

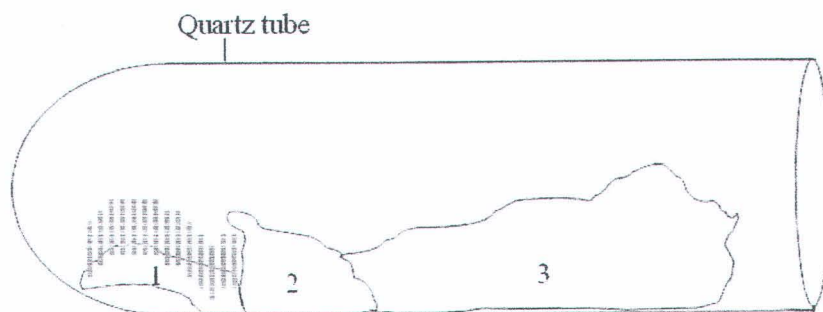
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการสังเคราะห์โครงสร้าง ZnO whiskers ที่เตรียมด้วยวิธีการออกซิเดชันด้วยกล้อง stereo microscope และ SEM เพื่อวิเคราะห์สภาพพื้นผิว รูปร่าง และขนาด ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีได้ใช้เทคนิค EDS และได้นำโครงสร้าง ZnO whiskers แบบ *W-ZnO* ที่สังเคราะห์ขึ้น ไปศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อไอเอทานอล เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เป็นเอทานอลเซนเซอร์ต่อไป โดยมีผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองดังต่อไปนี้

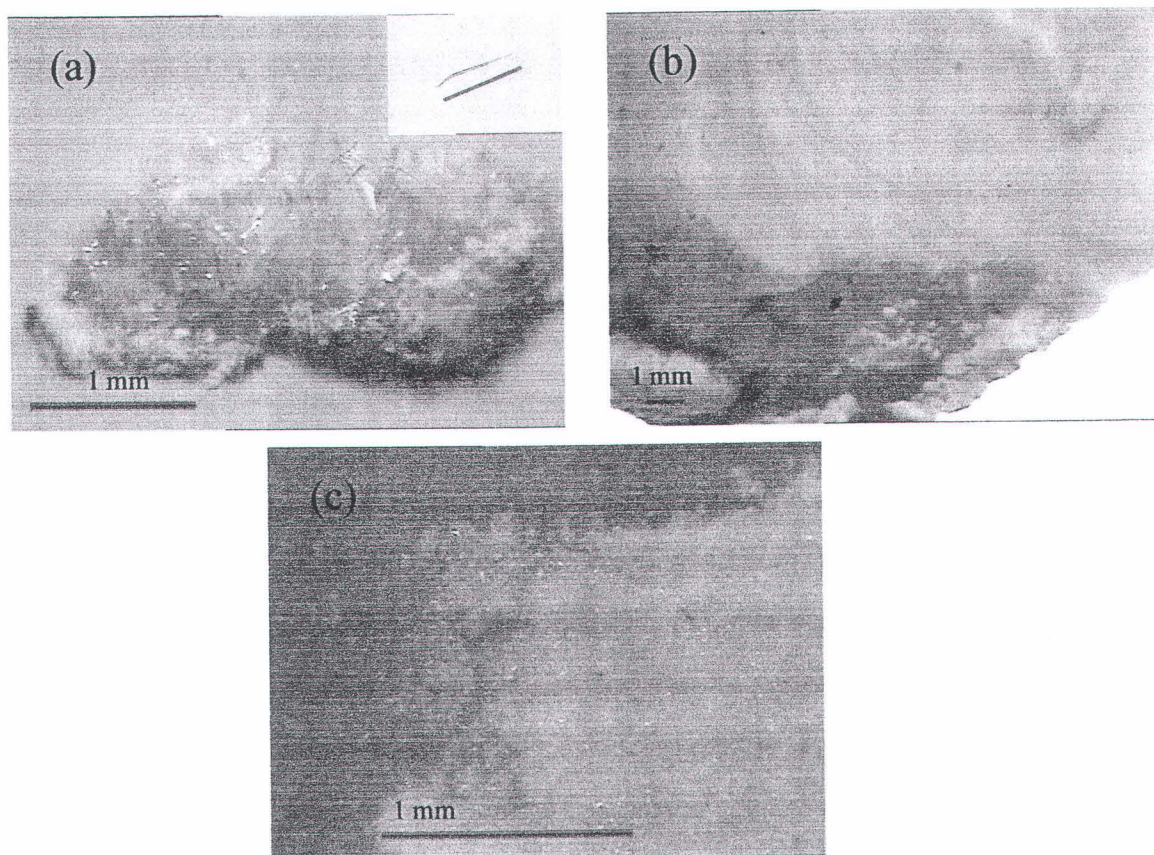
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้อง Stereo Microscope

จากการนำผงซิงก์ปริมาณ 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 และ 6 กรัม มาเผาในท่อควอตซ์ในเตาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้ว พบว่าภายในผนังท่อควอตซ์ถูกปกคลุมไปด้วยชั้นสีขาว และสารที่เกิดขึ้นภายในท่อควอตซ์สามารถแยกได้เป็น 3 ส่วน โดยเรียงลำดับจากกันต่อไปยังปากท่อ ดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง มีลักษณะเป็นเส้นใย ๆ ซึ่งสามารถมองได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ต่อมาส่วนที่สองมีลักษณะเป็นก้อนสีขาว และส่วนที่สามมีลักษณะเป็นปุยสีขาว บริเวณส่วนต่างๆ ภายในท่อแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังของ ZnO whiskers ที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของท่อควอตซ์

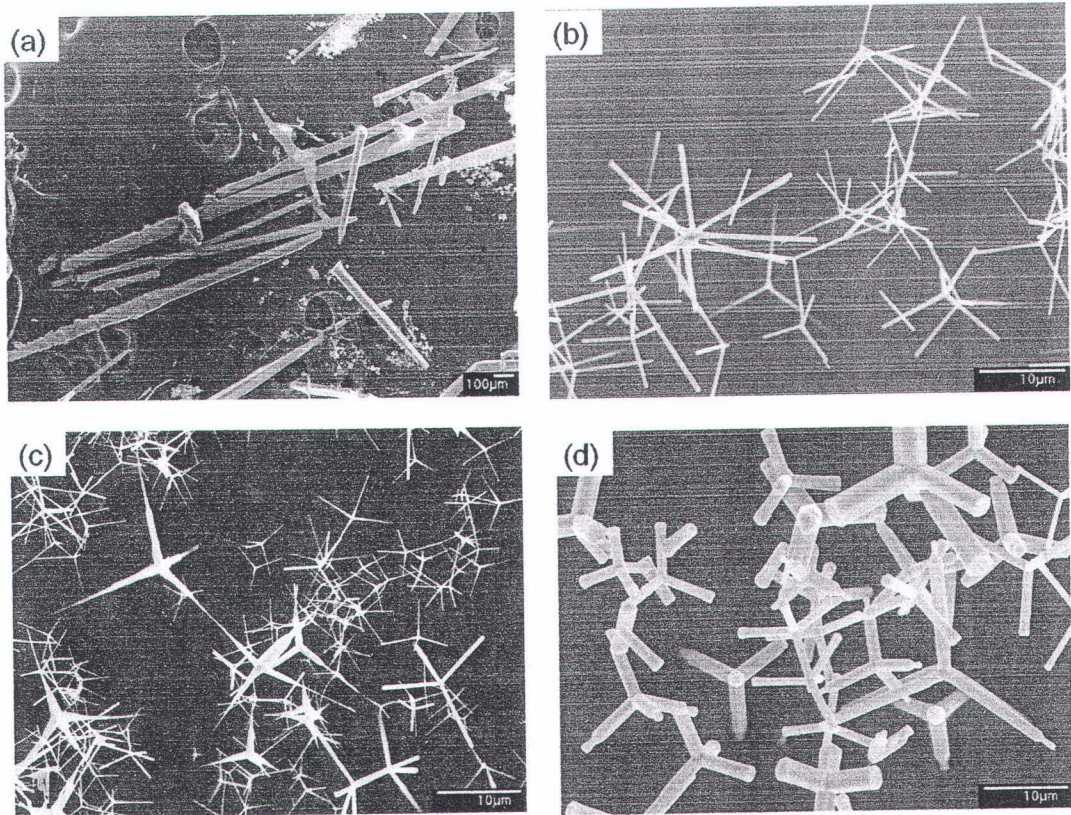
ซึ่งเมื่อนำสารทั้งสามส่วนไปส่องด้วยกล้อง stereo microscope ได้ผลดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ZnO whiskers ที่เกิดขึ้นบริเวณ (a) ส่วนที่ 1, (b) ส่วนที่ 2 และ (c) ส่วนที่ 3

## 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้อง SEM

เมื่อนำสารที่ได้ทั้ง 3 ส่วนไปวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้อง SEM พบว่า ZnO whiskers ที่ได้มีลักษณะแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งความแตกต่างนั้นเป็นในเรื่องของรูปร่าง ขนาด และความสม่ำเสมอของขนาด ZnO whiskers โดยเฉพาะส่วนที่ 3 ที่มีลักษณะเป็นปุยสีขาว ดังรูปที่ 4.2 (c) ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน แต่เมื่อนำวัสดุไปเช็คว่าสารที่ได้มีลักษณะคล้ายกับการแยกชั้น ซึ่งเกิดจากการที่สารหรือ ZnO whiskers ที่ได้มีขนาดไม่เท่ากัน ทั้งหมด โดยผลจาก SEM พบว่าในส่วนที่ 3 นี้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชั้น คือ ชั้นนอก และชั้นใน ซึ่งพบว่าชั้นนอกของส่วนที่ 3 จะมีรูปร่างที่สวยงามกว่าชั้นใน



รูปที่ 4.3 ลักษณะของนาโน ZnO whiskers ที่ได้รับบริเวณส่วนต่างๆ ของสารที่เผาได้ตามเงื่อนไขที่อุณหภูมิ 700°C (a) ส่วนที่ 1 (b) ส่วนที่ 2 (c) ส่วนที่ 3 ชั้นนอก (d) ส่วนที่ 3 ชั้นใน

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ในส่วนที่ 1 ZnO whiskers ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวคล้ายดินสอ (*W-ZnO*) ซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับส่วนอื่นและขนาดก็แตกต่างกัน ซึ่งง่ายต่อการแยกมาใช้งานและการนำผลึกเชิงเดี่ยวมาประยุกต์เป็นเซนเซอร์อาจมีประโยชน์ในการช่วยให้เข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมการทำงานของไอเอทานอล ส่วนที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นก้อนสีขาวที่ค่อนข้างอัดแน่น ประกอบไปด้วย tetrapod whiskers (*T-ZnO*) ที่มีขาเป็นรูปหกเหลี่ยมเท่ากันตั้งแต่โคนจนถึงปลาย ในส่วนที่ 3 จะมีลักษณะคล้ายปุยสีขาวและค่อนข้างพรุน พบว่ามีการแบ่งเป็นสองชั้น โดยชั้นนอกจะมีความหนาประมาณ 1 – 3 mm ซึ่งประกอบไปด้วย *T-ZnO* ที่มีลักษณะปลายแหลม ส่วนชั้นในจะประกอบไปด้วย *T-ZnO* ที่มีขนาดยาวและใหญ่กว่าชั้นนอก และมีขาเป็นรูปหกเหลี่ยมเท่ากันตั้งแต่โคนจนถึงปลายซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุดในบรรดา *T-ZnO* ทั้งหมด

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของ ZnO whiskers ที่สังเคราะห์ได้จากบริเวณต่างๆ ดังกล่าวมาแล้ว พบว่ามีขนาดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของ ZnO whiskers บริเวณต่าง ๆ เเผที่อุณหภูมิ 700°C

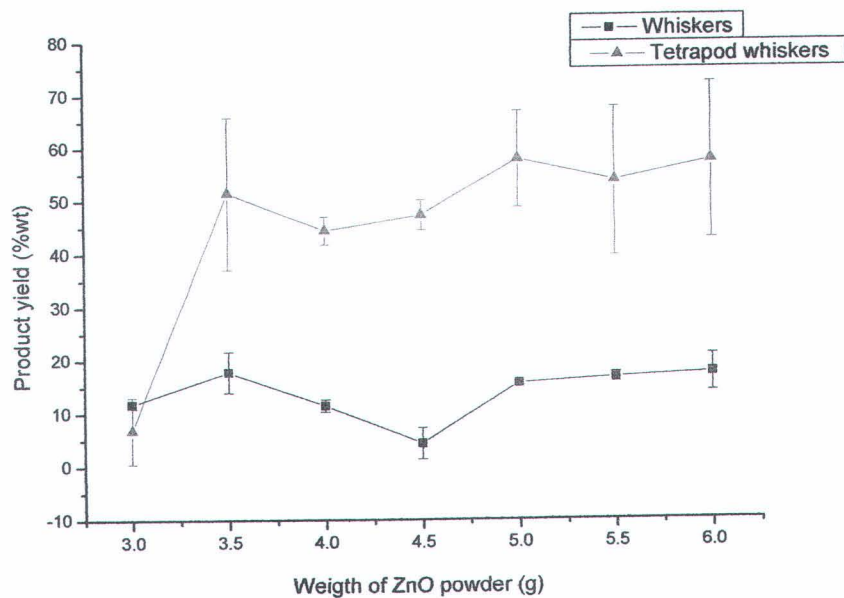
| ส่วนที่    | ประเภท        | ความยาว ( $\mu\text{m}$ ) |                          | เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm) |                          |
|------------|---------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
|            |               | ช่วง ( $\mu\text{m}$ )    | เฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ ) | ช่วง ( $\mu\text{m}$ ) | เฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ ) |
| 1          | <i>W</i> -ZnO | 0.38-4.59 mm              | $1.38 \pm 0.80$ mm       | 30-140                 | $71 \pm 33$              |
| 2          | <i>T</i> -ZnO | 6.17-9.21                 | $7.34 \pm 0.87$          | 0.32-0.66              | $0.49 \pm 0.09$          |
| 3(ชั้นนอก) | <i>T</i> -ZnO | 3.15-8.87                 | $4.77 \pm 1.46$          | โคน<br>0.43-0.97       | โคน<br>$0.66 \pm 0.14$   |
|            |               |                           |                          | ปลาย<br>0.13-0.28      | ปลาย<br>$0.21 \pm 0.05$  |
| 3(ชั้นใน)  | <i>T</i> -ZnO | 4.26-10.63                | $7.21 \pm 1.64$          | 0.67-2.64              | $1.50 \pm 0.65$          |

#### 4.2.1 การศึกษาผลของเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียม ZnO whiskers โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศ

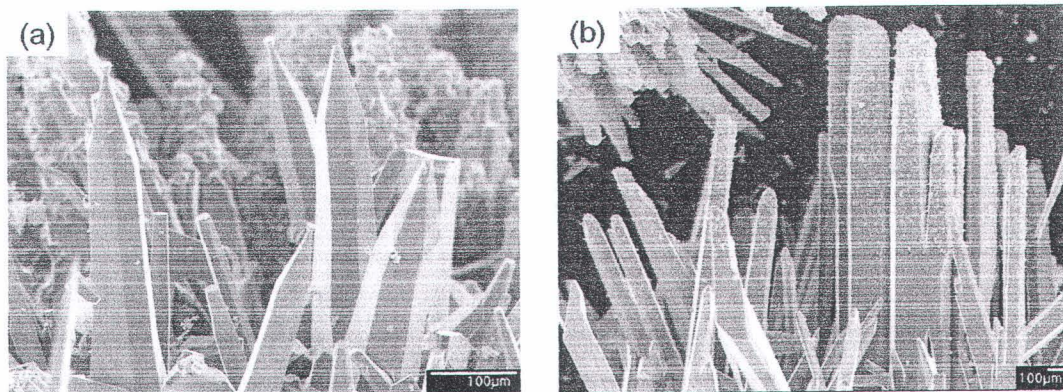
จากการเตรียม ZnO whiskers ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศพบว่า ปริมาณผงซิงก์ที่ใช้เผามีผลต่อปริมาณ ZnO whiskers ที่เกิดขึ้นดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่า *T*-ZnO มีอัตราการเกิดหรือให้ผลผลิตสูงจากผลการคำนวณหาค่าร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์เมื่อใช้สารตั้งต้นตั้งแต่ 3.5 กรัม ขึ้นไป และมีแนวโน้มที่จะคงที่ สำหรับอัตราการเกิดของ *W*-ZnO นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณสารตั้งต้น โดย *W*-ZnO ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นแท่งหกเหลี่ยม ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ปริมาณผงซิงก์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิด *W*-ZnO ที่สม่ำเสมอขึ้นลง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากไปทำให้ความดันไอของซิงก์จะมีค่าสูงขึ้นบริเวณที่เกิด *W*-ZnO ซึ่งทำให้พบอนุภาคเล็ก ๆ จำนวนมากเกาะติดอยู่ที่ผิวของ *W*-ZnO

ตารางที่ 4.2 ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้จากเงื่อนไขต่างๆ

| น้ำหนักผงสังกะสี<br>(g) | ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้ |                 |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------|
|                         | <i>W</i> -ZnO                   | <i>T</i> -ZnO   |
| 3.0                     | $11.8 \pm 0.7$                  | $6.9 \pm 6.3$   |
| 3.5                     | $17.8 \pm 3.8$                  | $51.6 \pm 14.4$ |
| 4.0                     | $11.5 \pm 1.1$                  | $44.5 \pm 2.6$  |
| 4.5                     | $4.3 \pm 2.9$                   | $47.3 \pm 2.8$  |
| 5.0                     | $15.6 \pm 0.4$                  | $57.9 \pm 9.1$  |
| 5.5                     | $16.7 \pm 0.9$                  | $53.7 \pm 14.1$ |
| 6.0                     | $17.5 \pm 3.5$                  | $57.5 \pm 14.8$ |



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของปริมาณผงสังกะสีต่อปริมาณร้อยละของ ZnO whiskers ที่เกิดขึ้น

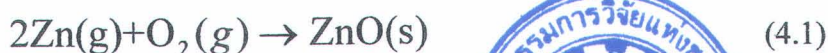


รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของ *W-ZnO* ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณผงซิงก์ที่น้ำหนักต่างๆ  
(a) ผงซิงก์ 3.5 กรัม (b) ผงซิงก์ 5.0 กรัม

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นว่าในเงื่อนไขที่ใช้ผงซิงก์ในปริมาณน้อยที่ 3.5 กรัม จะทำให้ได้รูปร่างของ *W-ZnO* ที่สม่ำเสมอและให้ค่าร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สุด คือ ร้อยละ  $17.8 \pm 3.8$  โดยน้ำหนัก ซึ่งเหมาะสำหรับคัดเลือก *W-ZnO* ไปประยุกต์เป็นเอทานอล เซนเซอร์

#### 4.2.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของ ZnO whiskers ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศ

จากเงื่อนไขทั้งหมดที่ได้ทำการทดลอง ลักษณะโดยรวมทางกายภาพของ ZnO whiskers ที่ได้จะมีอยู่ 2 ประเภทคือ *W-ZnO* และ *T-ZnO* ซึ่ง *W-ZnO* จะมีลักษณะเป็นแท่งหกเหลี่ยมคล้ายดินสอ ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังรูปที่ 4.2 (a) ส่วน *T-ZnO* จะมีสีเขนหรือขุ่นออกมาในทิศทางทั้งสี่โดยสมมาตร 4.3 (b) - (d) เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นลักษณะปุกปุยคล้ายปุยขนหรือสำลี ดังรูปที่ 4.2 (c) จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าสาเหตุที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันนั้นสืบเนื่องมาจากกลไกการโต (growth mechanism) ดังสมการที่ 2.1 โดยที่สิ่งสำคัญที่สุดของการเกิดโครงสร้าง ZnO whiskers เป็นผลมาจากการที่ผงซิงก์เกิดการออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน ดังสมการ



ในการทดลอง Zn ในสถานะก๊าซสามารถเกิดขึ้นได้จากการเผาโลหะ Zn ที่อุณหภูมิ 700 °C ซึ่งมีค่ามากกว่าจุดหลอมเหลวของ Zn ทำให้ Zn metal กลายมาเป็น Zn ในสถานะของเหลวและ Zn ในสถานะก๊าซ ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นภายในท่อควอตซ์ ในส่วนของออกซิเจนที่ต้องการในการทำปฏิกิริยานั้นมาจาก O<sub>2</sub> บางส่วนที่อยู่ในท่อควอตซ์ตอนเริ่มต้นและ O<sub>2</sub> ที่จะเข้าทางปากท่อเท่านั้น เมื่อเป็นเช่นนี้ O<sub>2</sub> concentration บริเวณปากท่อก็จะมีค่ามากกว่าบริเวณด้านในสุดของท่อ ดังนั้น supersaturation ratio ของ ZnO<sub>(g)</sub> (ZnO ที่ยังไม่ตกผลึกหรือเรียกว่า ไอของ ZnO) บริเวณปากท่อก็จะมากกว่าด้านในสุดของท่อ ด้วยเหตุนี้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงขึ้นอยู่กับ supersaturation ratio ของ ZnO<sub>(g)</sub> ในบริเวณต่างๆ ของท่อควอตซ์ ซึ่งจากสมการที่ 2.1 [21, 33, 34, 35] พบว่า ถ้าค่า supersaturation ratio มีค่าน้อยๆ จะทำให้เกิดโครงสร้าง nanowires และถ้าค่า supersaturation ratio มีค่ามาก ๆ จะทำให้เกิดโครงสร้าง tetrapod whiskers เพราะฉะนั้น

ส่วนที่ 1 ด้านในสุดจะได้สารที่มีโครงสร้างเป็นเส้น (W-ZnO) เนื่องจากค่า supersaturation ratio มีค่าน้อย และสาเหตุที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากเผานาน จึงทำให้โครงสร้างนาโนกลายเป็นมาโคร

ส่วนที่ 2 ตรงกลางมีโอกาสเกิดเป็น T-ZnO เนื่องจากเกิดการควบแน่นของ ZnO<sub>(g)</sub> ในอากาศแล้วตกลงมาและไม่มี Zn ของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นฐานในการเกิด nanowires เพราะฉะนั้นจึงเกิดเป็น tetrapod ก่อน แล้วจึงค่อย ๆ โตเป็น whisker ในแต่ละขา ในบริเวณนี้ค่า supersaturation ratio จะมีค่าปานกลาง แต่ก็มากพอที่จะทำให้เกิดเป็น T-ZnO

ส่วนที่ 3 จะค่า supersaturation ratio มาก เนื่องจากเป็นส่วนที่อยู่ใกล้ปากท่อ ดังนั้นไอของ Zn จึงมีโอกาสเจอกับ O<sub>2</sub> มากที่สุดจึงเกิดเป็น T-ZnO ได้ง่ายที่สุด สำหรับขนาดที่แตกต่างกันของชั้นในกับชั้นนอกนั้น เนื่องมาจากเวลาในการเผา นั่นคือ ชั้นในจะเกิดขึ้นก่อนและเกิดการโตอย่างต่อเนื่อง

#### 4.2.3 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเอทานอลเซนเซอร์ที่ประยุกต์มาจาก W-ZnO เมื่อเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ

หลังจากที่ทำการสังเคราะห์และคัดเลือก W-ZnO เพื่อนำมาประกอบเป็นเซนเซอร์เอทานอลโดยการติดลงบนแผ่นรองรับที่ทำมาจากอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ส่วนเงื่อนไขที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเซนเซอร์เอทานอลที่ทำมาจาก W-ZnO และเซนเซอร์เอทานอลที่ทำมาจาก

*W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ ซึ่งลักษณะสีของเซนเซอร์เอทานอลที่ทำมาจาก *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีชมพู

ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของเซนเซอร์เอทานอลที่ได้ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 น้ำหนักของสารที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์เอทานอล

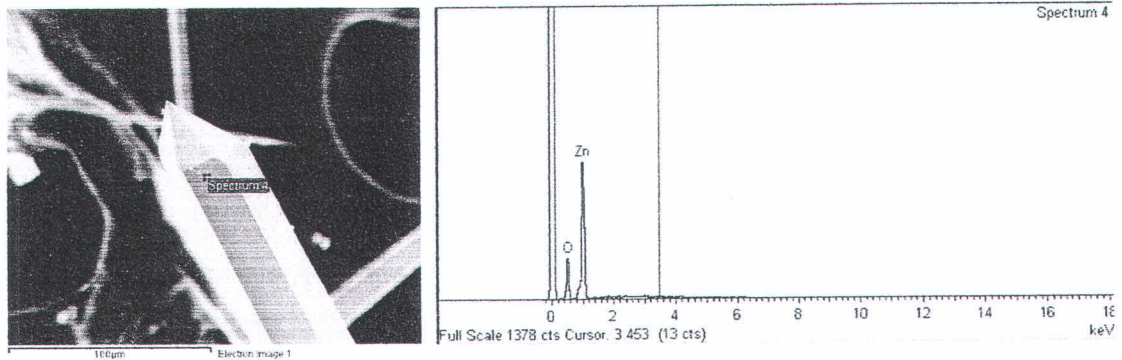
| ตัวอย่าง | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>substrate<br>(g) | <i>W</i> -ZnO<br>(μg) | น้ำหนักเฉลี่ย<br>(μg) | 0.1%mol<br>ของอนุภาค<br>ทองคำนาโน<br>(μl) |
|----------|----------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------------|
| 1        | ~ 0.0360                                           | 118                   | ~ 119                 | -                                         |
| 2        |                                                    | 120                   |                       | -                                         |
| 3        |                                                    | 120                   |                       | -                                         |
| 4        |                                                    | 120                   |                       | 4.85                                      |
| 5        |                                                    | 118                   |                       | 4.76                                      |
| 6        |                                                    | 115                   |                       | 4.64                                      |

จากตารางที่ 4.3 พบว่า น้ำหนักของ *W*-ZnO ในแต่ละตัวอย่างจะมีค่าที่ไม่ต่างกันโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 119 μg ซึ่งได้ควบคุมระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่จะใช้ทำเป็นเซนเซอร์เอทานอลให้เท่ากัน ทั้งนี้หากระยะแตกต่างกันไปมากอาจส่งผลต่อค่าความไวต่อไอของเซนเซอร์เอทานอลได้ในเรื่องของพื้นที่การเข้าทำปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นผิว ส่วนเซนเซอร์เอทานอลที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเจือด้วยปริมาณที่น้อยมากจึงไม่ส่งผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเซนเซอร์เอทานอล โดยปริมาณการเจืออยู่ที่ปริมาณ 0.1 %mol

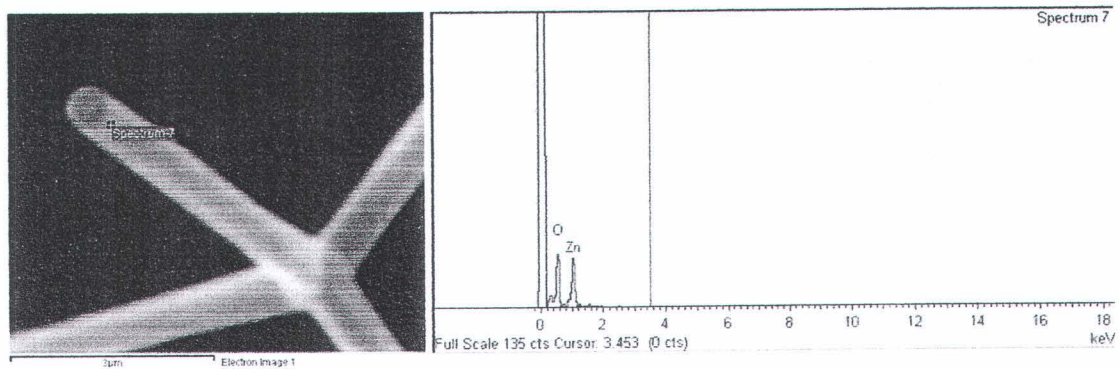
#### 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง EDS

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของโครงสร้าง ZnO whiskers แล้วได้นำมาศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS เพื่อยืนยันว่า สารที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างของซิงก์ออกไซด์จริงอยู่หรือไม่ และเซนเซอร์เอทานอลที่ทำจาก *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโน

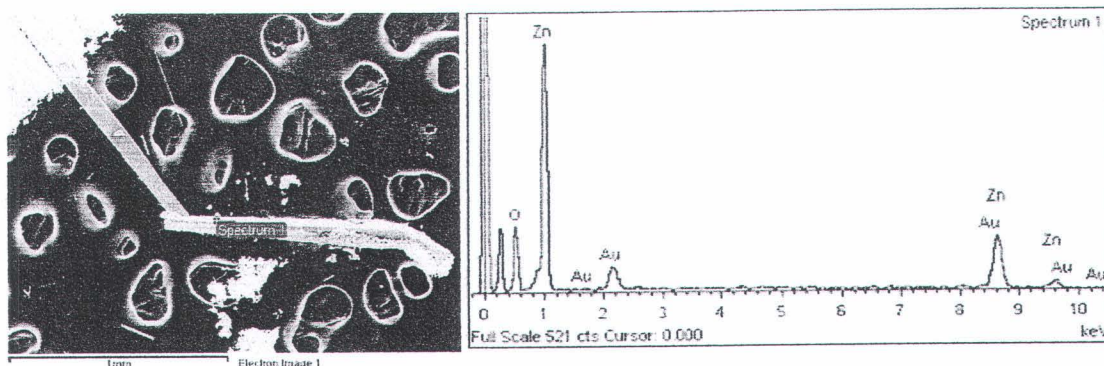
ของทองคำ มีทองคำเจืออยู่จริงหรือไม่ ซึ่งสรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างของสารที่ทดลองดังรูปที่ 4.6-4.8 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งและสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ของโครงสร้าง  $W-ZnO$  ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งและสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ของโครงสร้าง  $W-ZnO$  ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งและสเปกตรัมการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDS ของโครงสร้าง *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ

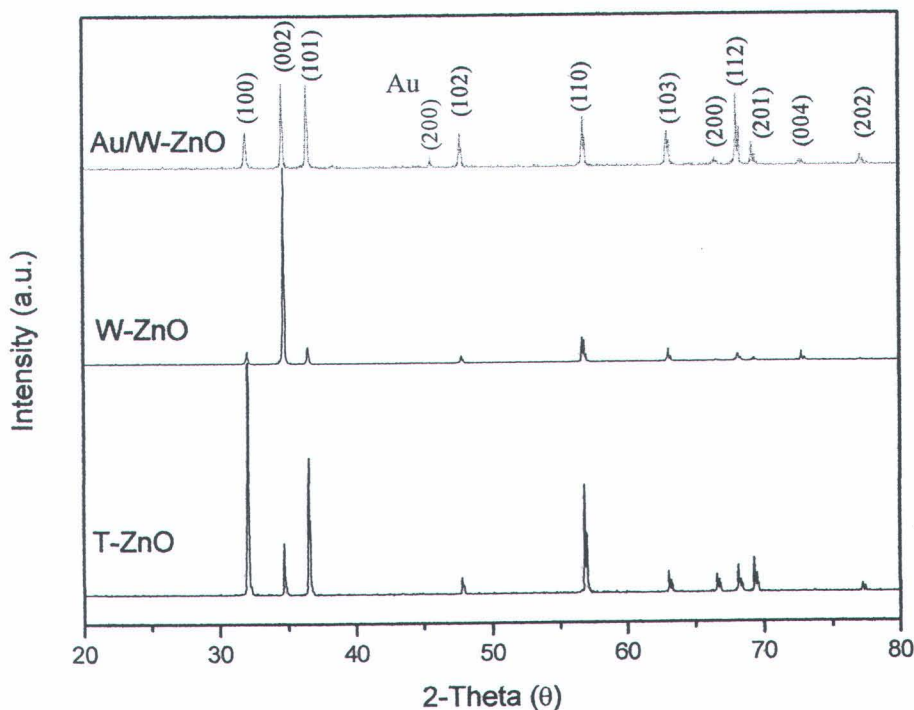
ตารางที่ 4.4 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้าง ZnO whiskers และโครงสร้าง ZnO whiskers ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ

| Element | Atomic (%)                       |                                  |                                    | Weight (%)                       |                                  |                                    |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|         | 0%<br>mol<br>Au<br><i>W</i> -ZnO | 0%<br>mol<br>Au<br><i>T</i> -ZnO | 0.1%<br>mol<br>Au<br><i>W</i> -ZnO | 0%<br>mol<br>Au<br><i>W</i> -ZnO | 0%<br>mol<br>Au<br><i>T</i> -ZnO | 0.1%<br>mol<br>Au<br><i>W</i> -ZnO |
| Zn      | 47.65                            | 44.19                            | 61.80                              | 79.25                            | 76.41                            | 80.77                              |
| O       | 52.35                            | 55.81                            | 36.26                              | 20.75                            | 23.59                            | 11.60                              |
| Au      | -                                | -                                | 1.94                               | -                                | -                                | 7.63-                              |
| Total   | 100                              |                                  |                                    | 100                              |                                  |                                    |

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้าง ZnO whiskers ทั้งแบบ *W*-ZnO และ *T*-ZnO ที่สังเคราะห์ได้โดย EDS พบว่าโครงสร้างที่สังเคราะห์ได้ประกอบไปด้วย ธาตุซิงก์ (Zn) และออกซิเจน (O) เท่านั้น แสดงว่า *W*-ZnO, *T*-ZnO ที่สังเคราะห์ได้เป็นซิงก์ออกไซด์จริง สำหรับในโครงสร้าง *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol จะพบฟลักของทองคำปรากฏขึ้นด้วย สรุปได้ว่ามีองค์ประกอบของทองคำในโครงสร้าง *W*-ZnO ที่สังเคราะห์และนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นเซนเซอร์เอทานอล

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกด้วย XRD

การศึกษาโครงสร้างทางผลึกด้วย XRD โดยใช้ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ( $\lambda$ ) เท่ากับ 1.54056 Å ผลการวิเคราะห์ที่ได้ พบว่า สารที่สังเคราะห์เป็นซิงก์ออกไซด์โดยได้เทียบกับข้อมูลมาตรฐานของ Joint Committee on Power Diffraction Standard (JCPDS)-International Centre for Diffraction Data เพื่อยืนยันผลที่อ่านได้ ซึ่งผลทั้งหมดที่ปรากฏขึ้นดังรูปที่ 4.9 พบว่าโครงสร้างของ *W*-ZnO ที่ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ hexagonal เทียบกับ ZnO no. 89-0510 JCPDS ค่า lattice parameter  $a = 3.2493$  Å และ  $c = 5.2052$  Å โครงสร้าง *T*-ZnO ที่ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ hexagonal เทียบกับ ZnO no. 89-0510 JCPDS ค่า lattice parameter  $a = 3.2480$  Å และ  $c = 5.2050$  Å และเมื่อวิเคราะห์ *W*-ZnO ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol เทียบกับ Gold no. 04-0784 JCPDS ซึ่งปรากฏผลของทองคำ ซึ่งค่า lattice parameter  $a = 3.2511$  Å และ  $c = 5.2087$  Å การปรากฏขึ้นเพียงเล็กน้อยของผลึกของทองคำอาจเนื่องด้วยปริมาณการเจือที่น้อยมากๆ เมื่อเทียบกับปริมาณของ *W*-ZnO สรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.5-4.7



รูปที่ 4.9 *T*-ZnO เทียบกับ ZnO no. 89-0510 JCPDS

ตารางที่ 4.5 ค่า lattice parameter จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของ *W*-ZnO

| Conditions | 2 Theta | d-spacing | The lattice parameter |        |                             |        |                 |        |
|------------|---------|-----------|-----------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------|--------|
|            |         |           | ผลการวิเคราะห์        |        | JCPDS<br>ZnO<br>no. 89-0510 |        | ความคลาดเคลื่อน |        |
|            |         |           | a (Å)                 | c (Å)  | a (Å)                       | c (Å)  | a               | c      |
| W-ZnO      | 32.067  | 2.7889    | 3.2493                | 5.2052 | 3.2480                      | 5.2050 | 0.04%           | 0.004% |
|            | 34.736  | 2.5805    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 36.534  | 2.4575    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 47.808  | 1.9010    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 56.693  | 1.6224    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 63.099  | 1.4722    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 66.687  | 1.4014    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 68.197  | 1.3740    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 69.346  | 1.3540    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 72.799  | 1.2981    |                       |        |                             |        |                 |        |
|            | 77.178  | 1.2350    |                       |        |                             |        |                 |        |

ตารางที่ 4.6 ค่า lattice parameter จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของ T-ZnO

| Conditions | 2 Theta | d-spacing | The lattice parameter |        |                             |        |                 |       |
|------------|---------|-----------|-----------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------|-------|
|            |         |           | ผลการวิเคราะห์        |        | JCPDS<br>ZnO<br>no. 89-0510 |        | ความคลาดเคลื่อน |       |
|            |         |           | a (Å)                 | c (Å)  | a (Å)                       | c (Å)  | a               | c     |
| T-ZnO      | 32.074  | 2.7884    | 3.2510                | 5.2089 | 3.2480                      | 5.2050 | 0.09%           | 0.07% |
|            | 34.723  | 2.5814    |                       |        |                             |        |                 |       |
|            | 36.553  | 2.4563    |                       |        |                             |        |                 |       |
|            | 47.803  | 1.9012    |                       |        |                             |        |                 |       |
|            | 56.834  | 1.6187    |                       |        |                             |        |                 |       |
|            | 63.082  | 1.4725    |                       |        |                             |        |                 |       |
|            | 66.602  | 1.4030    |                       |        |                             |        |                 |       |
|            | 68.181  | 1.3743    |                       |        |                             |        |                 |       |
|            | 69.314  | 1.3546    |                       |        |                             |        |                 |       |
|            | 77.189  | 1.2348    |                       |        |                             |        |                 |       |

ตารางที่ 4.7 ค่า lattice parameter จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ของ Au/W-ZnO

| Au/W-ZnO   |         |           | The lattice parameter |        |                                            |        |                 |       |
|------------|---------|-----------|-----------------------|--------|--------------------------------------------|--------|-----------------|-------|
| Conditions | 2 Theta | d-spacing | ผลการวิเคราะห์        |        | JCPDS<br>ZnO no. 89-0510<br>Au no. 04-0784 |        | ความคลาดเคลื่อน |       |
|            |         |           | a (Å)                 | c (Å)  | a (Å)                                      | c (Å)  | a               | c     |
| W-ZnOG     | 31.968  | 2.7973    | 3.2495                | 5.2087 | 3.2480                                     | 5.2050 | 0.05%           | 0.07% |
|            | 34.640  | 2.5874    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 36.465  | 2.4620    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 47.727  | 1.9040    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 56.760  | 1.6206    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 63.000  | 1.4743    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 66.614  | 1.4028    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 68.106  | 1.3756    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 69.232  | 1.3560    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 72.711  | 1.2994    |                       |        |                                            |        |                 |       |
| 77.135     | 1.2356  |           |                       |        |                                            |        |                 |       |
| Gold       | 38.351  | 2.3452    | 4.1371                | -      | 4.0780                                     | -      | 1.05%           | -     |
|            | 45.600  | 1.9878    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 64.515  | 1.4432    |                       |        |                                            |        |                 |       |
|            | 77.382  | 1.2322    |                       |        |                                            |        |                 |       |

สำหรับ W-ZnO ค่า lattice parameter a และ c ที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS no. 89-0510,  $a = 3.2493 \text{ Å}$  และ  $c = 5.2052 \text{ Å}$ ) เพียงเล็กน้อย จากตารางที่ 4.5 มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.04% และ 0.004 ตามลำดับ ส่วน Au/W-ZnO ในตารางที่ 4.7 มีความคลาดเคลื่อน 0.05% และ 0.07% ตามลำดับ

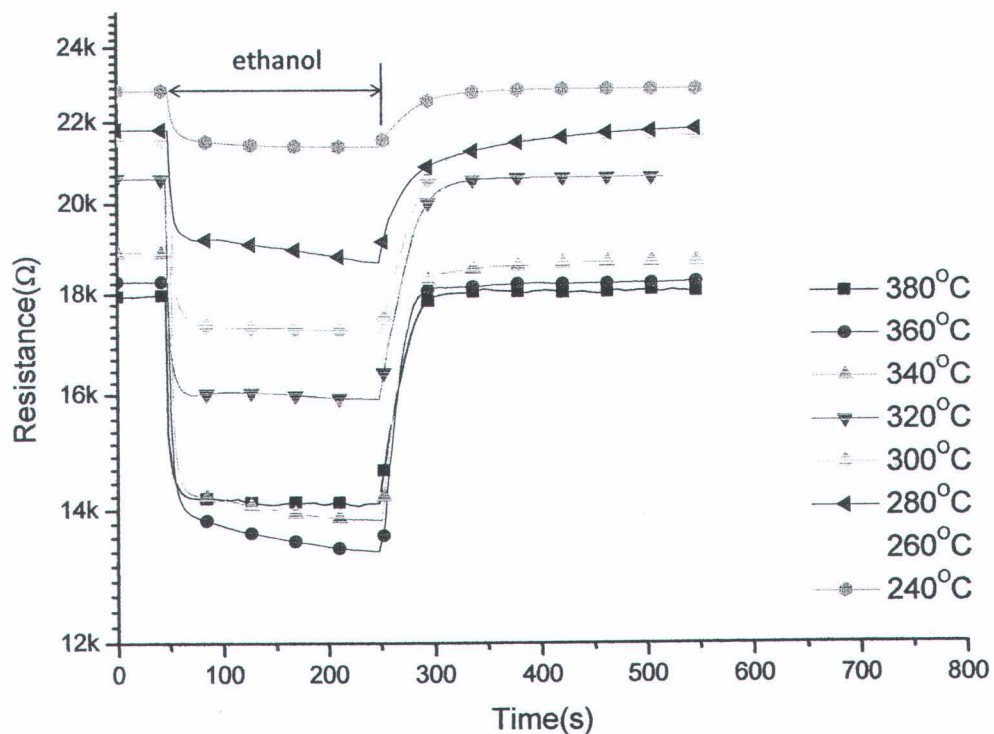
สำหรับ T-ZnO ค่า lattice parameter a และ c ของแต่ละพอดที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS no. 89-0510,  $a = 3.2493 \text{ Å}$  และ  $c = 5.2052 \text{ Å}$ ) เพียงเล็กน้อย จากตารางที่ 4.6 มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.09% และ 0.07% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมี EDS ของ Au/W-ZnO พบว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์อะตอมของ Au มีค่าประมาณ 1.94% ซึ่งมีน้อย แต่ในส่วนของ Zn และ O มีค่าประมาณ 61.80% และ 36.26% ตามลำดับ ตามตารางที่ 4.4 จึงถือได้ว่า Au มีปริมาณน้อยจึงทำให้พีคของ XRD ที่ได้ไม่ค่อยชัดเจน

## 4.5 ผลการศึกษาสมบัติการตรวจจักษ์ก๊าซของเซนเซอร์เอทานอลที่ใช้ $W-ZnO$ เป็นฐาน

### 4.5.1 ผลการทดสอบไอเอทานอลของเซนเซอร์เอทานอลที่ใช้ $W-ZnO$ เป็นฐาน

นำ  $W-ZnO$  เผาที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  มาประกอบเป็นเซนเซอร์เอทานอลและนำมาทดสอบกับไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 50-1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่  $240 - 380^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เวลาในการปล่อยไอเอทานอล 200 วินาที ดังรูปที่ 4.10 พบว่าที่อุณหภูมิทดสอบ  $340^{\circ}\text{C}$  เซนเซอร์เอทานอลมีความต้านทานเริ่มต้นที่ค่อนข้างต่ำอยู่ในระดับโอห์ม และความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้ได้ค่าสภาพไวค่อนข้างต่ำตามไปด้วย โดยค่าความไวที่ได้มีค่าสูงสุดประมาณ 1.369 ที่ไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm รวมถึงมีเวลาในการตอบสนอง (response time) และเวลาในการคืนตัวกลับ (recovery time) ที่ค่อนข้างเร็ว ดังตารางที่ 4.8



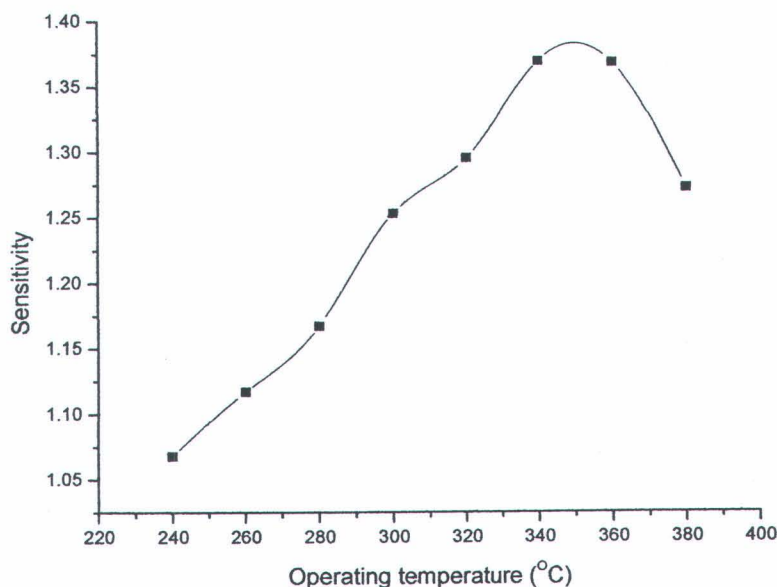
รูปที่ 4.10 การตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  เป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ

ตารางที่ 4.8 สภาพไว เวลาในการตอบสนอง และเวลาในการคืนตัวกลับที่ไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้ *W-ZnO* เป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ

| Operating temperature (°C) | Sensitivity ( $R_a/R_g$ ) | Response time (s) | Recovery time (s) |
|----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| 240                        | 1.068                     | 34.60             | 72.98             |
| 260                        | 1.117                     | 17.88             | 90.30             |
| 280                        | 1.167                     | 108.87            | 89.00             |
| 300                        | 1.253                     | 11.81             | 69.31             |
| 320                        | 1.295                     | 7.59              | 50.37             |
| 340                        | 1.369                     | 11.41             | 37.31             |
| 360                        | 1.367                     | 6.88              | 33.41             |
| 380                        | 1.272                     | 8.97              | 37.85             |

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความไวจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจนถึงระดับหนึ่งค่าความไวจะเริ่มลดลง ซึ่งค่าความไวที่ได้อาจจะไม่แตกต่างกันมากนักที่สำคัญ แต่ก็แสดงให้เห็นว่ามีอุณหภูมิที่เหมาะสมค่าหนึ่งที่ทำให้เอทานอลเซนเซอร์มีการตอบสนองได้ดีที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองค่าความไวต่อการตอบสนองสูงที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 340°C มีค่าเวลาในการตอบสนอง 11.41 วินาที และมีค่าเวลาในการคืนตัว 37.31 วินาที

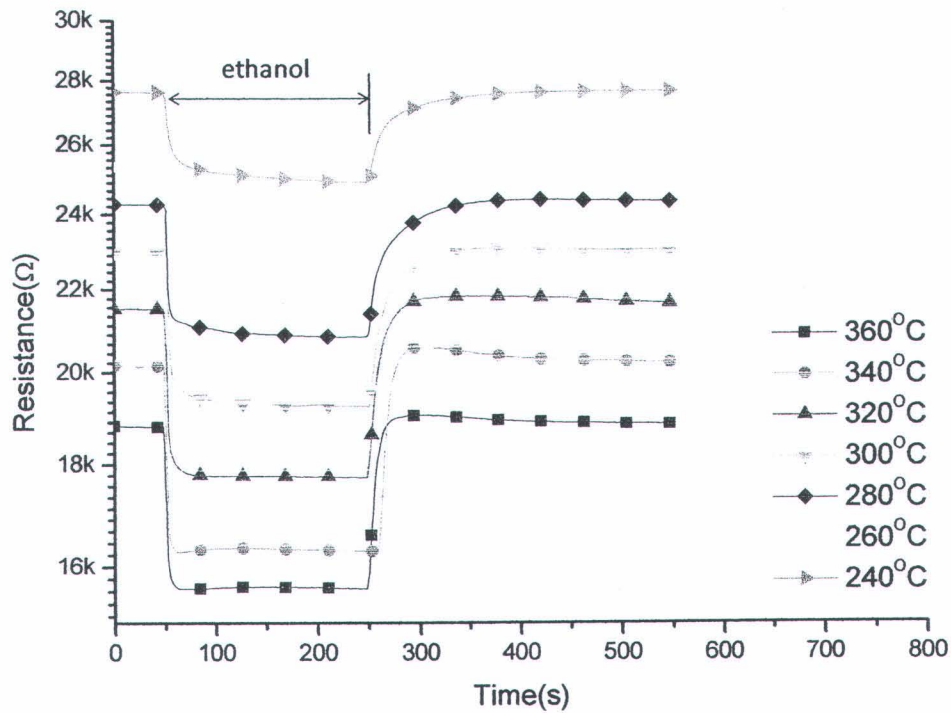
เมื่อพิจารณาค่าเวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนตัวของเอทานอลเซนเซอร์จะเห็นว่าในช่วงหนึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนตัวของเอทานอลเซนเซอร์มีแนวโน้มของเวลาที่ใช้น้อยลง จากค่าเวลาในการตอบสนองของเอทานอลเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 360°C มีค่าเวลาในการตอบสนองเร็วที่สุดคือ 6.88 วินาที ส่วนเวลาในการคืนตัวมีที่อุณหภูมิ 360°C มีค่าเวลาน้อยที่สุด คือ 33.41 วินาที แต่เมื่อพิจารณาค่าความไวต่อไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 340°C มีค่าสูงที่สุดและเวลาในการตอบสนองกับเวลาในการคืนตัวเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิอื่นๆ ไม่ต่างกันมากนัก ดังนั้นที่อุณหภูมิ 340°C ถือได้ว่ามีความเหมาะสมที่สุดที่จะเลือกใช้อุณหภูมินี้เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด เมื่อนำค่าความไวต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm มาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ค่าสภาพไวต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้ *W-ZnO* เป็นฐาน

#### 4.5.2 ผลการทดสอบไอเอทานอลของเซนเซอร์เอทานอลที่ใช้ *W-ZnO* เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเป็นฐาน

เมื่อนำเซนเซอร์เอทานอลที่ใช้ *W-ZnO* เป็นฐานเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.5.1 แต่ทำการเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำในปริมาณ 0.1%mol มาทดสอบกับไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 50-1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 240-360°C โดยใช้เวลาในการปล่อยไอเอทานอล 200 วินาที ดังรูปที่ 4.12 พบว่าเซนเซอร์เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำมีความต้านทานเริ่มต้นที่สูงกว่าเซนเซอร์ที่ไม่ได้เจือเล็กน้อย ที่อุณหภูมิทดสอบ 340°C ซึ่งความต้านทานเริ่มต้นมีค่าที่ค่อนข้างต่ำอยู่ในระดับกิโลโอห์มเช่นเดียวกัน และความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ทำให้ได้ค่าความไวค่อนข้างต่ำตามไปด้วย ซึ่งพบว่าความเมื่อเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำจะทำค่าความไวต่อไอเอทานอลของเซนเซอร์เอทานอลมีค่าลดลงเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากในช่วงที่เซนเซอร์ได้รับไอเอทานอล ความต้านทาน  $R_g$  ของเซนเซอร์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำจะมีความต้านทานที่สูงกว่าตอนที่ไม่ได้เจือ ทำให้ค่าความไวมีค่าต่ำลงโดยค่าความไวที่ได้มีค่าสูงสุดประมาณ 1.236 ที่ไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm รวมถึงมีเวลาในการตอบสนอง (response time) และเวลาในการคืนตัวกลับ (recovery time) ที่ค่อนข้างเร็ว ดังแสดงในตารางที่ 4.9



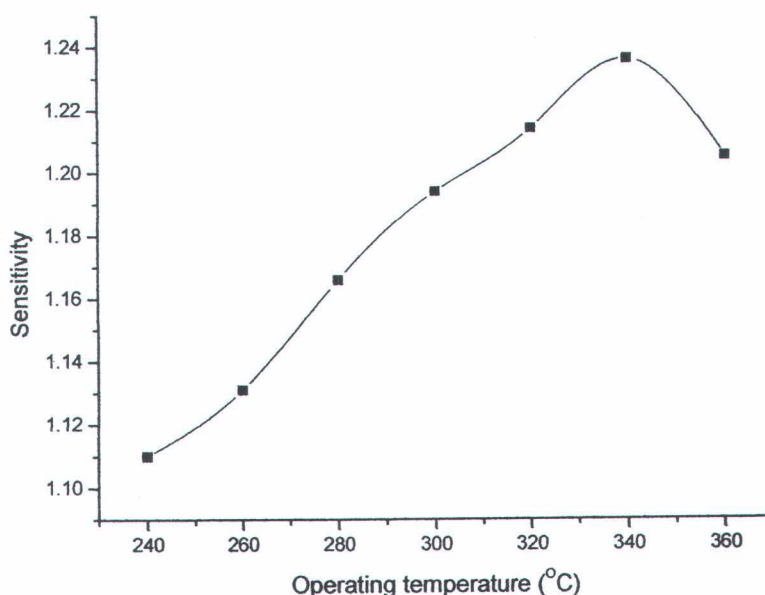
รูปที่ 4.12 การตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอล เซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ

ตารางที่ 4.9 ค่าความไว เวลาในการตอบสนอง และเวลาในการคืนตัวกลับที่ไอเอทานอลความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ

| Operating temperature ( $^{\circ}C$ ) | Sensitivity ( $R_a/R_g$ ) | Response time (s) | Recovery time (s) |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|
| 240                                   | 1.110                     | 56.67             | 73.11             |
| 260                                   | 1.131                     | 13.24             | 62.72             |
| 280                                   | 1.166                     | 18.69             | 59.94             |
| 300                                   | 1.194                     | 17.46             | 41.48             |
| 320                                   | 1.214                     | 8.56              | 22.43             |
| 340                                   | 1.236                     | 4.80              | 15.36             |
| 360                                   | 1.205                     | 4.09              | 12.83             |

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าความไวต่อไอเอทานอลเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจนถึงระดับหนึ่งค่าความไวจะเริ่มลดลงคล้ายกันกับในกรณีไม่ได้เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ แสดงให้เห็นว่ามีอุณหภูมิที่เหมาะสมค่าหนึ่งที่ทำให้ เอทานอลเซนเซอร์มีการตอบสนองได้ดีที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าความไวสูงที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 340°C มีค่าเวลาในการตอบสนอง 4.80 วินาที และมีค่าเวลาในการคืนตัวกลับ 15.36 วินาที

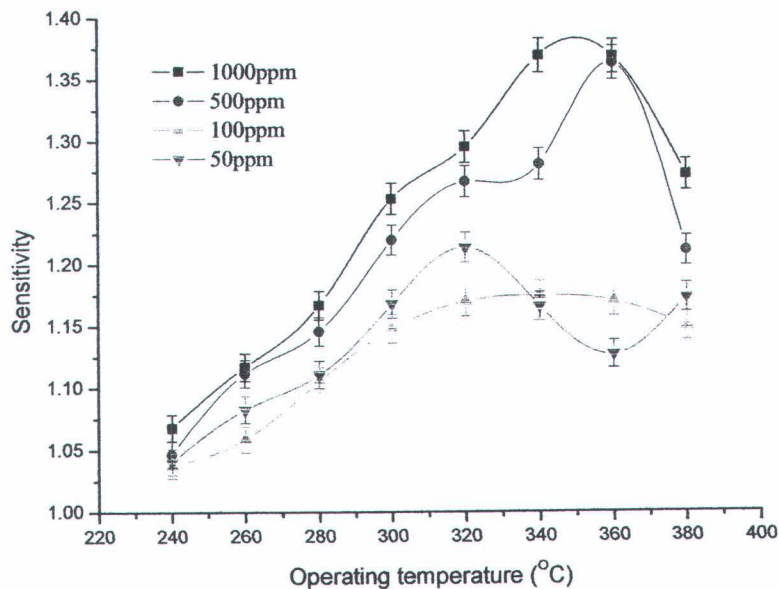
เมื่อพิจารณาค่าเวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนตัวกลับของเอทานอลเซนเซอร์จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเวลาในการตอบสนองและเวลาในการคืนตัวของเอทานอลเซนเซอร์มีแนวโน้มของเวลาที่ใช้น้อยลงโดยที่อุณหภูมิต่ำจะใช้เวลามากกว่าที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากค่าเวลาในการคืนตัวของเอทานอลเซนเซอร์ ที่อุณหภูมิ 360°C เวลาในการคืนตัวมีค่าที่น้อยที่สุดคือ 12.83 วินาที แต่เมื่อพิจารณาค่าความไวต่อไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 340°C มีค่าสูงที่สุดและเวลาในการตอบสนองกับเวลาในการคืนตัวกลับเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิอื่นๆ ถือว่าเหมาะสมกว่า ดังนั้นที่อุณหภูมิ 340°C ถือได้ว่ามีความเหมาะสมที่สุดที่จะเลือกใช้อุณหภูมินี้เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด จากการทดลองพบว่าความไวต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm มีค่าเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 4.13



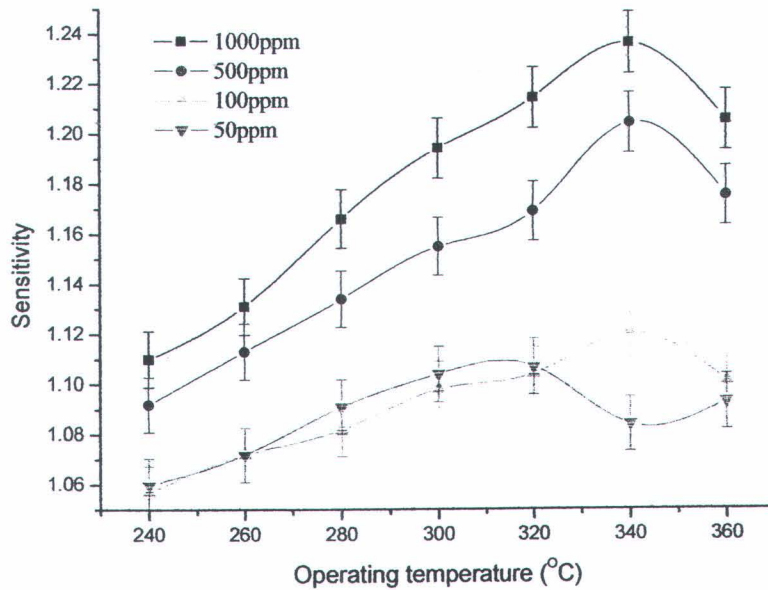
**รูปที่ 4.13** ค่าสภาพไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้ *W-ZnO* เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเป็นฐาน

#### 4.5.3 ผลการทดสอบไอเอทานอลที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ กัน

เมื่อนำเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  ที่เผาด้วยอุณหภูมิ  $700^{\circ}C$  เป็นฐานมาทดสอบกับ ไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 50-1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่  $240-360^{\circ}C$  โดยใช้เวลาในการปล่อยไอเอทานอล 200 วินาที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า ค่าความไวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไอเอทานอล และเมื่อพิจารณาผลของการเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ พบว่าเอทานอลเซนเซอร์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำปริมาณ 0.1%mol จะมีค่าความไวที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไอเอทานอลเช่นกัน แต่จะมีค่าความไวไม่ต่างกันเมื่อทดสอบกับ ไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และมีค่าต่ำกว่าเงื่อนไขที่ไม่ได้เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ ค่าความไวสูงสุดที่อุณหภูมิทดสอบ  $340^{\circ}C$  ที่ทุกๆ ความเข้มข้นของไอเอทานอล ดังรูปที่ 4.15 หากเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.14 เอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  เป็นฐานที่ไม่ได้เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำจะได้มีค่าความไวสูงสุดที่อุณหภูมิทดสอบ  $340^{\circ}C$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิทดสอบมีค่าเท่ากัน

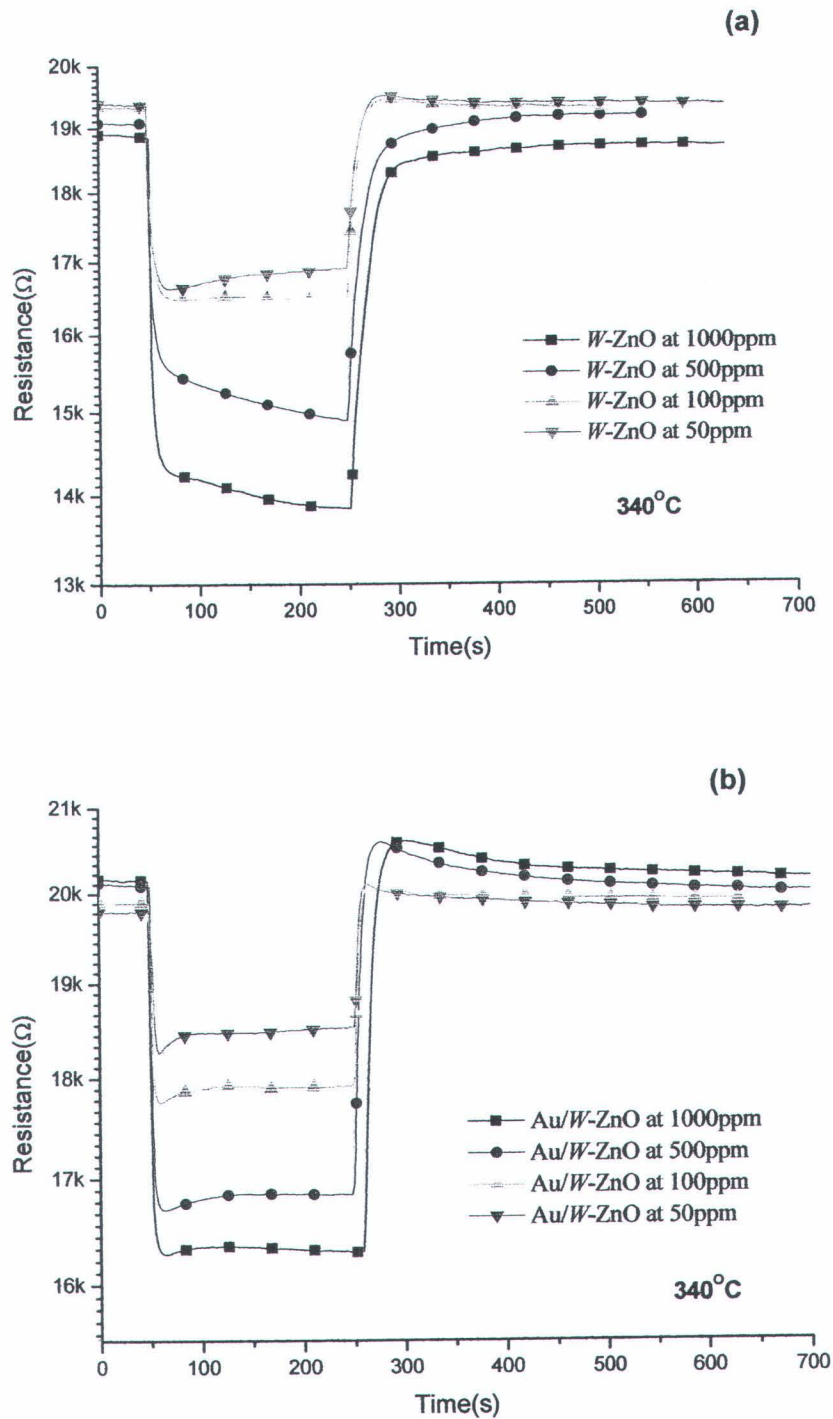


รูปที่ 4.14 ค่าสภาพไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  เป็นฐานที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ



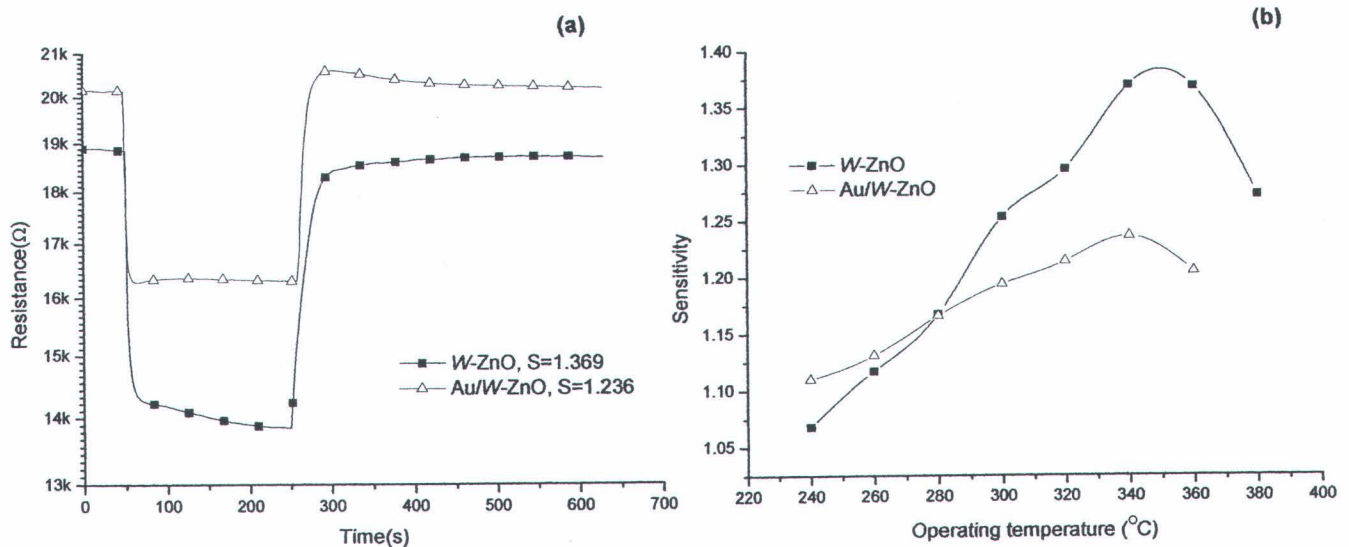
รูปที่ 4.15 ค่าสภาพไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol เป็นฐาน ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกราฟของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  เป็นฐานและที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol ในแต่ละความเข้มข้นของไอเอทานอลตั้งแต่ 50-1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบ 340°C พบว่าความต้านทานสุดท้ายมีค่าเท่ากับความต้านทานขณะที่เมื่อปล่อยไอเอทานอล ( $R_g$ ) ของเอทานอลเซนเซอร์ทั้งสองซึ่งมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของไอเอทานอลที่เพิ่มขึ้น [51, 53] ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การตอบสนองต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของเอทานอลเซนเซอร์  
 (a) ที่ใช้ W-ZnO เป็นฐานที่อุณหภูมิทดสอบ 340°C (b) ที่ใช้ W-ZnO เจือด้วย  
 อนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol เป็นฐาน ที่อุณหภูมิทดสอบ 340°C

เมื่อนำเอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  เป็นฐานและเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol มาทดสอบที่ความเข้มข้นของไอเอทานอล 1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 240-360°C พบว่า เอทานอลเซนเซอร์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ จะมีค่าความไวต่อการตอบสนองไอเอทานอลที่น้อยกว่าเมื่อไม่ได้เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 (a) การตอบสนองต่อไอเอทานอลสูงสุดที่ความเข้มข้น 1000 ppm

(b) เปรียบเทียบค่าความไวของเอทานอลเซนเซอร์ ความเข้มข้นไอเอทานอล 1000 ppm

ค่าความไวในการตอบสนองต่อไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ที่ลดลงสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ ตามสมการ [53]

$$S_g = \frac{R_a}{R_g} = \frac{\Gamma_t k_{Eth}(T) [O_{ads}^{ion}]^b [CH_3CH_2OH]^b}{n_0} + 1 \quad (4.2)$$

เมื่อค่า  $n_0$  แทน electron density ของเอทานอลเซนเซอร์ มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่า  $S_g$  คือ ถ้าค่า  $n_0$  มีค่ามากจะส่งผลให้ค่า  $S_g$  มีค่าน้อย และเมื่อดูจากรูปที่ 4.17 (a) ค่าความต้านทานในอากาศของเอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำจะมีค่าความต้านทานที่สูงกว่าเอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเอทานอลเซนเซอร์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำมีค่า  $n_0$  ที่ต่ำกว่า

สำหรับค่า  $[O_{ads}^{ion}]^b$  ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ซึ่งในกรณีของ เอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  พบว่าพื้นที่ทำปฏิกิริยามีค่อนข้างจำกัด ส่งผลให้ค่าความไวของเซนเซอร์มีค่าที่ต่ำ

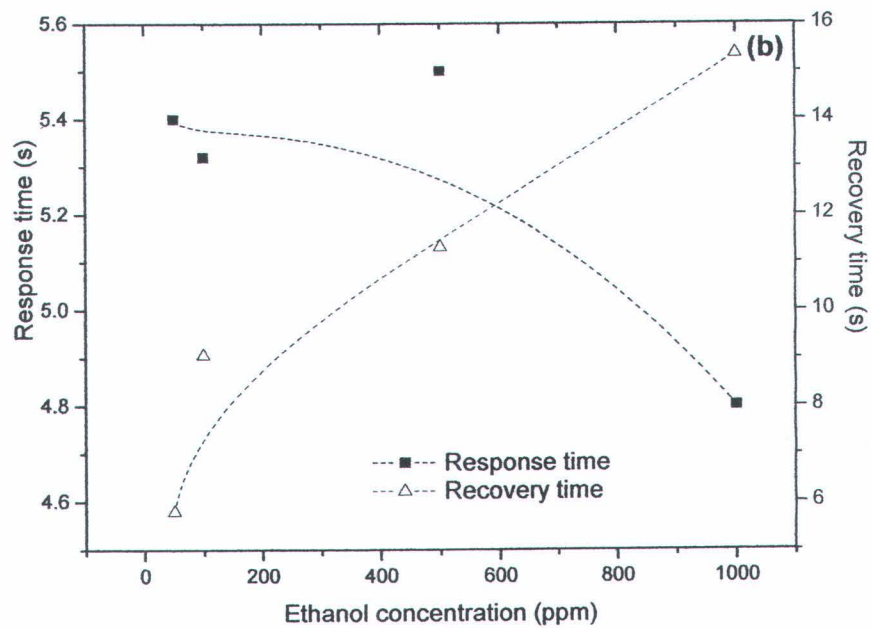
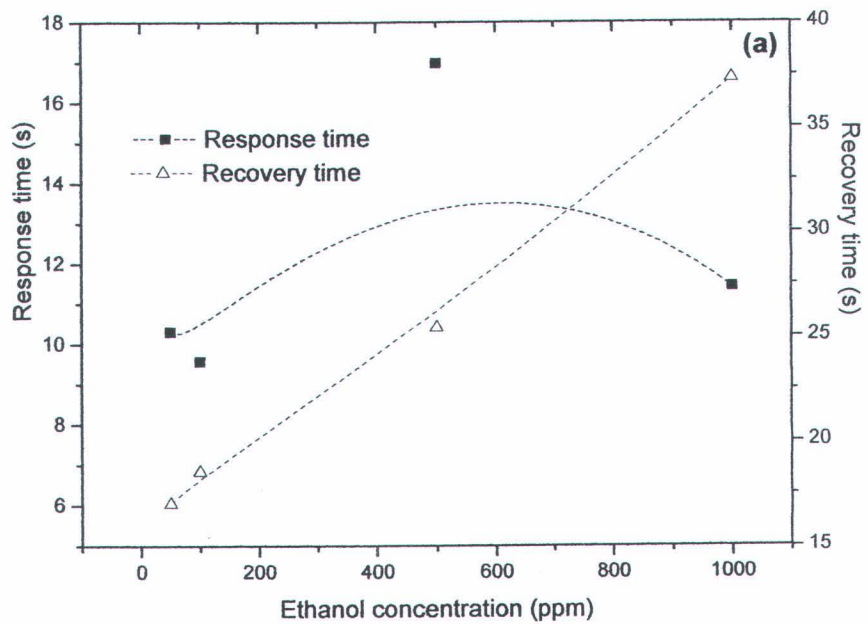
ส่วน  $k_{Eth}(T)$  แทนค่า reaction rate constant หรือ reaction rate coefficient ระหว่าง adsorbed oxygen ions กับ ethanol molecules ที่เข้าทำปฏิกิริยากัน มีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับค่า  $S_g$  แสดงว่าถ้า  $k_{Eth}(T)$  มีค่ามาก ค่า  $S_g$  ก็จะมีค่ามากไปด้วย จึงอาจพอสรุปได้ว่าอนุภาคนาโนของทองคำซึ่งปกติเป็นตัวกระตุ้นหรือเร่งปฏิกิริยาที่ดี แต่เนื่องจากการที่อนุภาคนาโนของทองคำไปเกาะบนเซนเซอร์ทำให้พื้นที่ที่จะทำปฏิกิริยาลดลงและทำให้ความหนาของบริเวณที่มีประจุลดลง ซึ่งจะทำให้ค่า  $k_{Eth}(T)$  ที่ต่ำลง ประกอบกับการที่เซนเซอร์มีพื้นที่ทำปฏิกิริยาที่จำกัดอยู่แล้ว ทำให้จุดอิ่มตัวมีค่าต่ำ จะเห็นได้จากการที่  $S_g$  ของเอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำมีค่าต่ำกว่า เอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  เล็กน้อย ดังสมการ



จากความสัมพันธ์ในเบื้องต้น สามารถแสดงผลที่สอดคล้องกับทฤษฎีได้จากรูปที่ 4.17 (a) เช่นกัน พบว่า ค่าความต้านทานของเอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเมื่อเจอกับไอเอทานอลแล้วจะมีค่าความต้านทานที่เปลี่ยนหรือลดลงน้อยกว่าที่ไม่ได้เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเล็กน้อย แสดงว่า ค่า  $k_{Eth}(T)$  ระหว่าง adsorbed oxygen ions กับ ethanol molecules ที่เข้าทำปฏิกิริยากันต่ำและเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวมาเบื้องต้น

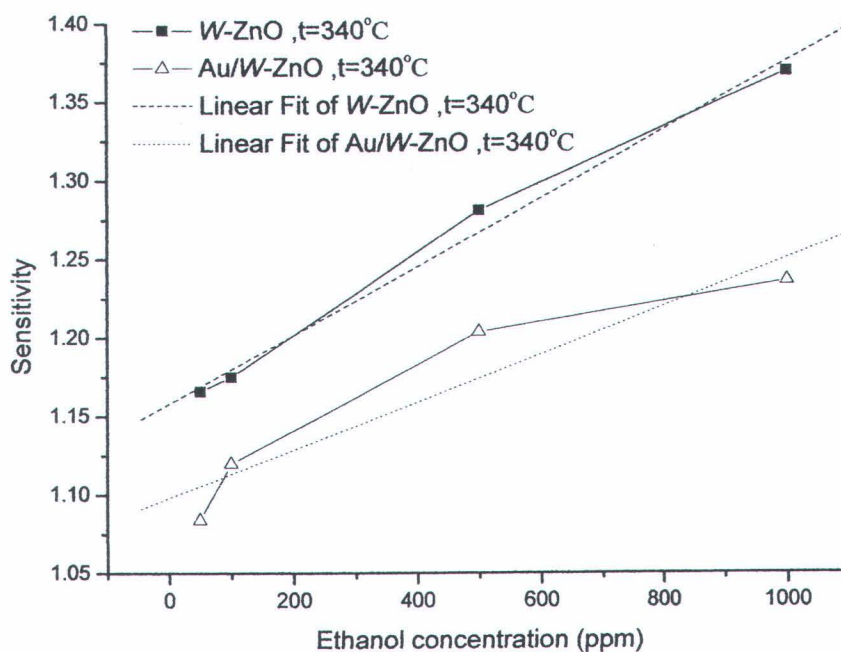
เมื่อพิจารณาเวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวของเอทานอลเซนเซอร์ของทั้งสองเงื่อนไขต่อความเข้มข้นไอเอทานอลที่แตกต่างกัน พบว่าเวลาการตอบสนองของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  $W-ZnO$  เป็นฐานจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งแล้วจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของไอเอทานอลเพิ่มขึ้น ส่วนเวลาการตอบสนองของเอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามความเข้มข้นของไอเอทานอลที่เพิ่มขึ้น ส่วนเวลาในการคืนตัวของเอทานอลเซนเซอร์ของทั้งสองจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไอเอทานอลที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.18 (a) และ (b)





รูปที่ 4.18 เวลาการตอบสนองและเวลาการคืนตัวกลับของเอทานอลเซนเซอร์ที่ใช้  
 (a) *W-ZnO* เป็นฐานที่ 340°C (b) *W-ZnO* ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol  
 เป็นฐาน ที่ 340°C

เมื่อพิจารณาสมบัติการตรวจจับไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของอุณหภูมิทดสอบที่อุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข ดังรูปที่ 4.19 พบว่าปริมาณการตอบสนองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไอเอทานอล ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 สมบัติการตรวจจับไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของอุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข

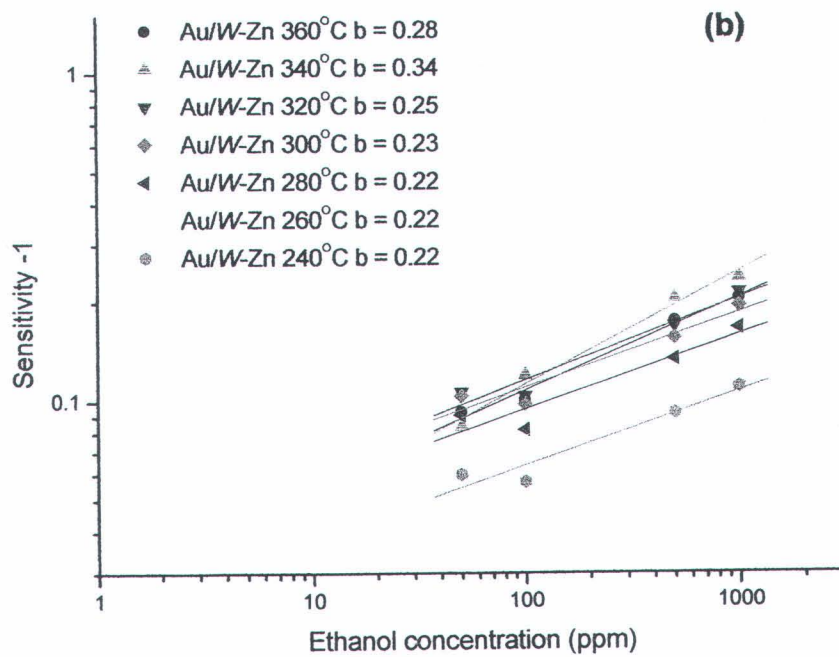
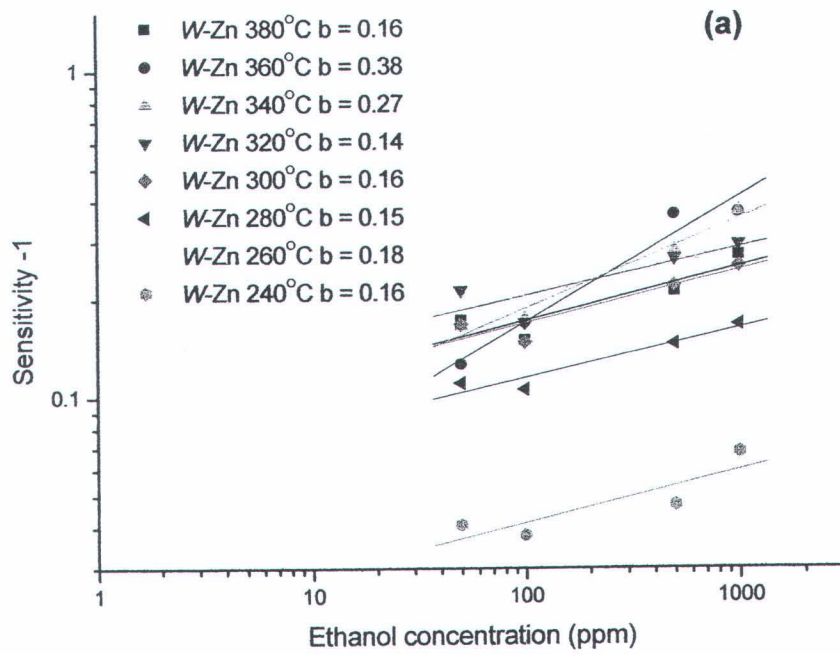
ตารางที่ 4.10 ปริมาณการตอบสนองของเอทานอลเซนเซอร์ต่ออุณหภูมิทดสอบต่างๆ ที่ความเข้มข้นไอเอทานอล 1000 ppm

| Operating temperature<br>(°C) | Response % $[(R_a - R_g)/R_a] * 100\%$ |          |
|-------------------------------|----------------------------------------|----------|
|                               | W-ZnO                                  | Au/W-ZnO |
| 260                           | 6                                      | 10       |
| 280                           | 10                                     | 12       |
| 300                           | 14                                     | 14       |
| 320                           | 20                                     | 16       |
| 340                           | 23                                     | 18       |
| 360                           | 27                                     | 19       |

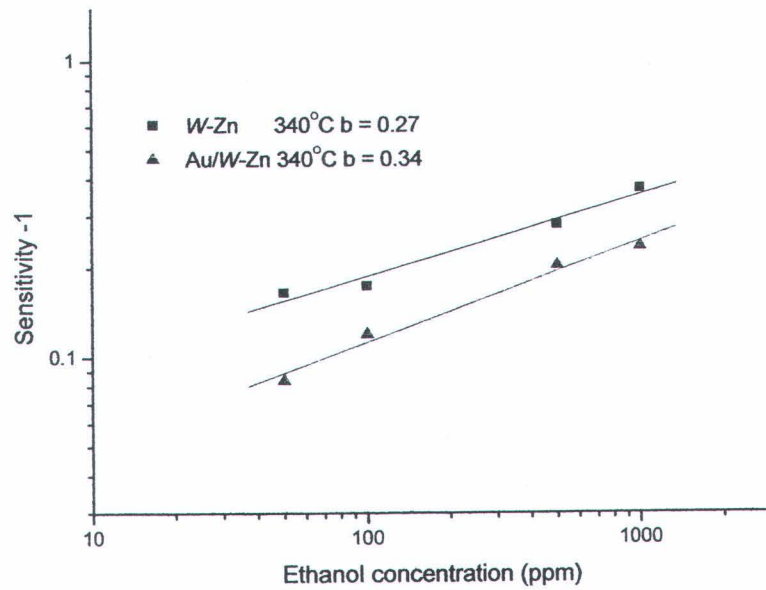
ตารางที่ 4.11 ปริมาณการตอบสนองของเอทานอลเซนเซอร์ต่อความเข้มข้นไอเอทานอลต่างๆ ที่อุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข

| Ethanol concentration<br>(ppm) | Response % $[(R_a - R_g)/R_a] * 100\%$ |          |
|--------------------------------|----------------------------------------|----------|
|                                | W-ZnO                                  | Au/W-ZnO |
| 50                             | 14                                     | 8        |
| 100                            | 15                                     | 11       |
| 500                            | 22                                     | 17       |
| 1000                           | 27                                     | 19       |

จากการศึกษาผลการตรวจจับไอเอทานอลของเอทานอลเซนเซอร์ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นไอเอทานอลต่างๆ เมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่างค่าสภาพไวลบหนึ่ง (S-1) และความเข้มข้นของไอเอทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน เพื่อคำนวณหาค่า  $b$  ตามสมการที่ 2.10 ถ้า  $b$  มีค่าเท่ากับ 0.5 แสดงว่าออกซิเจนที่เกาะบนพื้นผิวของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์มีประจุเป็น  $O^{2-}$  และถ้า  $b$  มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าออกซิเจนที่เกาะบนพื้นผิวของโครงสร้างซิงก์ออกไซด์มีประจุเป็น  $O^-$  จากการทดลองหาค่า  $b$  ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ กัน ของเอทานอลเซนเซอร์ได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.12 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.21 แสดงค่า  $b$  ที่อุณหภูมิทดสอบที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข พบว่าออกซิเจนที่เกาะบนพื้นผิวส่วนใหญ่มีประจุเป็น  $O^{2-}$



รูปที่ 4.20 ค่า  $b$  ของเอทานอลเซนเซอร์ที่สร้างจาก (a)  $W-ZnO$  เป็นฐาน และ (b) เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol

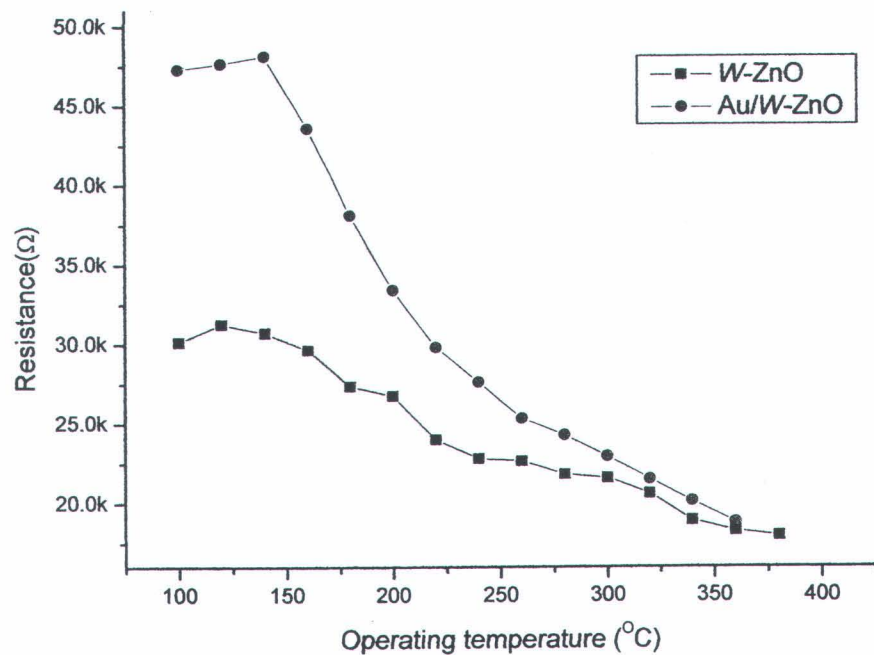


รูปที่ 4.21 ค่า  $b$  ของเอทานอลเซนเซอร์ที่สร้างจาก  $W\text{-ZnO}$  เป็นฐาน และเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ  $0.1\%\text{mol}$  ที่อุณหภูมิที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข

ตารางที่ 4.12 ค่า  $b$  ของเอทานอลเซนเซอร์ตามเงื่อนไขต่างๆ

| เงื่อนไข                 | Operating temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) | $b$  | Oxygen species  |
|--------------------------|----------------------------------------------|------|-----------------|
| $W\text{-ZnO}$           | 240                                          | 0.16 | $\text{O}^{2-}$ |
|                          | 260                                          | 0.18 |                 |
|                          | 280                                          | 0.15 |                 |
|                          | 300                                          | 0.16 |                 |
|                          | 320                                          | 0.14 |                 |
|                          | 340                                          | 0.27 |                 |
|                          | 360                                          | 0.38 |                 |
|                          | 380                                          | 0.16 |                 |
| $\text{Au}/W\text{-ZnO}$ | 240                                          | 0.22 | $\text{O}^{2-}$ |
|                          | 260                                          | 0.22 |                 |
|                          | 280                                          | 0.22 |                 |
|                          | 300                                          | 0.23 |                 |
|                          | 320                                          | 0.25 |                 |
|                          | 340                                          | 0.34 |                 |
|                          | 360                                          | 0.28 |                 |

เมื่อนำเอทานอลเซนเซอร์ที่ทำจาก  $W-ZnO$  เป็นฐานและเจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ 0.1%mol มาทดสอบที่ความเข้มข้นของไอเอทานอล 1000 ppm ที่อุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 100-360°C สามารถเขียนกราฟระหว่างความต้านทานของเอทานอลเซนเซอร์กับอุณหภูมิทดสอบได้ ดังรูปที่ 4.22 พบว่า เอทานอลเซนเซอร์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำ จะมีความต้านทานในอากาศ ( $R_g$ ) มากกว่าเมื่อไม่ได้เจือด้วยอนุภาคนาโนของทองคำเล็กน้อย และความต้านทานของเซนเซอร์มีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.22 ค่าความต้านทานของเอทานอลเซนเซอร์ที่อุณหภูมิทดสอบต่างๆ