



การเตรียมทังสเทนออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์
แบบฟิล์มหนาสำหรับการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียและเอทานอล

**TITANIA DOPED TUNGSTEN OXIDE THICK FILM GAS SENSOR FOR
AMMONIA AND ETHANOL GAS DETECTION**

สว่าง เก่งเกรียงไกร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2551

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

การเตรียมทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์
แบบฟิล์มหนาสำหรับการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียและเอทานอล
TITANIA DOPED TUNGSTEN OXIDE THICK FILM GAS SENSOR FOR
AMMONIA AND ETHANOL GAS DETECTION

สว่าง เก่งเกรียงไกร

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวงเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

2551

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

การเตรียมทั้งสแตนออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์
แบบฟิล์มหนาสำหรับการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียและเอทานอล

สว่าง เก่งเกรียงไกร

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์
2551

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาพ ชูพันธ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ครุณี วัฒนศิริเวช)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ครุณี วัฒนศิริเวช ที่ถ่ายทอดองค์ความรู้ คอยให้คำปรึกษา แนะนำตั้งแต่เริ่มต้นงานวิจัย ทำให้การศึกษานี้ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ ตลอดจนสละเวลาตรวจทานต้นฉบับการเขียนรายงานให้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สุธี วัฒนศิริเวช ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะความรู้ความเข้าใจ เกี่ยวกับงานวิจัย และแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ ทำให้ได้งานวิจัยที่ความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาพ ชูพันธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ และ แนวทางการแก้ไขข้อผิดพลาด ทำให้งานวิจัยสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อารมณ์ ธีรมงคลศรีมี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และสถานที่ในการทดลอง รวมถึงให้คำปรึกษา แนะนำ แนวทางการวิจัย ทำให้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกต้อง

ขอขอบคุณ พนักงานประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย แม่ฟ้าหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์และทดสอบตัวอย่างต่างๆสำหรับงานวิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่อยู่เคียงข้างให้กำลังใจและ สนับสนุนการเรียนปริญญาโทตลอดมา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สว่าง เก่งเกรียงไกร

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การเตรียมทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาสำหรับการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนียและเอทานอล	
ชื่อผู้เขียน	นาย สว่าง เก่งเกรียงไกร	
หลักสูตร	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาวัสดุศาสตร์)	
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ครุณี วัฒนศิริเวช	ประธานกรรมการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำงาน อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์และอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารทังสเตนออกไซด์ผสมด้วยสารไททาเนียมออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาซึ่งเตรียมโดยวิธีการตกตะกอนแยก ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลและแก๊สแอมโมเนีย การสังเคราะห์สารทังสเตนออกไซด์ทำโดยการตกตะกอนสารแอมโมเนียมทังสเตต $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ด้วยกรดไนตริกและได้กรดทังสติก (H_2WO_4) เป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนสารไททาเนียมออกไซด์นั้นได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl_4) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ในตู้ดูดควัน และได้สารไททาเนียมไฮดรอกไซด์ $(\text{Ti}(\text{OH})_4)$ เป็นผลิตภัณฑ์ จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) และเทคนิคการวิเคราะห์สเปกโตรสโคปีเพอเรนเทียลเทอร์มอล (SDTA) พบว่ากรดทังสติกมีการสลายตัวของน้ำหนักเป็น 3 ช่วง ก่อนเปลี่ยนโครงสร้างเป็นทังสเตนออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C และสารไททาเนียมไฮดรอกไซด์มีการสลายตัวของน้ำหนักเป็น 2 ช่วง ก่อนเปลี่ยนโครงสร้างสารเป็นไททาเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิประมาณ 410°C จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าสารทังสเตนออกไซด์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่ 500 และ 600°C เป็นเวลา 30 นาที มีลักษณะโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเป็น 22.58 และ $9.61 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ส่วนสารไททาเนียมออกไซด์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C เป็นเวลา 30 นาที มีลักษณะโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล เฟสอานาเทส และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเป็น 122.5 81.02 และ $56.38 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 500 - 2500 ppm และแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 400 - 3200 ppm ที่อุณหภูมิในการทำงานเป็น 200 250 และ 300°C พบว่าแก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลดีที่สุดที่อุณหภูมิ 300°C และมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีที่สุดที่อุณหภูมิ 200°C ส่วนผลของอุณหภูมิการเผาแคลไชน์ของสารตั้งต้น พบว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไชน์ที่อุณหภูมิ 600°C ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สทั้งสองได้ดีกว่าที่อุณหภูมิการเผาแคลไชน์อื่นๆ และผลของอัตราส่วนการผสมสารนั้น พบว่าแก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนการผสมเป็น 92.5:7.5 และมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนการผสมเป็น 95:5

คำสำคัญ : ทั้งสเดนออกไซด์ / ไททาเนียมออกไซด์ / ประสิทธิภาพการตอบสนอง / แก๊สเซ็นเซอร์ /
ฟิล์มหนา /

Thesis Title	Titania doped Tungsten Oxide Thick Film Gas Sensor for Ammonia and Ethanol Gas Detection	
Author	Mr. Sawang Kengkriangkrai	
Degree	Master of Science (Materials Science)	
Supervisor	Asst. Prof. Dr. Darunee Wattanasiriwech	Chairperson

ABSTRACT

This research was aimed to study effects of operating temperature, calcination temperature and mixing ratio on sensitivity of ethanol and ammonia detection of tungsten oxide (WO_3) mixed with titanium oxide (TiO_2) thick film gas sensor prepared by separated precipitations. Tungsten oxide synthesis was achieved by precipitation of ammonium tungstate ($(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) with nitric acid to obtain tungstic acid (H_2WO_4) as a product. Titanium oxide was obtained from the reaction in a fume hood between titanium tetrachloride (TiCl_4) and ammonium hydroxide resulting in titanium hydroxide ($\text{Ti}(\text{OH})_4$) as a product. Thermal analysis by TGA and SDTA techniques showed that tungstic acid exhibited 3 weight loss steps before it was transformed to tungsten oxide at 500°C . Titanium hydroxide showed 2 weight loss steps before it was transformed at 410°C to titanium oxide. The XRD results for tungsten oxide calcined at 500 and 600°C for 30 min indicated that tungsten oxide was crystallized in a monoclinic structure with specific surface areas measured by the BET technique of 22.58 and $9.61 \text{ m}^2/\text{g}$ respectively. Titanium oxide calcined at 400, 500 and 600°C for 30 min was found to be tetragonal anatase with specific surface areas of 122.5, 81.02 and $56.38 \text{ m}^2/\text{g}$ respectively. The sensitivity measurement for ethanol and ammonia detection was performed in the concentration range of 500 - 2500 ppm and 400 - 3200 ppm respectively. The results showed that among

200, 250 and 300°C operating temperatures, the most effective ones for ethanol detection were at 300°C and at 200°C for ammonia detection. The calcination temperature which gave optimum sensitivity was at 600°C for WO₃ and 400°C for titanium oxide. Finally, the best mixing ratio for ethanol detection was at 92.5:7.5 and for ammonia detection was at 95:5

Keywords : Tungsten oxide / Titanium oxide / Sensitivity / Gas sensor / Thick film

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย/การศึกษาค้นคว้า	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แก๊สเซ็นเซอร์	4
2.2 การทำงานของแก๊สเซ็นเซอร์	8
2.3 ประสิทธิภาพการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์	11
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์	12
2.5 ทังสเตนออกไซด์	20
2.6 ไททาเนียมออกไซด์	27

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3 ขั้นตอนการทดลอง	31
3.1 การสังเคราะห์สารทั้งสแตนอกไซด์และสารไททาเนียมออกไซด์	31
3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารที่สังเคราะห์ได้	34
3.3 การประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์	36
3.4 การวัดค่าประสิทธิภาพการตอบสนอง	39
4 ผลการทดลอง	42
4.1 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อน	42
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	44
4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค	49
4.4 ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะต่อปริมาตร	53
4.5 ผลการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล	54
4.6 ผลการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย	86
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	113
5.1 สรุปผลการทดลอง	113
5.2 ข้อเสนอแนะ	114
บรรณานุกรม	115
ประวัติผู้เขียน	120

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ประเภทของแก๊สเซ็นเซอร์ หลักการทำงานแก๊สเซ็นเซอร์ และวัสดุที่นำไปประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์	5
2.2 ตัวอย่างโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและชนิดพี	7
2.3 ลักษณะการทำงานของแก๊สเซ็นเซอร์แบบกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี	8
2.4 เปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล	19
2.5 เปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย	20
2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของทั้งสเดนออกไซด์	22
2.7 ตัวอย่างวิธีการสังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ต่างๆ	24
3.1 ประสิทธิภาพ (yield) ของผลผลิตกรดทั้งสติกที่ได้จากปฏิกิริยา	32
3.2 ประสิทธิภาพ (yield) ของผลผลิตไททานเนียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยา	33
3.3 สภาวะการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)	35
3.4 สภาวะการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยเทคนิค BET	36
3.5 รหัสตัวอย่างแก๊สเซ็นเซอร์ ที่ผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์และไททานเนียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์และอัตราส่วนต่างๆ	37
4.1 ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของทั้งสเดนออกไซด์และไททานเนียมออกไซด์ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค BET และขนาดอนุภาคที่คำนวณจากพื้นที่ผิวจำเพาะ	53
4.2 ความเข้มข้นและอุณหภูมิการทำงานต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล	76
4.3 ความเข้มข้นและอุณหภูมิการทำงานต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย	103

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 แก๊สเซ็นเซอร์แบบการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในผลึก	6
2.2 แก๊สเซ็นเซอร์แบบเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิว	7
2.3 รูปจำลองผลของชั้นพร่องอิเล็กตรอนต่อการเคลื่อนผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคที่สถานะทั่วไป	9
2.4 รูปจำลองการเปลี่ยนแปลงของชั้นพร่องอิเล็กตรอนที่สถานะทั่วไปสถานะที่มีแก๊สเข้าสู่ระบบ	10
2.5 ค่ากำแพงศักย์ไฟฟ้าของแก๊สเซ็นเซอร์ที่สถานะปกติและสถานะที่มีแก๊ส	10
2.6 วงจรวัดค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์	11
2.7 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ต่างๆ	14
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิการทำงานที่สภาพบรรยากาศปกติของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์	16
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำแพงศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิการทำงานที่สภาพบรรยากาศปกติของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทินออกไซด์	17
2.10 รูปแบบโครงสร้าง 1 หน่วยของทั้งสเดนออกไซด์	21
2.11 ลักษณะโครงสร้างของไททานเนียมออกไซด์เฟสอนาเทส	28
2.12 ลักษณะโครงสร้างของไททานเนียมออกไซด์เฟสรูไทล์	28
2.13 การวิเคราะห์ทางความร้อนของไททานเนียมออกไซด์	30
3.1 ลักษณะของสารที่ได้จากการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมทั้งสเดนกับกรดไนตริก	32
3.2 ลักษณะของสารที่ได้จากการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่างไททานเนียมเตตระคลอไรด์กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์	34
3.3 แผนภาพการสร้างอิเล็กโทรดที่ทำจากโลหะเงินบนกระจกสไลด์	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.4	ลักษณะของอิเล็กโทรดบนกระจกสไลด์ ที่ป้ายด้วยเพลสของโลหะเงินและผ่านการเผาอบที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3.5	แก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น
3.6	ระบบหัวฉีด (Injector)
3.7	ส่วนประกอบต่างๆภายในห้องวัดแก๊ส
3.8	ไดอะแกรมของวงจรวัด - ขยายสัญญาณ
4.1	ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของกรดทั้งสติก
4.2	ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของไททานเนียมไฮดรอกไซด์
4.3	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของทั้งสเดนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น
4.4	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไททานเนียมออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น
4.5	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของทั้งสเดนออกไซด์
4.6	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไททานเนียมออกไซด์
4.7	ภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของทั้งสเดนออกไซด์ผสมกับไททานเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ
4.8	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 5W5T4 5W5T5 และ 5W5T6
4.9	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 5W6T4 5W6T5 และ 5W6T6
4.10	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 7.5W5T4 7.5W5T5 และ 7.5W5T6

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.11 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 7.5W6T4 7.5W6T5 และ 7.5W6T6	64
4.12 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 10W5T4 10W5T5 และ 10W5T6	66
4.13 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 10W6T4 10W6T5 และ 10W6T6	69
4.14 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 12.5W5T4 12.5W5T5 และ 12.5W5T6	72
4.15 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 12.5W6T4 12.5W6T5 และ 12.5W6T6	74
4.16 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์ต่อไททานเนียมออกไซด์เป็น 95:5 92.5:7.5 90:10 และ 87.5:12.5 ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์ต่างๆ	80
4.17 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	84
4.18 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 500°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	84
4.19 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 600°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.20	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทังสเตนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500°C กับไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	85
4.21	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทังสเตนออกไซด์เผาแคลไซน์ 600°C กับไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	86
4.22	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 5W5T4 5W5T5 และ 5W5T6	88
4.23	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 5W6T4 5W6T5 และ 5W6T6	90
4.24	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 7.5W5T4 7.5W5T5 และ 7.5W5T6	92
4.25	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 7.5W6T4 7.5W6T5 และ 7.5W6T6	94
4.26	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 10W5T4 10W5T5 และ 10W5T6	96
4.27	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 10W6T4 10W6T5 และ 10W6T6	98
4.28	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 12.5W5T4 12.5W5T5 และ 12.5W5T6	100
4.29	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ 12.5W6T4 12.5W6T5 และ 12.5W6T6	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.30	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์ต่อไททานเนียมออกไซด์เป็น 95:5 92.5:7.5 90:10 และ 87.5:12.5 ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์ต่างๆ	107
4.31	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	110
4.32	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 500°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	111
4.33	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 600°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	111
4.34	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500°C กับไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	112
4.35	ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500°C กับไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหามลภาวะและสภาวะแวดล้อมเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างจริงจัง ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณแก๊สที่เป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อมโดยใช้เครื่องมือที่มีราคาถูกลงและใช้งานได้ง่าย หรือที่เรียกว่าแก๊สเซ็นเซอร์จึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 40 ปี (Ihokura and Watson, 1994) ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแก๊สเซ็นเซอร์มากที่สุดคือวัสดุในกลุ่มสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ เช่นทินออกไซด์ (Zhou, et al., 1997) เป็นต้น นอกจากจะใช้ในการตรวจวัดแก๊สพิษแล้วยังมีการพัฒนาแก๊สเซ็นเซอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นการตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียในอากาศ ภายในโรงงานผลิตอาหาร ซึ่งข้อมูลจากสำนักควบคุมวัตถุอันตรายได้ระบุถึงระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์คือ ที่ระดับความเข้มข้น 400 ppm จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองหายใจตื้อ หากรับในปริมาณความเข้มข้นมากถึง 1700 ppm อาจเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ ซึ่งจากสถิติพบว่าปริมาณผู้ที่ต้องประสบภัยเกี่ยวกับการสูดดมแก๊สแอมโมเนียมีอยู่อย่างมากมาย ตัวอย่างเช่นในปี พ.ศ. 2548 พบว่ามีการรั่วไหลของแก๊สแอมโมเนียจากท่อส่งแก๊สภายในโรงงานชำแหละไก่จนเป็นเหตุให้มีผู้ได้รับบาดเจ็บจากการสูดดม 100 คน และต้องเข้ารับการรักษารอคิวอาการที่โรงพยาบาลจำนวน 20 คน (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) หรืออีกเหตุการณ์ในปีเดียวกัน ได้เกิดการรั่วไหลของแก๊สแอมโมเนียภายในโรงงานผลิตน้ำแข็ง จนเป็นเหตุให้ผู้ทำงานในโรงงานเกิดอาการหมดสติ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) เป็นต้น นอกจากนี้แก๊สเซ็นเซอร์ยังได้มีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในการตรวจวัดระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในลมหายใจของผู้ขับขี่ยานพาหนะ เพื่อความปลอดภัยแก่ประชาชน ซึ่งตาม พ.ร.บ. จราจรทางบก พ.ศ. 2522 ได้ระบุถึงระดับปริมาณแอลกอฮอล์ในเลือดของผู้ขับขี่ยานพาหนะไว้ที่ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมเปอร์เซ็นต์ ความหมายคือ ในเลือด 100 กรัม มีปริมาณแอลกอฮอล์ 50 มิลลิกรัม หรือเทียบเป็นความเข้มข้นได้ 471.5 ppm โดยแก๊สเซ็นเซอร์นี้

มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง ที่ช่วยให้ปริมาณอุบัติเหตุบนท้องถนนที่เกิดจากการเมาสุราแล้วขับลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจากสถิติปริมาณอุบัติเหตุที่เกิดจากการเมาสุราแล้วขับในปี พ.ศ. 2550 มีปริมาณลดลงไปจากปี พ.ศ. 2549 ถึง 8.34% (สำนักงานตำรวจแห่งชาติสระบุรี, 2550)

ทังสเตนออกไซด์ (WO_3) เป็นวัสดุที่น่าสนใจที่จะนำมาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ เนื่องจากเป็นสารที่มีเสถียรภาพสูง (Choi, et al., 2003) สามารถดูดซับและมีความจำเพาะกับแก๊สหลายชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สเอทานอลและแอมโมเนีย (มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, 2544) จากการทบทวนเอกสารพบว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิการทำงานต่ำกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์เพียงสารเดียว โดยจากการศึกษาของ Ivanov และคณะ (2004) พบว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์เพียงสารเดียวมีประสิทธิภาพการตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ $300^{\circ}C$ และมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ประมาณ 9 แต่จากการศึกษาของ Gopal Reddy และคณะ (2003) ได้ประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์จากสารทังสเตนออกไซด์ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์ด้วยอัตราส่วนระหว่างสารทังสเตนออกไซด์ต่อสารไททาเนียมออกไซด์เป็น 90:10 โดยนำหนัก ก่อนนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ พบว่าแก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ $160^{\circ}C$ และมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ประมาณ 21.6 ซึ่งเห็นได้ว่าการผสมสารไททาเนียมออกไซด์ลงในทังสเตนออกไซด์นั้น ทำให้แก๊สเซ็นเซอร์มีอุณหภูมิการทำงานลดลงและมีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งสารทังสเตนออกไซด์นั้นเป็นสารที่มีราคาค่อนข้างสูง ในขณะที่สารไททาเนียมออกไซด์มีราคาต่ำกว่ามาก ซึ่งหากได้มีการพัฒนาแก๊สเซ็นเซอร์ในเชิงพาณิชย์จะช่วยในการลดต้นทุนการผลิตได้มาก

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาผลของการผสมไททาเนียมออกไซด์ลงในทังสเตนออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลและแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยกำหนดอัตราส่วนการผสมสาร อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์สาร และอุณหภูมิในการทดสอบที่ต่างกัน ซึ่งคาดว่าผลที่ได้คือมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีมากขึ้นและอุณหภูมิในการทำงานที่ต่ำลง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ คือลักษณะรูปแบบโครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว พื้นที่ผิวจำเพาะ และ สมบัติทางความร้อน ของสารทั้งสเดนออกไซด์ และสารไททาเนียมออกไซด์ ที่เตรียมโดยวิธีการตกตะกอน

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลและแอมโมเนีย ของ แก๊สเซ็นเซอร์ชนิดฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์ ด้วยอัตราส่วนต่างๆ คือ 5 7.5 10 และ 12.5% ที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ที่ความเข้มข้นแก๊สเป็น 500 - 2500 ppm สำหรับแก๊สเอทานอล และที่ความเข้มข้น 400 - 3200 ppm สำหรับแก๊สแอมโมเนีย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1.3.1 สามารถลดอุณหภูมิ ในการทำงานของแก๊สเซ็นเซอร์

1.3.2 สามารถหาอัตราส่วนในการผสมสารที่เหมาะสมเพื่อให้มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลและแก๊สแอมโมเนียที่ดีที่สุด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย/การศึกษาค้นคว้า

1.4.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารทั้งสเดนออกไซด์และไททาเนียมออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอน

1.4.2 ศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส 2 ชนิดคือแก๊สเอทานอล และแก๊สแอมโมเนีย ที่ความเข้มข้นต่างๆด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากการผสมกันของสารทั้งสอง ที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ต่างๆ ด้วยอัตราส่วนการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์ต่อไททาเนียมออกไซด์เป็น 95:5 92.5:7.5 90:10 และ 87.5:12.5 โดยน้ำหนัก

1.4.3 ศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำงาน ผลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ ผลของอัตราส่วนในการผสมสารทั้งสอง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึง ประเภทและหลักการทำงาน คุณสมบัติต่างๆของแก๊ส เซ็นเซอร์ การศึกษาถึงสมบัติทั่วไป วิธีการสังเคราะห์ และรูปแบบ โครงสร้างของทั้งสเดนออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์

2.1 แก๊สเซ็นเซอร์

แก๊สเซ็นเซอร์สามารถแบ่งประเภทของแก๊สเซ็นเซอร์ตามลักษณะการทำงานได้เป็น 3 ประเภทคือ

2.1.1 แก๊สเซ็นเซอร์แบบอาศัยการดูดซับของแก๊ส (Gas-adsorption gas sensor)

แก๊สเซ็นเซอร์ในกลุ่มนี้ทำงานโดยวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เช่นการนำไฟฟ้า เมื่อมีโมเลกุลของแก๊สเข้ามาดูดซับที่ผิวของวัสดุที่ใช้ทำแก๊สเซ็นเซอร์ หรือการเหนี่ยวนำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น

2.1.2 แก๊สเซ็นเซอร์แบบอาศัยการทำปฏิกิริยาของแก๊ส (Gas-reaction gas sensor)

แก๊สเซ็นเซอร์ประเภทนี้อาศัยการวัดผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อแก๊สที่ต้องการวัดเกิดปฏิกิริยา เช่นการวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเซรามิกที่มีตัวกระตุ้นผสมอยู่ เมื่อเซรามิกสัมผัสกับแก๊สที่เผาไหม้

2.1.3 แก๊สเซ็นเซอร์แบบอาศัยแผ่นเลือกชนิดแก๊ส (Selective-membrane gas sensor)

แก๊สเซ็นเซอร์ประเภทนี้ใช้ประโยชน์ของแผ่นเมมเบรนที่มีคุณสมบัติในการยอมให้แก๊สบางชนิดเท่านั้นที่ผ่านได้ ซึ่งแผ่นเมมเบรนนี้โดยทั่วไปใช้อิเล็กโตรไลต์ของแข็ง (Solid electrolyte) เช่นการใช้ $Y_2O_3-ZrO_2$ เป็นตัวนำสำหรับการวัดออกซิเจน หรือการใช้ K_2SO_4 ในการวัด SO_2 เป็นต้น

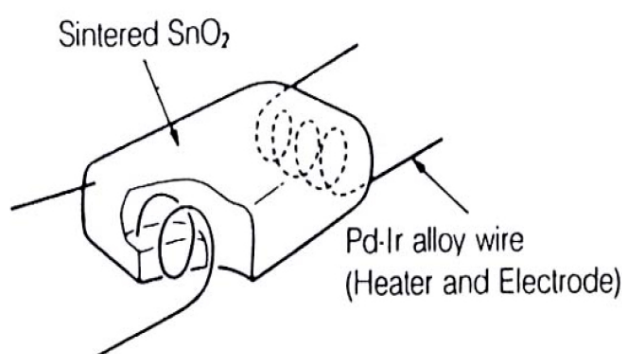
ประเภทของแก๊สเซ็นเซอร์ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถสรุปประเภท วัสดุที่นำมาประดิษฐ์ และแก๊สที่สามารถตรวจวัด ดังตารางที่ 2.1 โดยสังเกตได้ว่าแก๊สเซ็นเซอร์ในแต่ละประเภทยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกตามชนิดของการเกิดปฏิกิริยาเคมี และมีชื่อเรียกที่ระบุชัดเจนลงไป เช่น แก๊สเซ็นเซอร์แบบการดูดซับของแก๊สยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น สารประเภทโลหะกึ่งตัวนำ และเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิว เป็นต้น (มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, 2544)

ตารางที่ 2.1 ประเภทของแก๊สเซ็นเซอร์ หลักการทำงานแก๊สเซ็นเซอร์ และวัสดุที่นำไปประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์

Type	Classification	Phenomena	Materials	Gases
Gas adsorption	Semiconductor	Surface conductivity	SnO ₂ , ZnO, V ₂ O ₅	LPG, alcohol
		Bulk conductivity	TiO ₂ , CoO, MgO-CoO	O ₂
	Surface potential	Surface potential	Ag ₂ O, Pd-TiO ₂	H ₂ , CO
	Humidity	Conductivity	ZnO, MgCrO ₂ , Al ₂ O ₃	H ₂ O
	Other	Piezoelectric	Polyimide ๖๖ quartz oscillator	H ₂ S, NH ₃
Gas reaction	Catalytic combustion	Combustion heat	Pt wire, Pt, Pd+Al ₂ O ₃	Flammable gases
	Potentiostatic	Electrolytic current	Gas electrode	CO, NO ₂ , S ₂
	Galvanic cell	Cell current	Noble cathode (Pt,Au) and base anode (Pb)	O ₂
Selective membrane	Solid electrolyte	EMP	ZrO ₂ -CaO, PbCl ₂ , PbBr ₂ ,	O ₂

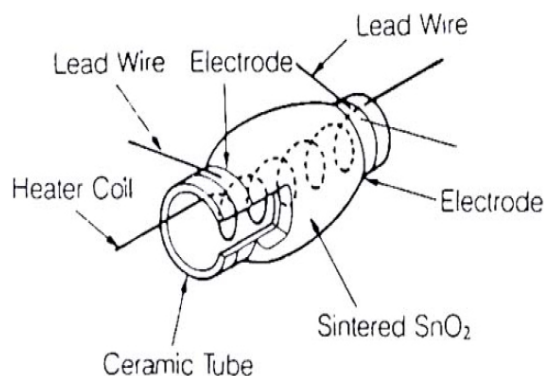
(มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, 2544)

แก๊สเซ็นเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Gas Sensor) เป็นแก๊สเซ็นเซอร์แบบอาศัยการดูดซับของแก๊สแบบหนึ่ง โดยใช้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำในการถ่ายเทอิเล็กตรอน และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า โดยลักษณะการนำไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ (Ihokura and Watson, 1994) แบบแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในผลึก (bulk) ซึ่งแก๊สเซ็นเซอร์แบบนี้จะมีความหนาแน่นโดยมีลักษณะเป็นก้อนเซรามิกทั้งก้อน ซึ่งโครงสร้างนั้นประกอบด้วยขดลวดความร้อนสองด้านที่แยกกัน โดยที่ขดลวดทั้งสองนั้นสัมผัสโดยตรงกับสารที่นำมาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ และขดลวดทั้งสองด้านนี้ยังทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับแบบที่สองนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิว ซึ่งโดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแบบฟิล์มบางและฟิล์มหนา ซึ่งโครงสร้างนั้นประกอบด้วยขดลวดความร้อนเส้นเดียวและไม่สัมผัสโดยตรงกับสารที่นำมาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ ซึ่งขดลวดความร้อนนั้นอยู่ภายในท่อเซรามิกที่ถูกห่อหุ้มด้วยสารที่นำมาเป็นแก๊สเซ็นเซอร์ และปลายทั้งสองด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะนำไฟฟ้าเช่น ทอง หรือ แพลตินัม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



(Ihokura and Watson, 1994)

รูปที่ 2.1 แก๊สเซ็นเซอร์แบบการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าในผลึก



(Ihokura and Watson, 1994)

รูปที่ 2.2 แก๊สเซ็นเซอร์แบบเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าที่ผิว

สารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ (Metal-Oxide) ที่นำมาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์นั้นมีทั้งชนิดเอ็น (n-type) เช่น TiO_2 หรือ WO_3 เป็นต้น และชนิดพี (p-type) เช่น PdO หรือ NiO เป็นต้น (Korotcenkov, 2007) ตัวอย่างชนิดของแก๊สเซ็นเซอร์นั้นดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นและชนิดพี

ชนิดเอ็น (n-type)	ชนิดพี (p-type)
MgO , CaO , TiO_2 , ZrO_2 , V_2O_5 , Nb_2O_5 ,	Y_2O_3 , La_2O_3 , CeO_2 , Mn_2O_3 , Co_3O_4 ,
Ta_2O_5 , MoO_3 , WO_3 , ZnO , Al_2O_3 ,	NiO , PdO , Ag_2O , Bi_2O_3 , Sb_2O_3 , TeO_2
Ga_2O_3 , In_2O_3 , SnO_2	

(Korotcenkov, 2007)

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีนี้นั้นมีพฤติกรรมในด้านการนำไฟฟ้าแตกต่างกันกัน คือ ในสภาพออกซิไดซ์ สารชนิดเอ็นจะมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง แต่สารชนิดพีจะมีค่าการนำไฟฟ้า

เพิ่มขึ้น (Korotcenkov, 2007) ซึ่งสรุปลักษณะการทำงานของแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดเอ็นและพี ดังตารางที่ 2.3

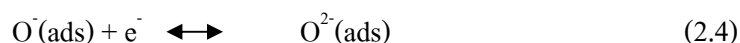
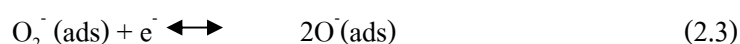
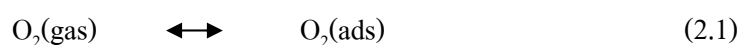
ตารางที่ 2.3 ลักษณะการทำงานของแก๊สเซ็นเซอร์แบบกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี

แก๊สเซ็นเซอร์	สภาพออกซิไดซ์	สภาพรีดิวซ์
ชนิดเอ็น	การนำไฟฟ้าลดลง	การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น
ชนิดพี	การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น	การนำไฟฟ้าลดลง

(Moseley and Toefield, 1987)

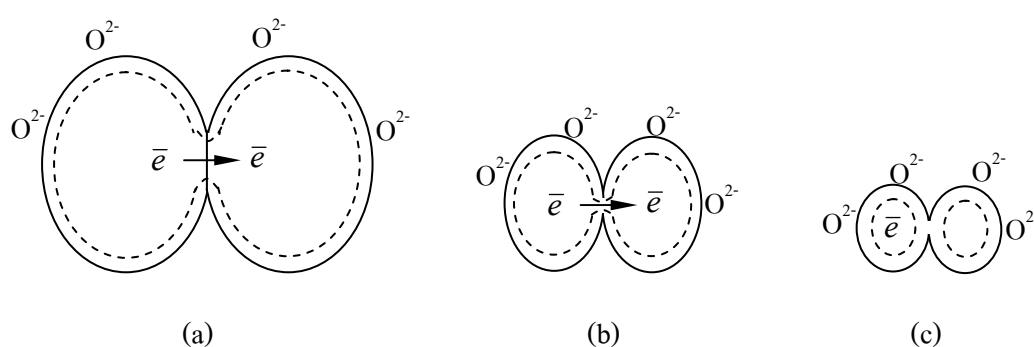
2.2 การทำงานของแก๊สเซ็นเซอร์

การเปลี่ยนแปลงค่าทางไฟฟ้าในกรณีของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากโลหะออกไซด์กึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) เช่น SnO_2 หรือ WO_3 เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนในผลึกของโลหะออกไซด์กับแก๊สออกซิเจนที่มาเกาะบริเวณขอบผลึกส่งผลให้ออกซิเจนเปลี่ยนสภาพเป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) การถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กตรอนในผลึกออกไซด์กับออกซิเจนเกิดเป็น 4 ขั้นตอนตามสมการ 2.1 - 2.4 ดังนี้ (Wang, Chen and Wu, 2001)



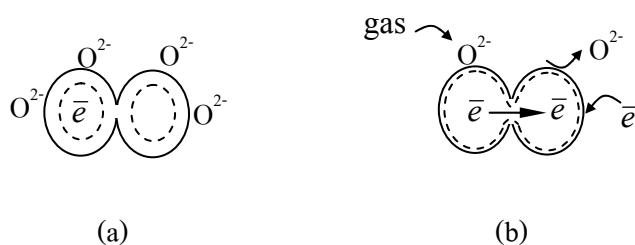
จากสมการข้างต้น แก๊สออกซิเจนเมื่อเกาะกับผลึกของโลหะออกไซด์จะมีสภาพเป็นแก๊สออกซิเจนที่ดูดซับกับผลึกโลหะออกไซด์ ดังสมการ 2.1 เมื่อแก๊สออกซิเจนดูดซับที่ผลึกของ

โลหะออกไซด์จะเกิดการถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กตรอนในผลึกโลหะออกไซด์กับแก๊สออกซิเจนที่ดูดซับกับผลึกทำให้แก๊สออกซิเจนมีสภาพเป็นไดออกซิเจนไอออนที่มีประจุเป็นลบหนึ่ง (สมการ 2.2) ซึ่งไดออกซิเจนไอออน นี้อยู่ในสภาพที่ไม่เสถียรจึงมีการรับอิเล็กตรอนเพิ่มและแตกตัวกลายเป็นออกซิเจนไอออนดังสมการ 2.3 ซึ่งออกซิเจนไอออนนั้นจำเป็นต้องรับอิเล็กตรอนเพิ่ม 1 ตัวเพื่อให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนครบแปดจึงมีสภาพเป็นออกซิเจนไอออนที่มีประจุเป็นลบ 2 ดังสมการ 2.4 การที่อิเล็กตรอนจากผลึกโลหะออกไซด์ไปจับตัวกับออกซิเจนที่มาเกาะบริเวณของเกรนดังสมการ 2.1 - 2.4 ทำให้ภายในผลึกโลหะออกไซด์เกิดช่องว่างขึ้นหรือชั้นพร่องอิเล็กตรอน (Depletion layer) โดยเกิดเป็นชั้นบางๆรอบขอบผลึก ในกรณีอนุภาคของผลึกมีขนาดใหญ่บริเวณชั้นพร่องอิเล็กตรอน (จากบริเวณขอบถึงเส้นประ) มีขนาดค่อนข้างบางเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาค ดังแสดงในรูป 2.3(a) ชั้นพร่องอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคนั้นไม่มีผลต่อการเคลื่อนผ่านระหว่างอนุภาคของอิเล็กตรอนภายในทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนผ่านจากอนุภาคหนึ่งสู่อีกอนุภาคหนึ่งได้สะดวก ในลักษณะนี้จึงมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี แต่เมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลงโดยชั้นพร่องอิเล็กตรอนมีขนาดเท่าเดิม ดังแสดงรูป 2.3(b) ชั้นพร่องอิเล็กตรอนแทบจะปิดกั้นบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทำให้อิเล็กตรอนภายในอนุภาคสามารถเคลื่อนจากอนุภาคหนึ่งสู่อีกอนุภาคหนึ่งได้ค่อนข้างยาก จึงส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าในรูป 2.4(a) และหากกรณีที่มีอนุภาคมีขนาดเล็กมากดังแสดงในรูป 2.3(c) บริเวณชั้นพร่องอิเล็กตรอนมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค ทำให้ชั้นพร่องอิเล็กตรอนปกคลุมบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนผ่านจากอนุภาคสู่อีกอนุภาคหนึ่งได้

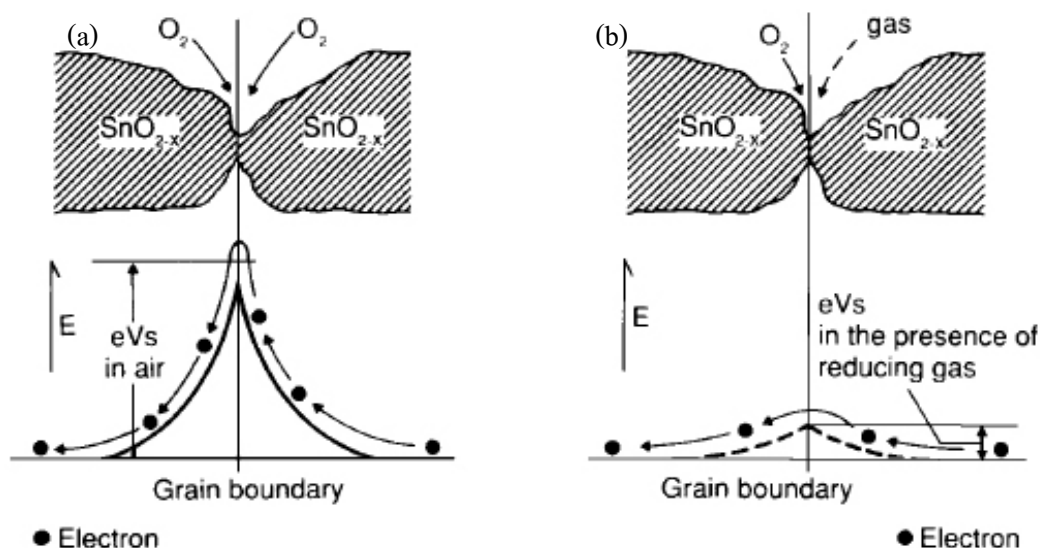


รูปที่ 2.3 รูปจำลองผลของชั้นพร่องอิเล็กตรอนต่อการเคลื่อนผ่านอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคที่สถานะทั่วไป โดยบริเวณเส้นขอบถึงเส้นประคือชั้นพร่องอิเล็กตรอน (a) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (b) อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และ (c) อนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก

สำหรับการถ่ายเทอิเล็กตรอนในผลึกของโลหะออกไซด์กับแก๊สออกซิเจนที่มาเกาะบริเวณขอบผลึกซึ่งส่งผลให้ออกซิเจนเปลี่ยนสภาพเป็นออกซิเจนไอออน (O^{2-}) ทำให้เกิดชั้นพร่องอิเล็กตรอนที่มีขนาดหนาจนทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนไปยังอีกอนุภาคหนึ่งได้ ดังแสดงในรูป 2.4(a) ส่งผลให้ค่าค่าแรงศักย์ไฟฟ้า ณ บริเวณรอยต่อของอนุภาคมีค่าค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูป 2.5(a) แต่เมื่อมีแก๊สเข้าสู่ระบบ แก๊สจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไอออน และเกิดการคายอิเล็กตรอนออกมา โดยอิเล็กตรอนนี้จะกลับเข้าสู่อนุภาค ทำให้ชั้นพร่องอิเล็กตรอนมีขนาดที่บางลงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนผ่านไปยังอีกอนุภาคหนึ่งได้ ดังแสดงในรูป 2.4(b) ทำให้ค่าค่าแรงศักย์ไฟฟ้า ณ บริเวณรอยต่อของอนุภาคมีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 2.5(b)



รูปที่ 2.4 รูปจำลองการเปลี่ยนแปลงของชั้นพร่องอิเล็กตรอนที่ (a) สถานะทั่วไป และ (b) สถานะที่มีแก๊สเข้าสู่ระบบ



(Ivanov, 2004)

รูปที่ 2.5 ค่าค่าแรงศักย์ไฟฟ้าของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ (a) สถานะปกติและ (b) สถานะที่มีแก๊ส

2.3 ประสิทธิภาพการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์

ประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นคุณสมบัติหนึ่งของแก๊สเซ็นเซอร์ การคำนวณหาประสิทธิภาพการตอบสนองสามารถคำนวณได้จากค่าอัตราส่วนของค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์ในสถานะที่เป็นอากาศปกติ (R_{air}) ต่อค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์ในสถานะที่มีแก๊สในระบบ (R_{gas}) ดังสมการ 2.5 (มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, 2544)

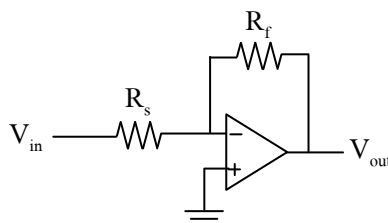
$$S = \frac{R_{air}}{R_{gas}} \quad (2.5)$$

โดย S คือ ประสิทธิภาพการตอบสนอง

R_{air} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าในสถานะปกติ

R_{gas} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าในสถานะที่มีแก๊สอยู่ในระบบ

วงจรที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์เป็นวงจรขยายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งได้ค่าสัญญาณของวงจรขาออก (V_{out}) ดังสมการ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรวัดค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์

$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_s}\right) \times V_{in} \quad (2.6)$$

โดย R_f คือ ค่าความต้านทานป้อนกลับ

R_s คือ ค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์

V_{in} คือ แรงดันขาเข้าที่ป้อนให้กับวงจร (5 volts)

V_{out} คือ แรงดันขาออก

ค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์ในสถานะที่เป็นอากาศปกติสามารถคำนวณได้จากแรงดันขาออกของวงจรเมื่ออยู่ในสถานะอากาศปกติ ซึ่งก็คือค่าแรงดันไฟฟ้าในสถานะอากาศปกติ ก่อนที่จะมีแก๊สเข้าสู่ระบบ (Base line voltage : V_{base}) ส่วนค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์ในสถานะที่มีแก๊สในระบบสามารถคำนวณได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกจากวงจรเมื่อมีแก๊สอยู่ในระบบ ซึ่งก็คือค่าสูงสุดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มีแก๊สอยู่ในระบบ (Voltage peak : V_{peak}) ดังนั้นค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สจึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$S = \frac{V_{peak}}{V_{base}} \quad (2.7)$$

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์

2.4.1 ขนาดอนุภาค

ขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสเป็นแบบผกผัน หากตั้งสมมติฐานว่าผลึกของสารมีลักษณะเป็นทรงกลม พื้นที่ผิวสัมผัสผลึกของสารสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.8

$$A_s = \frac{6}{(\rho \times d)} \quad (2.8)$$

โดย A_s คือพื้นที่ผิวจำเพาะ

ρ คือความหนาแน่นของสาร

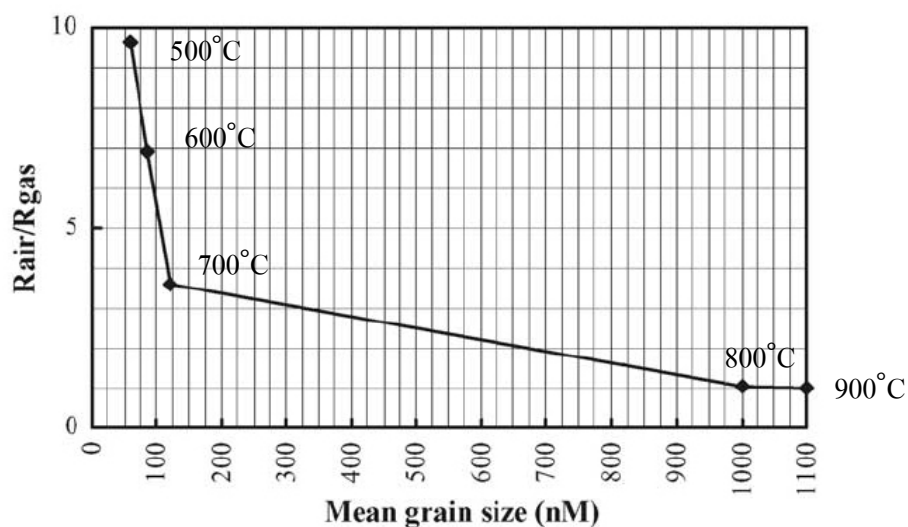
d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

อุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์ของสารเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อขนาดอนุภาคของสาร การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นก็ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของสารโตมากขึ้นเช่นเดียวกัน เช่น การศึกษาของ Kanda and Maekawa (2005) ได้ทำการวัดขนาดอนุภาคของทั้งสเดนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยนำทั้งสเดนออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 500 600 700 800 และ 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าภายหลังการเผาแคลไซน์ขนาดของอนุภาคที่ได้เป็น 60 85 110

1000 และ 1100 nm ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาแคลไซน์สูงขึ้นขนาดของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย

นอกจากอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์แล้ว ระยะเวลาในการเผาแคลไซน์ก็พบว่ามีส่วนต่อขนาดอนุภาคหลังเผาด้วย เช่นการศึกษาของ Supothina และคณะ (2007) ได้สังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์ด้วยเทคนิคการตกตะกอน ทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 2.6 และ 10 ชั่วโมง ผลการวัดขนาดอนุภาคของทั้งสเดนออกไซด์ พบว่ามีขนาดเป็น 29 30 และ 36 nm ตามลำดับ สังเกตได้ว่าการเผาที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ระยะเวลาดังกล่าวส่งผลให้ขนาดอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปโดยสารที่ใช้เวลาในการเผานานกว่าจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าเนื่องจากเกิดการรวมตัวของอนุภาค ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสังเกตได้ว่าอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อขนาดอนุภาคของสาร และขนาดของอนุภาคแปรผันแบบผกผันกลับพื้นที่ผิวสัมผัสของสาร ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และพื้นที่ผิวสัมผัสมีผลต่อประสิทธิภาพการตอบสนองของแก๊สโดยสารที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก (ขนาดอนุภาคเล็ก) จะมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สดีกว่าสารที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย (ขนาดอนุภาคใหญ่) เช่นการศึกษาของประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียและเอทานอล ของทั้งสเดนออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมทั้งสเดนกับกรดไนตริก พบว่าเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สทั้งสองดีกว่าสารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800°C (มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, 2544) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Kanda and Maekawa (2005) ที่ได้วัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สโทลูอิน ด้วยเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 - 900°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 500°C ให้ค่าประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 700 800 และ 900°C ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.7



(Kanda and Maekawa, 2005)

รูปที่ 2.7 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ต่างๆ

2.4.2 การเจือสาร

การเจือสารเป็นการนำสารซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกโลหะมีตระกูลเช่น พาลาเดียม แพลตินัม หรือทอง นำมาเติมเพื่อประโยชน์ในด้านประสิทธิภาพการตอบสนองของแก๊สจากการทบทวนเอกสารพบว่าได้มีผู้วิจัยทดลองการนำโลหะมาผสมกับสารที่นำมาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ทำให้ประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเดิม

Ivanov และคณะ (2004) ได้ทำการประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์ที่ทำจากทินออกไซด์เพื่อวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลเปรียบเทียบกับแก๊สเซ็นเซอร์ทินออกไซด์ที่เจือด้วยแพลตินัม ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นแก๊สเซ็นเซอร์ที่เจือด้วยแพลตินัมนั้นมีการตอบสนองที่ไวกว่าและมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลดีกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้เจือด้วยแพลตินัม

Chen and Tsang (2003) ได้ประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์ที่ทำจากทั้งสเดนออกไซด์เพื่อวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เปรียบเทียบกับแก๊สเซ็นเซอร์ทั้งสเดนออกไซด์ที่เจือด้วยเงิน โดยวัดที่อุณหภูมิ 300°C ผลการทดลองพบว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่เจือด้วยเงินมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้เจือประมาณ 2.5 เท่า

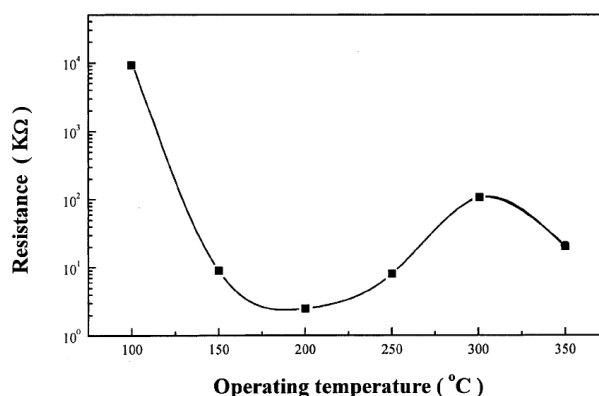
สำหรับการเจือสารนั้นมิใช่เพียงการเติมสารจำพวกโลหะมีตระกูลเท่านั้น และยังพบว่า มีการเจือสารจำพวกโลหะออกไซด์เพื่อประโยชน์ในด้านประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สอีกด้วย โดยจากการทบทวนเอกสารพบการนำสารชนิดต่างๆ เช่น การเจือทั้งสเดนออกไซด์ลงในทินออกไซด์ หรือการเจือไททานเนียมออกไซด์ลงในทั้งสเดนออกไซด์เป็นต้น

Pimthong-Ngam และคณะ (2007) ได้ทำการสังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์ด้วย แอมโมเนียมทั้งสเดนในทินออกไซด์ และควบคุมปริมาณทั้งสเดนออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆตั้งแต่ 0.3 - 20% เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทิลีน ความเข้มข้น 2 - 8 ppm ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วนของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 0.3% ให้ประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีที่สุดและดีกว่าประสิทธิภาพการตอบสนองของทินออกไซด์เพียงอย่างเดียว

Guidi และคณะ (2000) ได้ทำการเตรียมและศึกษาถึงคุณสมบัติ แก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมกันระหว่าง TiO_2 กับ WO_3 โดยผสมในอัตราส่วนต่างๆ (TiO_2/WO_3) คือ 10/90 และ 20/80 ในสภาพบรรยากาศที่เป็นออกซิเจนและอาร์กอนในอัตราส่วน 1:1 บนแผ่นอลูมินา และเผาอบสั่นที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (อัตราการให้ความร้อน 1.2 องศาเซลเซียส/นาทีก) จากการทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สในโตรเจนออกไซด์พบว่า ที่อัตราส่วนสาร 10/90 มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สในโตรเจนออกไซด์ดีกว่าที่อัตราส่วนสาร 20/80 เพราะอัตราส่วนสาร 10/90 มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าที่อัตราส่วนสาร 20/80

2.4.3 อุณหภูมิในการทำงาน

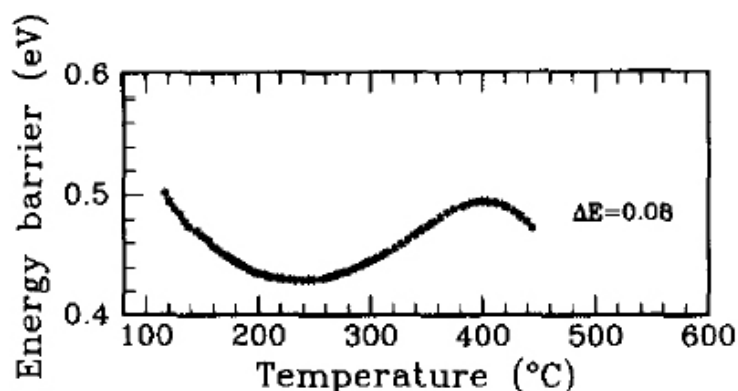
อุณหภูมิในการทำงานเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส โดยในช่วงอุณหภูมิห้องมีไอน้ำมาเกาะอยู่รอบๆอนุภาคของสารรวมถึงออกซิเจนที่ถูกดูดซับที่บริเวณผิวของอนุภาคของสารที่อยู่ในรูปของออกซิเจนไอออนดังสมการ 2.4 ซึ่งทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารจึงมีค่าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อนกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า เช่น ชั้นพลังงานตัวให้ (Donor level) หรือ ระดับชั้นวาเลนซ์ (Valance band) โดคข้ามขึ้นสู่ชั้นตัวนำ (Conduction band) (Tianshu, et al., 1999) จนถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งให้อิเล็กตรอนกระโดดข้ามสู่ชั้นตัวนำอย่างสมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีก โมเลกุลน้ำที่เกาะบริเวณรอบๆอนุภาคสาร (Chemisorbed water) ถูกคายออกและเกิดการเปลี่ยนรูปเป็น ออกซิเจนไอออนมาเกาะที่บริเวณรอบๆอนุภาคทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงอีกครั้งหนึ่ง (Yu de, et al., 2001) ดังแสดงในรูป 2.8 ซึ่งสอดคล้องกับค่าค่าแก๊สไฟฟ้า ที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น จนถึงอุณหภูมิประมาณ 250°C และค่าค่าแก๊สไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูป 2.9



(Yu de, et al., 2001)

รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิการทำงานที่สภาพบรรยากาศปกติ ของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์

จากรูปที่ 2.8 เห็นได้ว่าที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 175°C ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจนข้ามสู่ชั้นแถบตัวนำ แต่สำหรับช่วงอุณหภูมิ 175 - 225°C การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานค่อนข้างน้อยมาก และหลังจากช่วงอุณหภูมิ 225°C ค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้นอีกเนื่องจากโมเลกุลน้ำที่เกาะบริเวณรอบๆอนุภาคสาร (Chemisorbed water) ถูกคายออกและเกิดการเปลี่ยนรูปเป็น ออกซิเจนไอออนมาเกาะที่บริเวณรอบๆอนุภาค ซึ่งสอดคล้องกับรูป 2.9 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิการทำงานที่สภาพบรรยากาศปกติ



(Martinelli and Carotta, 1995)

รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำแพงศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิการทำงานที่สภาพบรรยากาศปกติของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทินออกไซด์

จากการทบทวนเอกสารพบว่าได้มีผู้ทำการทดลองโดยวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สที่อุณหภูมิต่างๆ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่างๆ ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าแตกต่างกันไป ดังนี้

มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544) ได้ทำการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 200 - 400°C และแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 150 - 400°C ด้วยเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทินออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียดีที่สุดที่อุณหภูมิ 300°C สำหรับแก๊สเอทานอล พบว่าเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีที่สุดที่อุณหภูมิ 250°C

Labidi และคณะ (2006) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลของแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทินออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีไอระเหย ซึ่งค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 2% ที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าเป็น 36

Ivanov และคณะ (2004) ได้ทำการทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลด้วยแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทินออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 250 300 และ 350°C โดยผลการทดลองพบว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 350°C ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประมาณ 9

Gopal Reddy และคณะ (2003) ได้ประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์จากทั้งสเดนออกไซด์ผสมกับไททาเนียมออกไซด์ด้วยอัตราส่วนระหว่างทั้งสเดนออกไซด์ต่อไททาเนียมออกไซด์เป็น 90:10 โดยน้ำหนักและวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 120 - 260°C เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 160°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการตอบสนองประมาณ 21.6

Tomchenko และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 25 ppm ที่อุณหภูมิ 200 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆรวมถึงทั้งสเดนออกไซด์แบบฟิล์มหนาด้วยวิธีโซล-เจล ที่ผ่านการเผาอบที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 15 นาที จากการทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 25 ppm ที่อุณหภูมิ 200 และ 300°C มีค่าเป็น -1.42 และ -1.04 ตามลำดับ ซึ่งค่าติดลบผู้วิจัยได้อธิบายว่าเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ลดลงขณะใส่แก๊สเข้าสู่ระบบ

Strivastava and Jain (2008) ทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 400 - 4000 ppm ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์ด้วยทั้งสเดนออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีโซลเจล เเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยทำการทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 - 450°C ผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นแก๊สแอมโมเนียเป็น 400 ppm เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 300°C โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองประมาณ 1.3

Siciliano และคณะ (2008) ได้ทำการทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 100 ppm ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีซีวีดี ทำการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 - 300°C จากผลการทดลองพบว่าเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีที่สุดที่อุณหภูมิ 220°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองประมาณ 9.0

Karunakaran และคณะ (2007) ทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 500 ppm ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มบางที่ประดิษฐ์จากไททาเนียมออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีสปีดเทอริง วัดประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 - 500°C จากผลการทดลองพบว่าเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีที่สุดที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองประมาณ 7.0

จากการทบทวนเอกสารตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นสำหรับกรณีแก๊สเอทานอลพบว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีในช่วงอุณหภูมิประมาณ 250 - 300°C (มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิริสุนทร สุโพธิณะ, 2544 และ

Ivanov, et al., 2004) และการผสมสารไททาเนียมออกไซด์ลงไปในสารทั้งสเดนออกไซด์ช่วยให้ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่อุณหภูมิต่ำลง (Gopal Reddy, et al., 2003) นอกจากนี้ยังพบว่า การผสมสารไททาเนียมออกไซด์ลงไปในสารทั้งสเดนออกไซด์ยังช่วยให้มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีขึ้นอีกด้วย (Ivanov, et al., 2004 และ Gopal Reddy, et al., 2003) ดังสรุปในตารางที่ 2.4

สำหรับกรณีของแก๊สแอมโมเนีย พบว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์แบบฟิล์มหนาด้วยวิธีโซล-เจลนั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 200 - 300°C สำหรับแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์แบบฟิล์มหนาด้วยวิธีตกตะกอนนั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 300°C ซึ่งสังเกตได้ว่าวิธีการสังเคราะห์โดยการตกตะกอนและวิธีโซล-เจลนั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแอมโมเนียดีในช่วงอุณหภูมิก่อนข้างกว้าง แต่สำหรับแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากไททาเนียมออกไซด์นั้นพบว่า มีประสิทธิภาพการตอบสนองได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 250°C โดยไม่พบรายงานการนำสารทั้งสองมาผสมกันเพื่อทดสอบวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย ดังสรุปในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล

แก๊สเซ็นเซอร์	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น	ประสิทธิภาพ การตอบสนอง	เอกสารอ้างอิง
WO ₃ (ตกตะกอน)	250	1%	10	มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544)
WO ₃ (ตกตะกอน)	300	2%	36	Labidi และคณะ (2006)
WO ₃ (ตกตะกอน)	300	1000 ppm	9	Ivanov และคณะ (2004)
TiO ₂ (MAPLE)	350	100 ppm	11	Rella และคณะ (2007)
WO ₃ + TiO ₂ (ผสม)	160	1000 ppm	21.6	Gopal Reddy และคณะ (2003)

* MAPLE คือ Matrix Assisted Pulsed Laser Evaporation

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

แก๊สเซ็นเซอร์	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น	ประสิทธิภาพ การตอบสนอง	เอกสารอ้างอิง
WO ₃ (ตกตะกอน)	300	1%	9.5	มานะ ศรีบุญทศศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544)
WO ₃ (โพล-เจล)	200	25 ppm	1.43	Tomchenko และคณะ (2003)
WO ₃ (โพล-เจล)	300	400 ppm	1.3	Srivastava and Jain (2008)
WO ₃ (ซีวีดี)	220	100 ppm	9.0	Siciliano และคณะ(2008)
TiO ₂ (สปีดเตอร์ริง)	250	500 ppm	7.0	Karunagaran และคณะ (2007)

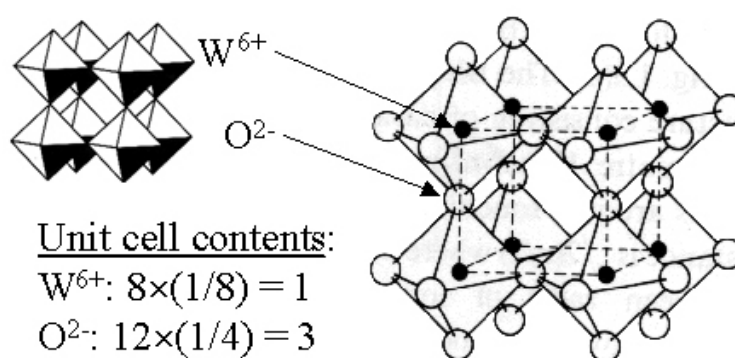
2.5 ทังสเตนออกไซด์ (Tungsten oxide: WO₃)

ในผลึกของแข็งประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากอยู่ด้วยกันอย่างหนาแน่นจึงทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมมีโอกาสซ้อนกันได้จึงทำให้มีระดับพลังงานย่อยๆ แยกออกมา โดยระดับพลังงานย่อยๆ นี้ มีความแตกต่างของระดับพลังงานเพียงเล็กน้อยจนเหมือนเป็นพลังงานต่อเนื่อง จึงเรียกว่าแถบพลังงาน (Energy band)

อิเล็กตรอนต้องอยู่ในระดับพลังงานที่แน่นอน ตามหลักเพาลี (Pauli Exclusion Principle) ซึ่งอิเล็กตรอนจะอยู่ช่องว่างระหว่างระดับพลังงานไม่ได้ การที่อิเล็กตรอนกระโดดจากระดับพลังงานหนึ่งไปยังอีกระดับพลังงานหนึ่งได้ต้องผ่านช่องว่างที่เรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (energy gap) ซึ่งค่าช่องว่างระดับพลังงานเป็นค่าเฉพาะของแต่ละสาร เช่น ทินออกไซด์มีช่องว่างพลังงาน ประมาณ 3.6 eV ไททาเนียมออกไซด์มีช่องว่างพลังงานประมาณ 3.2 eV เป็นต้น

ทังสเตนออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีค่าช่องว่างพลังงานแถบประมาณ 2.6 - 2.8 eV โดยทังสเตนออกไซด์มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าคือ 2 3 4 5 และ 6 ซึ่งในสภาวะที่เสถียรทังสเตนออกไซด์จะมีเลขออกซิเดชันเป็น 6 การนำไฟฟ้าของทังสเตนออกไซด์เกิดจากการที่ออกซิเจนไอออนหายไปจากแลตทิซทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจน (Oxygen vacancy) ขึ้น ดังนั้น

ทั้งสเดนจึงต้องเปลี่ยนวาเลนซ์จาก 6+ เป็น 4+ เพื่อให้มีประจุสมดุล โดยที่อิเล็กตรอนของทั้งสเดนออกไซด์วาเลนซ์ 4+ มีอิเล็กตรอนมากกว่าอิเล็กตรอนของทั้งสเดนออกไซด์วาเลนซ์ 6+ อยู่ 2 ตัว อิเล็กตรอนที่เกินมานี้จะเข้าไปอยู่ในชั้นอิเล็กตรอนตัวรับ (Donor level) จึงเป็นสาเหตุให้ทั้งสเดนออกไซด์มีสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำ (Supothina, et al., 2007) โดยสารทั้งสเดนออกไซด์นั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำทั้งสเดนออกไซด์เพื่อประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ (Solis, et al., 2001) ซึ่งสามารถตรวจวัดแก๊สได้หลายประเภทไม่ว่าจะเป็น เอทานอล หรือแอมโมเนีย เป็นต้น ทั้งสเดนออกไซด์นั้นสามารถสังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นหลายชนิด เช่น แอมโมเนียมทั้งสเดน ทั้งสเดนคลอไรด์ หรือโซเดียมทั้งสเดน เป็นต้น โดยทั้งสเดนออกไซด์นั้นมีลักษณะรูปแบบโครงสร้างได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิ เช่น ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 17 - 320°C มีรูปแบบโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก ดังแสดงในรูปที่ 2.10 หรือ ที่อุณหภูมิมากกว่า 720°C มีรูปแบบโครงสร้างเป็นเตตระโกนอลเป็นต้น ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป



(Whittingham, 1993)

รูปที่ 2.10 รูปแบบโครงสร้าง 1 หน่วยของทั้งสเดนออกไซด์

2.5.1 การศึกษารูปแบบโครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างของทั้งสเดนออกไซด์นั้น จากการทบทวนเอกสารของผู้ที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างของทั้งสเดนออกไซด์ ทำให้ทราบว่าทั้งสเดนออกไซด์นั้นเป็นสารที่มีโครงสร้างได้หลายรูปแบบ ซึ่งมีผู้วิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างของทั้งสเดนออกไซด์ดังนี้

Pintér และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของทังสเตนออกไซด์ (WO_3) โดยผลการทดลองแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของทังสเตนออกไซด์ได้สรุปดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของทังสเตนออกไซด์

ชื่อ	โครงสร้าง	ช่วงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
$\alpha\text{-WO}_3$	เตตระโกนอล	>720
$\beta\text{-WO}_3$	ออร์โทโรมบิก	$320 - 720$
$\gamma\text{-WO}_3$	โมโนคลินิก	$17 - 320$
$\delta\text{-WO}_3$	ไตรคลินิก	$-40 - 17$
$\epsilon\text{-WO}_3$	โมโนคลินิก	< -40

(Pintér, et al., 2001)

จากตารางที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบโครงสร้างทังสเตนออกไซด์ ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งสังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิต่างกันทังสเตนออกไซด์มีรูปแบบโครงสร้างที่ต่างกัน โดยการเปลี่ยนโครงสร้างต่างๆของทังสเตนออกไซด์นี้สามารถย้อนกลับได้ สำหรับที่อุณหภูมิห้องนั้น ทังสเตนออกไซด์มีรูปแบบโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก เช่นการศึกษาของ มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544) ได้สังเคราะห์ทังสเตนออกไซด์โดยการทำปฏิกิริยาระหว่าง แอมโมเนียมทังเตทกับกรดไนตริก นำไปล้างด้วยน้ำกลั่น ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปเผาอบผลึกที่อุณหภูมิ 600 และ 800°C จากการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ารูปแบบโครงสร้างของทังสเตนออกไซด์ที่ได้เป็นโมโนคลินิก เช่นเดียวกับการทดลองของ Supothina และคณะ (2007) สังเคราะห์ทังสเตนออกไซด์โดยใช้ปฏิกิริยาเดียวกันกับการทดลองของ มานะ ก่อนนำสารที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นและกรองด้วยโพลิเมอร์ เมมเบรนขนาด $0.47\text{ }\mu\text{m}$ นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 คืน นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ $150 - 400^{\circ}\text{C}$ จากการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่า ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ 150°C สารอยู่ในรูปของโมโนไฮเดรต ($\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีรูปแบบโครงสร้างเป็นออร์โทโรมบิก โดยอ้างอิงรหัสมาตรฐานเลขที่ JCPDS# 43-0679 และหลังเผาแคลไซน์

ที่อุณหภูมิ 300°C ขึ้นไปพบว่าสารมีรูปแบบโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก โดยอ้างอิงรหัสมาตรฐาน เลขที่ JCPDS# 43-1035

จากการศึกษารูปแบบโครงสร้างของผู้วิจัยตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสังเกตได้ว่า ทั้งสเดนออกไซด์ที่นำมาวิเคราะห์โครงสร้างนั้นได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอน ซึ่งมีรูปแบบโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก เช่นเดียวกันกับการสังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์โดยวิธีการอื่น รูปแบบโครงสร้างที่ได้ก็เป็นโมโนคลินิกเช่นเดียวกัน เช่นการศึกษาของ Shieh และคณะ (2002) สังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์แบบฟิล์มบางโดยวิธีโซล-เจล จากทั้งสเดนคลอไรด์กับ 2,4 เพนตะ ไดโอน (Pentadiene) ก่อนนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ รูปแบบโครงสร้างโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ XRD พบว่าทั้งสเดนออกไซด์ที่ได้ มีรูปแบบโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก โดยอ้างอิงรหัสมาตรฐานเลขที่ JCPDS# 830951 หรือการ ทดลองของ Lemire และคณะ (2002) สังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์แบบฟิล์มบางโดยวิธีพีวีดี ก่อน นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้าง พบว่า ทั้งสเดนออกไซด์ที่ได้มีรูปแบบโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก

2.5.2 การสังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์

การสังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์ จากการทบทวนเอกสารเพื่อศึกษาถึงกระบวนการ สังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์นั้น พบว่ากระบวนการสังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์มีทั้งวิธีการทางเคมี เช่นวิธีการตกตะกอน (Precipitate) โซล-เจล (sol-gel) หรือวิธีการทางกายภาพเช่น วิธีฟิสิกอล เวเปอร์ดีโพสิชัน (พีวีดี : PVD) หรือ เคมีคอลเวเปอร์ดีโพสิชัน (ซีวีดี : CVD) เป็นต้น สำหรับ กระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีตกตะกอนนั้นโดยส่วนใหญ่เป็นวิธีที่ใช้ประติสค์แก๊สเช่นเซอร์แบบ ฟิล์มหนา ส่วนวิธีอื่นๆที่ได้กล่าวมาเช่น โซล-เจล พีวีดี หรือซีวีดี นั้นเป็นวิธีการสังเคราะห์เพื่อใช้ในการ ประติสค์แก๊สเช่นเซอร์แบบฟิล์มบาง โดยข้อแตกต่างระหว่างแก๊สเช่นเซอร์แบบฟิล์มหนาและ ฟิล์มบางคือ แก๊สเช่นเซอร์แบบฟิล์มหนานั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีกว่าฟิล์มบางแต่ใช้ ปริมาณสารที่นำมาประติสค์มากกว่า แต่สำหรับแก๊สเช่นเซอร์แบบฟิล์มบางนั้นใช้ปริมาณสารน้อยกว่าแบบฟิล์มหนามากและมีความเร็วในการตอบสนองต่อแก๊สมากกว่าแก๊สเช่นเซอร์แบบฟิล์มหนา และกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธีตกตะกอนนั้น สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยากัน ระหว่างสารตั้งต้นที่เป็นสารประเภททั้งสเตท เช่น แอมโมเนียมทั้งสเตท (Ammonium tungstate ; $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) หรือ โซเดียมทั้งสเตท (Sodium tungstate ; Na_2WO_4) ทำปฏิกิริยากับกับกรด เช่นกรดไนตริก ซึ่งจะได้สารใหม่คือ กรดทั้งสติก (H_2WO_4) และสามารถเปลี่ยนเป็นทั้งสเดน ออกไซด์ได้โดยการเผาที่อุณหภูมิสูง จากการทบทวนเอกสารพบว่าสารแอมโมเนียมทั้งสเตท เป็น สารตั้งต้นชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นทั้งสเดนออกไซด์เนื่องจากทำให้ได้

ทั้งสเดนออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยการนำ แอมโมเนียมทั้งสเดนทำปฏิกิริยาทางเคมีกับกรด เช่นกรดไนตริกหรือไฮโดรเจนคลอไรด์ เพื่อให้ได้กรดทั้งสติก ก่อนนำกรดทั้งสติกที่ได้เข้าสู่กระบวนการคายนํ้าออกจากกรดทั้งสติกโดยการเผาที่อุณหภูมิสูงซึ่งการเผาที่อุณหภูมิสูงนี้มีข้อดีคือช่วยให้มีสิ่งเจือปนในสารที่ต้องการค่อนข้างน้อย (Jiménez, et al., 2003) ซึ่งเหมาะสำหรับวิธีการเตรียมเพื่อนำมาประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์

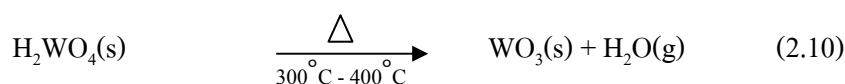
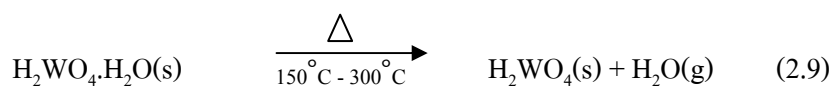
ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างวิธีการสังเคราะห์ทั้งสเดนออกไซด์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ต่างๆ

วิธีการ	สารตั้งต้น	ประเภทเซ็นเซอร์	เอกสารอ้างอิง
วิธีการสังเคราะห์ทางเคมี			
ตกตะกอน	แอมโมเนียมทั้งสเดน + ไนตริก	ฟิล์มหนา	มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544)
ตกตะกอน	แอมโมเนียมทั้งสเดน + ไนตริก	ฟิล์มหนา	Supothina และคณะ (2007)
โซล-เจล	ทั้งสเดนคลอไรด์ + 2,4- เพน ตะไดโอน	ฟิล์มบาง	Shieh และคณะ (2002)
โซล-เจล	ทั้งสเดนคลอไรด์ + ไอโซโพ รพานอล	ฟิล์มบาง	Tong และคณะ (2001)
วิธีการสังเคราะห์ทางกายภาพ			
พีวีดี	ทั้งสเดนบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง	Lemire และคณะ (2002)

2.5.3 การศึกษาผลทางความร้อน

การศึกษาผลทางความร้อนของสารทั้งสเดนออกไซด์ ศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและช่วงของการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารทั้งสเดนออกไซด์ เพื่อใช้ในการคาดเดาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างที่จะเกิดขึ้น โดยจากการทบทวนเอกสารพบว่างานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการสังเคราะห์สารทั้งสเดนออกไซด์วิธีเดียวกับการทดลองของ Supothina และคณะ (2007) ดังนั้นจึงขออภิปรายโดยใช้การทดลองของ Supothina และคณะ (2007) ซึ่งในการทดลองได้ศึกษา

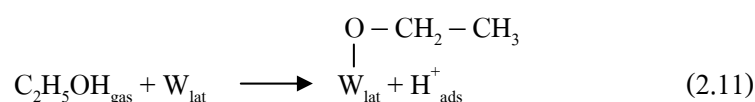
การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของทั้งสแตนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยแอมโมเนียมทั้งสเตท ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก และได้รายงานผลการทดลองด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) พบว่ามีน้ำหนักหายไปในช่วงอุณหภูมิ 40 - 120°C ซึ่งเป็นการระเหยของความชื้นในสาร และน้ำหนักหายไปช่วงอุณหภูมิ 150 - 300°C ประมาณ 5.2% ของน้ำหนักทั้งหมดโดยน้ำหนักที่สูงสูญหายมากที่สุดที่อุณหภูมิ 220°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของผลึก ดังสมการ (2.9) และค่อยๆสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิช่วง 300 - 400°C ดังสมการ (2.10) ซึ่งในรายงานได้ระบุว่าอาจเป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำที่ยังเหลืออยู่และเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสของโครงสร้าง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเทคนิค DTA โดยในรายงานพบการดูดพลังงาน 2 ช่วงคือที่อุณหภูมิ 100°C และอุณหภูมิ 260°C ซึ่งเกิดจากการระเหยของความชื้นในสารและการสลายตัวของน้ำในโมเลกุลตามลำดับ



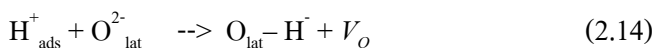
2.5.4 ปฏิกิริยาที่ผิวของทั้งสแตนออกไซด์ในการตรวจวัดแก๊สเอทานอล

(Yu-De, et al., 2001)

ที่อุณหภูมิประมาณ 250°C เอทานอลที่ถูกดูดซับ จะทำปฏิกิริยากับทั้งสแตนไอออน ซึ่งทำหน้าที่เป็นกรดลิวอิส โดยปฏิกิริยาเกิดเป็นเอทิลอีเทอร์ดังสมการ

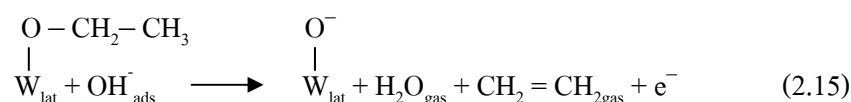


โดยที่ O-CH₂-CH₃ มีสถานะเป็นขั้วลบ ส่วน H_{ads}⁺ เป็นตัวทำปฏิกิริยาและได้ปฏิกิริยาดังสมการ

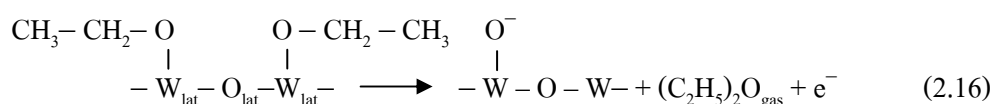


เมื่อ V_{O} คือ ช่องว่างออกซิเจน (Oxygen vacancy)

สำหรับที่อุณหภูมิ 350°C จะมีการสร้างเอทีลีนขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่าง O-CH₂-CH₃ กับ OH⁻ ดังสมการ



สำหรับที่อุณหภูมิต่ำและมีปริมาณของออกซิเจนน้อย O-CH₂-CH₃ ไอออน 2 หมู่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเอทิลอีเทอร์ได้ดังสมการ

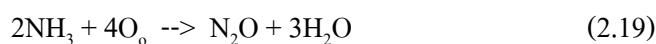
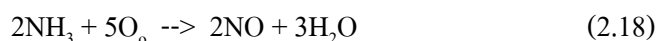


ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดอิเล็กตรอนโดยอิเล็กตรอนนี้เข้าสู่ทั้งสแตนออกไซด์ ทำให้ทั้งสแตนออกไซด์มีปริมาณอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย

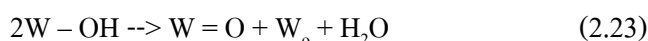
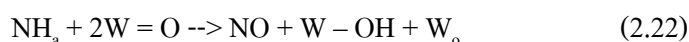
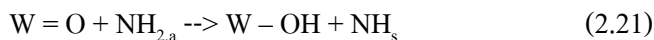
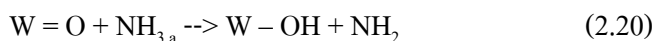
2.5.5 ปฏิกิริยาที่ผิวของทั้งสแตนออกไซด์ในการตรวจวัดแก๊สแอมโมเนีย

(Jiménez, 2003)

แก๊สแอมโมเนียสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ในรูปแบบต่างๆดังสมการ



เมื่อ O₀ คือ รูปแบบต่างๆของออกซิเจนไอออน โดยอาจจะเป็นแลคทิสฟลักหรือว่าออกซิเจนตัวดูดซับซึ่งอยู่ในรูปแบบ O⁻ หรือ O₂⁻ จากสมการข้างต้นเป็นสมการทั่วไป โดยการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับทั้งสแตนออกไซด์นั้นมีโอกาสเกิดได้ทั้งสามรูปแบบตามสมการข้างต้น แต่ขอรายงานเพียงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับทั้งสแตนออกไซด์ ในปฏิกิริยาการเกิดในรูปแบบของไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ดังสมการ



โดยที่ W_o คือทั้งสเดนอะดอม

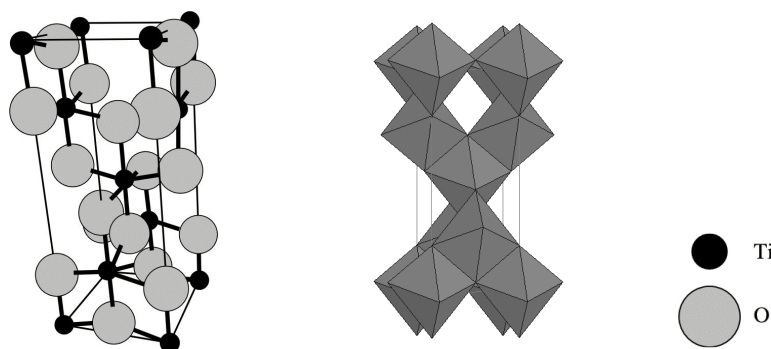
2.6 ไททาเนียมออกไซด์

ไททาเนียมออกไซด์หรืออีกชื่อหนึ่งคือไททาเนีย มีค่าแถบพลังงานประมาณ 3.2 eV (Zhao, et al., 2008) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไททาเนียมออกไซด์เพื่อประดิษฐ์เป็นแก๊สเซ็นเซอร์ (Karunagaran, et al., 2006) ซึ่งสามารถตรวจวัดแก๊สได้หลายประเภทไม่ว่าจะเป็น เอทานอล หรือแอมโมเนีย เป็นต้น ไททาเนียมออกไซด์นั้นสามารถสังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นหลายชนิดเช่น Titanium tetrachloride ($TiCl_4$) (Kumagai, et al., 1995) Titanium tetraethoxide ($Ti(OC_2H_5)_4$) (Haraguchi, et al., 2004) หรือTetrabutyl titanate ($(C_4H_9O)_4Ti$) (Shen, et al., 1995) โดยไททาเนียมออกไซด์นั้นมีลักษณะรูปแบบโครงสร้าง 2 รูปแบบ และมี 3 เฟส ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

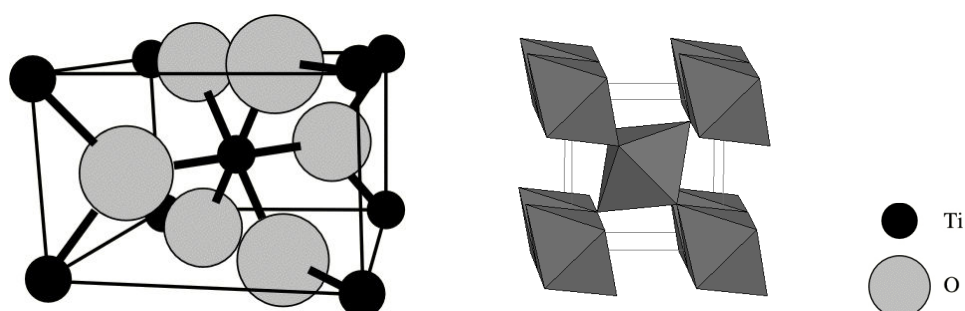
2.6.1 การศึกษารูปแบบโครงสร้าง

โครงสร้างของไททาเนียมออกไซด์นั้น จากการทบทวนเอกสารของผู้ที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างของไททาเนียมออกไซด์ ทำให้ทราบว่าไททาเนียมออกไซด์นั้นเป็นสารที่มีรูปแบบโครงสร้างสองรูปแบบ คือ เตตระโกนอล และออร์โธโรมบิก โดยแบ่งเป็น 3 เฟสคือ อนาเทส (Anatase) บรูไคท์ (Brookite) และ รูไทล์ (Rutile) (Hsiang and Lin, 2004)ซึ่งในส่วนของ อนาเทสและรูไทล์ มีรูปแบบโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล โดยอนาเทสอยู่ในสเปซกรุ๊ป (space group) $I4/amd$ มีพารามิเตอร์คือ $a = 3.785 \text{ \AA}$ และ $c = 9.514 \text{ \AA}$ สำหรับรูไทล์นั้นอยู่ในสเปซกรุ๊ป (space group) $P4_2 / mmm$ มีพารามิเตอร์คือ $a = 4.954 \text{ \AA}$ และ $c = 2.958 \text{ \AA}$ (Rohrer, 2001) ส่วนบรูไคท์มีรูปแบบโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (Hu, et al., 2003) เฟสอนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นเฟสรูไทล์

ได้เมื่อได้รับความร้อนโดยการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800°C ขึ้นไป (Hsiang and Lin, 2008 และ Zhao, et al., 2008) สำหรับเฟสอานาเทสและรูไทล์นั้นแสดงดังรูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12 (Campbell, et al., 1999)



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของไททาเนียมออกไซด์เฟสอานาเทส



รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของไททาเนียมออกไซด์เฟสรูไทล์

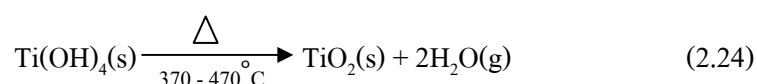
2.6.2 การสังเคราะห์ไททาเนียมออกไซด์

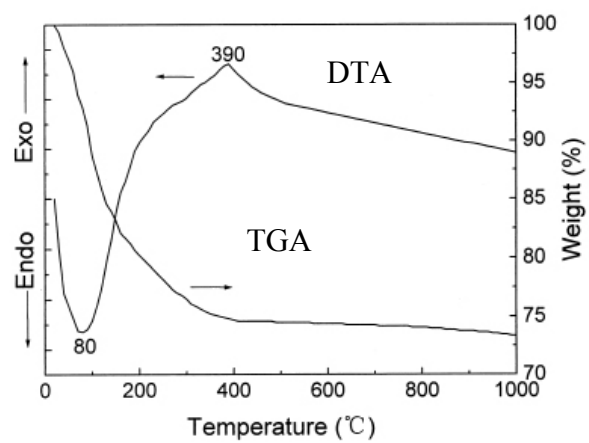
การสังเคราะห์ไททาเนียมออกไซด์นั้น มีด้วยกันหลายวิธี เช่นวิธีการตกตะกอน หรือวิธีโซล-เจล เป็นต้น วิธีการสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนนั้นโดยส่วนใหญ่เป็นวิธีที่ใช้ประติสรีร์แก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนา ส่วนวิธีอื่นๆเช่น โซล-เจล นั้นเป็นวิธีการสังเคราะห์เพื่อใช้ในการประติสรีร์แก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มบาง สำหรับการสังเคราะห์ไททาเนียมออกไซด์โดยวิธีการตกตะกอนนั้นจากการทบทวนเอกสารพบว่าวิธีการสังเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนนั้นเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมเตตระคลอไรด์กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Li and Wang, 1999)

หรือปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมเตตระคลอไรด์กับกรดไฮโดรคลอริก (Hu, et al., 2003) เป็นต้น โดยวิธีการสังเคราะห์โดยวิธีการทั้งสองตามตัวอย่างที่ได้กล่าวมานั้น ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะขนาดอนุภาคที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก ดังเช่นการศึกษาของ Li and Wang (1999) ได้ทำการสังเคราะห์ไททาเนียมออกไซด์ด้วยวิธีการสังเคราะห์แบบตกตะกอนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่าง ไททาเนียมเตตระคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 M กับ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 M ก่อนนำไปล้างด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง และอบแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และผลจากการวัดขนาดอนุภาคของสารภายหลังจากนำสารที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีขนาด 10 และ 28 nm ตามลำดับ การทดลองของ Hu และคณะ (2003) สังเคราะห์ไททาเนียมออกไซด์โดยวิธีการตกตะกอนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมเตตระคลอไรด์กับกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 0.1 M ก่อนนำไปล้างด้วย น้ำกลั่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากผลการวัดขนาดอนุภาคหลังจากนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าขนาดของอนุภาคอยู่ระหว่าง 8 - 10 nm

2.6.3 การศึกษาผลทางความร้อน

การศึกษาผลทางความร้อนของไททาเนียมออกไซด์ที่เกิดจากการสังเคราะห์นั้นจากการ ทบทวนเอกสารพบว่าการสังเคราะห์ไททาเนียมออกไซด์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการสังเคราะห์วิธี เดียวกับของ Li and Wang (1999) ดังนั้นจึงขออภิปรายการศึกษาทางความร้อนโดยใช้การทดลอง ของ Li and Wang (1999) ซึ่งในการทดลองศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของไททาเนียม ออกไซด์ได้มีการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้นตอนคือขั้นตอนของการระเหยของความชื้นในสาร และการสลายตัวของน้ำในโครงสร้างผลึกและเกิดเป็นไททาเนียมออกไซด์เฟสอนาเทสที่อุณหภูมิ ประมาณ 390°C ดังสมการ 2.24 (Li and Wang, 1999) สำหรับรูปการวิเคราะห์ทางความร้อนโดย การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) และเทคนิคสปอนเทเนียลดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอล อะนาไลซิส (SDTA) เป็นดังรูปที่ 2.13





(Li and Wang, 1999)

รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์ทางความร้อนของไททานเนียมออกไซด์

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

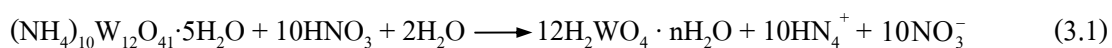
งานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ทดสอบเป็นหัวข้อดังนี้

- 3.1 การสังเคราะห์สารทังสเตนออกไซด์และสารไททาเนียมออกไซด์
- 3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารที่สังเคราะห์ได้
- 3.3 การประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์
- 3.4 การวัดประสิทธิภาพการตอบสนอง

3.1 การสังเคราะห์สารทังสเตนออกไซด์และสารไททาเนียมออกไซด์

3.1.1 การสังเคราะห์สารทังสเตนออกไซด์ (WO_3)

การสังเคราะห์ทังสเตนออกไซด์ทำโดยใช้สารตั้งต้นคือสารแอมโมเนียมทังสเตท (Ammonium tungstate ; $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์ 99.99% จากบริษัท SIGMA-ALDRICH ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก ความเข้มข้น 65% จากบริษัท MERCK ดังสมการที่ 3.1



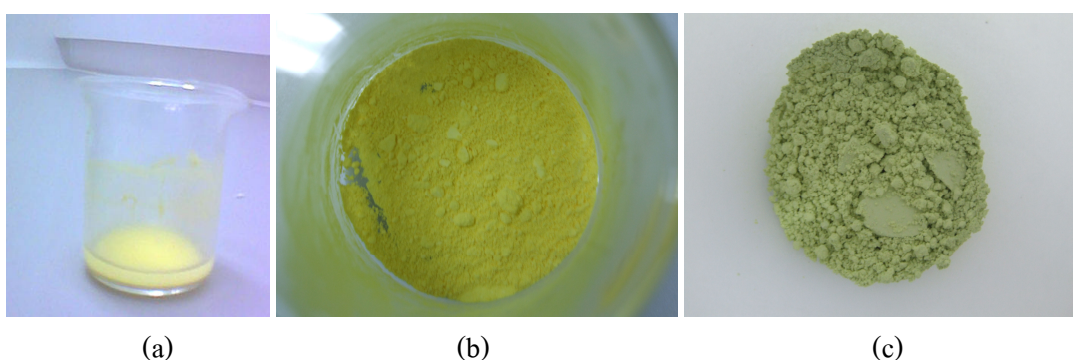
การทดลองทำโดยนำผงแอมโมเนียมทังสเตทไปชั่งให้ได้น้ำหนักตามอัตราส่วนที่ต้องการดังแสดงในตาราง 3.1 จากนั้นหยดกรดไนตริกลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียมทังสเตทตั้งทิ้งไว้รอจนปฏิกิริยาสิ้นสุด จะเกิดกรดทังสติก (H_2WO_4) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อนๆ ดังรูปที่ 3.1(a) หลังจากนั้นนำผงที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นบนกระดาษกรองประมาณ 10 รอบ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออก ซึ่งผงที่ผ่านการอบมีลักษณะ

เป็นผงสีเหลืองเข้มดังแสดงในรูปที่ 3.1(b) จากนั้นนำสาร ไปชั่งเพื่อหาประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยจากการเตรียมสาร 4 ครั้ง มีค่าประมาณ 82.05 % ตามตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ประสิทธิภาพ (yield) ของผลผลิตกรดทั้งสติกที่ได้จากปฏิกิริยา

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4
สารตั้งต้น แอมโมเนียมทังสเตท (g)	7	7.5	10	20
ผลผลิต กรดทั้งสติก (g)	5.53	6.44	8.05	15.32
ผลผลิตจากการคำนวณ (g)	6.70	7.18	9.57	19.14
ประสิทธิภาพ (%)	82.5	82.6	84.11	78.97
ประสิทธิภาพเฉลี่ย (%)	~82.05			

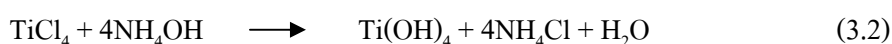
เนื่องจากสารที่ได้ยังไม่ใช่ทั้งสเดนออกไซด์ดังที่ต้องการ จึงต้องทำการเผาเพื่อเปลี่ยนกรดทั้งสติกเป็นทั้งสเดนออกไซด์ดังนี้ นำกรดทั้งสติกที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้ว ไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C เป็นเวลา 15 นาที และ 30 นาที ซึ่งภายหลังจากการเผา ผงทั้งสเดนออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นสีเขียวอ่อน ดังรูปที่ 3.1(c) หลังจากนั้นนำผงที่ได้ไปทำการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกและวิเคราะห์ทางความร้อนต่อไป



รูปที่ 3.1 ลักษณะของสารที่ได้จากการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมทังสเตทกับกรดไนตริก (a) ตะกอนของกรดทั้งสติก (b) ผงของกรดทั้งสติกหลังจากผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิประมาณ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ (c) ผงทั้งสเดนออกไซด์ หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 30 นาที

3.1.2 การสังเคราะห์สารไททาเนียมออกไซด์ (TiO₂)

ในการทดลองนี้ได้ทำการสังเคราะห์สารไททาเนียมออกไซด์จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ไททาเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl₄) กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) ดังสมการที่ 3.2



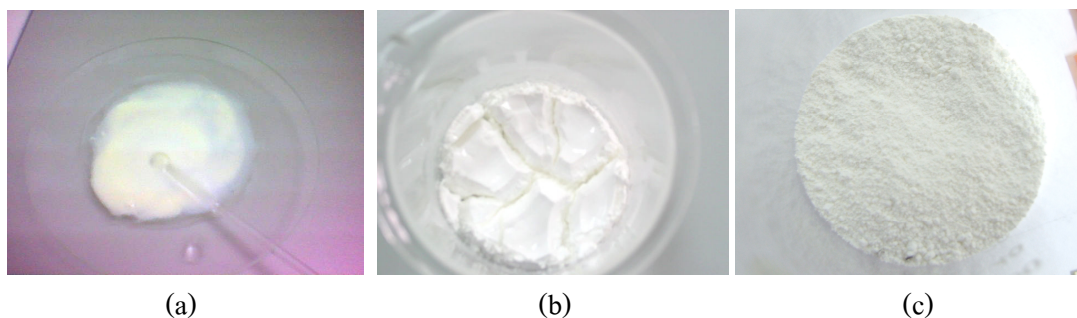
วิธีการทดลองมีขั้นตอนคือ ชั่งไททาเนียมคลอไรด์ในบีกเกอร์ที่แห้งและปราศจากความชื้น (ทำโดยอบแห้งและเก็บในตู้ดูดความชื้น) หลังจากนั้นหยดแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ลงในไททาเนียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดควันขึ้นอย่างมากควรทำการทดลองในตู้ดูดควันตั้งทิ้งไว้และรอจนปฏิกิริยาสิ้นสุด หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลงแล้ว ลักษณะสารไททาเนียมไฮดรอกไซด์ที่ได้ มีลักษณะเป็นตะกอนสีขาวดังรูปที่ 3.2(a) นำตะกอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิประมาณ 60°C และคนสารตลอดเวลาเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuge) เพื่อให้เกิดการตกตะกอน ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงเทน้ำออกให้เหลือแต่ตะกอน นำตะกอนมาทำการล้างซ้ำด้วยวิธีการเดิมเป็นจำนวน 10 รอบ ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก นำสารที่ได้ไปชั่งเพื่อหาประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยจากการเตรียม 3 ครั้งมีค่าประมาณ 50.03 % ตามตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ประสิทธิภาพ (yield) ของผลผลิตไททาเนียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยา

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
สารตั้งต้น ไททาเนียมคลอไรด์ (ml)	10	10	30
ผลผลิต ไททาเนียมไฮดรอกไซด์ (g)	5.28	5.87	14.15
ผลผลิตจากการคำนวณ (g)	10.57	10.57	31.71
ประสิทธิภาพ (%)	49.95	55.53	44.62
ประสิทธิภาพเฉลี่ย (%)	~50.03		

หลังจากการอบเพื่อไล่ความชื้น ผงที่ได้อาจติดกันเป็นก้อนใหญ่ดังรูปที่ 3.2(b) ก่อนการเผาควรนำผงที่ได้ไปบดด้วยมือในโถรงบสารแบบซิลิกา (Agate) จนละเอียด หลังจากนั้นนำผงที่

ผ่านการบดแล้วไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C เป็นเวลา 15 นาที และ 30 นาที เพื่อเปลี่ยนไททาเนียมไฮดรอกไซด์ (Ti(OH)_4) เป็นไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆแล้ว ผงไททาเนียมออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นสีขาว ดังรูปที่ 3.2(c)



รูปที่ 3.2 ลักษณะของสารที่ได้จากการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมเตตระคลอไรด์กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (a) ตะกอนไททาเนียมไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ (b) ผงไททาเนียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (c) ผงไททาเนียมออกไซด์ที่ผ่านการบดและเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที

3.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารที่สังเคราะห์ได้

3.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 ทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction: XRD ของบริษัท PANalytical รุ่น X'Pert PRO MPD ประเทศเนเธอร์แลนด์) โดยมีเงื่อนไขการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงในตาราง 3.3

ตารางที่ 3.3 สภาวะการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
(X-Ray Diffraction: XRD)

ชนิดตัวกำเนิดรังสีและความยาวคลื่น (Source and wave length)	K- α (1.540 Å)
ช่วงมุมการยิงรังสี (Range)	20 – 90 องศา
ขนาดมุมแต่ละช่วงการยิงรังสี (Step size)	0.0167 องศา
เวลาต่อช่วงการยิงรังสี (Time per step)	10.065 วินาที

3.2.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric/Differential Analysis: TGA บริษัท METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA STAR 851^o) โดยทดสอบในสภาวะที่เป็นอากาศบริสุทธิ์ด้วยอัตราการไหลของแก๊ส 20 ml/min ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 700^oC ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20^oC/min การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ทำโดยใช้เทคนิคสปอนเทนเนียสดีฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลอะนาไลซิส (Spontaneous Differential Thermal Analysis: SDTA)

3.2.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

นำสารที่เผาอบผลึกที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ มาศึกษาลักษณะทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM บริษัท LEO รุ่น VP 1450) โดยศึกษาที่ค่าความต่างศักย์ 20 KeV

3.2.4 การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ

ศึกษาถึงพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร ด้วยเทคนิค BET โดยใช้เครื่องรุ่น Autosorb1MB ยี่ห้อ Quantachrome และมีสภาวะการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สภาวะการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยเทคนิค BET

แก๊สที่ดูดซับ	ไนโตรเจน
อุณหภูมิขณะไม่มีแก๊ส	50°C
ความดันสัมพัทธ์	วัดจำนวน 5 จุด
เวลาที่ใช้ในการดูดความชื้นในระบบสุญญากาศ	8 ชั่วโมง
เวลาคงสภาวะไม่มีแก๊ส ณ อุณหภูมิ 50°C	4 ชั่วโมง

ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ หากสมมติว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม การคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคเป็นดังสมการ 3.3

$$A_s = \frac{6}{\rho \times d} \quad (3.3)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของสาร ซึ่ง ρ ของทั้งสแตนออกไซด์มีค่าเป็น 7,200 kg/m³ (Winter, 2007) และของไททาเนียมออกไซด์มีค่าเป็น 4,230 kg/m³ (Winter, 2007)

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)

A_s คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ (m²/g)

3.3 การประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์

3.3.1 อัตราส่วนการผสม

นำสารที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 30 นาที มาผสมกันตามอัตราส่วนต่างๆ และเนื่องจากสภาวะของสารที่ใช้ในการประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์มีหลากหลาย ทำให้แก๊สเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดลองมีมาก ผู้วิจัยจึงได้กำหนดรหัสตัวอย่างเพื่อให้เกิดความกระชับในการอธิบายผลการทดลองดังตารางที่ 3.5 โดยรหัสตัวอย่างบ่งบอกถึงอัตราส่วนในการผสมของไททาเนียมออกไซด์และอุณหภูมิการเผาแคลไซต์ของสารทั้งสองชนิด ดังตัวอย่างเช่น 10W5T4 มีความหมายดังนี้

10 หมายถึง ปริมาณของไททานเนียมออกไซด์ที่ผสมเป็น 10% โดยน้ำหนัก

W5 หมายถึง สารทั้งสเดนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C

T4 หมายถึง สารไททานเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 400°C

ตารางที่ 3.5 รหัสตัวอย่างแก๊สเซ็นเซอร์ ที่ผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์และไททานเนียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิการเผาเคลือบและอัตราส่วนต่างๆ

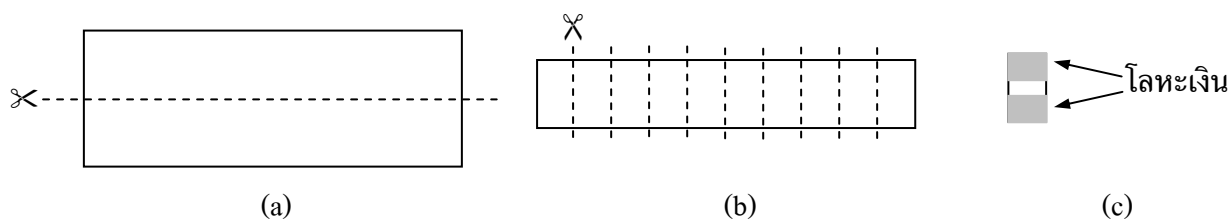
อุณหภูมิการเผาเคลือบ		รหัสตัวอย่างของอัตราส่วนผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์และไททานเนียมออกไซด์(%)			
WO ₃	TiO ₂	95 : 5	92.5 : 7.5	90 : 10	87.5 : 12.5
500	400	5W5T4	7.5W5T4	10W5T4	12.5W5T4
500	500	5W5T5	7.5W5T5	10W5T5	12.5W5T5
500	600	5W5T6	7.5W5T6	10W5T6	12.5W5T6
600	400	5W6T4	7.5W6T4	10W6T4	12.5W6T4
600	500	5W6T5	7.5W6T5	10W6T5	12.5W6T5
600	600	5W6T6	7.5W6T6	10W6T6	12.5W6T6

จากตารางที่ 3.5 ในการทดลองนี้ใช้สารที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 30 นาที ดังผลการทดลองแสดงในบทต่อไป

3.3.2 การสร้างอิเล็กโทรด

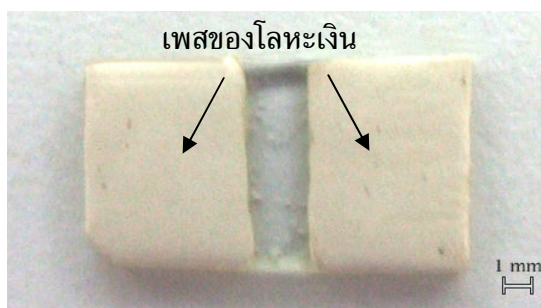
อิเล็กโทรด เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับวัดค่าการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าของแก๊สเซ็นเซอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นขั้วที่ทำจากโลหะเงินบนกระจกสไลด์ โดยมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

1. ตัดรีจิงกระจกสไลด์ตามแนวยาว ดังรูปที่ 3.3(a)
2. ตัดกระจกสไลด์ที่ได้จากขั้นตอนแรก โดยตัดตามแนวขวางให้มีความกว้างประมาณ 0.5 ซม. ดังรูปที่ 3.3(b)
3. นำกระจกสไลด์ที่ตัดแล้วมาป้ายด้วยเพสของโลหะเงิน (Silver Paste: บริษัท SPI Supply) ที่ปลายกระจกเป็น 2 แนว โดยเว้นช่องตรงกลางไว้ประมาณ 0.25 ซม. ดังรูปที่ 3.3(c)
4. นำกระจกสไลด์ที่ป้ายโลหะเงินแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยลักษณะของอิเล็กโทรดที่ได้เป็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แผนภาพการสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากโลหะเงินบนกระจกสไลด์

(a) แนวการตัดกระจกสไลด์ (b) แนวการตัดกระจกสไลด์ตามแนวขวาง (c) ตำแหน่งการป้ายเศษของโลหะเงิน



รูปที่ 3.4 ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์บนกระจกสไลด์ ที่ป้ายด้วยเศษของโลหะเงินและผ่านการเผาอบที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

หลังจากที่ได้อิเล็กทรอนิกส์แล้ว นำสารที่ผสมระหว่าง ทั้งสเดนออกไซด์กับไททาเนียมออกไซด์ ตามอัตราส่วนต่างๆที่ได้เตรียมไว้มาป้ายบนขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการอบแล้ว ซึ่งลักษณะของแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น

3.4 การวัดค่าประสิทธิภาพการตอบสนอง

วัดประสิทธิภาพการตอบสนองด้วยเครื่องวัดอัตราการตอบสนองต่อแก๊ส ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยวัดการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์ ในสภาพที่มีแก๊สกลุ่มไฮโดรคาร์บอนของเอทานอลที่อัตราส่วนความเข้มข้น 500 - 2500 ppm และแอมโมเนียที่อัตราส่วนความเข้มข้น 400 - 3200 ppm ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 - 300°C โดยเครื่องมือวัดนี้มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

3.4.1 ระบบแก๊สพาหะ (Carrier gas)

ระบบแก๊สพาหะเพื่อนำสารตัวอย่างที่ต้องการวัดไปยังแก๊สเซ็นเซอร์ ซึ่งในที่นี้ใช้แก๊สผสมระหว่างไนโตรเจนและออกซิเจนในอัตราส่วน 4:1 เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมที่เป็นการวัดอากาศทั่วไป

3.4.2 ระบบหัวฉีด (Injector)

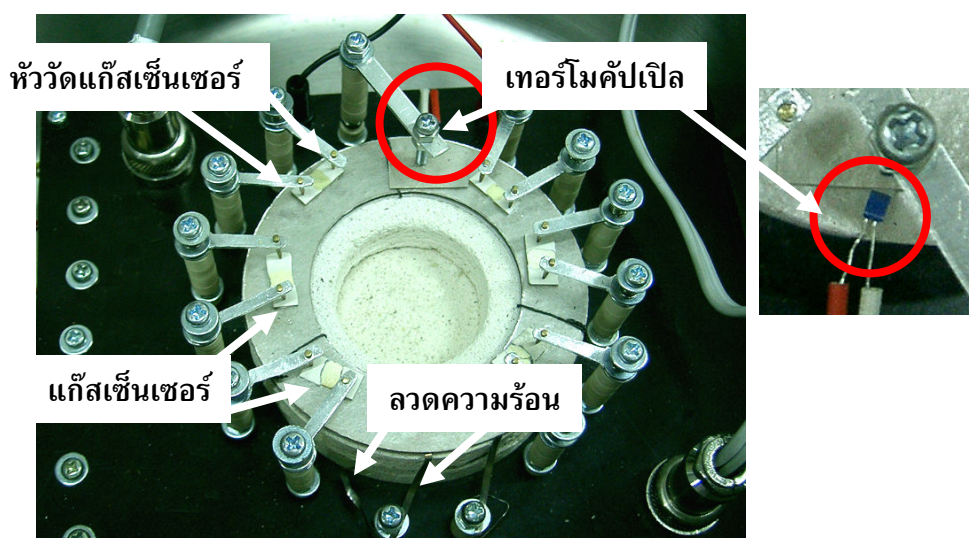
ในส่วนของระบบหัวฉีด ได้ติดตั้งหลอดความร้อนที่หัวฉีดเพื่อทำการระเหยสารตัวอย่างให้เป็นไอ ก่อนที่จะถูกแก๊สพาหะนำพาสารตัวอย่างที่กลายเป็นไอไปสู่แก๊สเซ็นเซอร์ โดยที่หัวฉีดมีเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของหัวฉีด และมีตัวควบคุมอุณหภูมิติดอยู่เพื่อควบคุมอุณหภูมิของหัวฉีดให้คงที่ที่ 100°C โดยในการฉีดสารตัวอย่างเข้าสู่ห้องวัดแก๊สนั้น ต้องใช้เข็มฉีดสารฉีดสารตัวอย่างที่รู้สำหรับฉีดสาร ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบหัวฉีด (Injector)

3.4.3 ห้องวัดแก๊ส (Gas measuring chamber)

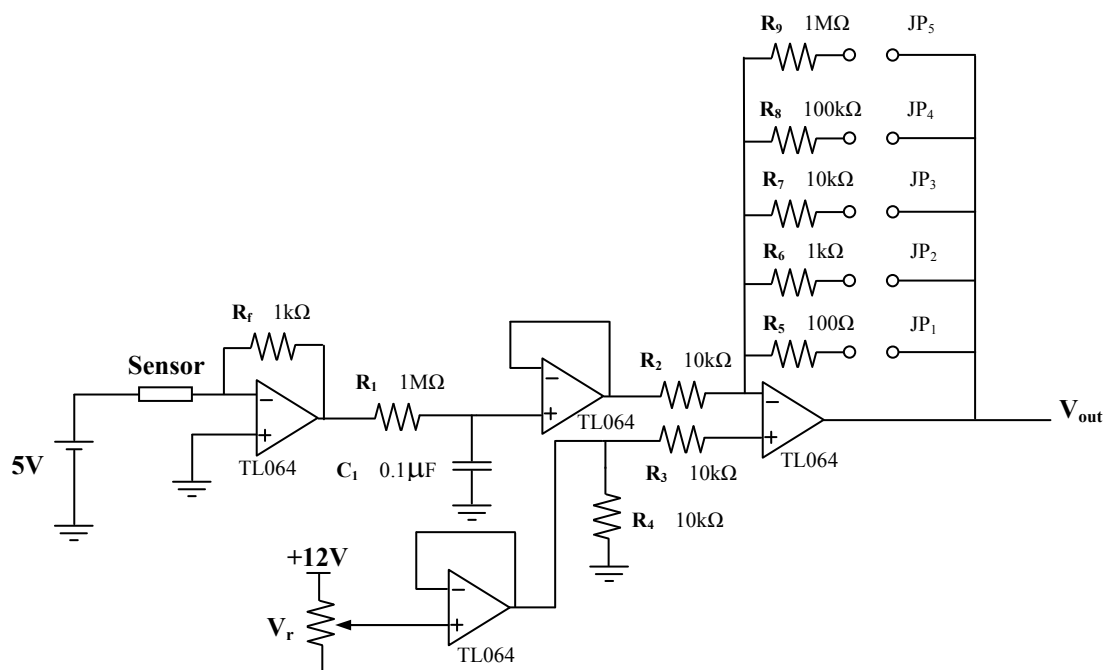
ห้องวัดแก๊สเป็นหน้าที่ใช้ติดตั้งแก๊สเซ็นเซอร์ที่ต้องการศึกษาเป็นระบบปิด โดยห้องวัดแก๊สนี้ออกแบบให้สามารถวัดและศึกษาการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์ได้พร้อมกันคราวละ 6 ตัว โดยติดตั้งหลอดความร้อนเพื่อให้ความร้อนแก่แก๊สเซ็นเซอร์ ไว้ที่ฐานรองรับตัวแก๊สเซ็นเซอร์ และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิขณะทำงานของแก๊สเซ็นเซอร์ ไว้ด้านเดียวกันกับที่วางแก๊สเซ็นเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบต่างๆภายในห้องวัดแก๊ส

3.4.4 วงจรวัด - ขยายสัญญาณ

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการวัดสัญญาณการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์ โดยวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของแก๊สเซ็นเซอร์ เมื่อสัมผัสกับแก๊สดังกล่าว โดยไดอะแกรมของวงจรที่ใช้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งจะช่วยให้ได้สัญญาณขาออก (V_{out}) แปรผันตามค่าความนำไฟฟ้าของแก๊สเซ็นเซอร์ โดยได้เพิ่มวงจรขยายและวงจรปรับค่าเพื่อให้สามารถวัดสัญญาณที่มีขนาดต่ำๆได้



(มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, 2544)

กำหนดให้	V _{out}	คือ	ค่าความต่างศักย์ขาออก
	V _r	คือ	ตัวต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 100 kΩ
	Sensor	คือ	แก๊สเซ็นเซอร์

รูปที่ 3.8 ไลอะแกรมของวงจรวัด - ขยายสัญญาณ

3.4.5 เครื่องประมวลผลและวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

ใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลเพื่อแปลงสัญญาณที่วัดได้จากวงจรวัด ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลและนำสัญญาณที่ได้ส่งเข้าไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและแสดงผลค่าการตอบสนองของแก๊สเซ็นเซอร์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

สำหรับผลการทดลองในหัวข้อวิจัยนี้ ผู้วิจัยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อย 5 ข้อ ดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อน
- 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก
- 4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค
- 4.4 ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะต่อปริมาตร
- 4.5 ผลการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล
- 4.6 ผลการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

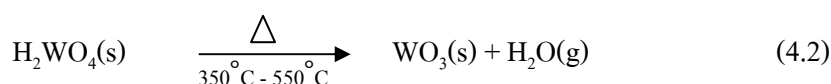
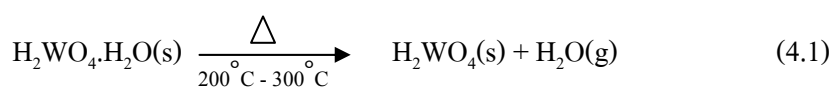
ซึ่งได้แสดงไว้เป็นลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของกรดทังสติก ($\text{H}_2\text{WO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ที่ได้จากการสังเคราะห์ตามสมการ 3.1 และไททาเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ti}(\text{OH})_4$) ที่ได้จากการสังเคราะห์ตามสมการ 3.2 แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปหลังการเผา ทำโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis : TGA) และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆขณะทำการเผา ทำโดยใช้เทคนิคสปอนเทนีสดีฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลอะนาไลซิส (Spontaneous Differential Thermal Analysis : SDTA) Supothina และคณะ (2007) ได้วิเคราะห์ทางความร้อนโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส ของกรดทังสติกที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง แอมโมเนียมทังสเตทกับกรดไนตริก ผลการทดลองพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 3 ช่วงอุณหภูมิคือช่วงที่หนึ่งตั้งแต่อุณหภูมิ 40°C

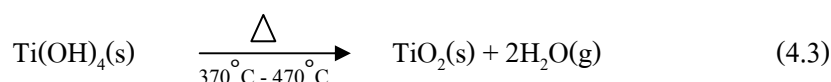
จนถึง 120°C เป็นการระเหยของความชื้นในสาร ช่วงที่สองตั้งแต่อุณหภูมิ 150°C จนถึง 300°C เกิดการสลายตัวของน้ำที่อยู่ในโมเลกุล และช่วงที่สามตั้งแต่อุณหภูมิ 300 จนถึง 400°C เกิดการตกผลึกเป็นทั้งสเดนออกไซด์

ในส่วนของการวิจัยนี้ ใช้วิธีการและสารเคมีตั้งต้นเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Supothina และคณะ (2007) และจากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของกรดทั้งสติก คล้ายกับผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือ สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่หายไป 3 ช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงที่หนึ่งตั้งแต่อุณหภูมิห้อง จนถึง 150°C ช่วงที่สองตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 200 จนถึง 300°C และช่วงที่สามตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 350 จนถึง 500°C ดังแสดงในรูปที่ 4.1(a) ดังนั้นการอธิบายผลจึงอ้างอิงจากงานวิจัยของ Supothina และคณะ (2007) ดังนี้คือ ในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 150°C เป็นการระเหยของความชื้นในสาร สำหรับช่วงอุณหภูมิประมาณ 200 จนถึง 300°C น่าจะเป็นการสลายตัวของน้ำที่อยู่ในโมเลกุล ดังแสดงในสมการ 4.1 และสำหรับช่วงอุณหภูมิประมาณ 350 จนถึง 500°C น่าจะเป็นการสลายตัวของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกและเกิดการตกผลึกเป็นทั้งสเดนออกไซด์ ดังแสดงในสมการ 4.2



การเปลี่ยนแปลงแต่ละขั้นตอนในสมการ 4.1 และ 4.2 มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเกิดขึ้นด้วยคือ เกิดการดูดพลังงานในช่วงที่เกิดการระเหยของความชื้นและการสลายตัวของน้ำในโมเลกุลของสาร และคายพลังงานในช่วงอุณหภูมิประมาณ $350 - 500^{\circ}\text{C}$ อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจากกรดทั้งสติกและเกิดการตกผลึก เป็นทั้งสเดนออกไซด์ (WO_3) ดังแสดงในรูปที่ 4.1(b) และสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500°C ขึ้นไป ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและพลังงานความร้อน แสดงให้เห็นว่าไม่มีการการเปลี่ยนแปลงใดๆในช่วงของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบนี้

ในส่วนของการวิเคราะห์ทางความร้อนของสารไททาเนียมไฮดรอกไซด์ สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่หายไป 2 ช่วงอุณหภูมิ คือช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้อง จนถึง 270°C และ ช่วงอุณหภูมิประมาณ $370 - 470^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.2(a) โดยในช่วงอุณหภูมิห้อง จนถึง 270°C เป็นการระเหยของความชื้นในสาร และที่ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $350 - 500^{\circ}\text{C}$ น่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากไททาเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นไททาเนียมออกไซด์ ดังแสดงในสมการ 4.3

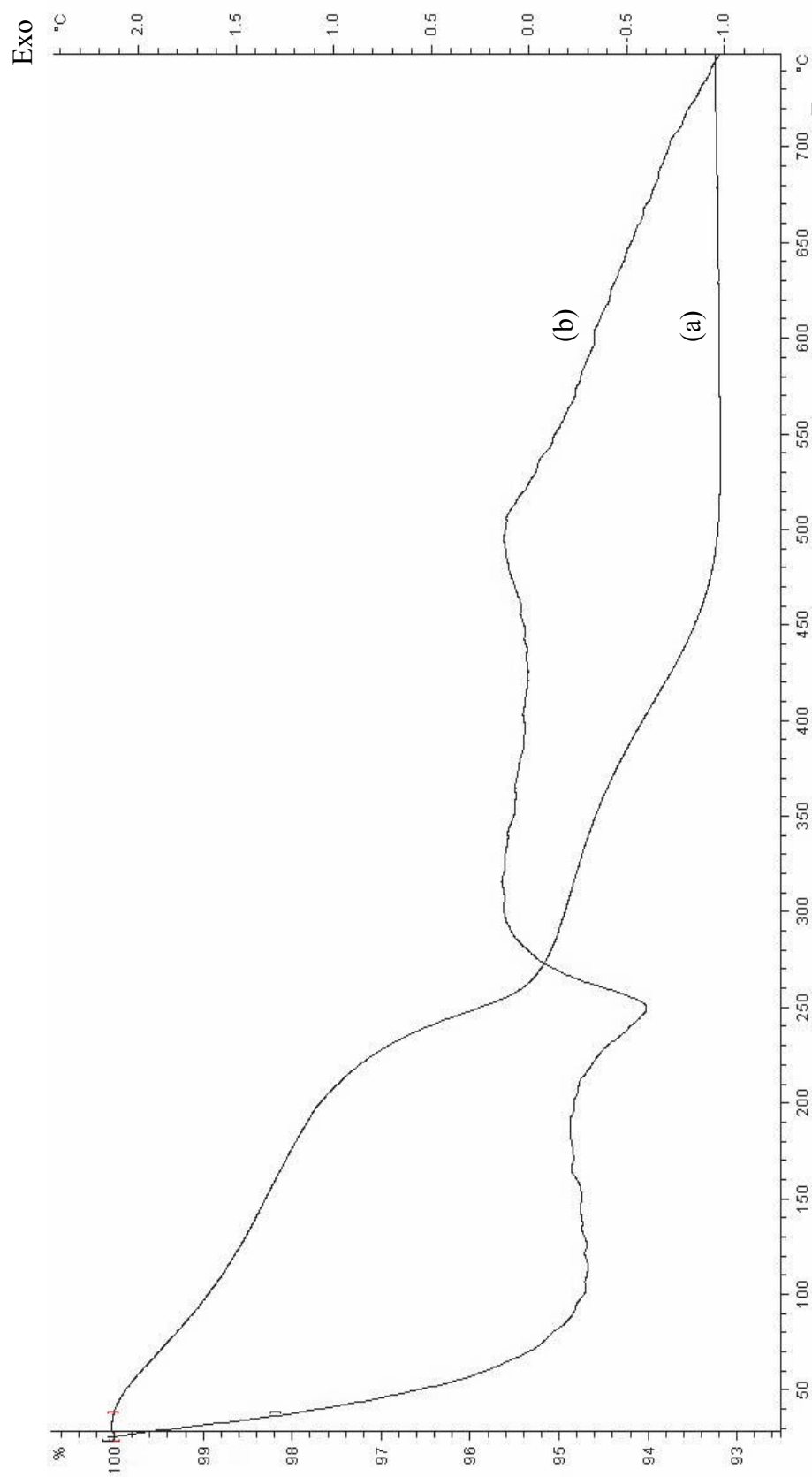


การเปลี่ยนแปลงแต่ละขั้นตอนในสมการที่ 4.3 สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน ที่เกิดการดูดพลังงานในช่วงอุณหภูมิที่เกิดการหายไปของน้ำหนักของสาร และในช่วงอุณหภูมิประมาณ 370 - 470°C น่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของไททาเนียมไฮดรอกไซด์เป็นไททาเนียมออกไซด์ (TiO₂) ดังแสดงในรูปที่ 4.1(b) และสังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 470°C ขึ้นไป ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและพลังงานความร้อน แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในช่วงของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบนี้ ผลการทดสอบทางความร้อนของไททาเนียมไฮดรอกไซด์ นี้ คล้ายกับผลการทดลองของ Li และ Wang (1999) ซึ่งวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของไททาเนียมไฮดรอกไซด์ ที่สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่าง ไททาเนียมคลอไรด์และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนคายความร้อนขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 390°C โดยผู้วิจัยได้อธิบายว่าเนื่องจากการเปลี่ยนไททาเนียมไฮดรอกไซด์กลายมาเป็นไททาเนียมออกไซด์ โดยการปล่อยน้ำ 2 โมเลกุลออกจากโครงสร้าง

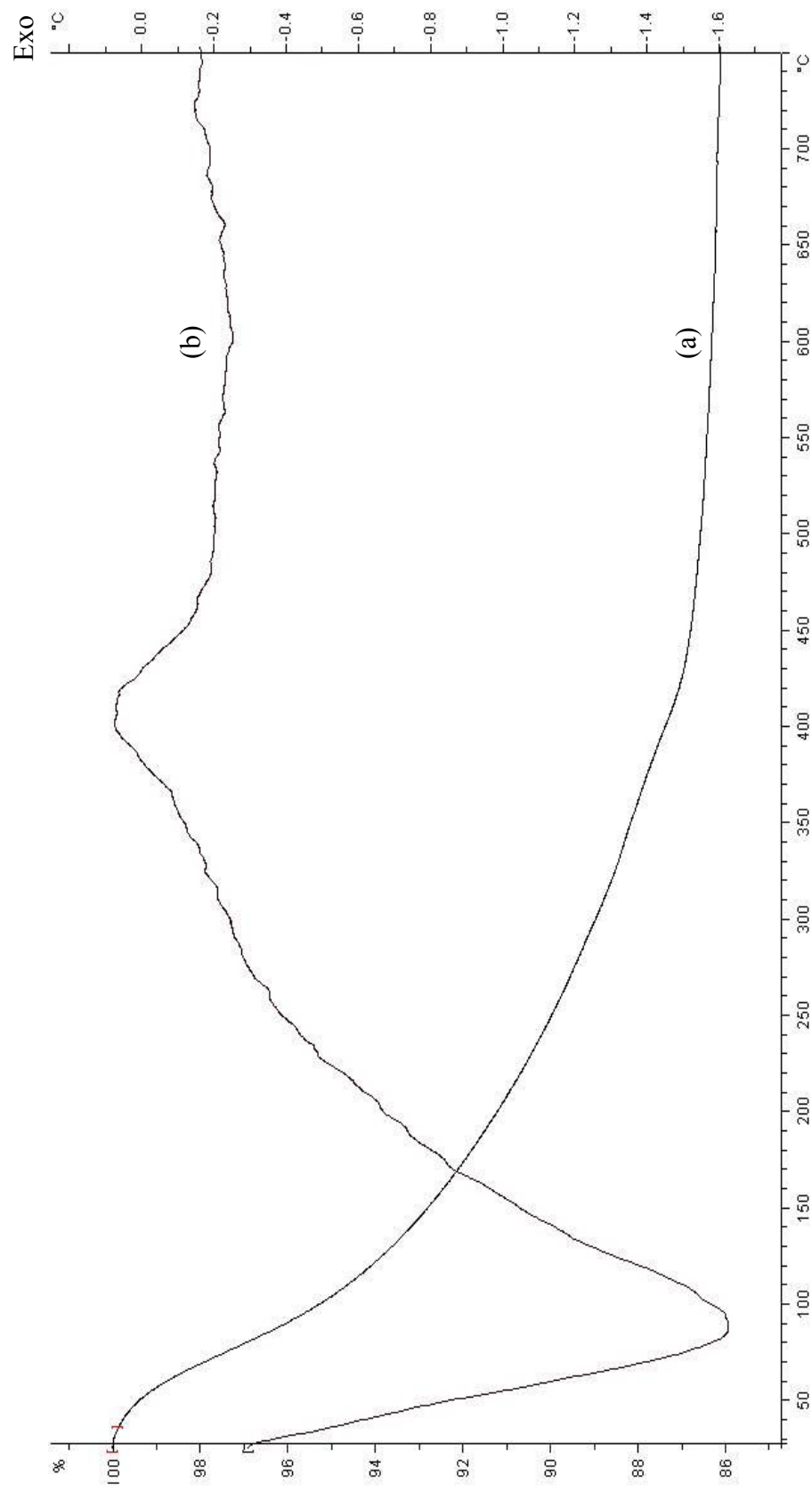
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อศึกษาความเป็นผลึกของทั้งสเดนออกไซด์และไททาเนียมออกไซด์ ที่สังเคราะห์ขึ้นและเผาอบผลึกที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

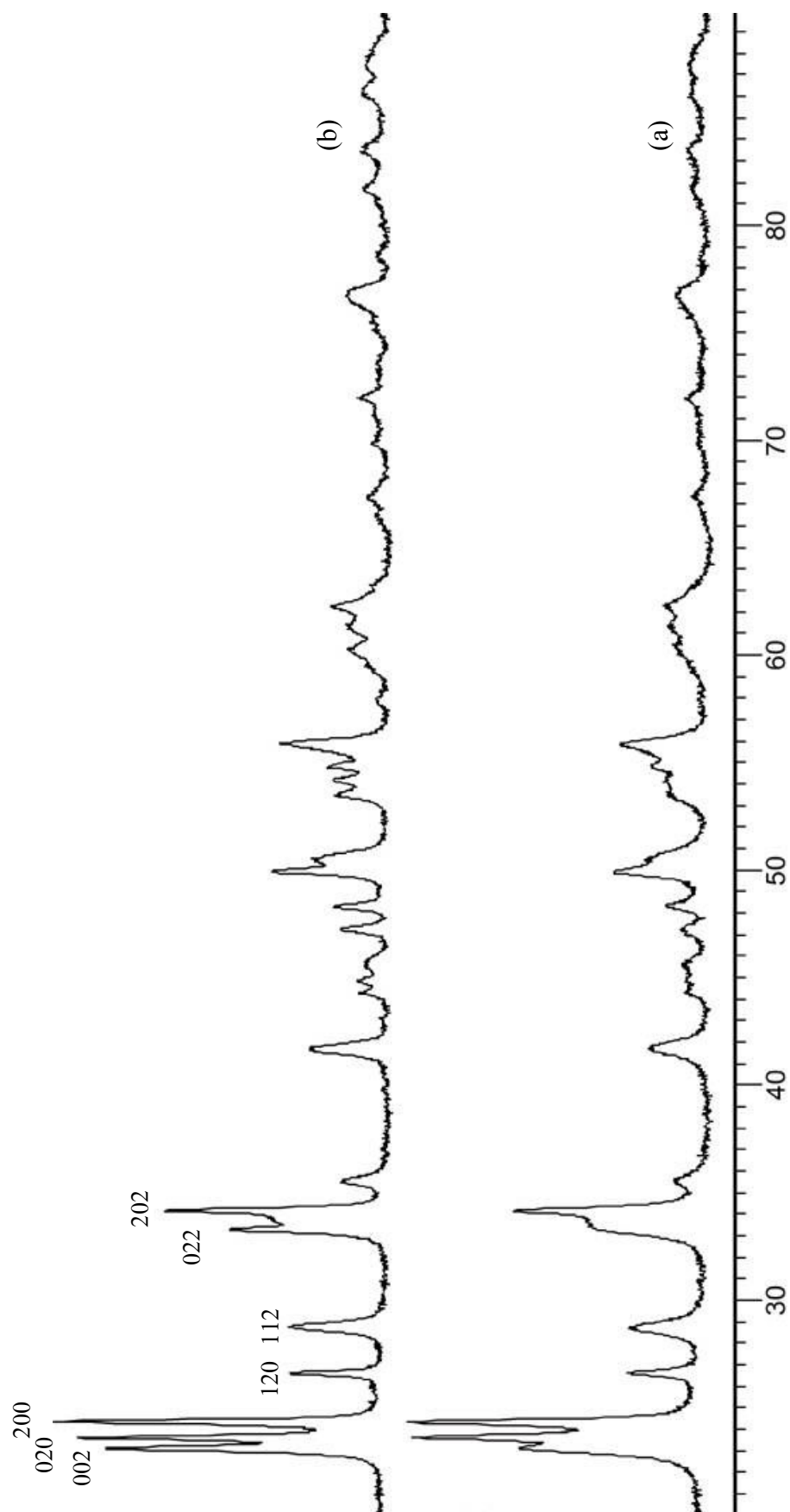
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ระบุว่าทั้งสเดนออกไซด์ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที มีความเป็นผลึกแล้วดังแสดงในรูปที่ 4.3(a) และมีความเป็นผลึกเป็นโมโนคลินิก (มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, 2544 และ Hoel, et al., 2004) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เป็น 600°C เป็นเวลา 30 นาที ลักษณะผลึกมีความชัดเจนมากขึ้นและมีขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3(b) ทำนองเดียวกัน สำหรับไททาเนียมออกไซด์แสดงความเป็นผลึกแล้วเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที มีความเป็นผลึกเป็นอานาเทส (Fang and Chen, 2002 และ Hsiang and Lin, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 4.4(a) และมีความเป็นผลึกชัดเจนมากขึ้นมีขนาดของเกรนที่ใหญ่มากขึ้น เมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น และไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก โดยยังคงเป็นอานาเทสเช่นเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.4(b)และ 4.4(c) ตามลำดับ



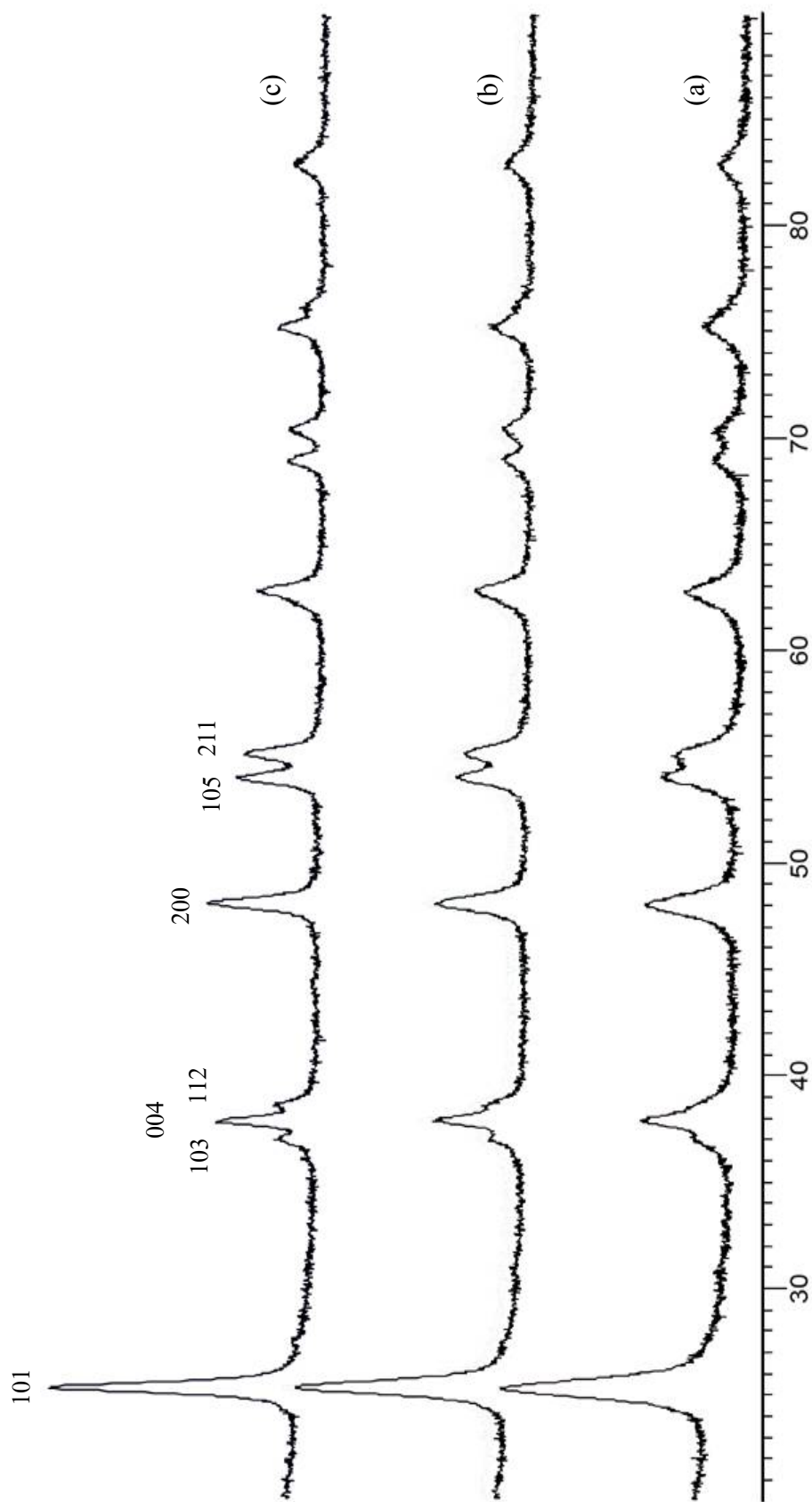
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของกรดฟังก์ติก โดยใช้ (a) เทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราฟิกรวมน้ำหนักที่หายไป (Thermogravimetric Analysis: TGA) (b) เทคนิคสเปกโตรสโกปีเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (Spontaneous Differential Thermal Analysis: SDTA)



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของโพลิอิมไนด์ โดยใช้ (a) เทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราฟิกสำหรับการศึกษาน้ำหนักที่หายไป (Thermogravimetric Analysis: TGA) (b) เทคนิคสปอนเทนเนียลดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์โมการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (Spontaneous Differential Thermal Analysis: SDTA)



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของทั้งสแตมออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยเผาแคลไชน์ที่อุณหภูมิ (a) 500°C และ (b) 600°C เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของโพลิอิมิดที่สังเคราะห์ขึ้น โดยเผาแคลไชนที่อุณหภูมิ (a) 400°C (b) 500°C และ (c) 600°C เป็นเวลา 30 นาที

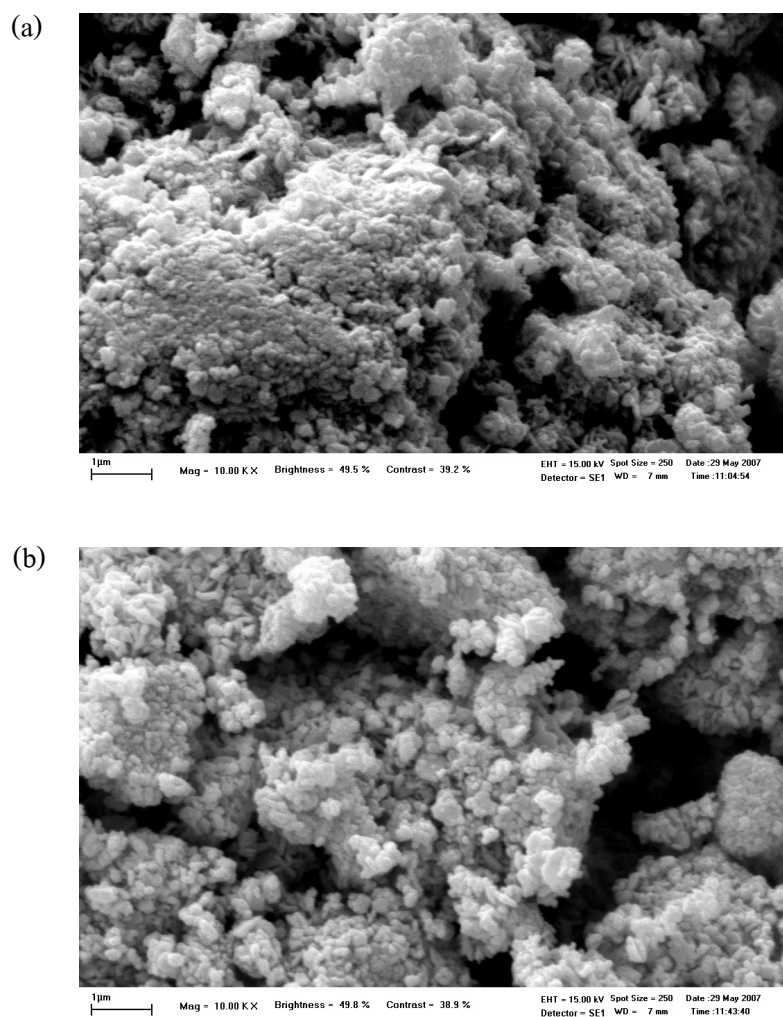
4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค

การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารทั้งสเดนออกไซด์ สารไททาเนียมออกไซด์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ และสารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 600°C ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400°C ที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.5 - 4.7

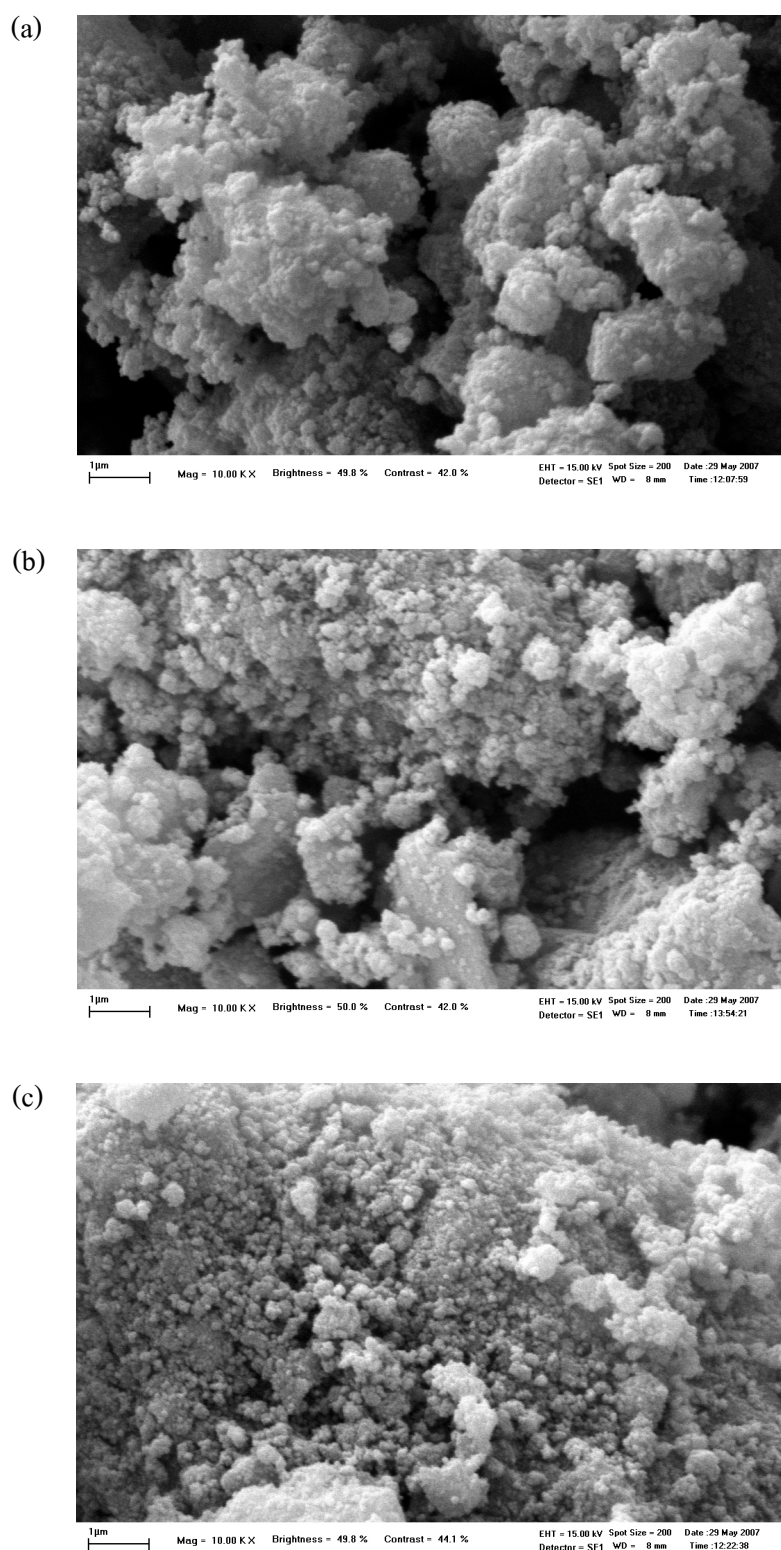
สำหรับทั้งสเดนออกไซด์ ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C และ 600°C เป็นเวลา 30 นาที แสดงในรูปที่ 4.5(a) และ 4.5(b) ตามลำดับ โดยทั้งสองมีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน และอนุภาคปฐมภูมิมีขนาดเล็กกว่า 100 nm ถึงแม้ว่าขนาดอนุภาคในทั้งสองตัวอย่างมีขนาดเล็กและเกาะกันเป็นกลุ่ม ทำให้การวัดขนาดอนุภาคโดยเทคนิค SEM เป็นไปได้ยากแต่สามารถสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ จาก 500°C เป็น 600°C อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย

ไททาเนียมออกไซด์ ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C 500°C และ 600°C เป็นเวลา 30 นาที แสดงในรูปที่ 4.6(a) 4.6(b) และ 4.6(c) ตามลำดับ มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนและขนาดของอนุภาคที่เกาะกันนั้นมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถวัดขนาดของอนุภาคได้ แต่จากการสังเกตพบว่า สารเมื่อผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเป็นลำดับ กล่าวคือสารที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C มีขนาดใหญ่กว่าสารที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C และ 400°C ตามลำดับ

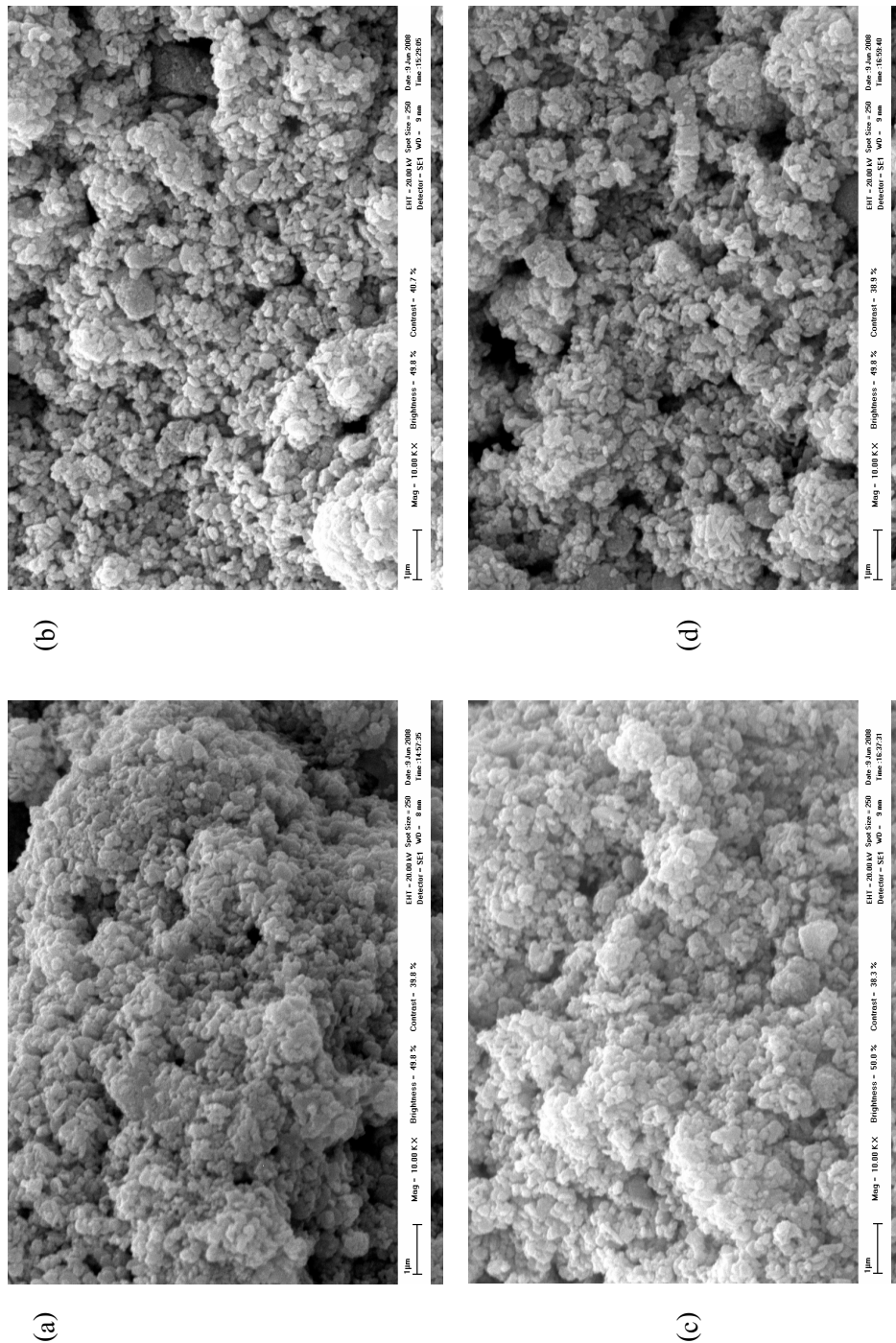
สำหรับสารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 600°C ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400°C ที่อัตราส่วนการผสมเป็น 95:5 92.5:7.5 90:10 และ 87.5:12.5 แสดงในรูปที่ 4.7 (a) - (d) ตามลำดับ สังเกตได้ว่าสารที่ผสมกันในทุกอัตราส่วนนั้นไม่เห็นลักษณะของการเกาะตัวกันเป็นก้อนใหญ่ แต่มีเพียงการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มเล็กๆ



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของทั้งสแตนออกไซด์ ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (a) 500°C (b) 600°C เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไททาเนียมออกไซด์ ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ (a) 400°C (b) 500°C (c) 600°C เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไทเทเนียมออกไซด์
 เพาเคลโซนที่อุณหภูมิ 400°C ที่อัตราส่วนการผสม (a) 95:5 (b) 92.5:7.5 (c) 90:10 และ (d) 87.5:12.5

4.4 ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะต่อปริมาตร

การวัดอัตราส่วนของพื้นที่ผิวน้ำหนักหรือที่เรียกว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของทั้งสแตนออกไซด์และไททานเนียมออกไซด์ โดยใช้เทคนิค BET และขนาดอนุภาคที่คำนวณจากพื้นที่ผิวจำเพาะแสดงตามสมการ 3.3 แสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของทั้งสแตนออกไซด์และไททานเนียมออกไซด์ ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิค BET และขนาดอนุภาคที่คำนวณจากพื้นที่ผิวจำเพาะ

สาร	อุณหภูมิการแคลไซน์ (°C)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ขนาดของอนุภาค (nm)
ทั้งสแตนออกไซด์	500	22.58	36.90
	600	9.61	86.71
ไททานเนียมออกไซด์	400	122.5	12.61
	500	81.02	17.51
	600	56.38	25.16

จากผลการทดลองพบว่าทั้งสแตนออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าไททานเนียมออกไซด์มาก เมื่อคำนวณขนาดอนุภาคจากพื้นที่ผิวจำเพาะตามสมการ 3.3 พบว่า ขนาดอนุภาคของไททานเนียมออกไซด์มีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคของทั้งสแตนออกไซด์ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิเดียวกัน และเป็นที่สังเกตว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ สารทั้งสองมีพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง แสดงให้เห็นว่าสารทั้งสองมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น โดยที่สารทั้งสแตนออกไซด์มีอัตราการโตของอนุภาคสูงกว่าไททานเนียมออกไซด์อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ ขนาดอนุภาคของทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์จากอุณหภูมิ 500°C เป็น 600°C มีอัตราการโตของอนุภาคเป็น 2.3 เท่า ในขณะที่ขนาดอนุภาคของไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์จากอุณหภูมิ 400°C เป็น 500°C และจากอุณหภูมิ 500°C เป็น 600°C มีอัตราการโตของอนุภาคเป็น 1.3 เท่าและ 1.4 เท่า ตามลำดับ

4.5 ผลการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อแก๊สเอทานอล

สำหรับผลการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อแก๊สเอทานอล ได้แบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อย่อยคือ ผลของอุณหภูมิในการทำงานของเซ็นเซอร์ ผลของอุณหภูมิการเผาแคลไชน์ของสารตั้งต้น และผลของอัตราส่วนการผสมสารต่อประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ ซึ่งแสดงไว้เป็นลำดับดังนี้

4.5.1 ผลของอุณหภูมิในการทำงานของเซ็นเซอร์ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ

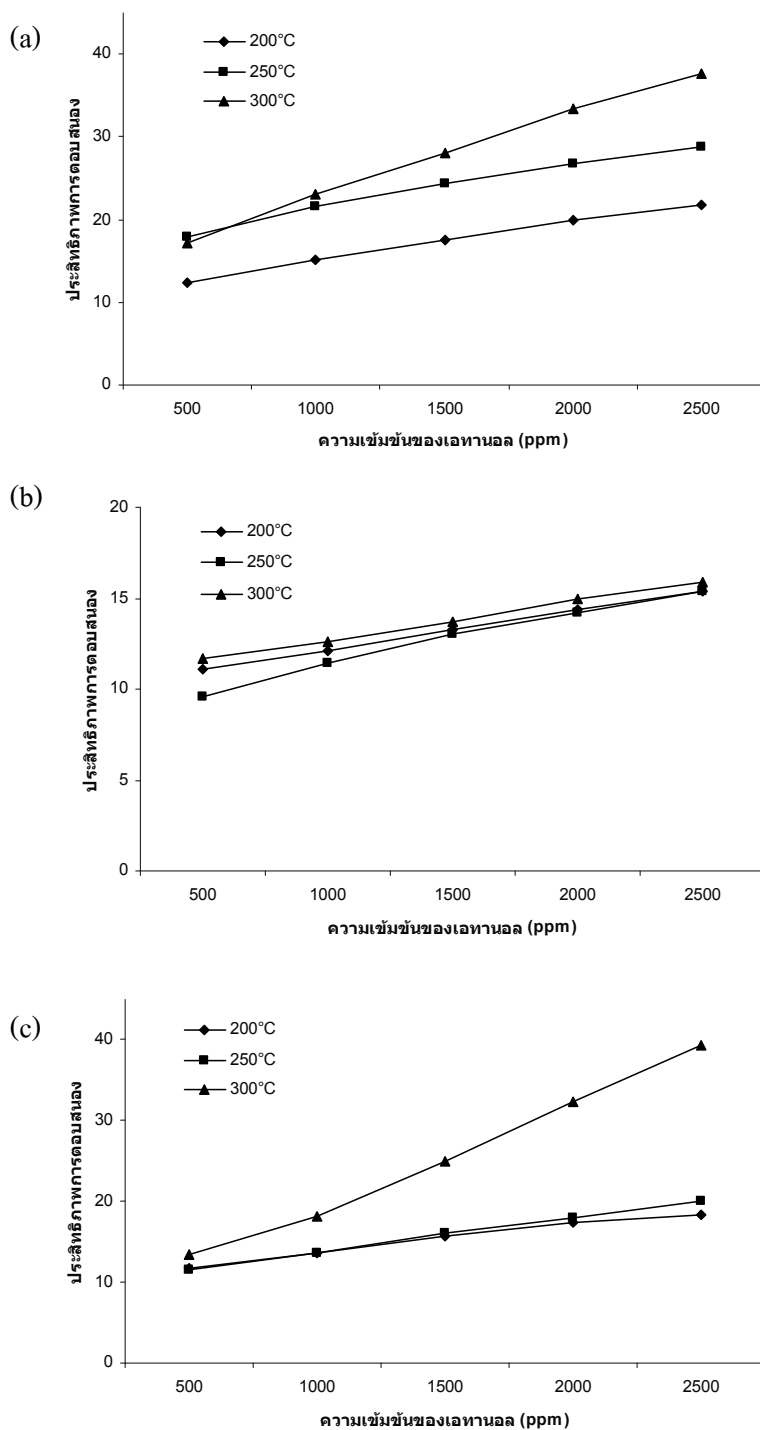
ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในการทำงานของเซ็นเซอร์ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 4 กลุ่ม ตามอัตราส่วนในการผสมสารระหว่างสารทั้งสเดนออกไซด์และสารไททาเนียมออกไซด์ คือกลุ่มของเซ็นเซอร์ที่มีอัตราส่วนของทั้งสเดนออกไซด์ต่อไททาเนียมออกไซด์เป็น 95:5 92.5:7.5 90:10 และ 87.5:12.5 และในแต่ละกลุ่มยังแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยตามอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไชน์สารทั้งสเดนออกไซด์ ซึ่งแสดงผลการทดลองไว้เป็นลำดับดังนี้

ผลการทดลองของกลุ่มที่ 1a กลุ่มที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์กับไททาเนียมออกไซด์เป็น 95:5 และกำหนดให้อุณหภูมิในการเผาแคลไชน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาแคลไชน์ของไททาเนียมออกไซด์เป็น $400 - 600^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปที่ 4.8 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 5W5T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200°C ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มนั้นเป็นแบบเชิงเส้น คือที่ความเข้มข้น 500 ppm มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองประมาณ 12.4 และที่ความเข้มข้น 2500 ppm มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 21.8 สำหรับที่อุณหภูมิ 250°C นั้น พบว่าประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200°C ในทุกช่วงความเข้มข้นของแก๊ส และมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองคล้ายคลึงกับที่อุณหภูมิการทำงาน 200°C กล่าวคือมีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 18.0 - 28.7 และที่อุณหภูมิ 300°C สังเกตเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 500 ppm มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 250°C คือมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 17.1 แต่มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น โดยเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 17.1 - 37.6

เซ็นเซอร์ 5W5T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (b) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่ำสุดและมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนอง 2 ช่วงกล่าวคือ ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 500 - 1500 ppm มีประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 9.6 - 13.0 แต่ในช่วง 1500 - 2500 ppm นั้นการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นมากขึ้น โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 13.0 - 15.4 สำหรับที่อุณหภูมิ 200°C ประสิทธิภาพการตอบสนองมีการเพิ่มที่คงที่ และในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 500 - 2000 ppm นั้นอุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250°C คือมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 11.1 - 15.4 แต่ที่ความเข้มข้น 2500 ppm นั้น มีประสิทธิภาพการตอบสนองเท่ากับที่อุณหภูมิ 250°C คือมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองประมาณ 15.4 สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C โดยมีประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 11.7 - 15.9 และมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่คงที่ตลอดช่วงการวัด

เซ็นเซอร์ 5W5T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (c) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกันในช่วงความเข้มข้นของแก๊สตั้งแต่ 500 - 1500 ppm และเริ่มเห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการตอบสนองเมื่อความเข้มข้นแก๊สเป็น 2000 - 2500 ppm แต่สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C อย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นและมีการเพิ่มมากกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 13.4 - 39.4



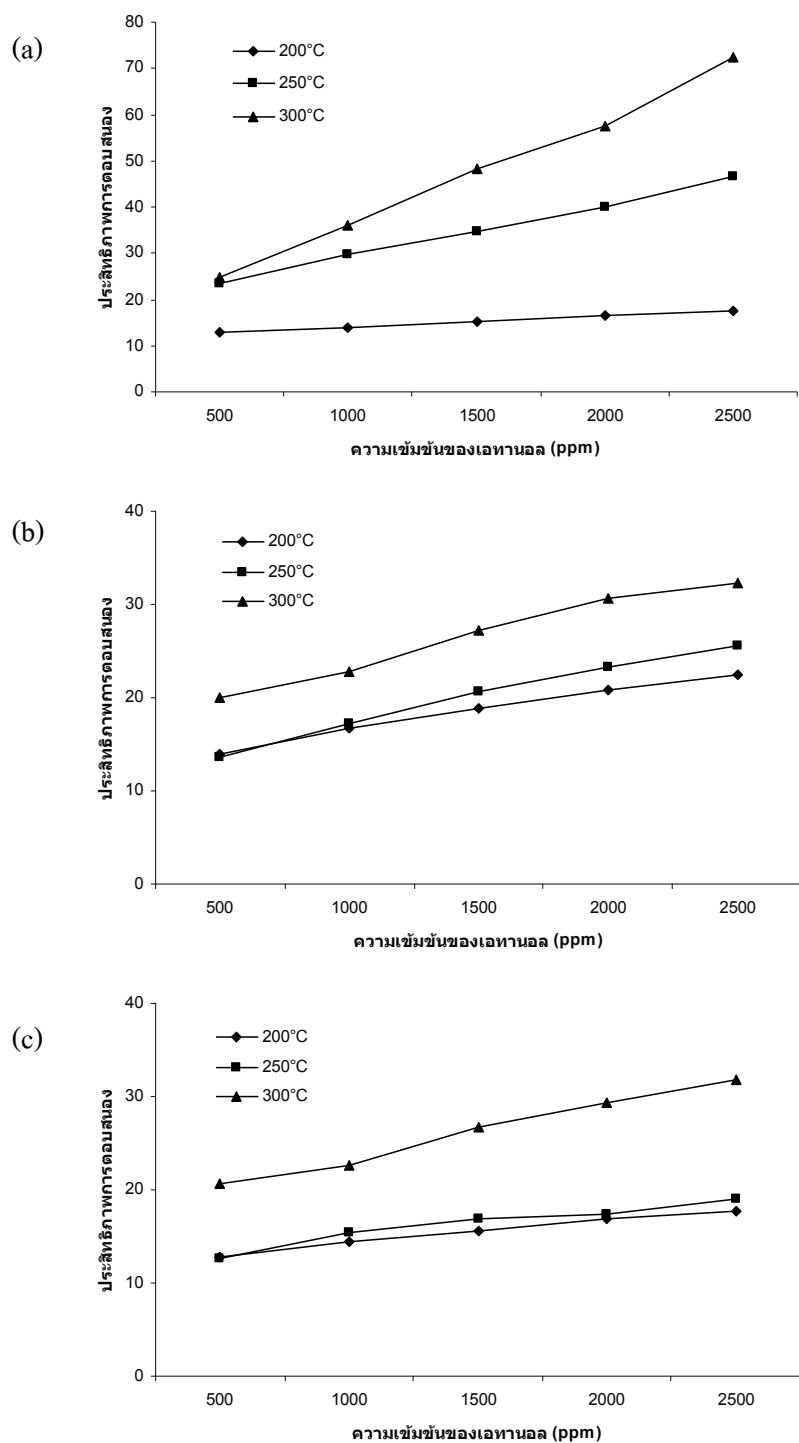
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 5W5T4 (b) 5W5T5 (c) 5W5T6

ผลการทดลองกลุ่มที่ 1b ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เหมือนกับกลุ่มที่ 1a แต่ให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ทั้งสแตนออกไซด์เป็น 600°C แสดงในรูปที่ 4.9 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 5W6T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (a) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200°C มีการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแม้ว่าความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้นก็ตาม สำหรับที่อุณหภูมิ 250°C มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้น และประสิทธิภาพการตอบสนองมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 200°C อย่างชัดเจน โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 23.5 - 46.8 และสำหรับที่อุณหภูมิ 300°C ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 500 ppm นั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 250°C แต่เมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการตอบสนองมีการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 250°C โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 24.8 - 72.6

เซ็นเซอร์ 5W6T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (b) สังเกตได้ว่า ที่ช่วงความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 - 1000 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และเริ่มเห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 1500 - 2500 ppm แต่สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C อย่างชัดเจน แต่การเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองนั้น ไม่คงที่เหมือนกับที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C

เซ็นเซอร์ 5W6T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (c) สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิ 200°C มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้น แต่มีประสิทธิภาพการตอบสนองน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และ 300°C สำหรับที่อุณหภูมิ 250°C ประสิทธิภาพการตอบสนองมีการเพิ่มที่ไม่คงที่ และที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C โดยที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 - 1500 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองมีการเพิ่มที่ไม่คงที่ แต่ที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 1500 - 2500 ppm การเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่สูงขึ้น โดยเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 20.0 - 32.3



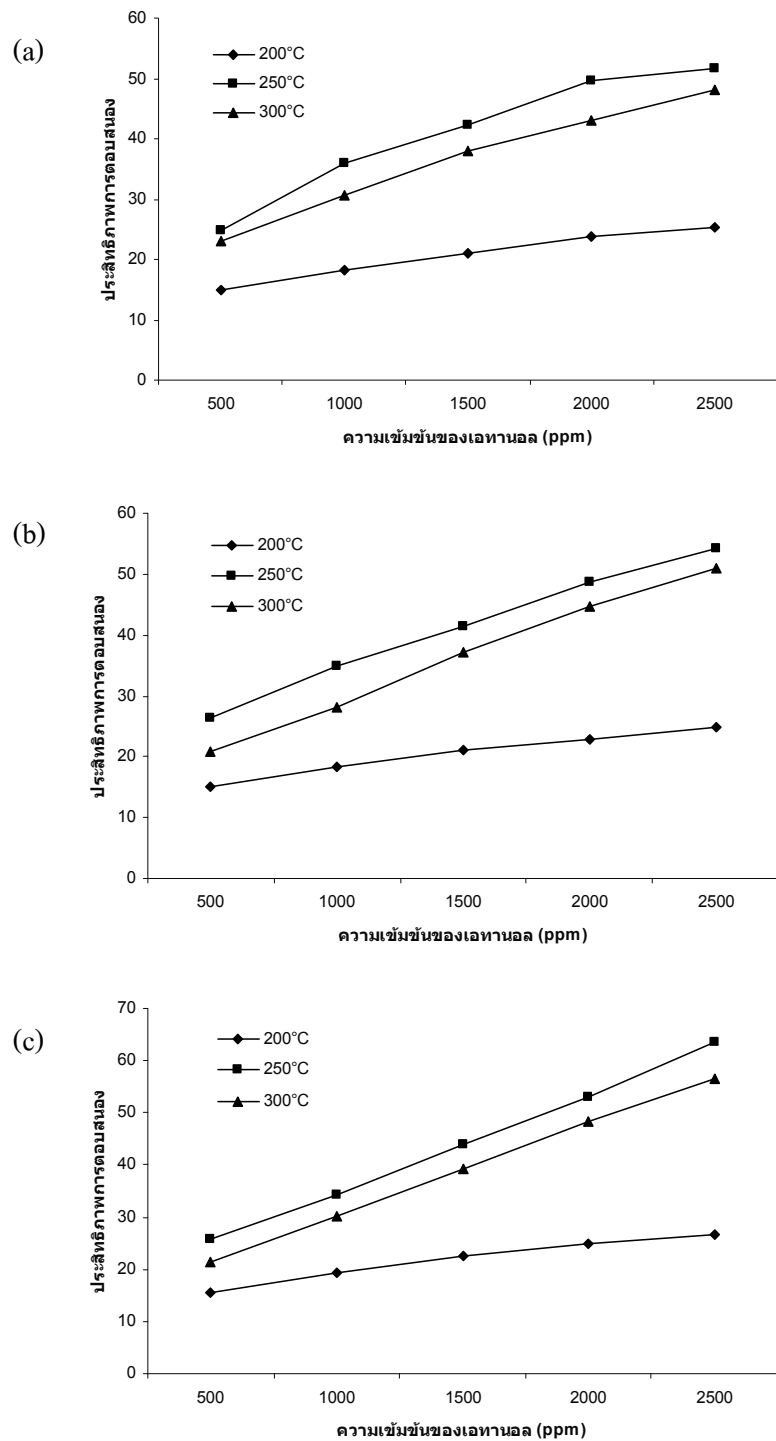
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 5W6T4 (b) 5W6T5 (c) 5W6T6

ผลการทดลองของกลุ่มที่ 2a กลุ่มที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์กับไททานเนียมออกไซด์เป็น 92.5:7.5 และกำหนดให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เป็น $400 - 600^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปแบบที่ 4.10 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 7.5W5T4 ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.10 (a) สังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 300°C และ 200°C ตามลำดับ สำหรับที่อุณหภูมิ 200°C มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองในลักษณะเชิงเส้นแต่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย คือที่ความเข้มข้น 500 ppm มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองประมาณ 14.9 และที่ความเข้มข้น 2500 ppm มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 25.4 สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 200°C แต่มีการเพิ่มมากกว่าที่ทุกค่าความเข้มข้น โดยที่ความเข้มข้น 500 ppm มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองประมาณ 23.0 และที่ความเข้มข้น 2500 ppm มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 48.2 และสำหรับที่อุณหภูมิ 250°C ที่ความเข้มข้น 500 ppm มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 300°C แต่เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมินี้กลับมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 300°C จนกระทั่งที่ความเข้มข้น 2500 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์กลับลดลงเล็กน้อยจนใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 300°C สำหรับประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิ 250°C นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 24.9 - 51.7

เซ็นเซอร์ 7.5W5T5 ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.10 (b) สังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 300°C และ 200°C ตามลำดับ สำหรับที่อุณหภูมิ 200°C มีการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองในลักษณะเชิงเส้นคือมีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้นแต่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิ 200°C นั้นอยู่ระหว่าง 15.1 - 24.9 สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 200°C แต่มีการเพิ่มขึ้นที่มากกว่า ซึ่งที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 20.7 - 51.0 และที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 300°C ตามลำดับ และมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งที่อุณหภูมิ 250°C นั้นมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนอง อยู่ระหว่าง 26.4 - 54.3

เซ็นเซอร์ 7.5W5T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (c) สังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการตอบสนอง ที่อุณหภูมิต่างๆมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนอง ที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 300°C และ 200°C ตามลำดับ สำหรับที่อุณหภูมิ 200°C มีการเพิ่มประสิทธิภาพ การตอบสนองในลักษณะเชิงเส้นคือมีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความ เข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 15.6 - 26.5 สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 200°C แต่ มีการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าและมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 21.3 - 56.6 และที่อุณหภูมิ 250°C พบว่ามีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่เป็นแบบเชิงเส้นเช่นกันและมีค่า ประสิทธิภาพการตอบสนอง อยู่ระหว่าง 25.7 - 63.5



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 7.5W5T4 (b) 7.5W5T5 (c) 7.5W5T6

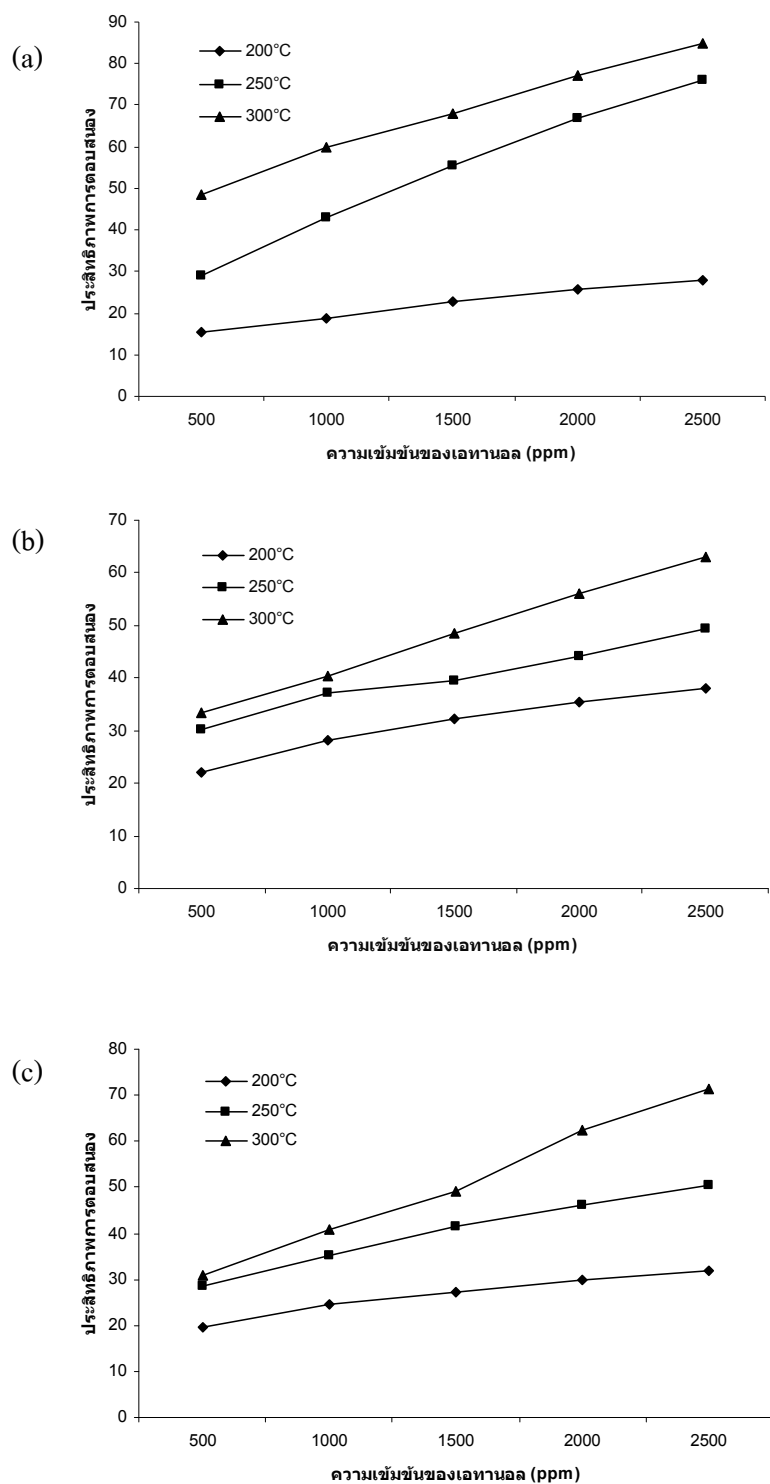
ผลการทดลองกลุ่มที่ 2b ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เหมือนกับกลุ่มที่ 2a แต่ให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C แสดงในรูปที่ 4.11 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 7.5W6T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (a) สังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิต่างๆมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และ 200°C ตามลำดับ และมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นในทุกอุณหภูมิ สำหรับที่อุณหภูมิ 200°C มีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการตอบสนองตามความเข้มข้นของเอทานอลเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการวัดที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 15.6 - 28.0 และที่อุณหภูมิ 250°C นั้นมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นเส้นตรงและมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนกับความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปของเอทานอล โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 29.1 - 76.1 และที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการตอบสนองที่เปลี่ยนไปกับความเข้มข้นชัดเจนเช่นกันแต่มีค่าการตอบสนองในระดับที่ดีกว่า คือมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 48.3 - 85.0

เซ็นเซอร์ 7.5W6T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (b) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นทุกอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และ 200°C ตามลำดับ สำหรับที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 22.2 - 38.0 และที่อุณหภูมิ 250°C ในช่วงความเข้มข้นแก๊สระหว่าง 500 - 1500 ppm นั้นการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองไม่คงที่ แต่ในช่วงความเข้มข้นของแก๊สระหว่าง 1500 - 2500 ppm การเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นไปอย่างคงที่ โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 30.1 - 49.5 และที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นและมีค่าดีกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ ในทุกค่าความเข้มข้นของแก๊ส โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 33.5 - 63.0

เซ็นเซอร์ 7.5W6T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (c) สังเกตได้ว่าที่อุณหภูมิ 200°C มีการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองไม่มากนักเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับเซ็นเซอร์ 7.5W6T4 และ 7.5W6T5 และมีประสิทธิภาพการตอบสนองน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และ 300°C โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 19.1 - 31.9 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 250°C การเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 200°C แต่มีการเพิ่มที่มากกว่า โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 28.6 - 50.5 และที่อุณหภูมิ 300°C ค่าประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์สูงกว่าทั้งอุณหภูมิ 250°C และ 200°C โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 30.9 - 71.4 และสังเกตเห็นว่าที่ความเข้มข้น

ค่าสุดที่ 500 ppm ค่าประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิ 250°C และ 300°C มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันแต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เซ็นเซอร์ที่วัดที่ 300°C มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด



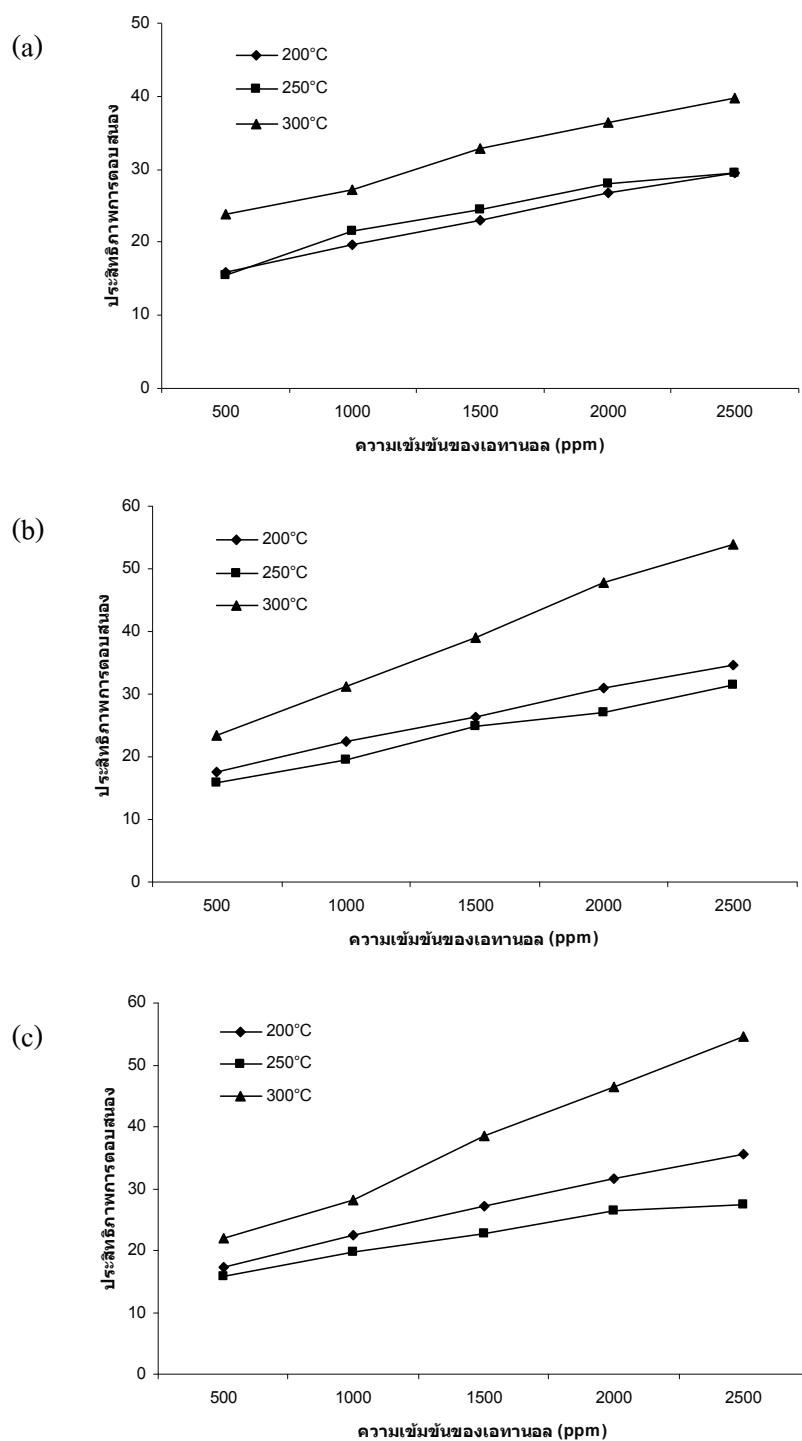
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 7.5W6T4 (b) 7.5W6T5 (c) 7.5W6T6

ผลการทดลองของกลุ่มที่ 3a กลุ่มที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์กับไททานเนียมออกไซด์เป็น 90:10 และกำหนดให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เป็น $400 - 600^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปที่ 4.12 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 10W5T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (a) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิในการวัดค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สของเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และ 200°C ที่ทุกค่าความเข้มข้นของแก๊ส สำหรับที่อุณหภูมิ 200°C ประสิทธิภาพการตอบสนองมีการเพิ่มที่คงที่แบบเชิงเส้นโดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 15.9 - 29.5 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 250°C นั้น มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ไม่คงที่ โดยที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 ppm นั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 200°C แต่ช่วงความเข้มข้นของแก๊สเป็น 1000 - 2000 ppm นั้นประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิ 250°C มากกว่าเล็กน้อย และที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 2500 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองของทั้งสองอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่อุณหภูมิ 200°C และที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 15.5 - 29.5 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 23.7 - 39.7

เซ็นเซอร์ 10W5T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (b) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน และมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นที่ใกล้เคียงกันโดยที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250°C เล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 17.5 - 34.7 และที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 15.7 - 31.3 สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองและการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C อย่างชัดเจนโดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 23.5 - 53.9

เซ็นเซอร์ 10W5T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 (c) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิการทดลองมีการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่ โดยที่ความเข้มข้นของแก๊ส 500 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ทุกตัวมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงความเข้มข้นแก๊สเป็น 1000 - 2500 ppm เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองมากที่สุด มากกว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 22.0 - 54.5 และที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 17.2 - 35.6 และ 15.7 - 27.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 10W5T4 (b) 10W5T5 (c) 10W5T6

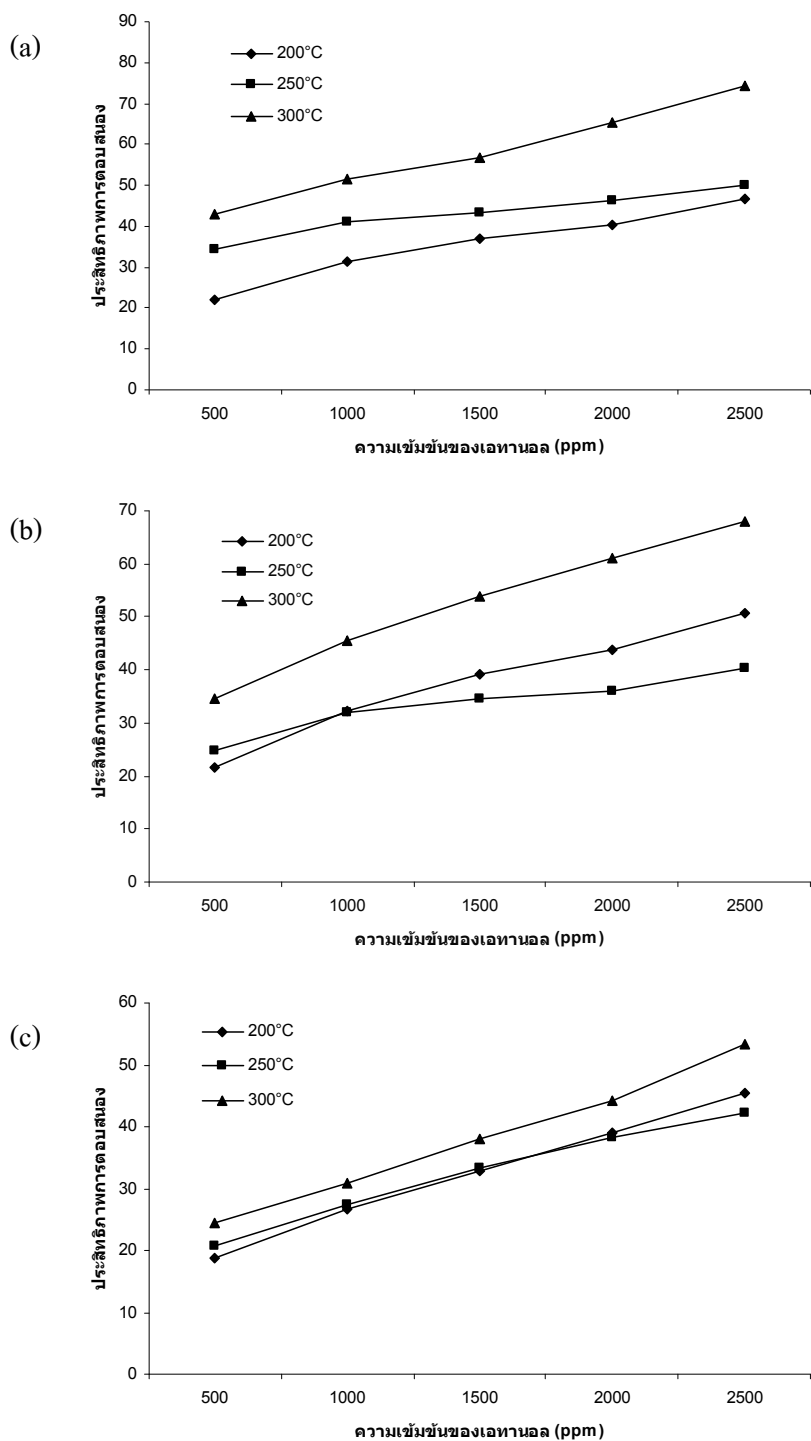
ผลการทดลองกลุ่มที่ 3b ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เหมือนกับกลุ่มที่ 3a แต่ให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C แสดงในรูปที่ 4.13 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 10W6T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (a) สังเกตได้ว่า ค่าประสิทธิภาพการตอบสนองที่แต่ละอุณหภูมิมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่ำกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ ในทุกๆ ความเข้มข้นของแก๊ส โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 21.8 - 46.8 ที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองสูงกว่าที่อุณหภูมิ 200°C ในช่วงความเข้มข้นของแก๊สระหว่าง 500 - 1000 ppm เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่มากกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C อย่างชัดเจนแต่มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 34.4 - 50.0 สำหรับที่อุณหภูมิ 300°C ประสิทธิภาพการตอบสนองที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C ในทุกค่าความเข้มข้นของแก๊สอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 43.0 - 74.3

เซ็นเซอร์ 10W6T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (b) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C เซ็นเซอร์แสดงการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองไม่คงที่ ในช่วงความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 - 1000 ppm นั้นเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C และที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกัน โดยที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเล็กน้อย แต่ในช่วงความเข้มข้นของแก๊สเป็น 1000 - 2500 ppm เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 250°C อย่างเห็นได้ชัด และสำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C ในทุกค่าความเข้มข้นของแก๊ส และมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่ โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 21.7 - 50.6 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 24.7 - 40.3 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 34.5 - 68.0

เซ็นเซอร์ 10W6T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (c) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C เซ็นเซอร์ 10W6T4 มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกัน โดยสังเกตได้ว่าในช่วงความเข้มข้นของแก๊ส 500 - 1500 ppm เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C เล็กน้อย แต่ในช่วงความเข้มข้นของแก๊ส 1500 - 2500 ppm เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C กลับมีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C โดยที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 18.9 - 45.4 และ 20.7 - 42.1 ตามลำดับ สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C ประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C

และ 250°C โดยที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 ppm มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเช่นเซอร์ที่วัดที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าอย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 24.4 - 53.3



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 10W6T4 (b) 10W6T5 (c) 10W6T6

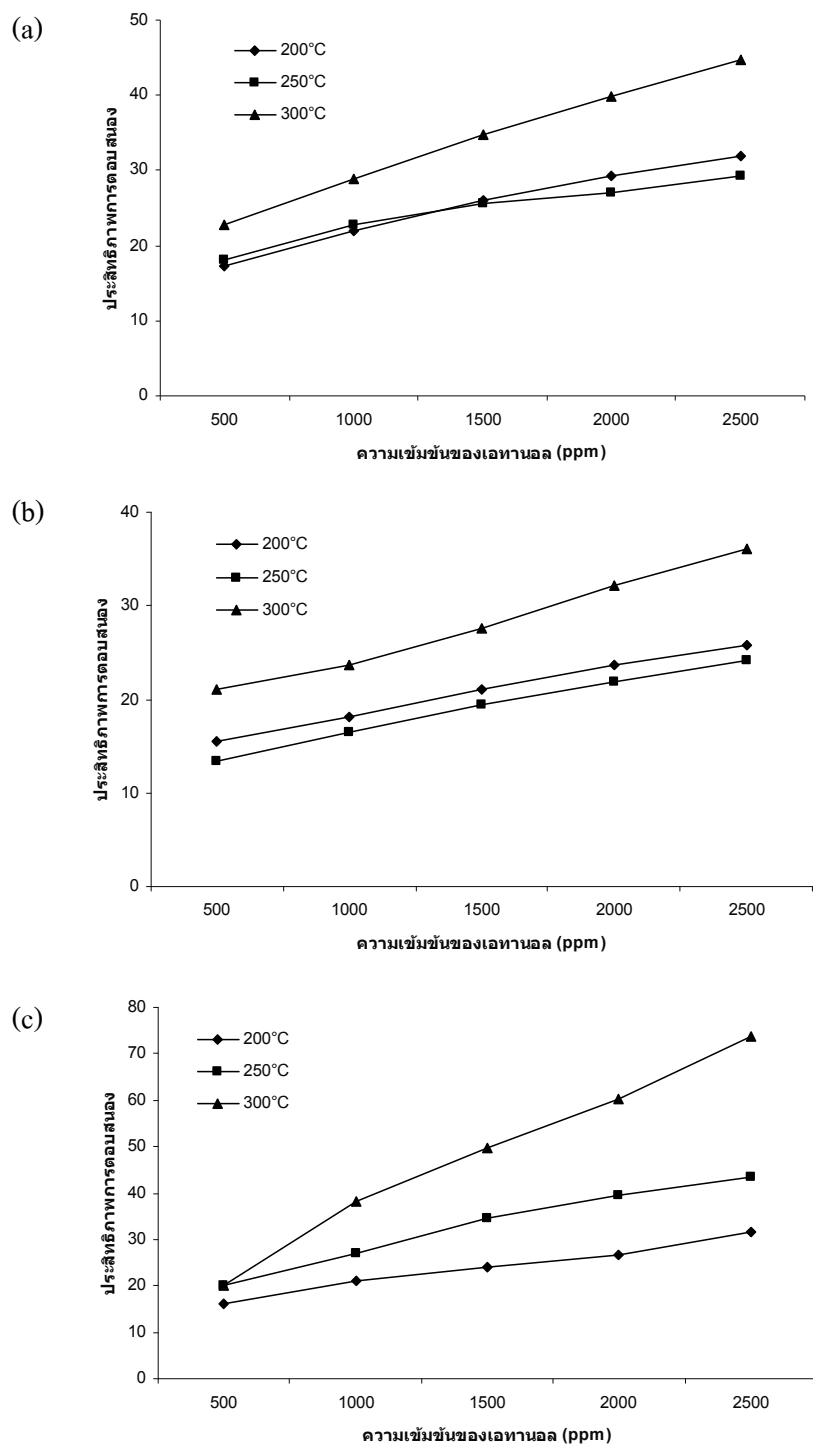
ผลการทดลองของกลุ่มที่ 4a กลุ่มที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์กับไททานเนียมออกไซด์เป็น 87.5:12.5 และกำหนดให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เป็น 400 - 600°C แสดงในรูปที่ 4.14 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 12.5W5T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (a) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงความเข้มข้นของแก๊ส 500 - 1500 ppm นั้น เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200°C เล็กน้อย แต่ในช่วงความเข้มข้นของแก๊ส 1500 - 2500 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C กลับน้อยกว่าที่ อุณหภูมิ 200°C เล็กน้อย แต่สำหรับประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C ดีกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และ 200°C ในทุกช่วงความเข้มข้นของแก๊สค่อนข้างชัดเจน โดยที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 ppm นั้น เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองสูงกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และ 200°C เล็กน้อยแต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เซ็นเซอร์ที่วัดที่ 300°C มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มข้นสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 22.7 - 44.8

เซ็นเซอร์ 12.5W5T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (b) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่ อุณหภูมิ 250°C เล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 13.4 - 24.2 ที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 15.5 - 25.8 สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C นั้นสังเกตเห็นว่าที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 ppm นั้น เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 200°C แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เซ็นเซอร์ที่วัดที่ 300°C มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 21.1 - 36.0

เซ็นเซอร์ 12.5W5T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (c) สังเกตได้ว่า มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์ 12.5W5T5 (รูปที่ 4.13 (b)) กล่าวคือเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่ อุณหภูมิ 250°C เล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 16.2 - 31.6 ที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 20.0 - 43.4 สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C นั้น

สังเกตเห็นว่าที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 ppm นั้น เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 200°C แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เซ็นเซอร์ที่วัดที่ 300°C มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 20.1 - 73.7



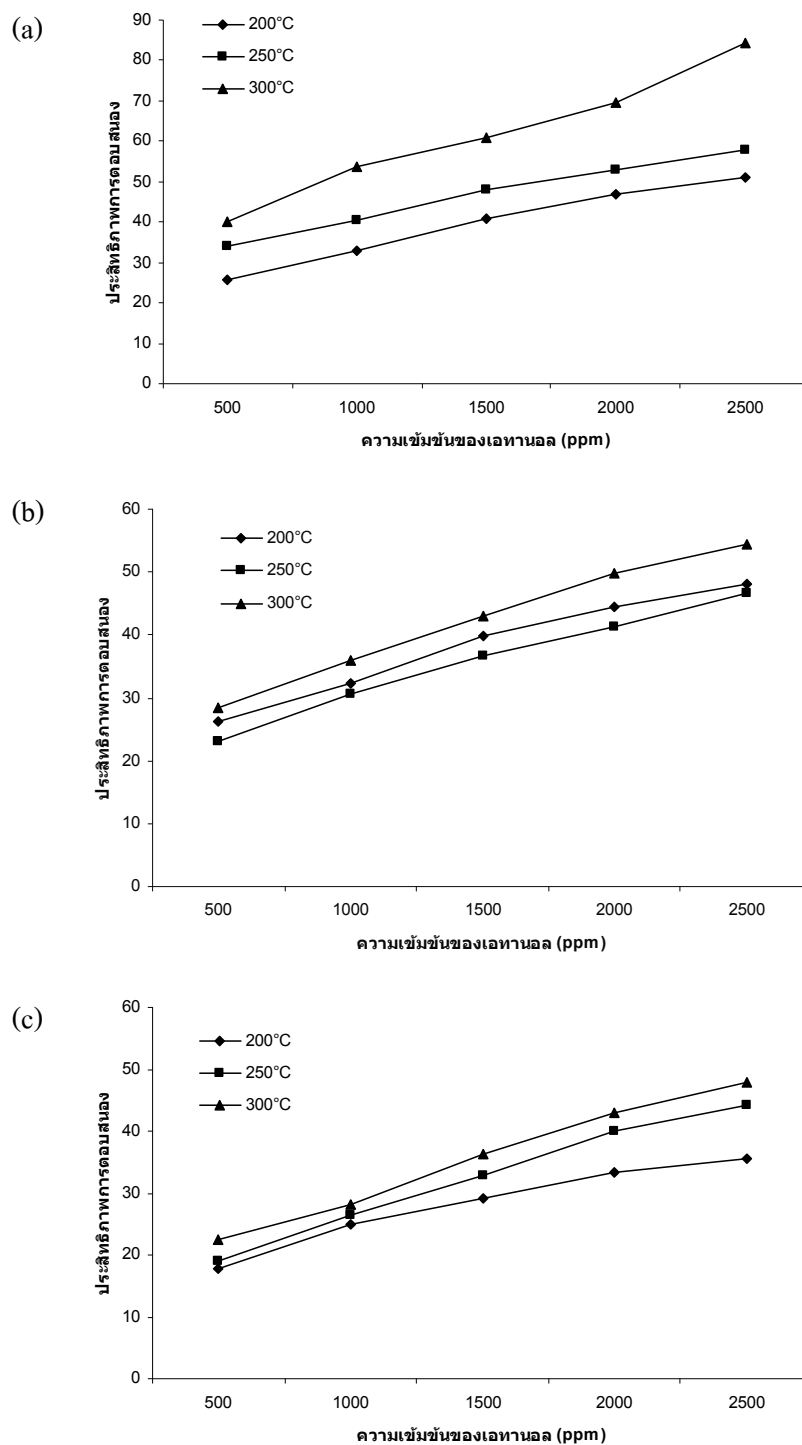
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 12.5W5T4 (b) 12.5W5T5 (c) 12.5W5T6

ผลการทดลองกลุ่มที่ 4b ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เหมือนกับกลุ่มที่ 4a แต่ให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C แสดงในรูปที่ 4.15 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 12.5W6T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (a) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200°C เล็กน้อยในทุกค่าความเข้มข้นของแก๊ส โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 25.9 - 51.0 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 34.0 - 57.7 สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C นั้นสังเกตเห็นว่าที่ความเข้มข้นของแก๊สเป็น 500 - 1000 ppm นั้น เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 250°C แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เซ็นเซอร์ที่วัดที่ 300°C มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด และมีการเพิ่มไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 40.0 - 84.3

เซ็นเซอร์ 12.5W6T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (b) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ที่ทุกอุณหภูมิมีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่เป็นเชิงเส้น และที่แต่ละอุณหภูมิประสิทธิภาพการตอบสนองมีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนที่ทุกความเข้มข้น โดยผลการวัดที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองสูงกว่าการวัดที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 28.3 - 54.5 ที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 26.3 - 48.2 และที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 23.0 - 46.6

เซ็นเซอร์ 12.5W6T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (c) สังเกตได้ว่า ที่ช่วงความเข้มข้นของแก๊ส 500 - 1000 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์มีค่าใกล้เคียงกันทุกอุณหภูมิในการวัด โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และ 200°C เล็กน้อยตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้นสังเกตเห็นว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ลดลง ซึ่งแตกต่างจากเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C และ 300°C ที่มีการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่คงที่ โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 17.7 - 35.4 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 19.0 - 44.2 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 22.5 - 47.9



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 12.5W6T4 (b) 12.5W6T5 (c) 12.5W6T6

จากการทดลองผลของอุณหภูมิในการทำงานของเซ็นเซอร์ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลดีกว่าที่อุณหภูมิ 200°C และ 250°C ซึ่งหากพิจารณาแนวโน้มของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลแล้วนั้น สังเกตได้ว่าประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าถ้าเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองมากขึ้นประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลน่าจะดีขึ้น โดยที่แก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองได้ดีที่อุณหภูมิ 300°C นั้นน่าจะเกิดจากผลของอุณหภูมิในการทดลอง ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.4.3 คือ ช่วงอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิประมาณ 300°C มีไอน้ำมาเกาะอยู่รอบๆอนุภาคของสารรวมถึงออกซิเจนที่ถูกดูดซับที่บริเวณผิวของอนุภาคของสารที่อยู่ในรูปของออกซิเจนไอออนดังสมการ 2.4 ซึ่งทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารจึงมีค่าต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อนกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า เช่น ชั้นพลังงานตัวให้ (Donor level) หรือ ระดับชั้นวาเลนซ์ (Valance band) โดคข้ามขึ้นสู่ชั้นตัวนำ (Conduction band) (Tianshu, et al., 1999) จนถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งที่อิเล็กตรอนกระโดดข้ามสู่ชั้นตัวนำอย่างสมบูรณ์ แต่จากการศึกษาของ มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544) ซึ่งทำการทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้นตั้งแต่ 0.001 - 100% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ $150 - 400^{\circ}\text{C}$ ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีตกตะกอน พบว่าเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิ 250°C ดีกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ นอกจากนี้จากการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลด้วยแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์ ที่อุณหภูมิ $250\ 300$ และ 350°C ของ Ivanov และคณะ (2004) พบว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C ให้ประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 350°C ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประมาณ 9 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นและอุณหภูมิการทำงานต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล สามารถสรุปได้ดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นและอุณหภูมิการทำงานต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล

แก๊สเซ็นเซอร์	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น	ประสิทธิภาพ การตอบสนอง	เอกสารอ้างอิง
WO ₃ (ตกตะกอน)	250	1%	10	มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544)
WO ₃ (ตกตะกอน)	300	1000 ppm	9	Ivanov และคณะ (2004)
WO ₃ + TiO ₂ (ผสม 90:10)	160	1000 ppm	21.6	Gopal Reddy และคณะ (2003)
WO ₃ + TiO ₂ (ผสม 92.5:7.5)	300	1000 ppm	59.84	งานวิจัยนี้

จากตารางที่ 4.2 และจากการทดลองของ มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544) กับ Ivanov และคณะ (2004) สังเกตได้ว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์เพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง คือ ที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C ตามลำดับ แต่ในรายงานของ Gopal Reddy และคณะ (2003) ที่มีการผสมสารไททาเนียมออกไซด์ลงในสารทังสเตนออกไซด์แล้วจึงเผาแคลไซน์ พบว่าเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า และมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่สูงกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทังสเตนออกไซด์เพียงอย่างเดียว แต่เมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้ที่ได้ทำการเผาแคลไซน์สารทั้งสองก่อนทำการผสมกัน มีอุณหภูมิการทำงานที่สูงกว่าแต่มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีกว่า

จากผลการทดลองข้างต้นและการทบทวนเอกสาร อาจเป็นไปได้ว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากการนำไททาเนียมออกไซด์ผสมกับทังสเตนออกไซด์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์แล้ว มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์เพียงอย่างเดียว สำหรับผลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของสารตั้งต้นต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

4.5.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของสารตั้งต้นต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.5.1 เรื่อง ผลของอุณหภูมิในการทำงานของเซ็นเซอร์ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล แสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ส่วนใหญ่ตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่อุณหภูมิ 300°C และมีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเอทานอลเพิ่มขึ้น และดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อความสำคัญและที่มาของปัญหา ในบทที่ 1 ว่าปริมาณแอลกอฮอล์ของผู้ขับขี่ยานพาหนะต้องมีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มิลลิกรัมเปอร์เซ็นต์หรือประมาณ 500 ppm ดังนั้นในหัวข้อ 4.5.2 นี้ การทดลองเรื่องผลของอุณหภูมิในการเคลือบสารตั้งต้น จึงกำหนดให้อุณหภูมิของเซ็นเซอร์อยู่ที่ 300°C และความเข้มข้นของแก๊สเอทานอลที่ 500 ppm โดยผลการทดลองในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C และไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C ตามลำดับ โดยให้อัตราส่วนการผสมระหว่างสารทั้งสแตนออกไซด์ต่อสารไททาเนียมออกไซด์เป็น 95:5 92.5:7.5 90:10 และ 87.5:12.5 และได้ผลการทดลองดังนี้

ที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 95:5 แสดงในรูปที่ 4.16a สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C อย่างชัดเจน และเซ็นเซอร์ทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันคือ เซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C เล็กน้อย และเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน

ที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 92.5:7.5 แสดงในรูปที่ 4.16b สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C อย่างชัดเจน โดยเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองไม่แตกต่างกันมากแม้ว่าจะผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิใดก็ตาม แต่สำหรับเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C มีแนวโน้มประสิทธิภาพการตอบสนองที่ลดลงเมื่อผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิสูงขึ้น

ที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 90:10 แสดงในรูปที่ 4.16c สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C อย่างชัดเจน โดยเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองไม่

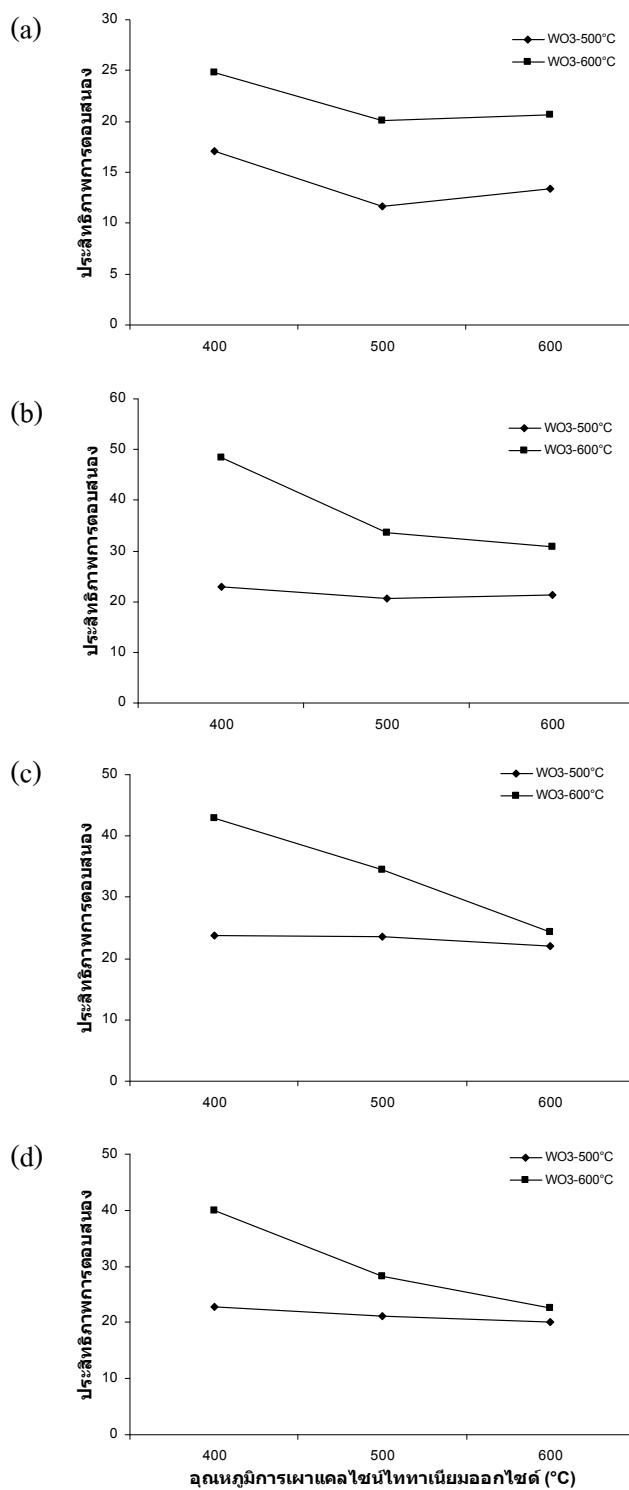
แตกต่างกันมากแม้ว่าจะผสมด้วยไททานเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิใดก็ตาม แต่สำหรับ เซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C มีแนวโน้มประสิทธิภาพการตอบสนองที่ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อผสมด้วยไททานเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิสูงขึ้น

ที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 87.5:12.5 แสดงในรูปที่ 4.16d สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองคล้ายคลึงกับเซ็นเซอร์ที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 90:10 คือเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองไม่แตกต่างกันมากแม้ว่าจะผสมด้วยไททานเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิใดก็ตาม แต่สำหรับเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C มีแนวโน้มประสิทธิภาพการตอบสนองที่ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อผสมด้วยไททานเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิสูงขึ้น

จากผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น เซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารที่เผาที่อุณหภูมิในการเคลือบต่างกัน มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ต่างกันด้วย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองโดยให้อุณหภูมิในการเผาเคลือบของทังสเตนออกไซด์คงที่ สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C หากพิจารณาจากหัวข้อ 4.4 แสดงถึงผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่ 500°C มีพื้นที่ผิวจำเพาะเป็น $22.58 \text{ m}^2/\text{g}$ และทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่ 600°C มีพื้นที่ผิวจำเพาะเป็น $9.61 \text{ m}^2/\text{g}$ และจากรายงานของ มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ดังนั้นจากการทดลองดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นเซ็นเซอร์ที่ผสมทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่ 500°C ควรจะมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบที่ 600°C แต่จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงในหัวข้อ 4.2 เห็นได้ว่า ทังสเตนออกไซด์มีความเป็นผลึกตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 500°C เมื่อพิจารณาจากสเปกตรัมที่เกิดขึ้นแล้วนั้น สังเกตได้ว่ายอดของระนาบ (002) ของสารทังสเตนออกไซด์ที่เผาเคลือบที่ 500°C มีความเข้มค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเคลือบเป็น 600°C พบว่า พีกแรก (002) นั้นมีความเข้มเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งจากผลการทดลองนี้อาจเป็นไปได้ว่าการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาทีนั้น กรดทั้งสติกยังเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารทังสเตนออกไซด์ยังไม่สมบูรณ์ อาจยังเหลือส่วนที่เป็นกรดทั้งสติกอยู่ แต่เมื่อเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 30 นาที กรดทั้งสติกเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารทังสเตนออกไซด์ที่สมบูรณ์กว่าการเผาเคลือบที่ 500°C จึงส่งผลให้เซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทังสเตนออกไซด์เผาเคลือบ

ไชน์ที่ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทั้งสเดนออกไซด์เผาเคลไชน์ที่ 500°C และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตอบสนองโดยให้อุณหภูมิในการเผาเคลไชน์ของสารไททานเนียมออกไซด์คงที่ สังเกตได้ว่าที่ทุกอัตราส่วนการผสมสาร แก๊สเซ็นเซอร์มีแนวโน้มเดียวกันคือมีประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาเคลไชน์สารเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือแก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารไททานเนียมออกไซด์เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิการเผาเคลไชน์ 500 และ 600°C ซึ่งเป็นเพราะว่าขนาดของอนุภาคของไททานเนียมออกไซด์เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400°C เล็กกว่าที่อุณหภูมิการเผาเคลไชน์ 500 และ 600°C หรือพื้นที่ผิวจำเพาะของไททานเนียมออกไซด์เผาเคลไชน์ที่ 400°C มีมากกว่าที่ 500 และ 600°C จึงทำให้แก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยไททานเนียมออกไซด์เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีกว่าการเผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น

จากผลการทดลองเรื่องผลของอุณหภูมิในการเผาเคลไชน์ของสารตั้งต้นต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสรุปได้ว่า แก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์เผาเคลไชน์ที่ 600°C ผสมกับไททานเนียมออกไซด์เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทั้งสเดนออกไซด์กับไททานเนียมออกไซด์เผาเคลไชน์ที่อุณหภูมิอื่นๆ และสำหรับผลของอัตราส่วนการผสมสารต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทังสเตนออกไซด์ ต่อไททาเนียมออกไซด์ เป็น (a) 95:5 (b) 92.5:7.5 (c) 90:10 และ (d) 87.5:12.5 ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ ของไททาเนียมออกไซด์ต่างๆ

4.5.3 ผลของอัตราส่วนการผสมสารต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล

ในหัวข้อ 4.5.3 นี้ การทดลองเรื่องผลของอัตราส่วนการผสมสารต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล กำหนดให้อุณหภูมิของเซ็นเซอร์คงที่ ที่ 300°C ความเข้มข้นของแก๊สเอทานอลที่ 500 ppm เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.5.2 โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกให้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารไททาเนียมออกไซด์คงที่ ที่ 400°C 500°C และ 600°C ผสมกับทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C และ 600°C ตามลำดับ และกลุ่มที่สองให้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์คงที่ ที่ 500°C และ 600°C ผสมกับไททาเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400°C 500°C และ 600°C ตามลำดับ ผลการทดลองเป็นดังนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มให้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารไททาเนียมออกไซด์คงที่ ที่ 400°C (กลุ่ม 1a) 500°C (กลุ่ม 1b) และ 600°C (กลุ่ม 1c) ผสมกับทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C และ 600°C ตามลำดับ

กลุ่ม 1a ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารไททาเนียมออกไซด์เป็น 400°C (รูปที่ 4.17) พบว่า เมื่ออุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 500°C ค่าประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่ไม่ว่าอัตราส่วนของไททาเนียมออกไซด์เป็นเท่าไรก็ตาม โดยประสิทธิภาพการตอบสนองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนการผสมเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 7.5% และมีแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนของไททาเนียมออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์เป็น 600°C พบว่าค่าประสิทธิภาพการตอบสนองสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนการผสมของไททาเนียมออกไซด์เพิ่มจาก 5 เป็น 7.5% แล้วจึงลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมของไททาเนียมออกไซด์เป็น 10% จากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ที่อัตราส่วนการผสมเป็น 12.5%

กลุ่ม 1b ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารไททาเนียมออกไซด์เป็น 500°C (รูปที่ 4.18) พบว่า อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 500°C มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลคล้ายคลึงกับอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 600°C โดยมีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนการผสมสารไททาเนียมออกไซด์จาก 5 เป็น 7.5% และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 10% พบว่าค่าประสิทธิภาพการตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไททาเนียมออกไซด์มากขึ้น พบว่าเซ็นเซอร์มีแนวโน้มการลดลงของค่าประสิทธิภาพการตอบสนอง

กลุ่ม 1c ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารไททาเนียมออกไซด์เป็น 600°C (รูปที่ 4.19) พบว่า อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 500°C ค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการผสมของไททาเนียมออกไซด์เพิ่มจาก 5 เป็น 7.5% และมีแนวโน้มค่า

ประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนของไททานีียมออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น แต่สำหรับอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C พบว่าประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มอย่างรวดเร็วขึ้นเมื่ออัตราส่วนการผสมไททานีียมออกไซด์จาก 5 เป็น 7.5% ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมของไททานีียมออกไซด์เป็น 10% จากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ที่อัตราส่วนการผสมเป็น 12.5%

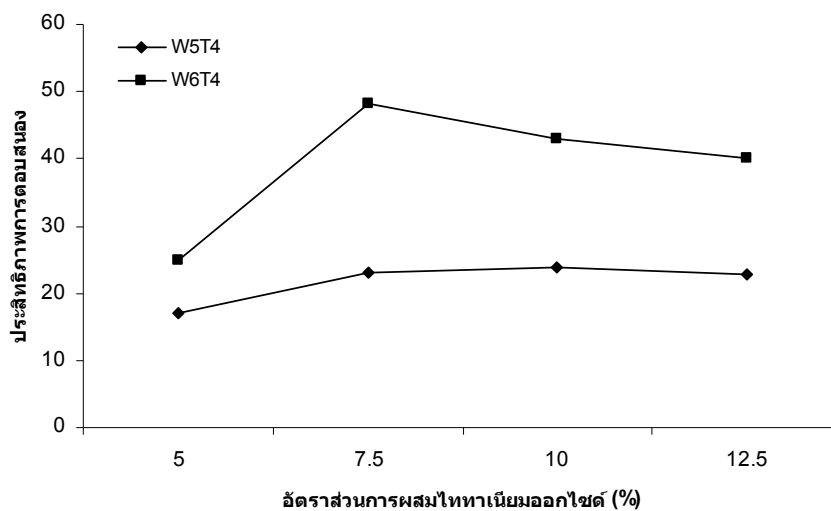
กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์คงที่ที่ 500°C (กลุ่ม 2a) และ 600°C (กลุ่ม 2b) ผสมกับไททานีียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C ตามลำดับ

กลุ่ม 2a ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C (รูปที่ 4.20) พบว่าที่ทุกอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ไททานีียมออกไซด์เซ็นเซอร์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลคล้ายคลึงกัน คือมีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนการผสมไททานีียมออกไซด์เพิ่มจาก 5 เป็น 7.5% และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการผสมเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ไททานีียมออกไซด์เป็น 500°C ที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการผสมไททานีียมออกไซด์เพิ่มจาก 5 เป็น 10% และลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนการผสมเป็น 12.5% และเซ็นเซอร์ที่แต่ละอัตราส่วนการผสมนั้นมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน

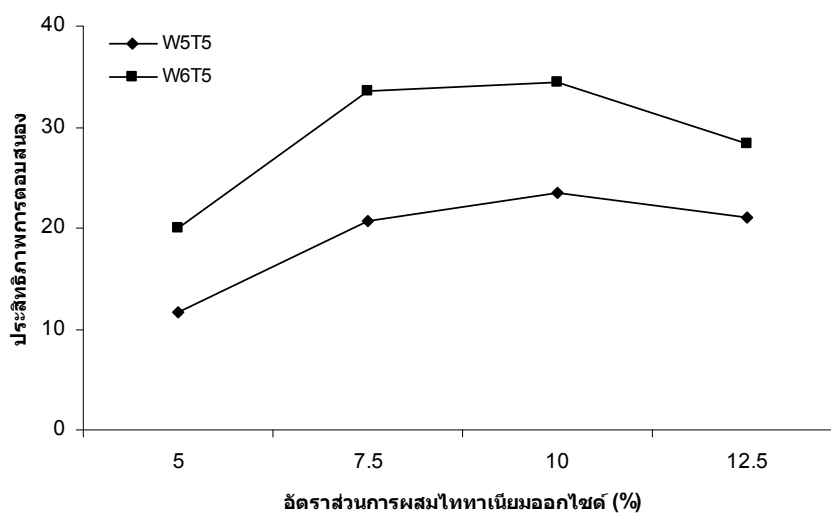
กลุ่ม 2b ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C (รูปที่ 4.21) พบว่าที่ทุกอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ไททานีียมออกไซด์เซ็นเซอร์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่แตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ไททานีียมออกไซด์เป็น 400°C พบว่าค่าประสิทธิภาพการตอบสนองสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนการผสมของไททานีียมออกไซด์เพิ่มจาก 5 เป็น 7.5% แล้วจึงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมของไททานีียมออกไซด์เป็น 10% จากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ที่อัตราส่วนการผสมเป็น 12.5% สำหรับที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ไททานีียมออกไซด์เป็น 500°C พบว่า ประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการผสมสารไททานีียมออกไซด์จาก 5 เป็น 7.5% และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 10% พบว่าค่าประสิทธิภาพการตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไททานีียมออกไซด์มากขึ้น พบว่าเซ็นเซอร์มีแนวโน้มการลดลงของค่าประสิทธิภาพการตอบสนอง ส่วนที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ไททานีียมออกไซด์เป็น 600°C พบว่า ประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มอย่างรวดเร็วขึ้นเมื่ออัตราส่วนการผสมไททานีียมออกไซด์จาก 5 เป็น 7.5% และลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมเป็น 10% จากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ที่อัตราส่วนการผสมเป็น 12.5%

จากผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ทุกตัวมีประสิทธิภาพการตอบสนองดีมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมสารไททาเนียมออกไซด์จาก 5 เป็น 7.5% ก่อนที่จะลดลงและเล็กน้อยและมีแนวโน้มคงที่ของค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผสมมากขึ้น จากการศึกษาของ Guidi และคณะ (2000) ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนการผสมเป็น 80:20 นั้นเป็นอัตราส่วนการผสมที่มากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สไม่ดีเท่ากับที่อัตราส่วนเป็น 90:10 และในการทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ด้วยเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์จากทั้งสเดนออกไซด์ผสมกับไททาเนียมออกไซด์ด้วยอัตราส่วนระหว่างทั้งสเดนออกไซด์ต่อไททาเนียมออกไซด์เป็น 90:10 ของ Gopal Reddy และคณะ (2003) นั้นพบว่าเซ็นเซอร์มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลประมาณ 21.6 สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าสารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 600°C ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400°C ด้วยอัตราส่วน 92.5:7.5 มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ดีที่สุดด้วยค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 48.31 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าที่อัตราส่วนการผสมระหว่างสารทั้งสเดนออกไซด์กับสารไททาเนียมออกไซด์เป็น 92.5:7.5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมกว่าที่อัตราส่วนเป็น 90:10

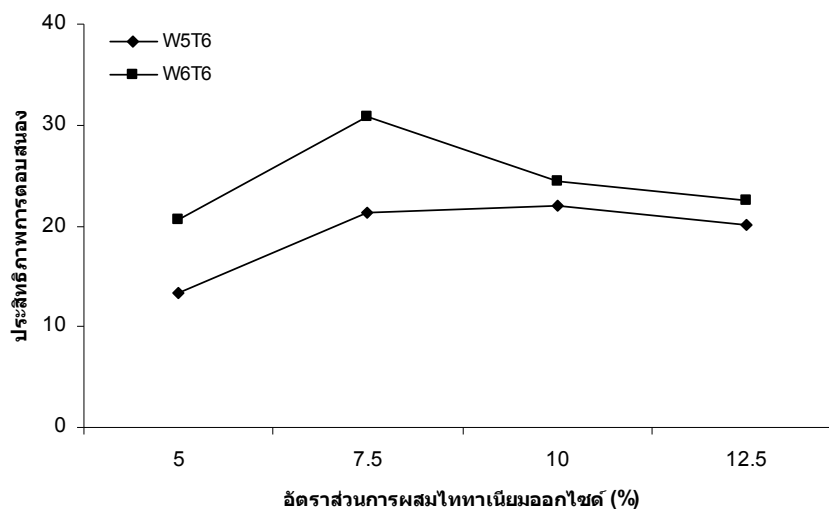
จากผลการทดลองทั้งสามหัวข้อย่อยตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น สรุปได้ว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทั้งสเดนออกไซด์ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิประมาณ 300°C เช่นเดียวกับแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทั้งสเดนออกไซด์หรือสารไททาเนียมออกไซด์เพียงชนิดเดียวที่มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิประมาณ $250 - 300^{\circ}\text{C}$ และ 350°C ตามลำดับ และแก๊สเซ็นเซอร์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ก่อนนำมาผสมกันมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลดีกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมสารกันก่อนนำไปเผาแคลไซน์ โดยแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลดีกว่าการผสมสารที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิอื่น โดยที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 92.5:7.5 ให้ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลดีกว่าที่อัตราส่วนผสมอื่น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลมากที่สุดคือผลของอัตราส่วนในการผสมสาร



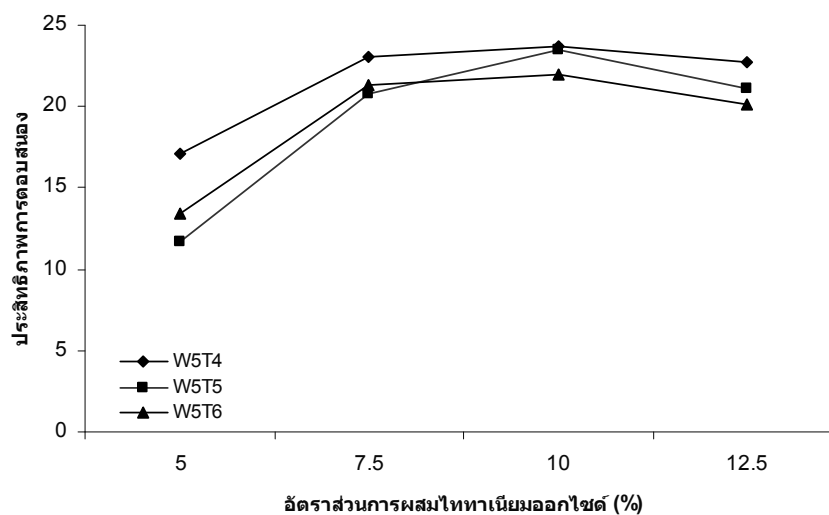
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ



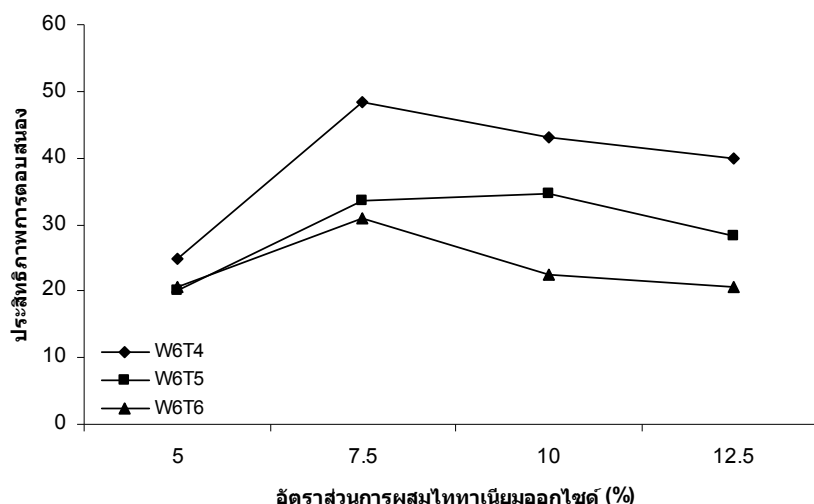
รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 500°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 600°C กับทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500°C กับไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิ 300°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทังสเตนออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่ 600°C กับไททาเนียมออกไซด์ที่ 400 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนต่างๆ

4.6 ผลการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อแก๊สแอมโมเนีย

การวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C โดยกำหนดความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ในช่วง 400 - 3200 ppm

สำหรับผลการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ต่อแก๊ส ได้แบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อย่อยคือ ผลของอุณหภูมิในการทำงาน ผลของอุณหภูมิการเผาแคลเซียมของสารตั้งต้น และผลของอัตราส่วนการผสมสารต่อประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ ซึ่งแสดงไว้เป็นลำดับดังนี้

4.6.1 ผลของอุณหภูมิการทดลองต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

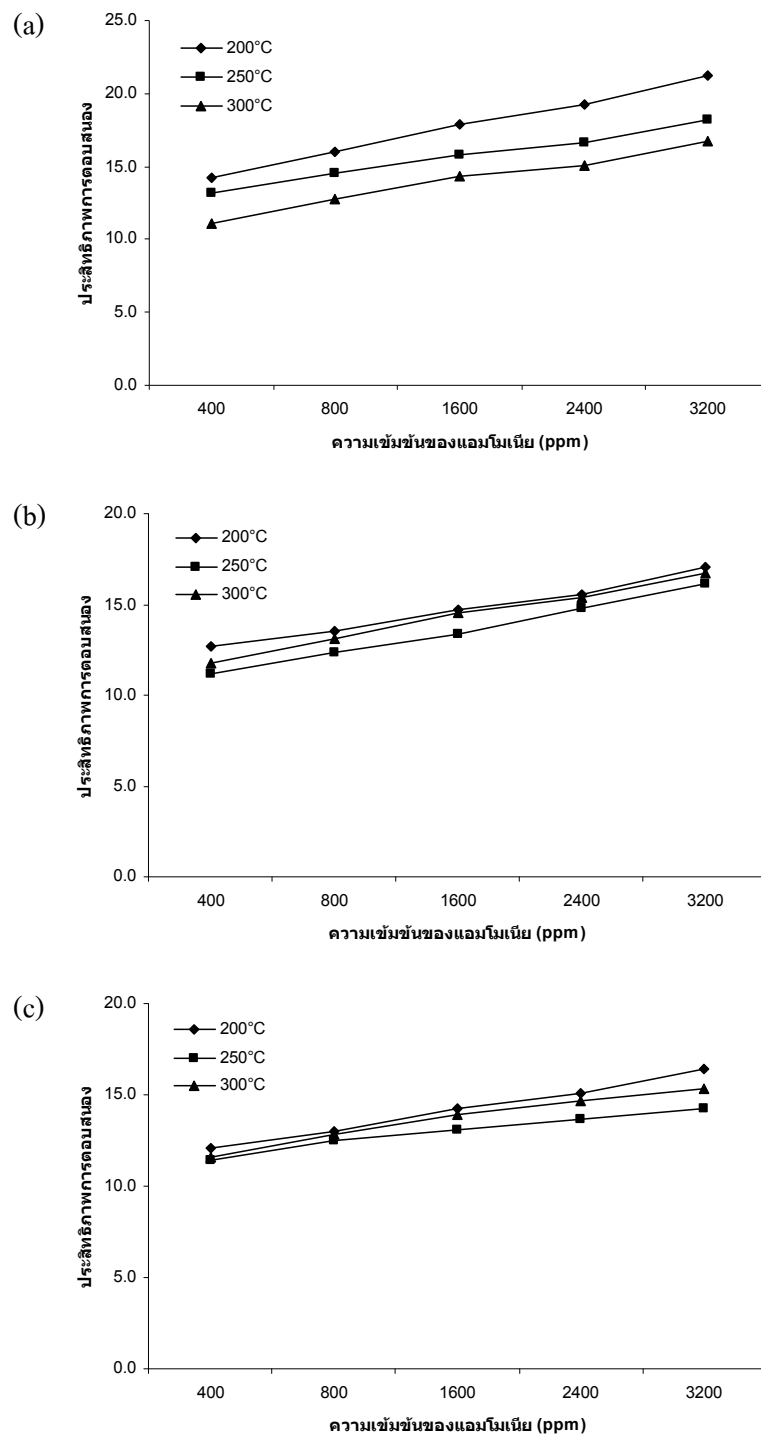
ในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิในการทำงานของเซ็นเซอร์ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 4 กลุ่ม ตามอัตราส่วนในการผสมสารระหว่างทังสเตนออกไซด์และไททาเนียมออกไซด์ คือกลุ่มของเซ็นเซอร์ที่มีอัตราส่วนของทังสเตนออกไซด์ต่อไททาเนียมออกไซด์เป็น 95:5 92.5:7.5 90:10 และ 87.5:12.5

และในแต่ละกลุ่มยังแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยตามอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์สารทั้งสเดนออกไซด์ ซึ่งแสดงผลการทดลองไว้เป็นลำดับดังนี้

ผลการทดลองของกลุ่มที่ 1a กลุ่มที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์กับไททานเนียมออกไซด์เป็น 95:5 และกำหนดให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เป็น $400 - 600^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปที่ 4.22 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 5W5T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (a) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของแก๊สที่เพิ่มขึ้น และที่ทุกอุณหภูมิเซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่แบบเชิงเส้น มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนที่ความเข้มข้นของแก๊สทุกค่า โดยเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C ที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น $14.2 - 21.2$ ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่า $13.2 - 18.2$ และ อุณหภูมิ 300°C มีค่า $11.1 - 16.7$

เซ็นเซอร์ 5W5T5 และ 5W5T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (b) - (c) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ทั้งสองตัวมีค่าและแนวโน้มการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกันและที่ทุกอุณหภูมิ คือ เซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่แบบเชิงเส้น ที่ทุกอุณหภูมิมียมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ อื่นๆเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น $12.7 - 17.0$ ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่า $11.2 - 16.1$ และ อุณหภูมิ 300°C มีค่า $11.8 - 16.7$



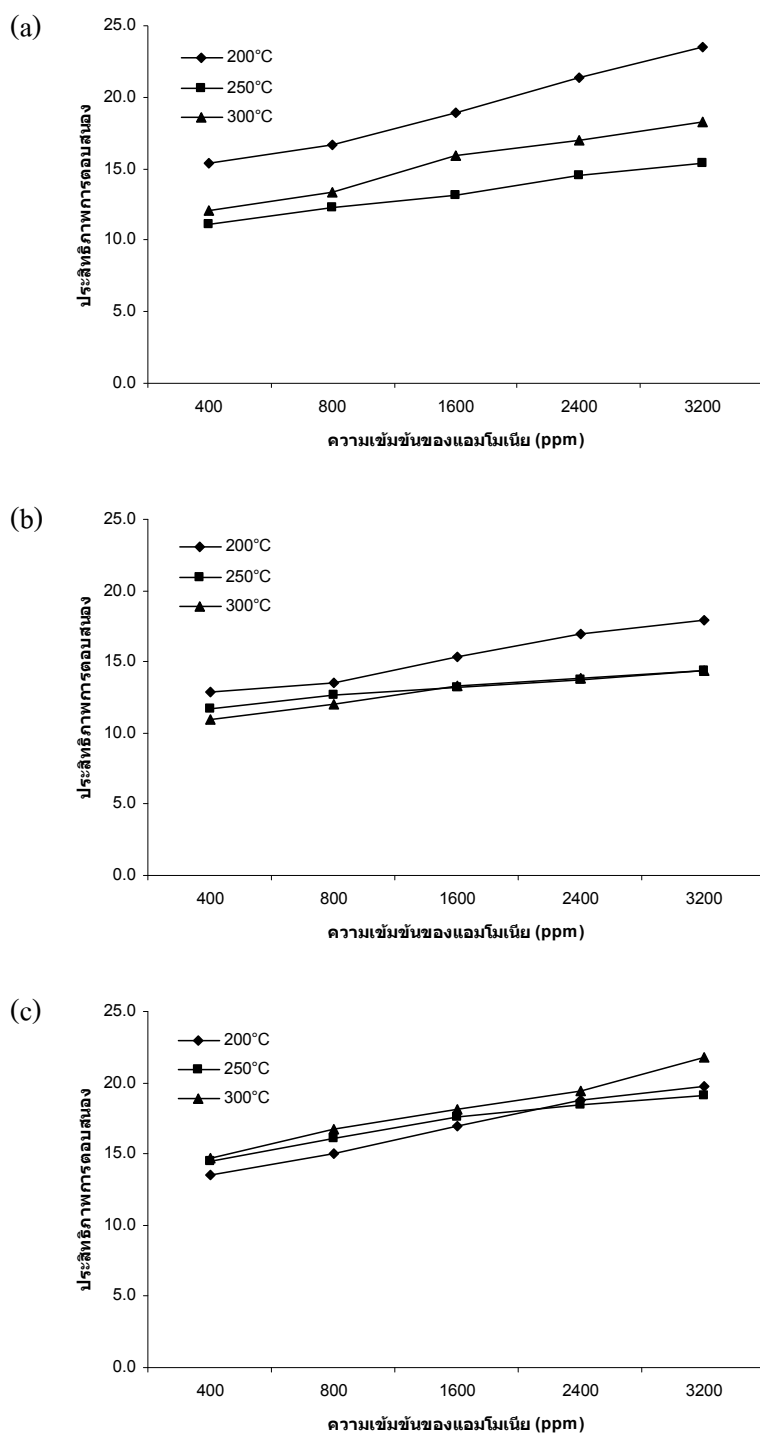
รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 5W5T4 (b) 5W5T5 (c) 5W5T6

ผลการทดลองกลุ่มที่ 1b ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เหมือนกับกลุ่มที่ 1a แต่ให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ทั้งสแตนด์ออกไซด์เป็น 600°C แสดงในรูปที่ 4.23 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 5W6T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (a) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของแก๊สที่เพิ่มขึ้น และที่ทุกอุณหภูมิเซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่แบบเชิงเส้น เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C ค่อนข้างชัดเจน ที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 15.4 - 23.5 อุณหภูมิ 250°C มีค่า 11.2 - 15.4 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่า 12.1 - 18.2

เซ็นเซอร์ 5W6T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (b) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิเซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่แบบเชิงเส้น ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 400 - 800 ppm เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันที่ทุกอุณหภูมิ แต่เมื่อความเข้มข้นแก๊สมากขึ้นประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C อย่างชัดเจน โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 13.2 - 18.0 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่า 11.7 - 14.4 และ อุณหภูมิ 300°C มีค่า 10.9 - 14.4

เซ็นเซอร์ 5W6T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (c) ที่ทุกอุณหภูมิเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มมากขึ้นค่อนข้างคงที่แบบเชิงเส้นตามความเข้มข้นของแก๊สที่เพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C เล็กน้อย ที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 13.5 - 19.2 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่า 14.5 - 19.1 และ อุณหภูมิ 300°C มีค่า 14.7 - 21.8

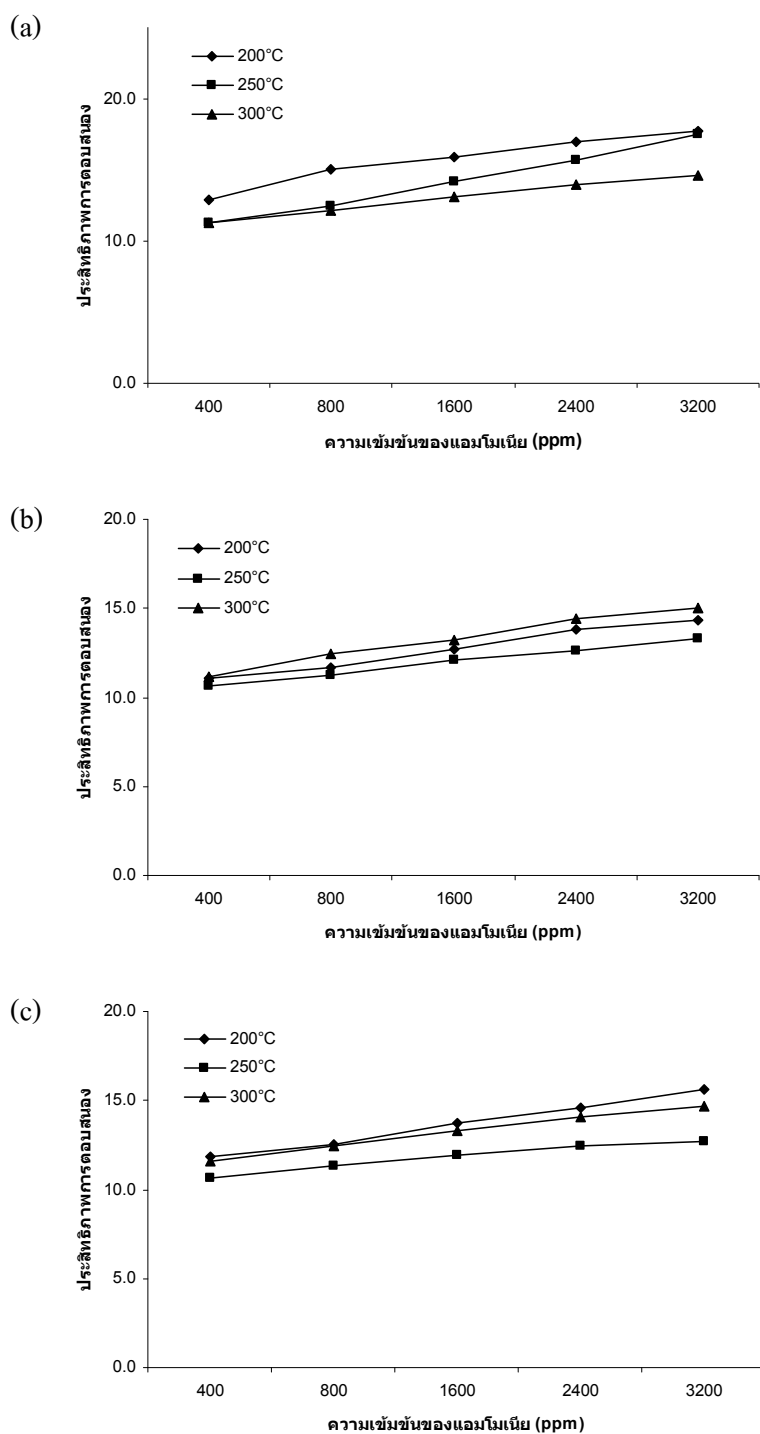


รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 5W6T4 (b) 5W6T5 (c) 5W6T6

ผลการทดลองของกลุ่มที่ 2a กลุ่มที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์กับไททานเนียมออกไซด์เป็น 92.5:7.5 และกำหนดให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เป็น $400 - 600^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปที่ 4.24 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 7.5W5T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (a) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิประสิทธิภาพการตอบสนองมีอัตราการเพิ่มเป็นแบบเชิงเส้น โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C ที่ทุกค่าความเข้มข้นแก๊ส โดยที่ความเข้มข้นแก๊ส 400 - 2400 ppm เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C อย่างชัดเจนแต่ที่ความเข้มข้นแก๊สเพิ่มเป็น 3200 ppm แก๊สเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C กลับมีค่าใกล้เคียงกัน และที่ความเข้มข้นแก๊ส 400 ppm เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C โดยเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 300°C เล็กน้อยและแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 12.8 - 17.7 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่า 11.3 - 17.5 และ อุณหภูมิ 300°C มีค่า 11.3 - 14.6

เซ็นเซอร์ 7.5W5T5 และเซ็นเซอร์ 7.5W5T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (b) - (c) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ทั้งสองตัวมีค่าและแนวโน้มการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกัน คือเซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่แบบเชิงเส้น โดยที่ทุกอุณหภูมิมิมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันแตกต่างกันไม่มากนัก สำหรับเซ็นเซอร์ 7.5W5T5 สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิอื่นเล็กน้อย แต่เซ็นเซอร์ 7.5W5T6 นั้นต่างกันเล็กน้อยคือเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิอื่นเล็กน้อย สำหรับที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองเป็น 11.1 - 14.3 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่า 10.7 - 13.3 และ อุณหภูมิ 300°C มีค่า 11.2 - 15.1



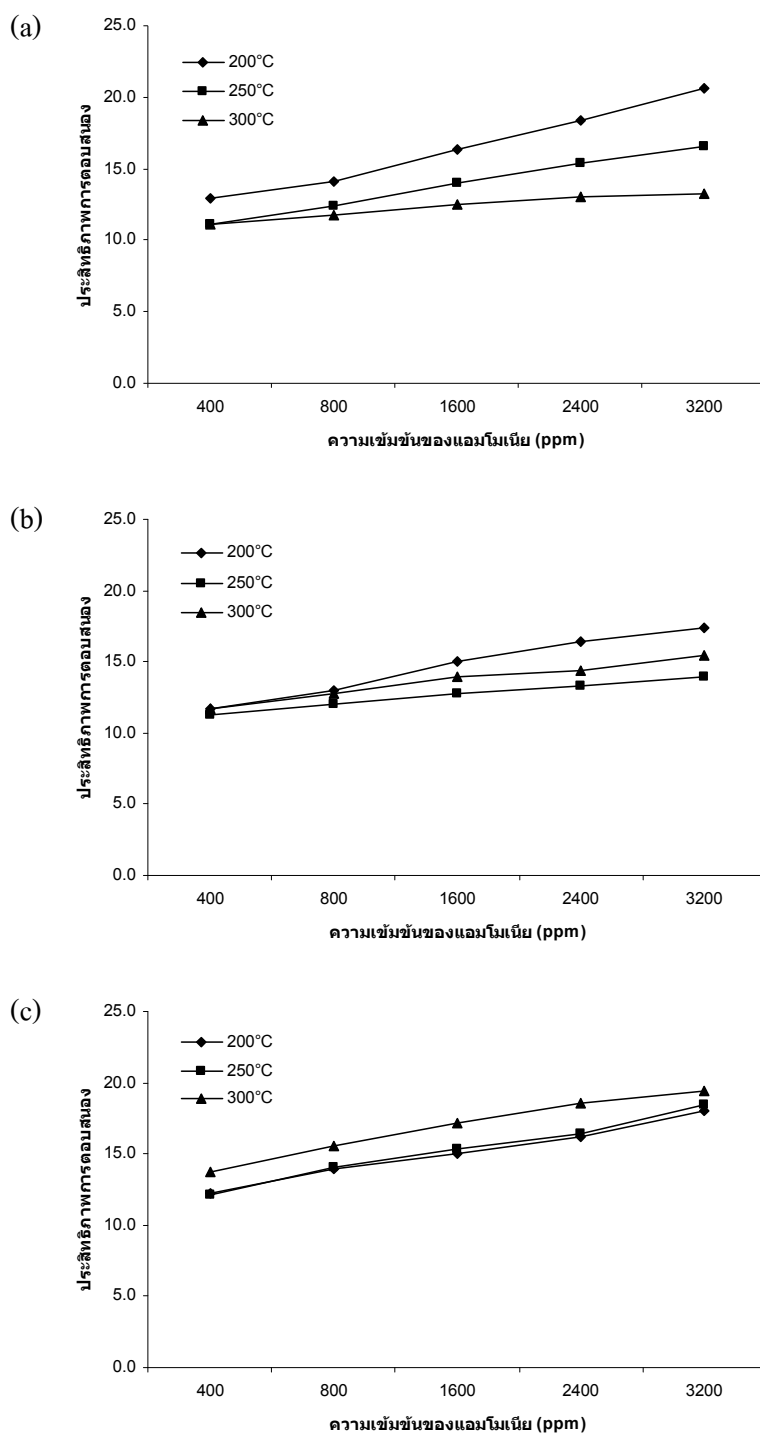
รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 7.5W5T4 (b) 7.5W5T5 (c) 7.5W5T6

ผลการทดลองกลุ่มที่ 2b ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เหมือนกับกลุ่มที่ 2a แต่ให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C แสดงในรูปที่ 4.25 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 7.5W6T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (a) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิการทดลองมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่ โดยที่ความเข้มข้นของแก๊ส 400 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C มีค่าใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกันมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆค่อนข้างชัดเจนในทุกค่าความเข้มข้นแก๊ส โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 12.9 - 20.7 และที่อุณหภูมิ 250 $^{\circ}\text{C}$ มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 11.1 - 16.6 และ 300°C และ 11.1 - 13.2

เซ็นเซอร์ 7.5W6T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (b) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200°C มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่ และมีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 300 และ 250°C ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นของแก๊ส 400 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองของเซ็นเซอร์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงความเข้มข้นของแก๊สเป็น 800 - 3200 ppm ประสิทธิภาพการตอบสนองแตกต่างกันมากขึ้นเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองมากที่สุด มากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 11.6 - 17.3 ที่อุณหภูมิ 250 $^{\circ}\text{C}$ มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 11.3 - 13.9 และ 300°C และ 11.6 - 15.4

เซ็นเซอร์ 7.5W6T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (c) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ที่ทุกอุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่แบบเชิงเส้น เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C นั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันมากในทุกค่าความเข้มข้น สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C เล็กน้อย โดยมีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ประมาณ 12.1 - 19.4

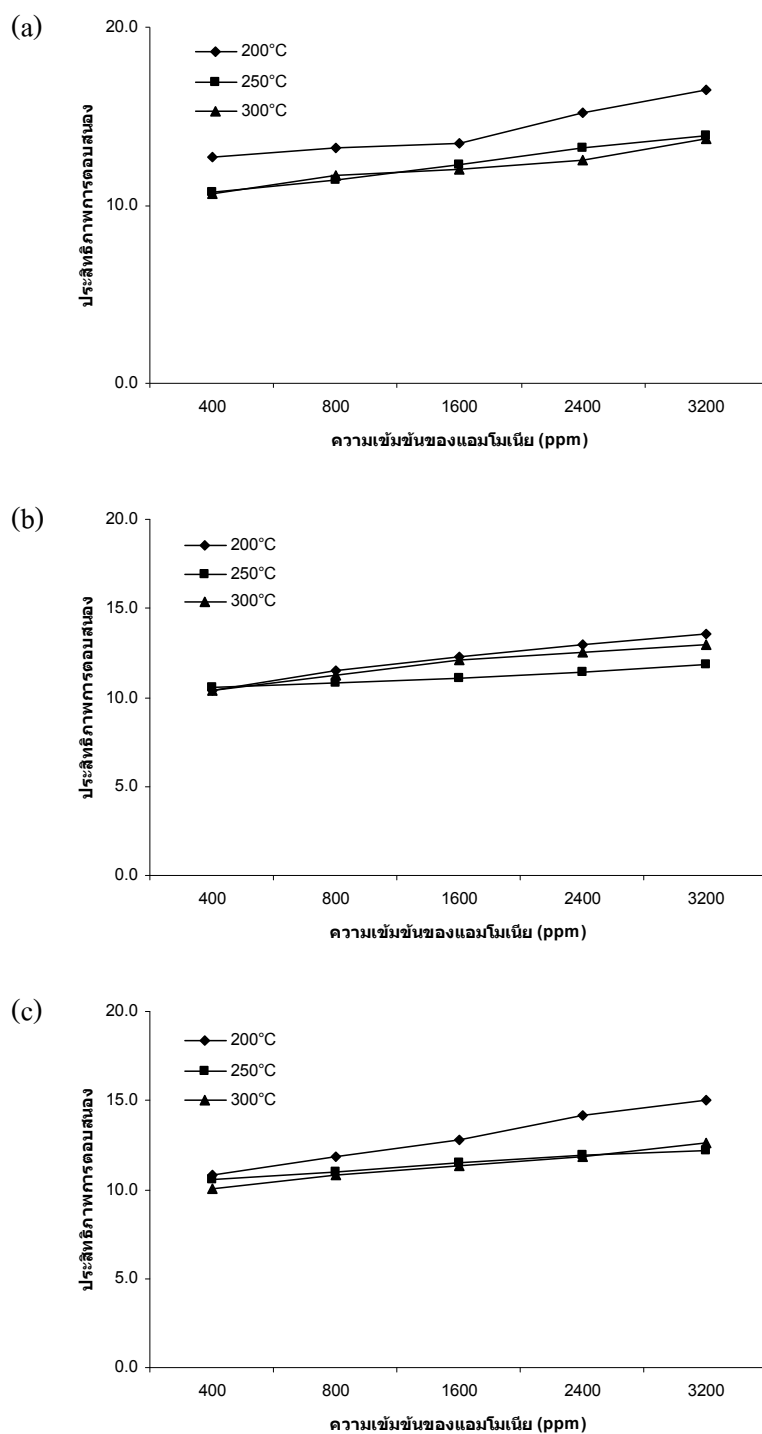


รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 7.5W6T4 (b) 7.5W6T5 (c) 7.5W6T6

ผลการทดลองของกลุ่มที่ 3a กลุ่มที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสแตนออกไซด์กับไททาเนียมออกไซด์เป็น 90:10 และกำหนดให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 500°C ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททาเนียมออกไซด์เป็น $400 - 600^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปที่ 4.26 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 10W5T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (a) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันทุกค่าความเข้มข้น โดยเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิอื่นๆเล็กน้อยและมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ดีกว่าชัดเจนมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นแก๊สเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 12.7 - 16.5 ส่วนที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 10.7 - 13.9

เซ็นเซอร์ 10W5T5 และเซ็นเซอร์ 10W5T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (b) - (c) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ทั้งสองตัวมีค่าและแนวโน้มการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกัน คือเซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่แบบเชิงเส้น โดยที่ทุกอุณหภูมิมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันแตกต่างกันไม่มากนัก โดยเซ็นเซอร์ทั้งสองนั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่อุณหภูมิ 200°C ดีกว่าที่อุณหภูมิอื่น โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.4 - 13.6 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.5 - 11.8 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.4 - 12.9



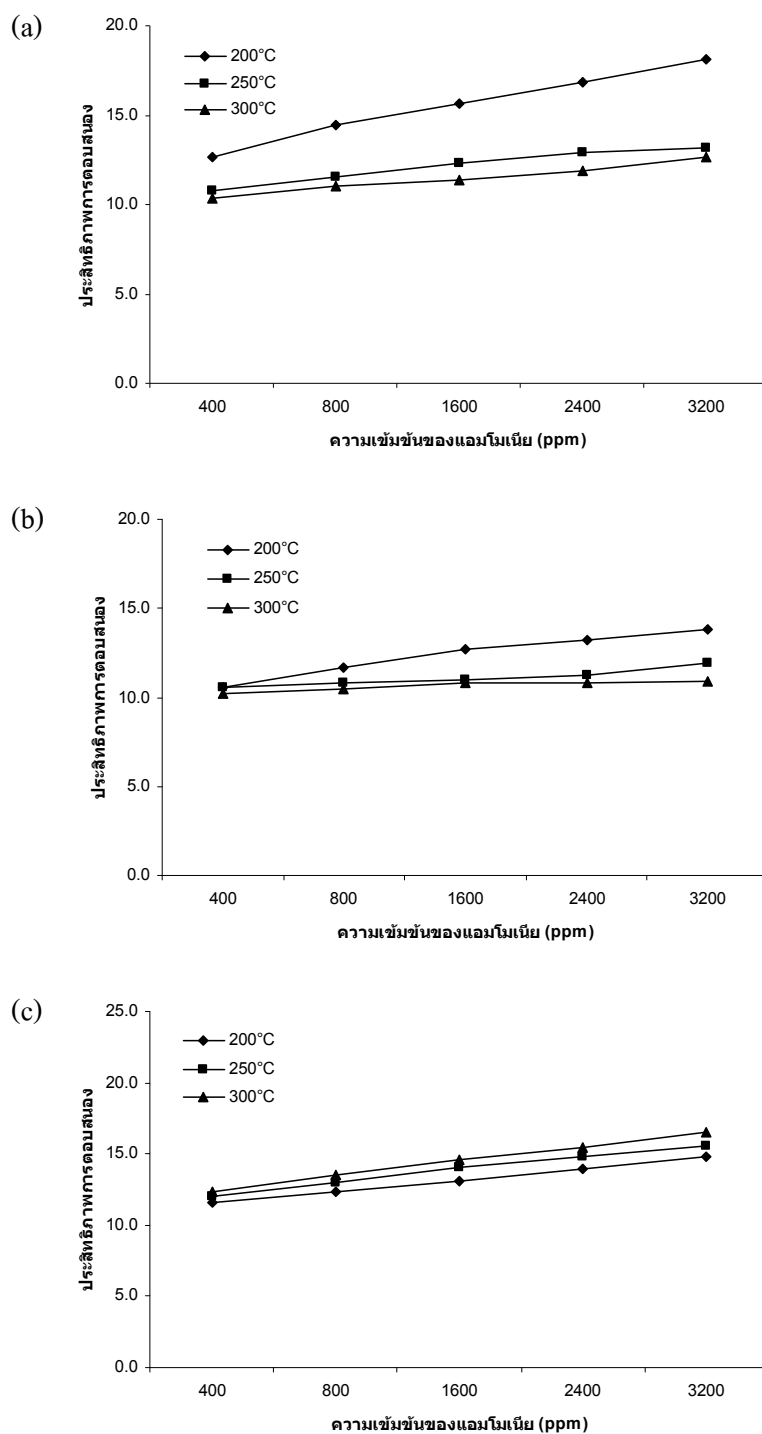
รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 10W5T4 (b) 10W5T5 (c) 10W5T6

ผลการทดลองกลุ่มที่ 3b ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เหมือนกับกลุ่มที่ 3a แต่ให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C แสดงในรูปที่ 4.27 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 10W6T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (a) สังเกตได้ว่า เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C นั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่คงที่เป็นเชิงเส้น โดยที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 300°C โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 12.7 - 18.1 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.8 - 13.1 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.4 - 12.6

เซ็นเซอร์ 10W6T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (b) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองที่ไม่คงที่ โดยที่อุณหภูมิ 200°C ในช่วงความเข้มข้นแก๊สเป็น 400 - 1600 ppm เซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าในช่วงความเข้มข้นแก๊สเป็น 1600 - 3200 ppm และเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C ชัดเจน สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C ที่ความเข้มข้นแก๊ส 400 ppm มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C และมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองเล็กน้อยในช่วงความเข้มข้นแก๊ส 400 - 1600 ppm และมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองที่มากขึ้นที่ความเข้มข้นแก๊ส 1600 - 3200 ppm และเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C ประสิทธิภาพการตอบสนองเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยแม้ว่าความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้นก็ตาม โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.6 - 13.8 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.5 - 11.9 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.2 - 10.9

เซ็นเซอร์ 10W6T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (c) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่เป็นเชิงเส้น โดยที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 11.5 - 14.8 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 12.0 - 15.5 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 12.3 - 16.5



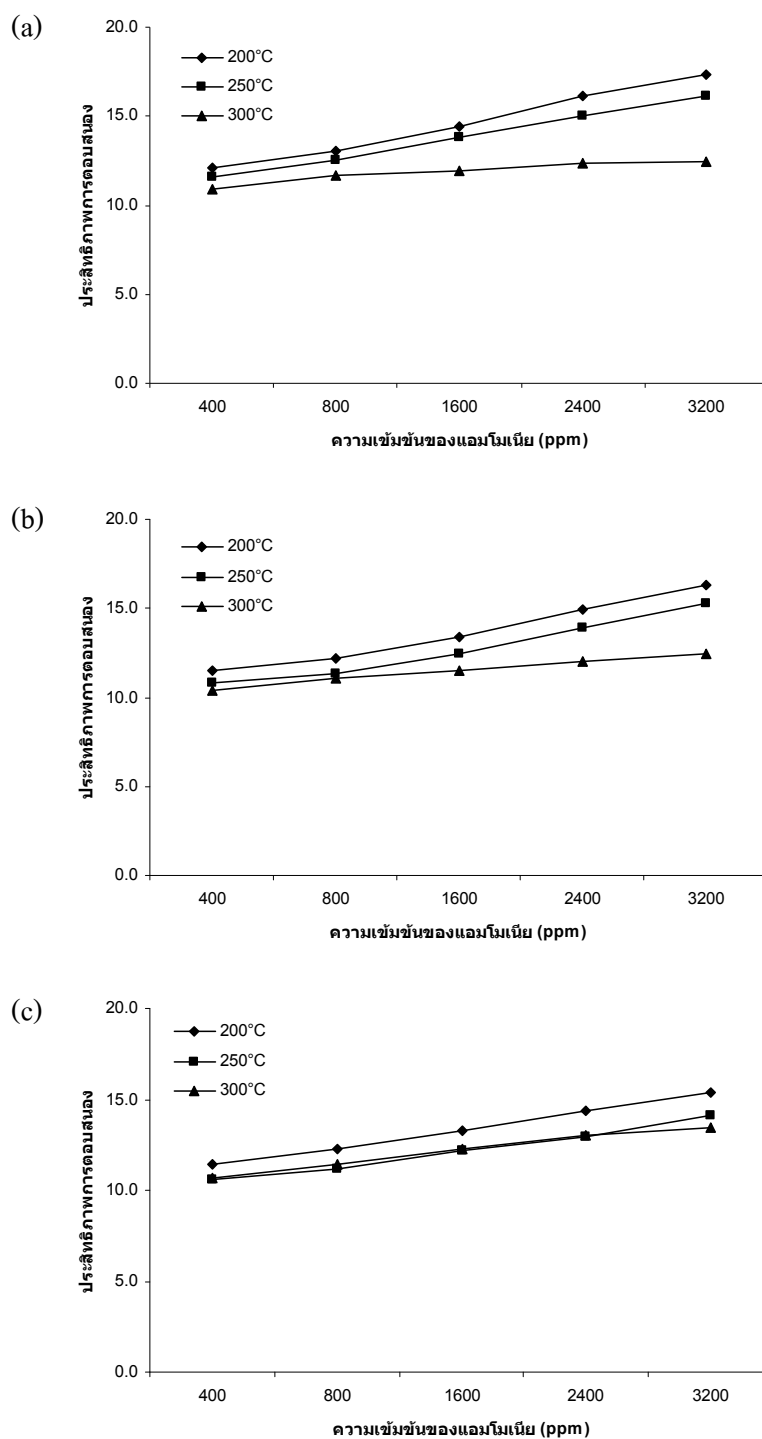
รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 10W6T4 (b) 10W6T5 (c) 10W6T6

ผลการทดลองของกลุ่มที่ 4a กลุ่มที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์กับไททานเนียมออกไซด์เป็น 87.5:12.5 และกำหนดให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C ในขณะที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เป็น $400 - 600^{\circ}\text{C}$ แสดงในรูปแบบที่ 4.28 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 12.5W5T4 ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.28 (a) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่เป็นเชิงเส้น โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C สำหรับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C นั้นมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกับเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C แต่มีประสิทธิภาพการตอบสนองน้อยกว่าเล็กน้อย และสำหรับที่อุณหภูมิ 300°C ประสิทธิภาพการตอบสนองไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแม้ว่าความเข้มข้นแก๊สเพิ่มขึ้นก็ตาม โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 11.6 - 17.5 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 11.5 - 16.1 ที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 10.9 - 12.4

เซ็นเซอร์ 12.5W5T5 ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.28 (b) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C ที่ความเข้มข้น 400 - 800 ppm นั้นมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองเพียงเล็กน้อย และมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้น โดยเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 250°C และสำหรับที่อุณหภูมิ 300°C มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่เป็นเชิงเส้น แต่มีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแม้ว่าความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 10.5 - 16.5 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 10.8 - 15.3 ที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองอยู่ระหว่าง 10.4 - 12.5

เซ็นเซอร์ 12.5W5T6 ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.28 (c) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200°C เซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองที่คงที่เป็นเชิงเส้น โดยมีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C สำหรับที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C มีอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันแม้ว่าความเข้มข้นแก๊สเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 400 - 2400 ppm นั้น เซ็นเซอร์ที่ทั้งอุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250°C เล็กน้อย แต่เมื่อความเข้มข้นแก๊สเพิ่มขึ้นเป็น 3200 ppm เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C กลับมีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 300°C โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.3 - 15.5 ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.5 - 14.1 และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง 10.7 - 13.4



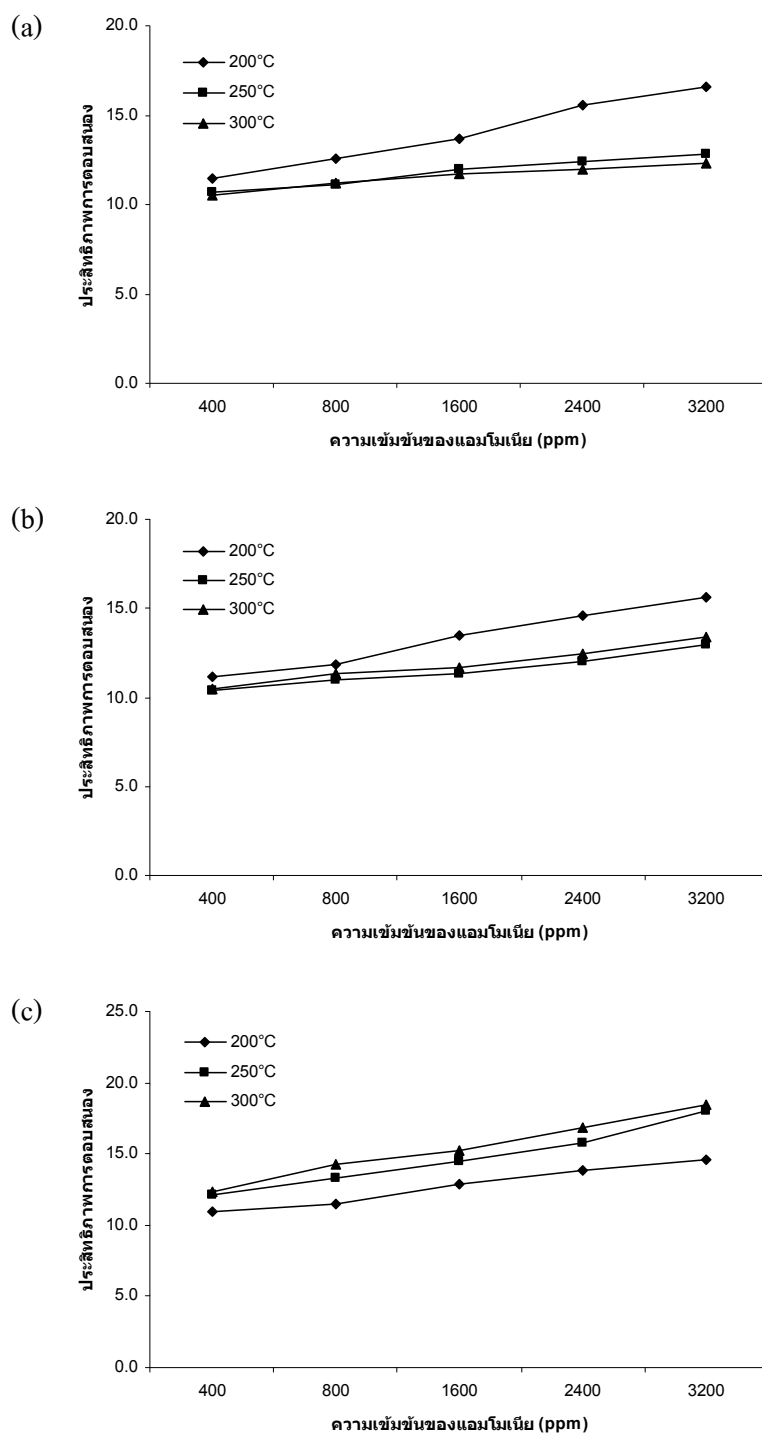
รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 12.5W5T4 (b) 12.5W5T5 (c) 12.5W5T6

ผลการทดลองกลุ่มที่ 4b ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของสารตั้งต้นและอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของไททานเนียมออกไซด์เหมือนกับกลุ่มที่ 4a แต่ให้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C แสดงในรูปที่ 4.29 (a) - (c)

เซ็นเซอร์ 12.5W6T4 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (a) สังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมิ 200°C เซ็นเซอร์มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองไม่คงที่ โดยที่ความเข้มข้นแก๊ส $400 - 1600 \text{ ppm}$ มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองน้อยกว่าความเข้มข้นแก๊สช่วง $1600 - 3200 \text{ ppm}$ โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C สำหรับที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C มีอัตราการเพิ่มของประสิทธิภาพการตอบสนองคงที่เป็นเชิงเส้น ที่ความเข้มข้นแก๊สเป็น $400 - 800 \text{ ppm}$ เซ็นเซอร์ที่ทั้งสองอุณหภูมิ มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันแต่เมื่อความเข้มข้นแก๊สเพิ่มขึ้น เซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C ชัดเจนมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $11.5 - 16.5$ ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $10.7 - 12.8$ และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $10.5 - 12.3$

เซ็นเซอร์ 12.5W6T5 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (b) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองไม่คงที่ โดยที่อุณหภูมิ 200°C ที่ความเข้มข้นแก๊ส $400 - 800 \text{ ppm}$ มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองเล็กน้อย แต่เมื่อความเข้มข้นมากขึ้นประสิทธิภาพการตอบสนองมีอัตราการเพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 200°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C สำหรับที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C นั้น ที่ความเข้มข้นแก๊ส 400 ppm มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นแก๊ส $800 - 1600 \text{ ppm}$ นั้นเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C มีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองน้อยกว่าในช่วงความเข้มข้นแก๊ส $1600 - 3200 \text{ ppm}$ โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $10.5 - 15.6$ ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $10.4 - 12.9$ และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $10.4 - 13.4$

เซ็นเซอร์ 12.5W6T6 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (c) สังเกตได้ว่า ที่ทุกอุณหภูมิมีอัตราการเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองค่อนข้างคงที่เป็นเชิงเส้น โดยเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 300°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 250 และ 200°C ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $10.6 - 14.6$ ที่อุณหภูมิ 250°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $12.1 - 18.0$ และที่อุณหภูมิ 300°C มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองระหว่าง $12.3 - 18.5$



รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ของเซ็นเซอร์ (a) 12.5W6T4 (b) 12.5W6T5 (c) 12.5W6T6

จากการทดลองผลของอุณหภูมิในการทำงานของเซ็นเซอร์ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเมื่ออุณหภูมิการทดลองสูงขึ้น กล่าวคือที่อุณหภูมิ 200°C เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C ซึ่งจากการทบทวนเอกสาร พบว่าการทดลองของ Tomchenko และคณะ (2003) ที่ได้วัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 25 ppm ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์แบบฟิล์มหนา ที่อุณหภูมิ 200 และ 300°C พบว่าแก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200°C ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 300°C และในการทดลองของ Siciliano และคณะ (2008) ที่ได้ทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 100 ppm ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากทังสเตนออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 150 - 300°C พบว่าแก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 220°C นอกจากนี้ การทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 500 ppm ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มบางที่ประดิษฐ์จากไททาเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 - 500°C ของ Karunagaran และคณะ (2007) พบว่าเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีที่สุดที่อุณหภูมิ 250°C ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นและอุณหภูมิการทำงานต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย สามารถสรุปได้ดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นและอุณหภูมิการทำงานต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

แก๊สเซ็นเซอร์	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น	ประสิทธิภาพ การตอบสนอง	เอกสารอ้างอิง
WO ₃ (ตกตะกอน)	300	1%	9.5	มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ (2544)
WO ₃ (โซล-เจล)	200	25 ppm	1.43	Tomchenko และคณะ (2003)
WO ₃ (ซีวีดี)	220	100 ppm	9.0	Siciliano และคณะ(2008)
TiO ₂ (สปีดเตอริง)	250	500 ppm	7.0	Karunagaran และคณะ (2007)
WO ₃ + TiO ₂ (ผสม 95:5)	200	400 ppm	15.4	งานวิจัยนี้

จากผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสังเกตได้ว่า แก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากไททาเนียมออกไซด์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิสูงกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสแตนออกไซด์เล็กน้อย และสำหรับผลการทดลองของงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมกันระหว่างสารทั้งสแตนออกไซด์กับสารไททาเนียมออกไซด์ และพบว่าอุณหภูมิที่แก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 200°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ได้ใช้แก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสแตนออกไซด์เพียงสารเดียว ซึ่งเห็นได้ว่าช่วงอุณหภูมิการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียนั้นมิได้สูงขึ้นแม้ว่าจะผสมด้วยสารไททาเนียมออกไซด์ก็ตามสำหรับผลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของสารตั้งต้นต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

4.6.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของสารตั้งต้นต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.6.1 เรื่อง ผลของอุณหภูมิในการทำงานของเซ็นเซอร์ต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย แสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ส่วนใหญ่ตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่อุณหภูมิ 200°C ดัง และแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้นประมาณ 400 ppm จะส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์เราคือทำให้เกิดอาการระคายเคืองหายใจติดขัด ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อความสำคัญและที่มาของปัญหา ในบทที่ 1 ดังนั้นในหัวข้อ 4.6.2 การทดลองเรื่องผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์ของสารตั้งต้น จึงกำหนดให้อุณหภูมิของเซ็นเซอร์ครั้งที่ 200°C และความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียที่ 400 ppm โดยผลการทดลองในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C และไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการผสมของสารทั้ง 4 อัตราส่วน ได้ผลการทดลองดังนี้

ที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 95:5 แสดงในรูปที่ 4.30 (a) สังเกตได้ว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เล็กน้อย และเซ็นเซอร์ทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่คล้ายคลึงกันคือ เซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C โดยเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน

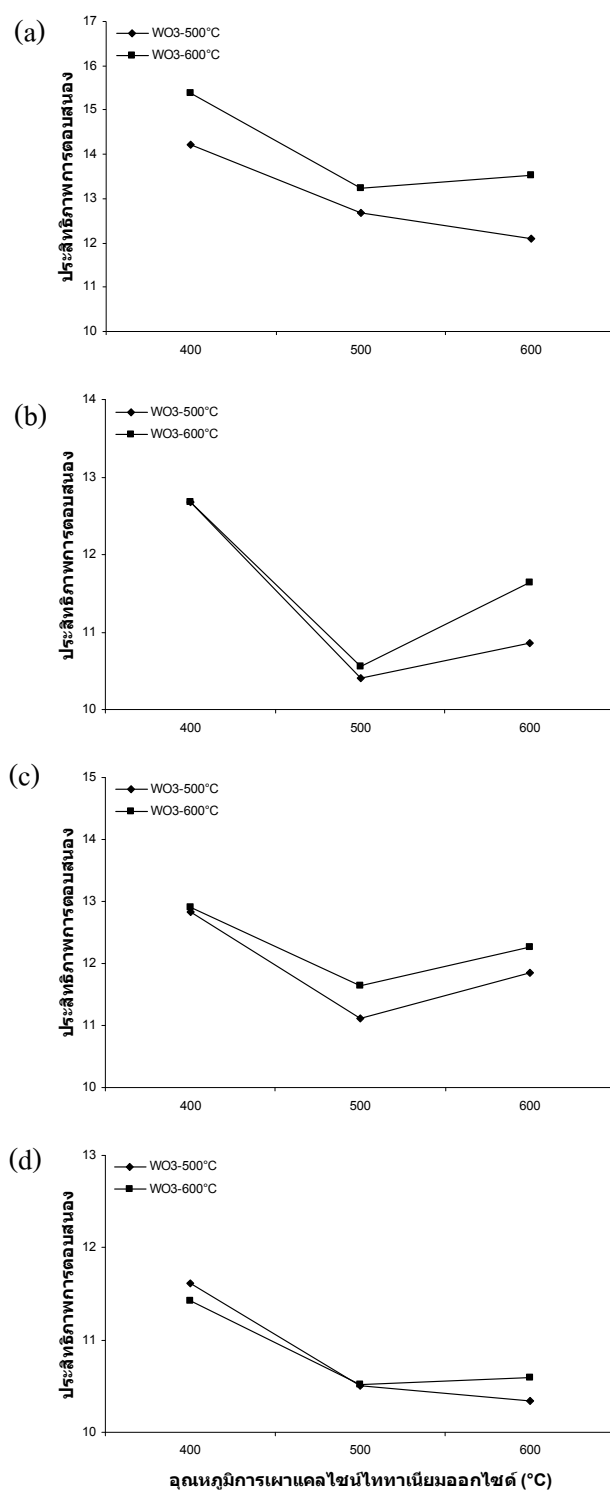
ที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 92.5:7.5 และอัตราส่วนการผสมสารเป็น 90:10 แสดงในรูปที่ 4.30 (b) - (c) สังเกตได้ว่าเส้นเซอร์ทุกตัวมีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันในทั้งสองอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์ และเส้นเซอร์ทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกันคือ เส้นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเส้นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C เล็กน้อย และเส้นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน

ที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 87.5:12.5 แสดงในรูปที่ 4.30 (d) สังเกตได้ว่าเส้นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองเท่ากับเส้นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C เล็กน้อย และเส้นเซอร์ทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการตอบสนองที่เหมือนกันคือ เส้นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเส้นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C เล็กน้อย

จากผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสังเกตได้ว่าเส้นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์และไททาเนียมออกไซด์ที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ มีประสิทธิภาพการตอบสนองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ทุกอัตราส่วนการผสมสังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 95:5 เส้นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเส้นเซอร์ที่ผสมด้วยสารทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C เล็กน้อย แต่สำหรับที่อัตราส่วนอื่นๆนั้นแทบไม่เห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการตอบสนอง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องในทิศทางเดียวกันกับผลของอุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ของสารตั้งต้นต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล และเหตุผลน่าจะเป็นกรณีเดียวกันคือแม้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่ 500°C มีมากกว่าทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่ 600°C แต่เพราะทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่ 500°C อาจยังเป็นเฟสไม่สมบูรณ์เท่าทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่ 600°C ดังนั้นประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียของทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่ 600°C จึงดีกว่าทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่ 500°C และสำหรับการผสมสารไททาเนียมออกไซด์นั้นพบว่าเส้นเซอร์ทุกตัวมีแนวโน้มเดียวกันคือ ไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีกว่าไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C เล็กน้อย โดยผลจากการทดลองนี้น่าจะเกิดจากพื้นที่ผิวสัมผัสของไททาเนียมออกไซด์ คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C มีค่าเป็น 122.5 81.02 และ 56.38 m²/g ตามลำดับ เห็นได้ว่า

ไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 400°C มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C ตามลำดับ จึงส่งผลให้เซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าเซ็นเซอร์ที่เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C ตามลำดับ แม้ว่าจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงในหัวข้อ 4.2 แสดงในรูปที่ 4.4 ไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C เฟสจะมีความสมบูรณ์มากกว่าไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500 และ 400°C ก็ตาม ซึ่งสังเกตได้จากไททาเนียมออกไซด์ที่ผ่านการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C เกิดยอดระนาบ (103) และ (112) ชัดเจนกว่าที่ 500 และ 400°C ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 600°C มีความเป็นเฟสสมบูรณ์มากกว่าเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 500 และ 400°C แต่ผลจากความสมบูรณ์ของเฟสนั้นอาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สน้อยกว่าผลของพื้นที่ผิวจำเพาะ

จากผลการทดลองเรื่องผลของอุณหภูมิในการเผาเคลือบของสารตั้งต้นต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสรุปได้ว่า แก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสแตนออกไซด์เผาเคลือบที่ 600°C ผสมกับไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมด้วยทั้งสแตนออกไซด์กับไททาเนียมออกไซด์เผาเคลือบที่อุณหภูมิอื่นๆ และสำหรับผลของอัตราส่วนการผสมสารต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่มีอัตราส่วนในการผสมระหว่างทังสเตนออกไซด์ต่อไททาเนียมออกไซด์ เป็น (a) 95:5 (b) 92.5:7.5 (c) 90:10 และ (d) 87.5:12.5 ที่อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ ของไททาเนียมออกไซด์ต่างๆ

4.6.3 ผลของอัตราส่วนการผสมสารต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

ในหัวข้อ 4.6.3 นี้ การทดลองเรื่องผลของอัตราส่วนการผสมสารต่อประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย กำหนดให้อุณหภูมิของเซ็นเซอร์คงที่ ที่ 200°C ความเข้มข้นของแก๊สแอมโมเนียที่ 400 ppm เช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.6.2 โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกให้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารไททาเนียมออกไซด์คงที่ ที่ 400°C 500°C และ 600°C ผสมกับทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C และ 600°C ตามลำดับ และกลุ่มที่สองให้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์คงที่ ที่ 500°C และ 600°C ผสมกับไททาเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400°C 500°C และ 600°C ตามลำดับ ผลการทดลองเป็นดังนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มให้อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารไททาเนียมออกไซด์คงที่ ที่ 400°C (กลุ่ม 1a) 500°C (กลุ่ม 1b) และ 600°C (กลุ่ม 1c) ผสมกับทั้งสแตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C และ 600°C ตามลำดับ

กลุ่ม 1a ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารทั้งสแตนออกไซด์ 500°C และ 600°C กับสารไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C ดังแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่าอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 500°C มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียคล้ายคลึงกับอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 600°C คือมีประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเมื่ออัตราส่วนการผสมสารไททาเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 7.5% และประสิทธิภาพการตอบสนองไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 10% ก่อนที่จะมีประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 12.5% โดยที่อัตราส่วนเป็น 5% นั้นอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 600°C นั้นมีประสิทธิภาพการตอบสนองมากกว่าอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 500°C เล็กน้อย และมีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกันมากที่อัตราส่วนการผสมเป็น 7.5 - 12.5%

กลุ่ม 1b ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารทั้งสแตนออกไซด์ 500°C และ 600°C กับสารไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500°C ดังแสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 500°C มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียคล้ายคลึงกับอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 600°C คือประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเมื่ออัตราส่วนการผสมสารไททาเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนการผสมเป็น 5 - 10% นั้นอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่า อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสแตนออกไซด์เป็น 500°C เล็กน้อยก่อนที่จะเท่ากันที่อัตราส่วนการผสมเป็น 12.5%

กลุ่ม 1c ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารทั้งสเดนออกไซด์ 500 และ 600°C กับสารไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C ดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่าอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียคล้ายคลึงกับอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C คือประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเมื่ออัตราส่วนการผสมสารไททานเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และที่ทุกอัตราส่วนอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 600°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่า อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500°C เล็กน้อย

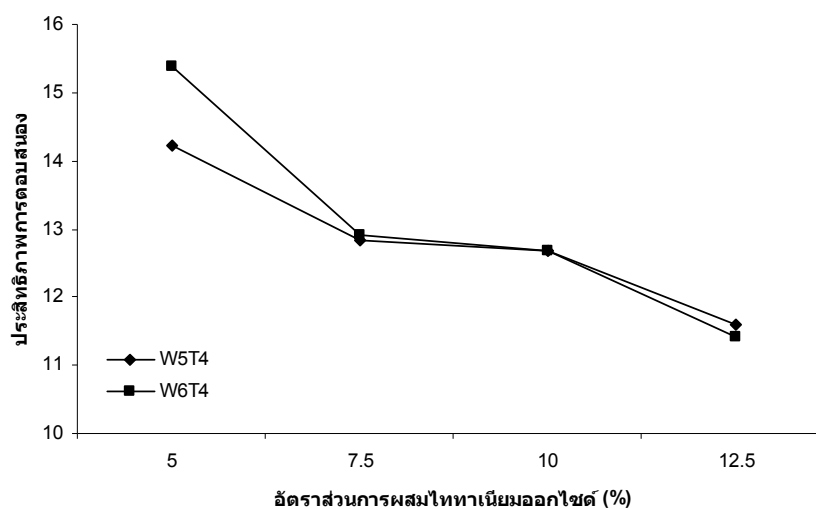
กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารทั้งสเดนออกไซด์เผาแคลไซน์คงที่ ที่ 500°C (กลุ่ม 2a) และ 600°C (กลุ่ม 2b) ผสมกับไททานเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C ตามลำดับ

กลุ่ม 2a และ กลุ่ม 2b ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ทั้งสเดนออกไซด์เป็น 500 และ 600°C ตามลำดับ (รูปที่ 4.34 - 4.35) พบว่าที่ทุกอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ไททานเนียมออกไซด์เซ็นเซอร์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียคล้ายคลึงกัน คือประสิทธิภาพการตอบสนองลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนการผสมไททานเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น โดยไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองดีกว่าไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ที่มีประสิทธิภาพการตอบสนองใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนการผสม

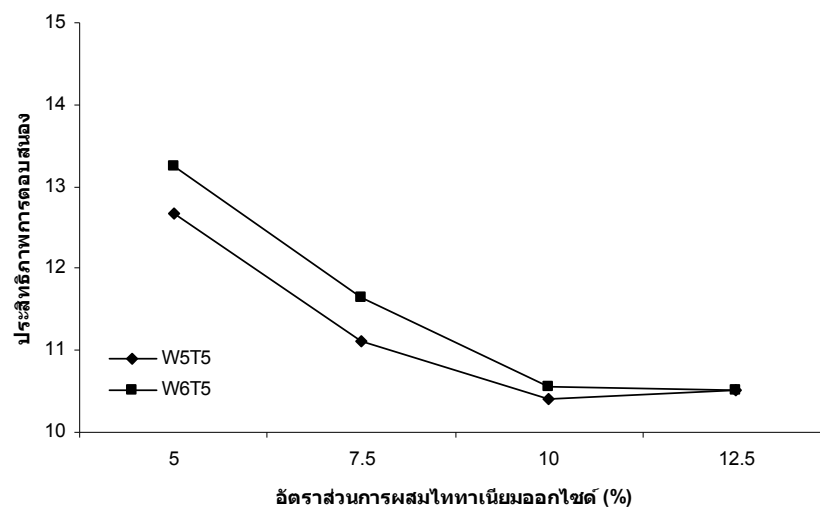
จากผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสรุปได้ว่า ค่าประสิทธิภาพการตอบสนองจะลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนการผสมสารไททานเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้นไม่ว่าอุณหภูมิการเผาแคลไซน์สารเป็นเท่าใดก็ตาม จากการศึกษาของ Siciliano และคณะ (2008) ทดลองวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 100 ppm ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 9.0 หรือการศึกษาวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย ความเข้มข้น 500 ppm ของเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารไททานเนียมออกไซด์ ของ Karunagaran และคณะ (2007) พบว่าประสิทธิภาพการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 7.0 จากผลการทดลองตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสังเกตได้ว่า แก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์หรือไททานเนียมออกไซด์เพียงชนิดเดียวมีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่แตกต่างกันโดยแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากทั้งสเดนออกไซด์มีประสิทธิภาพการตอบสนองสูงกว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากไททานเนียมออกไซด์เล็กน้อย สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์แก๊สเซ็นเซอร์จากสารทั้งสองที่ผสมกันด้วยอัตราส่วนต่างๆ และผลการทดลองที่ได้นั้นพบว่า ที่อัตราส่วนการผสมสารไททานเนียมออกไซด์มากขึ้นประสิทธิภาพการตอบสนอง

ต่อแก๊สแอมโมเนียจะลดลง โดยที่อัตราส่วนการผสมเป็น 95:5 แก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีที่สุด

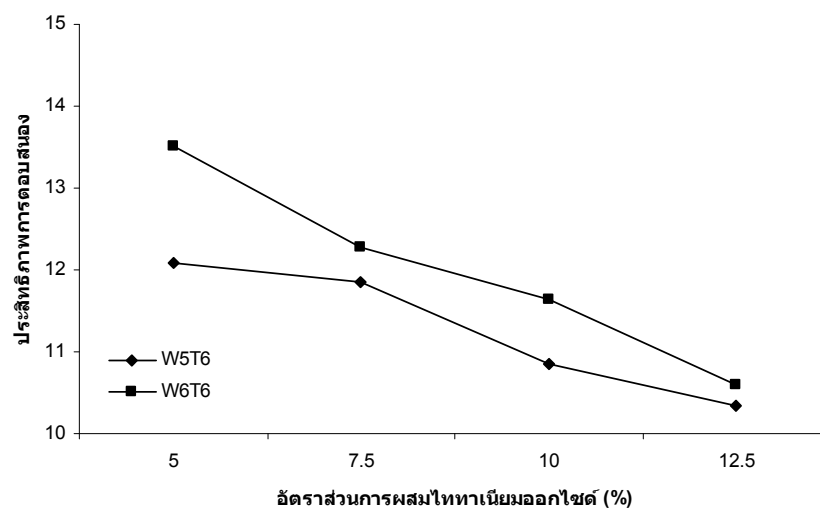
จากผลการทดลองทั้งสามหัวข้อย่อยตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น สรุปได้ว่าแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีอุณหภูมิประมาณ 200°C เช่นเดียวกับแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์หรือสารไททาเนียมออกไซด์เพียงชนิดเดียวที่มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีอุณหภูมิประมาณ 220 และ 250°C ตามลำดับ และแก๊สเซ็นเซอร์ที่ประดิษฐ์จากสารทังสเตนออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C ผสมกับสารไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400°C มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีกว่าการผสมสารที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิอื่น โดยที่อัตราส่วนการผสมสารเป็น 95:5 มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีกว่าที่อัตราส่วนผสมอื่น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการตอบสนองต่อเอทานอลมากที่สุดคือผลของอัตราส่วนในการผสมสาร



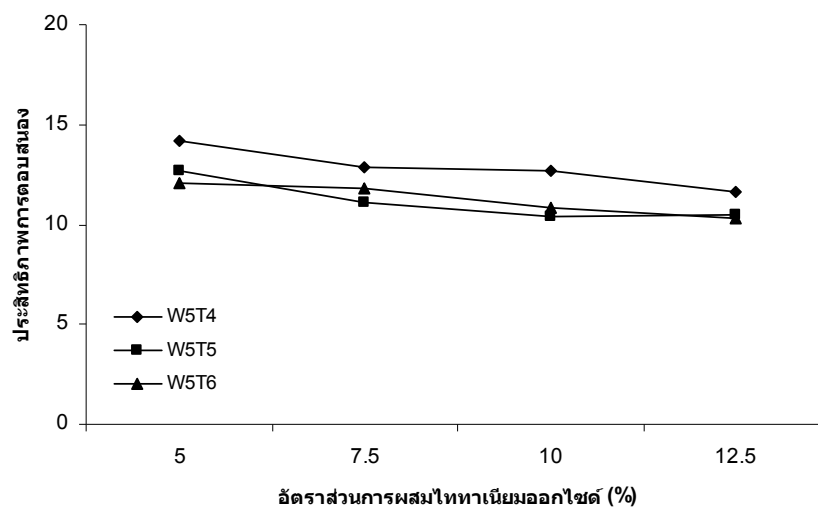
รูปที่ 4.31 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททาเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400°C กับทังสเตนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนในการผสมต่างๆ



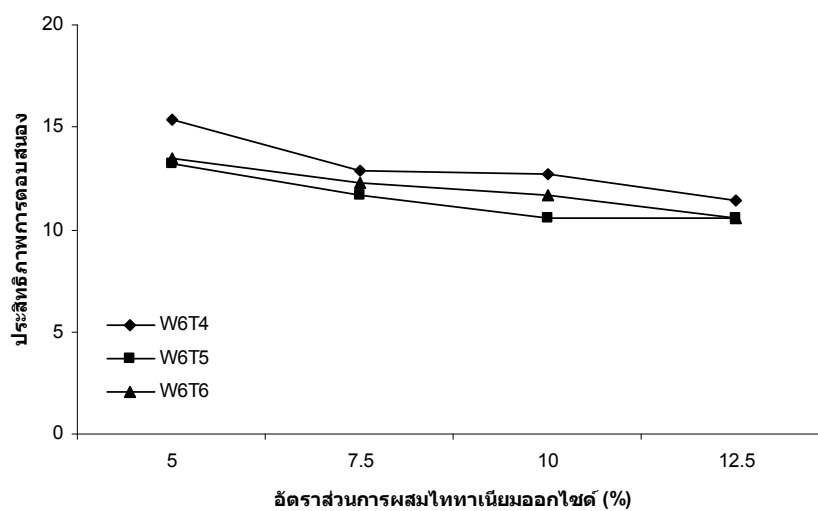
รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เฟาเคลไซน์ 500°C กับทังสเตนออกไซด์เฟาเคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนในการผสมต่างๆ



รูปที่ 4.33 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างไททานเนียมออกไซด์เฟาเคลไซน์ 600°C กับทังสเตนออกไซด์เฟาเคลไซน์ 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนในการผสมต่างๆ



รูปที่ 4.34 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทังสเตนออกไซด์เผาแคลไซน์ 500°C กับไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนในการผสมต่างๆ



รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียความเข้มข้น 400 ppm ที่อุณหภูมิ 200°C ของเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทังสเตนออกไซด์เผาแคลไซน์ 600°C กับไททานเนียมออกไซด์เผาแคลไซน์ 400 500 และ 600°C ด้วยอัตราส่วนในการผสมต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการเตรียมทั้งสแตนออกไซด์ที่เจือด้วยไททาเนียมออกไซด์แก๊สเซ็นเซอร์แบบฟิล์มหนาสำหรับการตรวจวัดแก๊สเอทานอลและแก๊สแอมโมเนีย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพและศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส โดยในส่วนของการศึกษาลักษณะทางกายภาพนั้นได้ศึกษาถึง ลักษณะรูปแบบโครงสร้าง ลักษณะพื้นผิว พื้นที่ผิวจำเพาะ และ สมบัติทางความร้อน ของทั้งสแตนออกไซด์ และไททาเนียมออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีการตกตะกอน และในส่วนของการศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สนั้นได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส 2 ชนิดคือ แก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 500 - 2500 ppm และแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 400 - 3200 ppm ด้วยแก๊สเซ็นเซอร์ชนิดฟิล์มหนาที่ประดิษฐ์จากสารทั้งสแตนออกไซด์ที่ผสมด้วยสารไททาเนียมออกไซด์ โดยที่สารทั้งสองได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน ในอัตราส่วนของสารไททาเนียมออกไซด์เป็น 5 7.5 10 และ 12.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 200 250 และ 300°C ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ

จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ สรุปได้ว่า กรดทั้งสติกที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมทั้งสตกกับกรดไนตริก มีการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วงอุณหภูมิ โดยเกิดเป็นผลึกทั้งสแตนออกไซด์นั้นเกิดที่อุณหภูมิ 500°C และสารทั้งสแตนออกไซด์เมื่อนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 600°C เป็นเวลา 30 นาที มีลักษณะรูปแบบโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก มีพื้นที่ผิวจำเพาะเป็น 22.58 และ 9.61 m²/g ตามลำดับ และไททาเนียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมเตตระคลอไรด์กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ มีการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง

อุณหภูมิ โดยเกิดเป็นผลึกไททาเนียมออกไซด์นั้นเกิดที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 410°C และสารไททาเนียมออกไซด์เฟาเคลไลนที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C เป็นเวลา 30 นาทีนั้น มีลักษณะโครงสร้างเป็นเฟสอนาเทส มีพื้นที่ผิวจำเพาะเป็น 122.5 81.02 และ $56.38 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ

5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล

จากการศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล สรุปได้ว่า แก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 300°C เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลดีกว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250°C โดยแก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์เฟาเคลไลนที่อุณหภูมิ 600°C กับไททาเนียมออกไซด์เฟาเคลไลนที่อุณหภูมิ 400°C ด้วยอัตราส่วนการผสมเป็น 92.5:7.5 มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่สุด มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิ 300°C ความเข้มข้น 500 ppm เป็น 48.31 โดยผลของอัตราส่วนในการผสมสารมีปัจจัยต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลมากที่สุด

5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

จากการศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย สรุปได้ว่า แก๊สเซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 200°C เซ็นเซอร์มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียดีกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300°C โดยแก๊สเซ็นเซอร์ที่ผสมระหว่างทั้งสเดนออกไซด์เฟาเคลไลนที่อุณหภูมิ 600°C กับไททาเนียมออกไซด์เฟาเคลไลนที่อุณหภูมิ 400°C ด้วยอัตราส่วนการผสมเป็น 95:5 มีประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีที่สุด มีค่าประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่อุณหภูมิ 200°C ความเข้มข้น 400 ppm เป็น 15.40 โดยผลของอัตราส่วนในการผสมสารมีปัจจัยต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส ซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคุณสมบัติของแก๊สเซ็นเซอร์ หากได้มีการนำไปศึกษาวิจัยต่อ น่าที่จะศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของคุณสมบัติของแก๊สเซ็นเซอร์ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์และประดิษฐ์เป็นเครื่องวัดแก๊สและสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องเตือนภัยในกรณีเกิดการรั่วไหลของแก๊สได้อีกด้วย อีกทั้งยังสามารถประยุกต์การใช้งานดังกล่าวเพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ (2549). รายงานเหตุฉุกเฉิน/สถานการณ์สำคัญด้านมลพิษ และสิ่งแวดล้อม.
แหล่งที่มา <http://gendb.pcd.go.th/hers/reportBrowse.asp?mainid=22> (15 ตุลาคม 2549)
- . (2549). รายงานเหตุฉุกเฉิน/สถานการณ์สำคัญด้านมลพิษ และสิ่งแวดล้อม.
แหล่งที่มา <http://gendb.pcd.go.th/hers/reportBrowse.asp?mainid=23> (15 ตุลาคม 2549)
- มานะ ศรียุทธศักดิ์ และ สิทธิสุนทร สุโพธิณะ. (2544). รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมฉบับ
สมบูรณ์ : การประดิษฐ์ก๊าซเซนเซอร์จากทั้งสแตนออกไซด์และระบบวัดสำหรับการวัด
สารระเหยอินทรีย์. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- สำนักงานประจำจังหวัดสระบุรี (2550). รายงานการประชุมคณะกรรมการจังหวัดและหัวหน้าส่วน
ราชการรัฐวิสาหกิจจังหวัดสระบุรี. สระบุรี : สำนักงานฯ.
- Campbell, S.A., et al. (1999). “Titanium dioxide (TiO₂)-based gate insulators”. **IBM J.** 43, 3
(May), 383-392.
- Chen, L. & Tsang, S.C. (2003). “Ag doped WO₃-based powder sensor for the detection of NO
gas in air”. **Sensors and Actuators B: Chemical.** 89, 1-2 (March), 68-75.
- Choi, Y.G., et al. (2003). “Wet process-prepared thick films of WO₃ for NO₂ sensing”, **Sensors
and Actuators B: Chemical.** 95, 1-3 (October), 258-265.
- Fang, C.S. & Chen, Y.W. (2003). “Preparation of titania particles by thermal hydrolysis of TiCl₄
in n-propanol solution”. **Materials Chemistry and Physics.** 78, 3 (February),
739-745.
- Gopal Reddy, C.V., et al. (2003). “Selective detection of ethanol vapor using xTiO₂-(1-x)WO₃
based sensor”. **Sensors and Actuators B: Chemical.** 94, 1-2 (August), 99-102.
- Guidi, V., et al. (2000). “Preparation and characterisation of titanium–tungsten sensors” **Sensors
and Actuators B: Chemical.** 65, 1-3 (June), 264-266.
- Haraguchi, M., et al. (2004). “Fabrication and optical characterization of a TiO₂ thin film on a
silica microsphere”. **Surface Science.** 548, 1-3 (January), 59-66.

- Hoel, A., et al. (2004). "Nanomaterials for environmental applications: novel WO_3 -based gas sensors made by advanced gas deposition". **Current Applied Physics**. 4, 5 (August), 547-553.
- Hsiang, H.I. & Lin, S.C. (2004). "Effects of aging on the phase transformation and sintering properties of TiO_2 gels". **Materials Science and Engineering A**. 380, 1-2 (August), 67-72.
- . (2008). "Effects of aging on nanocrystalline anatase-to-rutile phase transformation kinetics". **Ceramics International**. 34, 3 (April), 557-561.
- Hu, Y., Tsai, H.L. & Huang, C.L. (2003). "Phase transformation of precipitated TiO_2 nanoparticles". **Materials Science and Engineering A**. 344, 1-2(March), 209-214.
- Ihokura, K. & Watson J. (1994) "Stannic oxide gas sensor principles and applications", (New York : CRC).
- Ivanov, P., et al. (2004). "Development of high sensitivity ethanol gas sensors based on Pt - doped SnO_2 surfaces". **Sensors and Actuators B: Chemical**. 99, 2-3 (May), 201-206.
- . (2004). "A route toward more selective and less humidity sensitive screen-printed SnO_2 and WO_3 gas sensitive layers". **Sensors and Actuators B: Chemical**. 100, 1-2 (June), 221-227.
- Ivanov, P., **Design, Fabrication and Characterization of Thick-Film Gas Sensors**. (Ph.D., Thesis, Departament d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica I Automàtica, Universitat Rovira I Virgili, 2004).
- Jiménez, I., **Tungsten oxide nanocrystalline powders for gas sensing applications**. (Ph.D., Thesis, Department of electronics, Universitat de Barcelona, 2003).
- Jiménez, I., et al. (2003). "Crystalline structure, defects and gas sensor response to NO_2 and H_2S of tungsten trioxide nanopowders". **Sensors and Actuators B: Chemical**. 93, 1-3 (August), 475-485.
- Kanda, K. & Maekawa, T. (2005). "Development of a WO_3 thick-film-based sensor for the detection of VOC". **Sensors and Actuators B**. 108, 1-2 (July), 97-101.
- Karunagaran, B., et al. (2007). " TiO_2 thin film gas sensor for monitoring ammonia". **Materials Characterization**. 58, 8-9 (August), 680-684.

- Korotcenkov, G. (2007). "Practical aspects in design of one-electrode semiconductor gas sensors: Status report". **Sensors and Actuators B**. 121, 2 (February), 664-678.
- Kumagai, H., et al. (1995). "Fabrication of titanium oxide thin films by controlled growth with sequential surface chemical reactions". **Thin Solid Films**. 263, 1 (July), 47-53.
- Labidi, A., et al. (2006). "Ethanol and ozone sensing characteristics of WO_3 based sensors activated by Au and Pd". **Sensors and Actuators B: Chemical**. 120, 1 (December), 338-345.
- Lemire, C., et al. (2002). "Reactive R.F. magnetron sputtering deposition of WO_3 thin films". **Sensors and Actuators B: Chemical**. 84, 1 (April), 43-48.
- Li, G.L. & Wang, G.H. (1999). "SYNTHESIS OF NANOMETER-SIZED TiO_2 PARTICLES BY A MICROEMULSION METHOD". **Nanostructured Materials**. 11, 5 (August), 663-668.
- Martinelli, G. & Carotta, M.C. (1995). "Thick-film gas sensors" **Sensors and Actuators B: Chemical**. 23, 2-3 (February), 157-161.
- Mosely P.T. & Tofield B.C., "Solid state gas sensors", (Bristol, Arrowsmith J.W. LTD, 1987).
- Pimthong-Ngam, P., Jiemsirilers, S. & Supothina, S. (2007). "Preparation of tungsten oxide-tin oxide nanocomposites and their ethylene sensing characteristics". **Sensors and Actuators A: Physical**. 139, 1-2 (September), 7-11.
- Pintér, Z., et al. (2001). "Thermal behaviour of WO_3 and WO_3/TiO_2 materials". **Thin solid films**. 391, 2 (July), 243-246.
- Rella, R., et al. (2007). "Acetone and ethanol solid-state gas sensors based on TiO_2 nanoparticles thin film deposited by matrix assisted pulsed laser evaporation". **Sensors and Actuators B: Chemical**. 127, 2 (November), 426-431.
- Rohrer, S.G., "Structure and Bonding in Crystalline Materials", 1 (Cambridge, Cambridge University, 2001).
- Shen, Y.C., et al. (1995). "Fabrication, characterization and photovoltaic study of a TiO_2 microporous electrode". **Thin Solid Films**. 257, 1 (February), 144-146.
- Shieh, J., et al. (2002). " WO_3 and $\text{W}^{---}\text{Ti}^{---}\text{O}$ thin-film gas sensors prepared by sol-gel dip-coating". **Sensors and Actuators B: Chemical**. 86, 1 (August), 75-80.

Siciliano, T., et al. (2008). "WO₃ gas sensors prepared by thermal oxidization of tungsten".

Sensors and Actuators B: Chemical. 133, 1 (July), 321-326.

Solis, J.L., et al. (2001). "Nanocrystalline tungsten oxide thick-films with high sensitivity to H₂S at room temperature". **Sensors and Actuators B: Chemical.** 77, 1-2 (June), 316-321.

Srivastava, V. & Jain, K. (2008). "Highly sensitive NH₃ sensor using Pt catalyzed silica coating over WO₃ thick films". **Sensors and Actuators B: Chemical.** 133, 1 (July), 46-52

Supothina, S., et al. (2007). "Synthesis of tungsten oxide nanoparticles by acid precipitation method". **Ceramics International.** 33, 6 (August), 931-936.

Tianshu, Z., et al. (1999). "Selective detection of ethanol vapor and hydrogen using Cd-doped SnO₂ - based sensors". **Sensors and Actuators B.** 60, 2-3 (November), 208-215.

Tomchenko, A.A., et al. (2003). "Semiconducting metal oxide sensor array for the selective detection of combustion gases". **Sensors and Actuators B: Chemical.** 93, 1-3 (August), 126-134.

Tong, M., Dai, G. & Gao, D. (2001). "WO₃ thin film sensor prepared by sol-gel technique and its low-temperature sensing properties to trimethylamine". **Materials Chemistry and Physics.** 69, 1-3 (March), 176-179.

Wang, Y., Chen, J. & Wu, X. (2001). "Preparation and gas-sensing properties of perovskite-type SrFeO₃ oxide". **Materials Letters.** 49, 6 (July), 361-364.

Whittingham, S. M. "In Teaching General Chemistry: A Materials Science Companion", (Ellis, Ed., American Chemical Society, 1993).

Winter, M.J., (2007) **WebElements: the periodic table on the WWW**, Available from http://www.webelements.com/compounds/tungsten/tungsten_trioxide.html, 20 November 2007.

———. (2007) **WebElements: the periodic table on the WWW**, Available from http://www.webelements.com/compounds/titanium/titanium_dioxide.html, 20 November 2007.

Yu-De, W., et al. (2001). "Electrical and gas-sensing properties of WO₃ semiconductor material". **Solid-State Electronics.** 45, 5 (May), 639-644.

- Zhao, L., Han, M. & Lian, J. (2008). "Photocatalytic activity of TiO_2 films with mixed anatase and rutile structures prepared by pulsed laser deposition". **Thin Solid Films**. 516, 10 (March), 3394-3398.
- Zhou, X., et al. (1997). "Metal-semiconductor ohmic contact of SnO_2 -based ceramic gas sensors". **Sensors and Actuators B: Chemical**. 41, 1-3 (June), 163-167.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย สว่าง เก่งเกรียงไกร
วัน เดือน ปี เกิด	8 กุมภาพันธ์ 2521
ประวัติการศึกษา	
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2543 - ปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง