

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

โครงสร้างนาโนของซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีการออกซิเดชัน จากการทดลองในบทที่ 3 ได้นำสารซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาและวิเคราะห์ สังเคราะห์ได้มาศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) และศึกษาสมบัติในการตรวจจับไอเอทานอล ซึ่งผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

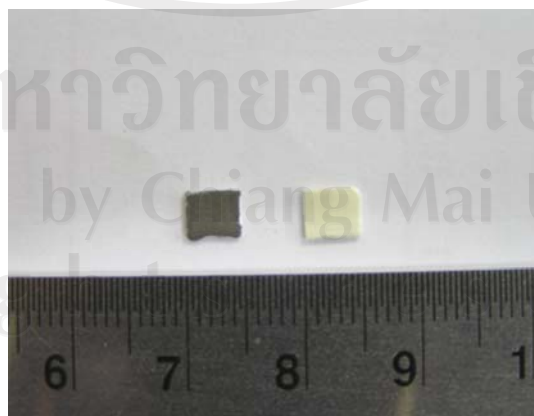
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

หลังจากที่ได้ฟิล์มหนาของโครงสร้างนาโนของซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำที่ผ่านกระบวนการเผาด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 แล้ว พบว่ามีลักษณะทางกายภาพของฟิล์มหนาของโครงสร้างที่เจือทองคำและไม่ได้เจือทองคำบางอย่างที่เปลี่ยนแปลงไป และสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน คือ สีของฟิล์มหนาที่ไม่ได้เจือทองคำจะเปลี่ยนเป็นสีขาวซึ่งเป็นลักษณะของซิงก์ออกไซด์ ดังรูปที่ 4.1 และสีของฟิล์มหนาที่เจือทองคำจะเปลี่ยนไป โดยสีมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปสู่สีอ่อนที่ค่อนข้างขาวมากขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิที่มากขึ้นในแต่ละเปอร์เซ็นต์ของการเจือทองคำ ดังรูปที่ 4.2

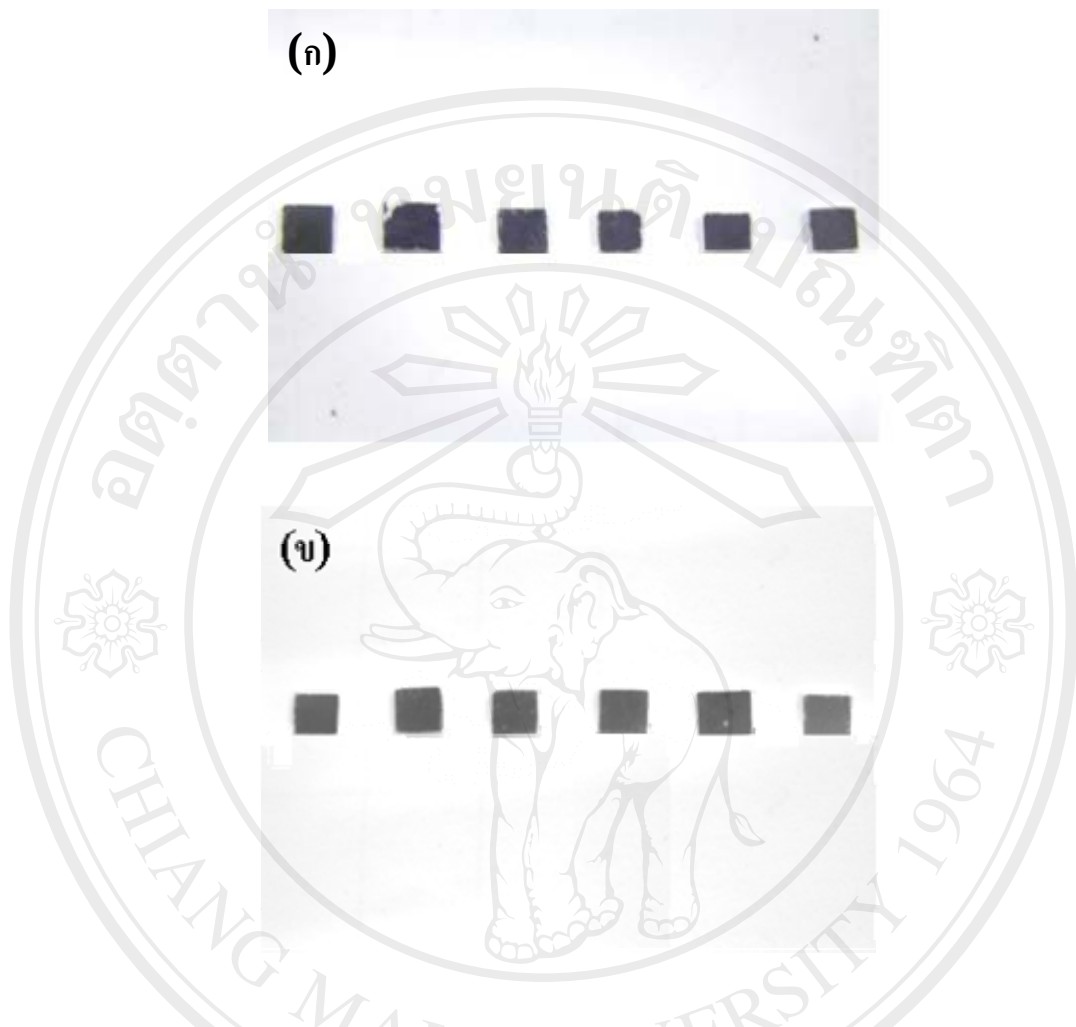
เงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้สำหรับสังเคราะห์โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เจือด้วยทองคำที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการเผาฟิล์มหนาของซิงก์ที่เจือด้วยทองคำ

สารตั้งต้น	อุณหภูมิที่ใช้เผา (°C)	ระยะเวลาที่ใช้เผา (ชั่วโมง)
ผงสังกะสี ที่ไม่ได้เจือทองคำ	500	6
	600	6
	700	6
	800	6
	900	6
ผงสังกะสี เจือทองคำ 5% wt	500	6
	600	6
	700	6
	800	6
	900	6
ผงสังกะสี เจือทองคำ 10% wt	500	6
	600	6
	700	6
	800	6
	900	6



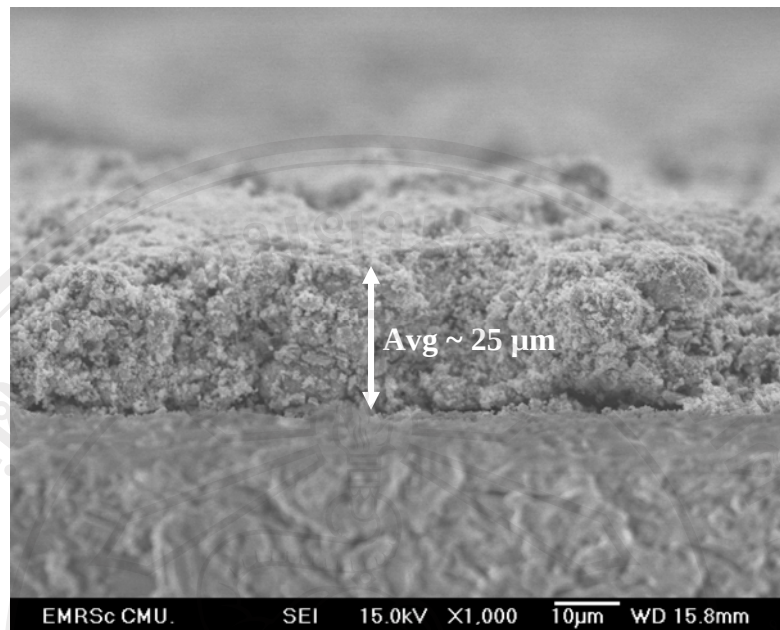
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มหนาของผงสังกะสีที่ไม่ได้เจือทองคำก่อนกระบวนการเผาและหลังกระบวนการเผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ ตามลำดับ



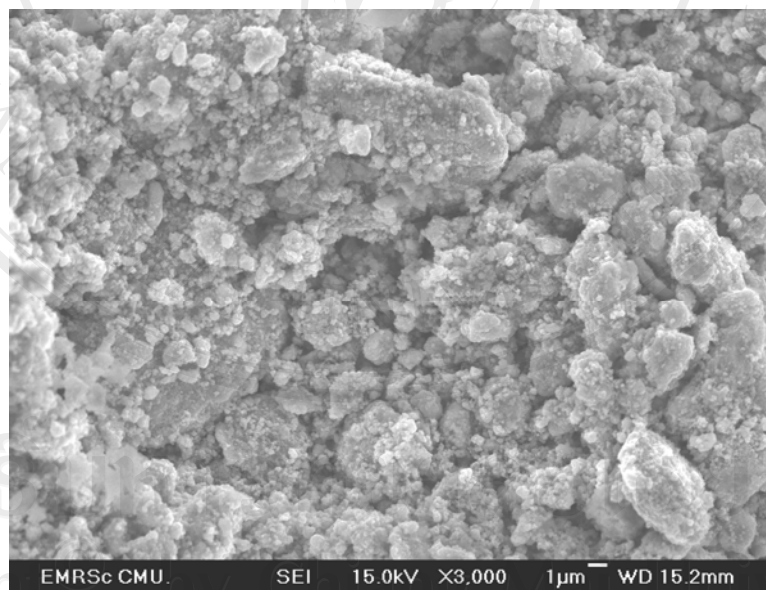
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะฟิล์มหนาที่เกิดอบลงบนแผ่นรองรับอะลูมินา จากซ้ายไปขวาเป็นลักษณะที่ยังไม่ได้ผ่านการเผา, เผาที่อุณหภูมิ 500°C , 600°C , 700°C , 800°C และ 900°C

(ก) เจือทองคำ 5% wt (ข) เจือทองคำ 10% wt

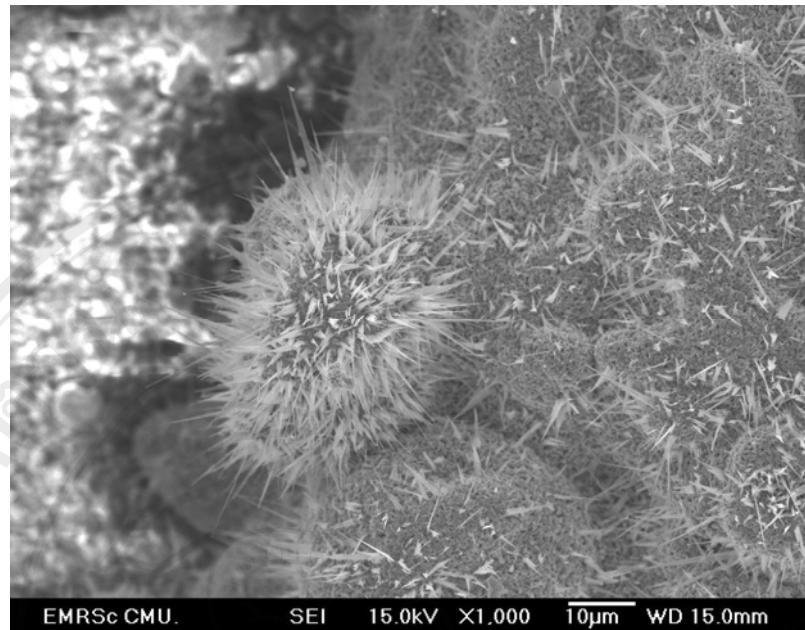
จากรูปที่ 4.3 แสดงความหนาของฟิล์มบนแผ่นรองรับอะลูมินาซึ่งมีความหนาของฟิล์มประมาณ 22 – 28 ไมโครเมตร มีความหนาโดยเฉลี่ย 25 ไมโครเมตร จากการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ก่อนกระบวนการเผาและซิงก์ออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วด้วย SEM ดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.7 พบโครงสร้างนาโนของซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำในปริมาณที่แตกต่างกันเกิดขึ้นทั่วไปบนฟิล์มหนา และโครงสร้างที่พบนั้นมีลักษณะคล้ายกับ nanobelts และ nanowires ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร



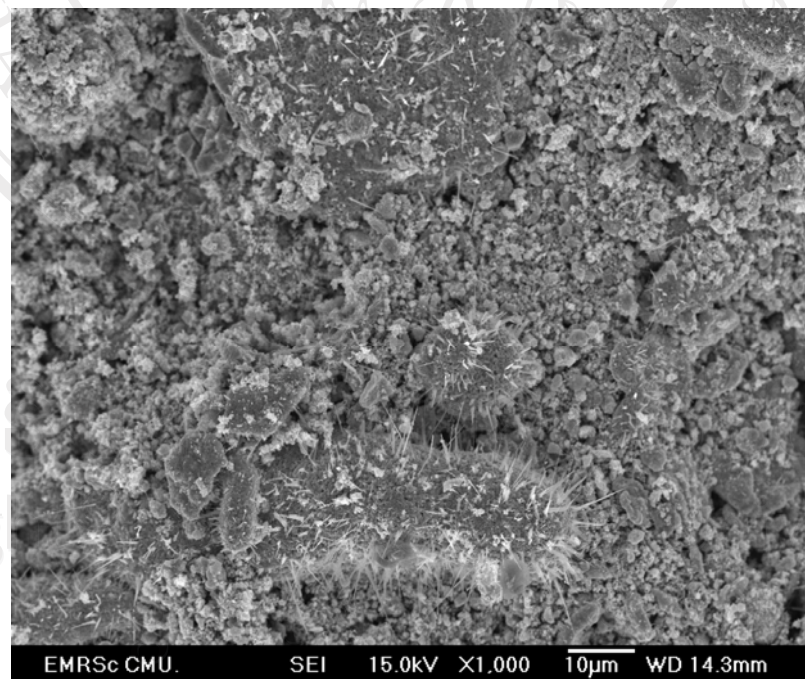
รูปที่ 4.3 แสดงความหนาของฟิล์มบนแผ่นรองรับอะลูมินา



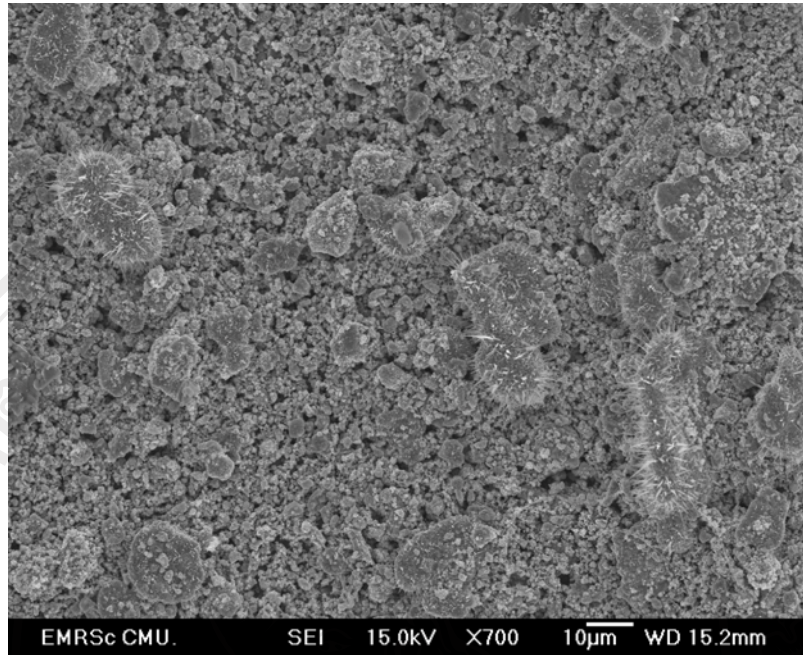
รูปที่ 4.4 แสดงภาพจาก SEM ของโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ก่อน
กระบวนการเผา



รูปที่ 4.5 แสดงภาพจาก SEM ของโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์หลังกระบวนการเผา



รูปที่ 4.6 แสดงภาพจาก SEM ของโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนัก หลังกระบวนการเผา



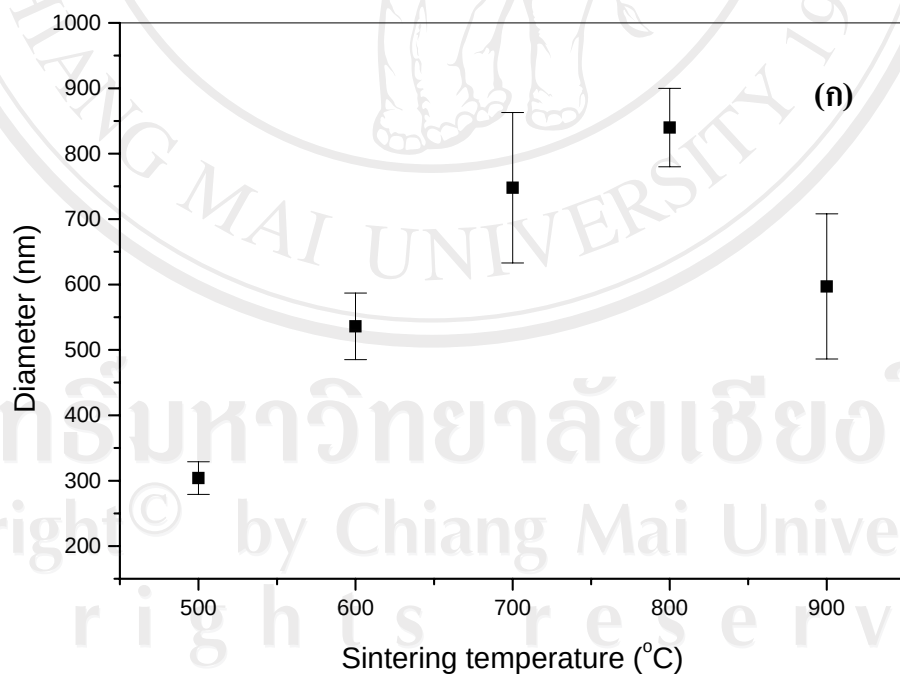
รูปที่ 4.7 แสดงภาพจาก SEM ของโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำ 10% โดยน้ำหนัก หลังกระบวนการเผา

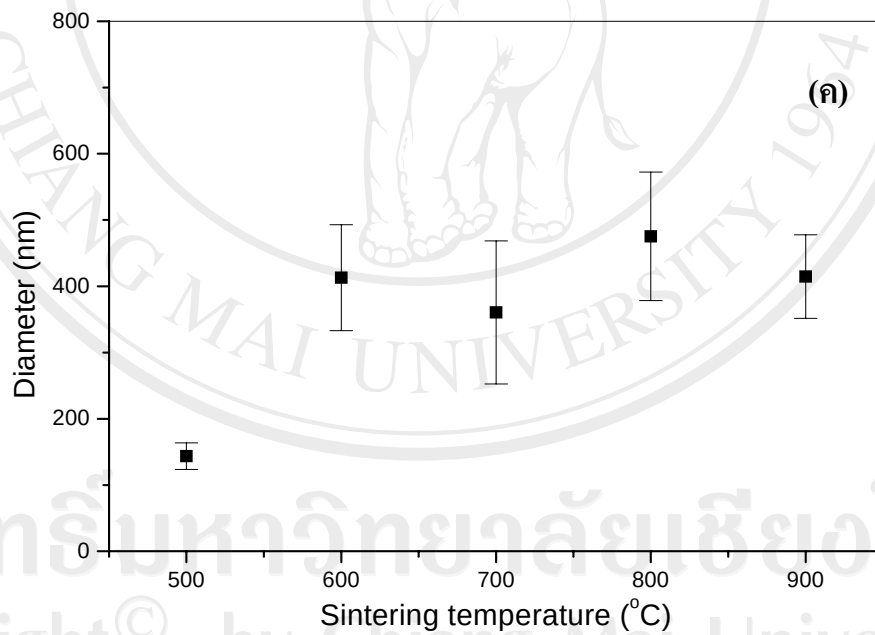
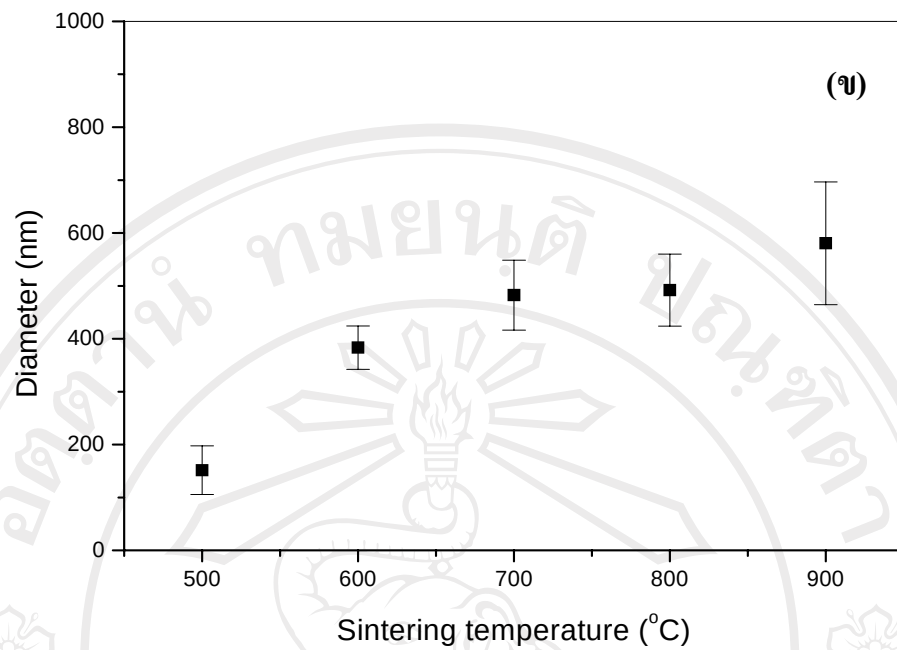
จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำที่เผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ โดย SEM เมื่อวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำ ที่เผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ พบว่าสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบขนาดและความยาวโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ
ในเงื่อนไขและอุณหภูมิการเผาต่างๆ

Sintering temperature (°C)	Diameter (nm)			Length (μm)		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%
500	172 – 436	50 - 324	54 - 264	1.2 – 5.7	1.4 – 4.8	0.9 – 4.6
600	307 – 764	107 - 793	187 – 638	0.7 – 5.5	1.7 – 8.7	1.0 – 4.6
700	346 – 1589	146 - 820	36 – 685	0.8 – 7.6	0.2 – 8.9	1.0 – 4.9
800	319 – 1362	218 - 766	18 – 932	0.9 – 8.0	0.9 – 5.5	0.6 – 7.0
900	228 - 966	35 - 1126	164 - 665	0.8 – 5.3	1.3 – 8.1	0.7 – 4.0

จากตารางที่ 4.2 เมื่อนำค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำในแต่ละเงื่อนไขมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



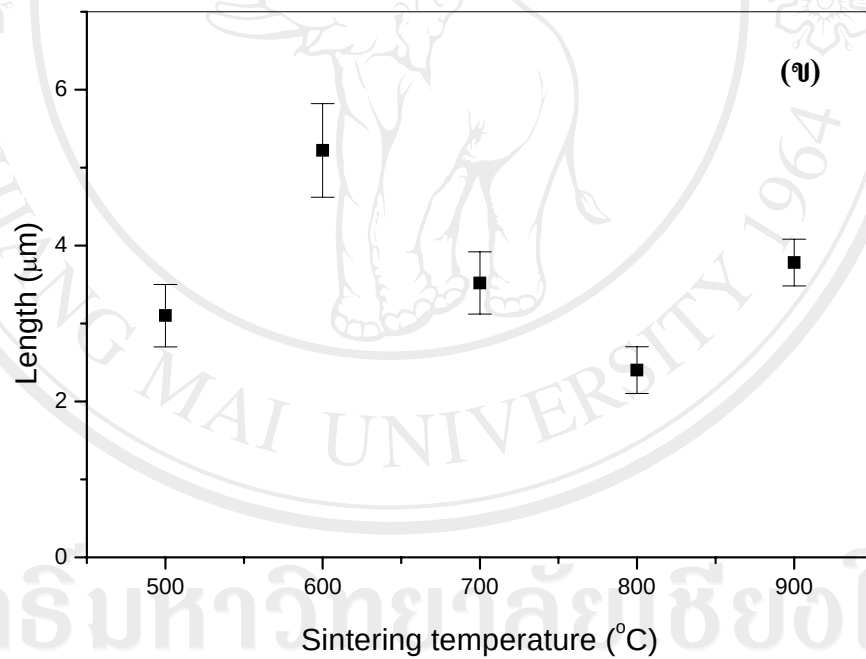
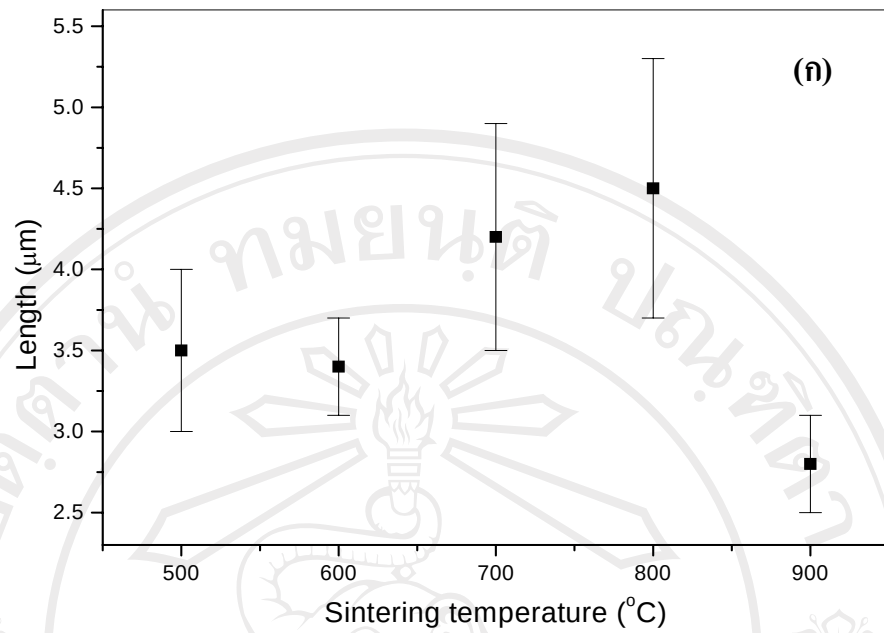


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงขนาดของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ

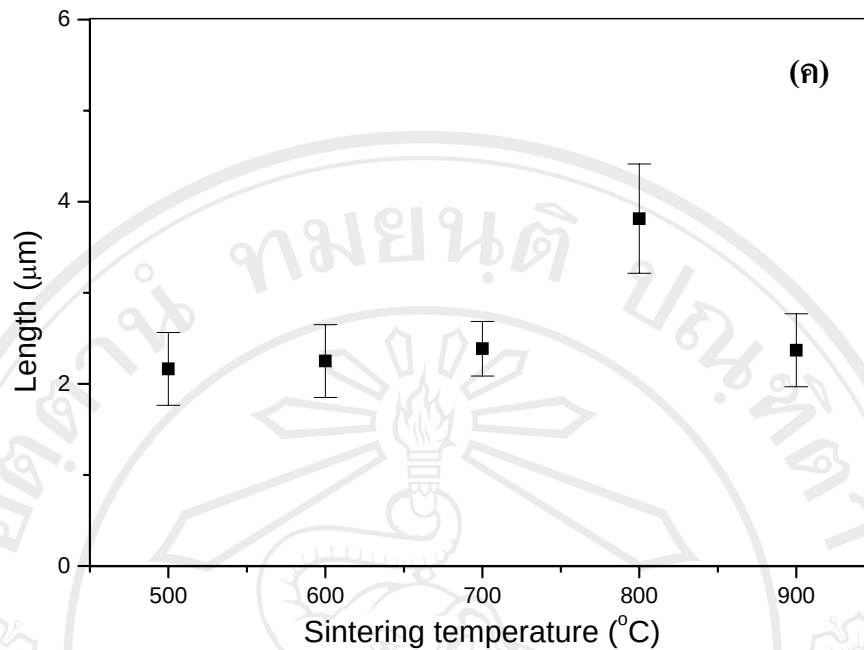
(ก) 0% wt

(ข) 5% wt

(ค) 10% wt



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



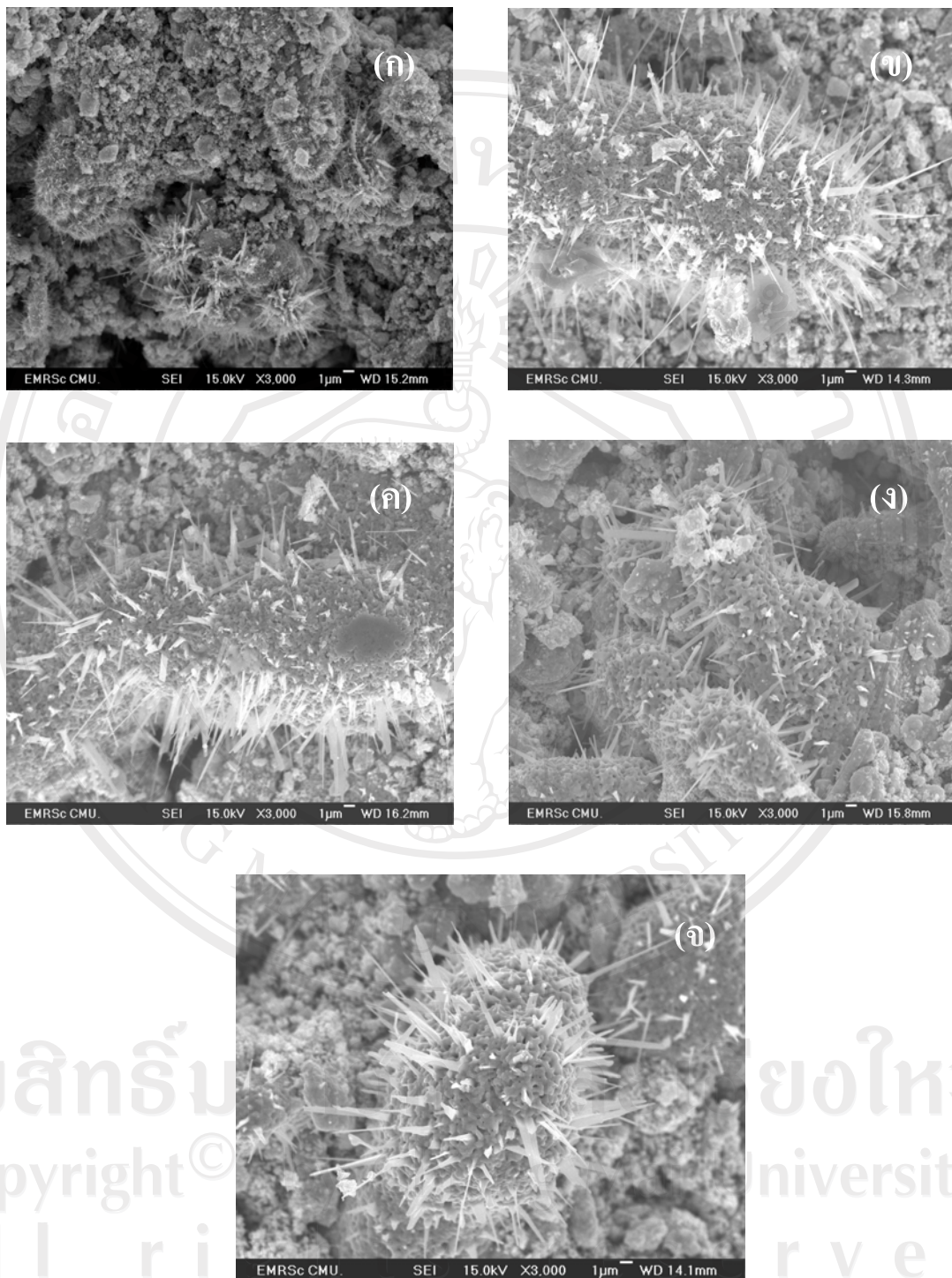
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความยาวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ

(ก) 0% wt (ข) 5% wt (ค) 10% wt

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำที่สังเคราะห์ได้ที่เผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ โดย SEM สามารถวิเคราะห์ผลต่างๆ ได้ดังนี้

4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้เผาคือขนาด ความยาวและความหนาแน่น ของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำ

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำที่สังเคราะห์ได้ที่เผาด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ คือ 500, 600, 700, 800 และ 900 °C โดย SEM พบว่า อุณหภูมิที่ใช้เผาน่าจะมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เจือทองคำที่สังเคราะห์ได้ เมื่อพิจารณาจากกราฟ ความยาวของโครงสร้างในแต่ละเงื่อนไขของการเจือทองคำ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก และมีแนวโน้มของขนาดที่มากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนความหนาแน่นของโครงสร้างไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังรูปที่ 4.10

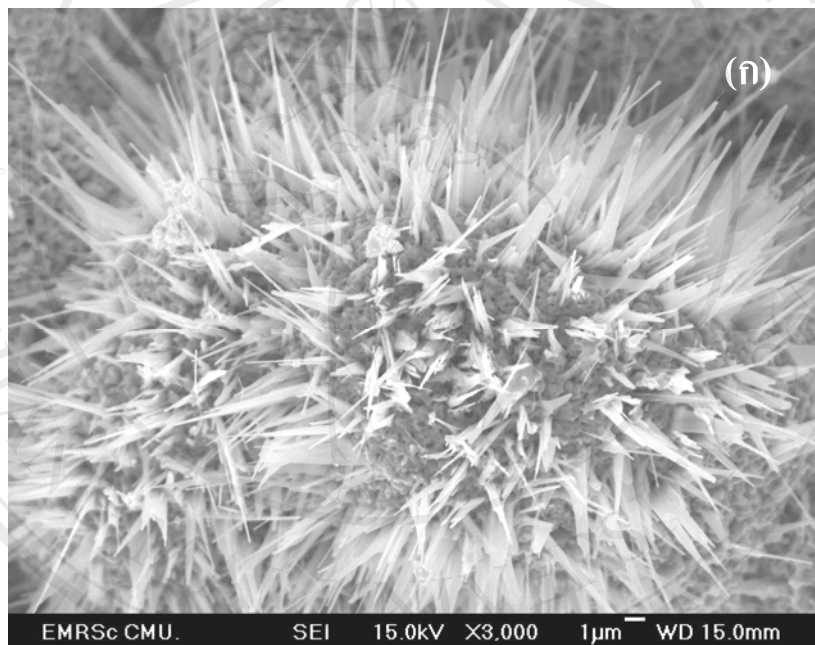


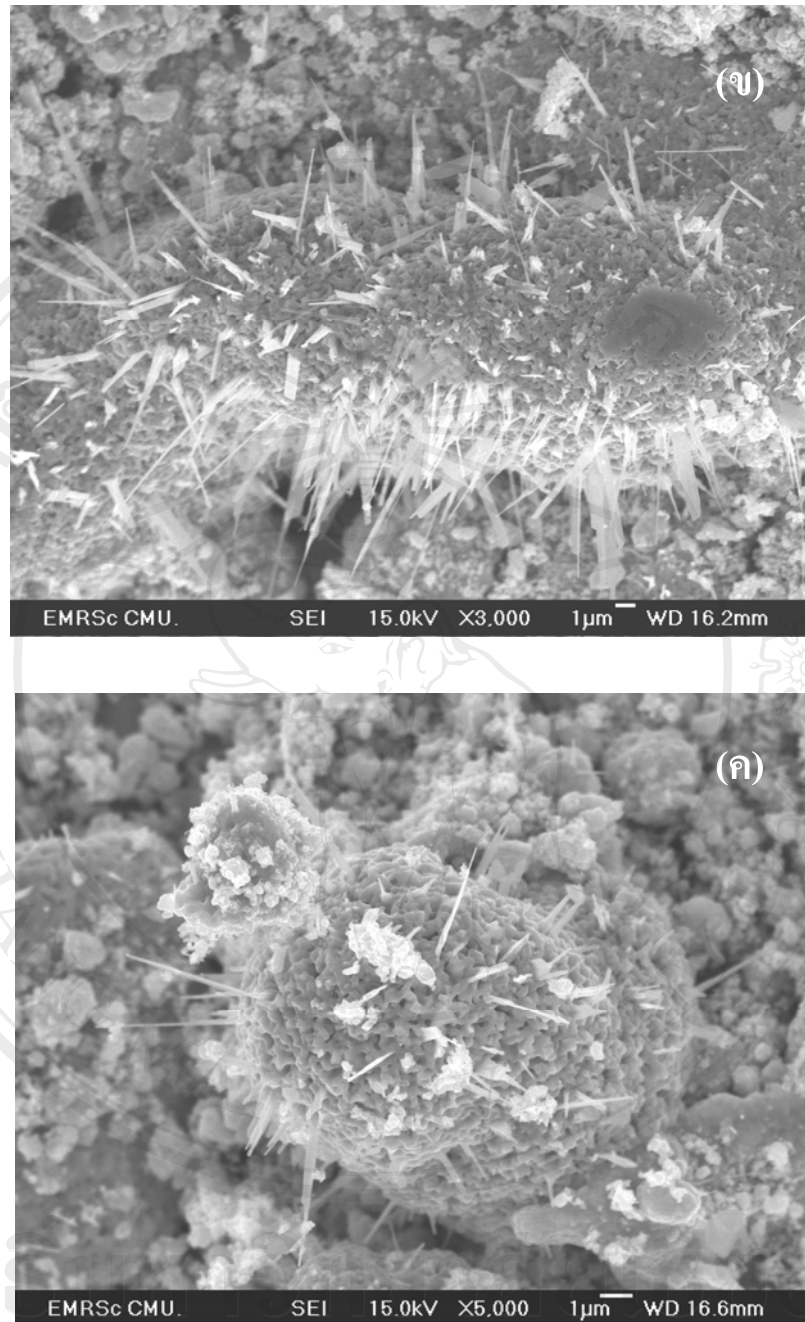
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ

(ก) 500 °C (ข) 600 °C (ค) 700 °C (ง) 800 °C (จ) 900 °C

4.1.2 การศึกษาผลของการเจือทองคำต่อขนาด ความยาวและความหนาแน่นของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำที่สังเคราะห์ได้ เมื่อเจือทองคำ 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนักและเผาที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 700 °C จะเห็นว่าการเจือทองคำด้วยปริมาณที่ต่างกันไม่มีผลต่อความแตกต่างของขนาดและความยาวของโครงสร้างอย่างชัดเจนแต่สังเกตเห็นว่า ความหนาแน่นของโครงสร้างจะลดลงเมื่อมีการเจือทองคำในปริมาณที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.11





รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700°C เจือทองคำ

(ก) 0% wt

(ข) 5% wt

(ค) 10% wt

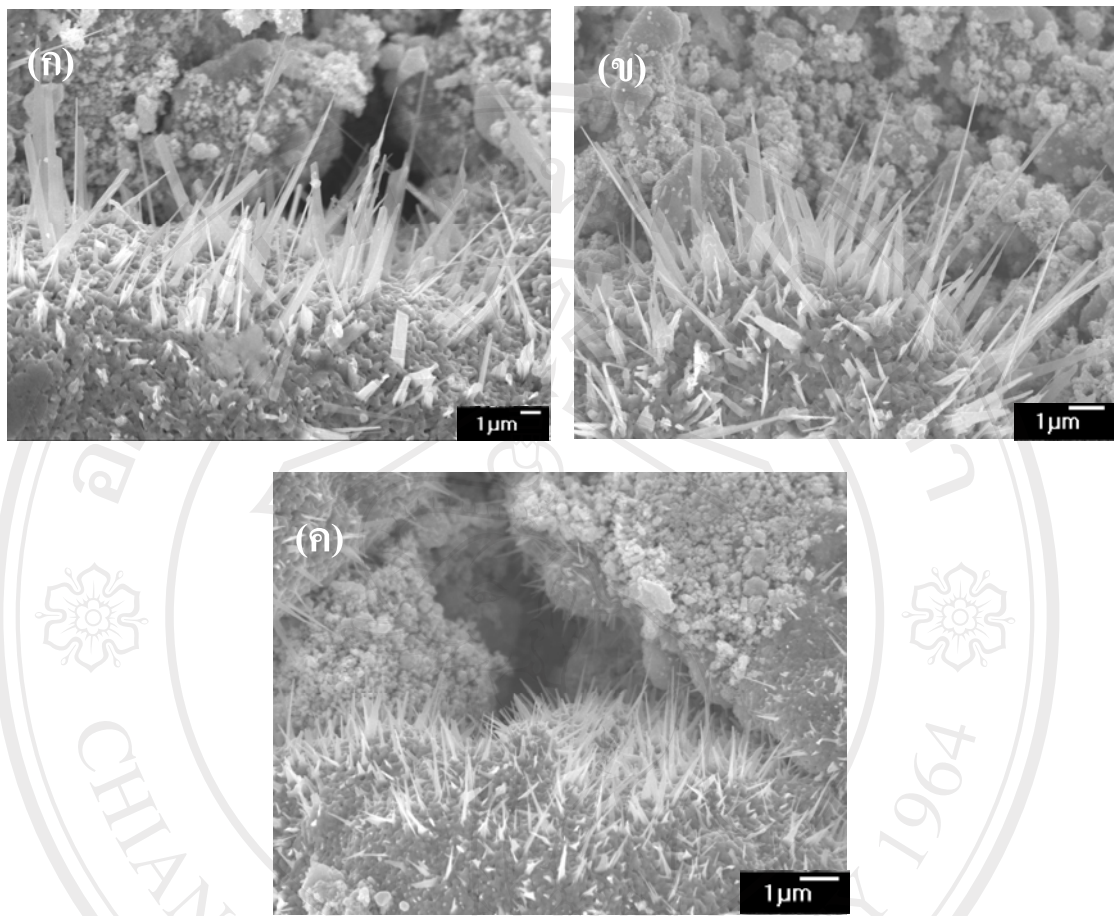
4.1.3 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ก๊าซเนื่องจากการอบในเวลาที่แตกต่างกัน

เนื่องจากการอบโดยใช้เตาอบด้วยอุณหภูมิดังกล่าว ไม่สามารถไล่ความชื้นที่เกาะบนผิวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำได้ นอกจากนี้ยังใช้เวลานานมาก กว่าค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซนเซอร์ก๊าซจะค่าคงที่ จึงทำการปล่อยไอเอทานอลได้ จึงได้เปลี่ยนวิธีการอบใหม่ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจาก Power supply ไปยัง heater โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน heater ประมาณ 2 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 200 – 240 °C ดังรูปที่ 4.12 เปรียบเสมือนเป็นการทำให้เซนเซอร์ก๊าซมีการทำงานตลอดเวลา นอกจากนี้ยังทำให้ค่าความต้านทานเริ่มต้นคงที่เร็วขึ้น



รูปที่ 4.12 แสดงการอบเซนเซอร์ก๊าซโดยใช้ Power supply ยี่ห้อ Thurlby รุ่น PL 310 ของบริษัท RS Components จำกัด

เมื่อนำเซนเซอร์ก๊าซที่เผาเป็นเวลา 6 ชั่วโมงมาอบด้วยวิธีใหม่ และพิจารณาลักษณะโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำ 5% โดยนำน้ำหนักก่อนการอบ และในเวลาการอบ 30 วัน และ 80 วัน จะเห็นว่าขนาดและความยาวของโครงสร้างก่อนการอบและหลังการอบ 30 วัน ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยมีขนาดอยู่ระหว่าง 250 - 750 และ 137- 877 นาโนเมตร และมีขนาดเฉลี่ยเป็น 500 และ 507 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับความยาวของโครงสร้างอยู่ระหว่าง 0.2-7 และ 0.6 -10 ไมโครเมตร ตามลำดับ ส่วนขนาดและความยาวของโครงสร้างที่ผ่านการอบ 80 วัน จะเห็นว่ามีความที่เล็กและสั้นลง โดยมีขนาดและความยาวอยู่ระหว่าง 71- 484 นาโนเมตรและ 0.1-5 ไมโครเมตร ขนาดโดยเฉลี่ยของโครงสร้างเป็น 244 นาโนเมตร ซึ่งอาจจะเป็นผลจากการอบ แสดงดังรูปที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนัก
(ก) ก่อนการอบ (ข) อบ 30 วัน (ค) อบ 80 วัน

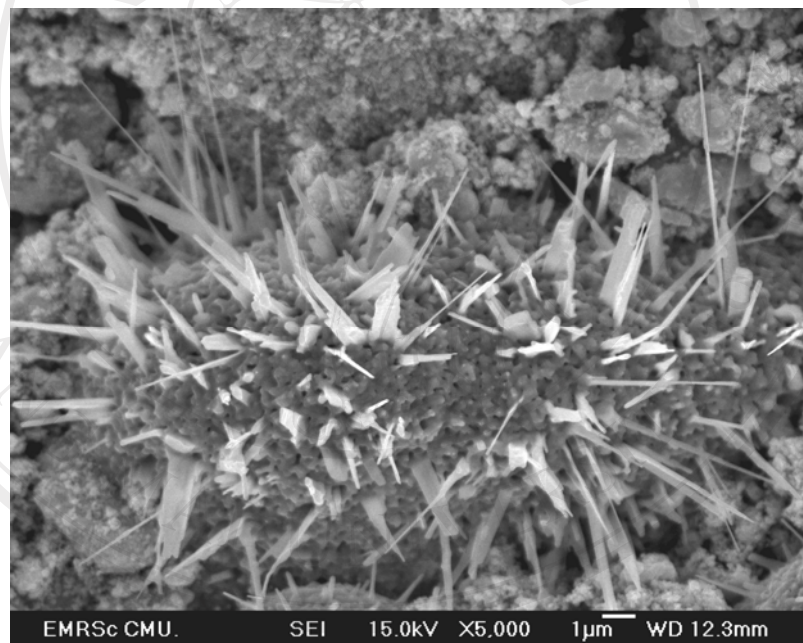
ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดและความยาวโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนักที่
เวลาการอบต่าง ๆ กัน

Sample & Condition	Diameter (nm)	Length (μm)	Average diameter (nm)
5%700°C before baking	250 - 750	1.7-7.0	500
5%700°C baked 30 days	137 - 877	0.6 - 10.0	507
5%700°C baked 80 days	71 - 484	0.1 - 5.0	244

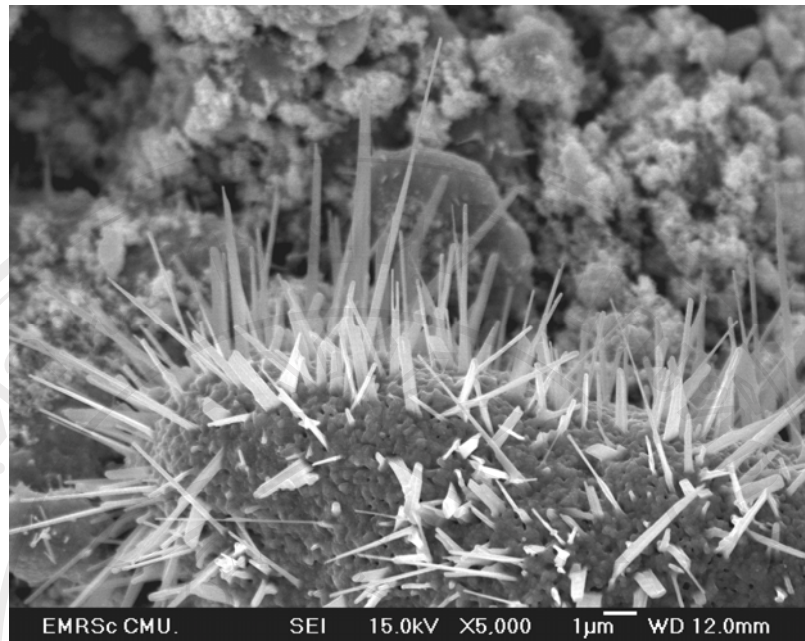
4.1.4 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ก๊าซจากการเผาโครงสร้างเป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง

จากการเผาเป็นเวลา 6 ชั่วโมงนั้นทำให้เซนเซอร์ก๊าซเกิดความไม่เสถียรในแต่ละครั้งของการทดสอบกับไอเอทานอลดังแสดงจากผลการทดลองข้างต้น อาจจะมีสาเหตุมาจากโครงสร้างเกิดออกซิเดชันไม่หมดทำให้โครงสร้างบางส่วนไม่เป็นซิงก์ออกไซด์ เมื่อนำเซนเซอร์ก๊าซไปอบแล้วนำมาทดสอบแต่ละครั้งก็ทำให้บางส่วนเกิดการออกซิเดชันกลายเป็นซิงก์ออกไซด์ขึ้น

ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองโดยนำฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% ไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนซึ่งมีอัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ได้ผลดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 แสดงภาพจาก SEM ของโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำ 5% โดยนำหน้าหลังกระบวนการเผา 12 ชั่วโมง

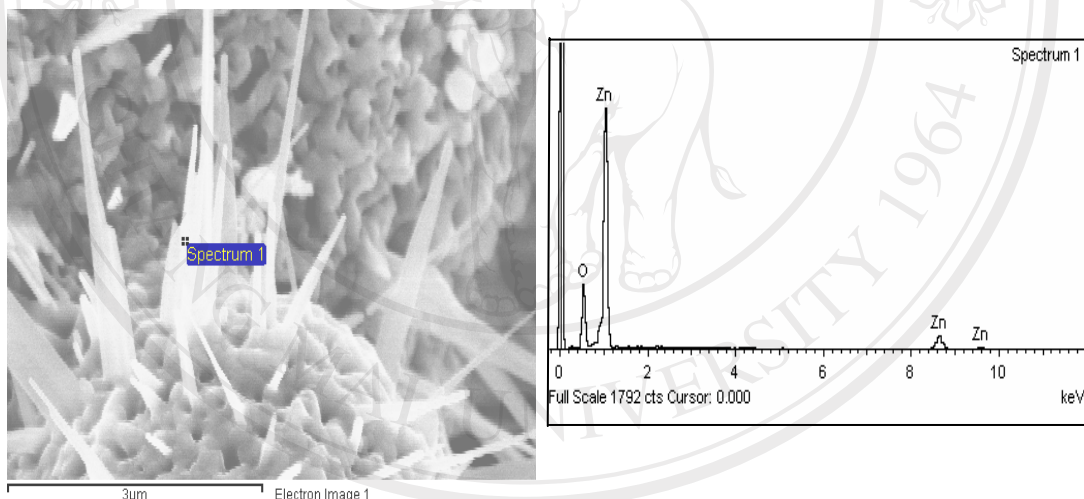


รูปที่ 4.15 แสดงภาพจาก SEM ของโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนัก หลังกระบวนการเผา 24 ชั่วโมง

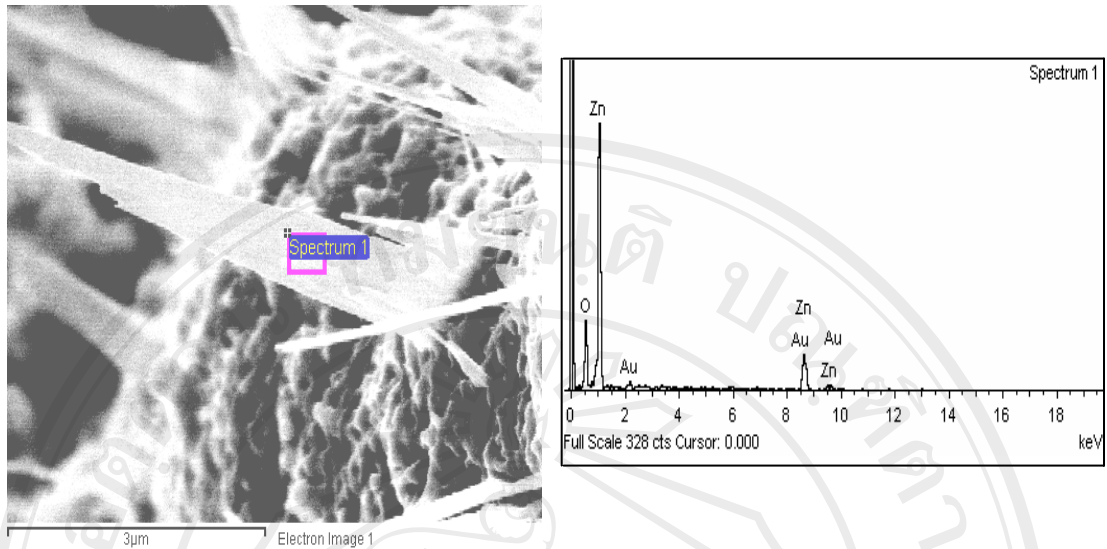
เมื่อฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนักเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ลักษณะของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.23 และฟิล์มหนาของซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนักเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.24 ลักษณะของโครงสร้างมีความคล้ายคลึงกับการเผาในระยะเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาจากขนาดและความยาวของโครงสร้างที่เผา 12 ชั่วโมง พบว่า มีขนาดประมาณ 110 - 660 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 0.8 - 8.2 ไมโครเมตร โดยมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 382 นาโนเมตร สำหรับโครงสร้างที่เผา 24 ชั่วโมง มีขนาดประมาณ 170 - 500 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 2.0 - 7.0 ไมโครเมตร โดยมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 330 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดและความยาวของโครงสร้างที่เผา 6 ชั่วโมง ซึ่งมีขนาดประมาณ 250 - 750 นาโนเมตรและมีความยาวประมาณ 1.7 - 7.0 ไมโครเมตร โดยมีขนาดโดยเฉลี่ย 500 นาโนเมตร จะเห็นว่าโครงสร้างที่เผา 12 ชั่วโมงจะมีขนาดที่น้อยกว่าและค่อนข้างสั้นกว่าโครงสร้างที่เผา 6 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)

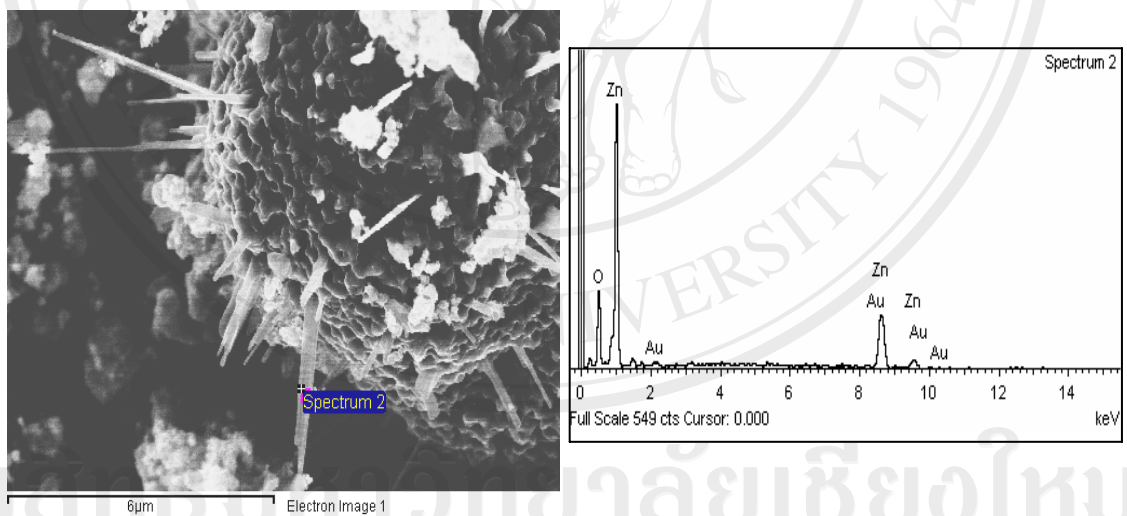
เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เจือทองคำบนฟิล์มหนาที่เผาด้วยเงื่อนไขต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แล้ว จึงวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) เพื่อยืนยันว่า โครงสร้างนาโนที่สังเคราะห์ได้ คือโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์จริงหรือไม่ ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังนี้ จากรูปที่ 4.16 – 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 0, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 แสดงตำแหน่งและกราฟสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 0% โดยน้ำหนักด้วย EDS



รูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งและกราฟสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยนำหน้าด้วย EDS



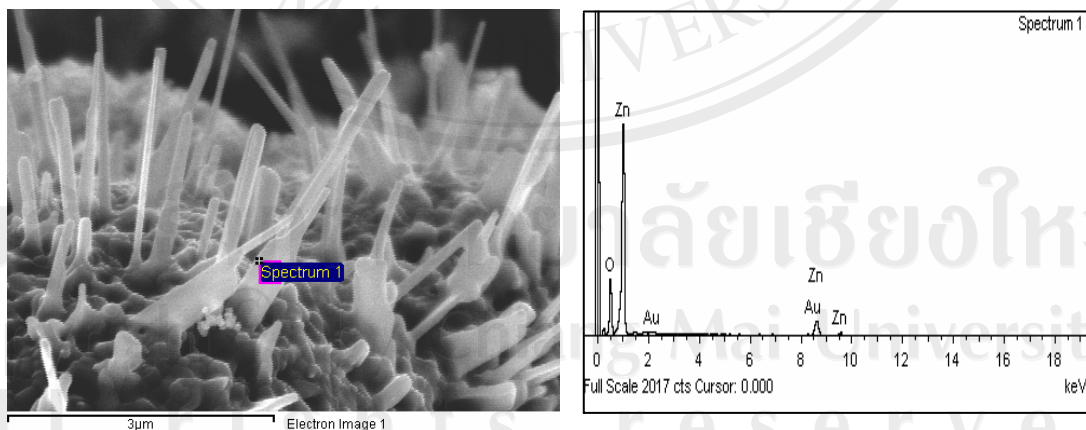
รูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งและกราฟสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 10% โดยนำหน้าด้วย EDS

ตารางที่ 4.4 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และ โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ

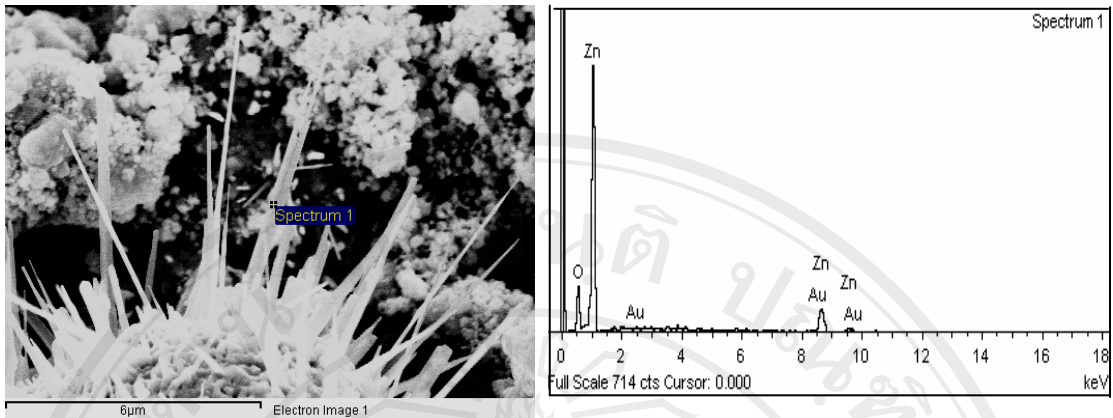
Element	Atomic (%)		
	0% wt	5% wt	10% wt
Zn	38.09	56.45	64.24
O	61.91	43.05	35.49
Au	-	0.50	0.27

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดย EDS พบว่าโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วย ธาตุซิงก์ (Zinc, Zn) และออกซิเจน (Oxygen, O) เท่านั้น สำหรับโครงสร้างที่เจือด้วยทองคำ 5% และ 10% โดยน้ำหนัก พบฟลักของทองคำปรากฏขึ้นซึ่งมีพลังงานประมาณ 2.1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ซึ่งจะอยู่ในระดับพลังงานชั้น M_{α} ทำให้สรุปได้ว่ามีองค์ประกอบของทองคำในโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้บนฟิล์มหนารองรับด้วยแผ่นอะลูมินาจริง

เมื่อนำโครงสร้างที่เผา 12 และ 24 ชั่วโมงมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องสเปกโตรสโกปีพลังงานกระจาย (EDS) พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกันกับโครงสร้างที่เผา 6 ชั่วโมง (จากรูปที่ 4.17) โดยพบทองคำปะปน (incorporation) อยู่กับโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งและสเปกตรัมของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนักเมื่อเผา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 แสดงตำแหน่งและสเปกตรัมของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนักเมื่อเผา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และ โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำที่เผาเป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง

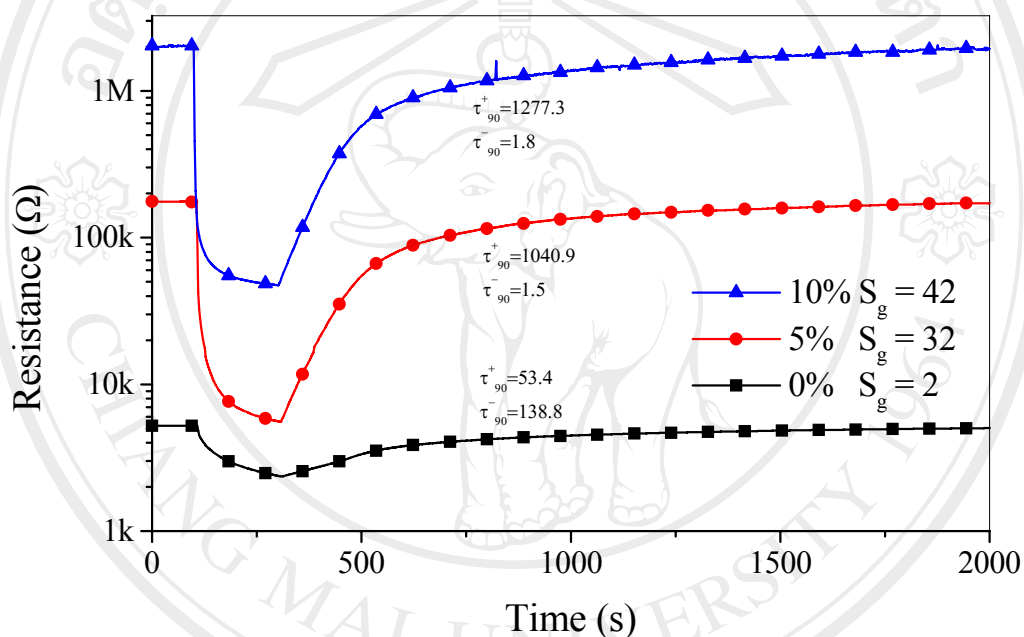
Element	Atomic (%)	
	12 hrs	24 hrs
Zn	42.34	58.82
O	57.50	41.14
Au	0.15	0.04

4.3 ผลจากการทดสอบกับไอเอทานอล

4.3.1 ผลการทดสอบกับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซเมื่อเผาโครงสร้างเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

เมื่อนำเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนักโดยเลือกเซนเซอร์ก๊าซที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงมาทดสอบกับไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm โดยใช้อุณหภูมิทดสอบ 240°C พบว่าเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 10% โดยน้ำหนัก มีความต้านทานเริ่มต้นค่อนข้างสูงในช่วงของเมกะโอห์ม ทำให้ได้ค่าสภาพไวค่อนข้างสูงตามไปด้วย ซึ่งมีค่าเป็น 42 และเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนัก มีความต้านทานประมาณ 200 กิโลโอห์ม ซึ่งไม่สูงมากนัก ค่าสภาพไวมีค่าเป็น 32 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 10% โดยน้ำหนัก ส่วนเวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 10% โดย

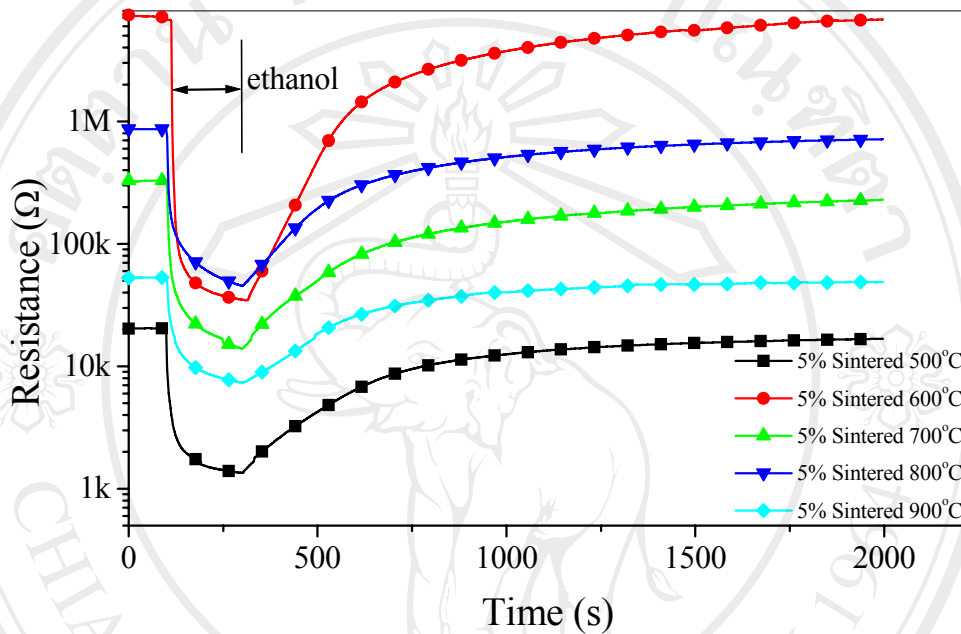
น้ำหนักไม่แตกต่างจากเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนักมากนัก แต่มีค่าที่สูงกว่าเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนัก แสดงว่ามีการตอบสนองและการคืนตัวที่ช้ากว่า สำหรับเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 0% โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าค่าความต้านทานเริ่มต้นค่อนข้างต่ำ ทำให้ได้ค่าสภาพไวค่อนข้างต่ำด้วย ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่านั้น และเวลาการตอบสนองค่อนข้างจะช้ามากกว่ากรณีอื่นๆ ถึงแม้ว่าเวลาการคืนตัวจะต่ำแต่ก็ถือว่าไม่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.21 ดังนั้นจึงเลือกเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนักมาทดสอบกับไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm เพื่อหาเงื่อนไขการเผาที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟการตอบสนองต่อไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิทดสอบ 240°C

เมื่อนำเซนเซอร์ก๊าซที่เผาที่อุณหภูมิ 500, 600, 700, 800 และ 900 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงมาทำการตรวจจับไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ที่อุณหภูมิกระทำ 240 °C โดยใช้เวลาในการปล่อยไอเอทานอล 200 วินาที จะเห็นว่าเซนเซอร์ก๊าซที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700 °C ให้สภาพไวสูงกว่าเซนเซอร์ก๊าซที่เผาด้วยอุณหภูมิ 800 และ 900 °C ตามลำดับ สำหรับเซนเซอร์ก๊าซที่เผาด้วยอุณหภูมิ 500 °C ค่าความต้านทานเริ่มต้นค่อนข้างต่ำ ทำให้ได้ค่าสภาพไวที่ต่ำมาก ส่วนเซนเซอร์ก๊าซที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 °C เนื่องจากค่าความต้านทานเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างสูงในหน่วยของเมกะโอห์ม ทำให้ได้ค่าสภาพไวสูงด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาในแง่ของเวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวพบว่าเวลาการตอบสนองของเซนเซอร์ก๊าซที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700 °C มีค่าน้อยที่สุด แสดงว่ามีการ

ตอบสนองต่อไอเอทานอลเร็วที่สุด ดังนั้นความต้านทานเริ่มต้นเซนเซอร์ก๊าซที่เผาอุณหภูมิ 700 °C มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำไปทดสอบกับอุณหภูมิทดสอบต่างๆ นอกจากนี้ความต้านทานเริ่มต้นไม่ต่ำและไม่สูงเกินไป นอกจากนี้ค่าสภาพไวก็สูงกว่าโครงสร้างที่เผาที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C สำหรับความเข้มข้น 1000 ppm ดังรูปที่ 4.22



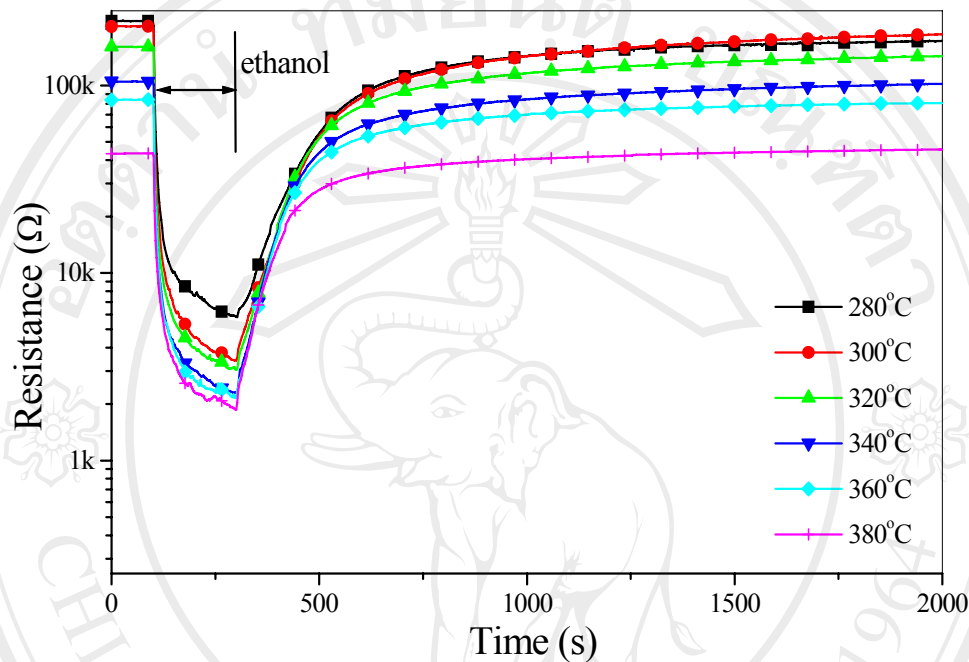
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟจากการตรวจจับไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเซนเซอร์ก๊าซในแต่ละเงื่อนไข

เมื่อนำมาหาค่าสภาพไวในแต่ละอุณหภูมิการเผาจะได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงสภาพไวต่อไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซในแต่ละเงื่อนไข

Sintering temperatures (°C)	Sensitivity (R_a/R_g)	Response time (s)	Recovery time (s)
500	15	1.59	หาค่าไม่ได้
600	207	2.2	1494.59
700	23	0.01	หาค่าไม่ได้
800	19	4.34	หาค่าไม่ได้
900	7	0.89	736.57

จากนั้นจึงนำเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนัก เผาด้วยอุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มาทดสอบการตรวจจับไอเอทานอลที่อุณหภูมิกระทำต่าง ๆ กัน ซึ่งก่อนที่จะนำมาทดสอบการตรวจจับไอเอทานอลต้องทำการอบเซนเซอร์ก๊าซ โดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 60 – 80 °C ใช้เวลาในการ ปล่อยไอเอทานอล 200 วินาที ได้ผลดังรูปที่ 4.23



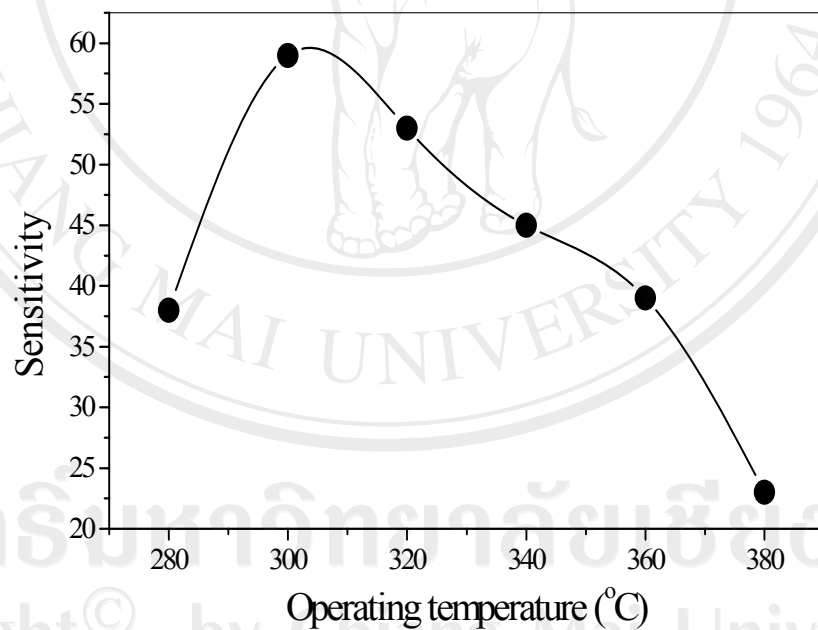
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟของการตรวจจับไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเซนเซอร์ก๊าซเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

เมื่อนำกราฟที่ได้มาหาค่าสภาพไวจะได้นี้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นว่าค่าสภาพไวมีค่าสูงสุดเป็น 59 ที่อุณหภูมิทดสอบ 300 °C เมื่อพิจารณาเวลาการตอบสนอง จะเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนเวลาการคืนตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิทดสอบสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการคืนตัวจะเร็วขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิทดสอบสูงขึ้น

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซที่อบโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 60 – 80 °C

Operating temperature (°C)	Sensitivity (R_a/R_g)	Response time (s)	Recovery time (s)
280	38	1.95	หาค่าไม่ได้
300	59	2.04	1518.33
320	53	1.91	1597.56
340	45	1.95	1006.63
360	39	1.97	896.34
380	23	1.7	456.73

เมื่อนำค่าสภาพไวมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟของค่าสภาพไวในแต่ละอุณหภูมิการทดสอบ

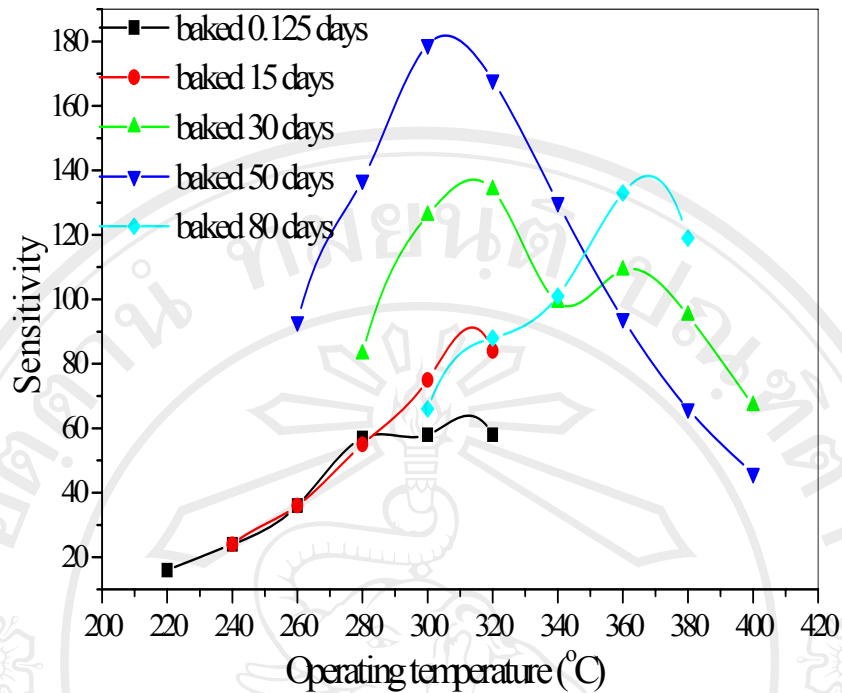
4.3.2 ผลการทดสอบกับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซเนื่องจากการอบในเวลาที่แตกต่างกันของเซนเซอร์ก๊าซที่เผา 6 ชั่วโมง

เนื่องจากการอบโดยใช้เตาอบด้วยอุณหภูมิดังกล่าว ไม่สามารถไล่ความชื้นที่เกาะบนผิวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำได้ นอกจากนี้ยังใช้เวลานานมาก กว่าค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซนเซอร์ก๊าซจะค่าคงที่ จึงทำการปล่อยไอเอทานอลได้ จึงได้เปลี่ยนวิธีการอบใหม่ โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจาก Power supply ไปยัง Heater โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Heater ประมาณ 2 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 200 – 240 °C แล้วนำมาทดสอบการตรวจจับไอเอทานอลทำให้ได้ค่าความต้านทานเริ่มต้นและค่าสภาพไวค่าหนึ่ง จากนั้นนำเซนเซอร์ก๊าซตัวเดียวกันนี้ไปอบต่อโดยเพิ่มระยะเวลาการอบเป็น 15, 30, 50 และ 80 วัน ตามลำดับ ในแต่ละระยะเวลาก็นำมาทดสอบการตรวจจับไอเอทานอลก่อนแล้วจึงนำไปอบต่อตามระยะเวลาข้างต้น พบว่าในการทดสอบตรวจจับไอเอทานอลแต่ละครั้ง ค่าความต้านทานเริ่มต้นและสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซเปลี่ยนแปลงไป โดยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการอบ แต่สังเกตว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการอบเซนเซอร์ก๊าซจนถึง 80 วัน พบว่า ค่าความต้านทานเริ่มต้นและสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซลดลงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซของการอบในเวลาที่แตกต่างกันโดยใช้อุณหภูมิทดสอบ 220 - 400°C

Operating Temperature(°C)	Sensitivity (Ra/Rg)				
	0.125 days	15 days	30 days	50 days	80 days
220	16	-	-	-	-
240	24	24	-	-	-
260	36	36	-	93	-
280	57	55	83	137	-
300	58	75	126	179	66
320	58	84	134	168	88
340	-	-	99	130	101
360	-	-	109	94	133
380	-	-	95	66	119
400	-	-	67	46	-

เมื่อนำค่าสภาพไวของแต่ละเงื่อนไขของการอบเซนเซอร์ก๊าซมาเขียนจะได้กราฟ ดังรูปที่ 4.25



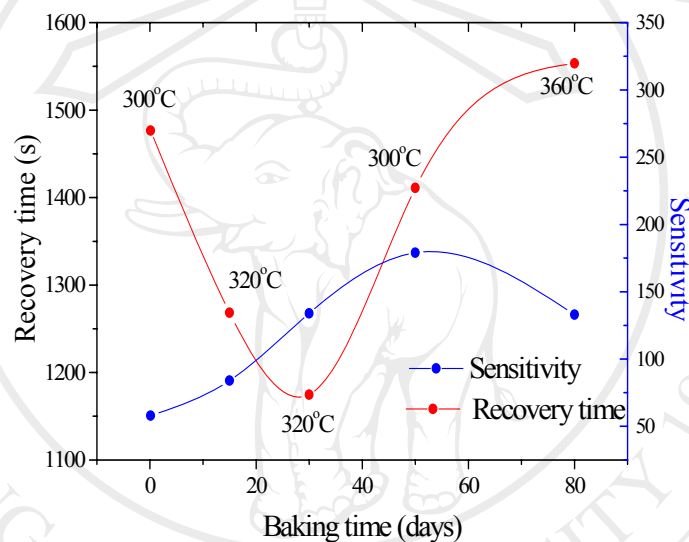
รูปที่ 4.25 แสดงกราฟเปรียบเทียบสภาพไวของการอบเซนเซอร์ก๊าซในเวลารอบต่าง ๆ กัน

เมื่อพิจารณาเวลาตอบสนองและเวลาคืนตัวของอุณหภูมิทดสอบที่ให้ค่าสภาพไวที่มากที่สุดพบว่าเวลาตอบสนองในแต่ละกรณีของการอบมีค่าที่ใกล้เคียงกันในหน่วยวินาที แต่เวลากลับคืนตัวมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงเวลากลับคืนตัวของเซนเซอร์ก๊าซที่เวลาอบต่าง ๆ กัน

Operating temperature (°C)	Recovery time (s)				
	0.125 days	15 days	30 days	50 days	80 days
280	-	-	-	-	-
300	1476	-	-	1411	-
320	1154	1268	1175	1206	2403
340	-	-	777	826	2325
360	-	-	705	539	1553
380	-	-	608	320	1148
400	-	-	466	201	-

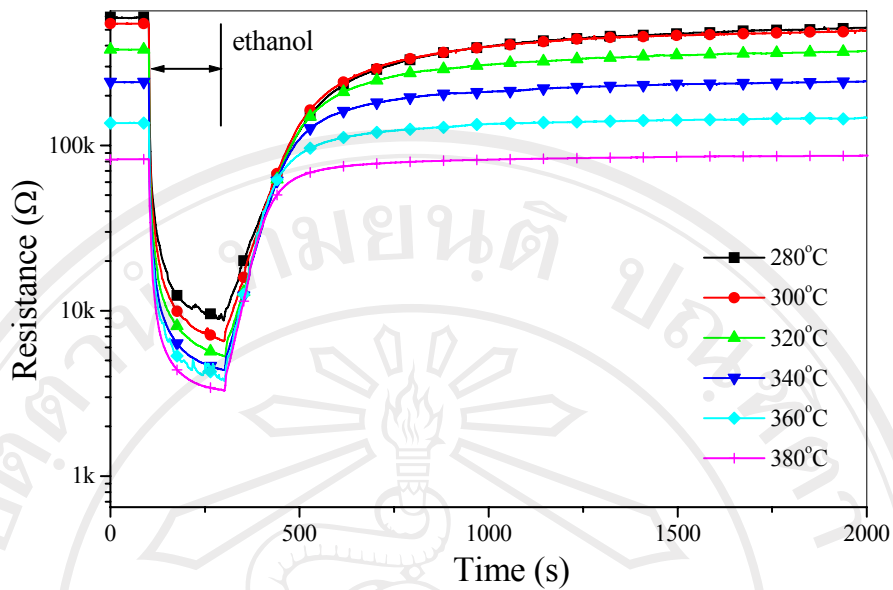
เมื่อนำเวลาการคืนตัวและค่าสภาพไวมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขของการอบที่ดีที่สุดพบว่าเวลาการคืนตัวในช่วงแรกมีแนวโน้มลดลงจนถึงเวลาการอบ 30 วัน มีเวลาการคืนตัวที่น้อยที่สุดเท่ากับ 1175 วินาที ที่อุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดคือ 320°C จากนั้นเมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้น แนวโน้มของเวลาการคืนตัวเริ่มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าสภาพไวของการอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการอบเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงเวลาการอบ 50 วัน ได้ค่าสภาพไวสูงที่สุดเป็น 179 ที่อุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดคือ 300°C จากนั้นค่าสภาพไวเริ่มลดลงหลังจากการอบ 50 วัน ดังนั้นเงื่อนไขการอบที่ดีที่สุดน่าจะเป็น 30 วัน ดังรูปที่ 4.26 แต่เนื่องจากว่าการอบด้วยระยะเวลานี้อาจจะนานเกินไป และยังไม่สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้



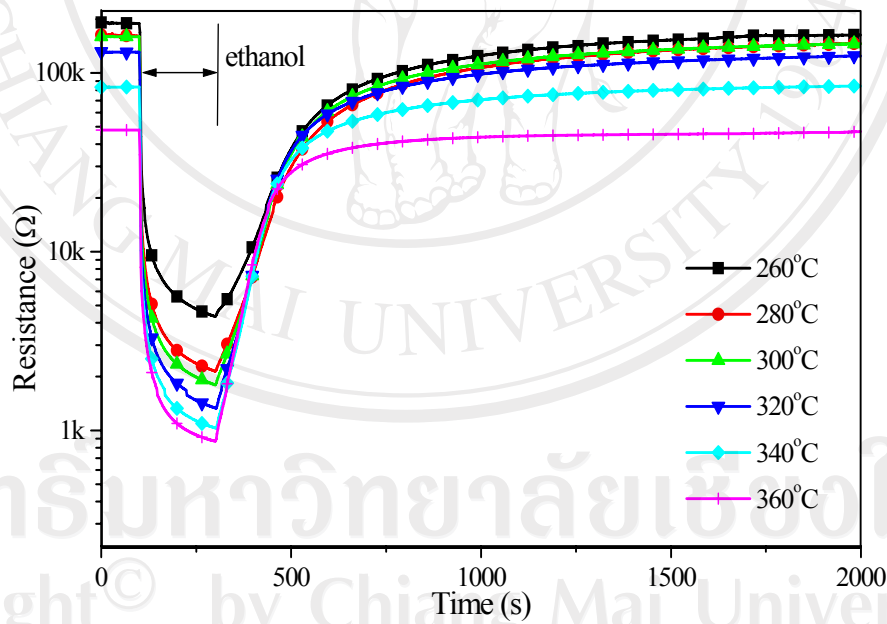
รูปที่ 4.26 แสดงกราฟเปรียบเทียบเวลาการตอบสนองและค่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซที่เวลาการอบต่างๆกัน

4.3.3 ผลการตรวจจับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซจากการเผาโครงสร้างเป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง

เมื่อนำโครงสร้างที่เผา 12 และ 24 ชั่วโมงมาทดสอบการตรวจจับไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm โดยใช้อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ $280 - 380^{\circ}\text{C}$ และ $260 - 360^{\circ}\text{C}$ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.27 และ 4.28



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟของการตรวจจับไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเซนเซอร์ก๊าซเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



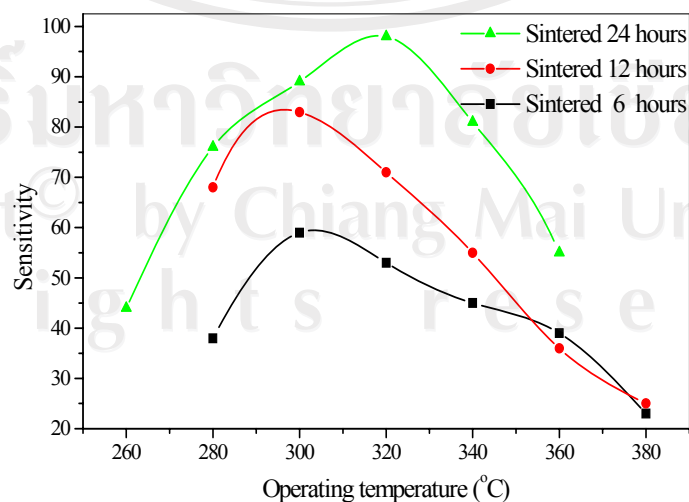
รูปที่ 4.28 แสดงกราฟของการตรวจจับไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเซนเซอร์ก๊าซเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อนำมาหาค่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนักที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมงและเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่เผาเป็นเวลา 6 ชั่วโมงข้างต้น จะได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซที่อุณหภูมิทดสอบแตกต่างกัน

Operating temperature (°C)	Sensitivity		
	6 hours	12 hours	24 hours
260	-	-	44
280	38	68	76
300	59	83	89
320	53	71	98
340	45	55	81
360	39	36	55
380	23	25	-

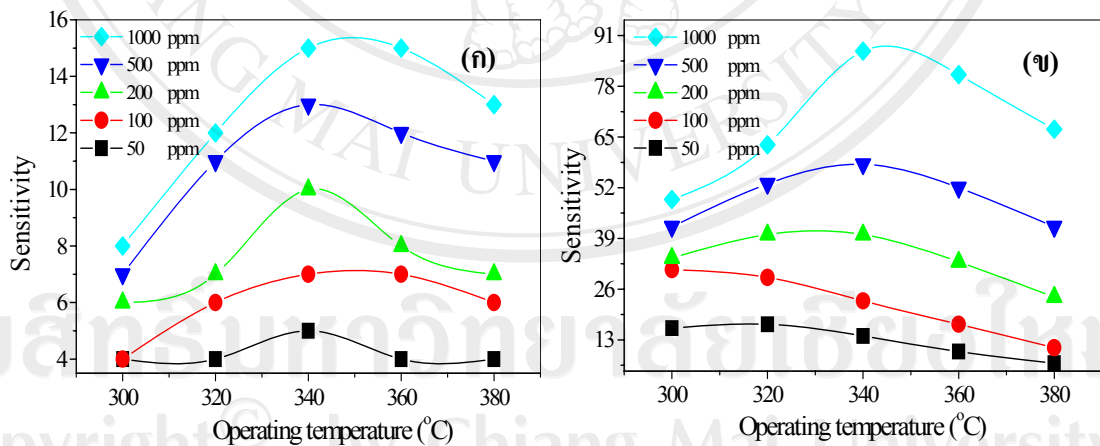
จากตารางที่ 4.10 เมื่อเผาฟิล์มหนาของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนักที่เผาด้วยอุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 6, 12 พบว่าที่อุณหภูมิทดสอบ 300 °C ให้ค่าสภาพไวสูงสุดเป็น 59 และ 83 ตามลำดับ สำหรับโครงสร้างที่เผาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิทดสอบ 320 °C ให้ค่าสภาพไวสูงสุดเป็น 98 จากนั้นนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.29 ซึ่งจะเห็นว่าค่าสภาพไวที่อุณหภูมิต่างๆของโครงสร้างที่เผาเป็นเวลา 24 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่าค่าสภาพไวที่อุณหภูมิต่างๆของโครงสร้างที่เผาเป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง ดังนั้นจึงเลือกเวลาเผา 24 ชั่วโมง มาเผาฟิล์มหนาซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก แล้วนำไปทดสอบกับไอเอทานอล ความเข้มข้น 1000 ppm

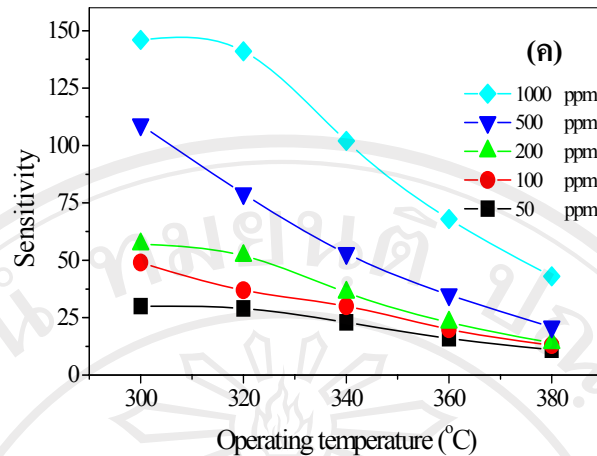


รูปที่ 4.29 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าสภาพไวที่แตกต่างกันของอุณหภูมิทดสอบ

4.3.4 ผลจากการทดสอบกับไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างกัน

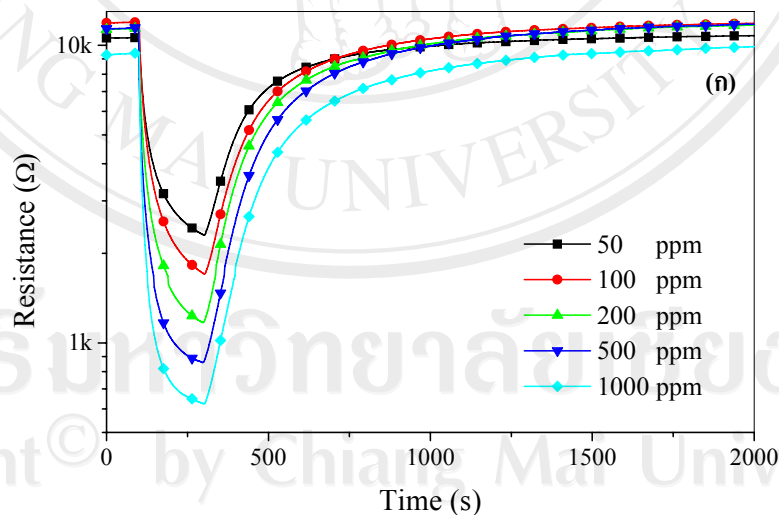
เมื่อนำเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 0, 5, 10 % โดยน้ำหนักเผา 24 ชั่วโมงมาทดสอบกับไอเอทานอลความเข้มข้น 50 – 1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบ 300 - 380°C พบว่า ค่าสภาพไวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไอเอทานอล เมื่อพิจารณาผลของการเจือทองคำ พบว่าเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 0% โดยน้ำหนักจะได้ค่าสภาพไวสูงสุดที่อุณหภูมิทดสอบ 340 °C ทุกๆความเข้มข้นของไอเอทานอลดังรูปที่ 4.30(ก) ส่วนเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 5% โดยน้ำหนัก สังเกตได้ว่าที่ความเข้มข้น 50 และ 100 ppm อุณหภูมิทดสอบที่ให้ค่าสภาพไวสูงสุดไม่อยู่ในช่วงดังกล่าว ซึ่งอุณหภูมิทดสอบที่ให้ค่าสภาพไวที่ดีที่สุดอาจจะอยู่ที่ 300 °C หรือต่ำกว่า 300 °C เมื่อทดสอบกับไอเอทานอลความเข้มข้น 200 ppm พบว่าอุณหภูมิทดสอบที่ให้ค่าสภาพไวสูงสุดอยู่ที่ 320 °C และเมื่อทดสอบกับความเข้มข้น 500 และ 1000 ppm พบว่าอุณหภูมิทดสอบที่ให้ค่าสภาพไวสูงสุดอยู่ที่ 340 °C ดังรูปที่ 4.30(ข) สำหรับเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าช่วงอุณหภูมิทดสอบดังกล่าวยังไม่สามารถบอกถึงอุณหภูมิที่ให้ค่าสภาพไวสูงสุดได้ แต่สังเกตได้ว่าที่ความเข้มข้น 1000 ppm อุณหภูมิทดสอบที่ให้ค่าสภาพไวสูงสุดน่าจะอยู่ที่ 300 °C หรืออาจจะต่ำกว่านี้ ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกรณีที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนักดังรูปที่ 4.30 (ค)

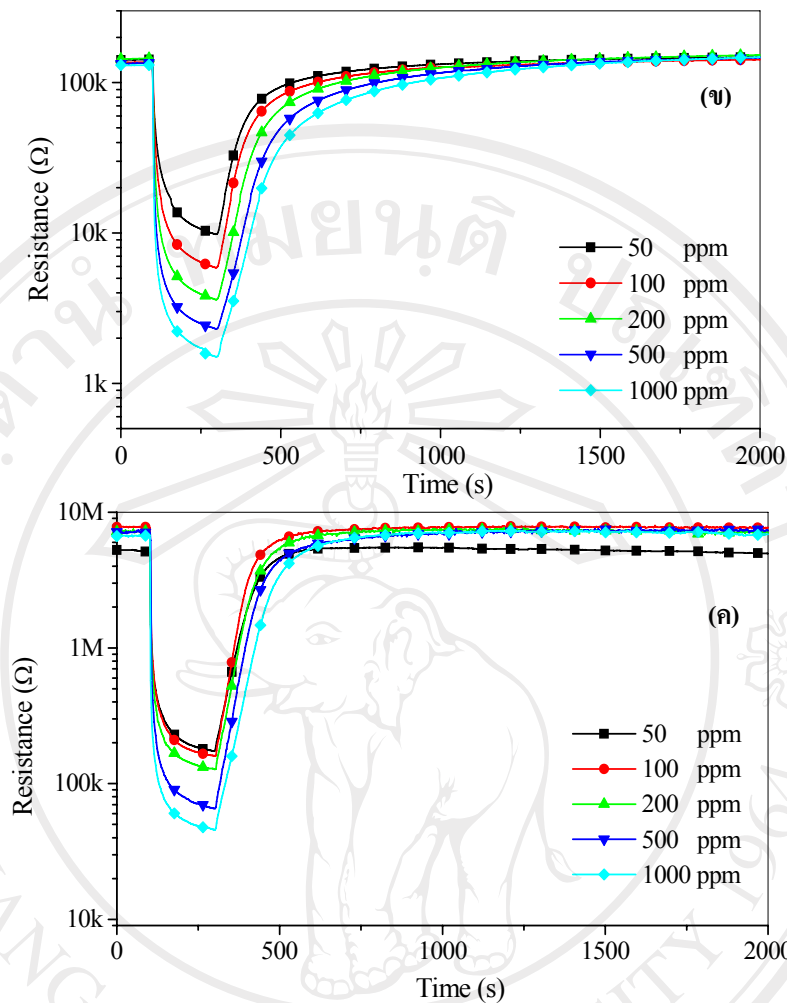




รูปที่ 4.30 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ (ก) 0% (ข) 5% และ (ค) 10% ที่ความเข้มข้นของไอเอทานอลและอุณหภูมิต่างๆกัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกราฟของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 0 และ 5% โดยน้ำหนักในแต่ละความเข้มข้นของไอเอทานอลตั้งแต่ 50 – 1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบ 340 °C และ 10% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิทดสอบ 300 °C พบว่าค่าความต้านทานสุดท้าย (R_g) ของเซนเซอร์ก๊าซจะลดลงตามความเข้มข้นของไอเอทานอลที่เพิ่มขึ้น⁽⁵⁹⁾ ดังรูปที่ 4.31

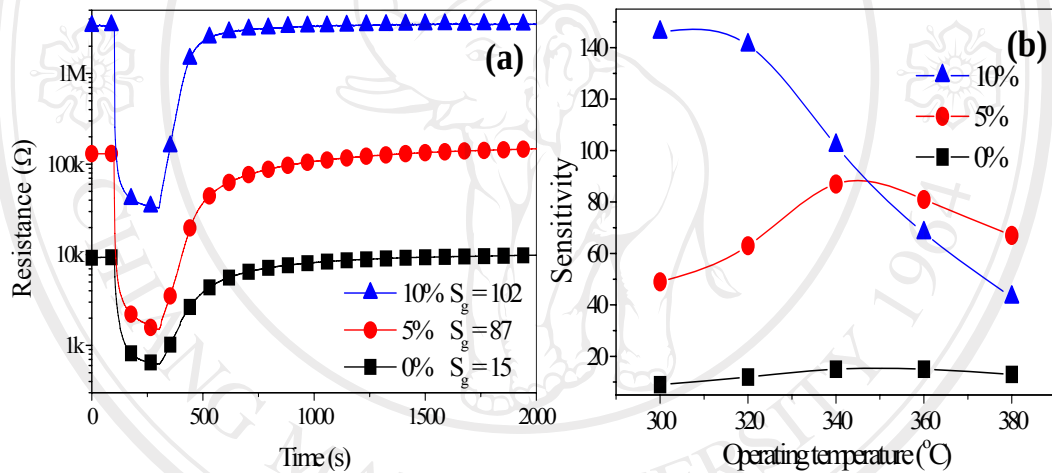




รูปที่ 4.31 แสดงกราฟการตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ (ก) 0% wt (ข) 5% wt ที่อุณหภูมิทดสอบ 340 °C และ (ค) 10% wt ที่อุณหภูมิทดสอบ 300°C

เมื่อนำเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนักเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงมาพิจารณาที่ความเข้มข้นของไอเอทานอล 1000 ppm โดยใช้อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 300 – 380 °C เมื่อพิจารณาค่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซที่มีการเจือทองคำ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 0 และ 5% โดยน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 340 °C แต่หลังจากนั้นจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ ส่วนค่าสภาพไวของการเจือทองคำ 10% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าสภาพไวสูงสุดไม่ได้อยู่ในช่วงของอุณหภูมิทดสอบนี้ และค่าสภาพไวของอุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 360 °C เป็นต้นไป จะต่ำกว่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนัก แต่สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิ 300 °C นั้นเริ่มคงที่แล้วและน่าจะเป็นอุณหภูมิที่ให้ค่าสภาพไวสูงสุดหรืออาจจะต่ำกว่าอุณหภูมิ 300°C ถือว่าค่อนข้างดีกว่ากรณีอื่น เมื่อพิจารณาเวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวของเซนเซอร์ก๊าซที่อุณหภูมิ 340°C พบว่าเวลาการตอบสนอง

ของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 0% โดยน้ำหนัก มีเวลาการตอบสนองน้อยที่สุด และ เซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 10% โดยน้ำหนัก มีเวลาการตอบสนองมากที่สุด ส่วนเวลาการคืนตัวนั้น เวลาการคืนตัวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 10% โดยน้ำหนัก จะมีค่าน้อยที่สุด ส่วนเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนัก จะมีเวลาการคืนตัวมากที่สุด เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว พบว่าเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนัก เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากความต้านทานไม่ต่ำและไม่สูงเกินไปและเวลาการตอบสนองต่ำกว่าเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 10% โดยน้ำหนัก และ เซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 10% โดยน้ำหนัก ความต้านทานเริ่มต้นค่อนข้างสูง ซึ่งเหมือนกันกับในกรณีที่เราฟิล์มนาซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.32 นอกจากนี้แสดงเวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัว ซึ่งจะเห็นว่าเวลาการตอบสนองมีความใกล้เคียงกัน แต่เวลาการคืนตัวนั้นจะมีการคืนตัวที่เร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังตารางที่ 4.11

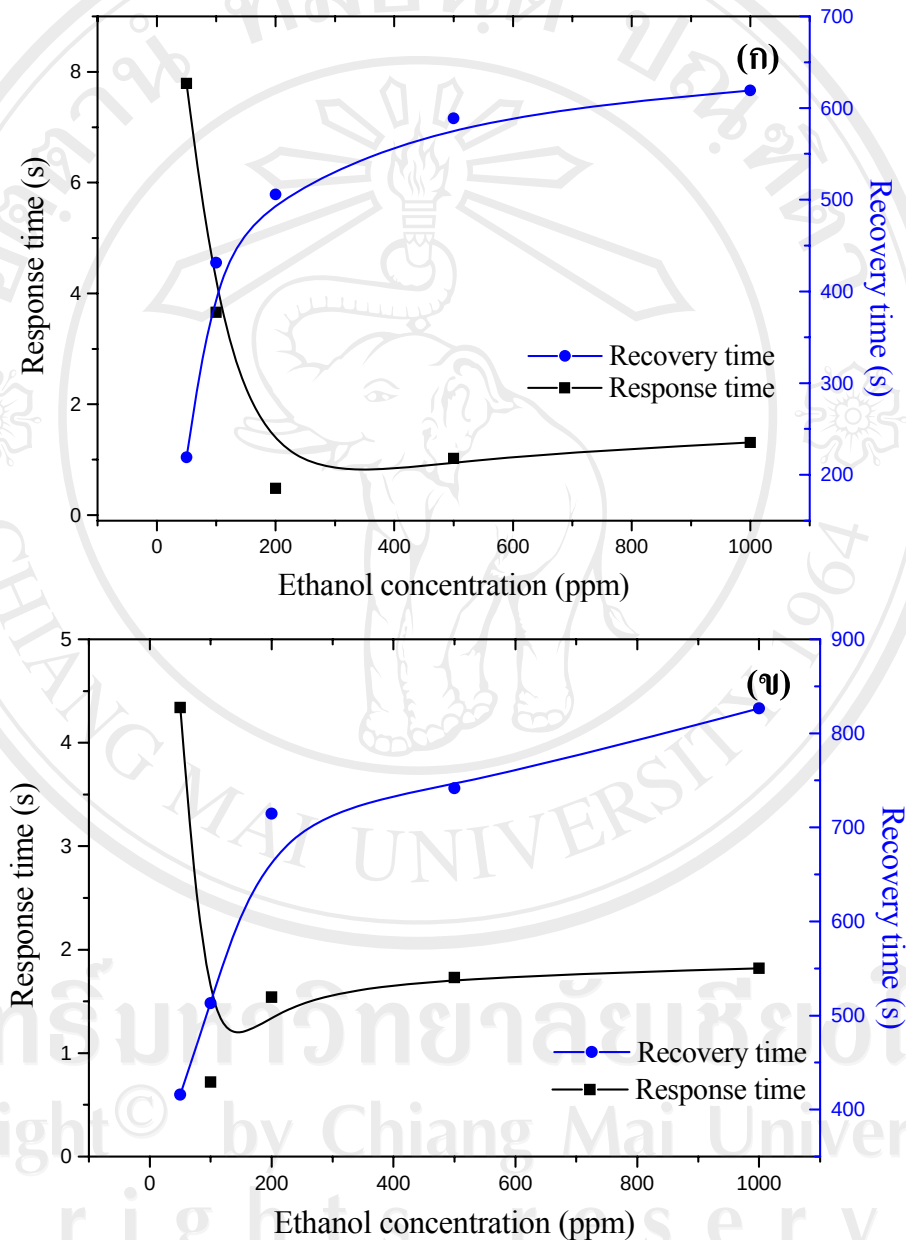


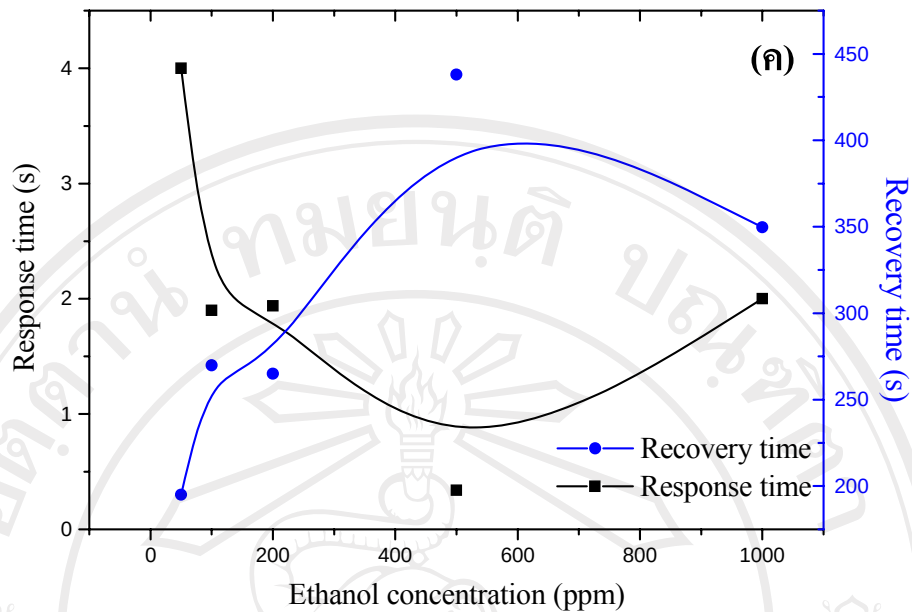
รูปที่ 4.32 (ก) แสดงกราฟการตรวจจับไอเอทานอล 1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบ 340 °C และ (ข) เปรียบเทียบค่าสภาพไวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นไอเอทานอล 1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบ 300 – 380 °C

ตารางที่ 4.11 แสดงเวลาการตอบสนองและเวลาคืนตัวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือไนซ์ต่างกัน

Operating temperature (°C)	Sensitivity			Response time (s)			Recovery time (s)		
	0%	5%	10%	0%	5%	10%	0%	5%	10%
300	8	49	146	0.5	1.6	2.0	736.9	664.8	345.1
320	12	63	141	1.0	1.8	2.1	706.1	806.3	419.9
340	15	87	102	1.1	1.8	2.1	619.1	826.5	379.7
360	15	81	68	1.4	1.8	1.5	535.0	724.0	278.4
380	13	67	43	1.4	1.9	1.9	408.7	597.0	230.6

เมื่อพิจารณาเวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ 0, 5 และ 10 % โดยน้ำหนักต่อความเข้มข้นของไอเอทานอลที่แตกต่างกัน พบว่าเวลาการตอบสนองจะลดลงและจะค่อยๆคงที่เมื่อความเข้มข้นของไอเอทานอลเพิ่มขึ้น ส่วนเวลาการคืนตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและจะค่อยๆคงที่ตามความเข้มข้นของไอเอทานอลที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.33





รูปที่ 4.33 แสดงกราฟของเวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือด้วยทองคำ

(ก) 0% wt (ข) 5% wt (ค) 10% wt

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิทดสอบและความเข้มข้นของไอเอทานอลต่อปริมาณการตอบสนองของเซนเซอร์ก๊าซพบว่าปริมาณการตอบสนองของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 5% โดยน้ำหนักมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนปริมาณการตอบสนองของเซนเซอร์ก๊าซที่เจือทองคำ 0 และ 10% โดยน้ำหนักยังไม่เป็นไปตามทฤษฎี แต่ก็มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในทำนองเดียวกันปริมาณการตอบสนองของเซนเซอร์ก๊าซในทุกๆเงื่อนไขมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไอเอทานอลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ดังตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ

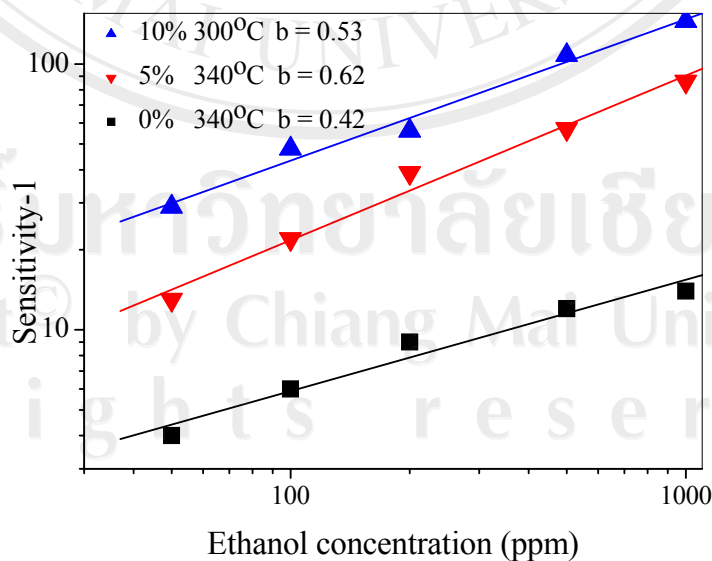
ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณการตอบสนองของเซนเซอร์ก๊าซต่ออุณหภูมิทดสอบต่างๆ

Operating temperature (°C)	Quantifier of sensor performance (%)		
	0% wt	5% wt	10% wt
300	88	98	99
320	92	98	99
340	93	99	99
360	93	99	99
380	92	99	98

ตารางที่ 4.13 แสดงปริมาณการตอบสนองของเซนเซอร์ก๊าซต่อความเข้มข้นของไอเอทานอลต่างๆ

Ethanol concentration (ppm)	Quantifier of sensor performance (%)		
	0% wt	5% wt	10% wt
50	78	93	97
100	86	96	98
200	90	98	98
500	92	98	99
1000	93	99	99

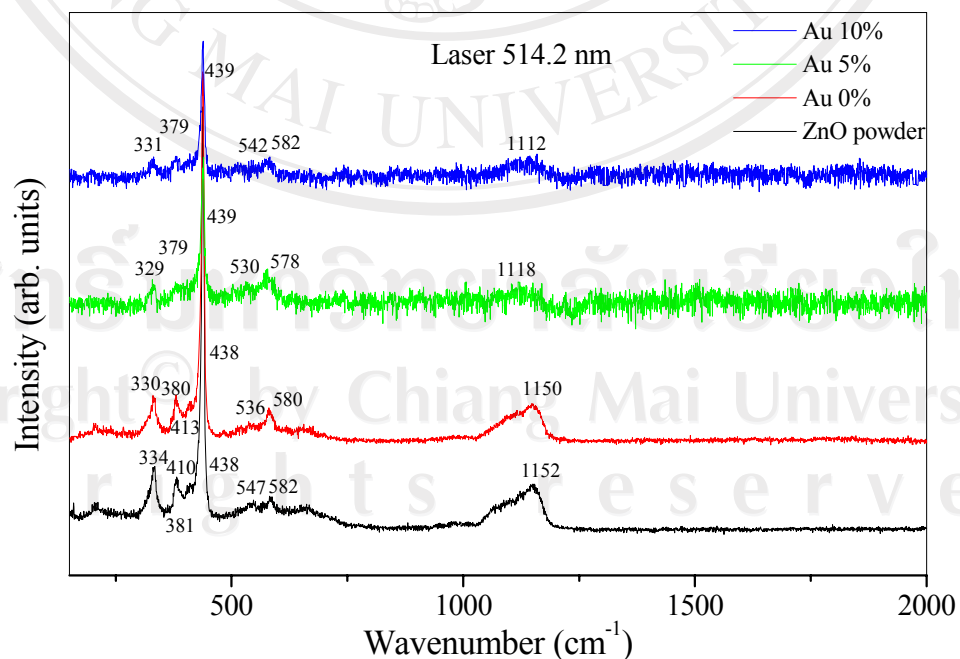
จากการศึกษาผลการตรวจจับไอเอทานอลของเซนเซอร์ก๊าซที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอเอทานอลต่างๆ เมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่างค่าสภาพโวลบหนึ่ง (S-1) และความเข้มข้นของไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆกันเพื่อคำนวณหาค่า b ตามสมการที่ 2.8 เมื่อค่า b มีค่าเท่ากับ 0.5 แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนที่เกาะบนพื้นผิวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์มีประจุเป็น O^{2-} และค่า b มีค่าเท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนที่เกาะบนพื้นผิวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์มีประจุเป็น O^- จากรูปที่ 4.34 แสดงค่า b ที่อุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 0, 5, และ 10% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าออกซิเจนที่เกาะบนพื้นผิวส่วนใหญ่มีประจุเป็น O^{2-} .



รูปที่ 4.34 แสดงค่า b ของโครงสร้างที่เจือด้วยทองคำในปริมาณต่างๆกัน

4.4 ผลการวิเคราะห์รามาน สเปกโตรสโคปี

การวัดสเปกตรัมรามาน จะเป็นการวัดคุณสมบัติการสั่นของอะตอมและเฟสของโครงสร้างของสาร ซึ่งสารซิงก์ออกไซด์จากที่กล่าวมาแล้วว่ามีโครงสร้างเป็นแบบ Wurtzite hexagonal ซึ่งมี Space group เป็นแบบ C_{6v} และใน Primitive cell จะมี 4 อะตอม เมื่อโหมดการสั่นที่เป็นไปได้ทั้งหมดของสารที่มี s อะตอมต่อ Primitive cell มีค่าเป็น 3s ดังนั้นสารซิงก์ออกไซด์มีโหมดการสั่นที่เป็นไปได้ทั้งหมด 12 โหมด ตามหลักการของกฎการเลือก (selection rules) สำหรับเฟสของ Wurtzite จะมีอยู่ 8 โหมดการสั่น (Optical phonon modes) ได้แก่ $2E_2$, $2E_1$, $2A_1$ และ $2B_2$ โดยที่โหมด $2B_2$ ซึ่งมี 2 โหมด จะไม่แอคทีฟกับรามาน นอกจากนี้โหมด A_1 และ E_1 เป็น Polar phonon แยกได้เป็น Longitudinal optical phonon (LO) และ Transverse optical phonon (TO) ทั้งสองจะแอคทีฟทั้งรามานและอินฟราเรด ส่วนโหมด ส่วน E_2 เป็น Non-polar phonon จะแอคทีฟเฉพาะกับรามานเท่านั้น สำหรับ B_1 จะไม่แอคทีฟกับรามานและอินฟราเรด จึงกล่าวได้ว่า Optical phonon จะมีทั้งหมด 9 โหมดหรือ $3s - 3$ โหมด อีก 3 โหมดที่เหลือจะเป็น Acoustic phonon modes จากผลของรามานสเปกโตรสโคปี ได้ดังกราฟในรูปที่ 4.35 โดยผลที่ได้จะเทียบกับผงซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือทองคำ 0% โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจากการเจือทองคำหรือมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของซิงก์ออกไซด์



รูปที่ 4.35 แสดงรามานสเปกตรัมของสารซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ

โหมดการสั่นของสารซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำปริมาณต่าง ๆ กันเทียบกับโหมดการสั่นของผงซิงก์ออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 4.14 ซึ่งกล่าวได้ว่าผงซิงก์ออกไซด์ที่ปรากฏที่ปรากฏขึ้นตรงตำแหน่ง 334 cm^{-1} เป็นโหมดที่เกิดจาก $E_2(\text{High})-E_2(\text{Low})$, 381 cm^{-1} เป็นโหมด $A_1(\text{TO})$, 410 cm^{-1} เป็นโหมด $E_1(\text{TO})$, 438 cm^{-1} เป็นโหมด $E_2(\text{High})$ ซึ่งเป็นโหมดที่ระบุถึงโครงสร้างเป็นแบบ Wurtzite hexagonal และ 582 cm^{-1} เป็นโหมด $E_1(\text{LO})$ จะแสดงถึง Oxygen vacancy หรือ Oxygen deficiency ด้วย

ตารางที่ 4.14 แสดงตำแหน่งเส้นสเปกตรัมของสารซิงก์ออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ

ZnO powder	ZnO: Au 0%	ZnO:Au 5%	ZnO:Au 10%	Symmetry
-	-	-	-	B_1
334	330	329	331	$E_2(\text{High})-E_2(\text{Low})$
381	380	379	379	$A_1(\text{TO})$
410	413	-	-	$E_1(\text{TO})$
438	438	439	439	$E_2(\text{High})$
547	536	530	542	$A_1(\text{LO})$
585	580	578	582	$E_1(\text{LO})$

ส่วนสารซิงก์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองคำ 0, 5 และ 10% โดยน้ำหนักนั้น พบว่าไม่ปรากฏตำแหน่งหรือการเลื่อนตำแหน่งอันเนื่องมาจากการเจือของทองคำอย่างชัดเจน เนื่องจากเลเซอร์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเป็นอาร์กอน (Ar) ซึ่งอยู่ในช่วง visible light ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 514.2 nm เมื่อพิจารณาโหมด $E_2(\text{High})$ จะเห็นว่าไม่มีความแตกต่างกันของตำแหน่งไม่ว่าจะเจือทองคำในปริมาณเท่าใดก็ตาม เมื่อสารซิงก์ออกไซด์เจือด้วยทองคำ 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ปรากฏว่า ไม่ปรากฏตำแหน่งในโหมด $E_1(\text{TO})$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ที่โหมด $E_1(\text{LO})$ จะแสดงถึง Oxygen vacancy หรือ Oxygen deficiency เหมือนกัน



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved