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในอากาศเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่อุดมไปด้วยโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นการวัดความชื้นหรือความสามารถในการควบคุมความชื้นหรือปริมาณไอน้ำ

โดยอัตโนมัติในอากาศจึงมีความสำคัญ ไม่เพียงแต่สำหรับมนุษย์เท่านั้นแต่ยังเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีที่ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในอากาศ เช่น การปกป้องสิ่งแวดล้อม การเพาะปลูกพืช การควบคุมคุณภาพอากาศการผลิตยาและวิทยาศาสตร์สุขภาพ [6-8] ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมากลุ่มของนักวิจัยให้ความสำคัญกับการพัฒนาวัสดุหรือองค์ประกอบที่มีความไวต่อความชื้น [9-13] ที่สามารถนำมาใช้ในระบบควบคุมความชื้นแบบอัตโนมัติ มีการพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นชนิดต่าง ๆ ตามหลักการ resistive [14], capacitive [15] และ thermal [16] ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เพิ่มความไวในการตอบสนองให้มีความไวเพิ่มขึ้น มีความเฉพาะของสารเคมีกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง และเพิ่มความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติกายภาพให้สูงขึ้น รวมถึงการมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง [17-21] นอกจากนี้ยังมีรายงานการใช้วัสดุที่มีความไวในการวัดความชื้นอีกมากมายโดยเฉพาะเซรามิกที่มีรูพรุน [22] ข้อดีของการใช้วัสดุเซนเซอร์เซรามิกที่มีรูพรุนคือมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยากับความชื้นที่มากขึ้น อีกทั้งยังมีความต้านทานต่อสารเคมีและความเสถียรทางความร้อนที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเซนเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ [23] และเซนเซอร์ โพลีเมอร์อินทรีย์ [24] เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีคณะวิจัยเพียงไม่กี่กลุ่มได้รายงานผลของการนำ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: CCTO ประกอบเป็นเซนเซอร์ความชื้นพบว่า ค่าความต้านทานของ CCTO ลดลงเมื่อสัมผัสกับอากาศชื้นจะทำให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ความชื้นได้เป็นอย่างดี ยกตัวอย่างเช่นการรายงานจากกลุ่มวิจัยของคุณ Chen และคณะ [25] พบว่าเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์ในรูปแบบผงอัดเม็ด (3D-pellets) นั้นให้ผลการตอบสนองและการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ยังคงขึ้นอยู่กับในหน่วยเวลาเป็นนาที่ แต่เมื่อเปลี่ยนมาประดิษฐ์ในรูปแบบของฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสเชื่อมพบว่าให้ผลการตอบสนองและการฟื้นคืนสภาพที่ดีขึ้นและใช้เวลาน้อยลงในหน่วยเวลาเป็นวินาที และจากอีกกลุ่มวิจัยของคุณ Mohsen Ahmadipour และคณะ [26] พบว่าการประดิษฐ์เซนเซอร์จากฟิล์มบางที่มีความหนาต่างกัมนั้น มีผลต่อการตอบสนองและการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์เช่นกัน เนื่องจากฟิล์มที่บางใช้เวลาในการตอบสนองและการฟื้นคืนสภาพที่เร็วกว่าฟิล์มที่หนากว่า (ฟิล์มหนา 200 nm ใช้เวลาการตอบสนอง และการฟื้นคืนสภาพ 12 วินาที และ 500 วินาที ตามลำดับและเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มหนา 600 nm ใช้เวลาการตอบสนองและการฟื้นคืนสภาพ 35 วินาที และ 650 วินาที ตามลำดับ) จากที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้ ผู้วิจัยคาดว่าหากสามารถพัฒนารูปแบบของ CCTO เป็นรูปแบบฟิล์มบาง และมีการปรับเปลี่ยนสมบัติทางไฟฟ้า โดยการเจือโลหะทรานซิชันลงไปจะทำให้ผลของการตรวจวัดค่าความชื้นดีขึ้น โดยที่ใช้เวลาในการตอบสนองและการฟื้นคืนสภาพที่ไวขึ้น และจากการทบทวนวรรณกรรมเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับเซนเซอร์จากฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีส [27] เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ฟิล์มบาง ZnO บริสุทธิ์ เซนเซอร์ตัวที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นมีค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยมีค่าการตอบเท่ากับ 6 นั้นสูงกว่าเซนเซอร์ ZnO บริสุทธิ์ 2-4 เท่าในช่วง RH ที่ 30-95% โดยได้อธิบายไว้ว่าการเจือแมงกานีสลงในเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ทำให้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระสูงมากในพื้นที่ผิว เมื่อทำการทดสอบความชื้นจึงอาจจะมีผลทำให้สามารถตอบสนองได้ดีขึ้น ทางผู้วิจัยจึงคาดว่า การผลิตเซนเซอร์ในรูปแบบของฟิล์มบางโดยเจือแมงกานีสลงไปในนั้นอาจมีผลทำให้มีความไวในการตอบสนองและการฟื้นคืนสภาพที่ไวขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติการตรวจจับแก๊สชนิดต่าง ๆ ของฟิล์มบางโครงสร้างของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่บริสุทธิ์ และเจือด้วยแมงกานีส (Mn)
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติการตรวจวัดค่าความชื้น (Humidity) ของฟิล์มบางโครงสร้างของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่บริสุทธิ์และเจือด้วยแมงกานีส (Mn)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

เซนเซอร์แก๊สที่ผลิตด้วยวิธีโซล-เจล ออกมาในรูปแบบของฟิล์มบางแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% นำไปศึกษาความไวการตอบสนองต่อแก๊สพิษ ได้แก่ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) อะซิโตน (CH_3COCH_3) อะเซทิลีน (C_2H_2) และ เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส และนำไปทดสอบความไวในการตอบสนองต่อความชื้นที่อุณหภูมิห้อง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้เชิงฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ในการทำเซนเซอร์ในรูปแบบของฟิล์มบาง เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรมต่อไป
2. สามารถสร้างเซนเซอร์ที่มีความจำเพาะต่อแก๊สพิษชนิดต่าง ๆ ในด้านอุตสาหกรรม และมีความจำเพาะต่อการตรวจวัดค่าความชื้นในด้านเกษตรกรรม
3. สามารถพัฒนาเซนเซอร์ฟิล์มบางให้มีการตอบสนองและการฟื้นคืนสภาพที่เร็วขึ้น อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและผลการทดลองเดิม

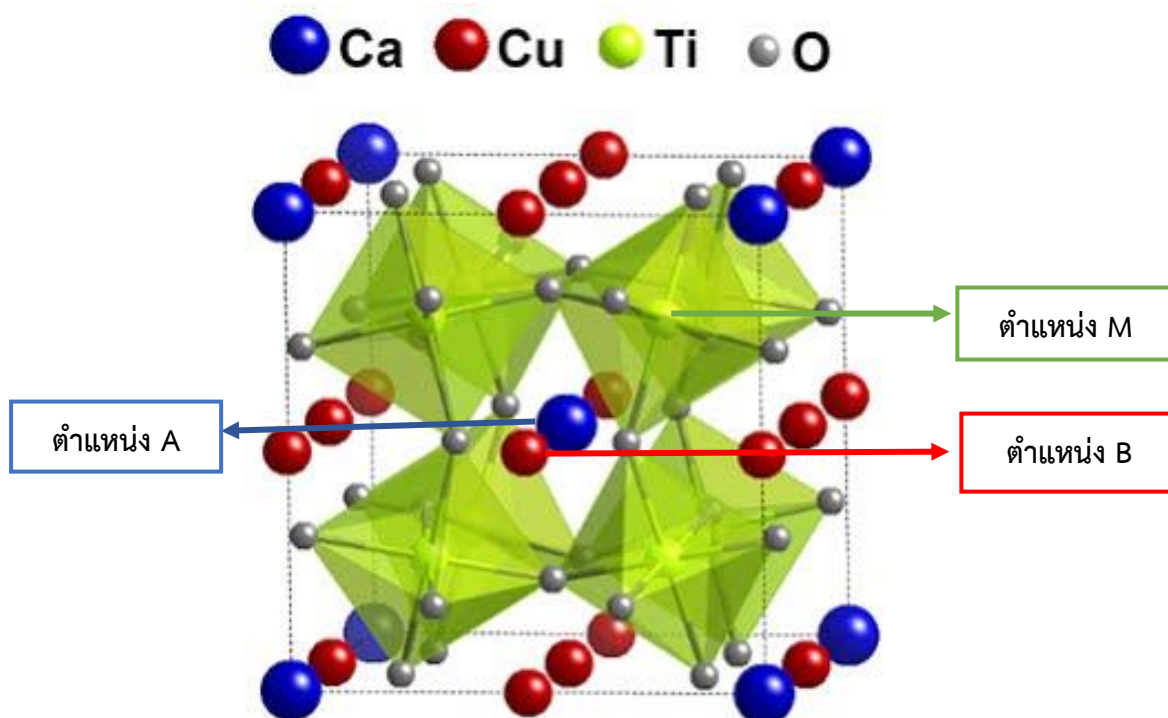
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและผลการทดลองเดิม

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) ในรูปแบบฟิล์มบาง

2.1.1 สมบัติและการนำไปประยุกต์ใช้ของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO)

แคลเซียมคอปเปอร์ไททานเทท ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$) หรือ CCTO มีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์เพอโรฟสไกต์ออกไซด์เทียม (pseudo-cubic perovskite oxide) มีสูตรโครงสร้างเป็น $\text{AB}_3\text{M}_4\text{O}_{12}$ ดังรูปที่ 2.1 โดยที่ Ca^{2+} อยู่ที่ตำแหน่ง A ร่วมกับออกซิเจนอีก 12 อะตอมมีโครงสร้างเป็น CaO_{12} หรือ icosahedron ในส่วนของตำแหน่ง B จะเป็น Cu^{2+} ร่วมกับออกซิเจนอีก 4 อะตอม แสดงโครงสร้างสี่เหลี่ยมแบนราบ (square planar : CuO_4) โดยที่อะตอมของ Cu เป็นศูนย์กลางของโครงสร้าง และ Ti^{4+} อยู่ที่ตำแหน่ง M ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอมเป็นโครงสร้างแบบทรงแปดหน้า (octahedron) ที่มีโครงสร้าง TiO_6 โดยทรงแปดหน้าเอียงทำมุม 20° กับยูนิตเซลล์เพื่อแสดงความไม่เป็นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (non-ferroelectricity) พันธะระหว่าง Ti-O มีความตึงเครียด (tension) ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการเกิดมีซ์ซ์ (polarizability) ของผลึก

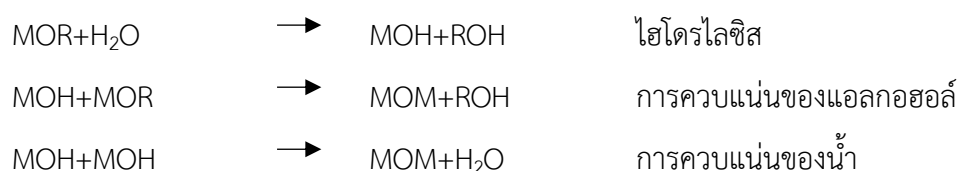


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ CCTO [28]

ในช่วงประมาณปี 1960 เฟสต่าง ๆ ของสารประกอบ CCTO ถูกค้นพบและมีการค้นพบโครงสร้างที่ถูกต้องอีกในช่วงปี 1970 โดย Bochu [29] และคณะ พบว่าสมบัติทางไฟฟ้าของ CCTO ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเฟส ในช่วงอุณหภูมิ 100-600 เคลวิน ต่อจากนั้น Subramanian และคณะเป็นกลุ่มวิจัยแรก [30] ได้ศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของผง CCTO ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าอยู่ในช่วง 1,200 และค่อนข้างคงที่ในย่านของอุณหภูมิห้องจนถึง 300 องศาเซลเซียส และหลังจากค้นพบนั้นมีการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ CCTO อย่างแพร่หลายและหลากหลายรูปแบบขึ้น เช่น ในรูปผง และฟิล์มบางเป็นต้น เนื่องจากการมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงและคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ดังนั้น CCTO จึงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น ตัวเก็บประจุ เซนเซอร์ และ เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบต่าง ๆ

2.1.2 การเตรียมฟิล์มฟิล์มด้วยวิธีโซลเจล

วิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคคอลลอยด์ (colloidal-particle) ที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในสารละลาย กระบวนการนี้มีประโยชน์ในการเตรียมวัสดุชนิดที่อยู่ในรูปของโลหะออกไซด์เชิงซ้อน (complex metal-oxide) และชนิดอื่น ๆ ที่มีรูปร่างที่หลากหลาย เช่น โครงสร้างที่มีรูพรุน (porous structure) เส้นใยบาง (thin fibers) ผงอัดแน่น (dense powders) และ ฟิล์มบาง (thin films) เป็นต้น โดยโซล (Sol) คือ การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคคอลลอยด์ (colloidal particles) หรือ โพลีเมอร์ที่อาจจะเป็นเนื้อเดียวกัน (amorphous) หรือเป็นพหุผลึก (polycrystalline) ที่แขวนลอยอยู่ในตัวทำละลาย ในขณะที่โซลเป็นอนุภาคที่อยู่ในของเหลวแอโรซอล (aerosol) เป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในแก๊ส ในส่วนของเจล (gel) จะประกอบไปด้วยโครงข่ายสามมิติที่โอบล้อมของเหลว สารละลายโซล-เจลจะประกอบด้วยโลหะอัลคอกไซด์ (metal-alkoxide : $M(OR)_2$) โดยที่ R คือ หมู่อัลคิล (alkyl group) กระบวนการโซล-เจลนี้ประกอบไปด้วยกระบวนการหลัก ๆ ทั้งหมด 3 กระบวนการ ได้แก่ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การควบแน่นของแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) และ การควบแน่นของน้ำ (water condensation)



โดยกระบวนการทั้งสามนี้เกิดในเวลาเดียวกัน ไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำและโมเลกุลของสารตั้งต้น (precursor) ที่มีรูปแบบโครงสร้างที่ไม่ต้องการ ในกระบวนการไฮดรอกซิล (hydroxyl group : OH) น้ำจะจับตัวหมู่อัลคิลโดยทั้งไฮโดรเจนให้ไปอยู่แทนที่ กระบวนการที่เกิดขึ้น

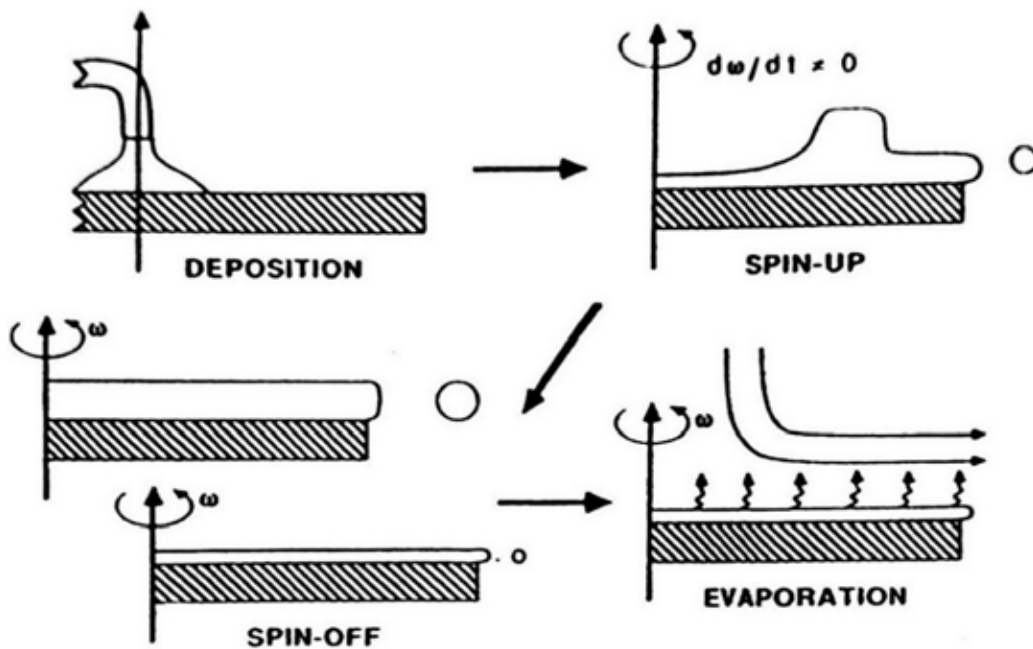
จะเกิดซ้ำไปมา สำหรับไททาเนียมอัลคอกไซด์ (titanium alkoxide) จะส่งผลให้เกิดการก่อตัวขึ้นของไททาเนียมออกไซด์ (hydrated titanium- oxide) ในการเตรียม CCTO สำหรับปฏิกิริยาการควบแน่นของแอลกอฮอล์เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้แอลกอฮอล์ถูกกำจัดออกไปจากโครงสร้างเดิมได้ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างโลหะไฮดรอกไซด์ (MOH) กับโลหะอัลคอกไซด์ (MOR) และสุดท้ายคือปฏิกิริยาการควบแน่นของน้ำเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลโลหะไฮดรอกไซด์ (MOH) กับโลหะไฮดรอกไซด์ด้วยกันเพื่อให้ได้น้ำออกมา

ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากทั้งสามปฏิกิริยานี้เป็นโครงข่ายของออกไซด์ (oxide-networked) สำหรับกระบวนการควบแน่นทั้งสองที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเผาเพื่อที่น้ำและแอลกอฮอล์จะถูกกำจัดออกไปเหลือเพียงแค่โครงสร้างที่ประกอบไปด้วยออกไซด์เท่านั้น [31]

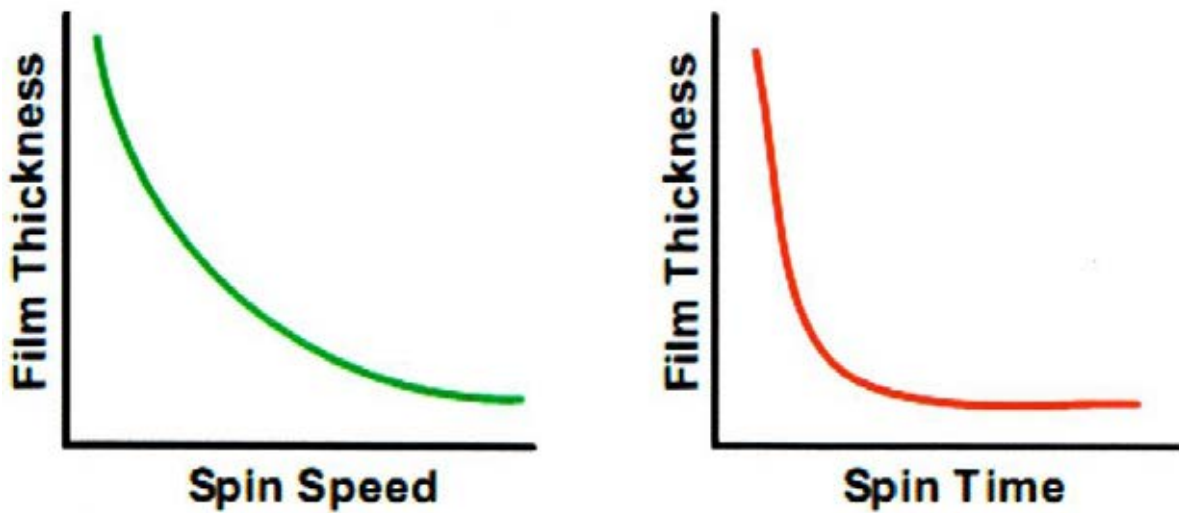
สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่เตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบสปินโดยอาศัยการหยดสารละลายที่ต้องการลงบนจุดกึ่งกลางแผ่นรองรับที่วางอยู่บนแท่นยึดของเครื่องเคลือบสปิน (spin coater) ซึ่งมีหลักการคือ สารละลายกระจายออกไปรอบ ๆ โดยมีแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) และ เกิดแรงเสียดทาน (friction force) ต้านการกระจายของสารละลาย ดังรูปที่ 2.2 โดยความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุน มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\text{Thickness} \propto \frac{1}{\sqrt{\omega}} \quad (1)$$

โดย ω คือ อัตราเร็วเชิงมุม นอกจากนี้ความหนาของฟิล์มยังขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนด้วย หากใช้เวลาในการหมุนมาก ความหนาของฟิล์มจะบางลง หากใช้เวลาในการหมุนน้อย ความหนาของฟิล์มก็จะหนาขึ้นดังรูปที่ 2.3 และอีกทั้งยังขึ้นอยู่กับความหนืดของสารละลายอีกด้วย เครื่องเคลือบสปินที่ใช้ในการทำวิจัยนี้สามารถหมุนด้วยความเร็วที่ควบคุมได้ จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายลงไปในครั้งเดียวของการหยดการหมุนจะทำให้สารละลายที่หยดลงไปถูกเกลี่ยทั่วบริเวณแผ่นรองรับอย่างสม่ำเสมอ [32]



รูปที่ 2.2 การเคลือบแบบสปิน [32]

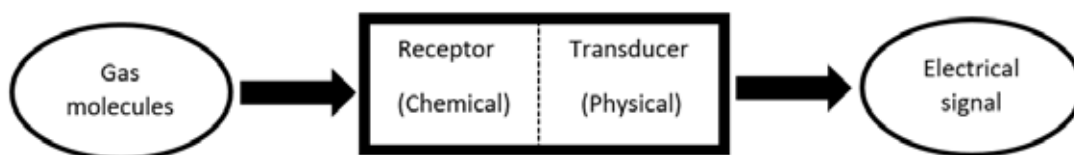


รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วในการหมุน (ซ้าย) และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับระยะเวลาที่ใช้ในการหมุน (ขวา) [32]

2.2 ทฤษฎีการทดสอบการตอบสนองของแก๊สและความชื้น

2.2.1 เทคนิคการทดสอบการตรวจจับแก๊สและความชื้น

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแก๊สและความชื้นนั้นเรียกว่า แก๊สเซนเซอร์ โดยเป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางเคมีเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยตัวรับ (receptor) ซึ่งในส่วนนี้จะเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ กับโมเลกุลของแก๊สต่าง ๆ และความชื้น (โมเลกุลของน้ำ) เช่นปฏิกิริยาดูดซับ (adsorption reaction) ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical reaction) และอีกส่วนประกอบคือตัวแปลง (transducer) จะแปลงผลที่เกิดขึ้นกับตัวรับออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น ความต้านทาน เป็นต้น ดังแผนผังแบบจำลองรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองแก๊สเซนเซอร์

สำหรับการตอบสนองต่อแก๊สและความชื้นสิ่งที่ควรพิจารณา คือ ความไวต่อการตอบสนอง (sensitivity) เป็นตัวกำหนดและระบุว่าเซนเซอร์นั้นมีการตอบสนองต่อแก๊สและความชื้นดีหรือไม่ดี หากเซนเซอร์มีค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊ส และความชื้นมากแสดงว่าเซนเซอร์นั้นมีการตอบสนองต่อแก๊ส และความชื้นได้ดีและสามารถวัดออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า ค่าสัญญาณที่ได้นั้นจะเป็นค่าความต้านทานของเซนเซอร์ โดยสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตอบสนองกับความต้านทานได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{R_a}{R_g} \quad (2)$$

โดย S คือ อัตราการตอบสนองต่อแก๊สหรือความชื้น

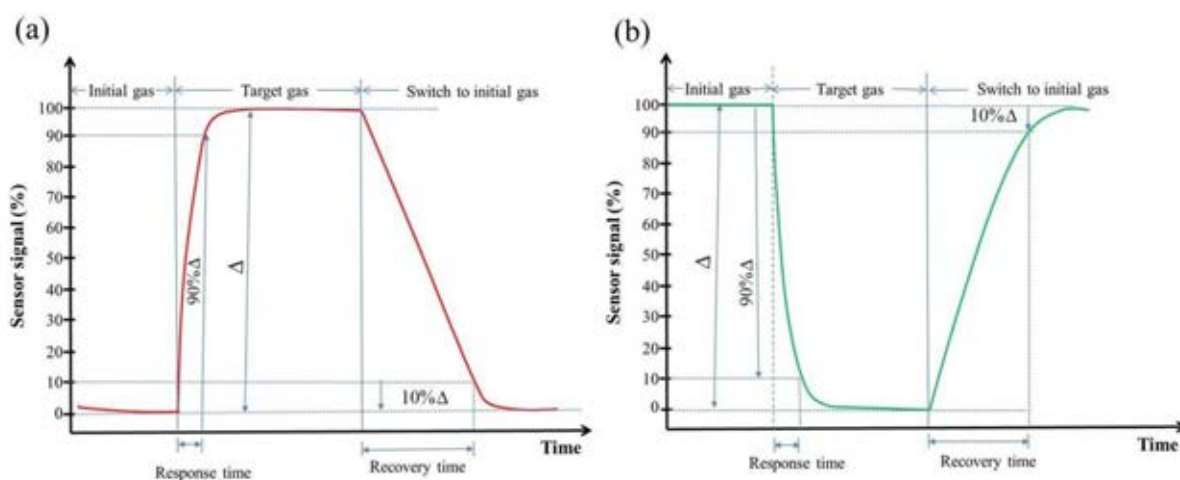
R_a คือ ความต้านทานของเซนเซอร์ที่อากาศบริสุทธิ์

R_g คือ ความต้านทานของเซนเซอร์หลังได้รับแก๊สหรือความชื้น

สำหรับอีกสิ่งที่ควรพิจารณา คือ เวลาในการตอบสนอง (response time) และเวลาในการฟื้นคืนสภาพ (recovery time) โดยพิจารณาเวลาการตอบสนองเป็นระยะเวลาที่ความต้านทานเปลี่ยนไป 90 % (80% ในกรณีความชื้น) จากทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ปล่อยแก๊สหรือความชื้นเข้าไปในระบบที่ต้องการวัด ในส่วนของเวลาฟื้นคืนสภาพนั้นเป็นระยะเวลาที่ความต้านทานเปลี่ยนกลับมาถึงค่า 10 % (20% ในกรณีความชื้น) จากทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากสิ้นสุดการปล่อยแก๊สหรือความชื้นเข้าสู่ระบบตามเวลาที่ต้องการก่อนที่ความต้านทานนั้นจะกลับสู่ความต้านทานเดิมก่อนปล่อยแก๊สหรือความชื้นเข้าสู่ระบบวัดสามารถสังเกตได้ดังรูปที่ 2.5

การตอบสนองต่อแก๊สและความชื้นที่ได้นอกจากต้องมีค่าความไวต่อการตอบสนองสูง แล้วยังต้องมีเวลาตอบสนองกับเวลาฟื้นคืนสภาพที่ต่ำ ในทางปฏิบัติเวลาฟื้นคืนสภาพจะมากกว่า เพราะต้องใช้เวลาในการไล่อากาศบริสุทธิ์ออกมาเนื่องด้วยไม่สามารถทำให้แก๊สหรือความชื้นที่วัดการตอบสนองในระบบออกไปได้ทันที

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเข้มข้นของแก๊ส 80 ppm ถึง 20 ppm และความชื้นตั้งแต่ 80 RH% ถึง 20 RH% อยู่ในระบบปิด



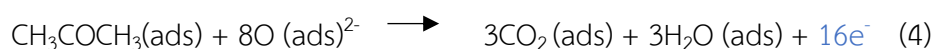
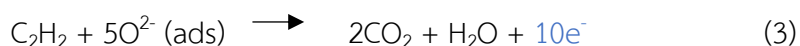
รูปที่ 2.5 สัญญาณที่วัดได้จากเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ที่ผ่านแก๊สแต่ละประเภท (a) ประเภทรีดิวซ์ (reduction) (b) ประเภทให้อิเล็กตรอน (oxidation) [33]

2.2.2 กลไกการตรวจจับการตอบสนองต่อแก๊ส

ฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ จะมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในระดับปานกลางที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากออกซิเจนในโครงสร้างให้อิเล็กตรอนกับแถบการนำ (conduction band) ของสารเมื่อเจอกับอากาศบริสุทธิ์ (air-zero) จะมีปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนที่ผิวของฟิล์มโดยแก๊สออกซิเจนจะรับอิเล็กตรอนมาจากแถบการ

นำกลายเป็นออกซิเจนไอออน (oxygen ion) ซึ่งเป็นออกซิเจนในสถานะดูดซับเรียกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ ปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมของสารที่ทำปฏิกิริยากันและมีการให้อิเล็กตรอนแก่สิ่งแวดล้อมเรียกตัวที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนว่าตัวรีดิวซ์ (reducing agent) โดยจะเกิดคู่กับปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) เสมอในส่วนของปฏิกิริยารีดักชัน คือ ปฏิกิริยาที่รับอิเล็กตรอนจากสิ่งแวดล้อมและตัวที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนนั้นเรียกว่า ตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) โดยปฏิกิริยาทั้งสองนี้มักจะเกี่ยวข้องกับออกซิเจน

แก๊สที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing gas) ซึ่งเป็นแก๊สให้อิเล็กตรอนแก่สิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น สมการที่ (3) มีอะเซทิลีน (C_2H_2) เป็นตัวรีดิวซ์ และ (4) มีอะซิโตน (CH_3COCH_3) เป็นตัวรีดิวซ์ ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์คือ อิเล็กตรอน และเมื่อทำปฏิกิริยากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะทำให้แถบการนำ (conductivity) เพิ่มขึ้น และแถบต้านทาน (resistivity) ลดลง ดังรูปที่ 2.5 (b) ในทางกลับกันหากสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี (P-type) ซึ่งมีช่องว่างของอิเล็กตรอน (hole) อยู่เยอะ ทำให้แถบการนำลดลง และแถบต้านทานเพิ่มขึ้น



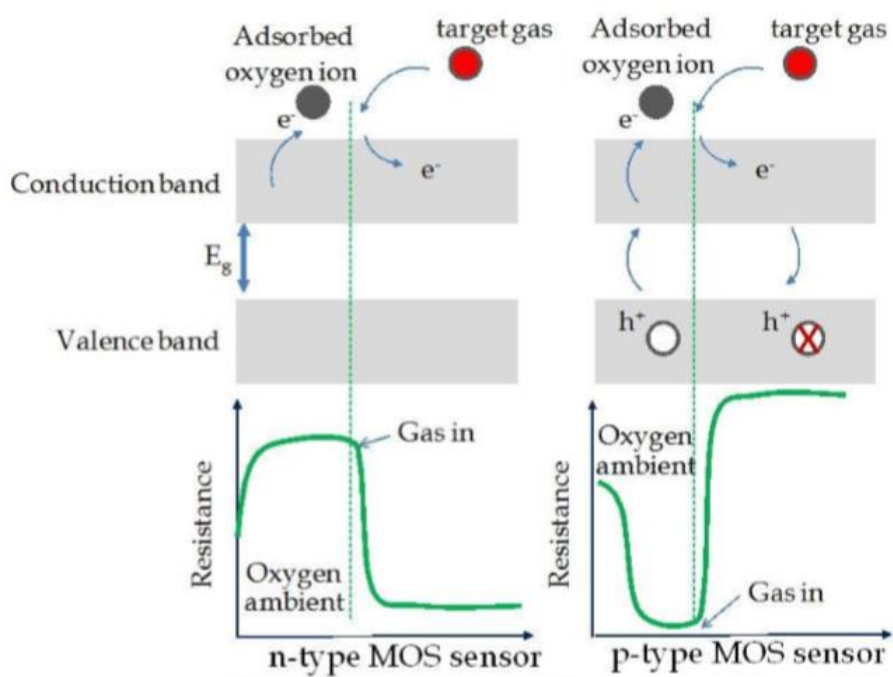
แก๊สที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing gas) ซึ่งตัวรับอิเล็กตรอนจากสิ่งแวดล้อม เมื่อทำปฏิกิริยากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะนั้นจะทำให้แถบการนำ (conductivity) ลดลง และแถบต้านทาน (resistivity) เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.5 (a) ในทางกลับกันหากสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี (P-type) ซึ่งมีช่องว่างของอิเล็กตรอน (hole) อยู่เยอะทำให้แถบการนำเพิ่มขึ้นและแถบต้านทานลดลง

สำหรับฟิล์มบาง CCTO นั้นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะ [34] เมื่อผ่านแก๊สที่มีสมบัติให้อิเล็กตรอน จะทำให้สัญญาณความต้านทานลดลงดังรูปที่ 2.5 (b) และในทางกลับกันหากแก๊สที่ผ่านนั้นมีสมบัติรับอิเล็กตรอนจะทำให้สัญญาณความต้านทานเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.5 (a)

ตัวอย่างกลไกการตรวจจับแก๊สของฟิล์มบาง CCTO ลำดับแรกคือปล่อยแก๊สบริสุทธิ์เข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของฟิล์มบาง เพื่อให้ออกซิเจน (O_2) ที่ปล่อยเข้าไปได้แตกตัวกลายเป็นออกซิเจนที่สถานะดูดซับ (O^{2-}) ดังสมการที่ (5) – (8)



และเมื่อได้ออกซิเจนสถานะดูดซับดังสมการ (5)-(8) แล้วทำให้เมื่อปล่อยแก๊สที่ต้องการตรวจจับเข้าไปสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสถานะดูดซับได้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอิเล็กตรอนออกมาดังสมการที่ (3) , (4) และอื่น ๆ ทำให้สามารถตรวจวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าออกได้ดังที่กล่าวไปข้างต้น สามารถดูรูปประกอบได้ดังรูปที่ 2.6



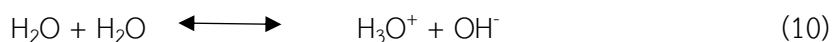
รูปที่ 2.6 การทำปฏิกิริยาบนผิวสารกึ่งตัวนำประเภทต่าง ๆ [35]

2.2.3 กลไกการตรวจจับความชื้น

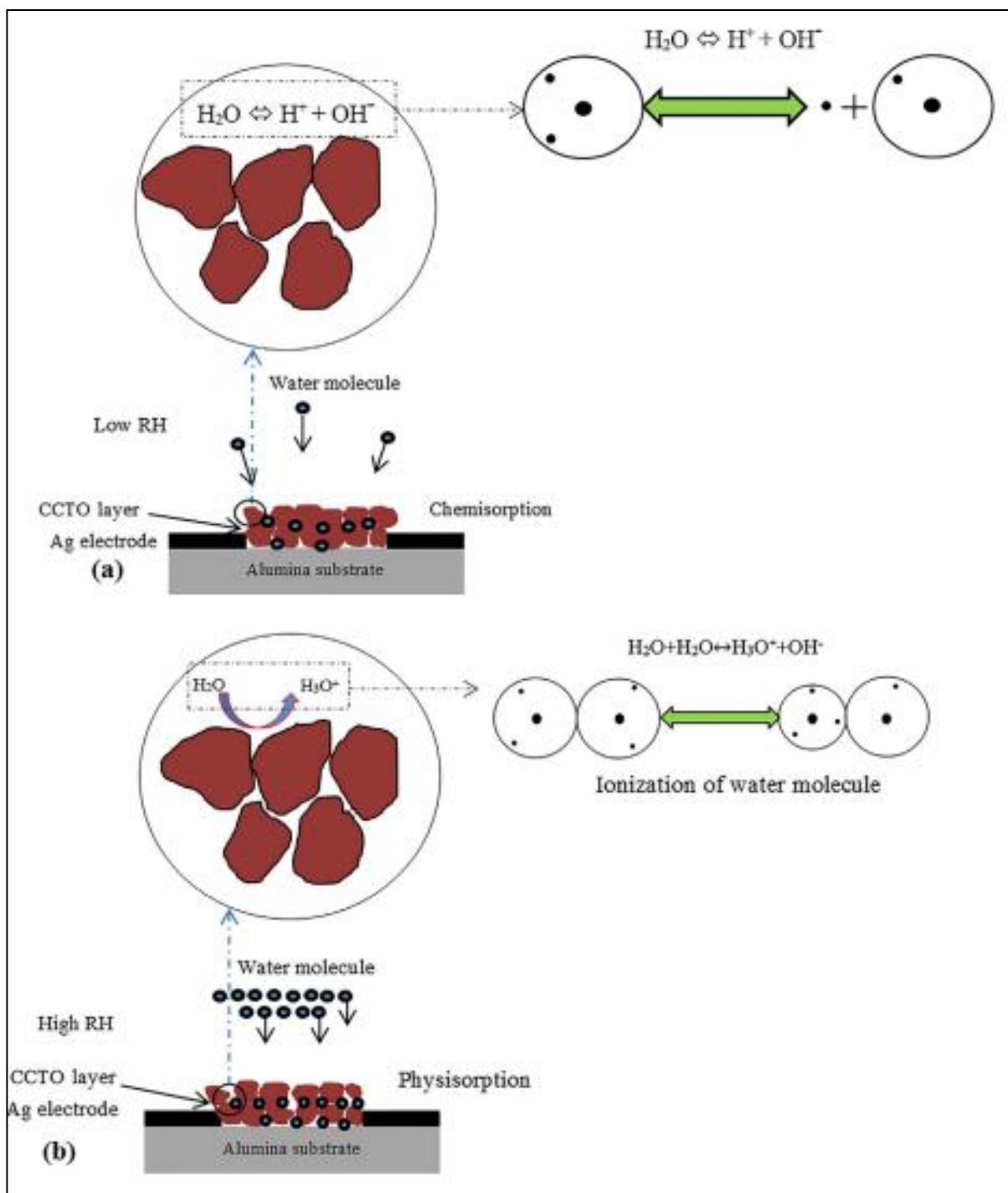
การตรวจจับความชื้นของฟิล์มบาง CCTO นั้นขึ้นอยู่กับกลไกการตรวจจับโมเลกุลของน้ำซึ่งสามารถอธิบายได้จากแผนผังรูปที่ 2.7 จากรูปจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 (a) คือส่วนต้นที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีคือการดูดซับทางเคมี (chemisorption) เมื่อทำการปล่อยความชื้นที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ (<30RH%) เข้าสู่ระบบวัดและเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเข้าไปทำให้โมเลกุลของน้ำทำปฏิกิริยากับผิวหน้าของฟิล์ม ดังสมการที่ (9)



จากสมการจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของโปรตอน (H^+) เสมือนมีการเคลื่อนที่ของประจุเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าและสามารถวัดค่าออกได้ในรูปของความต้านทาน ในส่วนที่ 2 (b) ให้ความชื้นที่ความเข้มข้นสูง ๆ (>60RH%) ลงบนผิวฟิล์มเดิมทำให้หน้าผิวฟิล์มเกิดการซึมน้ำโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดการดูดซับทางกายภาพ (physisorption) คือ จะเปลี่ยนจากดูดซับชั้นเดียวเป็นหลายชั้นแต่การแลกเปลี่ยนประจุยังคงเกิดที่โปรตอน (H^+) กับอนุภาคของน้ำเหมือนเดิมดังในส่วนที่หนึ่ง แต่การก่อตัวขึ้นหลาย ๆ ชั้นของน้ำนั้นทำให้เกิดการแยกออกของโมเลกุลน้ำเป็นกลุ่มไฮโดรเนียม (H_3O^+) ดังสมการที่ (10)



ในส่วนของขั้นตอนนี้จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของโปรตอน (H^+) ที่สถานะกระตุ้นและกลุ่มของไฮโดรเนียม (H_3O^+) จากโมเลกุลของน้ำหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง จึงนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน [36]

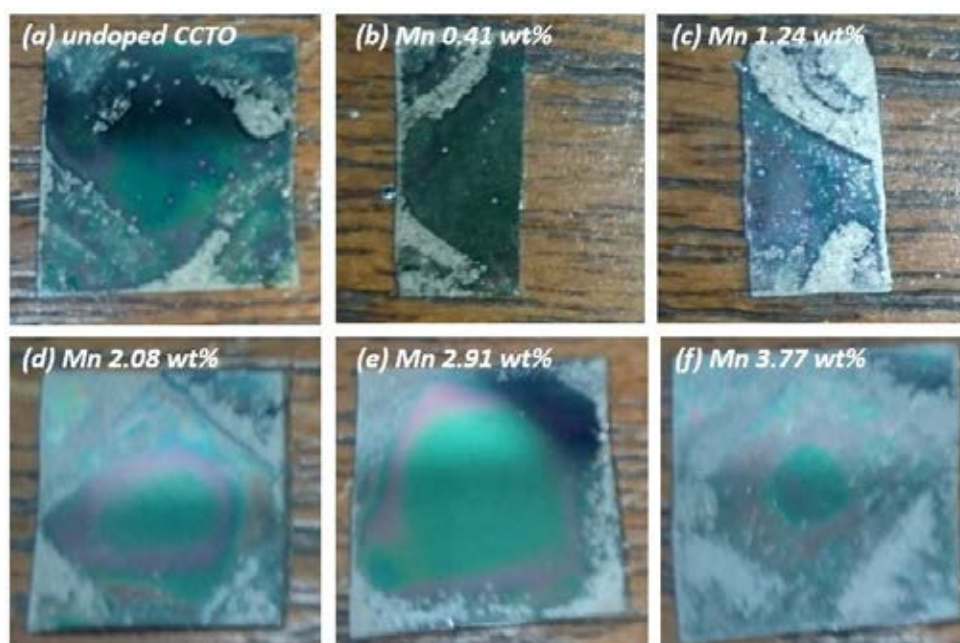


รูปที่ 2.7 แผนภาพกลไกการตรวจจับความชื้นของฟิล์มบาง CCTO [36]

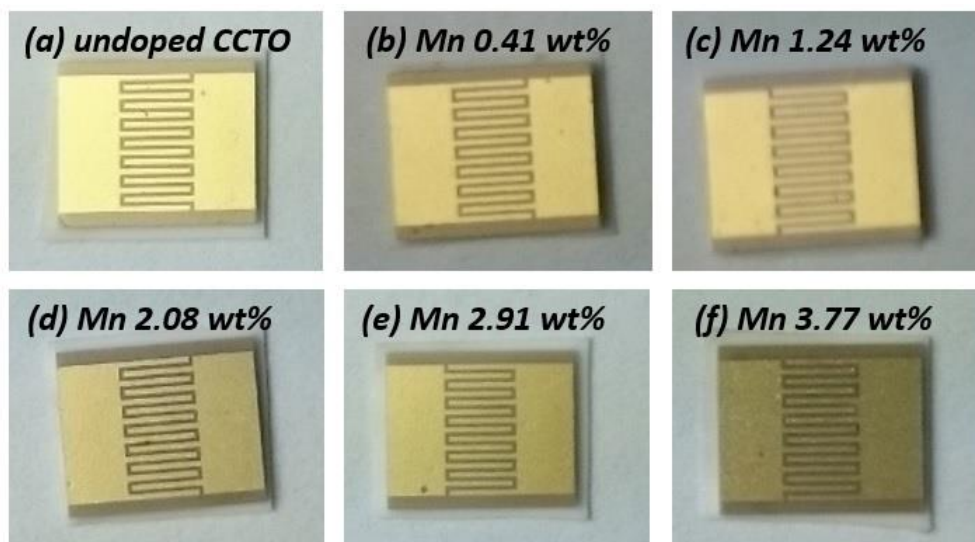
2.3 ผลการทดลองของนายเพชร โจ้ตสารัทกุล [37]

2.3.1 फिल्मที่ได้จากการปลูกฟิล์มด้วยวิธีโซล-เจล

หากสังเกตด้วยตาเปล่า ฟิล์มที่ได้ทั้งบนแผ่นรองรับอลูมินาและซิลิคอน มีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอ และความสม่ำเสมอกระจายออกไปตามขอบฟิล์ม โดยที่ขอบจะมีความสม่ำเสมอลดลง เนื่องจากถูกเหวี่ยงโดยเครื่องเคลือบแบบหมุน ดังรูปที่ 2.8 หากสังเกตต่อไปอีกจะพบว่า ฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นรองรับซิลิคอนที่เจือด้วยแมงกานีส จะมีพื้นที่ความสม่ำเสมอลดลงตามลำดับความเข้มข้นของแมงกานีสที่เจือลงไป และตามจำนวนชั้นของฟิล์มที่ปลูก ดังรูปที่ 2.8 อธิบายได้ว่า เมื่อเจือด้วยความเข้มข้นที่สูงขึ้น ความหนืดของสารละลายจะมากขึ้นเช่นกัน จึงทำให้ความสม่ำเสมอของฟิล์มที่ปลูกลดลง



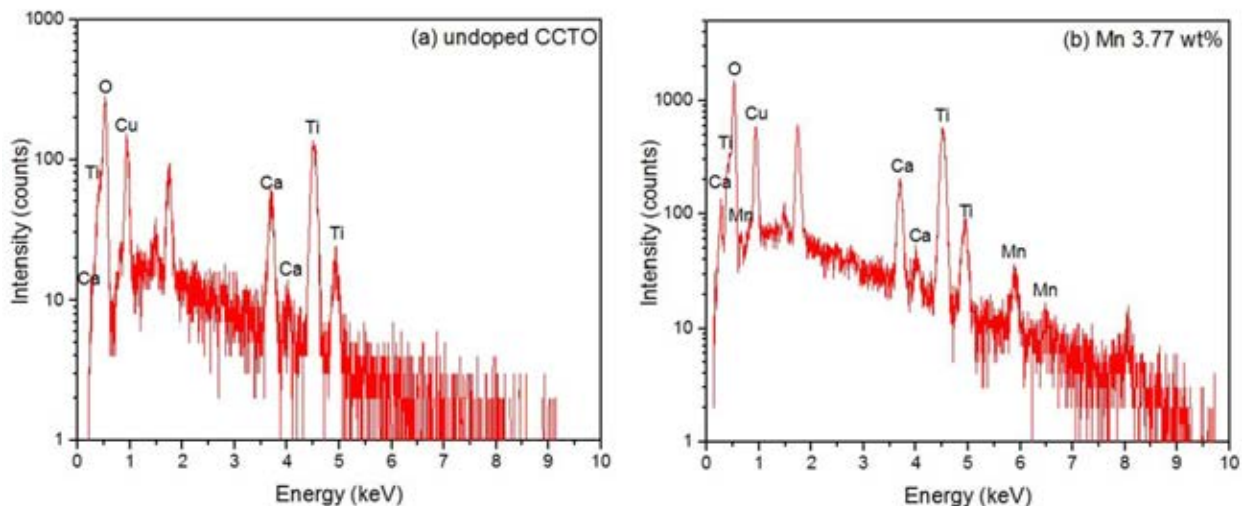
รูปที่ 2.8 ฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นรองรับซิลิคอน (a) ฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ (b) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 0.41 wt% (c) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% (d) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 2.08 wt% (e) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 2.91 wt% และ (f) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 3.77 wt%



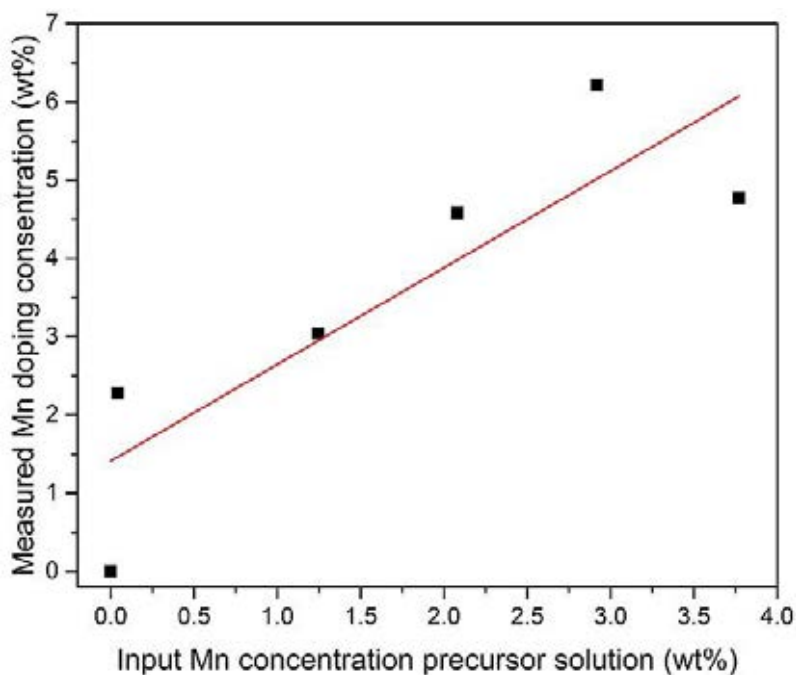
รูปที่ 2.9 ภาพฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นรองรับอลูมินา (a) ฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ (b) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 0.41 wt% (c) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% (d) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 2.08 wt% (e) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 2.91 wt% และ (f) ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 3.77 wt% เนื้อฟิล์มจะเป็นบริเวณขอบและตรงซี่หวี

2.3.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

จากรูปที่ 2.10 สามารถยืนยันได้ว่าฟิล์ม CCTO ประกอบไปด้วยธาตุต่าง ๆ คือ แคลเซียม ทองแดง ไททาเนียม และออกซิเจน โดยจะพบสเปกตรัมของแมงกานีสเฉพาะกับฟิล์มที่เจือแมงกานีสเข้าไป สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแมงกานีสที่เตรียมเป็นสารละลายกับความเข้มข้นของแมงกานีส พบความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นแต่มีข้อมูลบางจุดที่ไม่เป็นไปตามแนวโน้มเส้นตรง ดังรูปที่ 2.11 เนื่องด้วยการฟิล์มถูกปลูกโดยวิธีโซล-เจล ซึ่งควบคุมปริมาณความเข้มข้นได้ค่อนข้างดี แต่จะควบคุมได้ยากตอนปลูกฟิล์ม



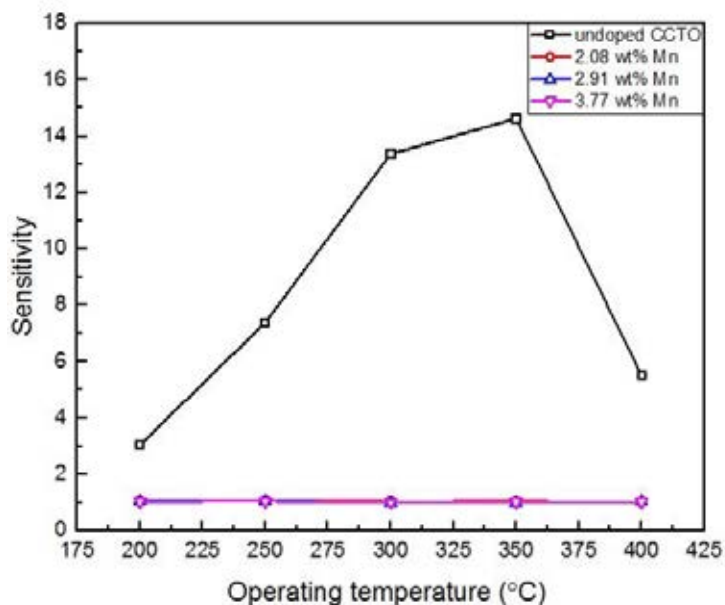
รูปที่ 2.10 สเปกตรัมของ EDX ที่ได้จาก (a) फिल्म CCTO บริสุทธิ์ (b) फिल्म CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 3.77 wt%



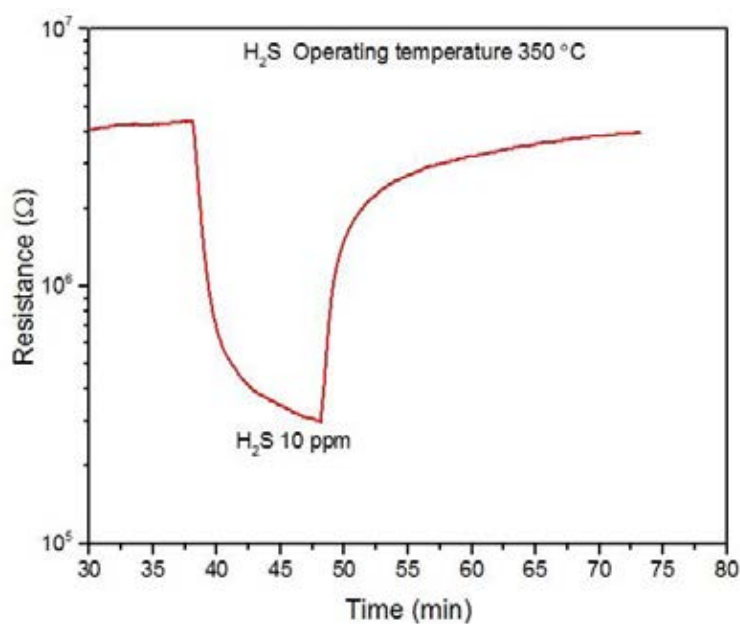
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแมงกานีสที่เตรียมเป็นสารละลายกับความเข้มข้นของแมงกานีสที่วัดได้

2.3.3 ผลการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

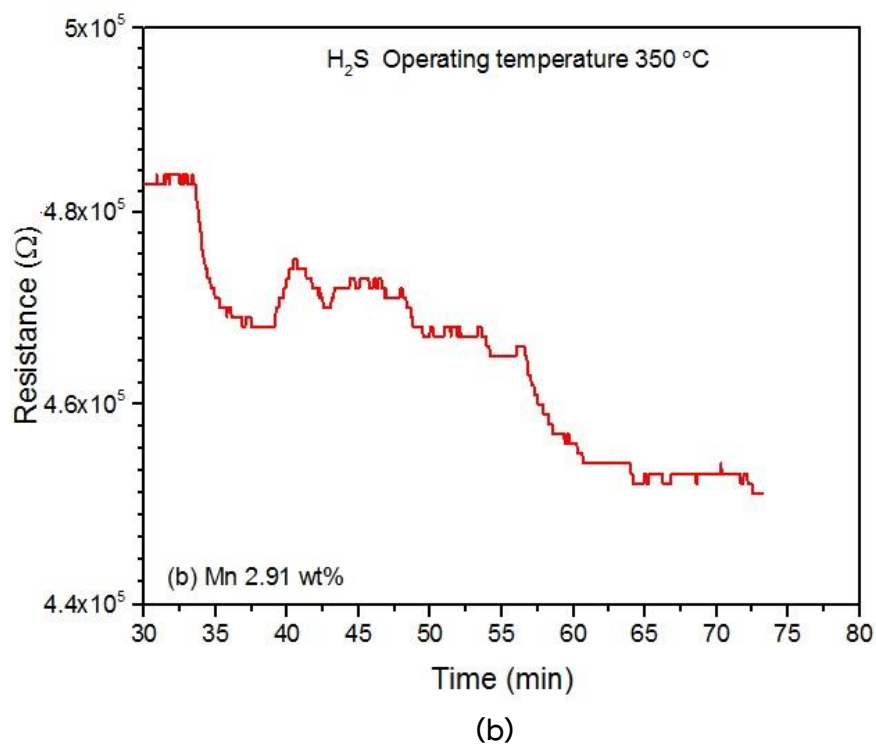
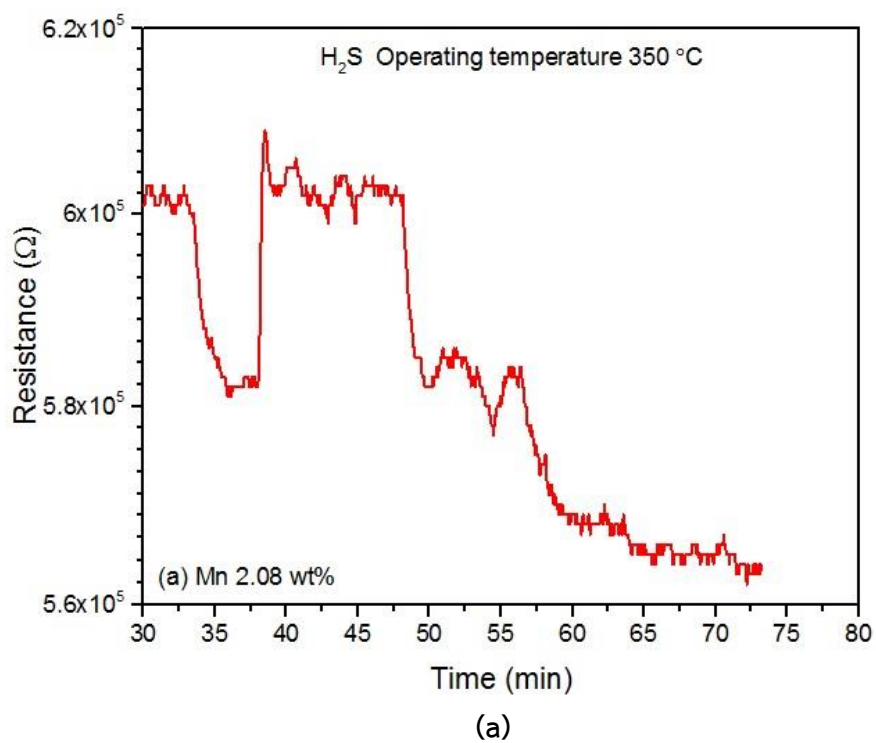
ในส่วนนี้จะเริ่มจากการหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการตอบสนองก่อน โดยจะผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสูงสุด และเริ่มที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงลดมาถึง 200 องศาเซลเซียส



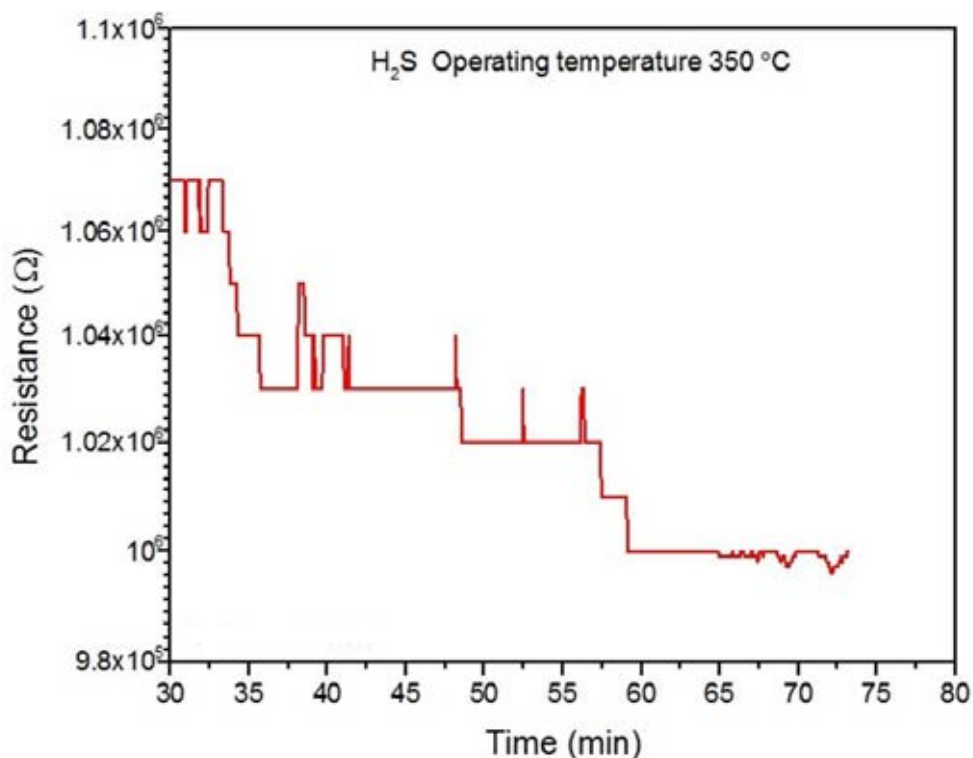
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 10 ppm กับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.13 ความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10 ppm ที่อุณหภูมิ 350 °C ในฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์



รูปที่ 2.14 ความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10 ppm ที่อุณหภูมิ 350 °C ในฟิล์ม CCTO (a) เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt%(b) เจือด้วยแมงกานีส 2.91 wt%

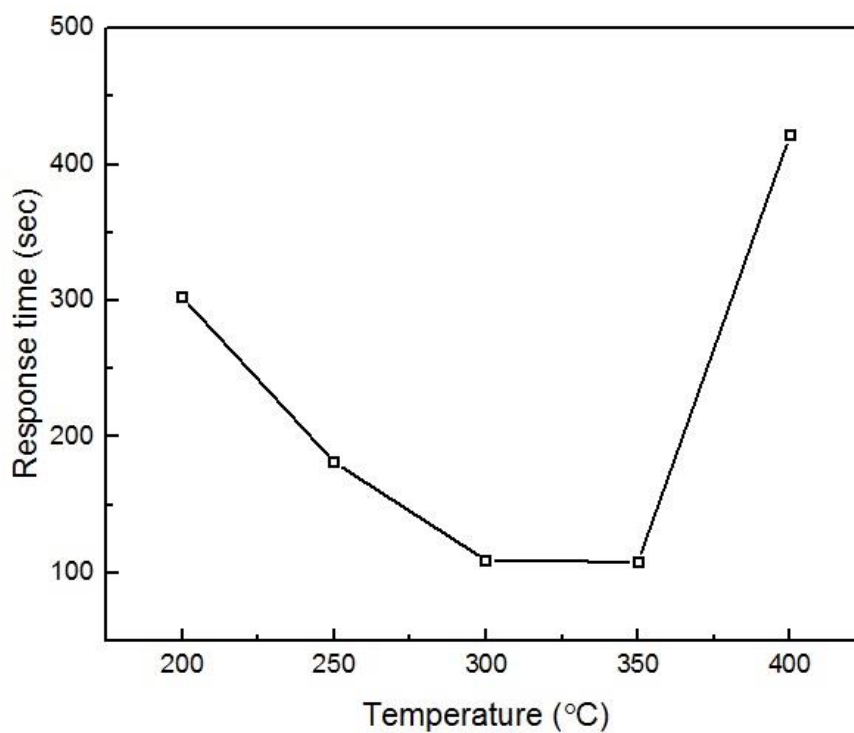


รูปที่ 2.15 ความต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10 ppm

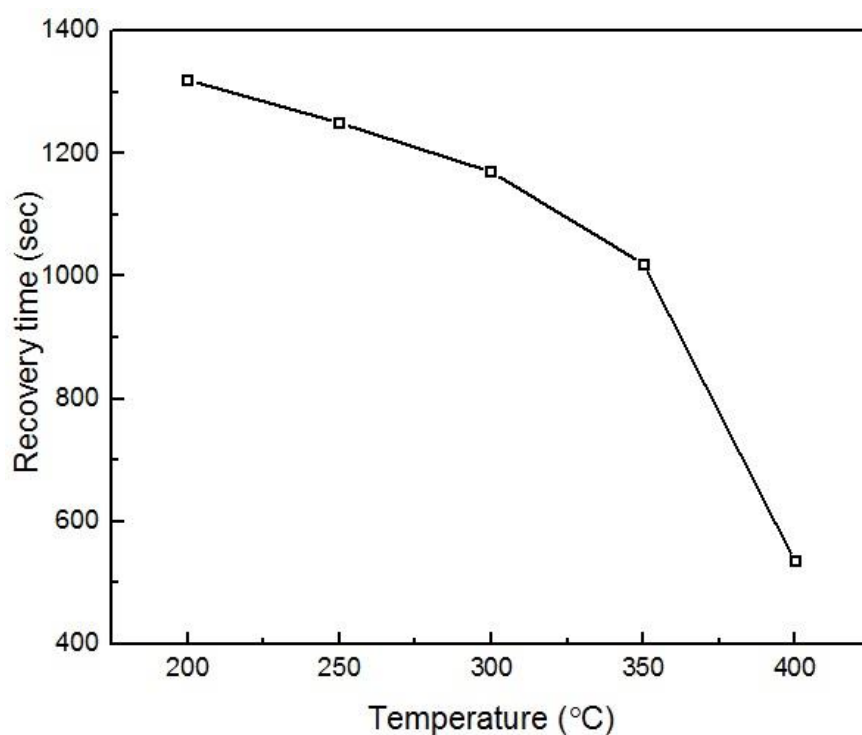
ที่อุณหภูมิ 350 °C ในฟิล์ม CCTO เจือด้วยแมงกานีส 3.77% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 2.12 จะพบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัดการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เมื่อพิจารณาจากฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังรูปที่ 2.13 โดยมีค่าความไวต่อการตอบสนองคือ 14.5 ซึ่งมีค่าความไวสูงที่สุดสำหรับฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ สำหรับฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสจะมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานน้อยมาก ดังรูปที่ 2.14 และ รูปที่ 2.15 โดยมีค่าความไวที่น้อยมากเกือบเท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าการเจือแมงกานีสเข้าไปส่งผลทำให้ค่าความไวต่อการตอบสนองของแก๊สลดลง

สำหรับเวลาการตอบสนองของฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ จะพบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำที่สุด สอดคล้องกับค่าความไวที่สูงที่สุด ณ อุณหภูมิดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.16 แต่สำหรับเวลาการฟื้นคืนสภาพมีค่าต่ำที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.17

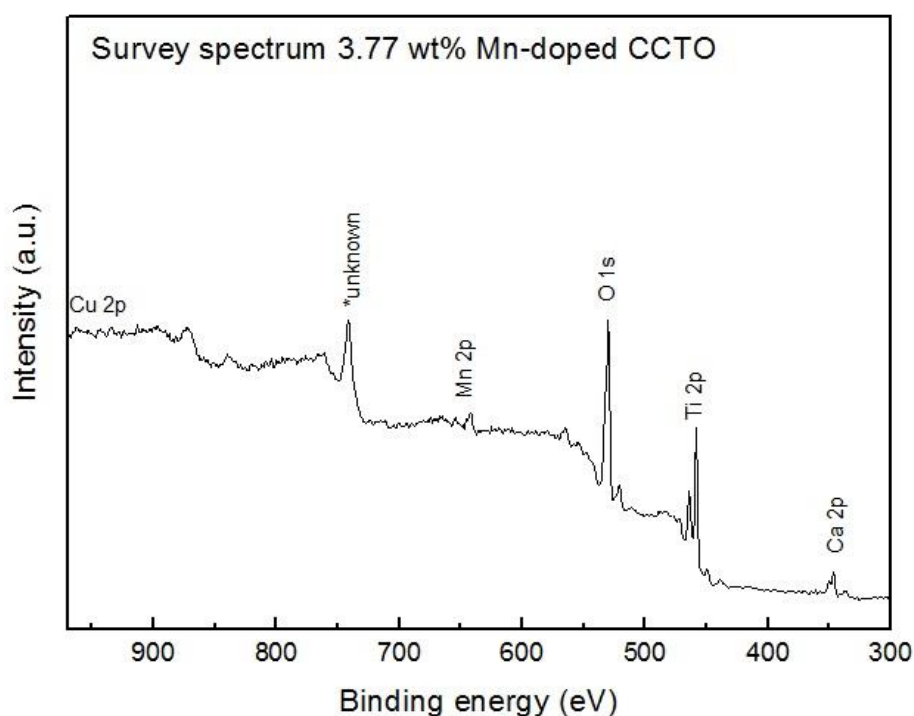


รูปที่ 2.16 เวลาการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 10 ppm กับอุณหภูมิของฟิล์ม CCTO บริษัท

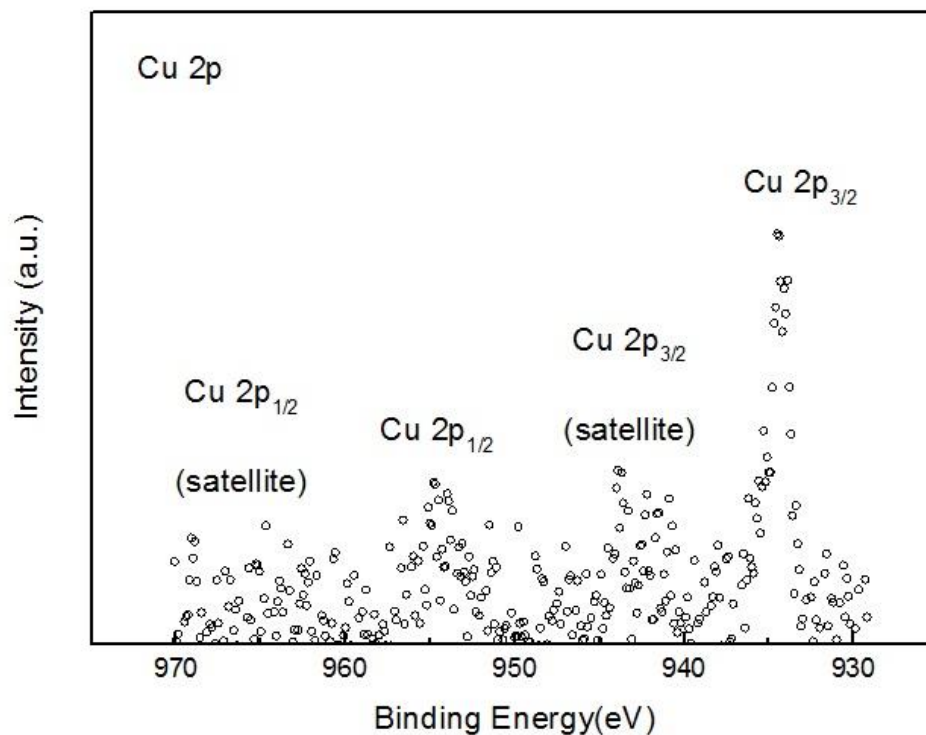


รูปที่ 2.17 เวลาการฟื้นคืนสภาพต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 10 ppm กับอุณหภูมิของฟิล์ม CCTO บริษัท

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาทำให้ข้าพเจ้าคาดหวังไว้ว่า เมื่อเจือแมงกานีสที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้ฟิล์มตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ดีขึ้น จากการศึกษาโครงงานวิจัยของ S.Prakenkrung [38] พบว่ามีสเปกตรัมที่วิเคราะห์ไม่ได้ (unknown) จากการวิเคราะห์บนพื้นผิว (XPS) ของฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 3.77% โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 2.18 จากการวิเคราะห์เพิ่มเติมพบว่าเส้นสเปกตรัมของทองแดงในฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสมีทั้งหมด 4 ยอด ดังรูปที่ 2.19 แต่เป็นสัญญาณที่ไม่ชัด อีกทั้งยังกระจัดกระจาย จึงไม่สามารถเขียนกราฟได้ ตรงส่วนนี้อธิบายได้ว่าทองแดงในฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้น มีน้อยกว่าฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ เนื่องมาจากกระบวนการเตรียมฟิล์มที่มีการลดปริมาณทองแดงแล้วเพิ่มแมงกานีส จึงส่งผลต่อกลไกการตรวจจับแก๊สของฟิล์ม CCTO โดยตรง ดังที่กล่าวไว้ในส่วนทฤษฎีเพราะเมื่อทองแดงลดลงทำให้เกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้น้อยลงไปตามด้วย ถึงแม้ว่าแมงกานีสจะเป็นตัวเร่งก็ตามซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความไวต่อการตอบสนองของฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์ที่มีค่าสูงกว่าฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส และการที่ฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสมีความไวต่อการตอบสนองที่ต่ำกว่าฟิล์ม CCTO บริสุทธิ์มากเป็นเพราะสาเหตุข้างต้นเช่นกัน



รูปที่ 2.18 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์บนพื้นผิวของฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 3.77% โดยน้ำหนัก [38]



รูปที่ 2.19 สเปกตรัมอย่างละเอียดของสัญญาณทองแดงในฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 3.77% โดยน้ำหนัก [38]

เนื่องผลการทดลองเดิมของนายพร โจลัดสาทกุล [37] นั้นพบว่าเมื่อได้ทำการทดสอบแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไปนั้นพบว่า ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นมีการตอบสนองที่ไม่ดีเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับฟิล์มบาง CCTO ที่บริสุทธิ์ และจากการทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ ก็พบว่าฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นอาจจะสามารถตรวจจับกับแก๊สชนิดอื่น ๆ ได้ และอาจจะสามารถตรวจจับความชื้นได้ ผู้วิจัยจึงนำฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสมาศึกษาและพัฒนาต่อยอด

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการ

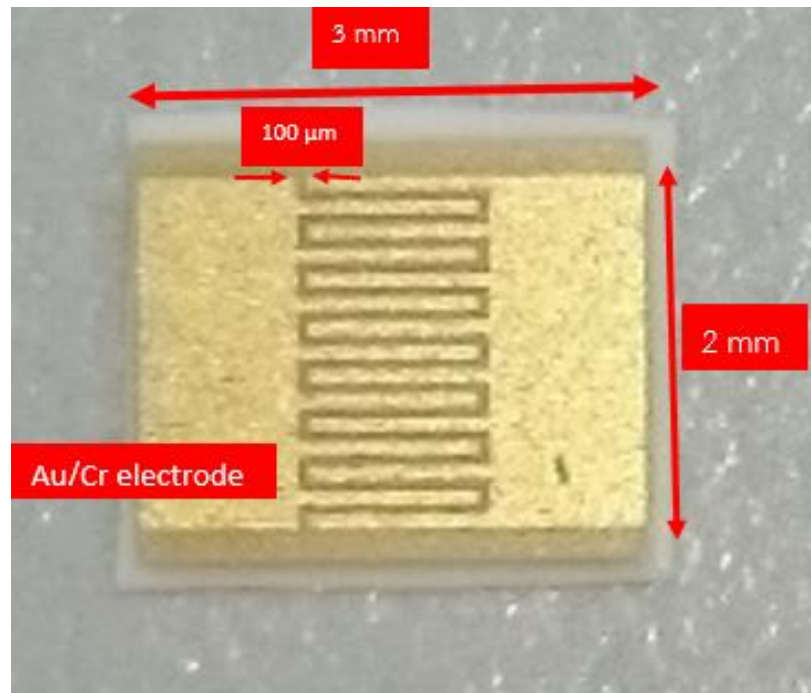
บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการ

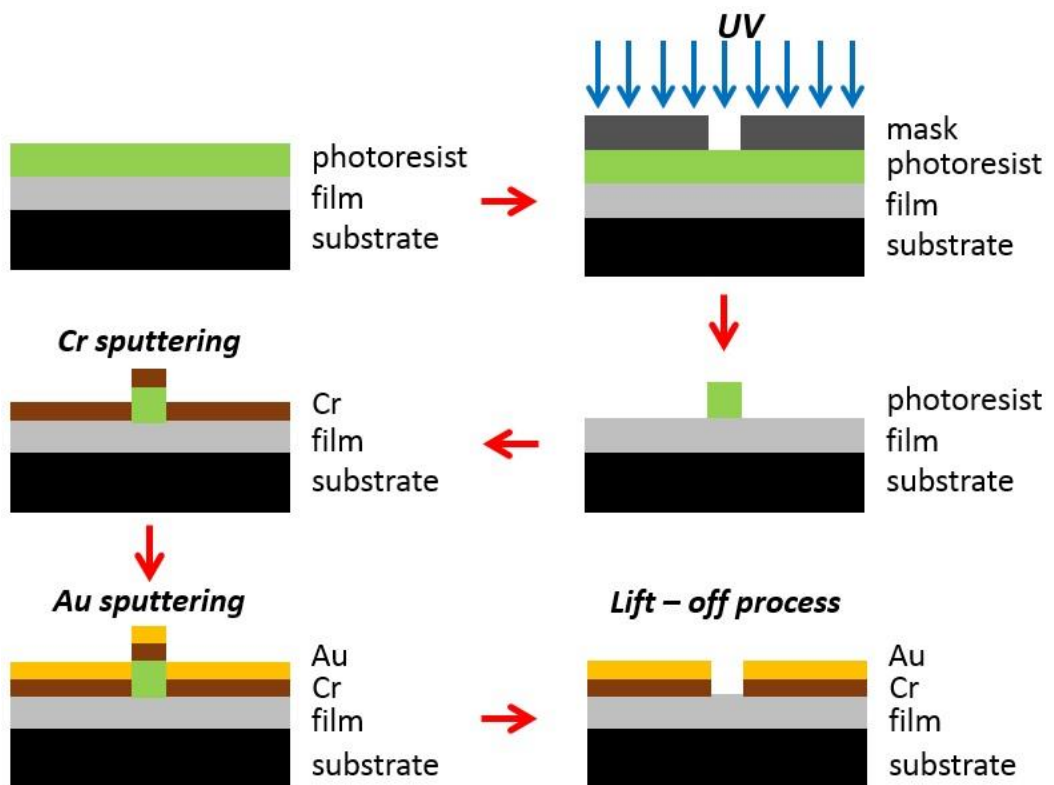
ในบทนี้จะอธิบายขั้นตอนและวิธีการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สต่าง ๆ และ การทดสอบการตอบสนองต่อความชื้นโดยขั้นตอนส่วนใหญ่ของทั้ง 2 ส่วนจะคล้ายกันต่างกันที่เวลา และ ปริมาณที่ใช้ในการทดสอบ โดยท้ายที่สุดจะมีขั้นตอนการทำความสะอาดเซนเซอร์ฟิล์มบางก่อนที่จะนำไปทำการทดสอบซ้ำเพื่อผลที่แน่นอนและชัดเจน

3.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เซนเซอร์แก๊สที่เตรียมจากแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO)
2. เซนเซอร์แก๊สที่เตรียมจากแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนต (CCTO) เจือด้วยแมงกานีส (Mn)
3. แก๊สที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ มีเทน (CH_4), อะซีโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), อะซีทิลีน (C_2H_2), เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), ไฮโดรเจน (H_2), ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และ อากาศบริสุทธิ์ (H_2O)
4. ท่อนำแก๊ส
5. อุปกรณ์ใช้ควบคุมการไหลของแก๊ส (mass flow controller)
6. ท่อปิด (Chamber)
7. ขั้วไฟฟ้า (ขั้วอิเล็กโทรด) และสายไฟ
8. มัลติมิเตอร์
9. กล้องจุลทรรศน์
10. ตัวทำความร้อน (Heater)
11. คอมพิวเตอร์
12. ขวดใส่น้ำเพื่อผลิตไอน้ำ

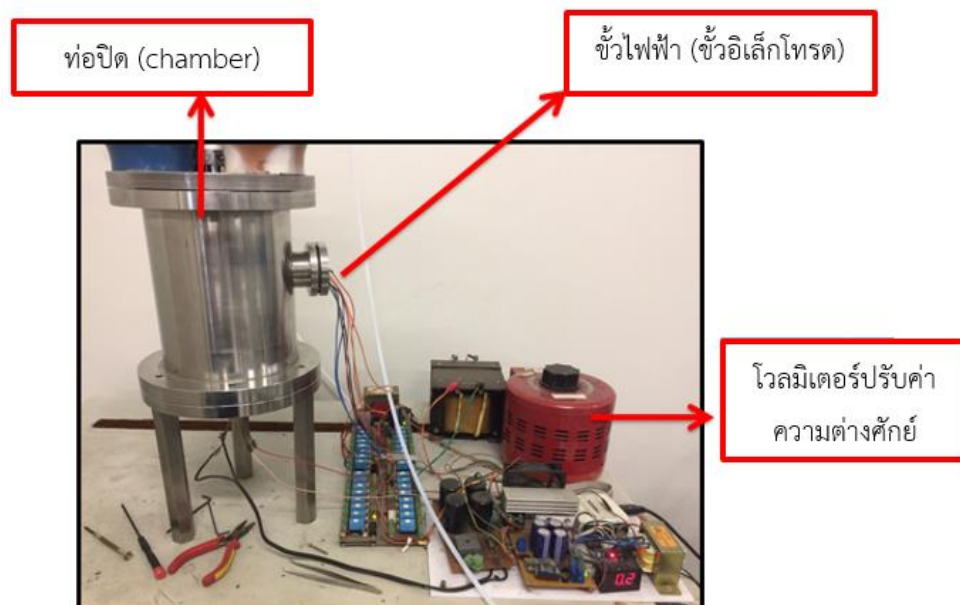


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของเซนเซอร์แก๊สที่ผลิตจาก CCTO โดยมีขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร และขนาดความกว้างของช่องว่างที่เป็นผิวหน้าของฟิล์มบาง 100 ไมโครเมตร โดยเคลือบผิวด้วยเงิน (Au) และโครเมียม (Cr)



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า

รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของเซนเซอร์แก๊สที่ผลิตจาก CCTO โดยมีขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร และจำเป็นต้องสร้างขั้วไฟฟ้าลงบนผิวของฟิล์มโดยใช้วิธีการลิโทกราฟีเนื่องจากการตอบสนองต่อแก๊สจะวัดออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยจะทำการเคลือบสารไวแสงชนิดบวก (positive photoresist) ลงบนผิวของฟิล์มก่อน จากนั้นจะนำหน้ากาก (mask) ที่เป็นลวดลายคล้ายซี่หวีวางบนสารไวแสงแล้วฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ดังแสดงในรูป 3.2 จากนั้นนำไปละลายในน้ำยาล้างสารไวแสง (developer) ส่วนของสารไวแสงที่ไม่สัมผัสรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะหลุดออกไป เหลือเพียงส่วนที่สัมผัสรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นทำการสปัตต์ (sputtering) โครเมียมแล้วค่อยสปัตต์ทองภายหลัง จะเกิดเป็นชั้นโครเมียมซึ่งหนาประมาณ 50 นาโนเมตร กับชั้นทองซึ่งหนาประมาณ 200 นาโนเมตร แยกชั้นกัน ที่ต้องทำเช่นนี้เพราะว่าโครเมียมจะทำให้ทองยึดกับผิวของฟิล์มได้ดีขึ้น [39] จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการลิฟออฟ (lift-off) ซึ่งจะล้างสารไวแสงออกทั้งหมด ดังนั้นส่วนของทองที่อยู่บนสารไวแสงจะถูกล้างออกไปด้วย ซึ่งทำให้ได้ลวดลายขั้วไฟฟ้าตามต้องการ



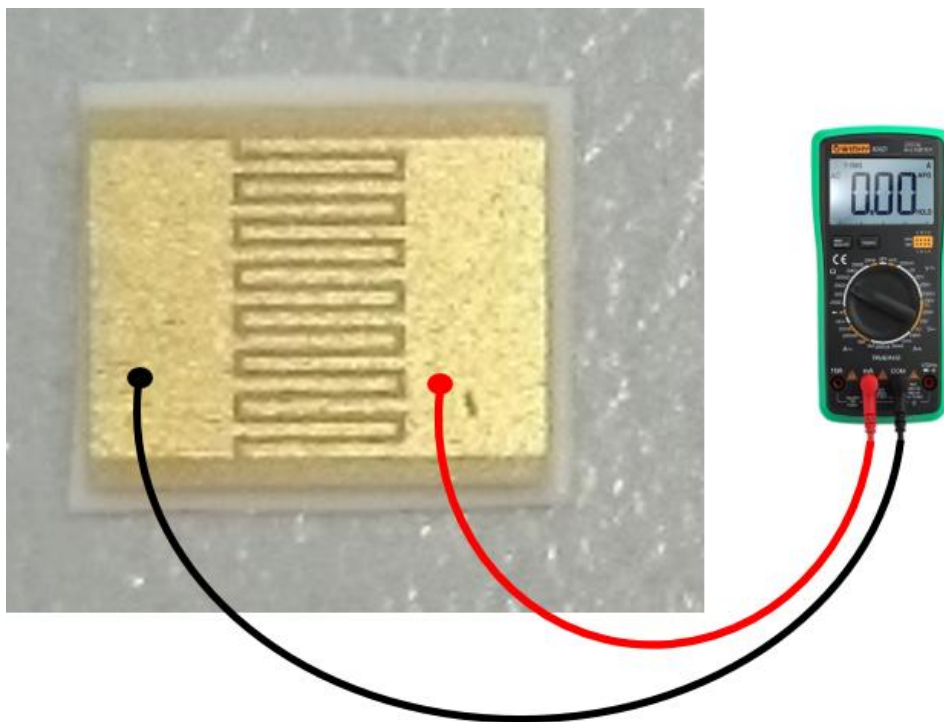
รูปที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยห้องปิดภายในมีตัวให้ความร้อนอยู่ และโวลมิเตอร์ปรับค่าความต่างศักย์เพื่อควบคุมความร้อน ขั้วไฟฟ้าและแผงวงจรต่าง ๆ

รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยห้องปิดภายในมีตัวให้ความร้อนและฐานรองที่เป็นเซรามิกสำหรับวางเซนเซอร์ที่ต้องการโพรบ (ต่อขั้วไฟฟ้า) ต่อด้วยสายไฟฟ้าที่สามารถเชื่อมออกมานอกห้องปิดและต่อเข้าสู่แผงวงจรที่ระบุช่องสัญญาณ (channel) โดยมีโวลต์มิเตอร์ปรับค่าความต่างศักย์เพื่อควบคุมความร้อนภายในห้องปิด

3.2 วิธีการดำเนินการ

3.2.1 การตรวจสอบการลัดวงจรของเซนเซอร์

1.การทดสอบด้วยมัลติมิเตอร์



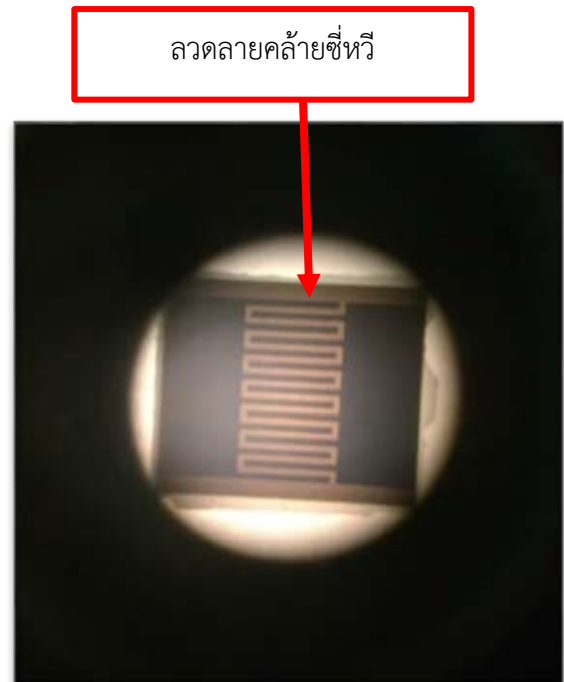
รูปที่ 3.4 การตรวจสอบการลัดวงจรด้วยมัลติมิเตอร์ที่เซนเซอร์ฟิล์มบาง

รูปที่ 3.4 แสดงการตรวจสอบการลัดวงจรเป็นการตรวจสอบเบื้องต้นโดยต่อมัลติมิเตอร์แต่ละขั้วเข้าไปยังตำแหน่งจุดสีดำและสีแดงของเซนเซอร์ฟิล์มบาง หลังจากนั้นจะมีการตั้งค่ามัลติมิเตอร์ไปยังตำแหน่งการวัดความต้านทาน และอ่านค่าที่หน้าจอของมัลติมิเตอร์ ค่าความต้านทานที่อ่านได้ถ้าหากเป็นค่า 0.00 ถึง 10 โอห์มแสดงว่าเซนเซอร์นี้มีการลัดวงจร ดังนั้นค่าความต้านทานที่อ่านได้ควรจะเป็น OL (overload) ซึ่งในทางปฏิบัติค่าความต้านทานมีค่าสูงมากเราสามารถวัดได้จากอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีความละเอียดกว่ามัลติมิเตอร์

2. การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์



(a)



(b)

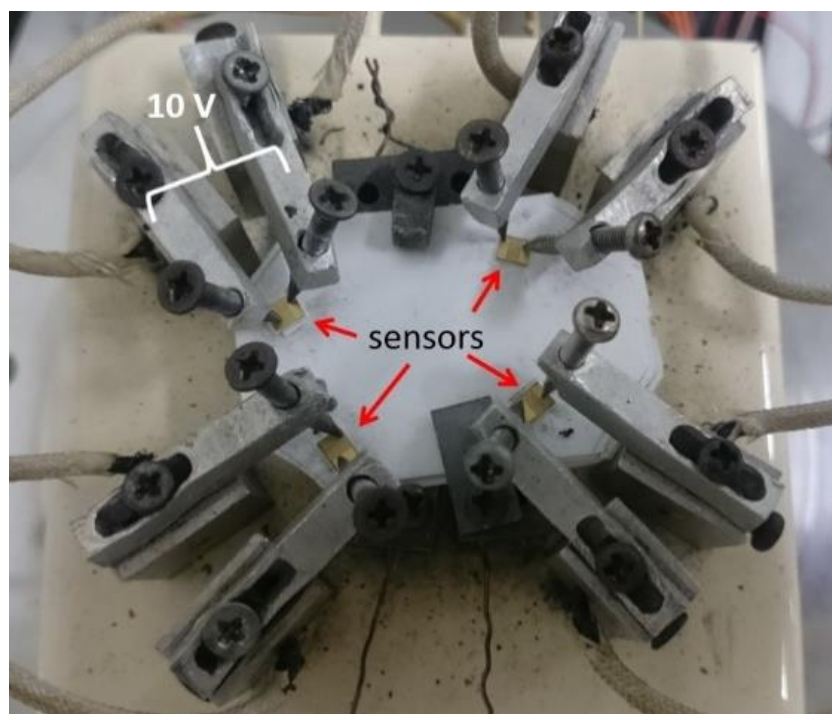
รูปที่ 3.5 (a) กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้สำหรับดูพื้นผิวเซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม

(b) ลักษณะฟิล์มที่สามารถสังเกตเห็นได้

จากรูปที่ 3.5 นอกจากจะมีการตรวจสอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์แล้วเรายังสามารถตรวจสอบได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์โดยสังเกตความคมชัดของขอบช่องว่างที่เป็นส่วนของฟิล์มบางที่มีลักษณะคล้ายซี่หวี ถ้าหากขอบของช่องว่างนี้ไม่มีความคมชัดจะทำให้พื้นผิวสัมผัสของฟิล์มบางจะไม่เท่ากันทุกบริเวณของลวดลายซี่หวี หรือผิวสัมผัสจะใหญ่กว่าที่คาดหวัง (ควรเท่ากับช่องว่างของมาร์ค (mask) ที่ใช้ในขณะฉายรังสี UV ดังรูปที่ 3.4 นั้นหมายความว่าในขั้นตอนการทำลิโธกราฟีและการลิฟออฟมีความผิดพลาดเกิดขึ้นโดยอาจจะเกิดจากการที่ฉายรังสี UV นานเกินไปเป็นต้น)

3.2.2 การนำเซนเซอร์ไปทดสอบการตอบสนองต่อแก๊ส

1 การต่อขั้วไฟฟ้า (การโพรบ)



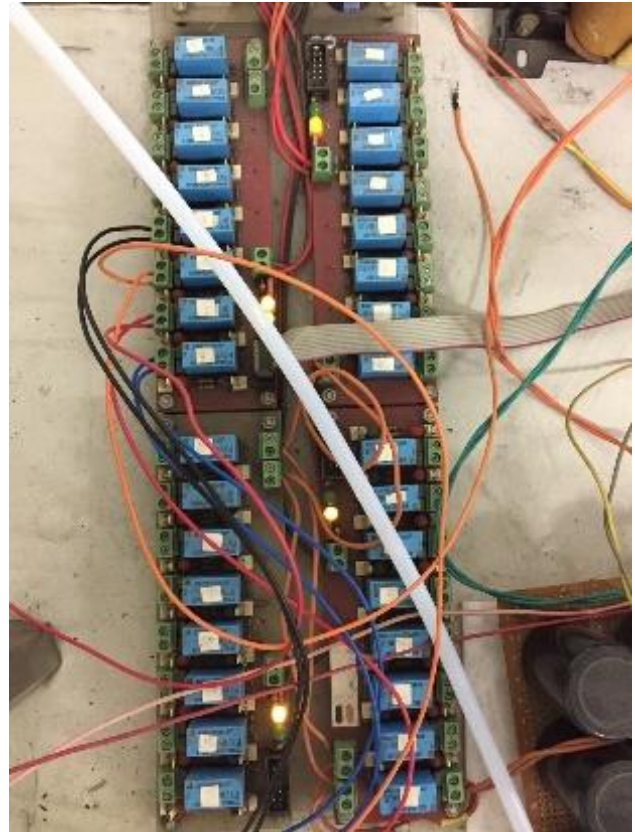
รูปที่ 3.6 การต่อขั้วไฟฟ้าโดยแต่ละที่ตัวเซนเซอร์ในท่อปิด

1. ทำการต่อขั้วไฟฟ้า (การโพรบ) โดยนำขั้วไฟฟ้ามารวมที่เซนเซอร์แต่ละตัวอย่าง ลักษณะการโพรบ จะใช้สกรูที่มีปลายแหลมและใช้ไขควงค้อย ๆ หมุนจนสกรูนั้นแตะกับส่วนอิเล็กทรอนิกส์บนตัวเซนเซอร์ ดังรูปที่ 3.6 โดยในแต่ละรอบสามารถวัดเซนเซอร์ 4 ตัว ซึ่งในการทดลองนี้จะให้ 1 ตัวเป็นเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และอีก 3 ตัวเป็นเป็นเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส (Mn) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ โดยเซนเซอร์ทุกตัวจะต้องผ่านการตรวจสอบการลัดวงจร ดังในหัวข้อ 3.2.1

2. ต่อสายไฟที่เชื่อมอยู่กับสกรูที่ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 3.6 ออกจากท่อปิดผ่านช่องรอยต่อระหว่างสายไฟจากขั้วอิเล็กทรอนิกส์และสายไฟเข้าสู่แผงวงจรดังรูปที่ 3.7 (a) โดยในการต่อสายไฟเข้าแผงวงจรจะต้องคำนึง ถึงช่องสัญญาณที่แผงวงจร เช่น เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ต่อเข้าด้วยช่องสัญญาณที่ 1 และ เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส (Mn) ที่ความเข้มข้น 0.41 wt% ต่อเข้าที่ช่องสัญญาณที่ 2 เป็นต้น เป็นการระบุว่าสัญญาณของเซนเซอร์แต่ละตัว โดยแสดงรูปแผงวงจรดังรูปที่ 3.7 (b)



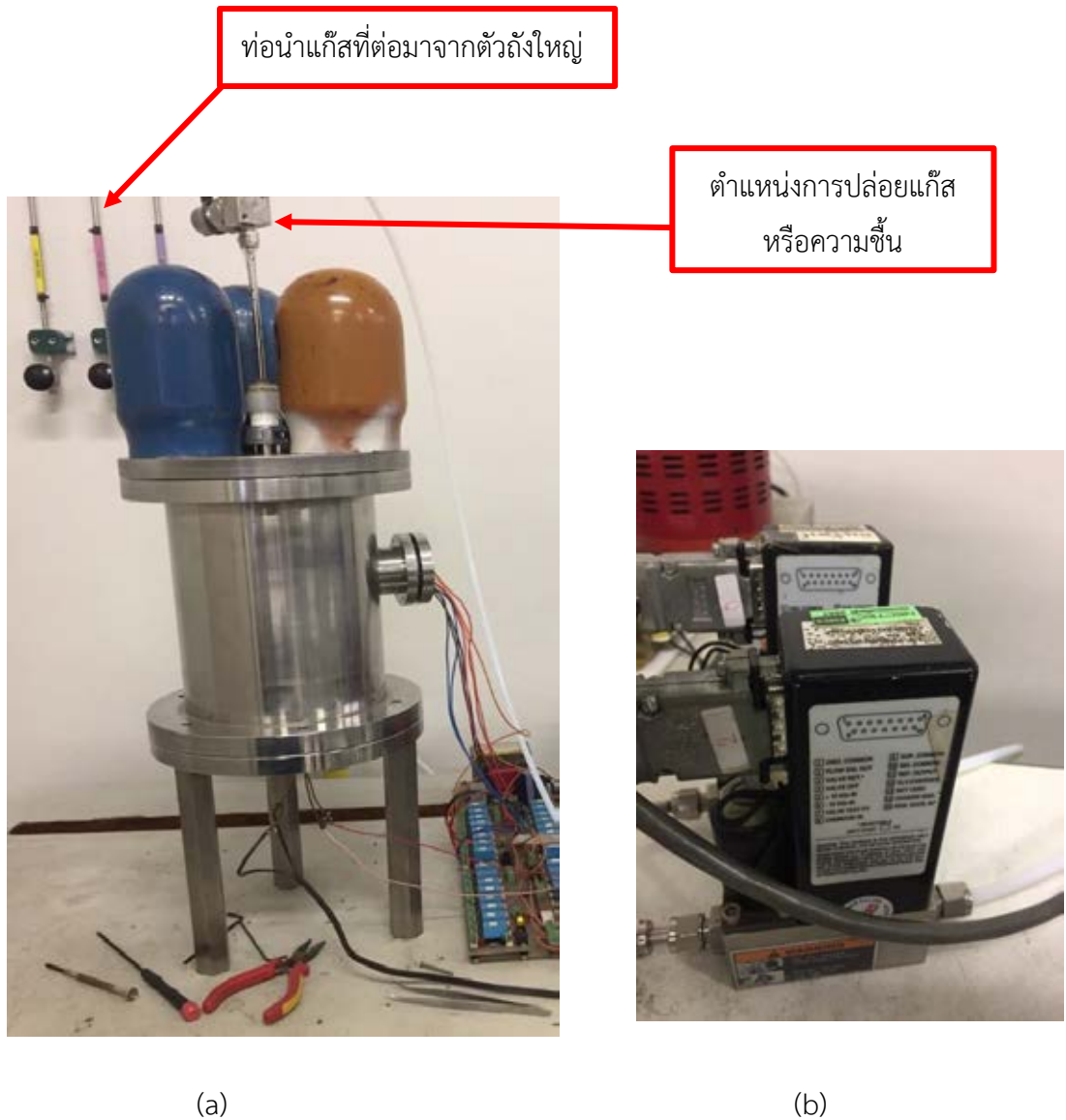
(a)



(b)

รูปที่ 3.7 (a) การต่อขั้วไฟฟ้าเข้าสู่แผงวงจร (b) แผงวงจร

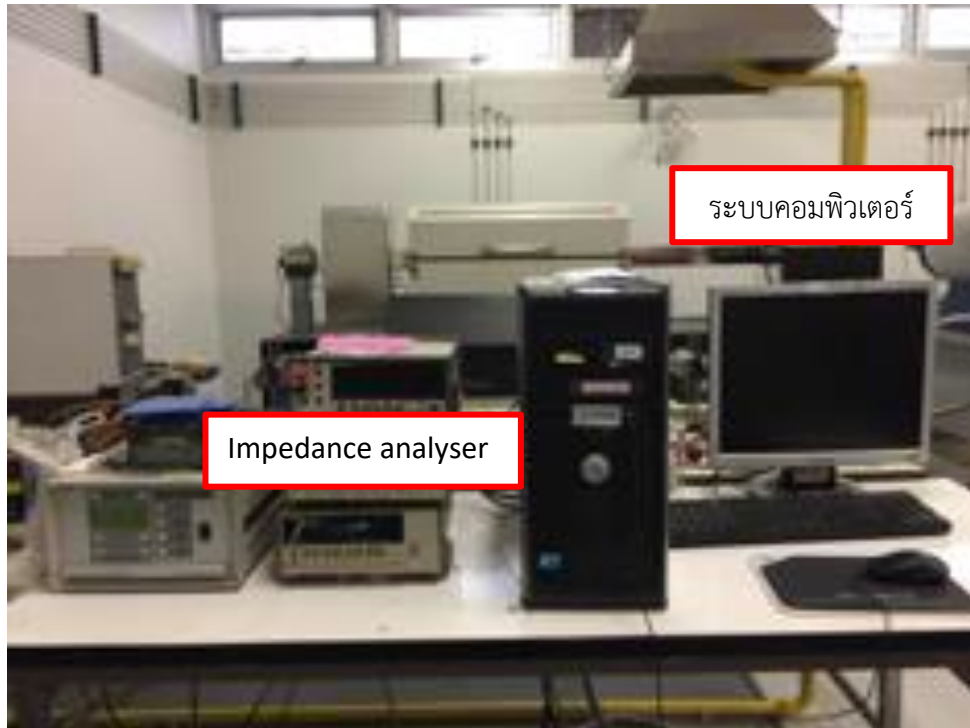
3. เปิดแก๊สจากตัวถังใหญ่ในห้องเก็บแก๊สชนิดต่างผ่านทางท่อ นำแก๊สที่ระบุไว้ในรูปที่ 3.8 (a) เข้าสู่อุปกรณ์ใช้ควบคุมการไหลของแก๊ส (mass flow controller) รูปที่ 3.8 (b) และต่อเข้าสู่ช่องด้านบนของท่อปิดที่ตำแหน่งที่ระบุไว้ในรูปที่ 3.8



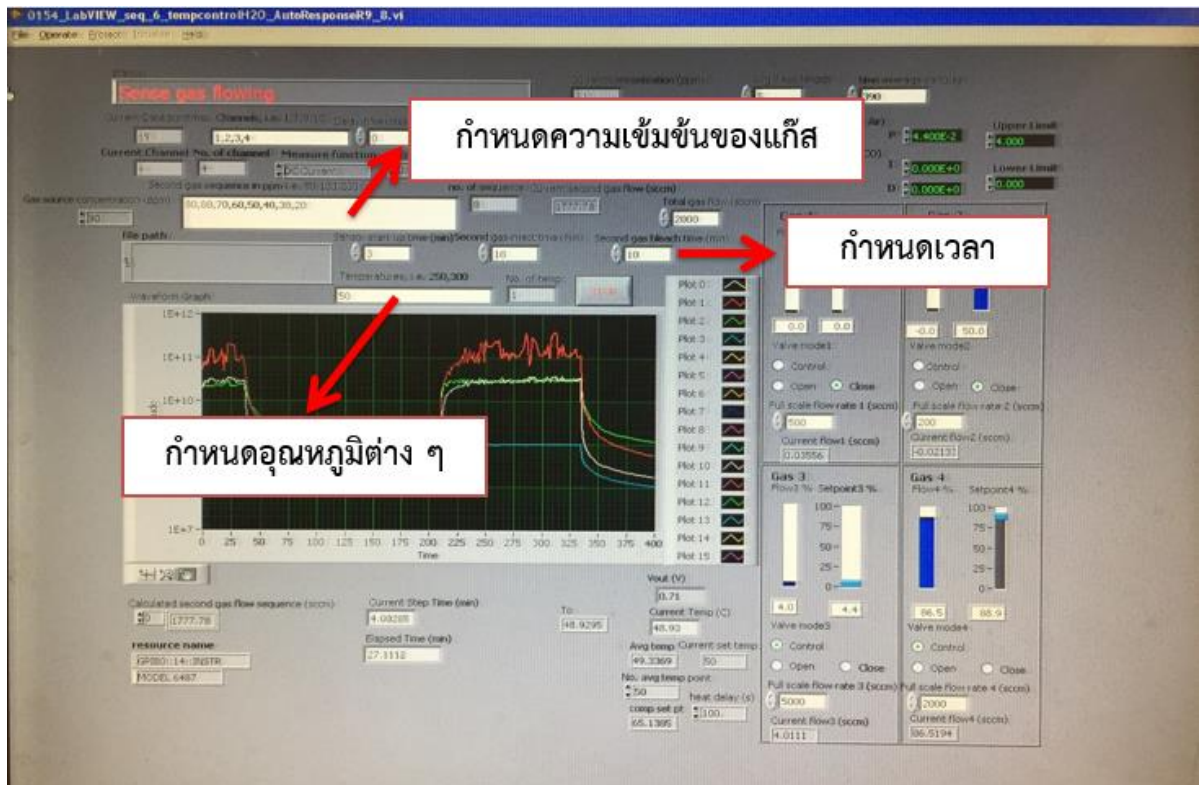
รูปที่ 3.8 (a) ระบุตำแหน่งการต่ออุปกรณ์ใช้ควบคุมการไหลของแก๊สเข้าสู่ท่อปิดและท่อ นำแก๊ส
 (b) อุปกรณ์ใช้ควบคุมการไหลของแก๊ส (mass flow controller)

2. ส่วนของโปรแกรม

1. ติดตั้งระบบคอมพิวเตอร์ และเครื่องวิเคราะห์ความต้านทานสูง ๆ (impedance analyser) เพื่อแปลงสัญญาณอื่น ๆ ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (สัญญาณความต้านทาน) ดังรูปที่ 3.9 พร้อมทั้งเปิดพัดลมระบายอากาศ ระบบไฟต่าง ๆ และเปิดตัวโปรแกรม shortcut smart เพื่อต่อสัญญาณระหว่างแผงวงจรที่ไพรอบและระบบคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นให้เปิดโปรแกรม labview เพื่อวัดค่าความต้านทาน



รูปที่ 3.9 การติดตั้งเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าและระบบคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.10 การตั้งค่าโปรแกรม labview ในส่วนต่าง ๆ ของการทดสอบแก๊ส

2. กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ คือกำหนดความเข้มข้นของแก๊สที่ต้องการตรวจสอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้แก่ 350, 300, 250, 200 และ 150 องศาเซลเซียส (ในการทดสอบจำเป็นต้องทดสอบทั้งหมดอย่างน้อย 2 รอบเนื่องจากป้องกันแก๊สตกค้างในท่อ) ดังรูปที่ 3.10 ในโปรแกรม labview สังเกต และควบคุม อุณหภูมิโดยการปรับความต่างศักย์ที่แผงควบคุมเพื่อไม่ให้ภายใน ท่อปิดร้อนเกินไป

3. กำหนดเวลาในการเก็บข้อมูลโดยเวลาในการเริ่มต้นทำงาน 3 นาที เวลาในการปล่อยแก๊สเข้าไปในท่อปิด 10 นาที และเวลาในการฟื้นคืนสู่อากาศบริสุทธิ์ 25 นาที โดยประมาณ

4. เปลี่ยนชนิดของแก๊สเป็น มีเทน (CH_4), อะซิโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), อะซิทีลีน (C_2H_2), เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), ไฮโดรเจน (H_2) และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2)

5. เปรียบเทียบค่าข้อมูลการตอบสนองต่อแก๊สที่ได้ระหว่างเซนเซอร์ CCTO ที่บริสุทธิ์และเซนเซอร์ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทั้งในส่วนของเวลาที่ใช้ในการตอบสนองและส่วนของเวลาที่ใช้ในการฟื้นคืนสภาพ

3.2.3 การนำเซนเซอร์ไปทดสอบการตอบสนองต่อความชื้น

1. การต่อขั้วไฟฟ้า (การโพรบ)

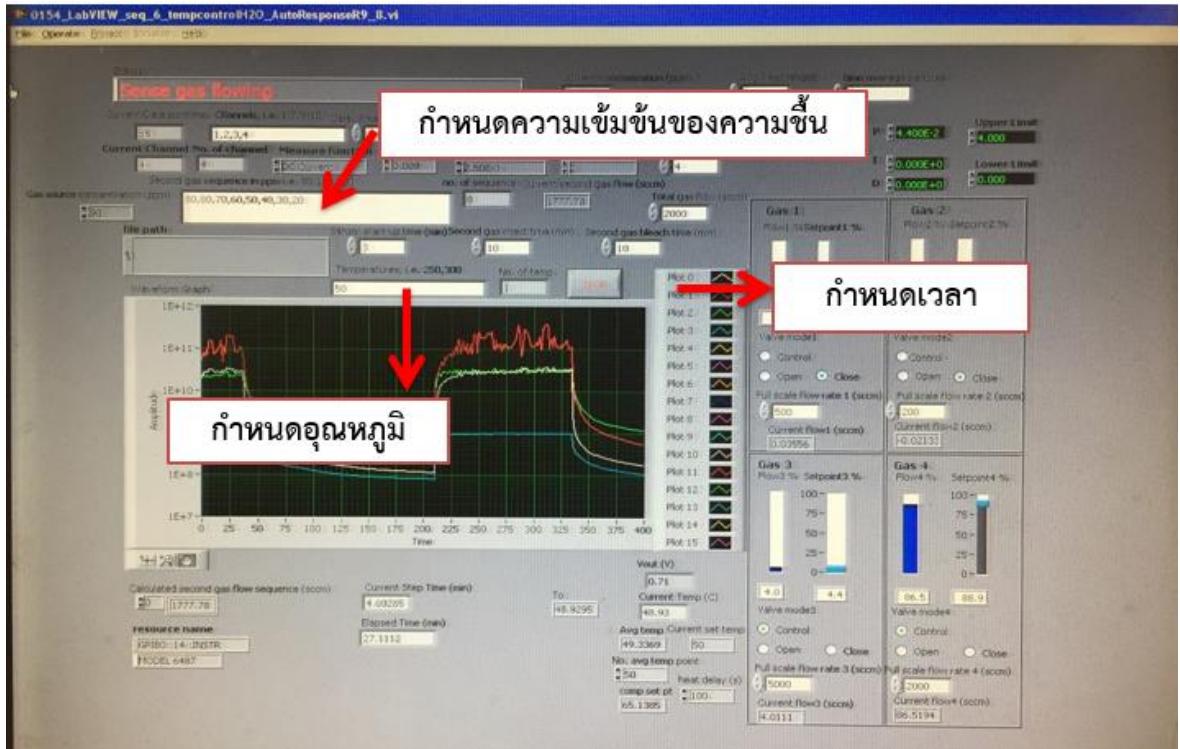


รูปที่ 3.11 ขวดใส่น้ำเพื่อผลิตไอน้ำ

ทำเช่นเดียวกับการทดสอบแก๊สในหัวข้อ 3.2.2 แต่เปลี่ยนการปล่อยแก๊สเข้าในท่อปิดเป็นการปล่อยไอน้ำเข้าไปแทนที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ผลิตไอน้ำดังรูปที่ 3.11 แทนที่อุปกรณ์ใช้ควบคุมการไหลของแก๊ส (mass flow controller) ได้เลย โดยอุปกรณ์ผลิตไอน้ำนั้นจะใช้ขวดแก้วใสเป็นภาชนะภายในบรรจุน้ำ (H_2O) ไว้ประมาณครึ่งขวด เหตุผลที่ใช้ขวดใส่นั้นเพราะว่าเมื่อปล่อยให้ระบบเริ่มทำงาน (เริ่มปล่อยอากาศบริสุทธิ์เข้าไปในระบบ) เราจะสามารถสังเกตเห็นฟองอากาศได้ชัดและที่ไม่ควรใส่น้ำเยอะเกินไปก็เป็นเพราะป้องกันการล้นทะลักของน้ำออกมาข้างนอก

2. ส่วนของโปรแกรม labview

1. ในส่วนของโปรแกรมเนื่องจากการทดสอบการตรวจวัดความชื้นทำที่อุณหภูมิห้องจึงจำเป็นต้องควบคุม อุณหภูมิให้เป็นอุณหภูมิห้อง และเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไอน้ำแต่ปล่อยให้เข้าไปในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 80, 70, 60, 50, 40, 30 และ 20 RH% ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การตั้งค่าโปรแกรม labview ในส่วนต่าง ๆ ของการทดสอบความชื้น

2. กำหนดเวลาในการเก็บข้อมูล โดยเวลาในการเริ่มต้นทำงาน 3 นาที เวลาในการปล่อยแก๊สเข้าท่อปิด 10 นาที และเวลาในการฟื้นคืนสู่อากาศบริสุทธิ์ 10 นาที โดยประมาณ (ใช้เวลาในการฟื้นคืนสภาพไวกว่า ขณะทดสอบแก๊ส จากการทดลอง)

3. เปรียบเทียบค่าข้อมูลการตอบสนองต่อความชื้นที่ได้ระหว่างเซนเซอร์ CCTO ที่บริสุทธิ์และเซนเซอร์ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทั้งในส่วนของเวลาที่ใช้ในการตอบสนองและส่วนของเวลาที่ใช้ในการฟื้นคืนสภาพ

3.2.3 การทำความสะอาดเซนเซอร์ฟิล์มบาง

1. นำเซนเซอร์ฟิล์มบางที่ต้องการทำความสะอาดมาแช่ในสารละลายอะซิโตน (acetone) ประมาณ 5-10 นาที และล้างออกด้วยสารละลายไอโซโพรพานอล (isopropanol) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่เกาะที่ตัวเซนเซอร์ฟิล์มบาง
2. เมื่อครบเวลาให้นำเซนเซอร์ฟิล์มบางมาตากแห้งบนแผ่นเซรามิก ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การตากแห้งของเซนเซอร์ฟิล์มบางบนแผ่นเซรามิก

รูปที่ 3.13 แสดงการจัดเรียงการตากแห้งของเซนเซอร์หลังจากล้างทำความสะอาดโดยการแช่สารละลายอะซิโตนมาประมาณ 5-10 นาที และล้างออกด้วยสารละลายไอโซโพรพานอล (isopropanol) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่เกาะที่ตัวเซนเซอร์ฟิล์มบาง การจัดเรียงนั้นจะมีการใช้ดินสอแบ่งช่องเป็นช่องย่อย ๆ สำหรับการวางเซนเซอร์ที่บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสที่มีความเข้มข้นต่างกัน เพื่อไม่ให้เซนเซอร์มีการสลับกันระหว่างการเจือแมงกานีสที่มีความเข้มข้นต่างกันป้องกันความผิดพลาดในการนำเซนเซอร์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วไปทดสอบซ้ำอีกครั้ง

3. เมื่อเซนเซอร์แห้งแล้วให้นำไปเข้าตู้อบ อบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.13 (a) และ (b) เหตุผลที่ใช้อุณหภูมิสูงในการอบเนื่องมาจากตัวอย่างเซนเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นได้ทำเสร็จมาเป็นเวลานาน อาจจะได้รับปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนเหล่านั้น



(a)



(b)

รูปที่ 3.14 (a) ภายในตู้อบอุณหภูมิสูง (b) แสดงตู้อบและหน้าจอการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 450 °C

4. เมื่อทำครบทุกกระบวนการแล้ว ก็สามารถนำแก๊สเซนเซอร์หรือเซนเซอร์ความชื้นนี้ไปทดสอบ วัดแก๊สต่าง ๆ และความชื้นซ้ำอีกครั้ง เพื่อยืนยันผลการทดลอง ดังในหัวข้อ 3.2.2 และ 3.2.3

บทที่ 4

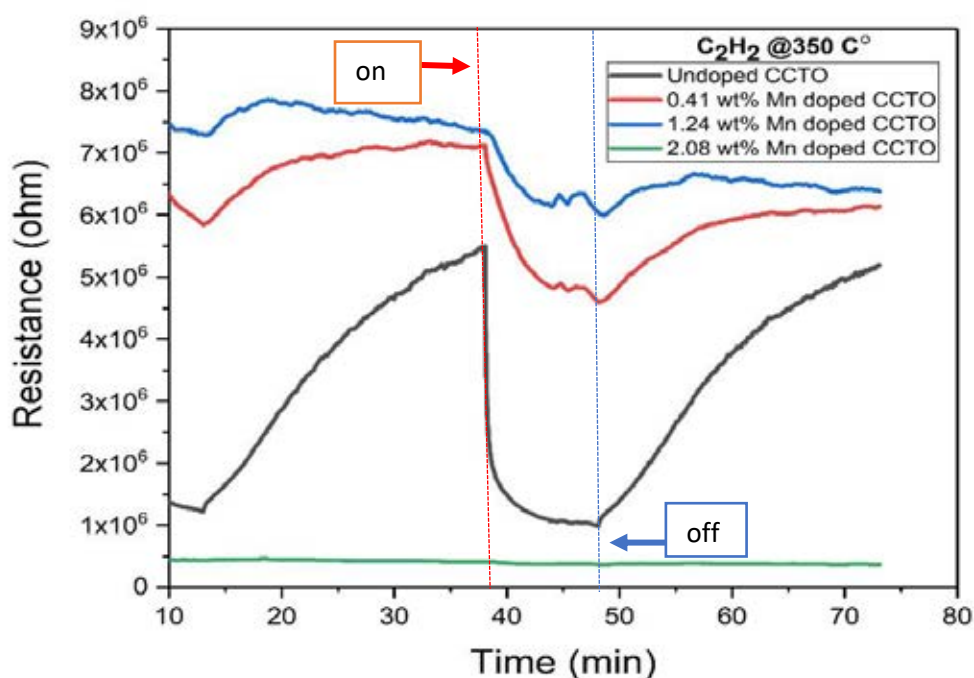
ผลและอภิปรายผลการศึกษา

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบการตรวจจับแก๊สต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CCTO

4.1.1 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีน (acetylene : C_2H_2)



รูปที่ 4.1 การตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีน (acetylene) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO (โอห์ม) และเวลาที่ใช้ในการทดสอบตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนที่ความเข้มข้น 10 ppm (นาที่) ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ (sensor response, R) ดีที่สุด เมื่อสังเกตลักษณะของกราฟแต่ละเส้นพบว่ากราฟของ CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกล่าวคือ เมื่อเริ่มปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบ (on) ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ฟิล์มบางก็จะลดลง และเมื่อปิดการปล่อยแก๊ส (off) ค่าความต้านทานก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ในส่วนของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของกราฟหรือไม่มีการตอบสนองใดใดต่อแก๊สอะซิทีลีน สังเกตจากกราฟที่เป็นเส้นตรง

มีความชันเท่ากับศูนย์ นั่นอาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณสารสัมพัทธ์ (stoichiometry) ในโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% ไม่เหมาะสม ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้นในบทที่ 2 แสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณของทองแดง (Cu) ลดลงอย่างมาก

ตารางที่ 4.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สอะซิทีลีน (acetylene)

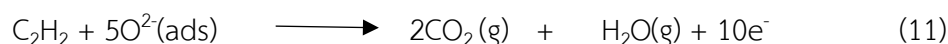
อะซิทีลีน (acetylene)	เวลาในการตอบสนอง (response time) (นาทีก)	เวลาในการฟื้นคืนสภาพ (recovery time) (นาทีก)	ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ (sensor response)
Undoped	2.15	19.67	5.50
0.41 wt% Mn doped CCTO	7.41	12.46	1.50
1.24 wt% Mn doped CCTO	6.93	8.90	1.25
2.08 wt% Mn doped CCTO	*	*	*

* สัญญาณที่วัดได้ค่อนข้างน้อยหรือไม่สามารถดึงข้อมูลออกมาเพื่อวิเคราะห์และรายงานผลได้

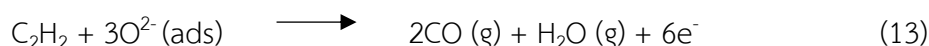
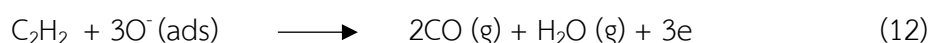
ตารางที่ 4.1 แสดงเวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สอะซิทีลีน (acetylene) พบว่าเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนของ CCTO บริสุทธิ์มีค่า 2.15 นาที สำหรับ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% นั้นมีค่า 7.41 นาที และ 6.93 นาที ตามลำดับ ในส่วนของเวลาในการฟื้นคืนสภาพหลังปิดการปล่อยแก๊สอะซิทีลีนแล้วของ CCTO บริสุทธิ์มีค่า 19.67 นาที สำหรับ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% นั้นมีค่า 12.46 นาที และ 8.90 นาที ตามลำดับ ในส่วนของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% สัญญาณที่วัดได้ค่อนข้างน้อยหรือไม่สามารถดึงข้อมูลออกมาเพื่อวิเคราะห์และรายงานผลได้ทั้งสัญญาณในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพ จากข้อมูลสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นไม่สามารถทำให้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนไวขึ้นเมื่อเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% ต่อเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนของ CCTO บริสุทธิ์พบว่ามีค่าต่ำกว่า 3.5 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% ต่อเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนของ CCTO บริสุทธิ์ก็มีค่าต่ำกว่า 3.2 เท่า แต่ในทางกลับกันการเจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% นั้นมีส่วนช่วยให้เวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ไวขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการฟื้นคืนสภาพของ CCTO บริสุทธิ์เป็นอัตราส่วน 1.6 และ 2.2 เท่าตามลำดับ และจากการสังเกตค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ (R) ต่อแก๊สอะซิทีลีน

พบว่า CCTO บริสุทธิ์นั้นมีค่าเท่ากับ 5.5 ซึ่งถือว่าไวมากกว่า CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.5 และ 1.25 ตามลำดับ

ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับปฏิกิริยาการตรวจจับแก๊สอะซิโตนกับโครงสร้างของ CCTO [40] พบว่าในส่วนแรกเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สบริสุทธิ์กับผิวหน้าของเซนเซอร์ฟิล์มบาง ดังแสดงในสมการที่ (5) - (8) ในบทที่ 2 ได้ผลิตผลิตภัณฑ์คือ ออกซิเจนไอออน (O^-) ในสถานะดูดซับ และในส่วนที่สองเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างผิวของเซนเซอร์ฟิล์มบางที่มีออกซิเจนไอออนสถานะดูดซับกับแก๊สอะซิโตน ที่ปล่อยเข้าไปหลังจากปล่อยแก๊สบริสุทธิ์ ดังแสดงในสมการที่ (11)

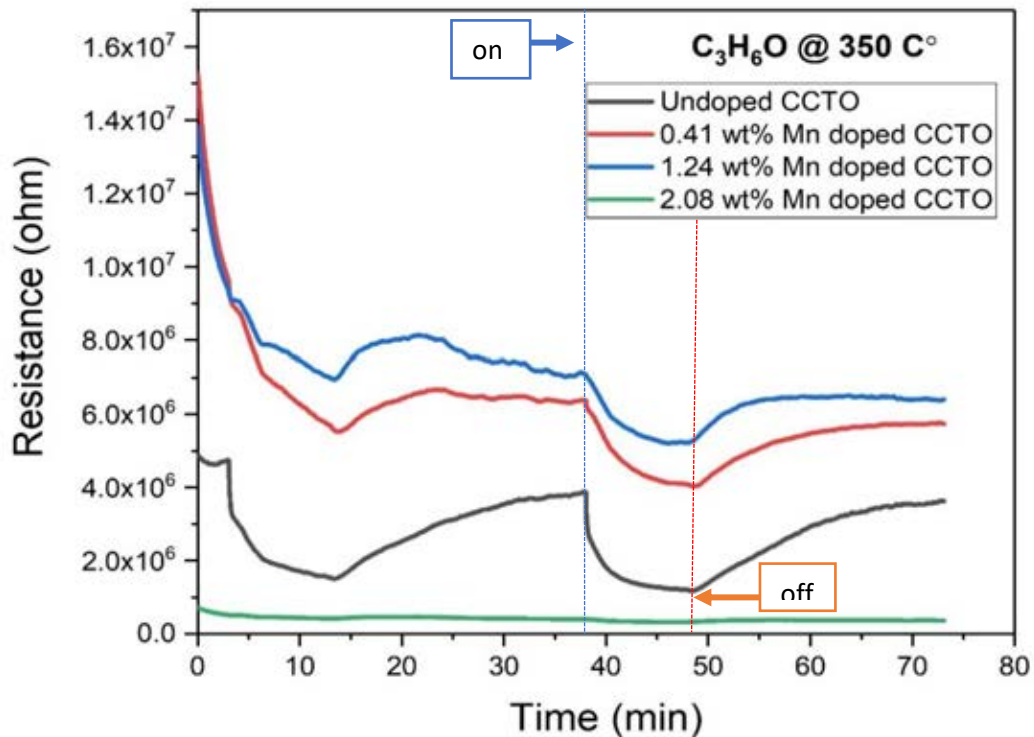


จากสมการที่ (11) สามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาระหว่างเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO กับแก๊สอะซิโตนนั้นผลที่ได้คือมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาแสดงว่าแก๊สอะซิโตนเป็นแก๊สประเภทรีดิวซ์ (reducing gas) และเนื่องจากเซนเซอร์ฟิล์มบางนั้นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะเมื่อทำปฏิกิริยากันทำให้การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นจึงเป็นเหตุผลทำให้ความต้านทานลดลง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1 ลักษณะของกราฟที่มีการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนมีความต้านทานลดลงเมื่อปล่อยแก๊สอะซิโตนเข้าสู่ระบบวัด และเมื่อทำการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนนั้นเกิดขึ้นได้หลายปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สอะซิโตนและปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่ได้จากปฏิกิริยาการดูดซับของออกซิเจนไอออน ซึ่งโดยสมบัติทางเคมีของอะซิโตนนั้นทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไม่ว่าจะอยู่ในสถานะแก๊ส หรือสถานะไอออนก็ได้คืออยู่แล้ว ตัวอย่างปฏิกิริยาระหว่างแก๊สอะซิโตนกับออกซิเจนในสถานะดูดซับแสดงในสมการที่ (12) และ (13)



จากสมการที่ (11), (12) และ (13) นั้นจะเห็นได้ว่าออกซิเจนในสถานะดูดซับมีสองรูปแบบคือ ในรูปของออกไซด์ O^- และ O^{2-} ซึ่งแต่ละปฏิกิริยาจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนอิเล็กตรอนจำนวนต่างกันจากการทบทวนวรรณกรรม ทำให้ทราบว่าในความเป็นจริงค่าเวลาในการตอบและค่าการตอบสนองจะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนที่ออกมาเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับความไวในการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนด้วย

4.1.2 ผลการทดสอบการตรวจจับแก๊สอะซิโตน (acetone : C₃H₆O)



รูปที่ 4.2 การตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตน (acetone) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนที่ความเข้มข้น 10 ppm (นาที่) และค่าความต้านทานของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO (โอห์ม) ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าการตอบสนองสูงสุด เมื่อสังเกตลักษณะของกราฟพบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับการนำไปทดสอบการตอบสนองต่อการตรวจจับแก๊สอะซิโตนในหัวข้อ 4.1.1 คือ เส้นกราฟของ CCTO บริสุทธิ์และกราฟของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 0.41 wt% และ 1.24 wt% นั้นเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันเมื่อเริ่มปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบ (on) และเมื่อปิดการปล่อยแก๊ส (off) ส่วนกราฟของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% ก็ยังคงเปลี่ยนแปลงน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย นั่นอาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณสัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% ไม่เหมาะสม กล่าวคือมีการลดลงของปริมาณทองแดงอย่างมาก ดังได้อธิบายแล้วข้างต้นแล้ว

ตารางที่ 4.2 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สอะซิโตน (acetone)

อะซิโตน (acetone)	เวลาในการตอบสนอง (response time) นาที	เวลาในการฟื้นคืนสภาพ (recovery time) นาที	ค่าการตอบสนองของ เซนเซอร์ (sensor response)
Undoped	5.08	18.00	4
0.41 wt% Mn doped CCTO	7.77	5.52	1.6
1.24 wt% Mn doped CCTO	8.15	5.57	1.4
2.08 wt% Mn doped CCTO	*	*	*

* สัญญาณที่วัดได้ค่อนข้างน้อยหรือไม่สามารถดึงข้อมูลออกมาเพื่อวิเคราะห์และรายงานผลได้

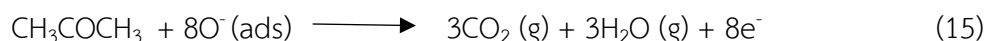
ตารางที่ 4.2 แสดงเวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สอะซิโตน (acetone) พบว่าเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนของ CCTO บริสุทธิ์มีค่า 5.08 นาที ในส่วนของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% มีค่า 7.77 นาที 8.15 นาที และไม่สามารถดึงข้อมูลออกมาเป็นตัวเลขได้ ตามลำดับสาเหตุที่ไม่สามารถดึงข้อมูลออกมาวิเคราะห์ได้นั้น เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้ค่อนข้างน้อยและแทบไม่มีการตอบสนอง จะเห็นได้ว่า CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสไม่ได้ช่วยให้การตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนของ CCTO บริสุทธิ์กับ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% มีค่าช้ากว่า 1.5 และ 1.6 เท่าตามลำดับ สำหรับเวลาในการฟื้นคืนสภาพของ CCTO บริสุทธิ์ นั้นมีค่า 18.00 นาที ซึ่งถือว่านานมากเมื่อเทียบกับเวลาในการฟื้นคืนสภาพของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% โดยมีค่า 5.52 นาที และ 5.57 นาที ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนพบว่า CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% มีการฟื้นคืนสภาพได้ไวกว่า CCTO บริสุทธิ์ ถึง 3.3 และ 3.2 เท่าตามลำดับ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการฟื้นคืนสภาพของอะซิโตนที่สังเกตุได้ว่าของแก๊สอะซิโตนนั้นมีความไวต่อการฟื้นคืนสภาพมากกว่าแก๊สอะซิโตนประมาณ 2 เท่า และ 1 เท่า ตามลำดับ ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ทุกตัวในชุดนี้ต่ออะซิโตนมีค่าน้อยกว่าต่ออะซิโตน สมมติฐานเบื้องต้นน่าจะอธิบายได้จากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างออกซิเจนกับอะซิโตนมีอัตราเร็วกว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับอะซิโตนจึงทำให้ทั้งค่าเวลาในการตอบสนองและทำให้ค่าการตอบสนองที่มากกว่า จากข้อมูลสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นไม่สามารถทำให้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนไวขึ้นได้เนื่องจากเมื่อมีการเจือด้วยแมงกานีสเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนช้ากว่าที่ CCTO

บริสุทธิ์ แต่ในทางกลับกันเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นมีส่วนช่วยให้เวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบางไวขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ CCTO บริสุทธิ์ ซึ่งผลที่ได้เหมือนกับที่เกิดขึ้นกับแก๊สอะซิโตนอาจจะเป็นไปได้ว่าเกิดจากพันธะเคมีที่ไม่เสถียรที่เกิดขึ้นระหว่างแก๊สทั้งสองชนิดกับแมงกานีส

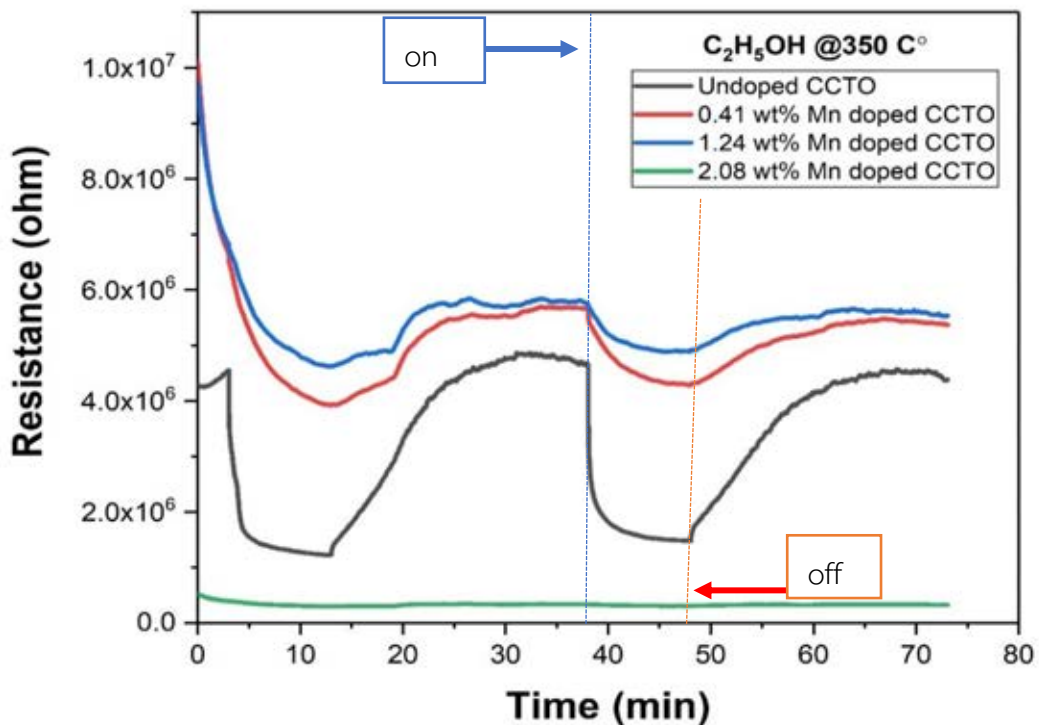
ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับปฏิกิริยาการตรวจจับแก๊สอะซิโตนกับโครงสร้างของ CCTO [39] พบว่าในส่วนแรกเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สบริสุทธิ์กับผิวหน้าของเซนเซอร์ฟิล์มบาง ดังสมการที่ (5) - (8) ในบทที่ 2 ได้ผลิตผลิตภัณฑ์คือ ออกซิเจนไอออน (O^-) ในสถานะดูดซับ และในส่วนที่สองเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างผิวของเซนเซอร์ฟิล์มบางที่มีออกซิเจนไอออนสถานะดูดซับอยู่กับแก๊สอะซิโตนที่ปล่อยเข้าไปหลังจากปล่อยแก๊สบริสุทธิ์ ดังสมการที่ (14)



จากสมการที่ (14) เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO กับแก๊สอะซิโตนซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับอะซิโตนว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คือมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาแสดงว่า แก๊สอะซิโตนเป็นประเภทตัวรีดิวซ์ (reducing gas) และเนื่องจากเซนเซอร์ฟิล์มบางนั้นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะ เมื่อทำปฏิกิริยากันทำให้การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นจึงเป็นเหตุผลทำให้ความต้านทานลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.2 สังเกตลักษณะของกราฟที่มีการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนมีความต้านทานลดลงเมื่อปล่อยแก๊สอะซิโตนเข้าสู่ระบบวัด เมื่อศึกษาเพิ่มเติมพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนนั้นเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบซึ่งโดยธรรมชาติแล้ว สมบัติทางเคมีของอะซิโตนนั้นทำให้เกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจนได้ยากกว่าแก๊สอะซิโตนดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ ตัวอย่างปฏิกิริยาระหว่างแก๊สอะซิโตนกับออกซิเจนในสถานะดูดซับดังสมการ (15)



4.1.3 ผลการทดสอบการตรวจจับแก๊สเอทานอล (ethanol : C₂H₅OH)



รูปที่ 4.3 การตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล (ethanol) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%

กราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 10 ppm (นาที) และค่าความต้านทานของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO (โอห์ม) ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าการตอบสนองเซนเซอร์มากที่สุด สังเกตว่าจากการทดลองกับแก๊สทั้งสามชนิดอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างพื้นผิวฟิล์ม CCTO กับแก๊สจะอยู่ที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง เมื่อสังเกตลักษณะของกราฟพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับการนำไปทดสอบการตอบสนองต่อการตรวจจับ แก๊สอะซิโตน และแก๊สอะซิโตนในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 ตามลำดับ คือเส้นกราฟของ CCTO บริสุทธิ์และ กราฟของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 0.41 wt% และ 1.24 wt% นั้นยังคงเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันเมื่อเริ่มปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบ (on) และเมื่อปิดการปล่อยแก๊ส (off) แต่ในส่วนของ CCTO บริสุทธ์นั้นกราฟมีลักษณะที่ชัดกว่า 2 กราฟก่อนหน้า (รูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2) ที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนกราฟของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% ก็ยังคงเปลี่ยนแปลงน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง เหตุผลก็น่าจะเป็นดังที่อธิบายไว้แล้วว่า ปริมาณทองแดงลดลงมากในโครงสร้างผลึก CCTO

ตารางที่ 4.3 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สเอทานอล (ethanol)

เอทานอล (ethanol)	เวลาในการตอบสนอง (response time) นาที	เวลาในการฟื้นคืนสภาพ (recovery time) นาที	ค่าการตอบสนองของ เซนเซอร์ (sensor response)
Undoped	1.93	11.17	2.70
0.41 wt% Mn doped CCTO	6.42	12.52	1.45
1.24 wt% Mn doped CCTO	6.73	8.87	1.20
2.08 wt% Mn doped CCTO	*	*	*

* สัญญาณที่วัดได้ค่อนข้างน้อยหรือไม่สามารถดึงข้อมูลออกมาเพื่อวิเคราะห์และรายงานผลได้

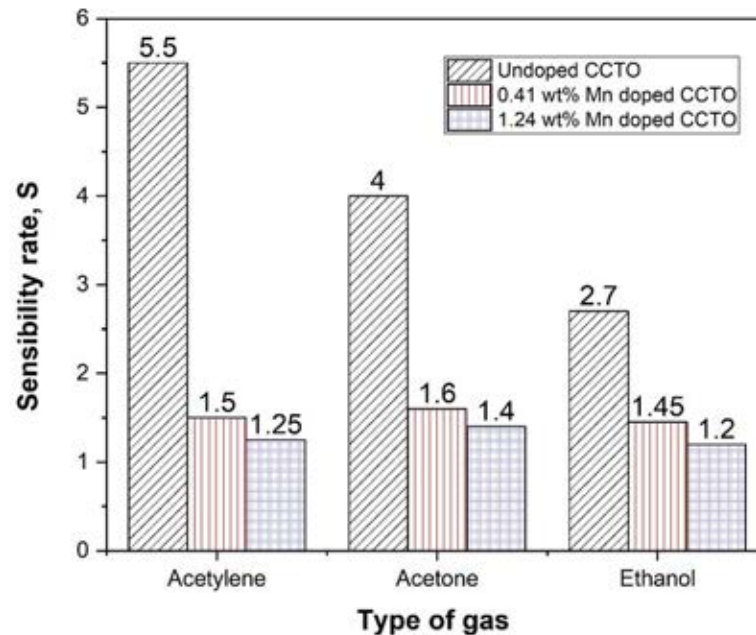
ตารางที่ 4.3 แสดงเวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สเอทานอล (ethanol) พบว่าเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลของ CCTO บริสุทธิ์มีค่า 1.93 นาที ในส่วนเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% มีค่า 6.42 นาที และ 6.73 นาที ตามลำดับ สำหรับเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% นั้นไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้ค่อนข้างน้อยและแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล จะเห็นได้ว่า CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสไม่ได้ช่วยให้การตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลให้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลของ CCTO บริสุทธิ์และ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% มีค่าช้ากว่า 3.3 และ 3.5 เท่าตามลำดับ สำหรับเวลาในการฟื้นคืนสภาพของ CCTO บริสุทธิ์ นั้นมีค่า 11.17 นาที ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับเวลาในการฟื้นคืนสภาพของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% โดยมีค่า 12.52 นาที และ 8.87 นาที ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนพบว่า CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% มีการฟื้นคืนสภาพได้ใกล้เคียงกับ CCTO บริสุทธิ์ หรือช้ากว่าและมากกว่าประมาณ 1.2 เท่า ตามลำดับ เช่นเดียวเมื่อสังเกตค่าการตอบสนองนั้นพบว่าไปในแนวทางเดียวกันกับการทดสอบการตรวจจับของแก๊สอะซิโตนและแก๊สอะซิโตน คือ ยิ่งเจือเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ด้วยแมงกานีสมากขึ้นค่าความไวในการตอบสนองก็จะช้าลงดังข้อมูล คือ CCTO บริสุทธิ์มีค่า 2.7 สำหรับ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสจากข้อมูลสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% มีค่า 1.45 และ 1.20 ตามลำดับ

จึงพบว่าการเจือแรงแม่เหล็กในเซโนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ไม่สามารถทำให้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลและเวลาในการฟื้นคืนสภาพไวขึ้นได้เนื่องจากการเจือด้วยแม่เหล็กในเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลและฟื้นคืนสภาพของเซโนเซอร์ที่ช้ากว่าที่ CCTO บริสุทธิ์

ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับปฏิกิริยาการตรวจจับแก๊สอะซิโตนกับโครงสร้างของ CCTO [40] พบว่าในส่วนแรกเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สบริสุทธิ์กับผิวหน้าของเซโนเซอร์ฟิล์มบาง ดังสมการที่ (5) - (8) ในบทที่ 2 ได้ผลิตผลิตภัณฑ์คือ ออกซิเจนไอออน (O^-) ในสถานะดูดซับ และในส่วนที่สองเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างผิวของเซโนเซอร์ฟิล์มบางที่มีออกซิเจนไอออนสถานะดูดซับอยู่ กับแก๊สเอทานอลที่ปล่อยเข้าไปหลังจากปล่อยแก๊สบริสุทธิ์ ดังสมการที่ (16)



จากสมการที่ (16) สามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาระหว่างเซโนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO กับแก๊สเอทานอลผลที่ได้นั้นมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจำนวนหนึ่ง แสดงว่าแก๊สเอทานอลเป็นประเภทตัวรีดิวซ์ (reducing gas) และเนื่องจากเซโนเซอร์ฟิล์มบางนั้นเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ซึ่งมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะ เมื่อทำปฏิกิริยากันทำให้การนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นจึงเป็นเหตุผลทำให้ความต้านทานลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าอัตราของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างเอทานอลกับและโมเลกุลออกซิเจนที่ไม่เร็วเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับของอะซิโตนและอะซิโตน ซึ่งน่าจะเป็นเหตุผลว่าทำไมค่าการตอบสนองต่ออะซิโตนมีค่ามากกว่าอะซิโตนและเอทานอล ตามลำดับ

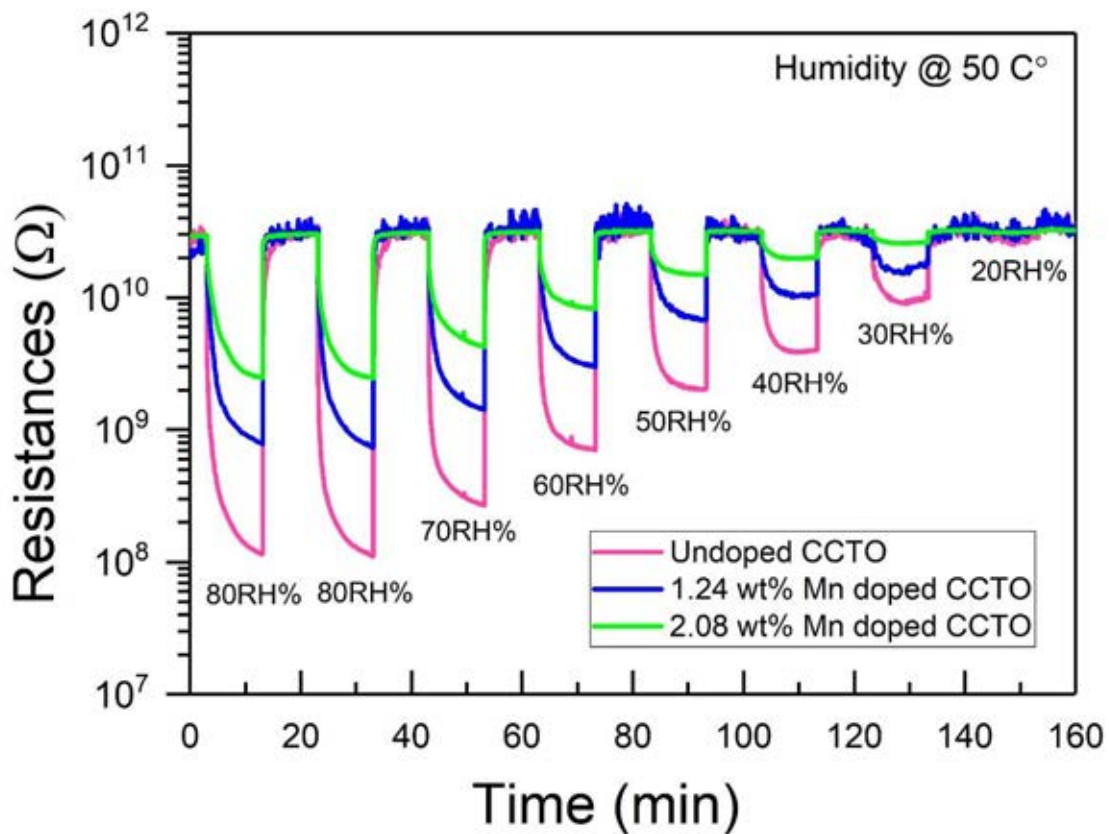


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีน แก๊สอะซิโตน และแก๊สเอทานอล ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt%

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าการตอบสนอง (sensor response, R) ต่อแก๊สอะซิทีลีน แก๊สอะซิโตน และ แก๊สเอทานอล ตามลำดับ ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 0.41 wt% และ 1.24 wt% พบว่าเป็นไปดังวิเคราะห์ที่ไว้ในข้างต้นคือเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO นั้นมีความไวในการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนมากที่สุดซึ่งทำให้ค่าการตอบสนองมากที่สุด ตามด้วยแก๊สอะซิโตนและสุดท้ายคือ แก๊สเอทานอล เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของฟิล์มบาง CCTO ที่ความเข้มข้นเดียวกัน สำหรับเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 0.41 wt% และ 1.24 wt% นั้นมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนเยอะที่สุดตามด้วยแก๊สอะซิทีลีน และสุดท้ายคือแก๊สเอทานอล แต่เมื่อสังเกตจากตัวเลขแล้วต่างกันไม่เกิน 0.3 หรือแทบไม่แตกต่างกันถ้าพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าจากรูปกราฟที่ได้ อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ตอนนี้สามารถสรุปได้ว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นไม่มีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาเคมีในการตรวจจับต่อแก๊สชนิดใดเลยเมื่อเปรียบเทียบกับ CCTO บริสุทธิ์ที่สามารถตรวจจับแก๊สทั้งสามชนิดข้างต้นได้ดีกว่า

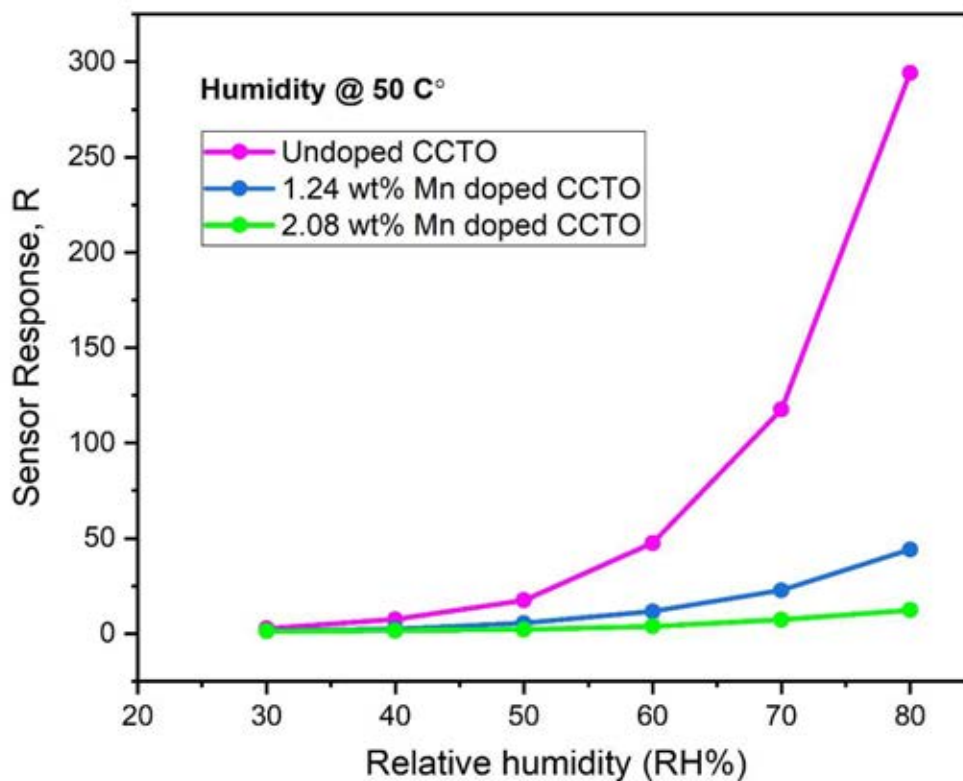
4.2 ผลการทดสอบการตรวจจับความชื้นของฟิล์มบาง CCTO

4.2.1 ผลการทดสอบการตอบสนองต่อการตรวจจับความชื้น (humidity)



รูปที่ 4.5 การตอบสนองต่อความชื้น (humidity) ที่ความเข้มข้น 80 RH% ถึง 20 RH% ของ เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ที่อุณหภูมิ 50 °C

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% เนื่องจากผลของการตอบสนองต่อความชื้น (RH%) กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (นาที) จากกราฟพบว่า การตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นดังกล่าวเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อปล่อยความชื้นเข้าสู่ระบบค่าความต้านทานค่อย ๆ ลดลงเรียกว่าช่วงการตอบสนองและเมื่อหยุดการปล่อยความชื้นค่าความต้านทานก็ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรียกว่าช่วงการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ ในทำนองเดียวที่ปริมาณความเข้มข้นของความชื้นมากค่าการตอบสนองก็จะมากด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.6 อัตราการตอบสนองต่อการตรวจจับความชื้นความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% ของ เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ที่อุณหภูมิ 50 °C

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบางที่บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ต่อความชื้นกับปริมาณความชื้นที่ความชื้น 30 RH% ถึง 80 RH% พบว่าแนวโน้มของการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO เป็นไปในแนวโน้มนเดียวกันคือมีการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นของความชื้น ตั้งแต่ 30 RH% ถึง 80RH% เหตุผลที่ไม่นำค่าปริมาณความชื้นของความชื้นที่ 20 RH% มาพิจารณานั้น เนื่องจากเส้นกราฟส่วนใหญ่มีสัญญาณรบกวนแทรกอยู่เยอะจึงไม่สามารถดึงข้อมูลออกเพื่อพิจารณาได้ ดังรูปที่ 4.8 เช่นเดียวกันความชื้นที่ปริมาณความเข้มข้น 30 RH% นั้นก็ยากแก่การพิจารณาเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนอยู่ด้วยแต่ไม่เยอะเท่าที่ 20RH% ทางผู้วิจัยจึงสามารถดึงข้อมูลออกมาดังตารางที่ 4.4 เพื่อวิเคราะห์ผล

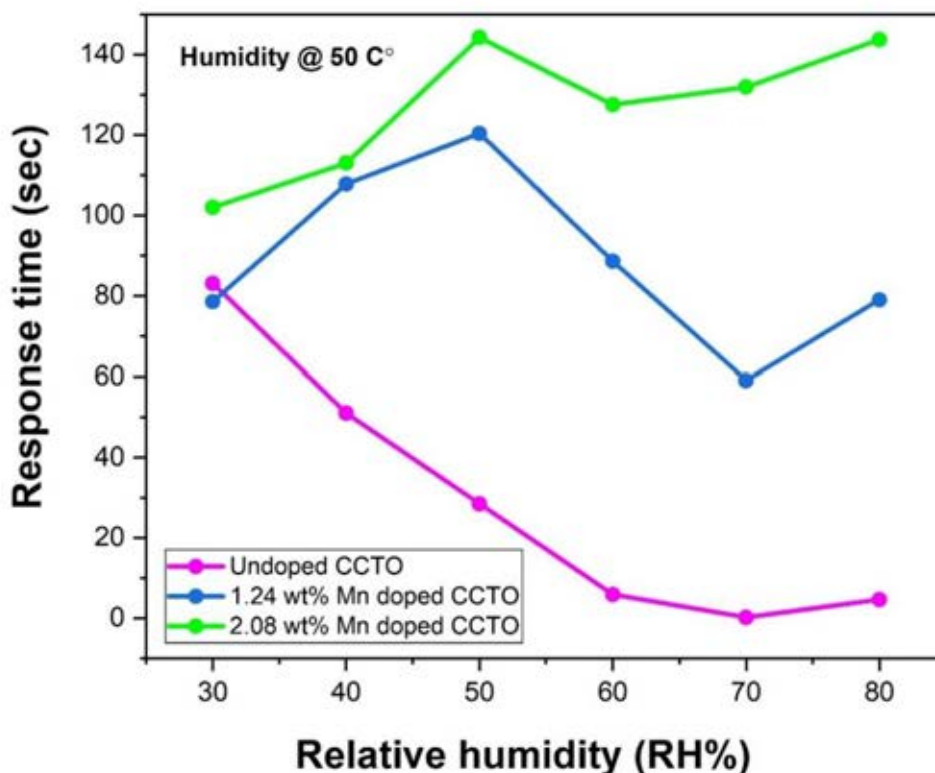
ตารางที่ 4.4 อัตราการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ในการทดสอบการตรวจจับความชื้น

ปริมาณความเข้มข้นของ ความชื้น (RH%)	อัตราการตอบสนองต่อความชื้น		
	Undoped CCTO	1.24 wt% Mn doped CCTO	2.08 wt% Mn doped CCTO
80	294	44.2	12.3
70	118	27.27	7.3
60	47.5	11.6	3.8
50	17.5	5.5	2.1
40	7.5	2.46	1.6
30	2.61	1.35	1.2

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ในการทดสอบการตรวจจับความชื้นโดยที่ความชื้นเข้มข้น 80 RH% อัตราการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่าสูงกว่าที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 1.24 wt% เป็นจำนวน 7 เท่า และสูงกว่าที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 2.08 wt% ถึง 24 เท่า การทดสอบการตรวจจับความชื้นที่ความเข้มข้น 70 RH% อัตราการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ก็ยังคงสูงกว่าที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 1.24 wt% 4 เท่า และ สูงกว่าที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 2.08 wt% ถึง 16 เท่า สำหรับการทดสอบการตรวจจับความชื้นโดยที่ความชื้นเข้มข้น 60 RH% การตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ก็ยังคงมีค่าสูงกว่าที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 1.24 wt% เป็นจำนวน 4 เท่า และ สูงกว่าที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 2.08 wt% 16 เท่า ในส่วนของการทดสอบการตรวจจับความชื้นโดยที่ความชื้นเข้มข้น 50 RH% อัตราการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% มีค่า 3 เท่า และ 8 เท่า ตามลำดับ ที่การทดสอบการตรวจจับความชื้นโดยที่ความชื้นเข้มข้น 40 RH% นั้นเริ่มมีค่าต่างกันไม่มากของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO คือที่ CCTO บริสุทธิ์มีอัตราการตอบสนองมากกว่าที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% เป็น 3 เท่า และที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% เป็น 5 เท่า และในส่วนของ การทดสอบการตรวจจับความชื้นโดยที่ความชื้นเข้มข้น 30 RH% ผลของอัตราการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีอัตราการตอบสนองมากกว่าถึง 3 เท่าของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสทั้งสองความเข้มข้น จากข้อมูลทั้งหมดนี้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า

เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นไปมีส่วนช่วยในการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับเป็นจำนวนเท่าของ CCTO บริสุทธิ์และ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสที่เข้มข้นต่าง ๆ พบว่า CCTO ที่บริสุทธิ์นั้นมีอัตราการตอบสนองต่อความชื้นที่ดีว่า CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสทุกตัวจึงได้ข้อสรุปว่าแมงกานีสไม่ได้มีส่วนช่วยในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาการตรวจจับความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO

ทางผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเพิ่มเติมและพบว่าปฏิกิริยาการตรวจจับความชื้นของฟิล์มบาง CCTO เป็นไปตามทฤษฎีที่ 2.2.3 สมการ (9)-(10) ในบทที่ 2 และมีขั้นตอนดังในรูปที่ 2.7 ในบทที่ 2 นั่นคือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของไอน้ำที่ใช้ในการทดสอบหากไอน้ำมีปริมาณความเข้มข้นมากจะทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนเยอะและเกิดการสะสมมากขึ้น ทำให้มีปริมาณของอิเล็กตรอนหลุดออกมาเพิ่มขึ้นด้วยเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ก็จะสามารถตรวจจับได้มากความต้านทานของเซนเซอร์ก็จะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.5 คือที่ความเข้มข้นของความชื้นมากเซนเซอร์จะมีความต้านทานลดลงต่ำกว่าที่ความเข้มข้นของความชื้นน้อย

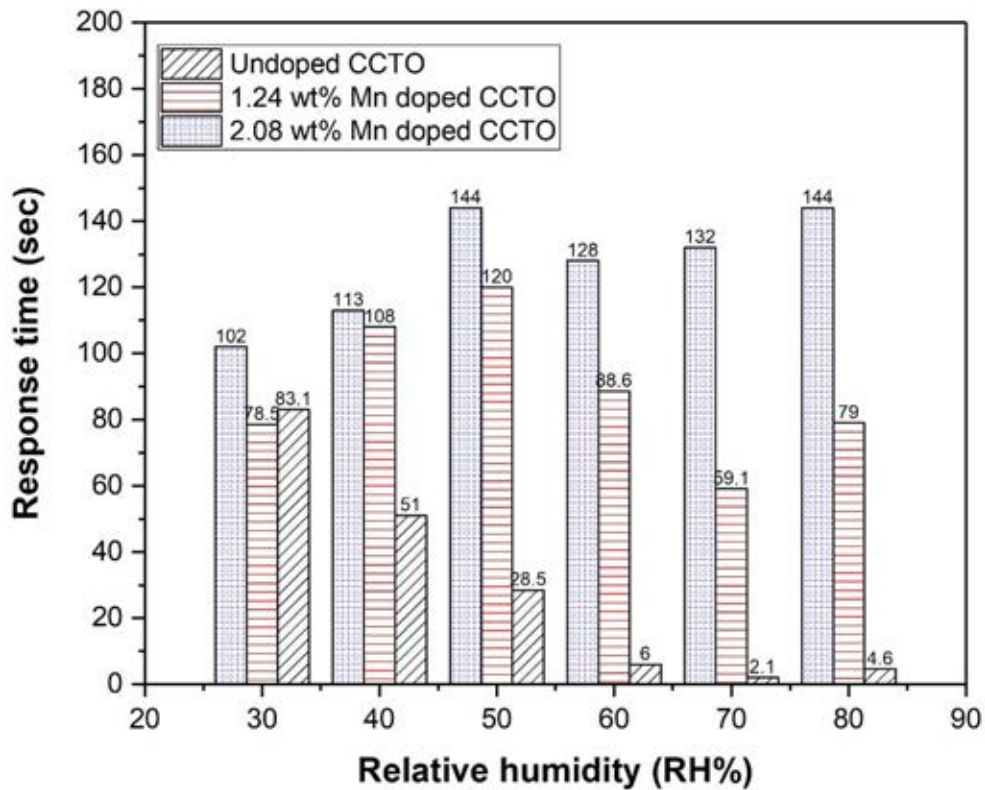


รูปที่ 4.7 เวลาในการตอบสนองต่อการตรวจจับความชื้น (humidity) ที่ความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ที่อุณหภูมิ 50 °C

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ต่อปริมาณความเข้มข้นของความชื้น 30 RH% ถึง 80 RH% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ลักษณะของกราฟในช่วงแรก 30 RH% ถึง 50 RH% มีลักษณะแนวโน้มรูปแบบของกราฟที่ต่างกันโดยกราฟของ CCTO บริสุทธิ์ มีเวลาในการตอบสนองลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของความชื้นมากขึ้น สำหรับกราฟของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% กราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก่อนแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เช่นเดียวกับ กราฟของ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% ต่างกันที่กราฟจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่าง ช้า ๆ และเพิ่มเร็วขึ้นในช่วงความเข้มข้นของความชื้น 40 RH% ถึง 50 RH% ในช่วงกลาง 50 RH% ถึง 70 RH% พบว่ากราฟทั้งสามเส้นเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันคือเวลาการตอบสนองต่อความชื้นค่อย ๆ ลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของความชื้นเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นเซนเซอร์ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% นั้นมีช่วง 60 RH% ถึง 70 RH% ที่กราฟมีแนวโน้มค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และในที่สุดท้ายคือ 70 RH% ถึง 80 RH% ที่เส้นกราฟเวลาในการตอบสนองเริ่มเพิ่มขึ้นของทั้งสามเส้นกราฟ ซึ่งเมื่อดึงข้อมูลออกมาเป็นตัวเลขเพื่อทำการวิเคราะห์พบว่าเป็นไปตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับ
ความชื้น

ปริมาณความเข้มข้น ของความชื้น (RH%)	เวลาในการตอบสนองต่อความชื้น (วินาที) ของ CCTO		
	Undoped CCTO	1.24 wt% Mn doped CCTO	2.08 wt% Mn doped CCTO
80	4.60	79.0	144
70	2.10	59.1	132
60	6.00	88.6	128
50	28.5	120	144
40	51.0	108	113
30	83.1	78.5	102

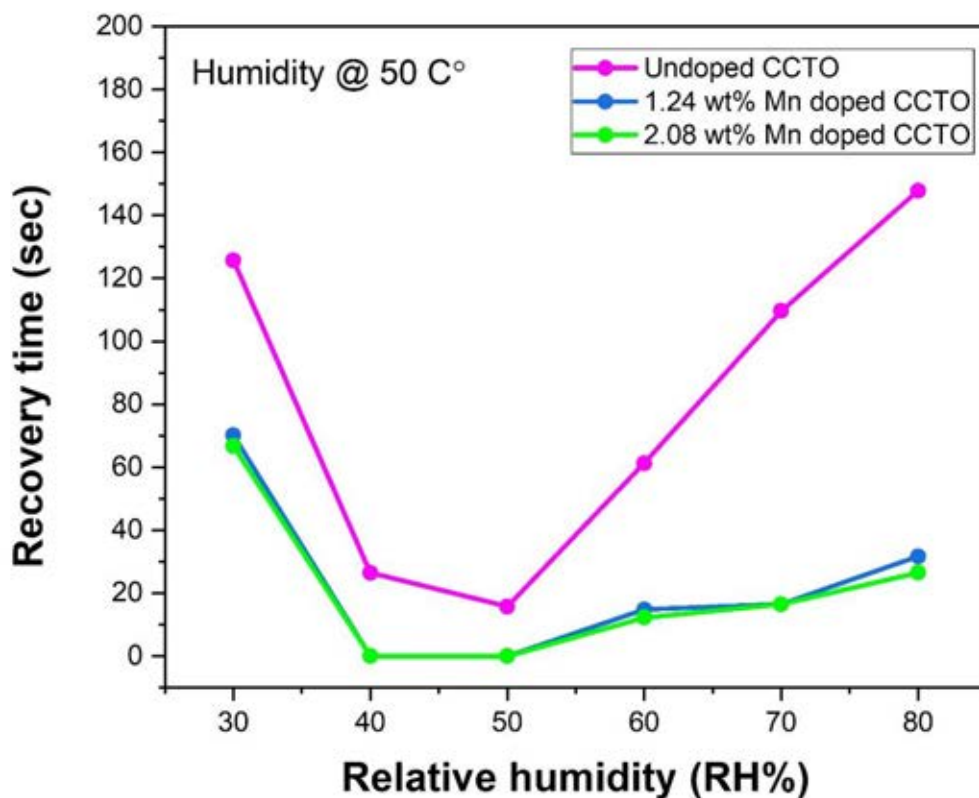


รูปที่ 4.8 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ต่อความชื้นที่ความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH%

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลของเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO กับปริมาณความเข้มข้นของความชื้นที่ 30 RH% ถึง 80 RH% พบว่าค่าข้อมูลที่ได้นั้นของทั้ง CCTO บริสุทธิ์ และ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% และ 2.08 wt% ค่อนข้างขึ้น ๆ ลง ๆ และสามารถดึงออกมาวิเคราะห์ได้ยาก ในส่วนที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้และมีค่าแนวโน้มที่ดีนั้นคือการตรวจจับความชื้นที่ความเข้มข้นในช่วง 50 RH% ถึง 70RH % คือค่าของเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO มีค่าลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของความชื้นมากขึ้น ซึ่งเป็นไปดังที่อธิบายไว้ข้างต้นคือเมื่อปริมาณความเข้มข้นมากขึ้นทำให้เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO มีการตอบสนองที่ดีและไวขึ้นและเมื่อนำค่าเวลาในการตอบสนองมาเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.8 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.8 แสดงกราฟแท่งเปรียบเทียบค่าเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นที่ความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้แล้วนั้นเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธินั้นมีค่าเวลาในการตอบสนองไวที่สุดเมื่อปริมาณความเข้มข้นของความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 30 RH% ถึง 80 RH% สำหรับ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 RH% เวลาในแต่ละช่วงไม่เป็นไปในแนวโน้มเดียวกับจึงไม่

สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อปริมาณความเข้มข้นของความชื้นเพิ่มมากขึ้นสามารถทำให้เวลาในการตอบสนองดีขึ้นได้เช่นเดียวกันนี้ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 RH% ก็ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงแนวโน้มได้เนื่องจากข้อมูลค่อนข้างขึ้น ๆ ลง ๆ ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันจึงไม่สามารถสรุปได้ว่า เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO นั้นสามารถช่วยในการเร่งปฏิกิริยาการตรวจจับความชื้นได้ แต่สำหรับ CCTO บริสุทธิ์นั้นพบว่าสามารถตรวจจับความชื้นได้ดีและเมื่อปริมาณความเข้มข้นของความชื้นมากขึ้นก็ยิ่งไวต่อการตอบสนอง ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ออกมาเป็นจำนวนเท่าต่อเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสมีดังนี้ ที่ปริมาณความเข้มข้นของความชื้น 30 RH% เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นไวกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% 1.2 เท่า แต่มีเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นใกล้เคียงกับเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% สำหรับที่ปริมาณความเข้มข้นของความชื้น 40 RH% เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นไวกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% และ 2.08 wt% ใกล้เคียงกันคือ 2.2 เท่า สำหรับที่ปริมาณความเข้มข้นของความชื้น 50 RH% นั้นเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นไวกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% และ 2.08 wt% คือ 5.1 และ 4.2 เท่าตามลำดับ และที่ปริมาณความเข้มข้นของความชื้น 60 RH% ถึง 80 RH% นั้นเวลาในการตอบสนองของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีความไวกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% และ 2.08 wt% ค่อนข้างเยอะ คือ ที่ความเข้มข้นของความชื้น 60 RH% มีความไวมากกว่า 21 และ 15 เท่า ที่ความเข้มข้นของความชื้น 70 RH% มีความไวมากกว่า 63 และ 28 เท่า และที่ความเข้มข้นของความชื้น 80 RH% มีความไวมากกว่า 31 และ 17 เท่าตามลำดับ

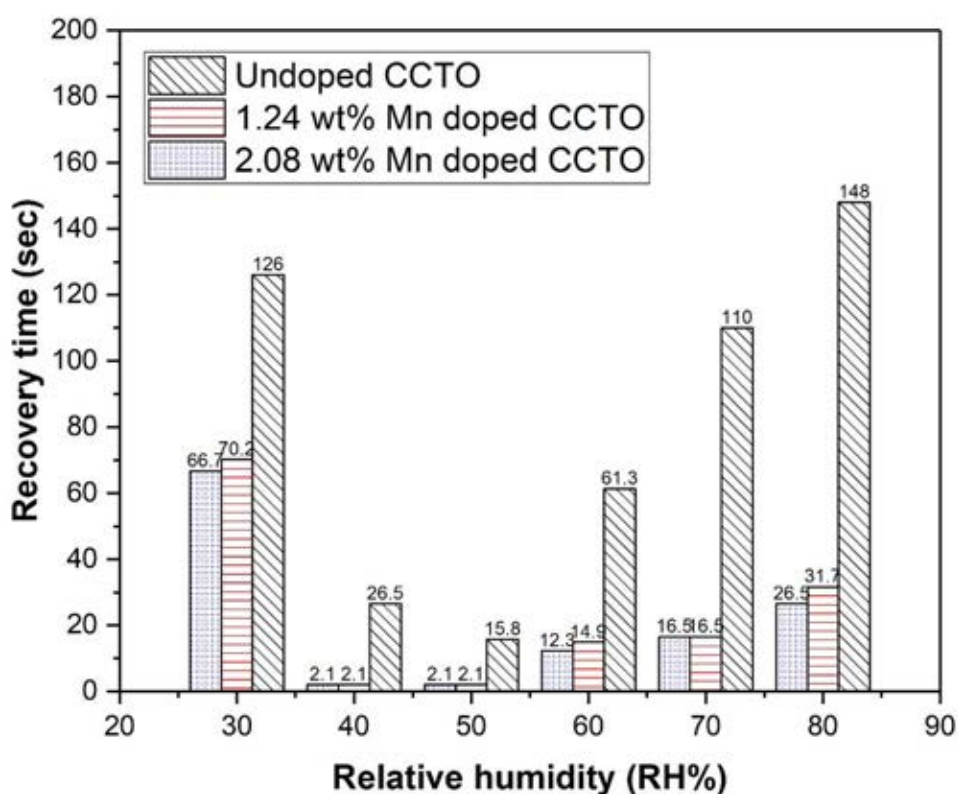


รูปที่ 4.9 เวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีส ที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% หลังได้รับความชื้นความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% ที่อุณหภูมิ 50 °C

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% หลังได้รับความชื้นความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% ที่อุณหภูมิ 50 °C ลักษณะของกราฟทั้งสามเส้นเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน คือ ในช่วง 30 RH% ถึง 40 RH% นั้นกราฟมีลักษณะลดลง เมื่อเข้าสู่ช่วง 40 RH% ถึง 50 RH% นั้นกราฟค่อนข้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง และ ในช่วงปลาย 50 RH% ถึง 80 RH% ลักษณะของกราฟค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเมื่อแยกพิจารณาทีละเส้นกราฟพบว่า เวลาในการฟื้นคืนสภาพของกราฟเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธินั้นโดยรวมนั้นใช้เวลาในการฟื้นคืนสภาพนานกว่ากราฟของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสทั้งสองความเข้มข้น ได้แก่ 1.24 wt% และ 2.08 wt% ดังนั้นสามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นมีส่วนช่วงลดเวลาในการฟื้นคืนสภาพของตัวเซนเซอร์

ตาราง 4.6 เวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับ
ความชื้น

ปริมาณความ เข้มข้นของ ความชื้น (RH%)	เวลาในการฟื้นคืนสภาพต่อความชื้น (วินาที) ของ CCTO		
	Undoped CCTO	1.24 wt% Mn doped CCTO	2.08 wt% Mn doped CCTO
80	148	31.7	26.5
70	110	16.5	16.5
60	61.3	14.9	12.3
50	15.8	2.10	2.10
40	26.5	2.10	2.10
30	126	70.2	66.7



รูปที่ 4.10 กราฟแท่งเปรียบเทียบค่าเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ต่อ
ความชื้นที่ความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH%

ตารางที่ 4.6 แสดงตารางค่าเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ หลังจากการตรวจจับความชื้นที่มีปริมาณความเข้มข้น 30 RH% ถึง 80 RH% จะสังเกตเห็นได้ว่าเวลาที่ที่ใช้ในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธินั้นมีค่าไวกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ในทุกทุกการฟื้นคืนสภาพหลังการตรวจจับความชื้นในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อนำค่าข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเป็นลักษณะของกราฟแท่งเพื่อทำการเปรียบเทียบให้เห็นชัดเจน ดังรูปที่ 4.10 และเมื่อดึงค่าข้อมูลออกมาคำนวณเปรียบเทียบผลที่ได้นั้นได้แก่ เวลาในการฟื้นคืนสภาพหลังการตรวจจับความชื้นที่ปริมาณความเข้มข้น 80 RH% ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่ามากกว่าเจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ถึง 4.6 และ 5.6 เท่าตามลำดับ ถัดมาคือเวลาในการฟื้นคืนสภาพหลังการตรวจจับความชื้นที่ปริมาณความเข้มข้น 70 RH% ตัวเซนเซอร์ที่บริสุทธิ์ก็ยังคงมากกว่าตัวที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ที่อัตราเท่ากัน คือ 6.7 เท่า สำหรับเวลาในการฟื้นคืนสภาพหลังการตรวจจับความชื้นที่ปริมาณความเข้มข้น 60 RH% ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่ามากกว่าเจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% ถึง 4.1 และ 5.0 เท่าตามลำดับ ในส่วนของเวลาในการฟื้นคืนสภาพหลังการตรวจจับความชื้นที่ปริมาณความเข้มข้น 50 RH% และ 40 RH% ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่ามากกว่าเจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้นต่าง ๆ ในอัตราส่วนที่เท่ากันคือ 7.5 และ 12.6 เท่า ตามลำดับ และสุดท้าย คือ เวลาในการฟื้นคืนสภาพหลังการตรวจจับความชื้นที่ปริมาณความเข้มข้น 30 RH% เริ่มมีการความต่างกันน้อย คือ เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีค่ามากกว่าเจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% เพียง 1.8 และ 1.9 เท่าตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเจือแมงกานีสลงไปในเซนเซอร์ฟิล์มบางนั้นมีส่วนช่วยให้เวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์มีความไวขึ้น จากผลที่เปรียบเทียบนั้นการเจือแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% มีค่าเวลาในการฟื้นสภาพที่ไวกว่าที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% เพียงเล็กน้อยหรือเทียบไม่ต่างกัน จากผลที่เปรียบเทียบนั้นการเจือแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% มีค่าเวลาในการฟื้นคืนสภาพที่ไวกว่าที่เจือด้วยแมงกานีส 2.08 wt% เพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่ต่างกันเลย ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ในที่นี้พบว่าฟิล์มที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1.24 wt% เป็นเซนเซอร์ที่ดีและสามารถวัดการตอบสนองของความชื้นได้พอสมควรและมีค่าในการฟื้นคืนสภาพที่ไวพอสมควรในหน่วยวินาทีเมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยเหล็ก เงิน และนิกเกิล จากงานวิจัยในห้องปฏิบัติการของผู้วิจัยที่ผ่านมาซึ่งมีค่าการฟื้นคืนสภาพที่แยกลงอยู่ในหน่วยนาที่เมื่อเจือธาตุทรานซิชันเหล่านั้น

ทางผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบางที่ผลิตจากโครงสร้างของ CCTO พบว่ามีเวลาในการฟื้นคืนสภาพที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของคุณ Mohsen Ahmadipour และคณะ [26] คืออยู่ในช่วงประมาณ 0-500 วินาที ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้พบว่าอยู่ในช่วง 0-200 วินาที สามารถยืนยันได้ว่า เวลาในการฟื้นคืนสภาพที่ได้นั้นเป็นผลที่สามารถใช้งานได้ พบว่าการที่เจือแมงกานีสลงไปโครงสร้าง CCTO นั้นทำให้เวลาที่ใช้ในการฟื้นคืนสภาพไวขึ้นมากอยู่ในช่วงเวลา 0-100 วินาที ซึ่งเป็นผลที่ค่อนข้างดี และเมื่อนำเวลาในการฟื้นคืนสภาพนี้ไปเปรียบเทียบกับเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นที่ความเข้มข้นของความชื้นเดียวกันนั้น ก็ได้ข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งคือ เนื่องจากเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือแมงกานีสนั้นมีการตอบสนองต่อความชื้นที่แยกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่บริสุทธิ์ จึงทำให้เวลาในการตอบสนองช้า และเมื่อเวลาในการตอบสนองต่อความชื้นช้าแสดงว่าเซนเซอร์นี้ตรวจจับความชื้นได้ไม่ดีเท่าที่ควร เป็นผลทำให้เวลาในการฟื้นคืนสภาพนั้นไวขึ้นเนื่องจากเซนเซอร์ไม่ได้จับกับความชื้นในปริมาณที่เยอะมาก จึงอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผลที่ได้เป็นดังที่กล่าวไปข้างต้นนอกจากนี้ก็อาจจะเกิดจากปัจจัยอื่นได้เช่นกันเพราะความชื้นค่อนข้างจะไวต่อสิ่งรบกวนต่างๆ แม้จะกระทำที่อุณหภูมิห้องก็ตาม ตัวอย่างปัจจัยที่มีผล เช่น ตัวเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดลองนั้นผลิตไว้นานพอสมควรอาจจะมีการเสื่อมสภาพไปในบางส่วนของโครงสร้างการตรวจจับถึงแม้ว่าจะนำมาทำความสะอาดแล้ว ในส่วนของเครื่องมือที่ใช้ก็มีความเก่าภายในช่องสัญญาณที่เชื่อมต่อเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์มีปัญหาที่ผู้ทดลองไม่สามารถแก้ไขเองได้ และที่สำคัญที่สุดคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO กับความชื้นนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณสัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างฟิล์ม CCTO ที่เจือแมงกานีสไปลดธาตุบางชนิดลง จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าแมงกานีสนั้นเข้าไปแทนที่ทองแดงในโครงสร้างซึ่งอาจมีผลต่อการตรวจจับกับความชื้นได้เช่นกัน ทำให้ผลที่ได้นั้นเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์มีการตอบสนองต่อความชื้นดีกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั่นเอง แต่ในทางกลับกันเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสมีความไวในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ได้ไวกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการตอบสนองต่อแก๊สของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO

สำหรับเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริษัท พบมีการตอบสนองต่อแก๊สทุกชนิด (แก๊สอะซิทีลีน แก๊สอะซิโตน และแก๊สเอทานอล) ที่ทำการทดสอบ ได้ดีกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส ในขณะที่ผ่านความเข้มข้นแก๊สเท่ากัน ณ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ 350 องศาเซลเซียส เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริษัทมีค่าการตอบสนอง (sensor response, R) ต่อแก๊สอะซิทีลีนที่ 10 ppm อยู่ที่ 5.5 ในขณะที่เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% จะมีค่าการตอบสนองอยู่ประมาณ 1.5 และ 1.25 ตามลำดับ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับ CCTO บริษัท ถัดมาเป็นผลของการตอบสนองของฟิล์มต่อแก๊สอะซิโตนที่ 10 ppm โดยเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริษัทมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนอยู่ที่ 4 ในขณะที่เซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้นเดียวกับข้างต้น มีค่า 1.6 และ 1.4 ตามลำดับ และสำหรับค่าการตอบสนองต่อ แก๊สเอทานอลที่ 10 ppm ก็ยังคงมีลักษณะเช่นกันกับการตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีนและแก๊สอะซิโตน คือ เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริษัทมีค่าการตอบสนองอยู่ที่ 2.7 และเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้น 1.24 wt% และ 2.08 wt% มีค่า 1.45 และ 1.20 ตามลำดับ กล่าวคือ การเจือด้วยแมงกานีสไม่ช่วยให้การตอบสนองต่อแก๊สอะซิทีลีน แก๊สอะซิโตน และแก๊สเอทานอลได้ดีขึ้น แต่กลับทำให้การตอบสนองแย่งกว่าเดิมมาก ซึ่งขัดกับสมมติฐานตั้งต้นที่ว่าแมงกานีสจะเป็นตัวเร่ง (catalyst) ทำให้มีความไวในการตอบสนองและเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจจะเป็นเนื่องจากการเตรียมฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสแทนที่ตำแหน่งทองแดงในโครงสร้าง CCTO ทำให้มีการลดปริมาณทองแดงลงอย่างเห็นได้ชัดจากผลการทดสอบด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) จนปริมาณสารสัมพัทธ์ในโครงสร้าง CCTO ไม่เหมาะสม จึงเกิดปฏิกิริยาเชิงเคมีกับแก๊สข้างต้นได้น้อยลง ทำให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความไวต่อแก๊สของฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสลดลง และเมื่อนำไปทดสอบกับแก๊สอื่น ๆ เช่น แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน ดังแสดงให้เห็นในภาคผนวก รูปที่ 6.1 -6.3 ก็พบว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ทั้งที่บริษัทและที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นไม่สามารถตอบสนองต่อแก๊สเหล่านี้เลย อาจเนื่องด้วยส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการโพรบมีการใช้สกรูที่เป็นโลหะโพรบกับพื้นผิวทองซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรด เป็นไปได้ว่าอาจจะหมุนสกรูแตะที่ขั้ว

อิเล็กทรอนิกส์ไม่แน่นอนทำให้สัญญาณไฟฟ้าซึ่งเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ที่ได้ออกมาส่งผลให้ได้กราฟรูปลักษณะเพี้ยนไป ไม่ได้รูปกราฟตามที่ควรจะเป็น

5.2 ผลการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO

สำหรับผลการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO นั้นพบว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่บริสุทธิ์มีค่าการตอบสนอง (sensor response, R) ต่อความชื้นในทุกๆ ความเข้มข้น (30 RH% ถึง 80 RH%) มากกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบางที่เจือด้วยแมงกานีส 1.24 wt% และ 2.08 wt% และในส่วนของเวลาที่ใช้ในการตอบสนองก็เช่นเดียวกัน คือ เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่บริสุทธิ์นั้นมีความไวมากกว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส จากการเปรียบเทียบอัตราการตอบสนองและเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการตรวจจับความชื้นในทุกๆ ความเข้มข้นสามารถสรุปได้ว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นไม่มีส่วนช่วยในการตอบสนองต่อความชื้น ในทางกลับกันเวลาที่ใช้ในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสนั้นมีค่าไวกว่าเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้นั้นพบว่าเวลาในการฟื้นคืนสภาพยังคงช้าอยู่มากและนี่คือข้อดีของการเจือแมงกานีสเข้าไปในโครงสร้าง CCTO เพื่อนำไปทดสอบกับความชื้น และตรงกับสมมติที่ว่า การเจือแมงกานีสเข้าไปในโครงสร้างของ CCTO สามารถช่วยลดระยะเวลาในการฟื้นคืนสภาพได้ สำหรับเวลาที่ใช้ในการตอบสนองที่ไม่ดีเท่าที่ควรนั้น อาจเกิดจากปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น เนื่องจากความชื้นค่อนข้างจะไวต่อสิ่งเร้าต่าง ๆ แม้จะกระทำที่อุณหภูมิห้องก็ตาม และที่สำคัญ คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO กับ ความชื้น อาจเกี่ยวเนื่องจากขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสแทนที่ตำแหน่งทองแดงในโครงสร้าง CCTO ทำให้มีการลดปริมาณทองแดงลงก็อาจจะเป็นเหตุผลเดียวกันกับการตอบสนองต่อการตรวจจับความชื้นจึงทำการการตอบสนองต่อความชื้นไม่ดีเท่าที่ควร

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. หากต้องการที่จะทดสอบต่อแก๊สหรือความชื้น โดยใช้เซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีส เพื่อให้โครงสร้างของ CCTO มีสมบัติการตรวจจับกับแก๊สหรือความชื้นได้ดี โดยต้องการให้ส่วนของแมงกานีสที่เจือขึ้นไปแทนที่ของไททานเนียมแทนการแทนที่ทองแดง (เนื่องจากทองแดงมีผลต่อการตรวจจับแก๊สและความชื้นมากกว่าธาตุอื่น ๆ ในโครงสร้าง) เพื่อให้เป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า การเจือด้วยแมงกานีสมีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ทำตัวฟิล์มบาง CCTO นั้นควรทำการลดปริมาณของไททานเนียมลงโดยที่อัตราส่วนของธาตุอื่น ๆ ยังคงเหมือนเดิม เพื่อให้แมงกานีสที่เจือเข้าไปนั้นไปแทนที่ตำแหน่งของไททานเนียม

2. หากต้องการที่จะเปลี่ยนตัวที่ต้องการเจือเข้าไปในโครงสร้างของ CCTO นั้นควรเป็นตัวที่เจือเข้าไปแล้วไม่มีผลไปลดปริมาณของทองแดงลงเพื่อไม่ให้คุณสมบัติของ CCTO เปลี่ยนไปและตัวที่เจือเข้าไปควรมีสมบัติการตรวจจับแก๊สหรือความชื้นที่ดีขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Enhancing H₂S sensing response of CCTO thin films beading Ag compounds, thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for degree of master of science program in Physics, Mr Aukrit Natkaeo, 135 (2017)
- [2] P.-G. Su, Y.-T. Peng, Fabrication of a room-temperature H₂S gas sensor based on PPy/WO₃ nanocomposite films by in-situ photopolymerization, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 193 (2014) 637-643.
- [3] J. Lindenmann, V. Matzi, N. Neuboeck, B. Ratzenhofer-Komenda, A. Maier, F.M. Smolle-Juettner, Severe hydrogen sulphide poisoning treated with 4- dimethylaminophenol and hyperbaric oxygen, *Diving and hyperbaric medicine*, 40 (2010) 213-217.
- [4] S.S. Kim, J.Y. Park, S.-W. Choi, H.S. Kim, H.G. Na, J.C. Yang, C. Lee, H.W. Kim, Room temperature sensing properties of networked GaN nanowire sensors to hydrogen enhanced by the Ga₂Pd₅ nanodot functionalization, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (2011) 2313-2319.
- [5] พชร โจลิตสาห์กุล, การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์มบางแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตบริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีส, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2016) 26-42
- [6] Z.M. Rittersma, Recent achievements in miniaturized humidity sensors – a review of transduction techniques, *Sens. Actuators A-Phys.* 96 (2002) 196–210.
- [7] J. Sluneko, J. Holc, M. Hrovat, M. Ceh, Thick film humidity sensor based on (Ba, Sr) TiO₃ porous ceramic doped with MgO and CaO, *Sens. Actuators B-Chem.* 7 (1992) 439–442.
- [8] P. Ivanov, J. Hubalek, K. Malysz, J. Prášek, X. Vilanova, E. Llobet, X. Correig, A route toward more selective and less humidity sensitive screen-printed SnO₂ and WO₃ gas sensitive layers, *Sens. Actuators B-Chem.* 100 (2004) 221–227.
- [9] M. Li, X.L. Chen, D.F. Zhang, W.Y. Wang, W.J. Wang, Humidity sensitive properties of pure and Mg-doped CaCu₃Ti₄O₁₂, *Sens. Actuators B-Chem.* 147 (2010) 447–452.
- [10] M. Li, Study of the humidity-sensing mechanism of CaCu₃Ti₄O₁₂, *Sens. Actuators B-Chem.* 228 (2016) 443–447.
- [11] J. Shah, R.K. Kotnala, B. Singh, H. Kishan, Microstructure-dependent humidity sensitivity of porous MgFe₂O₄–CeO₂ ceramic, *Sens. Actuators B-Chem.* 128 (2007) 306–311.

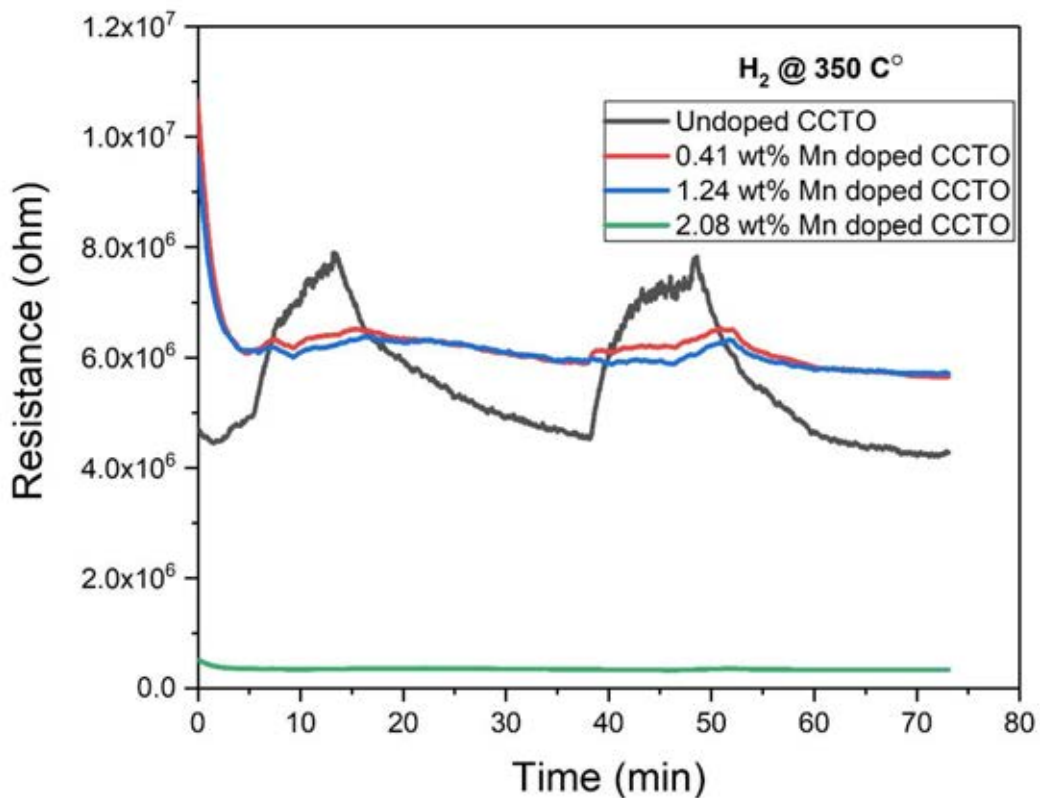
- [12] M. Bayhan, N. Kavasoglu, A study on the humidity sensing properties of $\text{ZnCr}_2\text{O}_4\text{-K}_2\text{CrO}_4$ ionic conductive ceramic sensor, *Sens. Actuators B-Chem.* 117 (2006) 261–265.
- [13] B. Okcan, T. Akin, A low-power robust humidity sensor in a standard CMOS process, *IEEE Trans. Electron Dev.* 54 (2007) 3071–3078.
- [14] Y. Sakai, M. Matsuguchi, N. Yonesato, Humidity sensor based on alkali salts of poly (2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid), *Electrochim. Acta* 46 (2001) 1509–1514.
- [15] M. Dokmeci, K. Najafi, A high-sensitivity polyimide capacitive relative humidity sensor for monitoring anodically bonded hermetic micro packages, *J. Microelectromech. Syst.* 10 (2001) 197–204.
- [16] M. Kimura, A new method to measure the absolute humidity independently of the ambient temperature, in: *Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators (TRANSDUCERS)*, 1995, pp. 843–846.
- [17] J. Zhao, Y.P. Liu, X.W. Li, G.Y. Lu, L. You, X.S. Liang, F.M. Liu, T. Zhang, Y. Du, Highly sensitive humidity sensor based on high surface area mesoporous LaFeO_3 prepared by a nanocasting route, *Sens. Actuators B-Chem.* 181 (2013) 802–809.
- [18] Y. Zhang, X.J. Zheng, T. Zhang, J. Sun, Y. Bian, J. Song, Gas sensing properties of coral-like $\text{Bi}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{TiO}_3$ powders synthesized by metal-organic decomposition, *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011) 115205.
- [19] Q. Qi, T. Zhang, X.J. Zheng, L.F. Wan, Preparation and humidity sensing properties of Fe-doped mesoporous silica SBA-15, *Sens. Actuators B-Chem.* 135 (2008) 255–261.
- [20] J. Wang, B.K. Xu, S.P. Ruan, S.P. Wang, Preparation and electrical properties of humidity sensing films of BaTiO_3 /polystyrene sulfonic sodium, *Mater. Chem. Phys.* 78 (2003) 746–750.
- [21] W.C. Geng, R. Wang, X.T. Li, Y.C. Zou, T. Zhang, J.C. Tu, Y. He, N. Li, Humidity sensitive property of Li-doped mesoporous silica SBA-15, *Sens. Actuators B-Chem.* 127 (2007) 323–329.
- [22] N. Yamazoe, Y. Shimizu, Humidity sensors: principles and applications, *Sens. Actuators B-Chem.* 10 (1986) 379–398.
- [23] M.V. Kulkarni, A.K. Viswanath, P.K. Khanna, Synthesis and humidity sensing properties of conducting poly (N-methyl aniline) doped with different acids, *Sens. Actuators B-Chem.* 115 (2006) 140–149.
- [24] X. Song, Q. Qi, T. Zhang, C. Wang, A humidity sensor based on KCl-doped SnO_2 nanofibers, *Sens. Actuators B-Chem.* 138 (2009) 368–373.

- [25] M. Li, X.L. Chen, Humidity sensitive properties of pure and Mg-doped CCTO, *Sens. Sensors and Actuators B*. 147 (2010) 447-452
- [26] Mohsen Ahmadipour. Effect of thickness on surface morphology, optical and humidity of RF magnetron sputtered CCTO thin films, *Applied. Applied surface Science*. 385 (2016) 182-190
- [27] Mn- doped zinc oxide nanopowders for humidity sensors, *Sensors and Actuator B, Chemical*, 174 (2012) 258-262
- [28] Atomic- scale defects in Crystals [online].
<https://www.slideshare.net/NandanKumar33/calcium-copper-titanate>
- [29] BOCHU, B.e.a., Synthesis and characterization of a series of perovskite titanates isostructural with $\text{CaCu}_3\text{Mn}_4\text{O}_{12}$. *J. Solid state Chem*. 29 (1979) 291-298
- [30] Kwon, S., et al. (2009). "Effects of cation stoichiometry on the dielectric properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$." *Journal of Alloys and Compounds* 473(1): 433-436.
- [31] C. J. Brinker, G.W.S., *Sol-gel science the physics and chemistry of sol-gel processing*. New York, USA. Academic Press., 1990
- [32] พชร โจลัตสาร์ทกุล, การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์มบางแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตบริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีส, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2016) 4-5, 13-14
- [33] Mr Aukrit Natkaeo , Enhancing H_2S sensing response of CCTO thin films beading Ag compounds, thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for degree of master of science program in Physics, 135 (2017)
- [34] S. Pongpaiboonkul, D. Phokharatkul, J.H. Hodak, A. Wisitsoraat, S.K. Hodak, Enhancement of H_2S sensing performances with Fe-doping in CCTO thin films prepared by Sol-gel method, *Sensors and actuator B, Chemical*, 224 (2016) 118-127
- [35] Enhancing H_2S sensing response of CCTO thin films beading Ag compounds, thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for degree of master of science program in Physics, Mr Aukrit Natkaeo, 135 (2017)
- [36] Mohsen Ahmadipour. Fabrication of resistance type humidity sensor based on CCTO thick film, *Measurement. Measurement*. 94 (2016) 902-908
- [37] พชร โจลัตสาร์ทกุล, การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์มบางแคลเซียมคอปเปอร์ไททาเนตบริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีส, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2016) 26-42
- [38] S. Prakenkrung, Effect of gamma radiation on microscopic and chemical properties of Mn, Ni and Ag doping in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ thin films, in, Chulalongkorn University, Bangkok, 2017.

ภาคผนวก

ผลการทดสอบที่ไม่ประสบความสำเร็จ

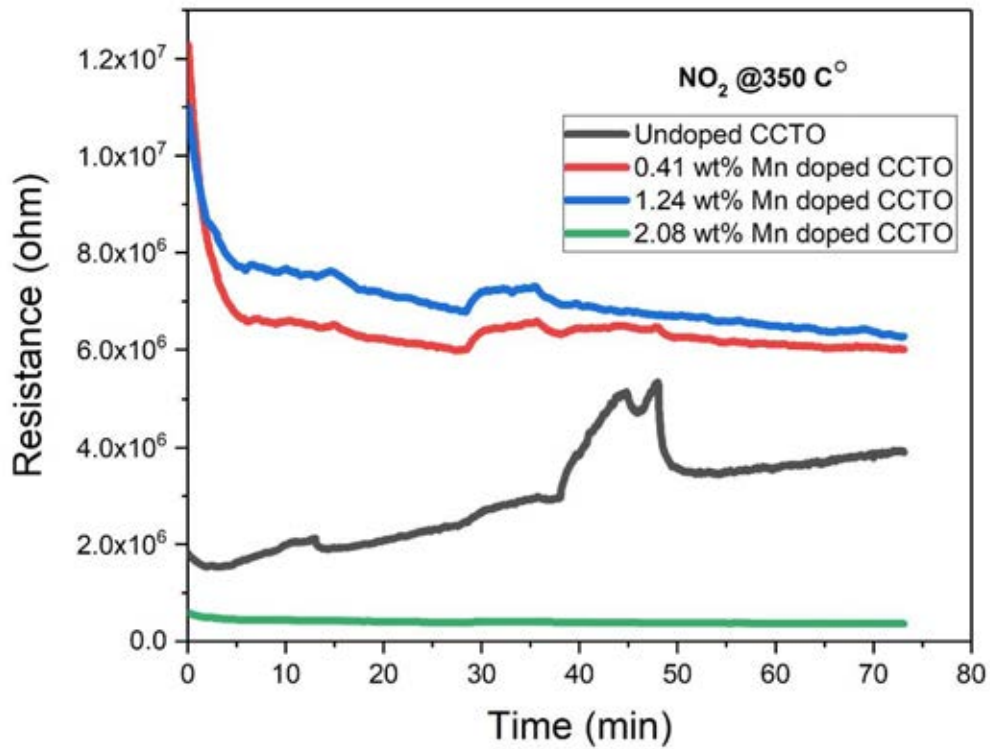
ผลการทดสอบการตรวจจับแก๊สต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CCTO



รูปที่ 6.1 การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen)

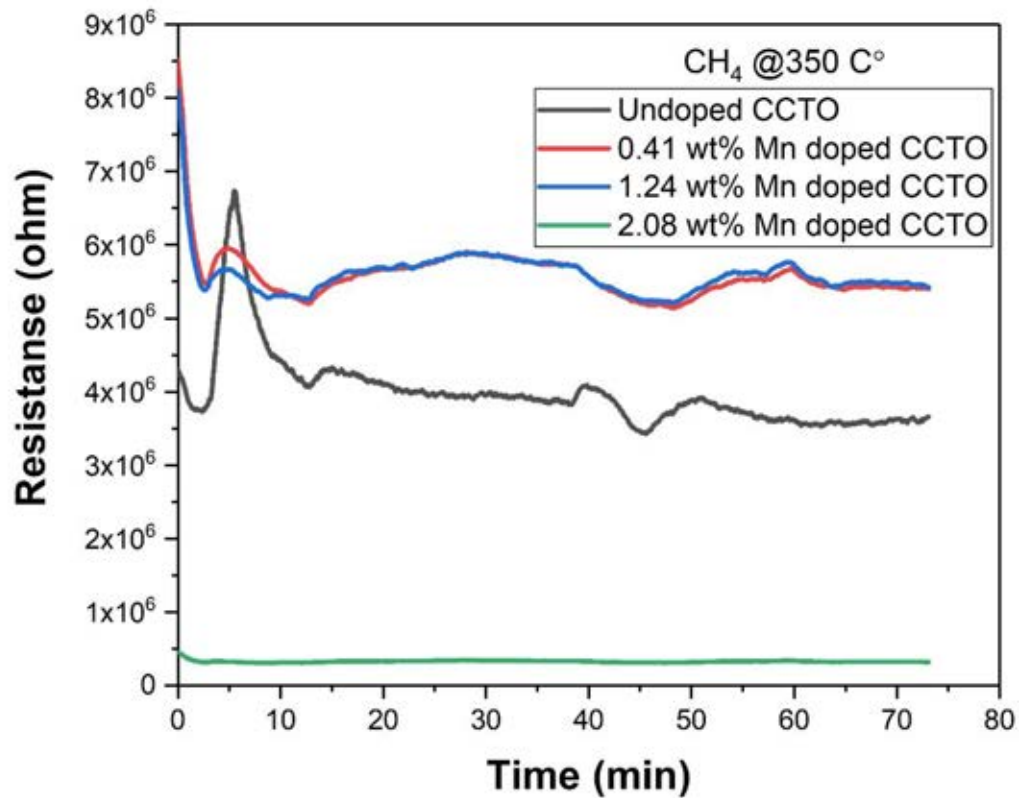
CCTO \ Property	Undoped CCTO	0.41 wt% Mn doped CCTO	1.24 wt% Mn doped CCTO	2.08 wt% Mn doped CCTO
Sensor response, R	1.66	1.01	1.03	1.06
Response time (sec)	447	0.021	37	277
Recovery time (Sec)	1070	1240	1280	1290



รูปที่ 6.2 การตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ

ตารางที่ 6.2 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide)

CCTO \ Property	Undoped CCTO	0.41 wt% Mn doped CCTO	1.24 wt% Mn doped CCTO	2.08 wt% Mn doped CCTO
Sensor response, R	1.39	1.16	1.12	1.13
Response time (sec)	524	172	339	453
Recovery time (Sec)	1230	211	625	649



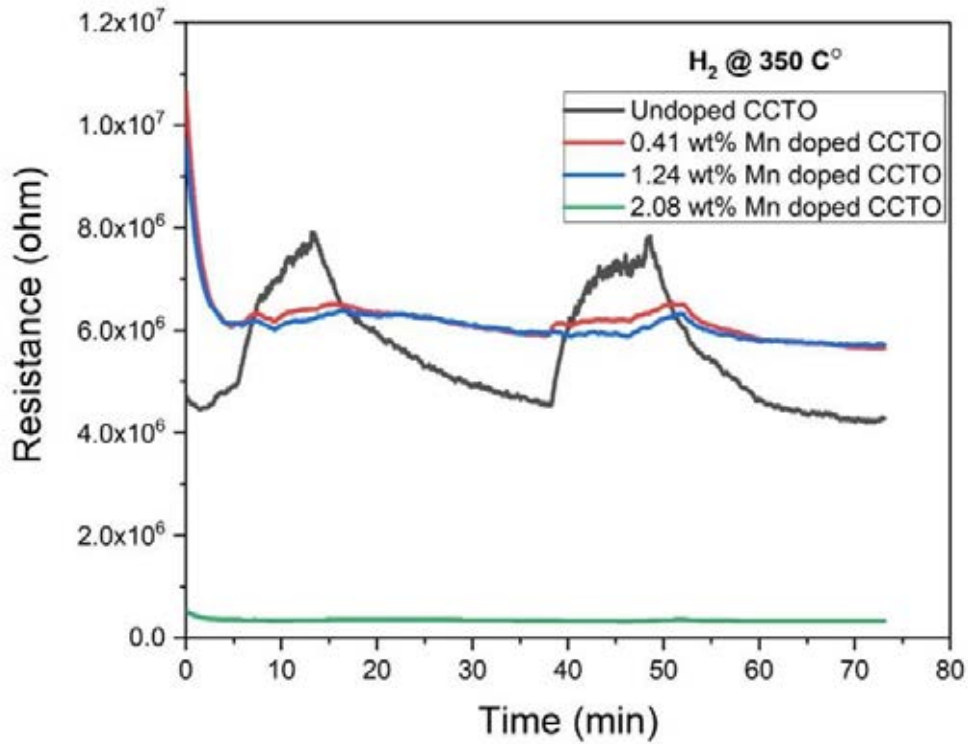
รูปที่ 6.3 การตอบสนองต่อแก๊สมีเทน (Methane) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt% ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3 เวลาในการตอบสนองและเวลาในการฟื้นคืนสภาพของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO ในการทดสอบการตรวจจับแก๊สมีเทน (Methane)

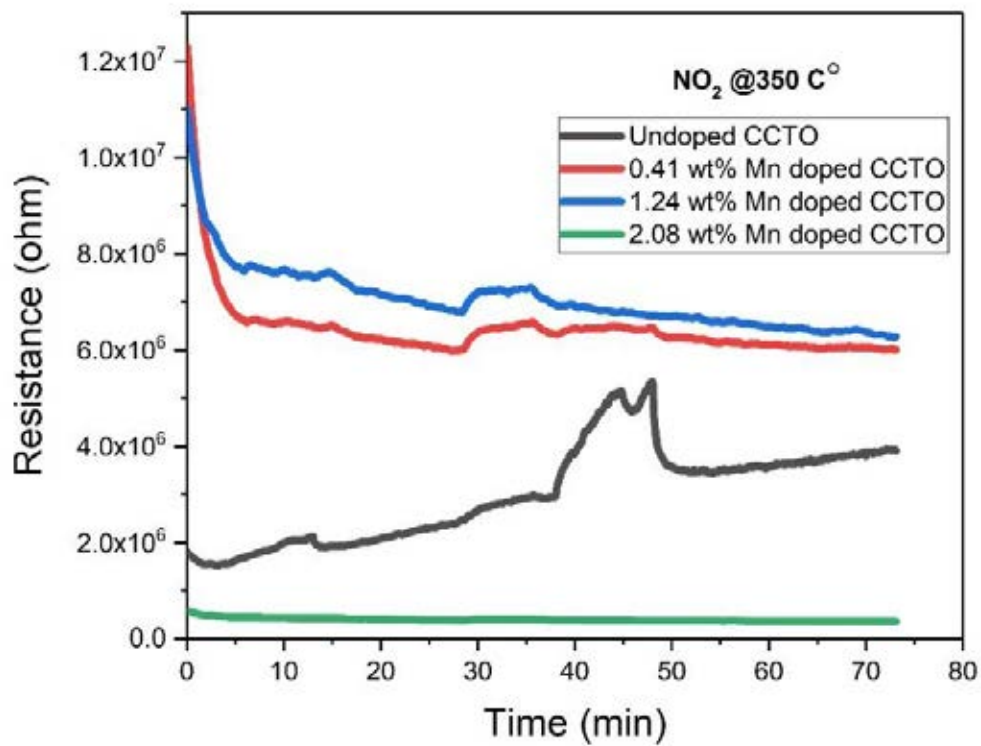
CCTO \ Property	Undoped CCTO	0.41 wt% Mn doped CCTO	1.24 wt% Mn doped CCTO	2.08 wt% Mn doped CCTO
Sensor response, R	1.06	1.05	1.03	1.02
Response time (sec)	18.7	543	328	234
Recovery time (Sec)	1330	507	369	501

ผลการทดสอบแก๊สทั้งสามชนิดนี้ไม่สามารถนำผลมาอธิบายหรือวิเคราะห์ที่ได้จึงนำมาไว้ในส่วนนี้

ผลการทดสอบการตรวจจับแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen : H_2), แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (nitrogen-dioxide : NO_2) และ แก๊สมีเทน (methane : CH_4)



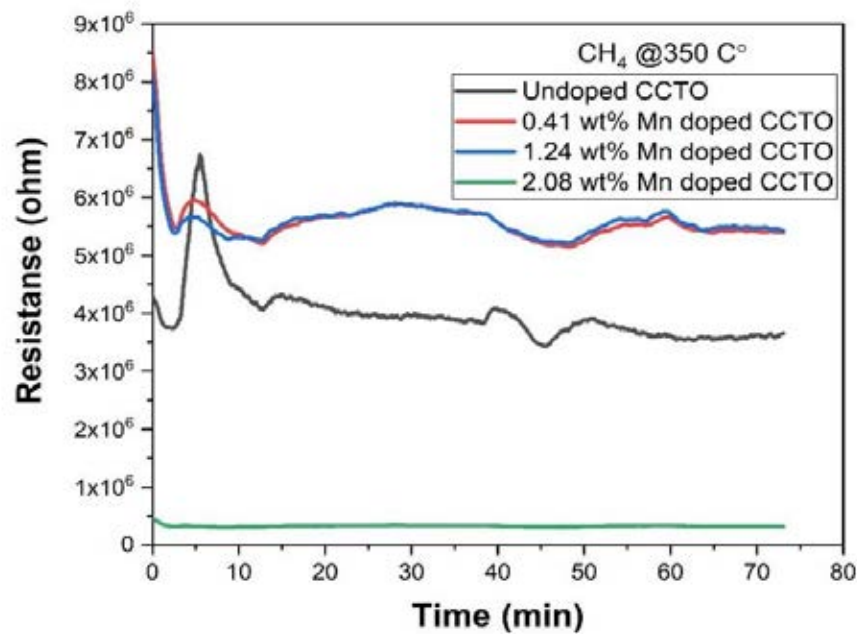
รูปที่ 6.4 การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%



รูปที่ 6.5 การตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (nitrogen dioxide)

ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%,

1.24 wt% และ 2.08 wt%



รูปที่ 6.6 การตอบสนองต่อแก๊สมีเทน (methane) ของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.41 wt%, 1.24 wt% และ 2.08 wt%

รูปที่ 6.4 - 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ และ แก๊สมีเทน ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น 10 ppm และค่าความต้านทานของเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO (โอห์ม) ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส (จากการทดลองเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้) พบว่าลักษณะกราฟและสัญญาณการตอบสนองต่อแก๊สนั้น ๆ ที่ได้นั้นไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันไม่ว่าจะเป็น CCTO บริสุทธิ์ หรือ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ไม่สามารถดึงข้อมูลออกมาเป็นตัวเลขเพื่อทำการวิเคราะห์ผลได้ แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟทั้ง 3 ก็ยังสามารถบอกได้ว่าเซนเซอร์ฟิล์มบาง CCTO บริสุทธิ์ และ CCTO ที่เจือด้วยแมงกานีสความเข้มข้นต่าง ๆ ไม่สามารถตรวจวัดค่าการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ และ แก๊สมีเทน ได้ในเบื้องต้นจากผลที่ได้นั้นอาจเป็นเพราะเกิดข้อผิดพลาดบางประการขึ้นขณะทดลองจึงทำให้ได้ผลที่ไม่ดีดังที่ต้องการ อาจเกิดขึ้นได้ในส่วนของการโพรบ คือ ขั้วไฟฟ้าสำหรับการโพรบแตะกับขั้วอิเล็กโทรดบนตัวเซนเซอร์ได้ไม่ดีพอ หรือ อาจเกิดจากแผงวงจรคือ ช่องสัญญาณบนแผงวงจรภายในอาจจะมีปัญหาโดยที่ผู้ทดลองไม่สามารถแก้ไขได้ ในส่วนของตัวเซนเซอร์นั้นอาจเกิดจากการทำมาเป็นเวลานานน่าจะมีบางส่วนของเซนเซอร์ที่เกิดการสึกกร่อนหรือเสียหายทำให้ปฏิกิริยาการตรวจจับกับแก๊สดังกล่าวได้ไม่ดีเท่าที่ควร