



## ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน $WO_3-SnO_2$

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน  $WO_3-SnO_2$  อาทิเช่น ปริมาณของทั้งสเดนออกไซด์ที่เติมลงในโครงสร้างของ  $SnO_2$  อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ซึ่งเงื่อนไขต่างๆที่กำหนดขึ้นจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ คือ เฟสองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างทางจุลภาค และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ ซึ่งสมบัติต่างๆเหล่านี้จะถูกวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ต่างๆ

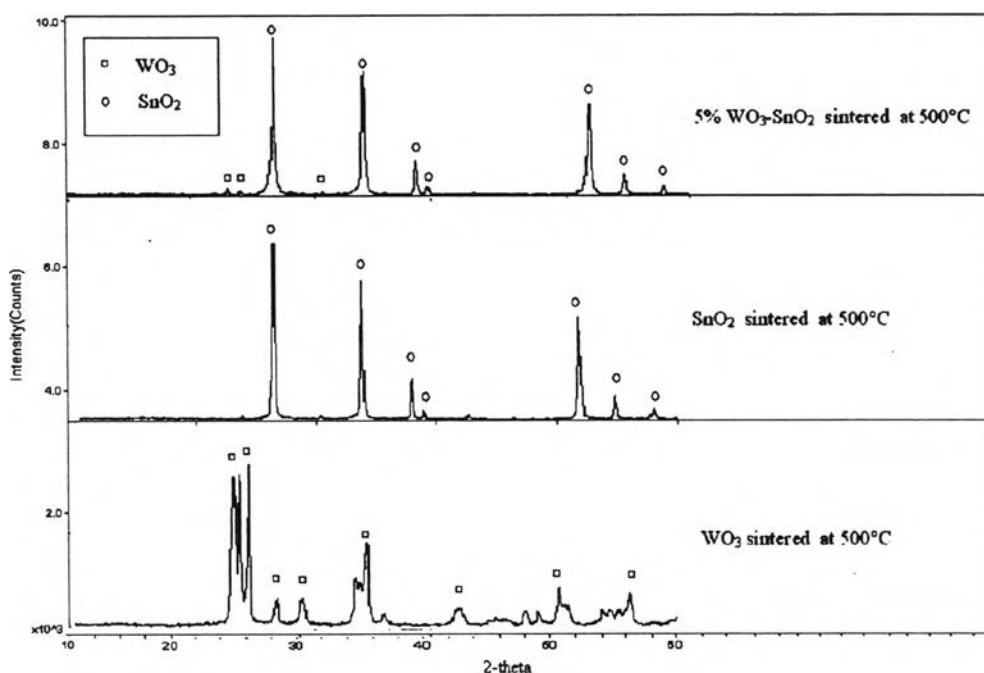
#### 4.1.1 เฟสและองค์ประกอบทางเคมี

รูปที่ 4.1 ก-ค แสดงแถบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงอนุภาคนาโน  $WO_3-SnO_2$  ที่ทำการเตรียมโดยการกำหนดเงื่อนไขให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณของ  $WO_3$  ที่เติมลงในโครงสร้าง  $SnO_2$  โดยทำการเผาที่อุณหภูมิกึ่งที่เท่ากับ  $500^\circ C$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยในรูป 4.1 ก ได้แสดงแถบการเลี้ยวเบนของทินออกไซด์และทั้งสเดนออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ  $500^\circ C$  เพื่อใช้เปรียบเทียบ ซึ่งพบว่าเฟสหลังการเผาของแต่ละตัวอย่างประกอบไปด้วย  $SnO_2$  ในรูปของแคสซิเทอไรต์ (JCPDS No.41-1445) และ  $WO_3$  แบบโมโนคลินิก (JCPDS No.41-0905) เมื่อพิจารณาจากรูปพบว่าที่ค่า  $2\theta$  ประมาณ 23.3, 24.1 และ  $30.7$  องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนหลักของ  $WO_3$  จะปรากฏความสูงของพีคที่ไม่ชัดเจนอันเนื่องมาจากปริมาณของ  $WO_3$  ที่เติมลงไป ในโครงสร้างของ  $SnO_2$  มีปริมาณน้อยเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับ  $SnO_2$  ส่วนพีคการเลี้ยวเบนอื่นๆที่เห็นชัดเจนเป็นพีคของ  $SnO_2$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของหัววัดแก๊ส นอกจากนี้ยังไม่พบพีคของสารประกอบใหม่ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง  $WO_3$  และ  $SnO_2$  ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าอาจเนื่องมาจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำเกินไป หรืออาจมีสารองค์ประกอบใหม่เกิดขึ้นแต่มีปริมาณน้อยเกินไปจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่

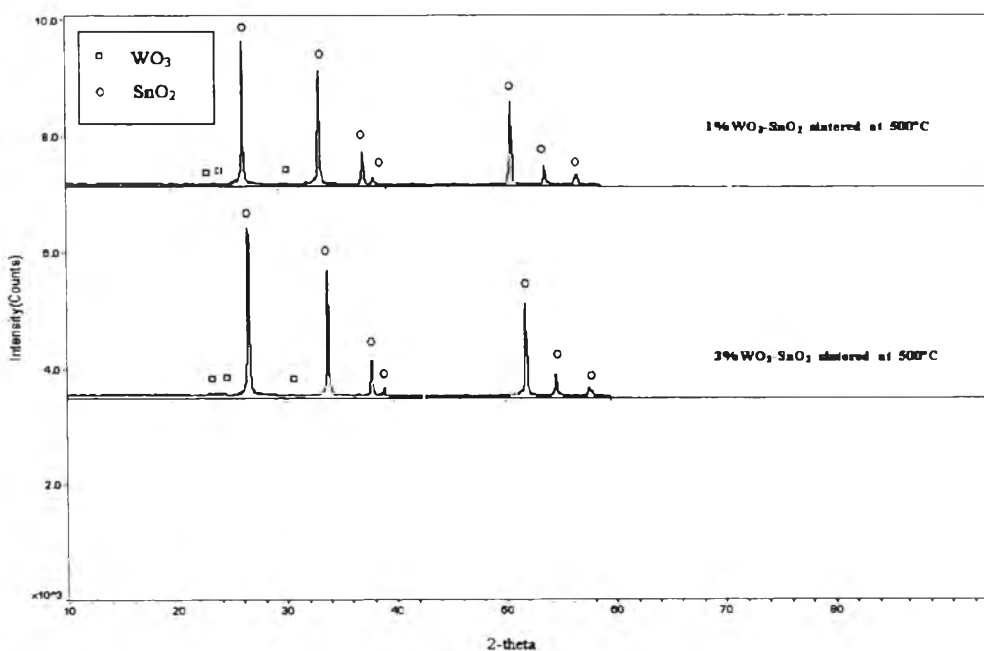
#### 4.1.4

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ถูกนำมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขเบื้องต้นในการกำหนดสัดส่วนและปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์สารกับองค์ประกอบของธาตุที่แท้จริงซึ่งปรากฏในตัวอย่างไม่สามารถทำการปรับปรุงเงื่อนไขเบื้องต้นในการสังเคราะห์สารเพื่อให้องค์ประกอบที่แท้จริงมีค่าใกล้เคียงกับเงื่อนไขที่กำหนดสำหรับการศึกษาคูสมบัติของหัววัดแก๊ส เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS เพื่อให้ทราบถึงปริมาณองค์ประกอบของธาตุที่แท้จริงใน

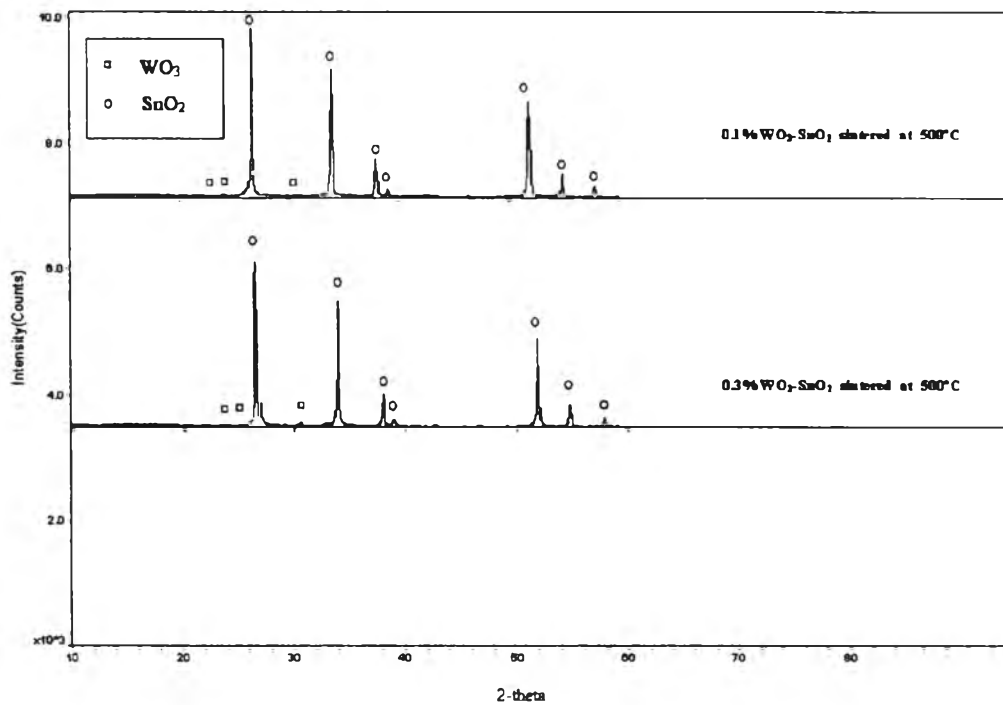
ตัวอย่างของหัววัดแก๊สที่เตรียมโดยการเติมปริมาณของ  $\text{WO}_3$  ที่แตกต่างกันลงไปโครงสร้างของ  $\text{SnO}_2$  และทำการเผาที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  พบว่าสัดส่วนปริมาณของ  $\text{WO}_3$  ที่มีใน  $\text{SnO}_2$  มีค่ามากกว่าปริมาณ  $\text{WO}_3$  ที่กำหนดในเงื่อนไขเริ่มต้นในกระบวนการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1



ก) 5% $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$  ,  $\text{WO}_3$  และ  $\text{SnO}_2$

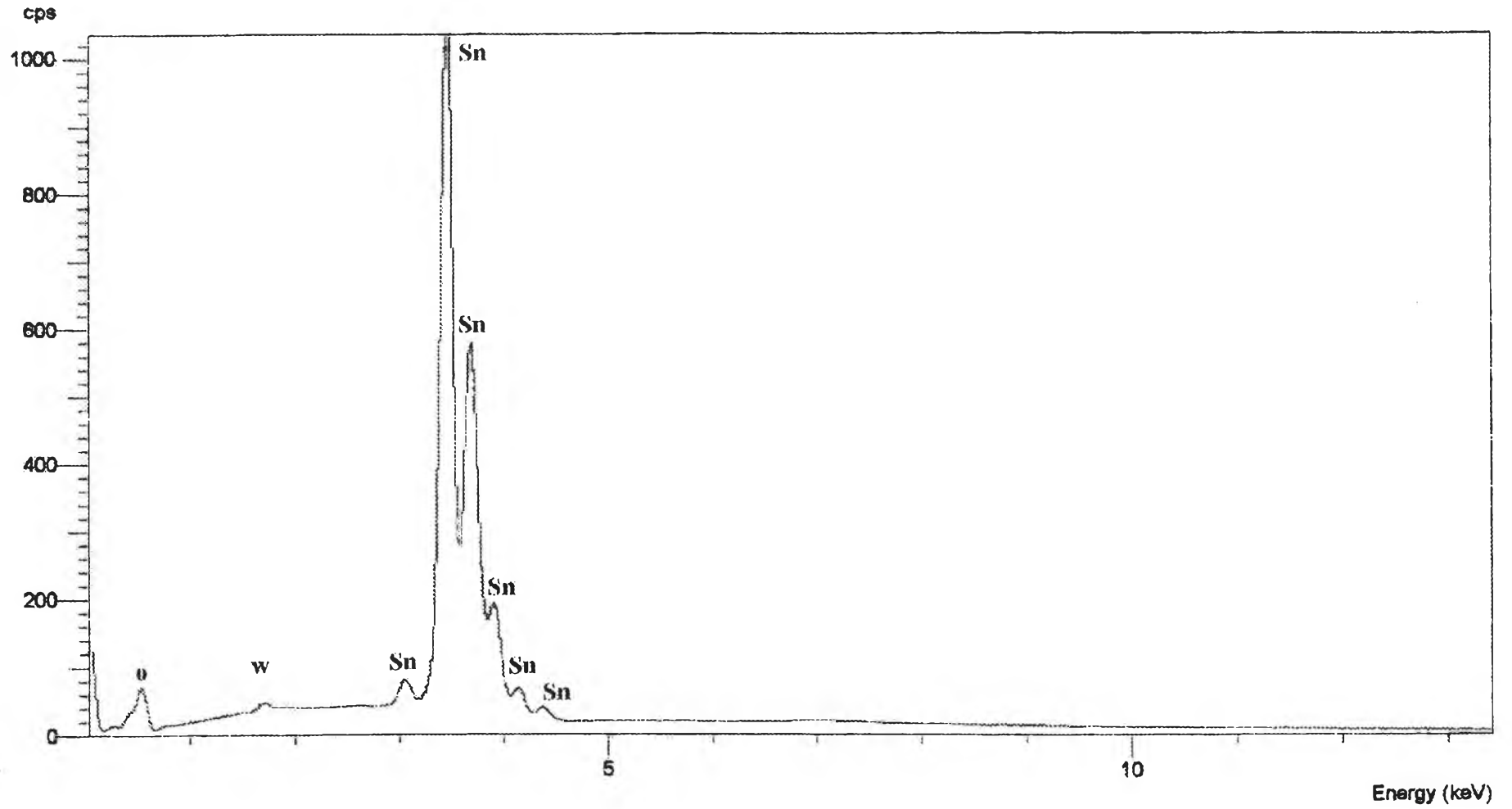


ข) 1% $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$  และ 3% $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$



ค) 0.1% $\text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$  และ 0.3% $\text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$

รูปที่ 4.1 แถบการเลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์ ของสาร  $\text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$  ที่ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณ  $\text{WO}_3$  โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 เส้นสเปกตรัม EDS ของ SnO<sub>2</sub> เจือด้วย 0.1 % WO<sub>3</sub> ,เผาที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS พบว่าสัดส่วนปริมาณของ  $WO_3$  ที่มีใน  $SnO_2$  มีค่ามากกว่าปริมาณ  $WO_3$  ที่กำหนดในเงื่อนไขเริ่มต้นในกระบวนการสังเคราะห์

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบ  $WO_3$  เป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์ EDS ของ ตัวอย่างที่ทำการเตรียมด้วยเงื่อนไขต่างๆเปรียบเทียบกับปริมาณที่เติมลงไปในช่วงตอนการสังเคราะห์

ตัวอย่าง	ปริมาณ $WO_3$ ที่คาดว่าจะพบ (Wt%)*	ปริมาณ $WO_3$ ที่พบ (Wt%)
0.01% $WO_3$ - $SnO_2$	0.01	0.29
0.03% $WO_3$ - $SnO_2$	0.03	0.41
0.1% $WO_3$ - $SnO_2$	0.1	0.48
0.3% $WO_3$ - $SnO_2$	0.3	0.98
1% $WO_3$ - $SnO_2$	1	1.48
3% $WO_3$ - $SnO_2$	3	3.62
5% $WO_3$ - $SnO_2$	5	5.80

\* จากการคำนวณ

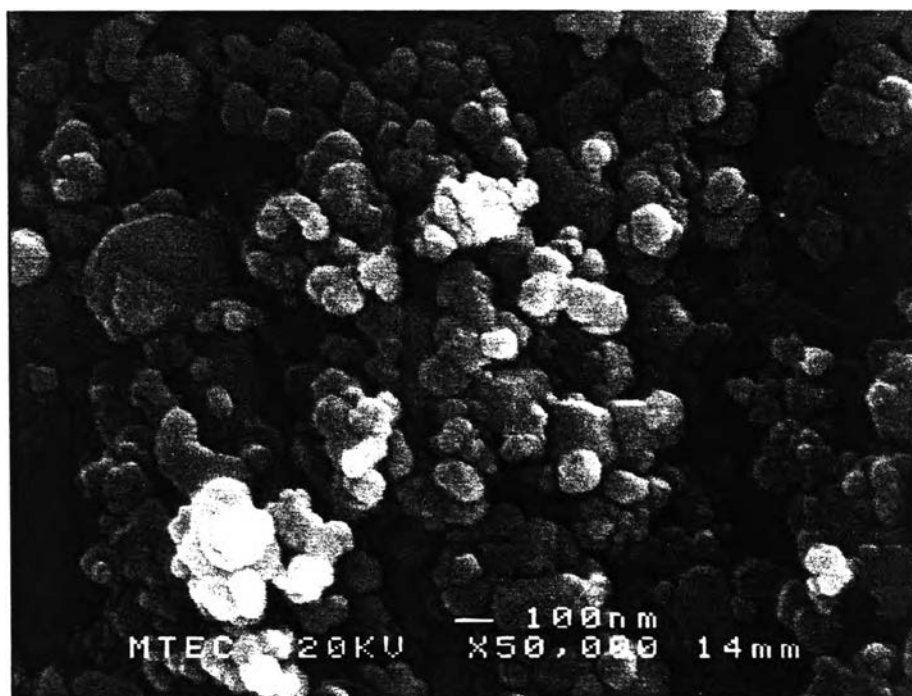
สัดส่วนปริมาณของ  $WO_3$  ที่เพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณ  $WO_3$  ที่กำหนดในเงื่อนไขเริ่มต้นในกระบวนการสังเคราะห์อาจเนื่องมาจากการกำหนดสัดส่วนเริ่มต้นของการเตรียมหัววัดแต่ละตัวอย่างเป็นการกำหนดจากสัดส่วนน้ำหนักของสารตั้งต้น ( $SnO_2$ ) และ  $WO_3$  ที่คาดว่าจะตกตะกอนออกมา โดยใช้ข้อมูลการตกตะกอนของ  $WO_3$  โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียมทั้งสเตรด กับกรดไนตริกในสภาวะที่ไม่มีการเติม  $SnO_2$  ที่มีการศึกษาไว้ [58] แต่ในการทดลองนี้การตกตะกอนของผง  $WO_3$  เกิดในสภาวะที่มีการเติมผง  $SnO_2$  ลงในสารละลายด้วย จึงอาจมีผลให้อัตราการตกตะกอนของ  $WO_3$  แตกต่างจากสภาวะที่ไม่มีการเติม  $SnO_2$  ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณและสัดส่วนของสารที่ได้หลังการสังเคราะห์มีค่าต่างไปจากค่าที่คำนวณไว้ในเงื่อนไขเบื้องต้นก่อนทำปฏิกิริยา

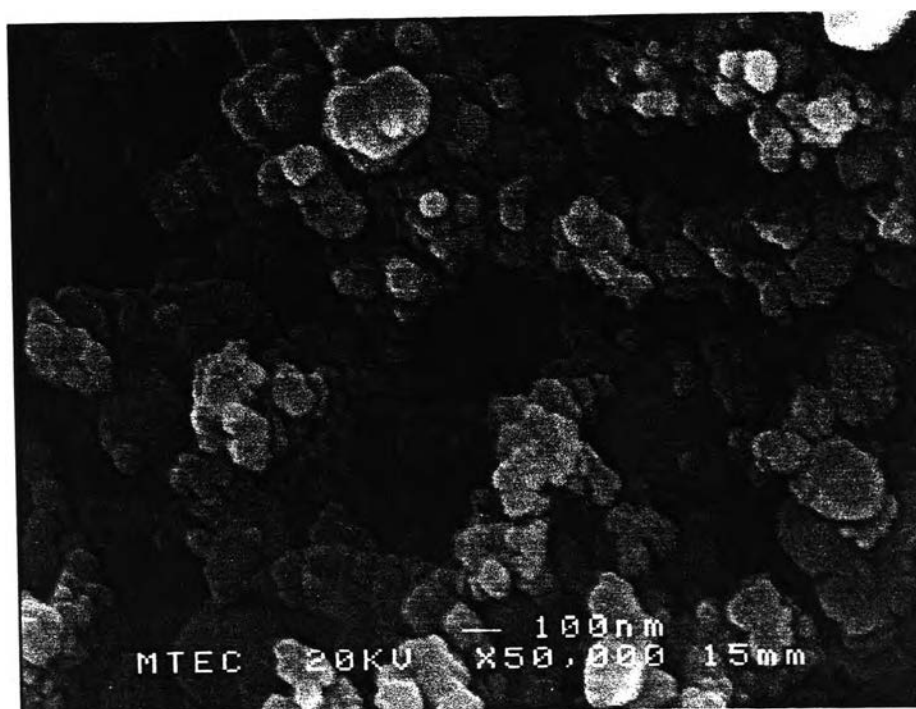
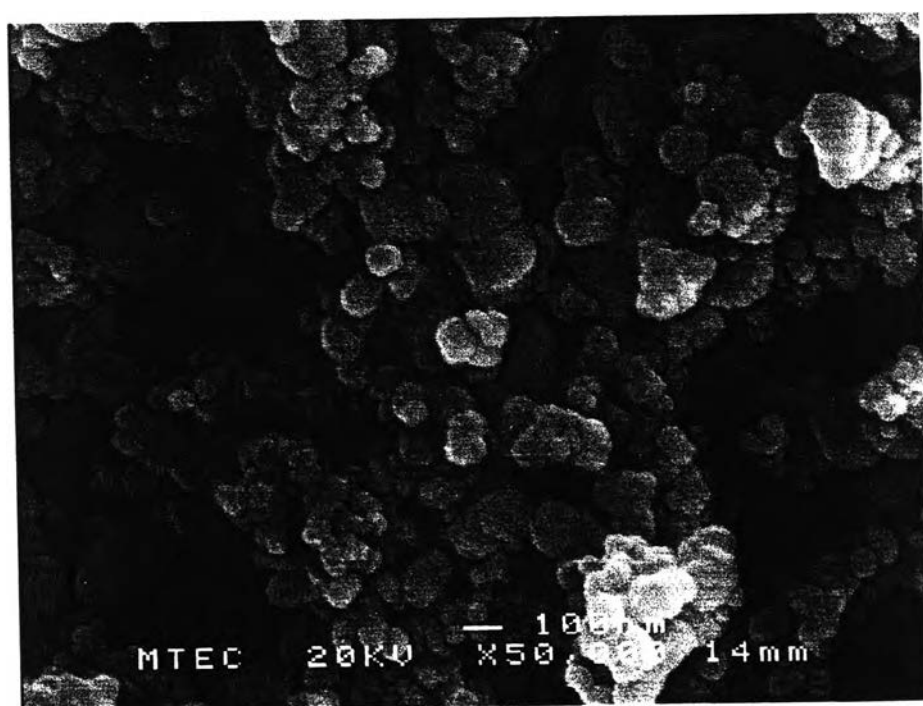
#### 4.1.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของอนุภาคนาโน $WO_3-SnO_2$

รูปที่ 4.3 เป็นภาพถ่าย SEM ซึ่งแสดงลักษณะการจัดเรียงตัวและขนาดของอนุภาคที่ปรากฏในสารตัวอย่าง รวมถึงการกระจายตัวของอนุภาคและรูพรุน ซึ่งจะสามารถใช้ในการพิจารณาผลของโครงสร้างทางจุลภาคที่มีต่อคุณสมบัติของหัววัดนอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลของเงื่อนไขเบื้องต้นในการสังเคราะห์สารที่มีต่อลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาค

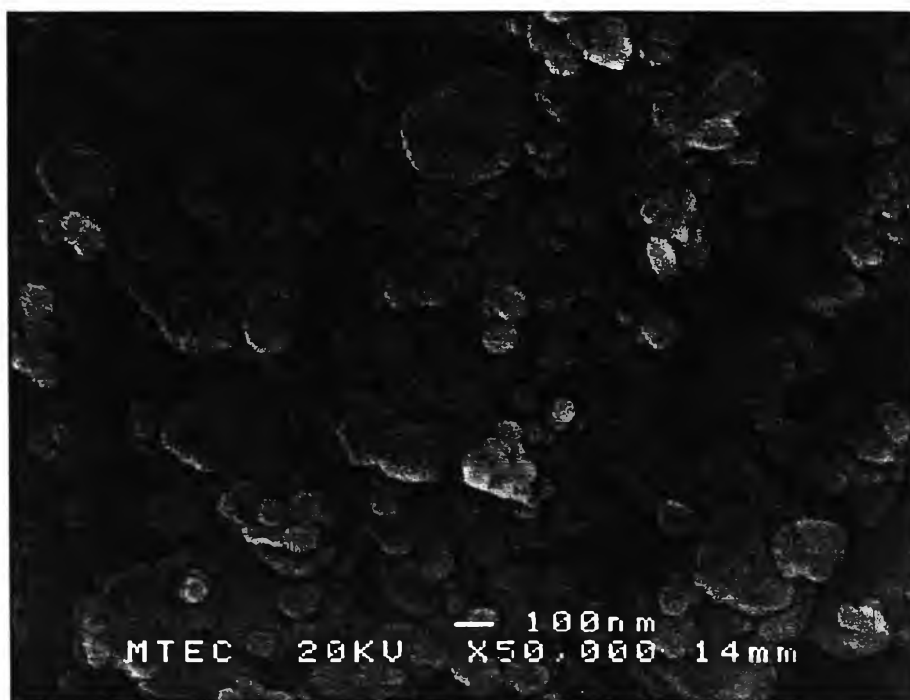
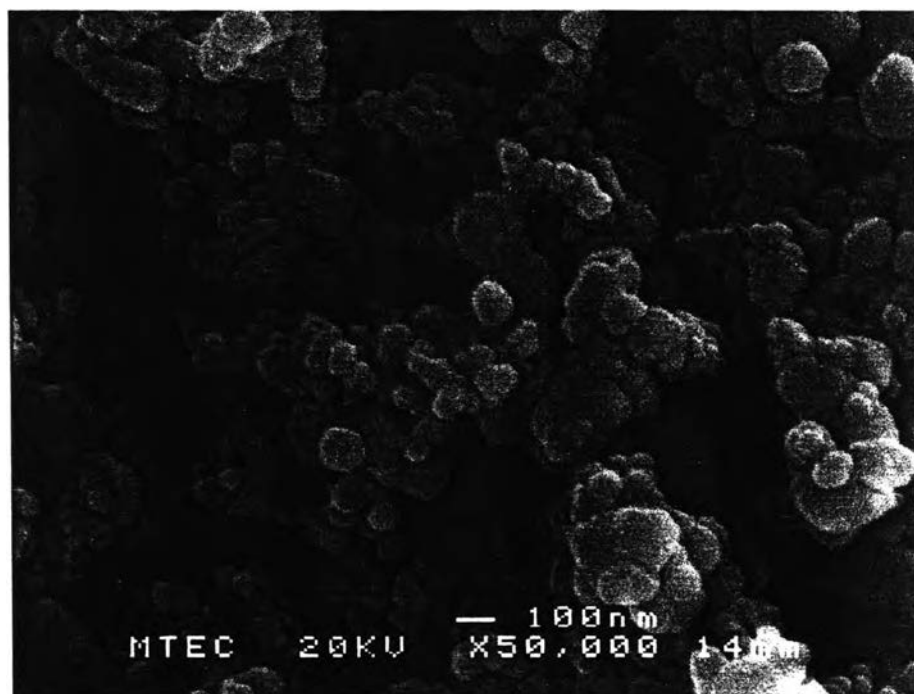
รูปที่ 4.3 ก-ข แสดงลักษณะของอนุภาค  $SnO_2$  บริสุทธิ์และ  $SnO_2$  ที่เติม  $WO_3$  ในปริมาณ 0.1, 0.3, 1.0, 3.0 และ 5 Wt% ตามลำดับโดยแต่ละตัวอย่างจะทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 50,000 เท่า เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 ก ซึ่งแสดงลักษณะการเรียงตัวของ  $SnO_2$  ซึ่งจะเห็นโครงสร้างที่เรียงตัวกันของกลุ่มอนุภาคที่เกาะตัวกันมีขนาดเล็ก โดยมีขนาดประมาณ 50-200 nm และเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะอนุภาคของตัวอย่างที่เตรียมโดยการเติม  $WO_3$  ปริมาณต่างๆ ลงไปในโครงสร้างของ  $SnO_2$  พบว่าอนุภาคผสม  $WO_3-SnO_2$  (รูปที่ 4.3 ข-ข) จะมีการกระจายตัวที่ดีกว่าอนุภาค  $SnO_2$  บริสุทธิ์ (รูปที่ 4.3 ก) อย่างชัดเจนโดยพบว่าอนุภาค  $WO_3-SnO_2$  แต่ละตัวอย่างที่เตรียมโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเติม  $WO_3$  ในช่วง 0.01-5 % จะมีขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันและมีรูปร่างค่อนข้างกลม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม  $WO_3$  ลงไปในโครงสร้างของ  $SnO_2$  จะมีผลช่วยทำให้วัสดุที่สังเคราะห์ได้มีการกระจายตัวที่ดีไม่เกาะตัวเป็นก้อนนอกจากนี้ยังทำให้ได้อนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะคล้ายทรงกลม

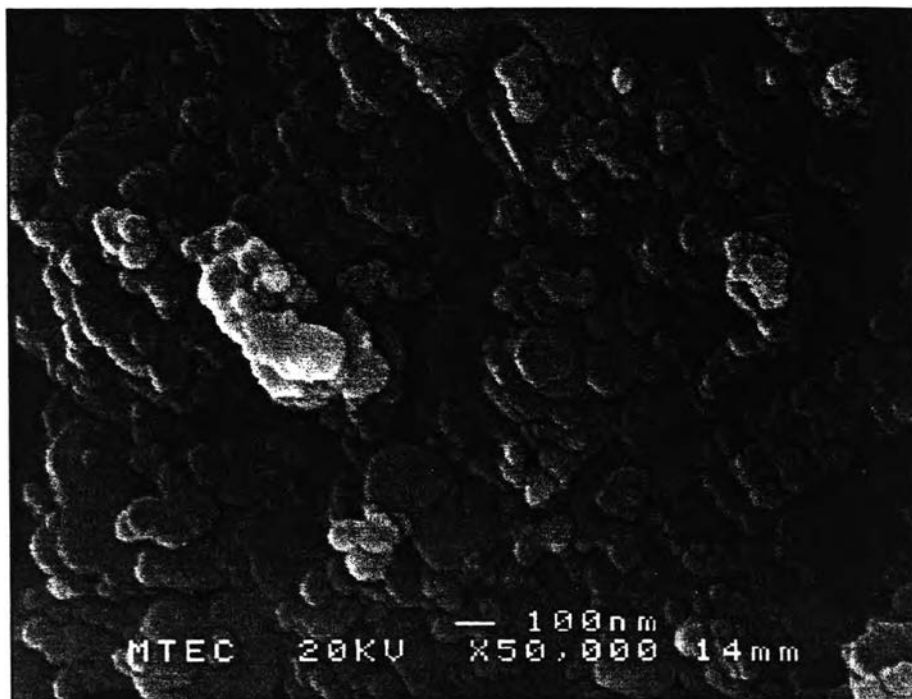
เมื่อพิจารณาอนุภาคผสม  $WO_3-SnO_2$  โดยเปรียบเทียบผลของปริมาณการเติม  $WO_3$  ลงไปในโครงสร้างของ  $SnO_2$  ในช่วง 0.01-5 % ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคพบว่าปริมาณการเติม  $WO_3$  จะไม่มีผลมากนักในการทำให้ขนาดของอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาค และรูพรุนเปลี่ยนแปลงหรือแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย SEM แต่ผลของปริมาณ  $WO_3$  ต่อสมบัติอื่นๆ เช่น การเกาะตัวกันของกลุ่มอนุภาค และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งไม่สามารถชี้ชัดด้วยการพิจารณาจากภาพถ่าย จะต้องใช้เทคนิควิเคราะห์อื่นๆ เช่นการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และการตรวจวัดการตอบสนองต่อแก๊ส เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นซึ่งจะได้พิจารณาจากหัวข้อถัดไป

n)  $\text{SnO}_2$ v) 0.01% $\text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$

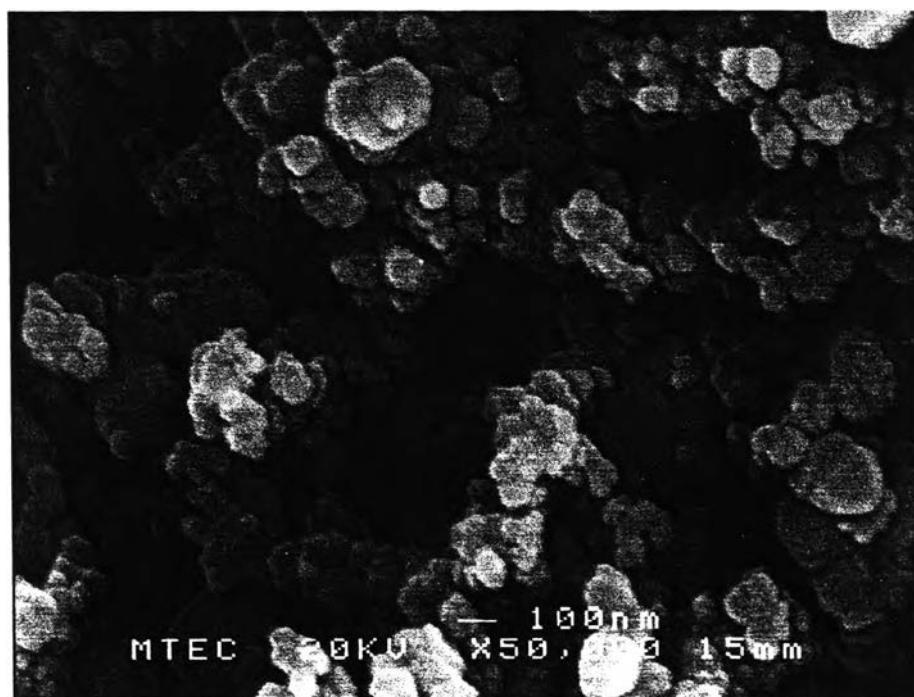
к) 0.05%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>г) 0.1%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>



g) 0.3%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>h) 1%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>



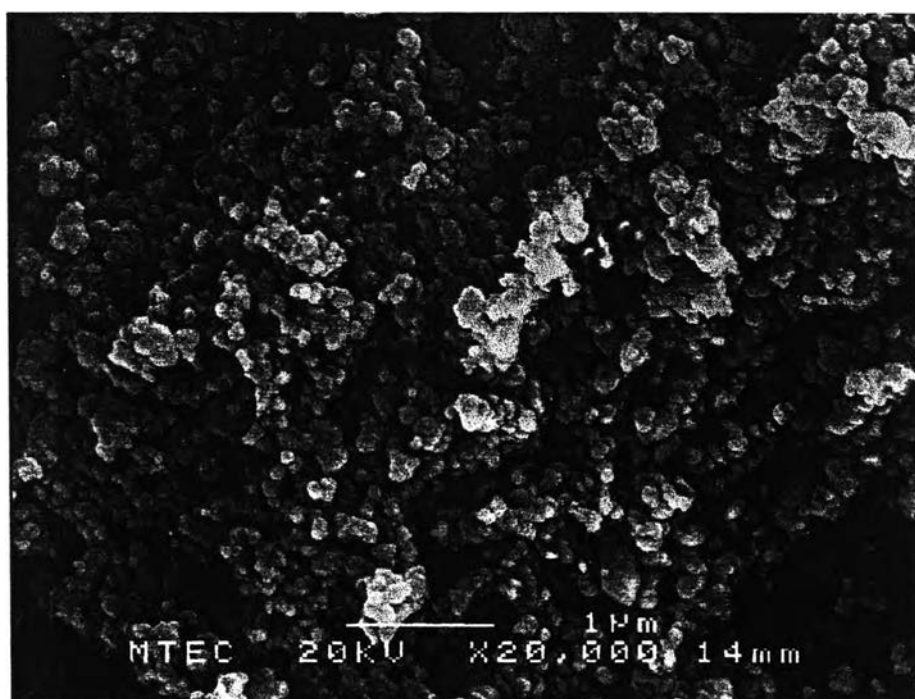
ข) 3%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>



ค) 5%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>

รูปที่ 4.3 รูปถ่าย SEM ของสาร SnO<sub>2</sub> บริสุทธิ์และสารที่ได้จากการสังเคราะห์โดยการกำหนดเงื่อนไขให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ WO<sub>3</sub> ที่เติมลงไปนโครงสร้างของ SnO<sub>2</sub> เผาที่อุณหภูมิ 500 °C

รูป 4.4 ก แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่เตรียมโดยสารผสม  $5\% \text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$  เมื่อพิจารณาจากรูปจะไม่สามารถแยกแยะได้ว่า  $\text{WO}_3$  มีการกระจายตัวของแต่ละอนุภาคใน  $\text{SnO}_2$  อย่างไร ดังนั้นเพื่อให้สามารถพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของแต่ละอนุภาคในสารผสมจึงต้องทำการศึกษาจากภาพถ่าย mapping ซึ่งได้จากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ข-ง ซึ่งจะแสดงลักษณะการกระจายตัวของธาตุ Sn, W และ O ตามลำดับ จากภาพพบว่าธาตุทั้งสามชนิดมีการกระจายตัวที่ดีซึ่งจะเป็นผลดีต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของหัววัดแก๊สที่ทำการประดิษฐ์ขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบภาพถ่าย SEM ในรูป 4.4 ก. กับภาพถ่าย mapping ของ W ในรูปที่ 4.4 ค. พบว่าอนุภาคของ  $\text{WO}_3$  มีการกระจายตัวที่ผิว



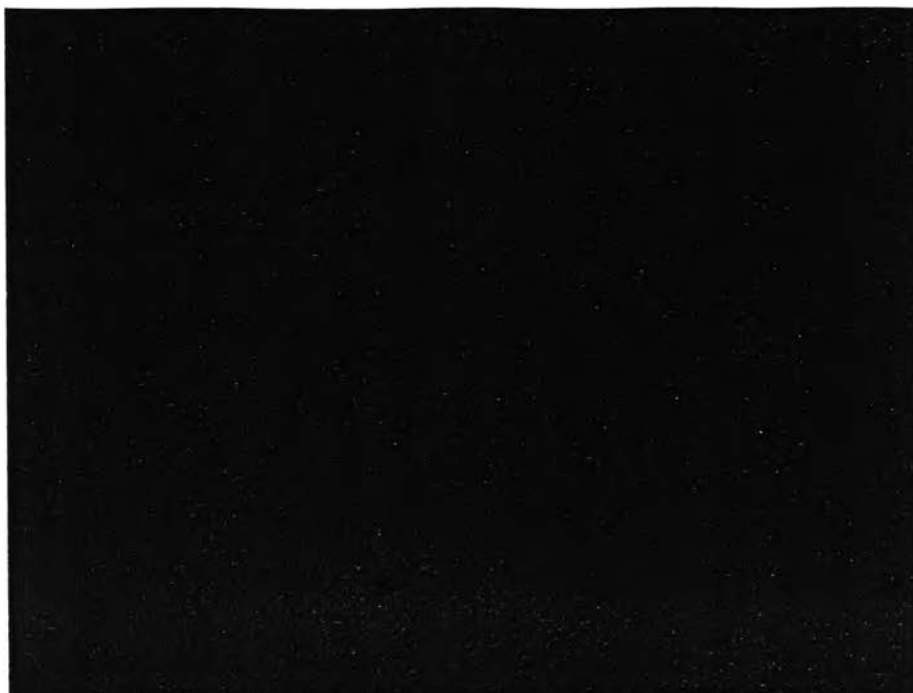
ก)  $5\% \text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$



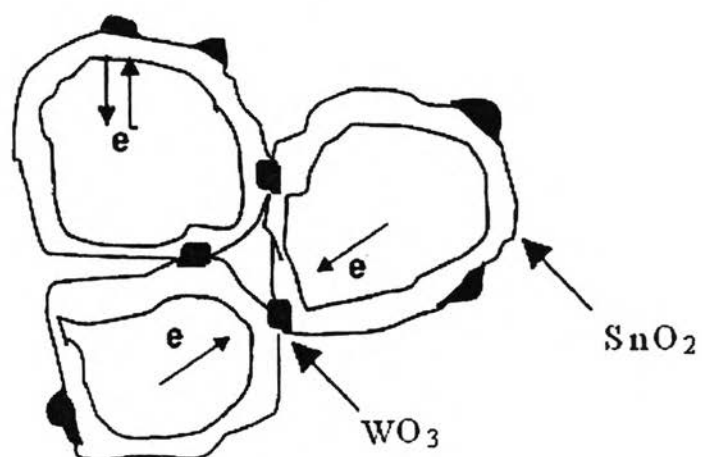
u) Sn



n) W



ง) O



จ)

รูปที่ 4.4 ก) ภาพถ่าย SEM ของ O ข) ภาพถ่าย mapping แสดงการกระจายตัวของอะตอม Sn  
 ค) ภาพถ่าย mapping แสดงการกระจายตัวของอะตอม W ง) ภาพถ่าย mapping แสดง  
 การกระจายตัวของอะตอม O จ) ภาพวาดแสดงแบบจำลองการกระจายตัวของ  $WO_3$  บน  
 พื้นผิวของ  $SnO_2$

จากรูปที่ 4.4 ข-ง ซึ่งเป็นภาพถ่าย mapping แสดงการกระจายตัวของอะตอม Sn W และ O ในองค์ประกอบของหัววัด ซึ่งแสดงให้เห็นการกระจายตัวที่คี่ของแต่ละองค์ประกอบ โดยจากรูปที่ 4.4 ค จะสังเกตเห็นว่าอะตอมของ W จะกระจายตัวบริเวณพื้นผิวของ Sn ซึ่งจะแสดงดังแบบจำลองของการกระจายตัวของ W บนพื้นผิวของ Sn ในรูปที่ 4.4 จ

#### 4.1.3 ผลของปริมาณ $WO_3$ ในโครงสร้างของ $SnO_2$ ที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊ส

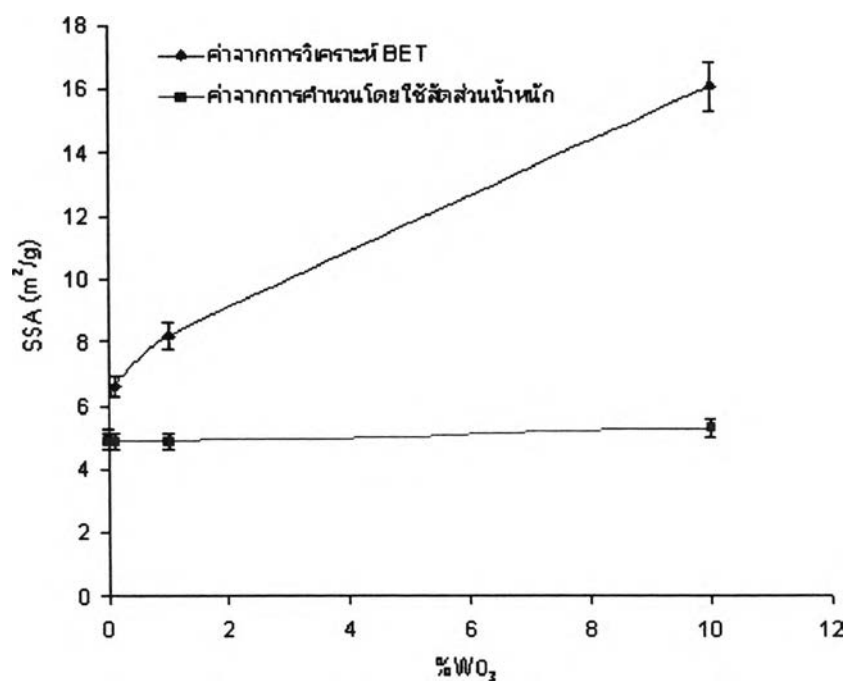
ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณ  $WO_3$  ที่เติมลงไป ในโครงสร้างของ  $SnO_2$  ที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หัววัดแก๊ส โดยจะทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีการเติม  $WO_3$  ปริมาณ 0.01% 0.1% 1% และ 10% โดยน้ำหนักลงไป ในโครงสร้างของ  $SnO_2$  แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $500^\circ C$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่เตรียมได้ไปทำการวัดเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้อัตราส่วนของน้ำหนักซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5

ผลจากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5 พบว่าตัวอย่าง  $SnO_2$  บริสุทธิ์มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ  $4.87 \text{ m}^2/\text{g}$  ส่วน  $WO_3$  บริสุทธิ์จะมีค่าเท่ากับ  $8.77 \text{ m}^2/\text{g}$  และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณการเติม  $WO_3$  จาก 0.01% เป็น 10% ทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเพิ่มขึ้นจาก  $5.02 \text{ m}^2/\text{g}$  เป็น  $16.08 \text{ m}^2/\text{g}$  นั่นคือเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้จากการคำนวณโดยสมมติว่าทั้ง  $WO_3$  และ  $SnO_2$  ผสมกันเป็นลักษณะที่เป็นคอมโพสิต (composite) โดยคำนวณจากสัดส่วนน้ำหนักของ  $WO_3$  ใน  $SnO_2$  กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้จากการวัดจริง พบว่าค่าที่ได้จากการวัดจริงมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม  $WO_3$  ลงไปใน  $SnO_2$  นั้น  $WO_3$  ไม่ได้กระจายตัวใน  $SnO_2$  ในลักษณะที่เป็นคอมโพสิต แต่น่าจะกระจายตัวตามขอบเกรนโดยอาจจะทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงการโตของเกรน (grain growth inhibitor) ซึ่งทำให้อัตราการโตของเกรนลดลง นอกจากนี้ยังอาจทำหน้าที่ช่วยลดการเกาะตัวเป็นก้อนของอนุภาค  $SnO_2$  ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ  $WO_3$  ที่เติมลงไป ในโครงสร้าง ซึ่งภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 4.3 สอดคล้องกับสมมติฐานนี้เนื่องจากในตัวอย่างที่มีการเติม  $WO_3$  ลงไปมีการเกาะตัวกันของอนุภาคน้อยกว่าตัวอย่างที่เป็น  $SnO_2$  บริสุทธิ์

ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณ  $\text{WO}_3$  ที่เติมลงไปโครงสร้าง  $\text{SnO}_2$  ที่มีต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ( $\text{m}^2/\text{g}$ )จากการคำนวณโดยใช้สัดส่วนน้ำหนัก	พื้นที่ผิวจำเพาะ( $\text{m}^2/\text{g}$ )จากการวิเคราะห์ BET
$\text{WO}_3^*$	-	8.77
$\text{SnO}_2$	-	4.87
0.01% $\text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$	4.874	5.02
0.1% $\text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$	4.878	6.62
1% $\text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$	4.913	8.20
10% $\text{WO}_3$ - $\text{SnO}_2$	5.264	16.08

\* จากเอกสารอ้างอิงที่ 56



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณ  $\text{WO}_3$  และพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร

#### 4.1.4 ผลของเงื่อนไขในการเผาที่มีต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของอนุภาคนาโน

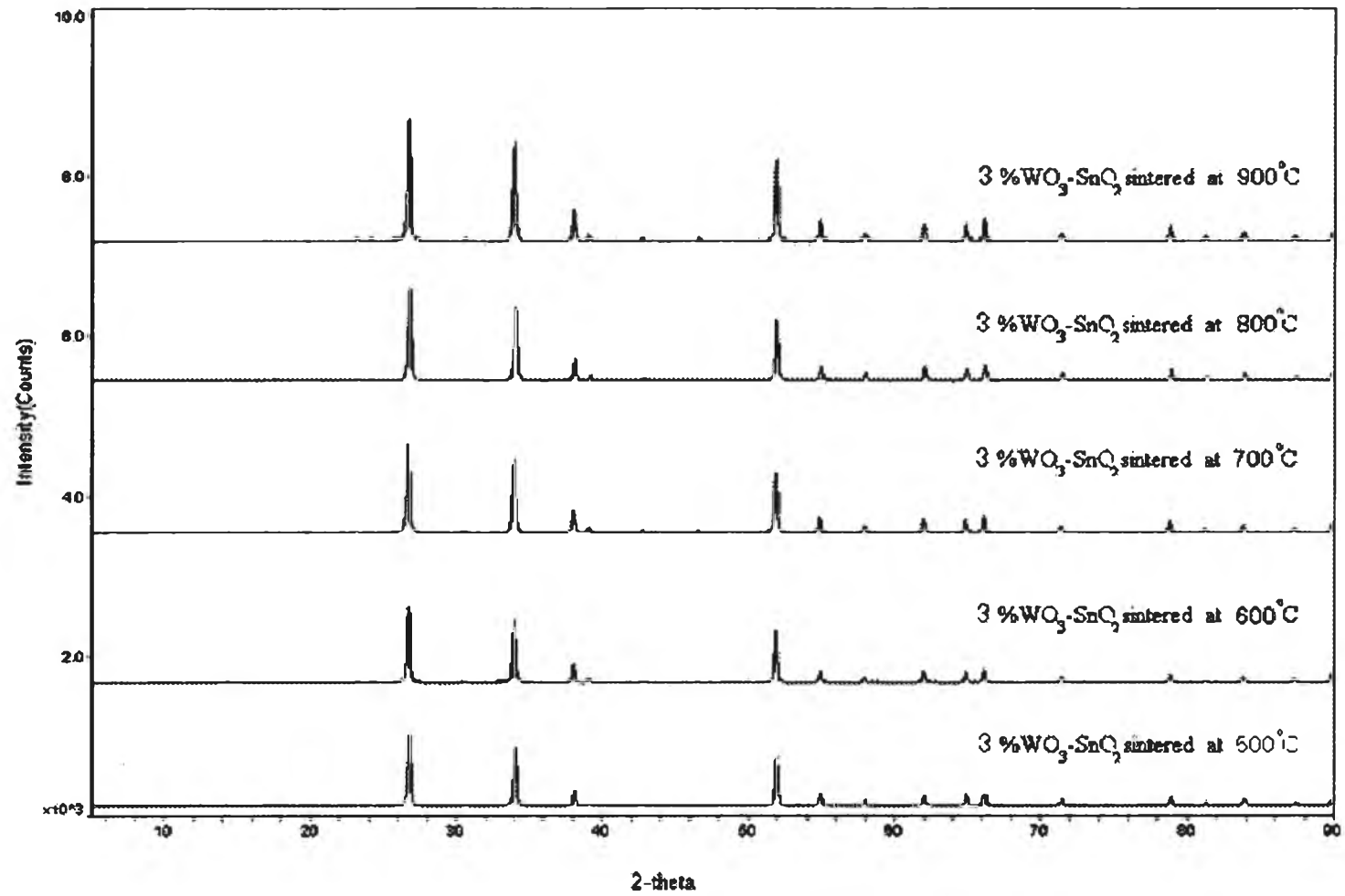
##### $WO_3-SnO_2$

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบแถบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของ  $3\%WO_3-SnO_2$  ที่ทำการเผาในช่วงอุณหภูมิ  $500 - 900^\circ C$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากการพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ปรากฏว่า ไม่พบพีคที่เป็นเฟสขององค์ประกอบใหม่ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง  $WO_3$  และ  $SnO_2$  เกิดขึ้น ซึ่งอาจมาจากสาเหตุสองประการคือ การเผาสารที่อุณหภูมิต่ำเกินไป และปริมาณของ  $WO_3$  มีค่าน้อยเกินไปซึ่งพบว่าที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ประมาณ 23.3, 24.1 และ  $30.7$  องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนหลักของ  $WO_3$  พบว่าจะมีพีคที่มีความสูงไม่ชัดเจนซึ่งสาเหตุเกิดจากปริมาณ  $WO_3$  ที่เติมลงไปในการสร้างของ  $SnO_2$  มีค่าน้อยเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของ  $SnO_2$  ดังนั้นเพื่อขจัดข้อสงสัยเกี่ยวกับการเกิดเฟสขององค์ประกอบใหม่เกิดขึ้นหรือไม่ จึงทำการศึกษาตัวอย่างที่ทำการเตรียมโดยการเพิ่มปริมาณ  $WO_3$  เป็น  $20\%$  และทำการเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น  $1,000^\circ C$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.9

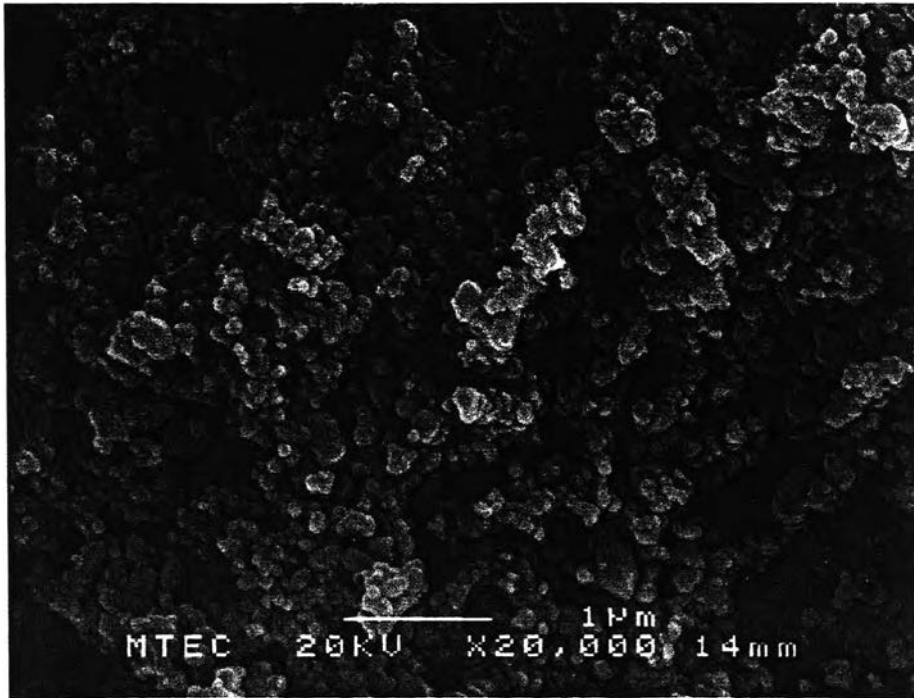
จากผลการวิเคราะห์เฟสสำหรับตัวอย่างที่ทำการเจือด้วย  $3\% WO_3$  และทำการเผาในช่วงอุณหภูมิ  $500-900^\circ C$  ในรูปที่ 4.6 พบว่าความสูงของพีคการเลี้ยวเบนจะมีความสูงค่อยๆเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกของ  $SnO_2$  จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเผาในช่วงอุณหภูมิ  $500-900^\circ C$  และเมื่อ พิจารณารูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและแผนภาพแสดงการเปรียบเทียบขนาดเกรนของตัวอย่าง  $3\%WO_3$  ที่ทำการเผาในช่วงอุณหภูมิ  $500-900^\circ C$  ซึ่งพบว่าขนาดของเกรนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.9 แสดงพีคการเลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์ และ ลักษณะ โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่าง  $20\% WO_3$  ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ  $1,000^\circ C$  ซึ่งจะพบว่าความสูงของพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ประมาณ 23.3, 24.1 และ  $30.7$  องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนหลักของ  $WO_3$  จะมีความสูงที่ชัดเจนและยังคงไม่พบพีคของสารประกอบใหม่ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง  $WO_3$  และ  $SnO_2$  ซึ่งเป็นการยืนยันว่าไม่พบเฟสใหม่ของสารประกอบใหม่ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง  $WO_3$  และ  $SnO_2$  ถึงแม้จะทำการเพิ่มอุณหภูมิการเผาและปริมาณการเติมสาร  $WO_3$  ลงไปในโครงสร้างของ  $SnO_2$

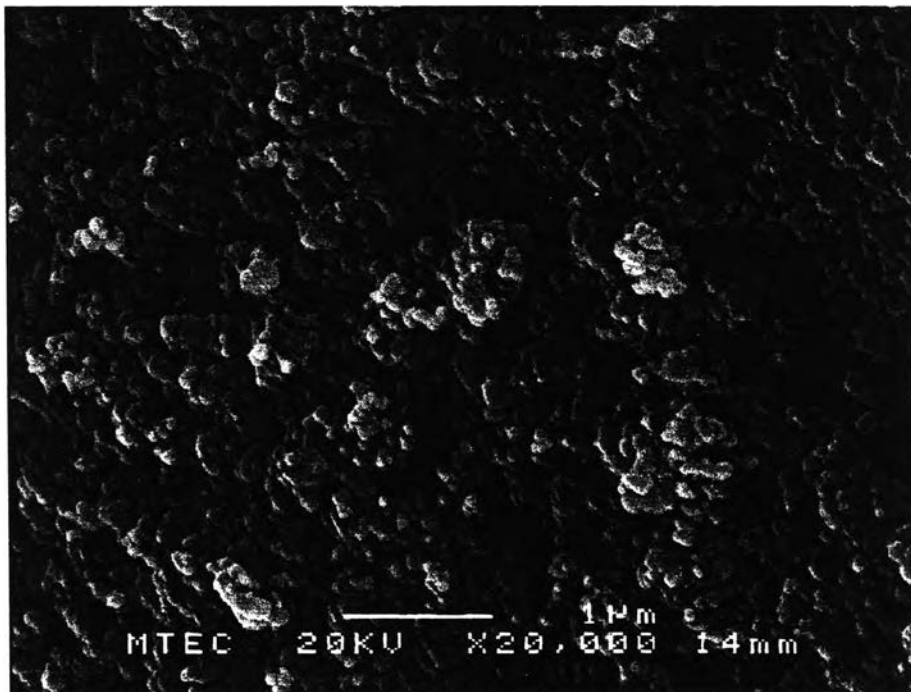




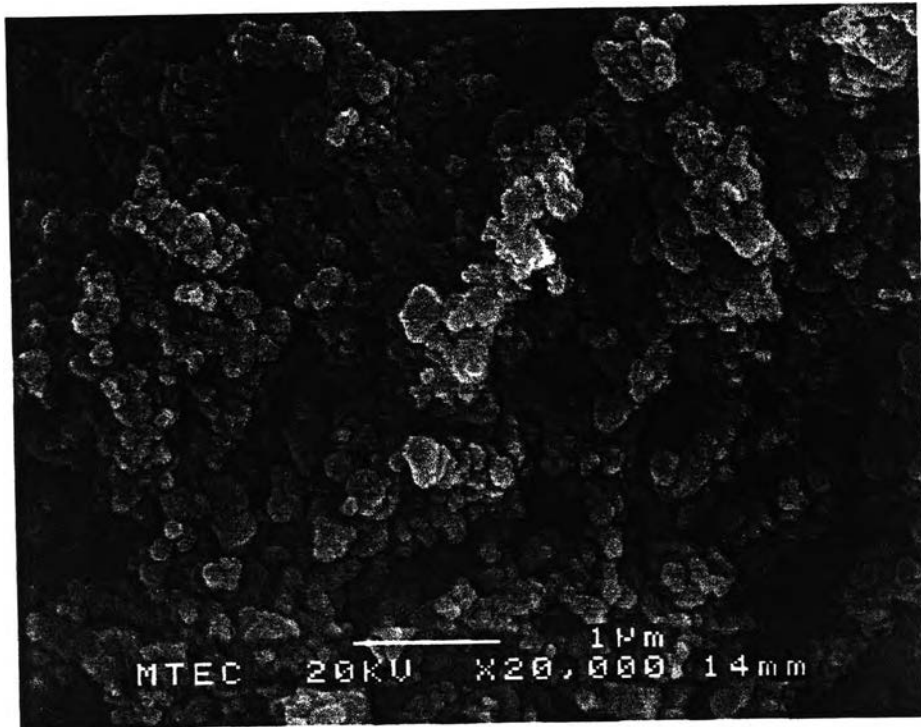
รูปที่ 4.6 แถบการเลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์ ของ 3%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> ที่ทำการเผาในช่วงอุณหภูมิ 500- 900°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



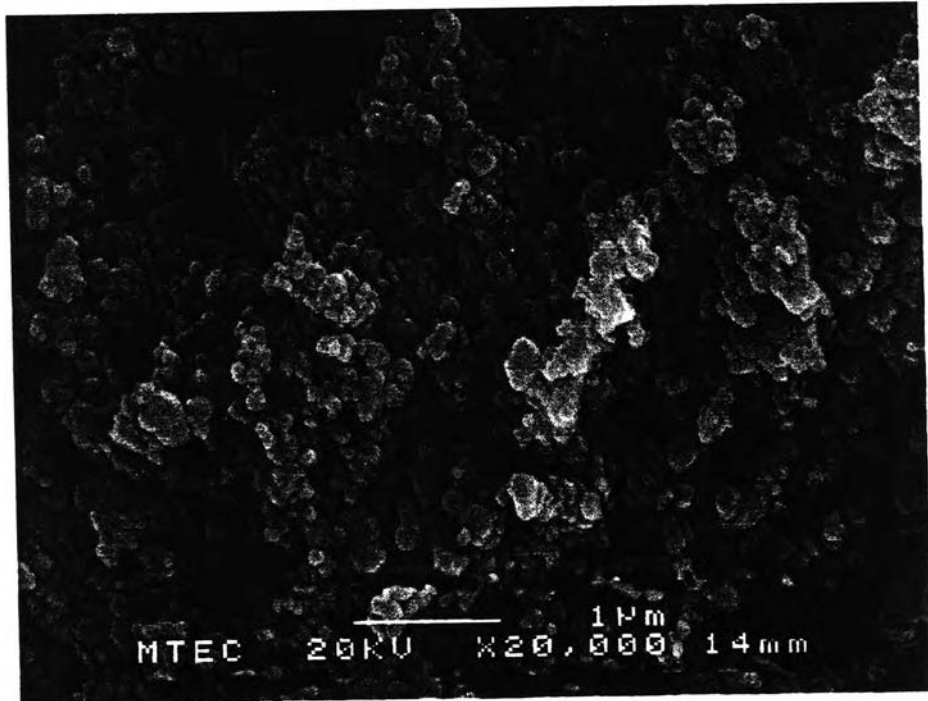
ก) 3%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> เฝ้าที่อุณหภูมิ 500°C



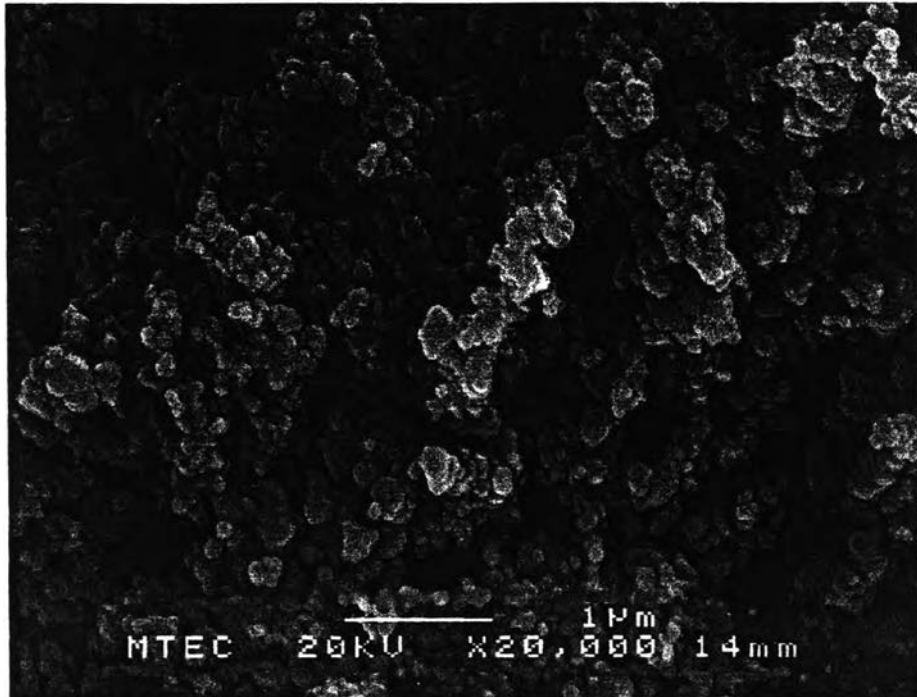
ข) 3%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> เฝ้าที่อุณหภูมิ 600°C



ค) 3% WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> เฝ้าที่อุณหภูมิ 700°C

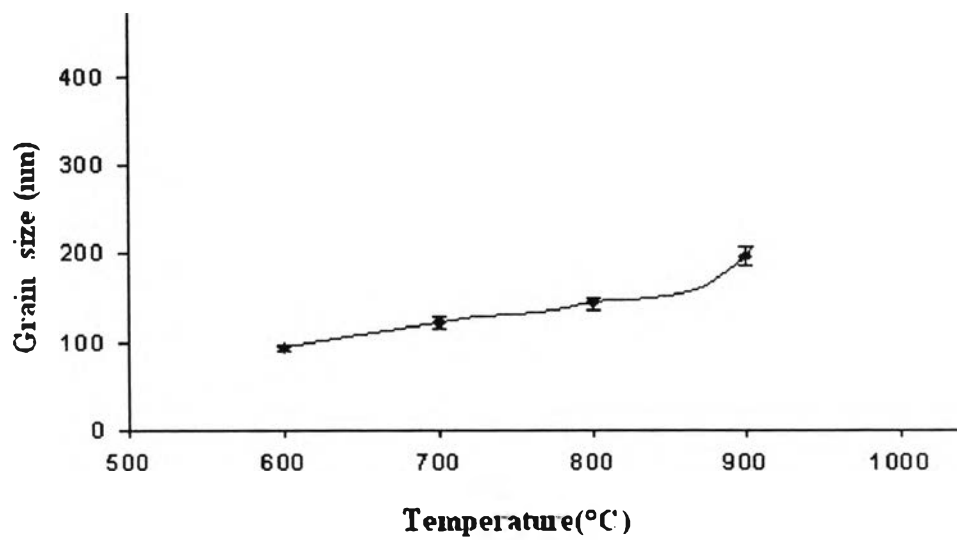


ง) 3%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> เฝ้าที่อุณหภูมิ 800°C

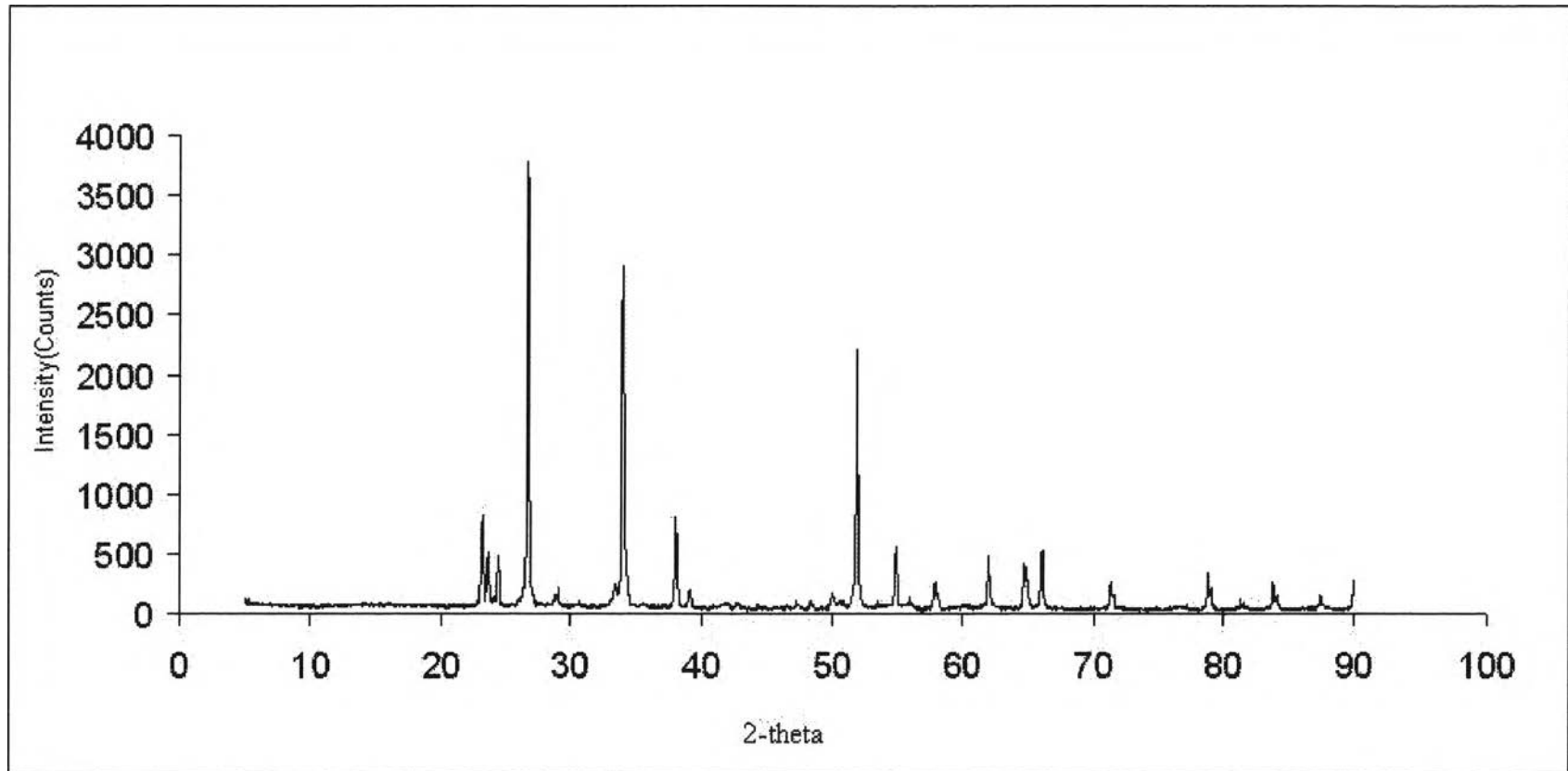


จ) 3%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> เผลาที่อุณหภูมิ 900°C

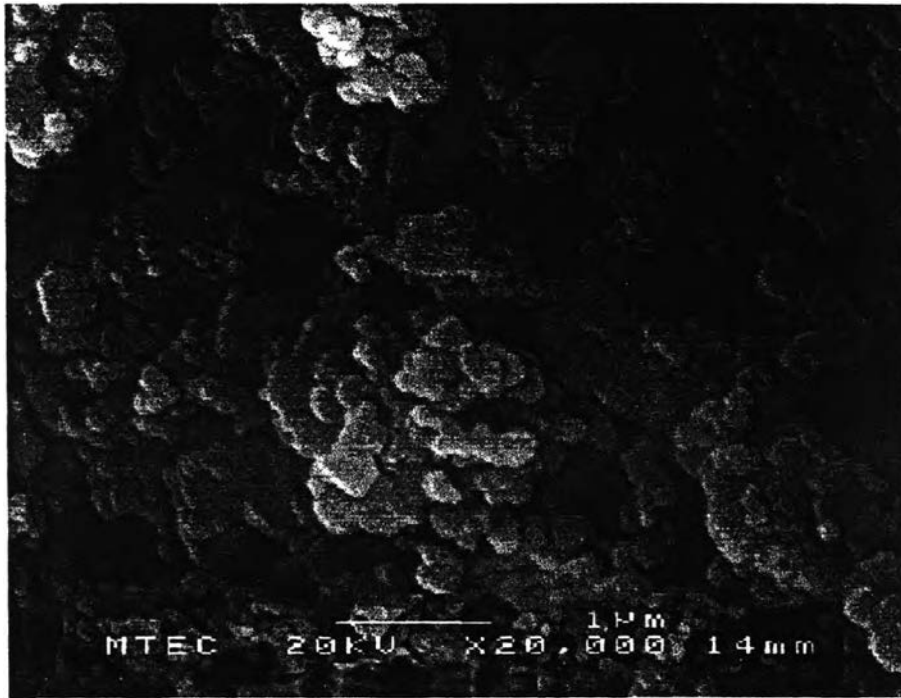
รูปที่ 4.7 รูปถ่าย SEM ของตัวอย่าง 3%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> ที่เผาในช่วงอุณหภูมิ 500-900°C



รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงการเปรียบเทียบขนาดของเกรนที่เผาในช่วงอุณหภูมิ 600-900°C



ก) แถบการเลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์ ของ  $20\% \text{WO}_3\text{-SnO}_2$  ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ  $1,000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



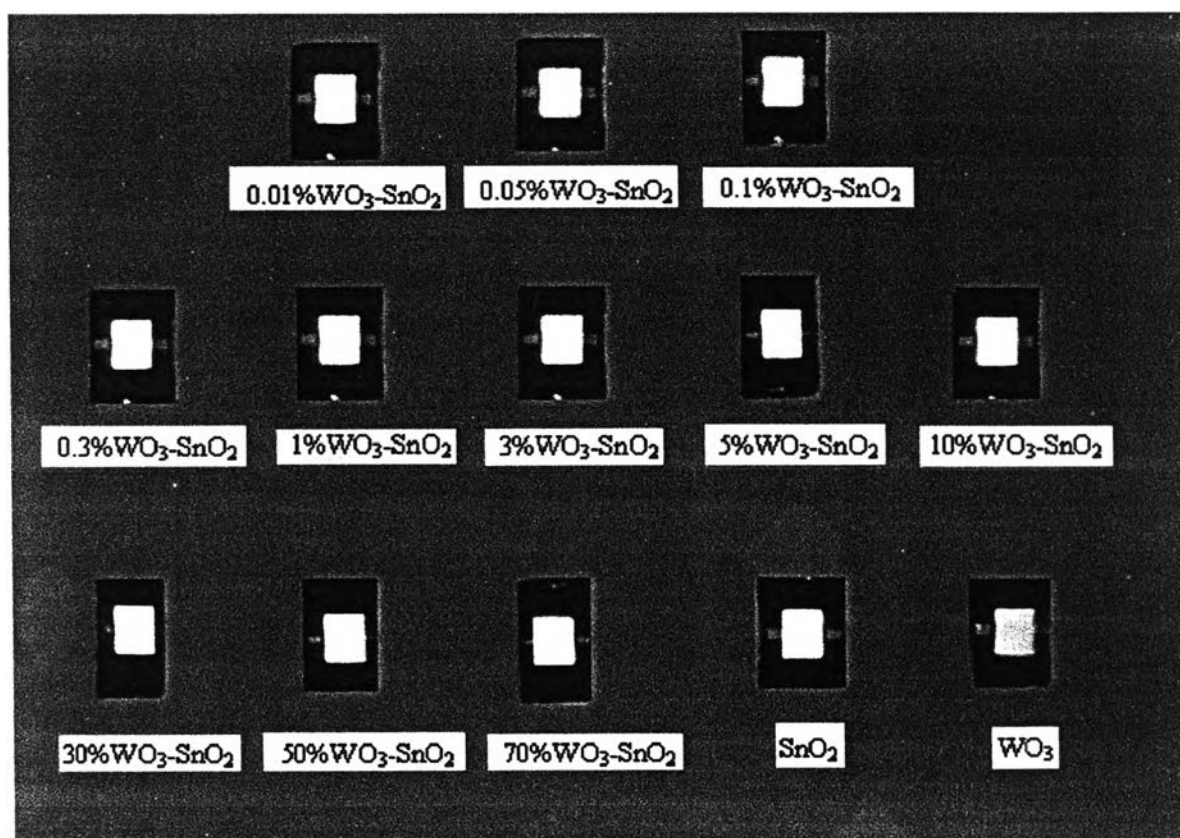
ข) 20 %WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> เฝ้าที่อุณหภูมิ 1,000°C

รูปที่ 4.9 ก) แถบการเลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์ ของ 20%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> ที่ทำการเผาในช่วงอุณหภูมิ 500 และ 1,000°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ข) แสดงรูปถ่าย SEM ของ 20%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> เฝ้าที่อุณหภูมิ 1,000°C

## 4.2 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโน $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$

### 4.2.1 ลักษณะการตอบสนองของหัววัดแก๊สเอทิลีน

รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะหัววัด  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$  ที่ทำการเตรียมโดยการนำเอาผง  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$  ที่ถูกเตรียมโดยใช้เงื่อนไขต่างๆ มาทำให้อยู่ในรูปของหมึกพิมพ์โดยการผสมผงของ  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$  กับสารตัวพา (vehicle) ซึ่งเตรียมจากสารเอทิลเซลลูโลส (ethylcellulose) ในตัวทำละลายเทอร์พีนอล (terpineol) ในอัตราส่วน 1:9 โดยอัตราส่วนของผง  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$  ต่อสารตัวพาจะเท่ากัน 2:1 โดยสารที่ได้จะถูกนำมาบดผสมให้เข้ากัน โดยต้องมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสม และทำการขึ้นรูปโดยวิธีพิมพ์สกรีนซึ่งหัววัดแก๊สที่ประดิษฐ์ขึ้นจะมีขนาด  $3 \times 4$  มิลลิเมตร



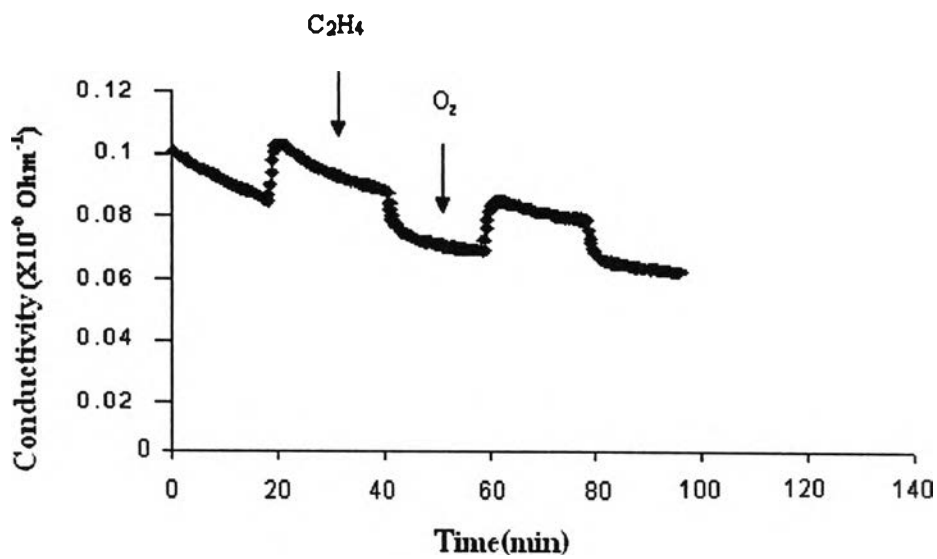
รูปที่ 4.10 หัววัด  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$  ที่ทำการขึ้นรูปโดยวิธีพิมพ์สกรีน

รูปที่ 4.11 ก และ ข แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของหัววัดแก๊สเอทิลีนที่เตรียมจากสาร  $WO_3$  และ  $SnO_2$  บริสุทธิ์ โดยหัววัดแก๊สที่ประจุสูงขึ้นจะถูกทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีน โดยจะทำการศึกษาจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพความนำไฟฟ้าที่ตกคล่อมหัววัดแก๊ส ในสภาวะบรรยากาศปกติและสภาวะบรรยากาศของแก๊สเอทิลีนสลับกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 ก และ ข พบว่าจะมีระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความนำอยู่สองระดับคือที่ระดับค่าความนำไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งจะเป็นค่าความนำที่สภาวะบรรยากาศปกติ (มี  $O_2$  สูง) โดยในสภาวะนี้อิเล็กตรอนอิสระที่ปกคลุมพื้นผิวของ  $WO_3$  และ  $SnO_2$  จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็น  $O_2^-$  หรือ  $O^-$  ซึ่งจะมีผลทำให้ค่า ค่าแรงศักย์ขอตัดที่ซึ่งปรากฏที่รอยต่อระหว่างเกรนมีค่าสูงขึ้นโดยค่าแรงศักย์ขอตัดก็จะคอยขัดขวางการเคลื่อนที่ผ่านระหว่างเกรนของอิเล็กตรอนอิสระและเมื่อกำแพงศักย์ขอตัดมีค่าสูงขึ้นโอกาสที่อิเล็กตรอนอิสระจะกระโดดข้ามกำแพงศักย์เพื่อผ่านไปยังอีกเกรนหนึ่งจึงมีน้อยลงดังนั้นจึงมีผลทำให้ค่าสภาพความนำไฟฟ้าในสภาวะนี้มีค่าต่ำ ส่วนในระดับที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงกว่าจะเป็นสภาวะบรรยากาศของแก๊สเอทิลีน โดยในสภาวะนี้แก๊สเอทิลีนจะเข้าไปดึงออกซิเจนที่ดูดซับอยู่บริเวณพื้นผิวของ  $WO_3$  และ  $SnO_2$  ออกไปทำให้ออกซิเจนที่ถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวลดลงและจะส่งผลให้ค่าแรงศักย์ขอตัดมีค่าต่ำซึ่งทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนอิสระจะกระโดดข้ามกำแพงศักย์เพื่อผ่านไปยังอีกเกรนหนึ่งจึงมีมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าสภาพความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.11 ก จะพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลาดเอียงลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลเกิดจากเส้นฐาน (base line) ซึ่งคือค่าต่ำสุดที่ใช้ในการอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของหัววัดไม่ว่าจะครั้งก่อนทำการวัดการตอบสนองของหัววัดแก๊สจะต้องทำการเปิดระบบวัดไว้ที่อุณหภูมิการใช้งานที่ต้องการตรวจวัดเป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมงเพื่อให้หัววัดเกิดความเสถียรภาพก่อนที่จะทำการวัดถ้าหัววัดยังไม่เสถียรจะทำให้ทุกครั้งที่ทำการตรวจวัดแก๊สจะทำให้เส้นกราฟลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลาดเอียงลง

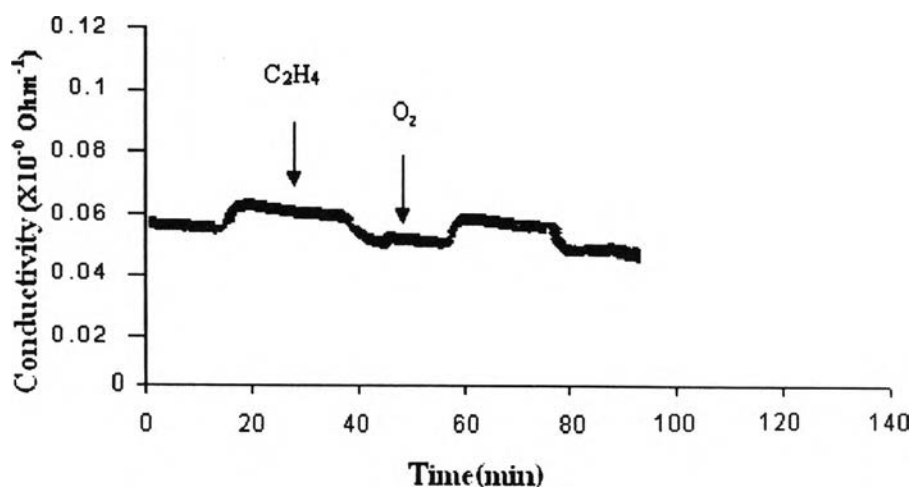
จากแผนภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของหัววัดแก๊สเอทิลีนของสาร  $WO_3$  และ  $SnO_2$  บริสุทธิ์ เมื่อนำเอาค่าการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นไปหาความสัมพันธ์โดยใช้สมการที่ (3.1) เพื่อหาค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนดังกล่าวความสัมพันธ์  $S = \frac{R_a - R_g}{R_g}$  เมื่อ  $R_g$  คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของหัววัดในสภาวะบรรยากาศตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนซึ่งจะสามารถหาได้จากส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้าในสภาวะบรรยากาศปกติ และ  $R_a$  คือค่าความต้านทานไฟฟ้าในสภาวะบรรยากาศของแก๊สเอทิลีนซึ่งจะเป็นส่วนกลับของค่าความนำไฟฟ้าในสภาวะเอทิลีนโดยผลที่ได้จากรูปที่ 4.11 ค คือแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนของสาร  $SnO_2$  และ  $WO_3$  บริสุทธิ์ พบว่า  $SnO_2$  มีค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนสูงกว่า  $WO_3$  อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ควรที่จะเลือกใช้  $SnO_2$  เป็นวัสดุพื้นฐาน



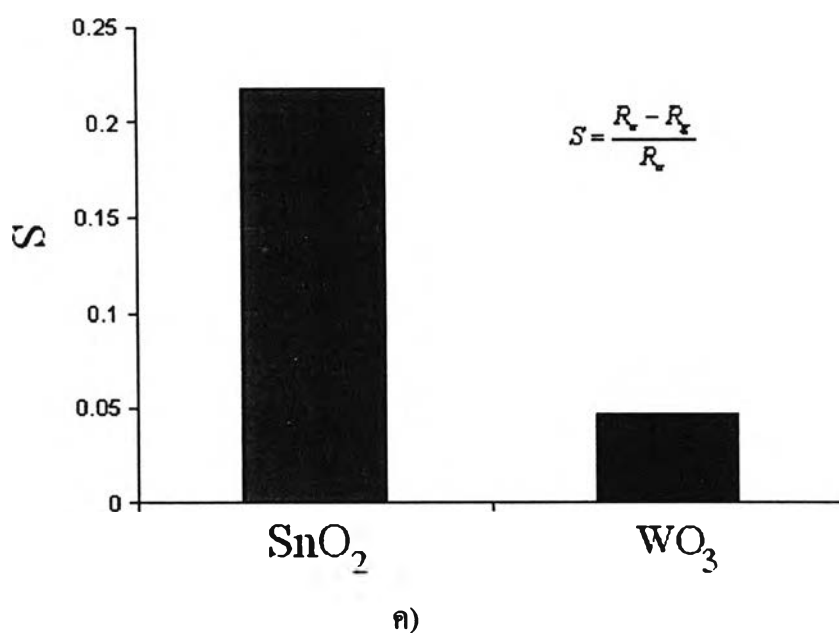
ในการประดิษฐ์หัววัดแก๊สเอทิลีน และใช้  $\text{WO}_3$  เป็นสารที่ใช้เติมลงไปโครงสร้างของ  $\text{SnO}_2$  เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้ดีขึ้น



ก)

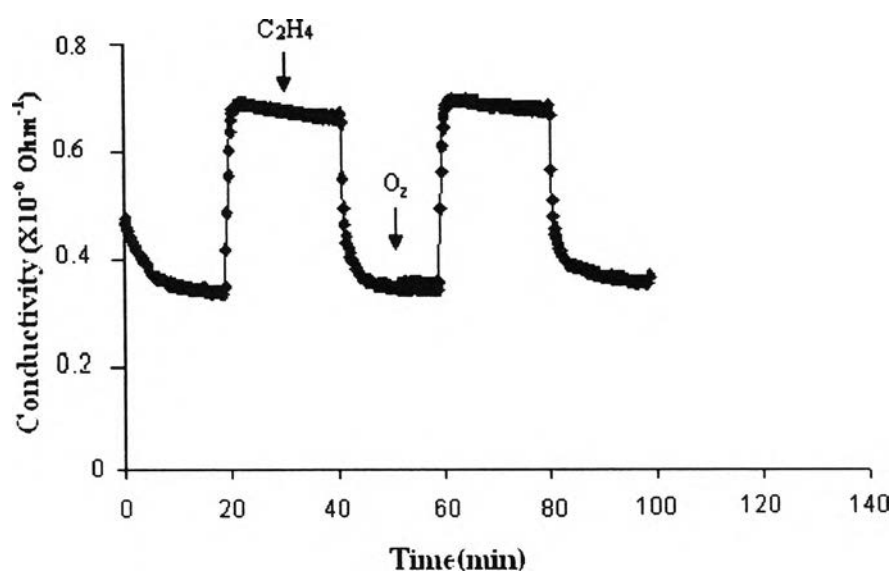


ข)

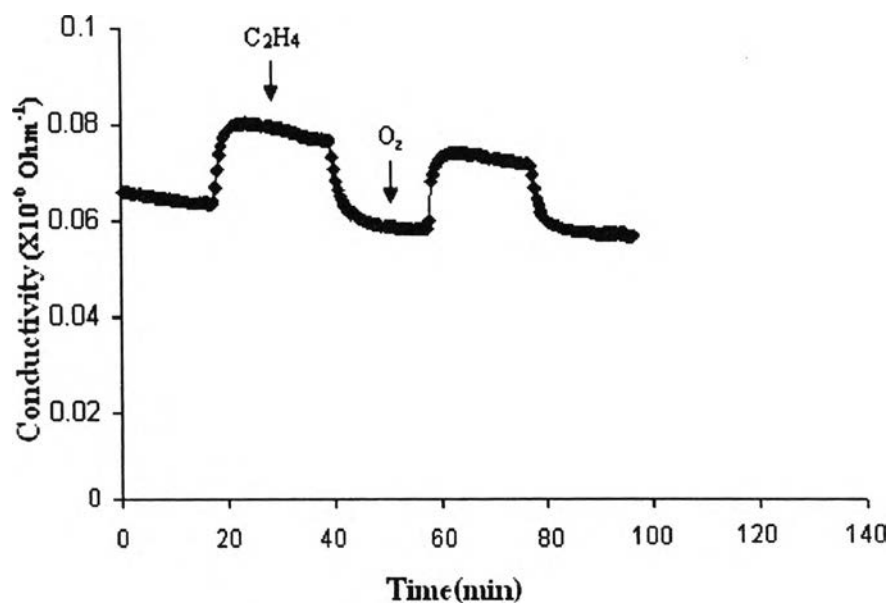
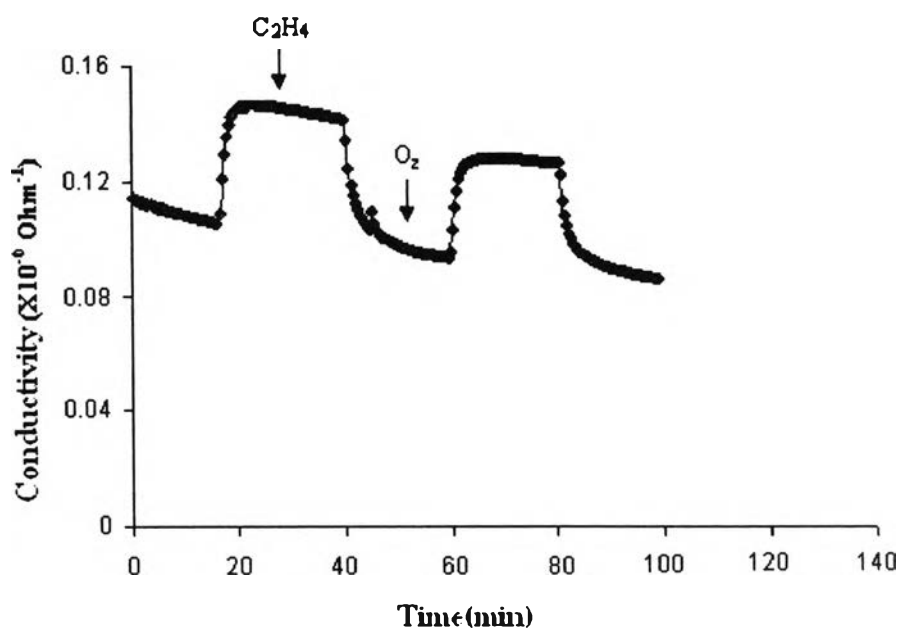


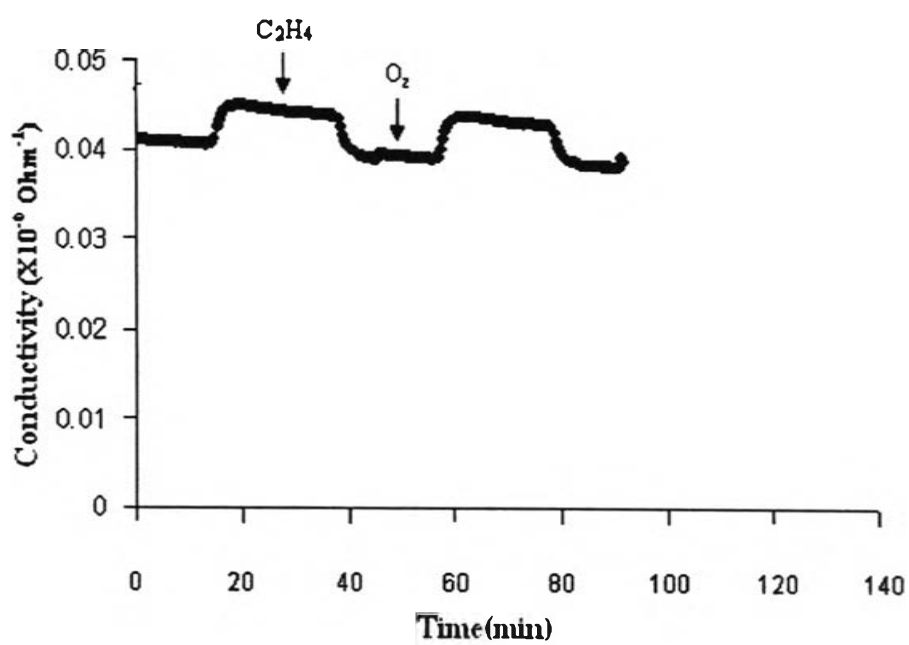
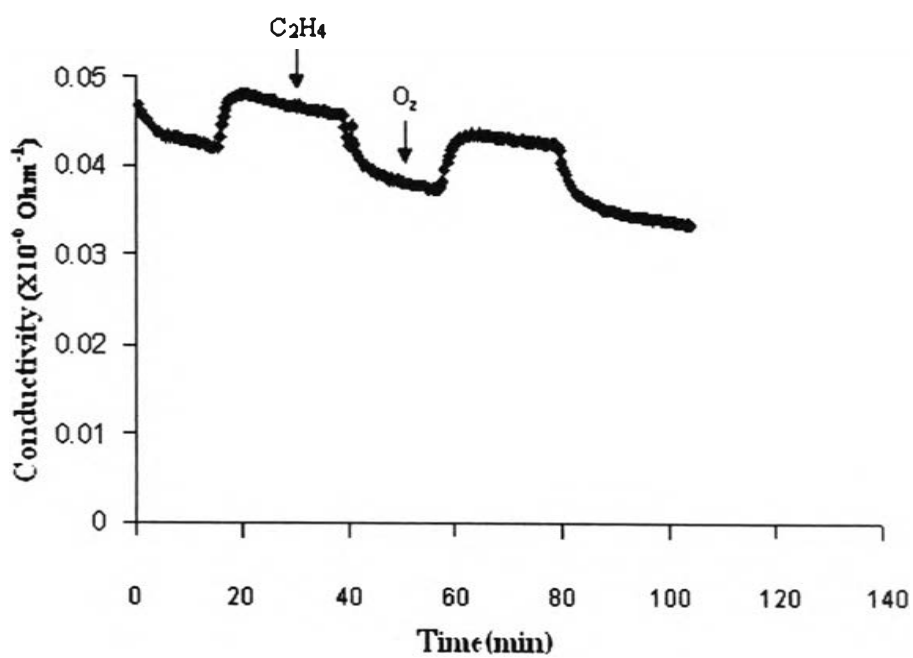
รูปที่ 4.11 ก)-ข) แสดงแผนภาพลักษณะการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนและ ค) แผนภูมิเปรียบเทียบค่าความไวระหว่าง SnO<sub>2</sub> และ WO<sub>3</sub>

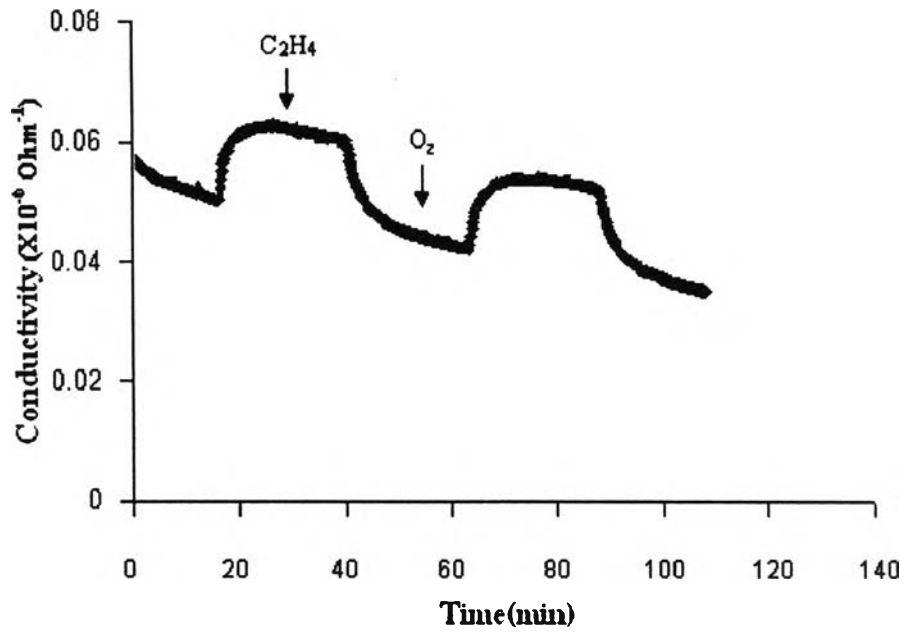
รูปที่ 4.12 ก-จ เป็นแผนภาพแสดงลักษณะการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนที่ความเข้มข้น 6 ppm ของหัววัดแก๊ส ที่มีการเติม WO<sub>3</sub> ในปริมาณต่างๆ ในโครงสร้างของ SnO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิการใช้งานเท่ากับ 300°C โดยทำการเปลี่ยนสถานะการตรวจวัดแก๊สระหว่างบรรยากาศแก๊สออกซิเจนและบรรยากาศแก๊สเอทิลีน ทุกๆ 20 นาที พบว่าหัววัดแก๊สมีการตอบสนองที่ดีต่อแก๊สเอทิลีนโดยพิจารณาจากความแตกต่างของค่าความนำไฟฟ้าระหว่างสถานะการตรวจวัดแก๊สทั้งสองสถานะซึ่งมีระดับที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



ก) 0.01%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>

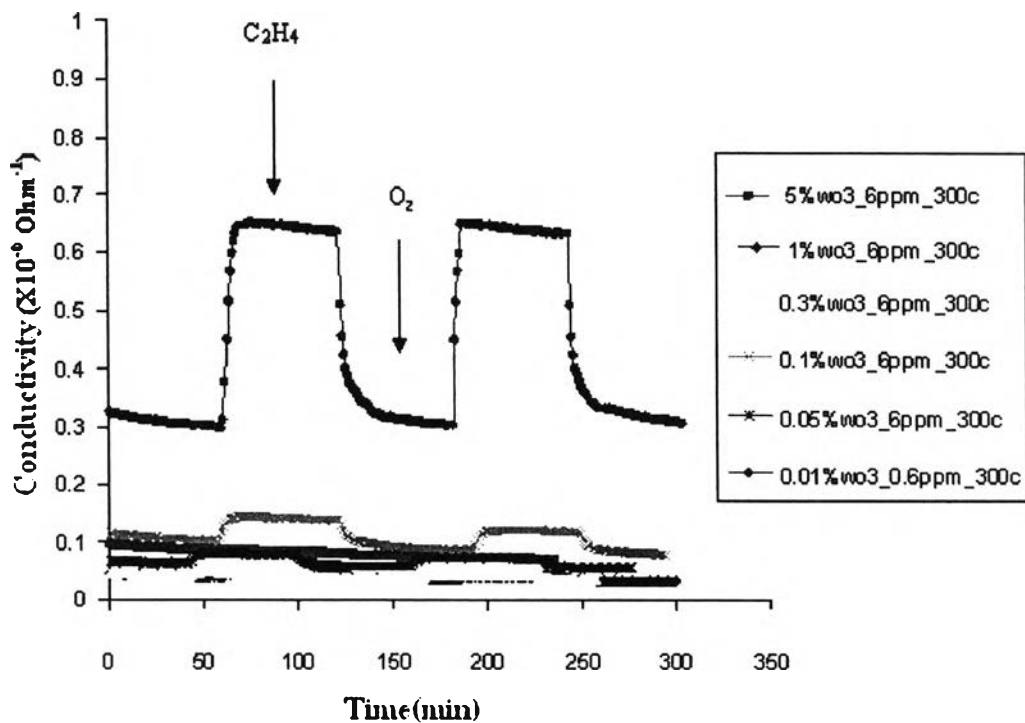
v) 0.05%  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$ vi) 0.1%  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$

d) 0.3%  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$ e) 1%  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$



จ) 5%WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>

รูปที่ 4.12 การตอบสนองของหัววัดแก๊สเอทิลีนที่เติม WO<sub>3</sub> ในปริมาณ 0.01-5% โดยน้ำหนัก (ความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนเท่ากับ 6 ppm และอุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 300°C)



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างหัววัดที่ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือ WO<sub>3</sub> ลงไปในโครงสร้างของ SnO<sub>2</sub>, เหนือที่อุณหภูมิ 500°C และที่อุณหภูมิใช้งานเท่ากับ 300°C

รูปที่ 4.13 เป็นแผนภาพแสดงการเปรียบเทียบลักษณะการตอบสนองต่อแก๊สเอทีลิน และ ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความนำไฟฟ้าที่สลับสถานะการตรวจวัดระหว่างบรรยากาศแก๊สออกซิเจน และบรรยากาศแก๊สเอทีลิน (6 ppm) ของตัวอย่างหัววัดที่ทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือ  $\text{WO}_3$  ลงไปในโครงสร้างของ  $\text{SnO}_2$  ในช่วง 0.01-3 %  $\text{WO}_3$

จากตารางและแผนภาพพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ทำการเจือ  $\text{WO}_3$  ในช่วง 0.05-5 % จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในอันดับที่ใกล้เคียงกัน คือ ที่บรรยากาศ  $\text{O}_2$  จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $4.0 \times 10^{-8}$  -  $10.2 \times 10^{-8} \text{ Ohm}^{-1}$  และที่บรรยากาศ  $\text{C}_2\text{H}_4$  จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $4.7$  -  $14.3 \times 10^{-8} \text{ Ohm}^{-1}$  แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างที่ทำการเจือ 0.01%  $\text{WO}_3$  โดยพิจารณาจาก แผนภาพและค่าในตารางพบว่าตัวอย่างมีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าอยู่ในอันดับที่สูงกว่า ตัวอย่างที่ทำการเจือ  $\text{WO}_3$  ในช่วง 0.05-5 % อย่างชัดเจน โดยพบว่า ที่บรรยากาศ  $\text{O}_2$  จะมีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ  $29.6 \times 10^{-8} \text{ Ohm}^{-1}$  และที่บรรยากาศ  $\text{C}_2\text{H}_4$  จะมีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ  $65.1 \times 10^{-8} \text{ Ohm}^{-1}$

จากผลที่อธิบายในเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าการเจือปริมาณ  $\text{WO}_3$  ลงไปในโครงสร้างของ  $\text{SnO}_2$  ในปริมาณที่ต่ำกว่า 0.05 % จะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของหัววัดมีค่าสูงกว่าหัววัดที่ทำการเจือ ปริมาณ  $\text{WO}_3$  ในปริมาณที่มากกว่า 0.05 % อย่างชัดเจนซึ่งเหตุผลเนื่องมาจากการเจืออะตอมของ  $\text{WO}_3$  ในปริมาณน้อยๆ ในโครงสร้างของ  $\text{SnO}_2$  จะเป็นการเพิ่มอิเล็กตรอนอิสระให้แก่ระบบซึ่งจะส่งผลให้ค่าความนำมีค่าสูงไฟฟ้ามี่ค่าสูง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าของหัววัด

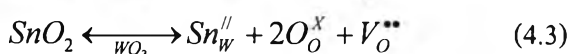
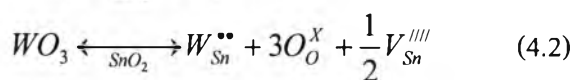
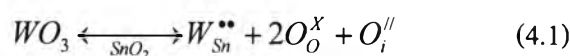
% $\text{WO}_3$	ความนำไฟฟ้าในบรรยากาศ $\text{O}_2$ ( $\times 10^{-8} \text{ Ohm}^{-1}$ )	ความนำไฟฟ้าในบรรยากาศ $\text{C}_2\text{H}_4$ ( $\times 10^{-8} \text{ Ohm}^{-1}$ )
0.01	29.6	65.1
0.05	6.3	8.0
0.1	10.2	14.3
0.3	4.1	4.8
1	4.0	4.7
5	4.7	5.5

#### 4.2.2 ผลของปริมาณ $WO_3$ ในโครงสร้างของ $SnO_2$ ที่มีผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีน

รูปที่ 4.14 เป็นแผนภาพแสดงการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนของตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบของ  $WO_3$  และ  $SnO_2$  โดยพบว่า การเจือปริมาณ 0.01%  $WO_3$  ลงไปในโครงสร้างของ  $SnO_2$  จะให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนสูงที่สุด และจะค่อยๆ ลดลงตามการเพิ่มปริมาณของ  $WO_3$  โดยพบว่า หัววัดจะมีค่าความไวในการตอบสนองต่ำที่สุดที่ 50%  $WO_3$ - $SnO_2$  และค่าความไวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ  $WO_3$  เป็น 70%  $WO_3$  -  $SnO_2$

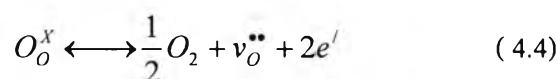
การเติม  $WO_3$  ลงไปใน  $SnO_2$  ทำให้เกิดผล 2 ประการ

1. เกิดจุดบกพร่องแบบแทนที่ (substitution) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ทั้งกรณี การเติม  $WO_3$  ในโครงสร้าง  $SnO_2$  หรือการเติม  $SnO_2$  ในโครงสร้าง  $WO_3$  (เนื่องจากเกิดที่จุดสัมผัสของสารทั้งสอง) โดยหลักในการพิจารณาการเกิดจุดบกพร่องแบบแทนที่จะพิจารณาจากอะตอมของสารทั้งสองต้องมีค่า electronegativity ใกล้เคียงกันและมีค่ารัศมีไอออนที่แตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยจากการพิจารณาคุณสมบัติทั้งสองข้อพบว่า พบว่า Sn และ W มีค่า electronegativity เท่ากับ 1.96 และ 2.36 ตามลำดับ ส่วนรัศมีไอออน พบว่า Sn และ W มีรัศมีไอออนเท่ากับ 1.62 และ 1.41 อังสตรอม ตามลำดับ ซึ่งจากการพิจารณาจากหลักการเบื้องต้นพบว่า โอกาสที่จะเกิดจุดบกพร่องแบบแทนที่มีความเป็นไปได้สูง โดยสมการการเกิดจุดบกพร่องแบบแทนที่จะเป็นไปดังสมการ



เมื่อพิจารณาขณะทำการทดสอบหัววัดแก๊สซึ่งวัสดุจะอยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนต่ำซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างออกซิเจนซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ (4.4) ซึ่งจะมีผลทำให้การนำไฟฟ้าและการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุกับแก๊สมีค่ามากขึ้น

ปฏิกิริยาการเกิดช่องว่างออกซิเจนซึ่งเกิดในสารประกอบ โลหะออกไซด์จะเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบถูกเผาในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อยในสถานะเช่นนี้ออกซิเจนในโครงสร้างของโลหะออกไซด์จะหลุดออกจากโครงสร้างเกิดเป็นช่องว่างออกซิเจนขึ้นดังสมการ

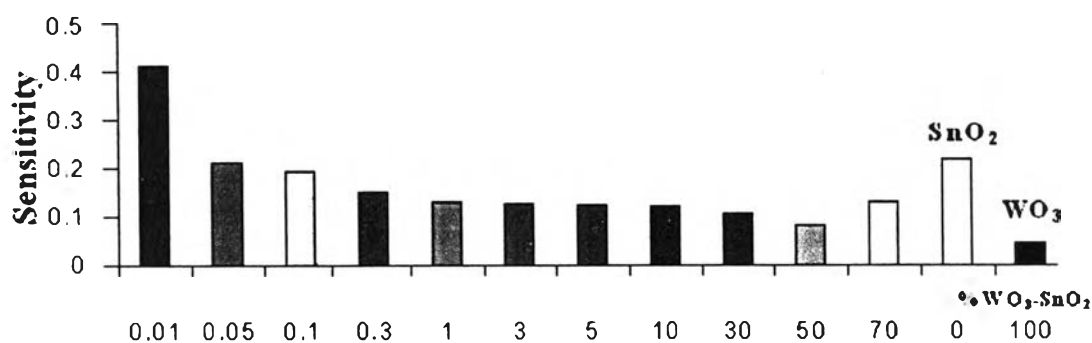


เมื่อออกซิเจนหลุดออกจากโครงสร้างผลึกก็จะคืนอิเล็กตรอน 2 ตัวที่เคยได้รับจากโลหะ ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอน 2 ตัวที่ถูกคืนยังคงวิ่งวนเวียนอยู่รอบๆ ช่องว่างออกซิเจน และเนื่องจากไม่

มีอะตอมของออกซิเจนคอยยึดไว้จึงทำให้อิเล็กตรอน 2 ตัวซึ่งถูกยึดไว้ในโครงสร้างด้วยแรงอ่อนๆ จะประพฤติตัวเหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระในโลหะซึ่งพร้อมจะเคลื่อนตัวไปตามทิศของสนามไฟฟ้าที่เข้ามากระตุ้นดังนั้นอิเล็กตรอน 2 ตัวนี้จึงเป็นพาหะประจุทำหน้าที่นำไฟฟ้าได้ดี

2. อะตอมของ  $WO_3$  ที่อยู่บริเวณขอบเกรนของ  $SnO_2$  ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ผ่านระหว่างเกรนของอิเล็กตรอนอิสระซึ่งจะส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าและค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าต่ำลง

เมื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ประการพบว่าผลที่เกิดขึ้นประการแรกจะมีความเด่นชัดเมื่อมีการเติมปริมาณของ  $WO_3$  มีค่าน้อยๆ ในโครงสร้างของ  $SnO_2$  ( $<0.05\% WO_3$ ) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าและค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าสูงซึ่งจะเป็นผลดีต่อหัววัดแก๊ส และเมื่อเพิ่มปริมาณของ  $WO_3$  ในโครงสร้างผลในประการที่สองจะมีความเด่นชัดขึ้นส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าและค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าต่ำลงซึ่งจะเป็นผลที่ไม่ดีสำหรับหัววัดแก๊ส โดยผลที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับผลการทดลองทุกประการ



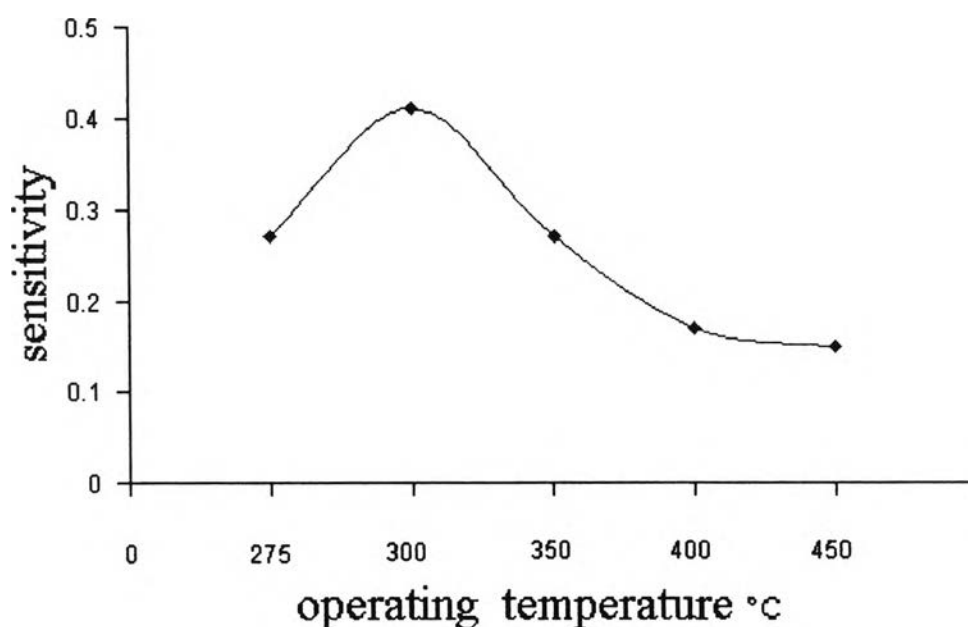
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ  $WO_3$  ในโครงสร้างของ  $SnO_2$  ที่มีผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีน



### 4.2.3 อุณหภูมิการใช้งาน

รูปที่ 4.15 เป็นแผนภาพแสดงการเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนที่อุณหภูมิใช้งานต่างๆ จากผลแสดงให้เห็นว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนของตัวอย่างที่ทำการเจือ 0.01%WO<sub>3</sub> ลงไปในโครงสร้างของ SnO<sub>2</sub> จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของหัววัดจากอุณหภูมิห้อง และพบว่าหัววัดจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิการใช้งานเท่ากับ 300°C และจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิใช้งานมีค่ามากกว่า 300°C

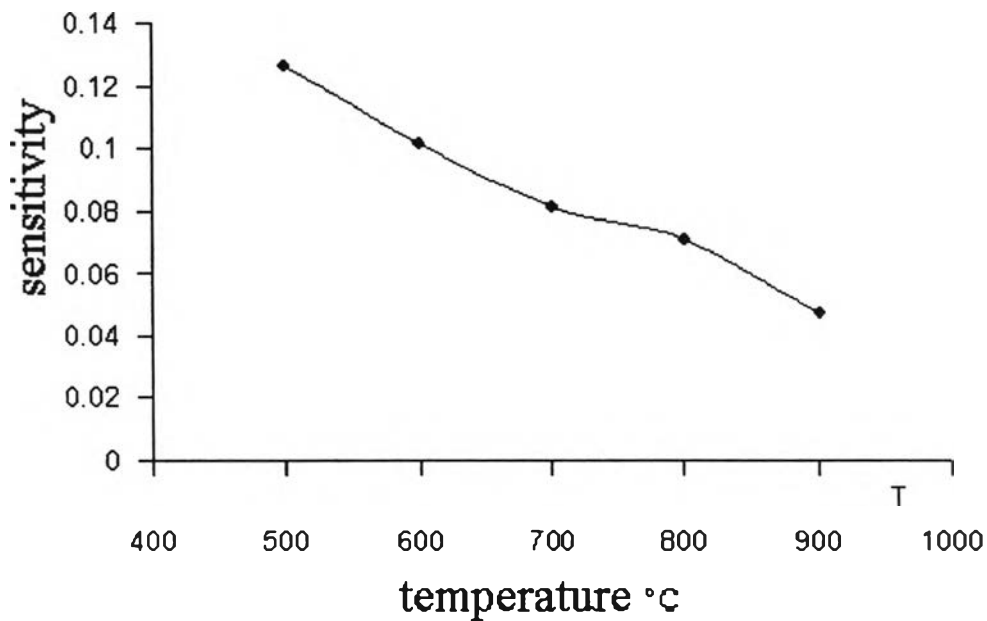
จากการอธิบายเบื้องต้นมีเหตุผลเนื่องมาจาก การเพิ่มอุณหภูมิของหัววัดจากอุณหภูมิห้อง จะเป็นการเพิ่มพลังงานกระตุ้น (activation energy) ให้กับหัววัดซึ่งจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ผ่านระหว่างเกรนได้ดีขึ้นและทำให้เกิดการดูดซับที่พื้นผิวของแก๊สมากขึ้นและที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 300°C) แก๊สที่ถูกดูดซับบริเวณพื้นผิวจะถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากพื้นผิวซึ่งจะทำให้ค่าความไวลดลง



รูปที่ 4.15 แสดงผลของอุณหภูมิการใช้งานที่มีต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนของตัวอย่าง 0.01% WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub>

#### 4.2.4 ผลของอุณหภูมิการเผาที่มีต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีน

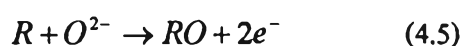
รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการเผาที่มีผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนของ 3%  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$  ซึ่งพบว่าค่าความไวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา โดยค่าความไวจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิการเผาเท่ากับ  $500^\circ\text{C}$  ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะมีผลให้ขนาดเกรนของหัววัดมีขนาดโตซึ่งจะส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของสารลดลงและทำให้พื้นที่ในการทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ต้องการตรวจวัดลดลงซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าความไวลดลงซึ่งผลดังกล่าวจะสอดคล้องกับผลในหัวข้อที่ 4.1.4



รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการเผาที่มีผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนของตัวอย่าง 3%  $\text{WO}_3\text{-SnO}_2$

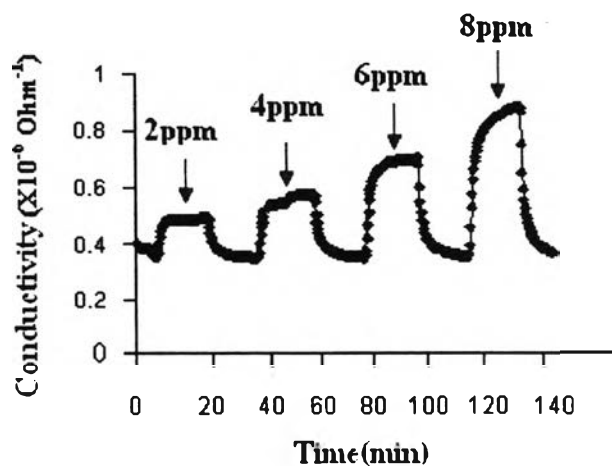
#### 4.2.5 ผลของความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนที่มีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าของหัววัดแก๊ส

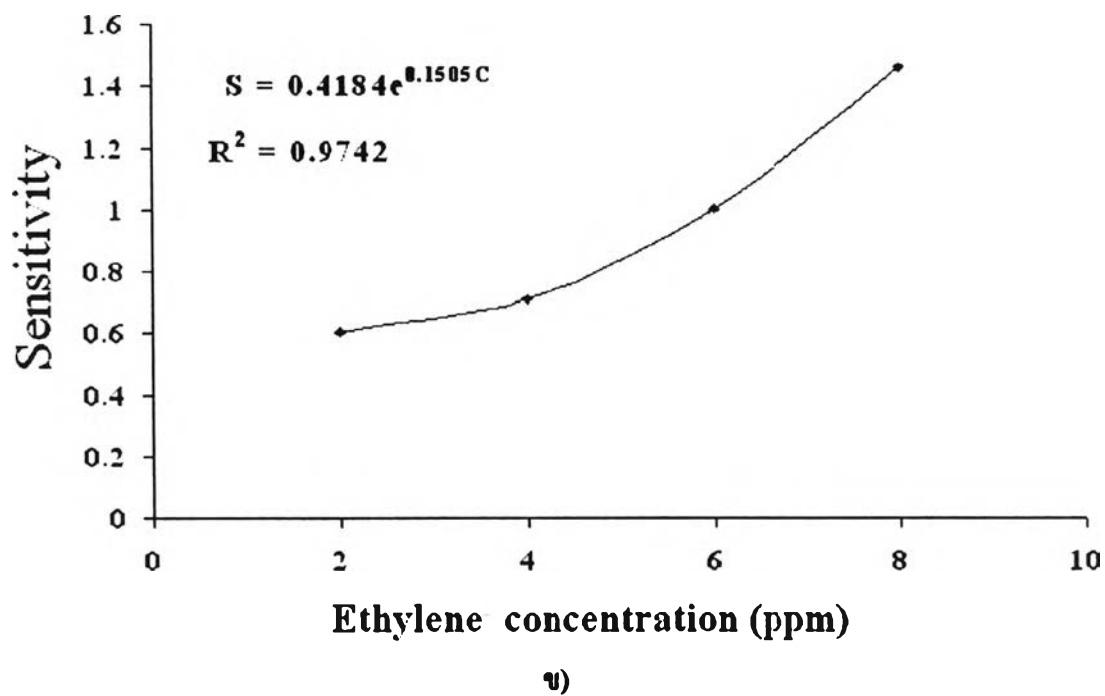
รูป 4.17 แสดงค่าการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความนำไฟฟ้าและค่าความไวในการตอบสนองต่อแก๊สเอทิลีนของ 5% WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความนำไฟฟ้าและค่าความไวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุผลเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนโมเลกุลของแก๊สเอทิลีนเข้าไปทำปฏิกิริยากับ O<sup>2-</sup> มากขึ้นมีผลทำให้ O<sup>2-</sup> ที่คอยดักจับอิเล็กตรอนอิสระซึ่งดูดซับบริเวณพื้นผิวของอนุภาค WO<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> ลดลงและจะส่งผลกระทบต่อเนื่องทำให้ประจุรวมที่พื้นผิวดำลงอิเล็กตรอนที่ถูกดักไว้จะถูกปลดปล่อยกลับคืนไปสู่แถบนำกระแส (conduction band) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้จะแสดงดังสมการ



R - แก๊สเอทิลีน

O<sup>2-</sup> - ออกซิเจนที่คอยดักจับอิเล็กตรอนอิสระ





รูป 4.17 ก และ ข แสดงค่าการเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพความนำไฟฟ้าและค่าความไวของ 5%  $WO_3-SnO_2$