

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลจากการทดลองที่ได้ทำการสังเคราะห์ลวดนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า, อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสและอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 สังเคราะห์ลวดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ เพื่อใช้เป็นวัสดุหลักในการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์ที่มีการตอบสนองต่อแก๊สเสียได้สูงโดยวิธีวิธีสปินโคตติง อีกทั้งยังจะทำการหาลักษณะเฉพาะทางกายภาพของสารทั้ง 3 ชนิด โดยเทคนิคการวิเคราะห์ขั้นสูงทั้งหมด ได้แก่ วิธีการสังเคราะห์ลวดนาโนทินไดออกไซด์ด้วยวิธีเทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า และการหาลักษณะเฉพาะของสารโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM), การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometry; EDS), กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force microscope: AFM), การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือรามาน (Raman spectroscopy), การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและการคำนวณขนาดโดยวิธีการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการบีอีที (BET), เครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคนาโนอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS), เครื่องมือตรวจวัดการกระเจิงชนิดรามาน (Raman Spectroscopy), เครื่องตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาว (UV-Visible Spectrophotometer) และทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์แต่ละประเภท เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจวัดแก๊สเสียแต่ละชนิด ในส่วนของผลการทดลอง ได้ทำการรายงานละเอียดถึงผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่

4.1 ผลการเตรียมทินไดออกไซด์โดยวิธีต่างๆ

4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของลวดนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง, อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสและอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657

4.3 คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมแต่ละประเภท

4.4 สันฐานวิทยาของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบ

แสดงในรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการเตรียมทินไดออกไซด์โดยวิธีต่างๆ

4.1.1 การเตรียมแท่งสารจากการสังเคราะห์ลวดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์โดยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า

ในการสังเคราะห์และการตรวจสอบเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ จะแบ่งตามส่วนผสมในแท่งสารตั้งต้น และมีลำดับของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยอุปกรณ์ดังนี้

ตาราง 4.1 แสดงเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์

เงื่อนไขที่	อัตราส่วนของผง $\text{SnO}_2 : \text{C}$ โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก	ผลการทดลอง	หมายเหตุ
1	10 : 90 (หรือ 0.3 : 2.7 กรัม)	ไม่เกิดเส้นใยฟู	ไม่มีอะไรเกิดขึ้น
2	20 : 80(หรือ 0.6 :1.4 กรัม)	ไม่เกิดเส้นใยฟู	มีลักษณะพองบวม
3	30 : 70(หรือ 0.9 : 2.1 กรัม)	เกิดเส้นใยฟู	มีลักษณะพองบวม และมีเส้นใยสีขาว เกิดขึ้นรอบๆ
3.1	30 : 70 อบที่ 250 °C นาน 1 ชั่วโมง	เกิดเส้นใยฟู จำนวน 0.024 กรัม	-
3.2	30 : 70 อบที่ 250 °C นาน 2 ชั่วโมง	เกิดเส้นใยฟู จำนวน 0.032 กรัม	-
3.3	30 : 70 อบที่ 250 °C นาน 3 ชั่วโมง	เกิดเส้นใยฟู จำนวน 0.048 กรัม	-

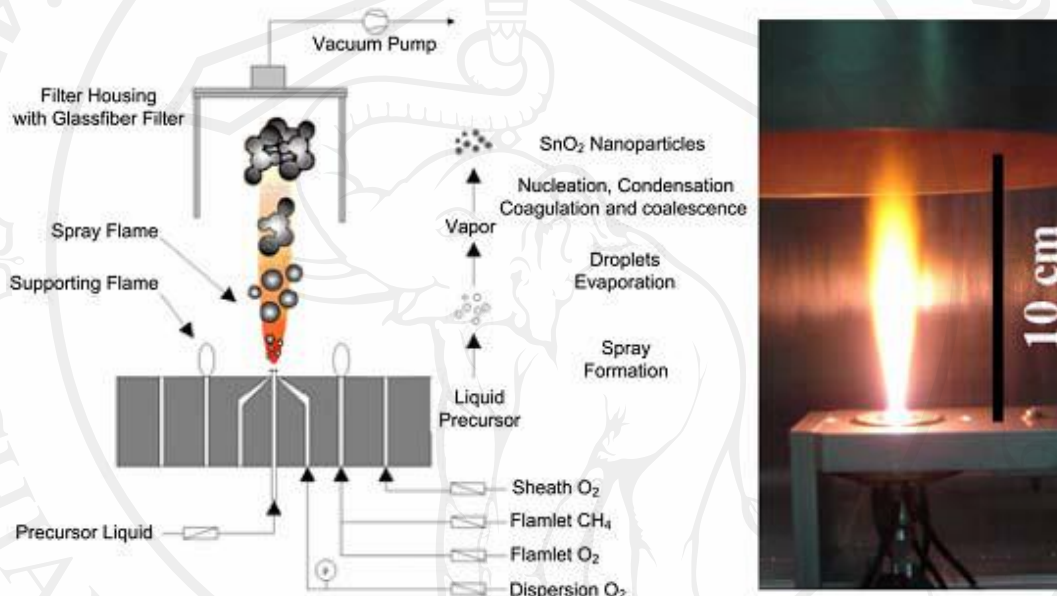
เงื่อนไขที่	อัตราส่วนของผง SnO ₂ : C โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก	ผลการทดลอง	หมายเหตุ
3.4	30 : 70 อบที่ 250 °C นาน 4 ชั่วโมง	เกิดเส้นใยฟู จำนวน 0.044 กรัม	-
3.5	30 : 70 อบที่ 250 °C นาน 5 ชั่วโมง	เกิดเส้นใยฟู จำนวน 0.028 กรัม	-
4	40 : 60(หรือ 1.2 : 1.8 กรัม)	ไม่เกิดเส้นใยฟู	เกิดเป็นคราบสีเทา และบวมเล็กน้อย
5	50 : 50(หรือ 1.5 : 1.5 กรัม)	ไม่เกิดเส้นใยฟู	เกิดเป็นคราบสีเทา
6	60 : 40(หรือ 1.8 : 1.2 กรัม)	ไม่เกิดเส้นใยฟู	ไม่มีอะไรเกิดขึ้น
7	70 : 30(หรือ 2.1 : 0.9 กรัม)	ไม่เกิดเส้นใยฟู	ไม่มีอะไรเกิดขึ้น
8	80 : 20(หรือ 1.4 : 0.6 กรัม)	ไม่เกิดเส้นใยฟู	ไม่มีอะไรเกิดขึ้น
9	90 : 10(หรือ 2.7 : 0.3 กรัม)	ไม่เกิดเส้นใยฟู	ไม่มีอะไรเกิดขึ้น

สรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์คืออัตราส่วนของผงทินไดออกไซด์ต่อปริมาณผงแกรไฟต์ (SnO₂ : C) โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 30 : 70 (หรือ 0.9 : 2.1 กรัม)อบที่ 250 °C นาน 3 ชั่วโมงเนื่องจากมีปริมาณเส้นใยฟูเกิดมากที่สุดและมีระยะเวลาการอบที่น้อยที่สุดเพื่อลดการเสียพลังงานในการอบไล่ความชื้น

4.1.2 ผลจากการเตรียมอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยเทคนิคฟลอมสเปร์ย์โพลีโรลิต

สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ แสดงขั้นตอนการก่อตัวเป็นอนุภาคดังรูป 4.1 การก่อตัวจะเริ่มจากการสังเคราะห์หัวสตุหลักก่อนเพื่อให้เกิดการเป็นโลหะออกไซด์ที่สมบูรณ์ ในการสังเกตลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น พบว่า เมื่อทำการฉีดสารละลายตั้งต้น

ภายใต้การเผาไหม้ความร้อนสูง เปลวไฟมีลักษณะที่ค่อนข้างเสถียร และสีที่สังเกตได้คือสีส้ม ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ ความสูงของเปลวไฟที่วัดได้มีค่าเป็น 10-12 เซนติเมตร โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 5/5 (อัตราเร็วในการฉีดสารละลายตั้งต้นเข้าไปในระบบ (liquid precursor feed rate) หน่วยเป็น มิลลิลิตรต่อนาที/อัตราเร็วในการพาแก๊สออกซิเจนซึ่งใช้ในการกระจายสารละลายตัวอย่าง (oxygen dispersion feed rate) หน่วยเป็นลิตรต่อ นาที)



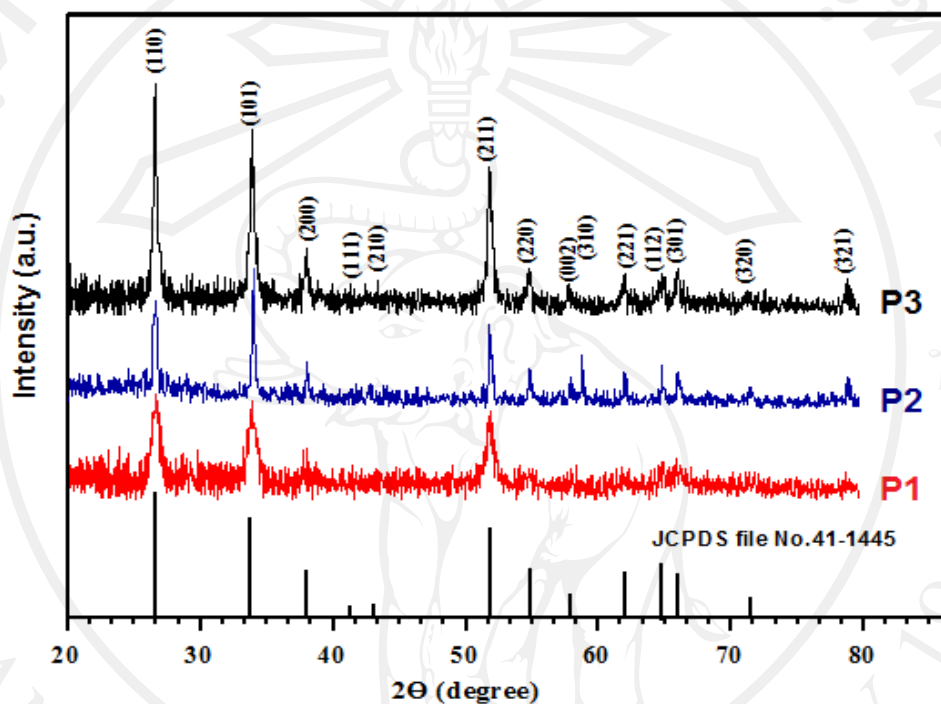
รูป 4.1 ขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการพ่นสารละลายตั้งต้น Tin (II) ethylhexanoate ละลายในตัวทำละลายไซลีน (xylene)

4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของลวดนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง, อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสและอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657

4.2.1 ผลการศึกษาจากวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) เพื่อตรวจสอบธาตุและสารประกอบในผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้

ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง XRD เพื่อวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยได้ทำการเปรียบเทียบของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ P2

เส้นสีน้ำเงิน)กับ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ P1 เส้นสีแดง) และอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ P3 เส้นสีดำ) โดยเปรียบเทียบเพื่อศึกษาคูการแตกต่างทางขนาดและรูปร่างของทินไดออกไซด์



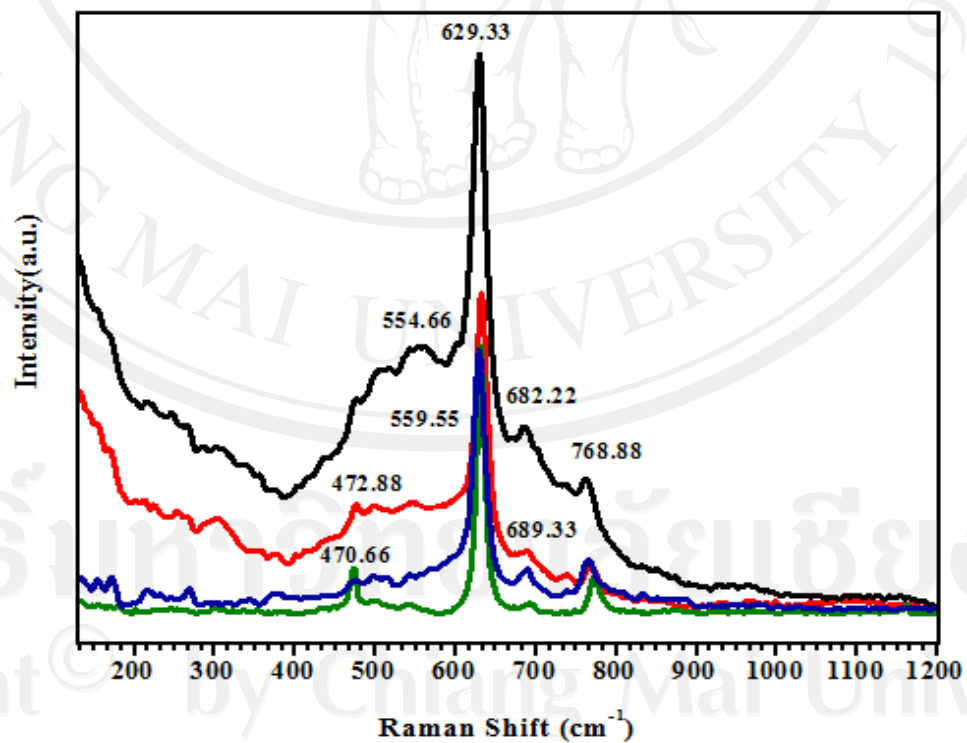
รูป 4.2 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากการสังเคราะห์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ตรงกับ JCPDS file NO. 41-1445

จากรูป 4.2 เมื่อศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารทั้ง 3 ชนิด ที่วิเคราะห์ได้ด้วย XRD จะพบว่า เมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานจากข้อมูลตรงกับ JCPDS (Joint Committee Powder Diffraction Standard) พบว่าจะสอดคล้องกับหมายเลข 41-1445 นั้นจะปรากฏเฟสหลักที่ตำแหน่ง 2θ คือ 26.61° , 33.89° , 37.95° , 42.63° , 51.78° , 54.76° , 57.82° , 62.59° , 64.72° , 65.94° และ 71.78° ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนกันเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วจะพบว่า ปรากฏเป็นเฟสของทินไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ซึ่งการวิเคราะห์ในส่วนนี้สามารถที่จะยืนยันเฟสและโครงสร้างที่แท้จริงของสารที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังสามารถที่จะทำนายขนาดของอนุภาคนาโนได้ เนื่องจากพีกมีความกว้างมาก (broad) ขนาดของอนุภาคนาโนก็จะมีขนาดเล็กมากตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการที่พีกสูงชันอย่างชัดเจนนั้น ย่อม

แสดงว่าอนุภาคนาโนมีความเป็นผลึก (Crystallinity) สูงขึ้น ไม่ใช่ลักษณะที่เป็นอสัณฐาน (amorphous)

4.2.2 ผลการศึกษาจากเครื่องมือรามาน(Raman spectroscopy) เพื่อใช้การศึกษาองค์ประกอบเอกลักษณ์เฉพาะทางเคมีของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือรามานเพื่อศึกษาองค์ประกอบเอกลักษณ์เฉพาะทางเคมีที่อยู่ในเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยได้ทำการเปรียบเทียบของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ P2 เส้นสีน้ำเงิน) กับ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ P1 เส้นสีแดง), อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ P3 เส้นสีดำ) และสารอ้างอิงทินไดออกไซด์จากบัตรเทียบสารของเครื่องมือรามาน (แทนด้วยสัญลักษณ์ P0 เส้นสีเขียว) โดยเปรียบเทียบเพื่อศึกษาการแตกต่างทางขนาดและรูปร่างของทินไดออกไซด์



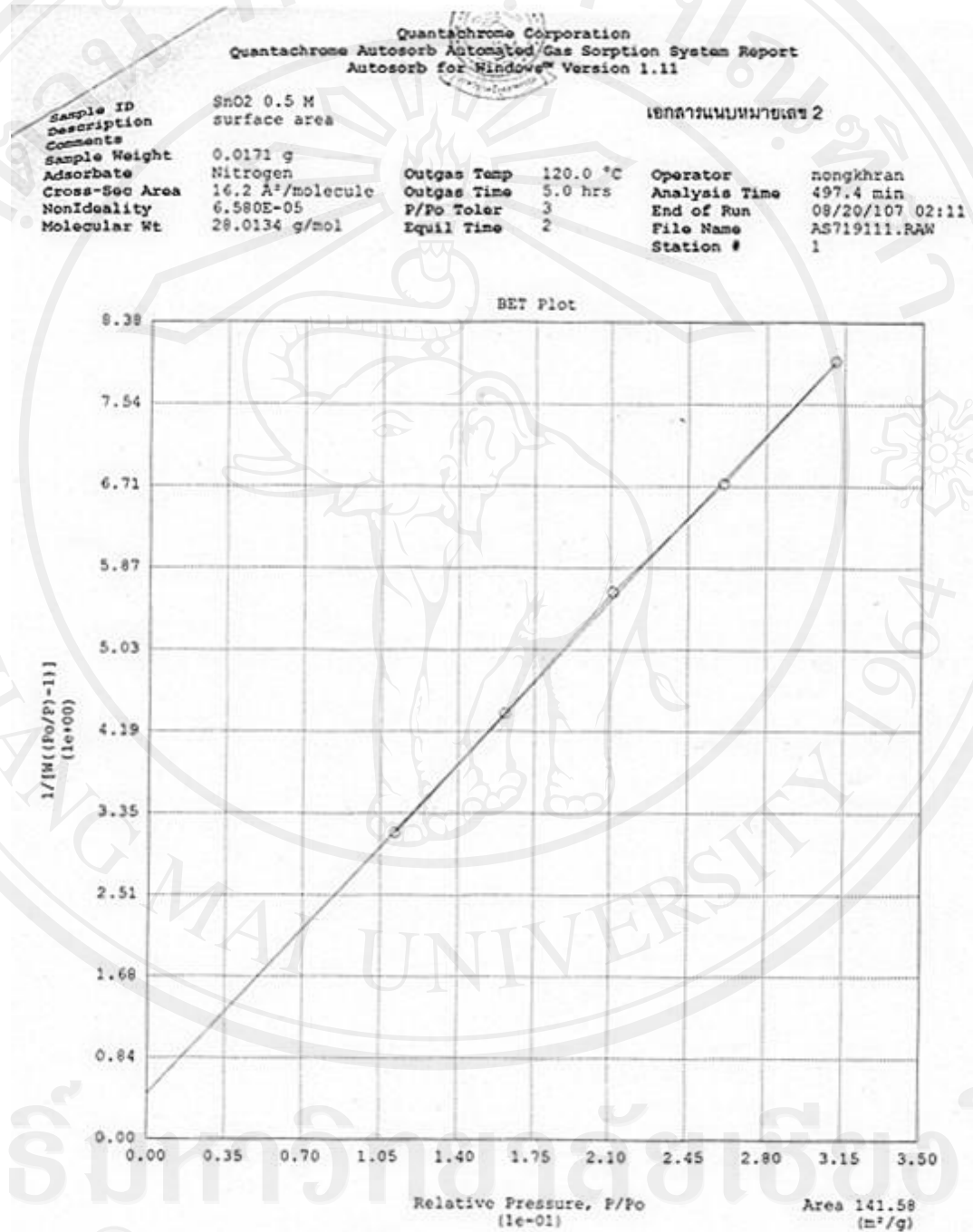
รูป 4.3 กราฟผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือรามาน

จากรูป 4.3 พบว่า สมบัติเชิงแสงของลวดนาโนทินไดออกไซด์ ถูกวิเคราะห์โดยเครื่องมือชนิดรามาน สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่า องค์ประกอบเอกลักษณ์เฉพาะทางเคมีของเฟสทินไดออกไซด์ ถูกยืนยันอย่างชัดเจนโดยค่าความเข้มของพีกซึ่งสอดคล้องกับลำดับการกระเจิงของรามาน โดยองค์ประกอบเอกลักษณ์เฉพาะทางเคมีที่อยู่ในเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยได้ทำการเปรียบเทียบของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ P2 เส้นสีน้ำเงิน) เกิดพีกที่ตำแหน่ง 470.66 cm^{-1} , 629.33 cm^{-1} และ 768.88 cm^{-1} , อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลตสเปรย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ P1 เส้นสีแดง) เกิดพีกที่ 472.88 cm^{-1} , 629.33 cm^{-1} และ 689.33 cm^{-1} ส่วนอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ P3 เส้นสีดำ) เกิดพีกที่ 554.66 cm^{-1} , 629.33 cm^{-1} , 682.22 cm^{-1} , 768.88 cm^{-1} และสารอ้างอิงทินไดออกไซด์จากบัตรเทียบสารทินไดออกไซด์ของเครื่องมือรามานเกิดพีกที่ตำแหน่ง 470.66 cm^{-1} , 629.33 cm^{-1} , 768.88 cm^{-1} ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบกราฟที่ได้พบว่ามีค่าความเข้มของพีกหลักที่ตำแหน่ง 470.66 cm^{-1} , 629.33 cm^{-1} และ 768.88 cm^{-1} จึงยืนยันได้ว่าเป็นสารทินไดออกไซด์

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและการคำนวณขนาดของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์โดยวิธีการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการบีอีที(BET)

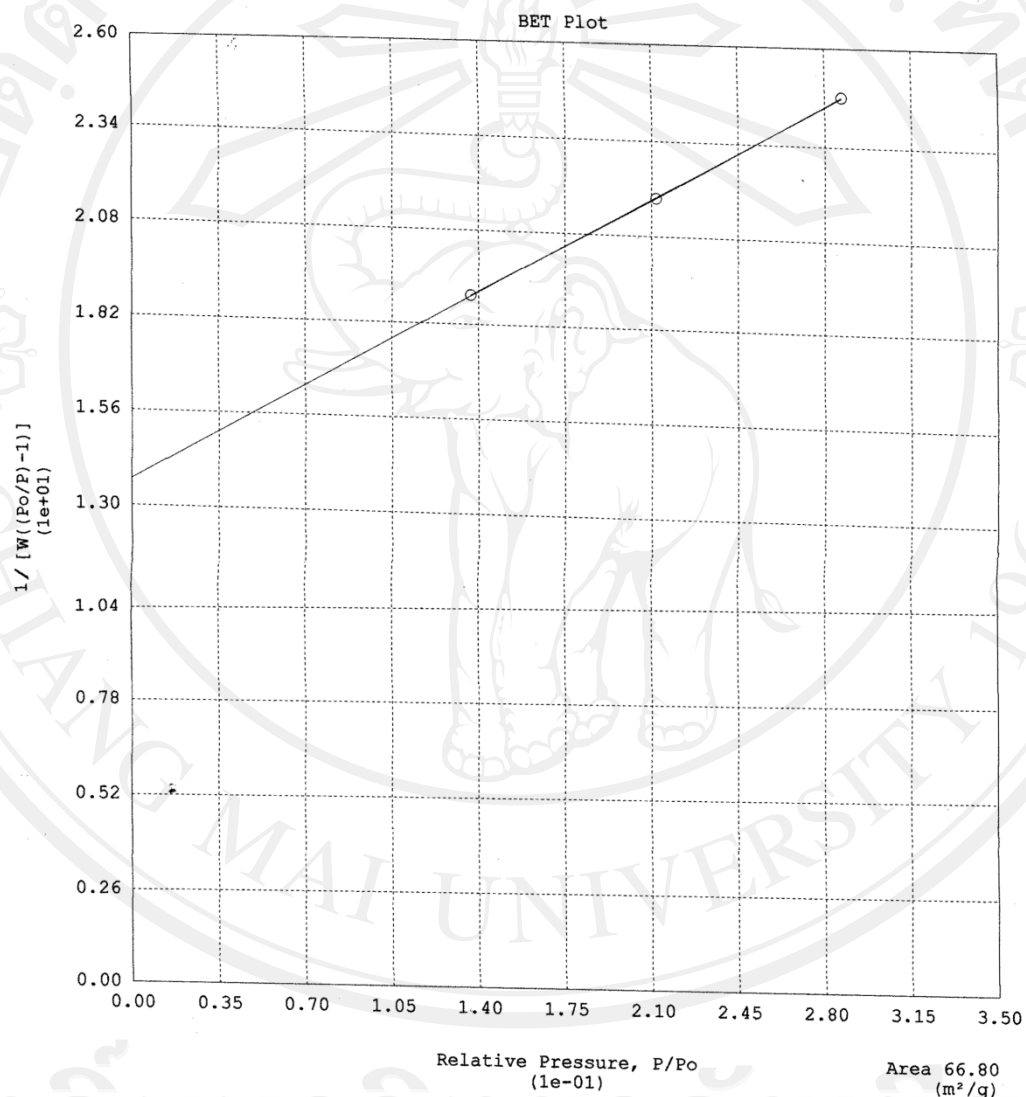
ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างเพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารนั้น สามารถวิเคราะห์ได้โดยการดูดซับของโมเลกุลแก๊สไนโตรเจนบนพื้นผิวเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยจะทำการไล่แก๊สปนเปื้อน (degassing) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะการดูดซับแก๊สไนโตรเจนและวัดปริมาณการคายของแก๊สไนโตรเจนของการดูดซับที่โมเลกุลชั้นเดียวหลายจุดการวิเคราะห์

ผลจากการทดลองจะออกมาในลักษณะกราฟเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะแสดงได้ดังนี้



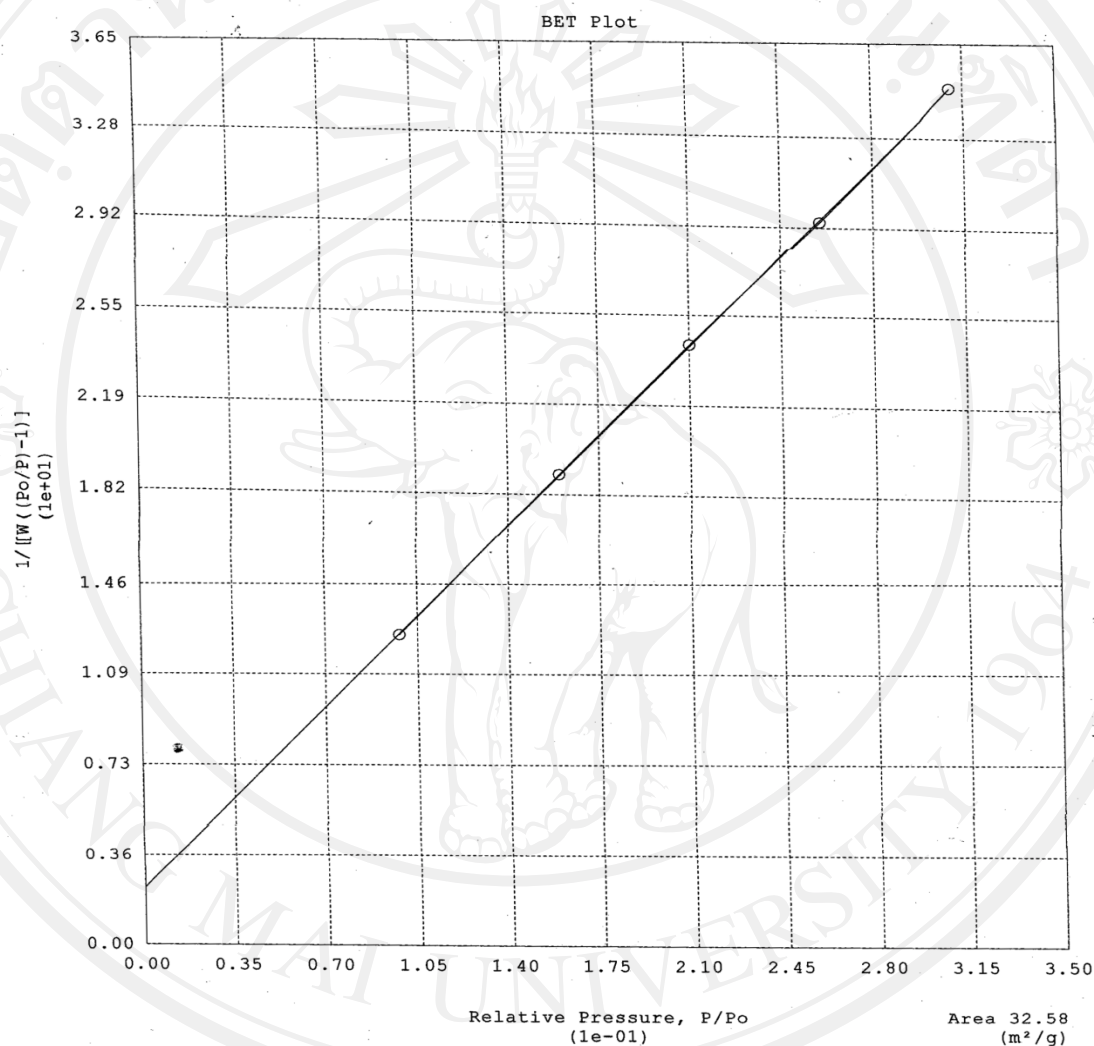
รูป 4.4 กราฟการวัดปริมาณการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการบีอีที(BET)ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส

Sample ID	SnO2				
Description	nanowire				
Comments				เอกสารแนบหมายเลข 2	
Sample Weight	0.0028 g				
Adsorbate	Nitrogen	Outgas Temp	120.0 °C	Operator	nongkhran
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	53.4 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	3	End of Run	02/24/102 07:48
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	2	File Name	AS111214.RAW
				Station #	1



รูป 4.5 กราฟการวัดปริมาณการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการบีอีที(BET)ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง

Sample ID	SnO2				
Description	white nanopowder				
Comments					
Sample Weight	0.1043 g	Outgas Temp	120.0 °C	Operator	nongkhran
Adsorbate	Nitrogen	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	46.4 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	3	End of Run	06/29/112 15:57
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	2	File Name	SNO20855.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol			Station #	1

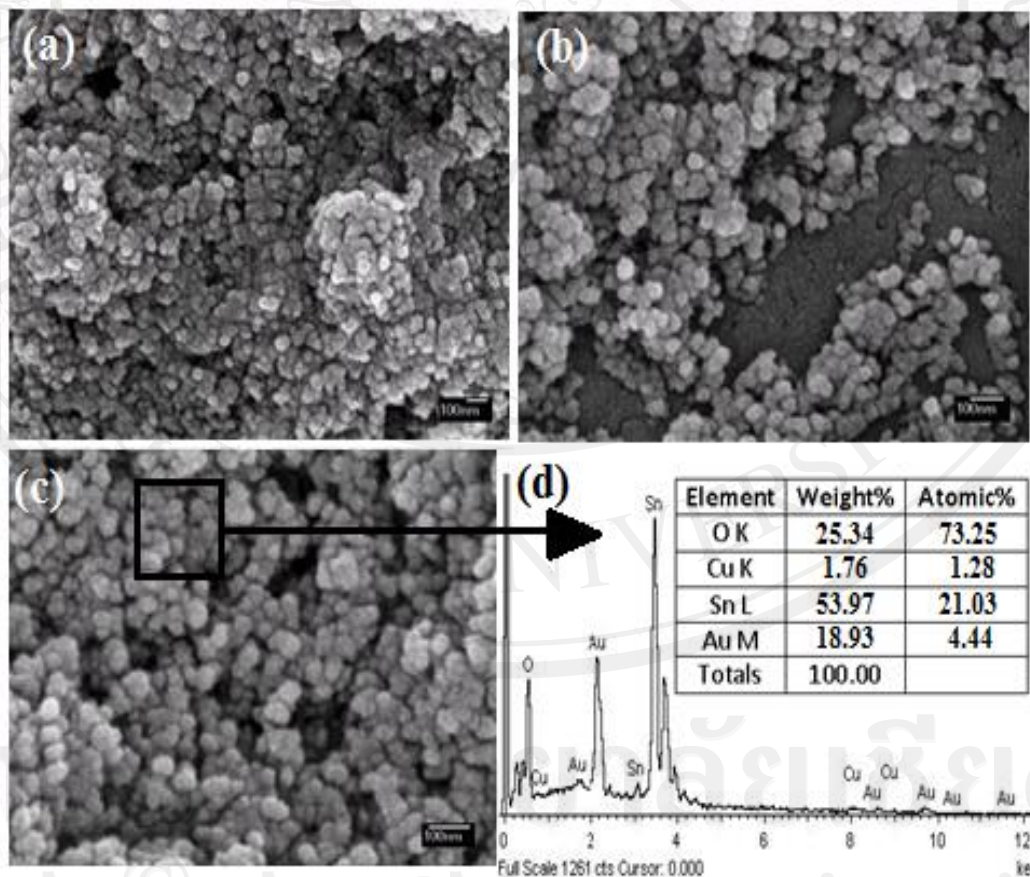


รูป 4.6 กราฟการวัดปริมาณการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการบีอีที(BET)ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657

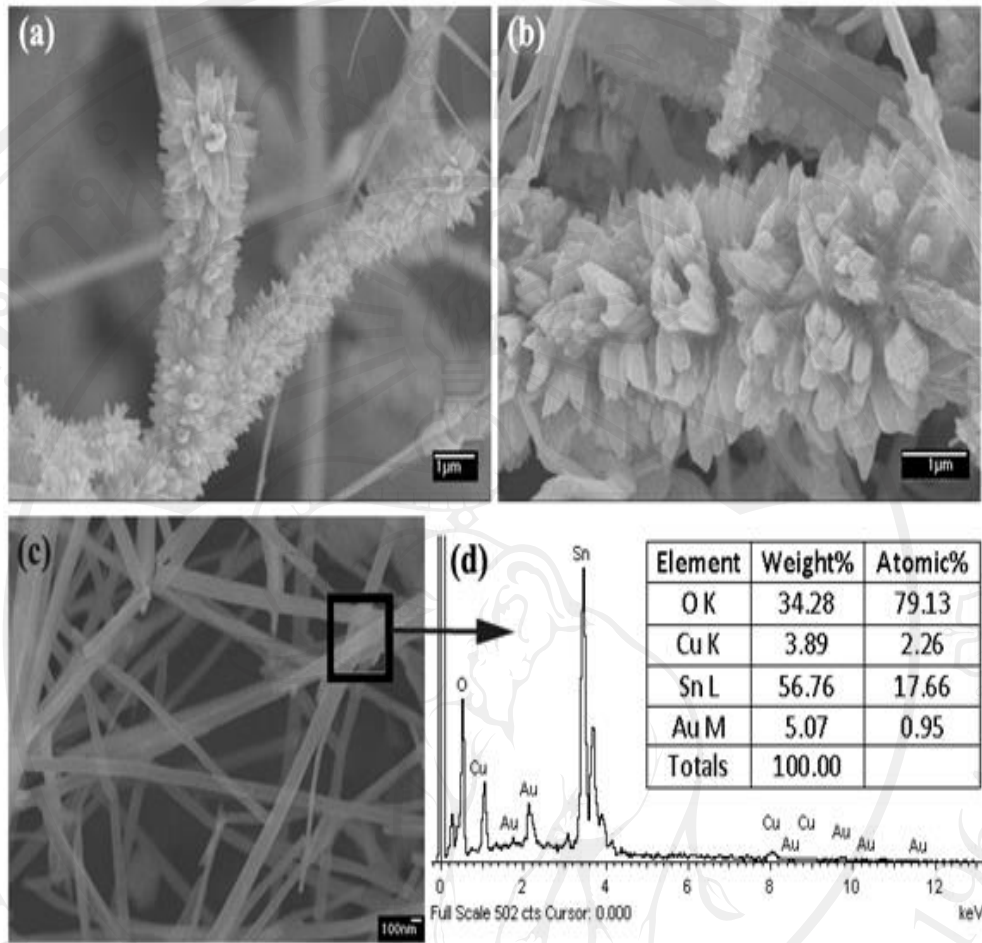
จากผลการทดลองดังรูป 4.4-4.6 จะพบว่า สามารถคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิสสารซึ่งมีค่า 141.6 m²/g ส่วนผลการคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง มีค่าเท่ากับ 66.8 m²/g และผลการคำนวณค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 มีค่าเท่ากับ 32.58 m²/g จะแสดงออกมาเป็นกราฟเส้นตรงตามทฤษฎีของ BET โดยที่ค่า

พื้นที่ผิวจำเพาะของสารจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคนาโน นั่นคือ เมื่ออนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคนาโนก็จะมีค่ามากด้วย เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิส นั้นมีค่าสูงกว่าเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงและอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657

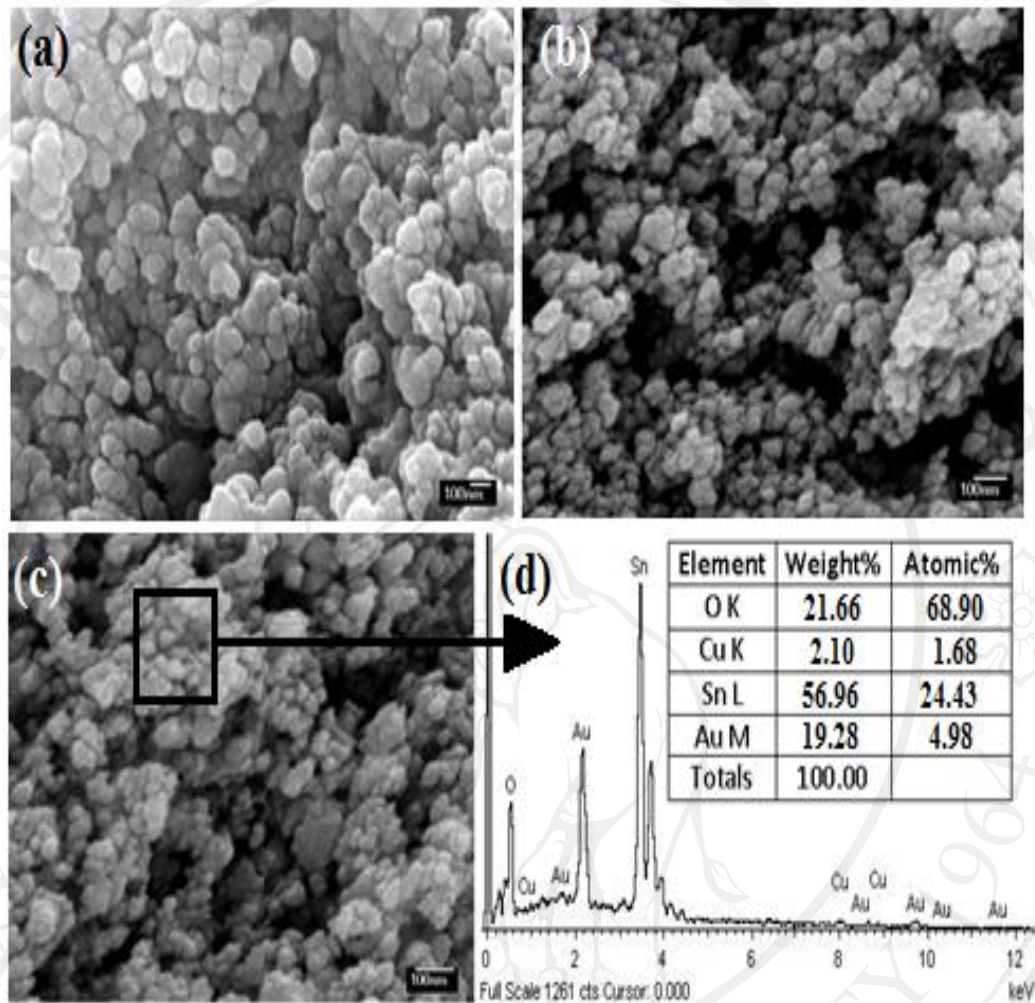
4.2.4 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometry, EDS)



รูป 4.7 (a-b) แสดงภาพรูปร่างและองค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิส โดยศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ(c-d) ผลจากการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์(EDS)



รูป 4.8 (a-b) แสดงภาพรูปร่างและองค์ประกอบธาตุของเส้นใยนาโนทिनไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง โดยศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ (c-d) ผลจากการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDS)



รูป 4.9 (a-b) แสดงภาพรูปร่างและองค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 โดยศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ(c-d) ผลจากการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์(EDS)

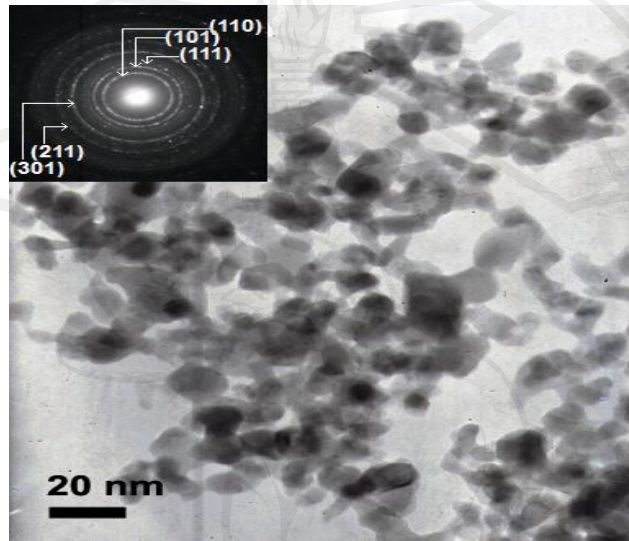
จากการศึกษาขนาดและรูปร่างของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้ รูป 4.7 – 4.9 เป็นภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยายที่ต่างเท่ากัน จากรูป 4.7 (a-b) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปย์ไพโรลิซิส โดยศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) อนุภาคนาโนที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม เกาะติดกันมีขนาดสม่ำเสมอ มีขนาดประมาณ 5-20 นาโนเมตร จากรูป 4.8(a-b) เป็นภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงมีลักษณะเป็น

เส้นใยหลากหลายรูปแบบทั้งเส้นตรงและรูปทรงคล้ายดอกไม้ เรียงตัวกันอย่างจัดกระจาย ส่วนรูป 4.9 (a-b) แสดงภาพรูปร่างของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 โดยศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า อนุภาคนาโนที่ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ประมาณ 60 นาโนเมตร และเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนหนาแน่น ไม่กระจายตัว

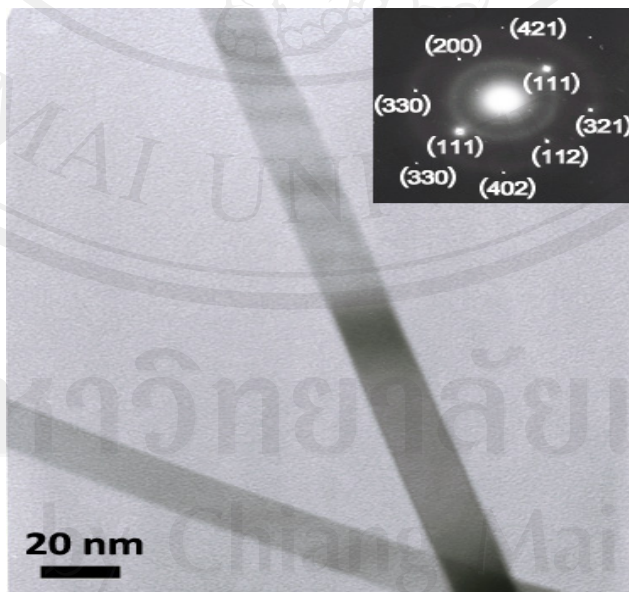
จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS พบว่า เมื่อยิงลำอิเล็กตรอนไปยังบริเวณ spectrum อิเล็กตรอนพลังงานสูงจะเคลื่อนที่เข้าชนวงโคจรชั้นพลังงานต่างๆ (K, L, M,...) โดยจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานแก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจร ทำให้อิเล็กตรอนหลุดไป และอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ ในการลดระดับพลังงานลงมาแทนที่นี้จะเกิดการปล่อยพลังงานมาในรูปรังสีเอกซ์ ซึ่งค่าพลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความต่างของระดับชั้นพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจร ซึ่งจะมีความเฉพาะในแต่ละธาตุนั้นๆ และจะปรากฏธาตุต่างๆให้เห็นได้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง ซึ่งในแต่ละธาตุจะแสดงสเปกตรัมที่ชั้น K เนื่องจากเป็นระดับชั้นพลังงานที่มีความเข้มของรังสีเอกซ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับระดับชั้นพลังงานอื่นๆ และไม่เกิดการซ้อนทับของพีคอื่น (overlaps) นอกจากนี้ยังพบว่า ธาตุต่างๆนั้นจะมีความสอดคล้องกับธาตุที่ปรากฏ โดยอาจจะมีปริมาณต่างกันเพียงเล็กน้อย และบางธาตุอาจจะไม่ปรากฏให้เห็นเนื่องจากอาจมีปริมาณที่น้อยเกินไปหรือไม่มีธาตุนั้นๆในบริเวณที่วิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ แสดงธาตุที่เป็นส่วนประกอบจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS จากรูป 4.7 (c-d) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส พบว่า ประกอบด้วยธาตุต่างๆซึ่งมีความสัมพันธ์กับธาตุที่ปรากฏในตาราง ซึ่งประกอบด้วยธาตุออกซิเจน 73.25% ทิน 21.03% จากรูป 4.8 (c-d) เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง ประกอบด้วยธาตุต่างๆซึ่งมีความสัมพันธ์กับธาตุที่ปรากฏในตาราง ซึ่งประกอบด้วยธาตุออกซิเจน 79.13% ทิน 17.66% และอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 ประกอบด้วยธาตุต่างๆซึ่งมีความสัมพันธ์กับธาตุที่ปรากฏในตารางในรูป 4.9 (c-d) ประกอบด้วย ธาตุออกซิเจน 68.90% ทิน 24.43% โดยสารทั้ง 3 ตัวอย่าง อาจมีปริมาณต่างกันเล็กน้อย และพบว่า มีพีคของ Sn และ O อยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างมากนั้นหมายถึงว่า สารตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีส่วนประกอบของ Sn และ O มากและที่มีพีคของ Cu และ Au ปรากฏ เนื่องจากการเคลือบผิวของเส้นใยที่ได้ด้วย Au และที่แท่งทองเหลืองจะใช้เทปขาวทองแดงในการยึดติดเส้นใย ทำให้มีการปรากฏพีค Cu ขึ้นมาด้วย

4.2.5 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

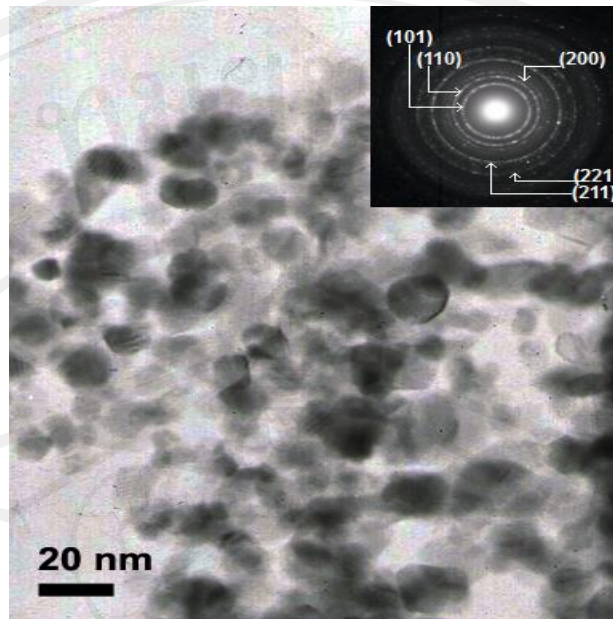
เพื่อศึกษาลักษณะภายในของเส้นใยนาโน ลักษณะและขนาด ของสารประกอบที่ฟอร์มตัว เป็นเส้นใยนาโน และศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (electron diffraction pattern) และสรุปขนาดของผลึก



รูป 4.10 ภาพการศึกษาสัณฐานวิทยาแบบละเอียดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่ สังเคราะห์ โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิส



รูป 4.11 ภาพการศึกษาสัณฐานวิทยาแบบละเอียดของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดย การตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง

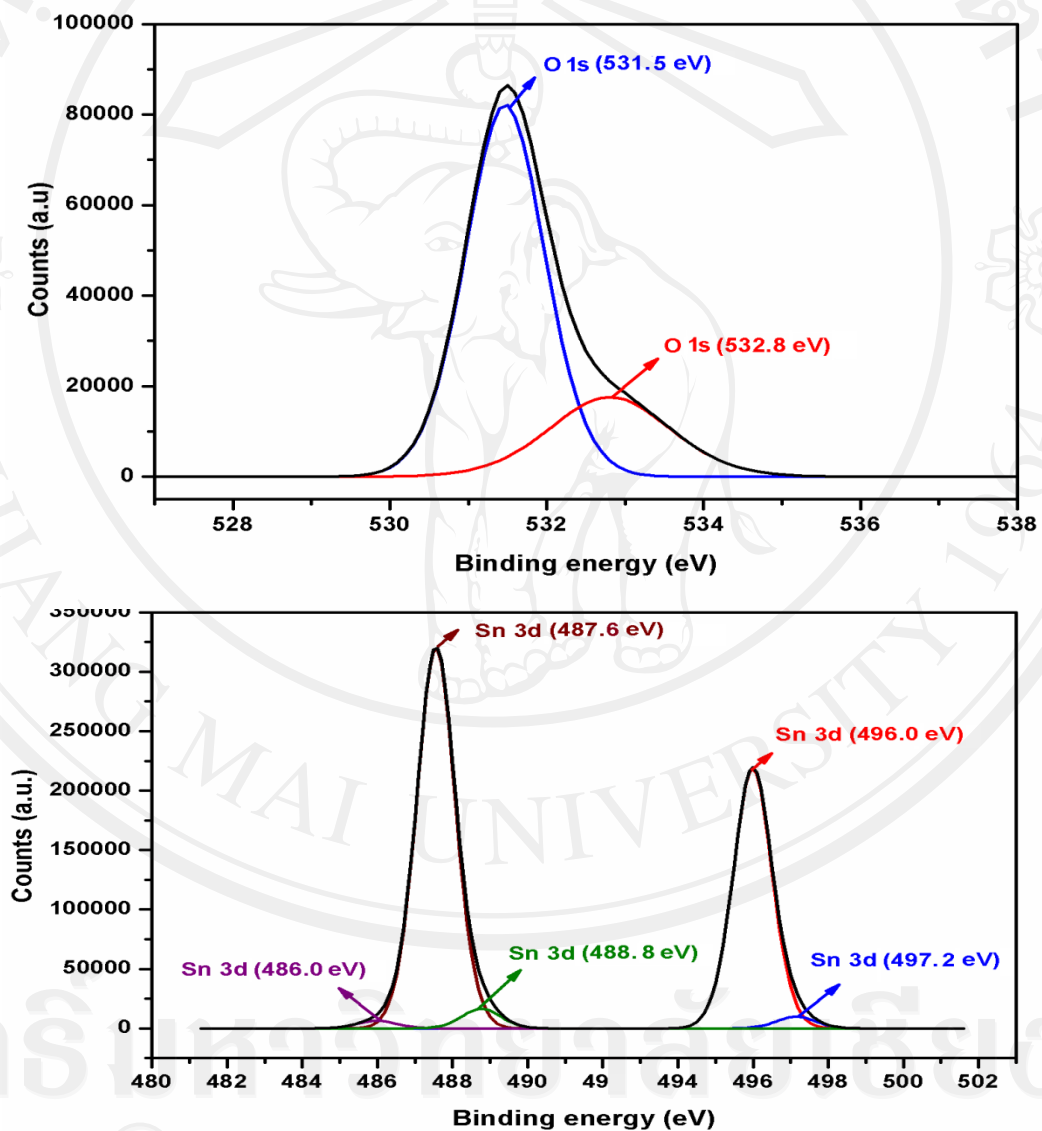


รูป 4.12 ภาพการศึกษาสัณฐานวิทยาแบบละเอียดของอนุภาคนาโนทิงไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657

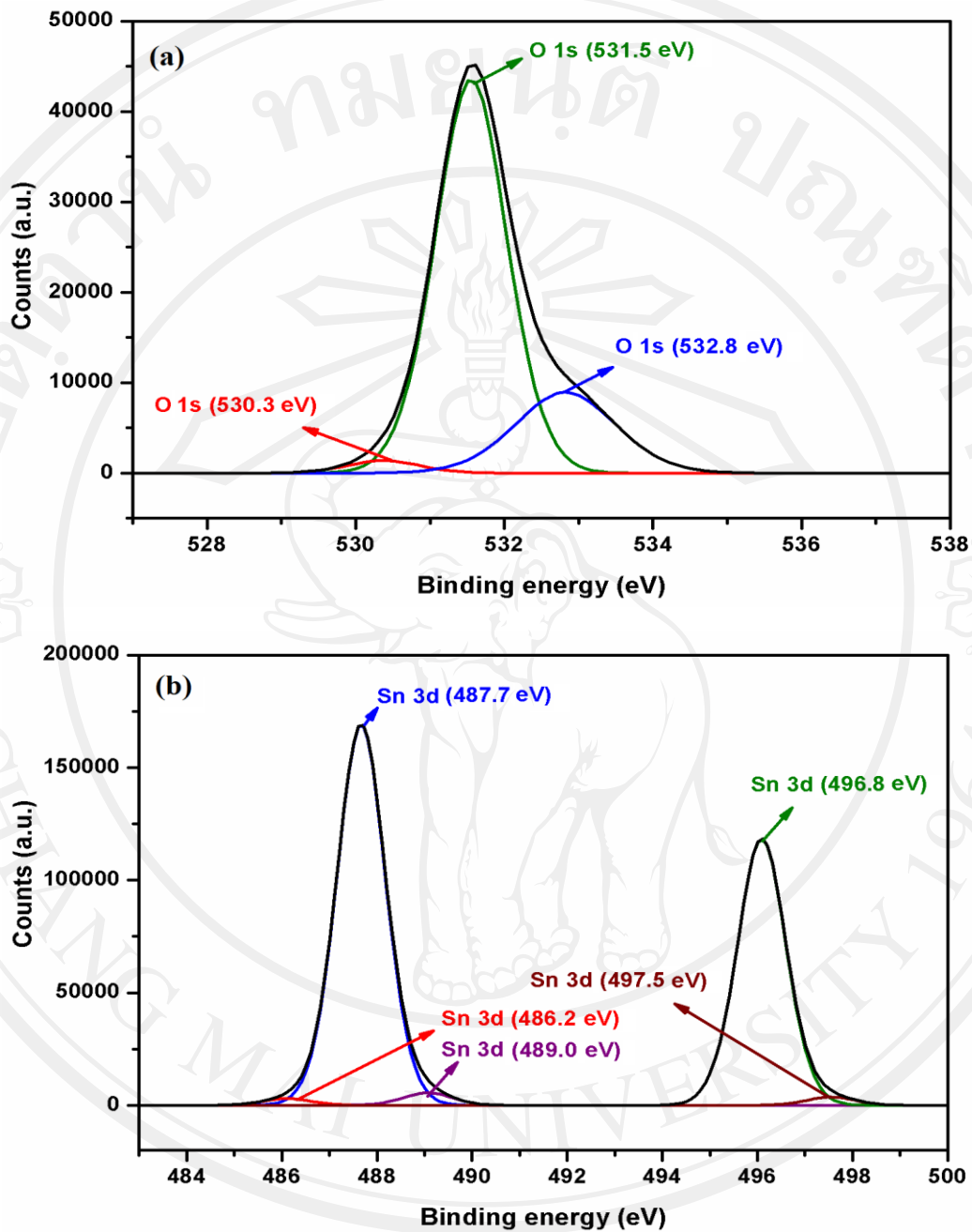
ผลที่ได้จากการการศึกษาสัณฐานวิทยาแบบละเอียดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า จากรูป 4.10 อนุภาคนาโนทิงไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส อนุภาคนาโนที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม อนุภาคนาโนค่อนข้างเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน แต่อนุภาคนาโนค่อนข้างเล็ก มีขนาดสม่ำเสมอ ขนาดอนุภาคนาโนอยู่ในช่วง 5-20 นาโนเมตร และมีลักษณะการจัดเรียงตัวกันในระนาบ (110), (101), (111), (211), (301) เป็นต้น จากรูป 4.11 เส้นใยนาโนทิงไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงมีลักษณะเป็นเส้นใยหลากหลายรูปแบบทั้งเส้นตรงและรูปทรงคล้ายดอกไม้ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 25-100 nm ลักษณะโดยส่วนใหญ่ของเส้นใยนาโนทิงไดออกไซด์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงยาว ผิวเรียบ และมีลักษณะการจัดเรียงตัวกันเป็นแบบ Polycrystal ในระนาบ (111), (112), (200), (321), (330), (402), (421) เป็นต้น ขนาดของเส้นใยสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน รูปร่างของเส้นใยเป็นลักษณะของโครงสร้างเตตระโกนอลที่ชัดเจน ขนาดของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ค่อนข้างเล็กโดยมีขนาดอยู่ในช่วง 25-100 นาโนเมตร และมีความยาวตั้งแต่ 10-100 μm ถือว่าเป็นขนาดที่แท้จริงของเส้นใยนาโนทิงไดออกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้ในครั้งนี้ ส่วนรูป 4.12 แสดงภาพรูปร่างของอนุภาคนาโนทิงไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 พบว่า อนุภาคนาโนที่ได้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ประมาณ 60 นาโนเมตร และเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ไม่กระจายตัว มีลักษณะการจัดเรียงตัวกันในระนาบ (110), (101), (211), (200), (221) เป็นต้น

4.2.6 ผลการศึกษาจากเครื่องสเปกโทรสโกปีของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS)

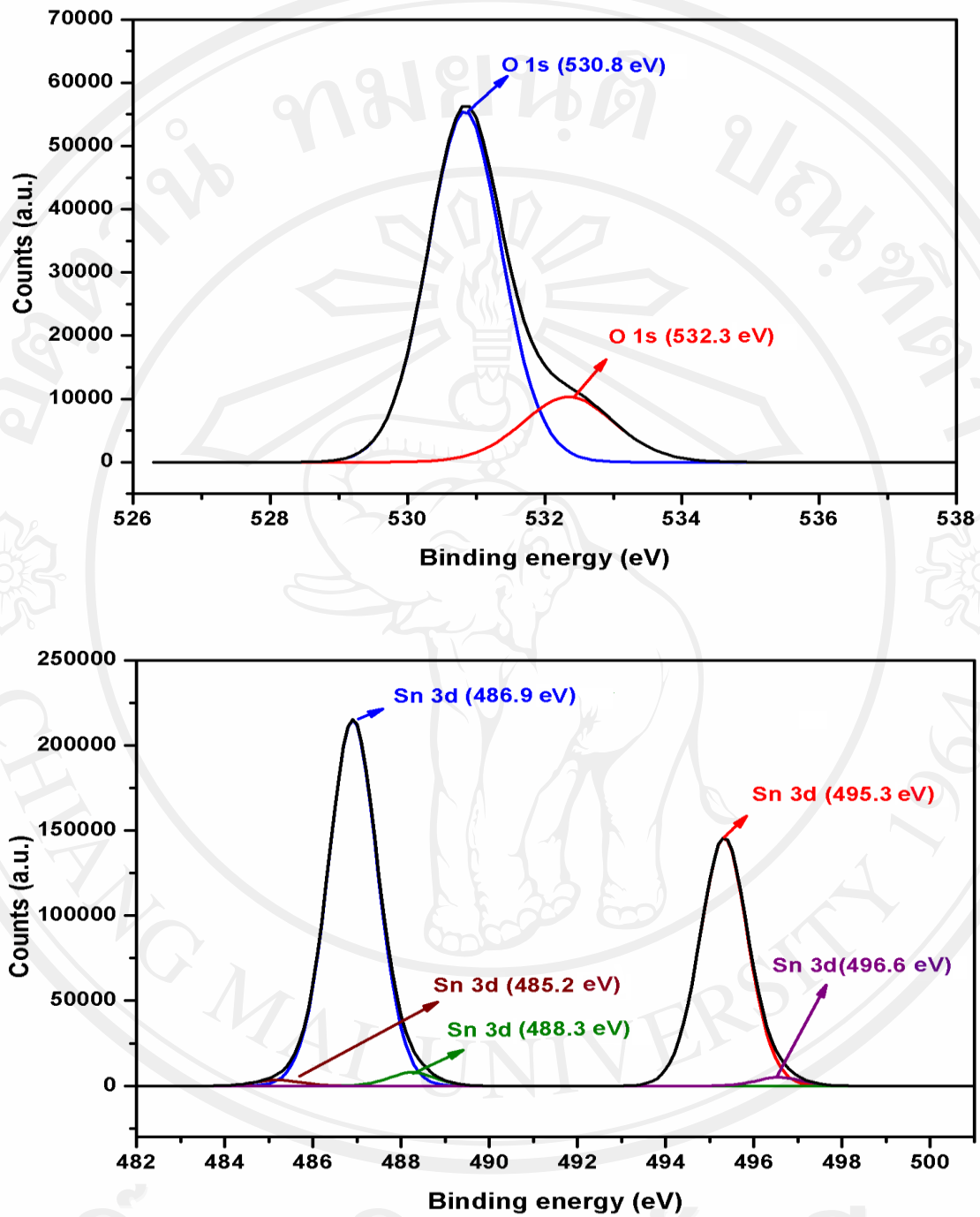
ในการวิเคราะห์สารด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์เป็นเทคนิควิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ที่สามารถให้ข้อมูลสมบัติทางเคมีที่ระดับผิวของวัสดุในหลายแง่มุม เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น



รูป 4.13 ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์



รูป 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์เส้นใยนาโนทิตานไดออกไซด์โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์



รูป 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของ บริษัท Aldrich หมายเลข 549657 ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคนาโนอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

ในการวิเคราะห์สารด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์พบว่า ทินที่เกิดขึ้นเป็นทินไดออกไซด์ มีเลขออกซิเดชันเป็น Sn^{4+} และ O^{2-} ซึ่งเป็นสารที่พบในผงนี้โดยสารที่วิเคราะห์ได้มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวต่างๆ ดังตาราง 4.2

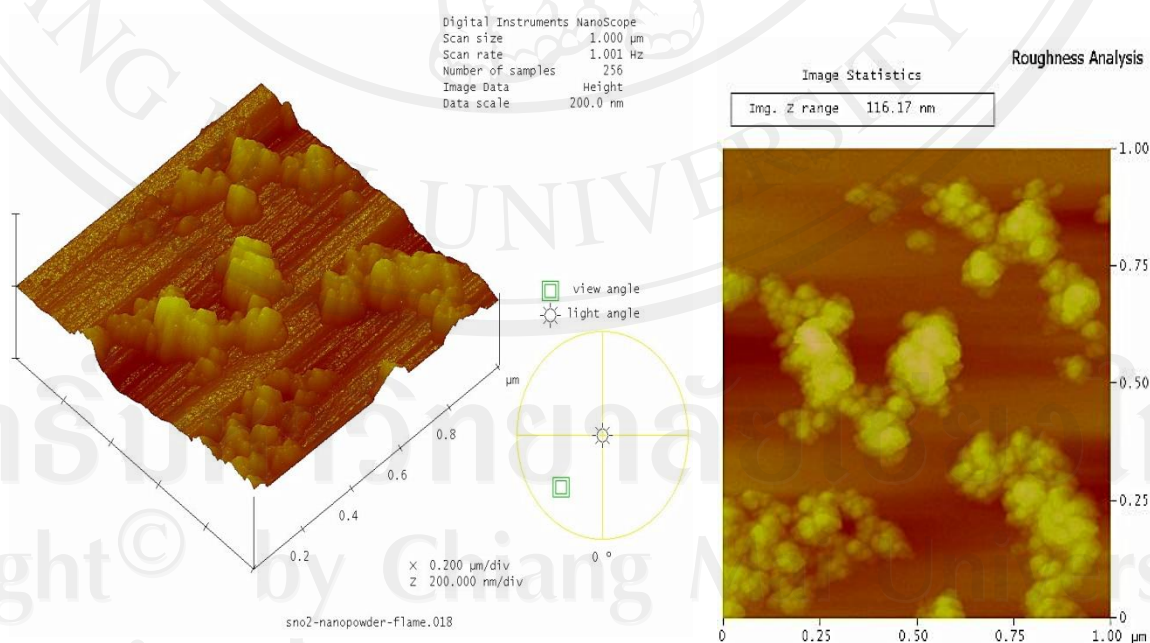
ตาราง 4.2 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของทินไดออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

ชนิด	เลขออกซิเดชัน	ระดับชั้นพลังงาน	พลังงานยึดเหนี่ยว (eV)	
			O	Sn
อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิส	$\text{Sn}^{4+}, \text{O}^{2-}$	$3d_{5/2}$	-	486.0
		$3d_{5/2}$	-	487.6
		$3d_{5/2}$	-	488.8
		$3d_{3/2}$	-	496.0
		$3d_{3/2}$	-	497.2
		1s	531.5	-
		1s	532.8	-
เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง	$\text{Sn}^{4+}, \text{O}^{2-}$	$3d_{5/2}$	-	486.2
		$3d_{5/2}$	-	487.7
		$3d_{5/2}$	-	489.0
		$3d_{3/2}$	-	496.8
		$3d_{3/2}$	-	497.5
		1s	530.3	-
		1s	531.5	-
อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldric หมายเลข 549657	$\text{Sn}^{4+}, \text{O}^{2-}$	$3d_{5/2}$	-	485.2
		$3d_{5/2}$	-	486.9
		$3d_{5/2}$	-	488.3
		$3d_{3/2}$	-	495.3
		$3d_{3/2}$	-	496.6
		1s	530.8	-
		1s	532.3	-

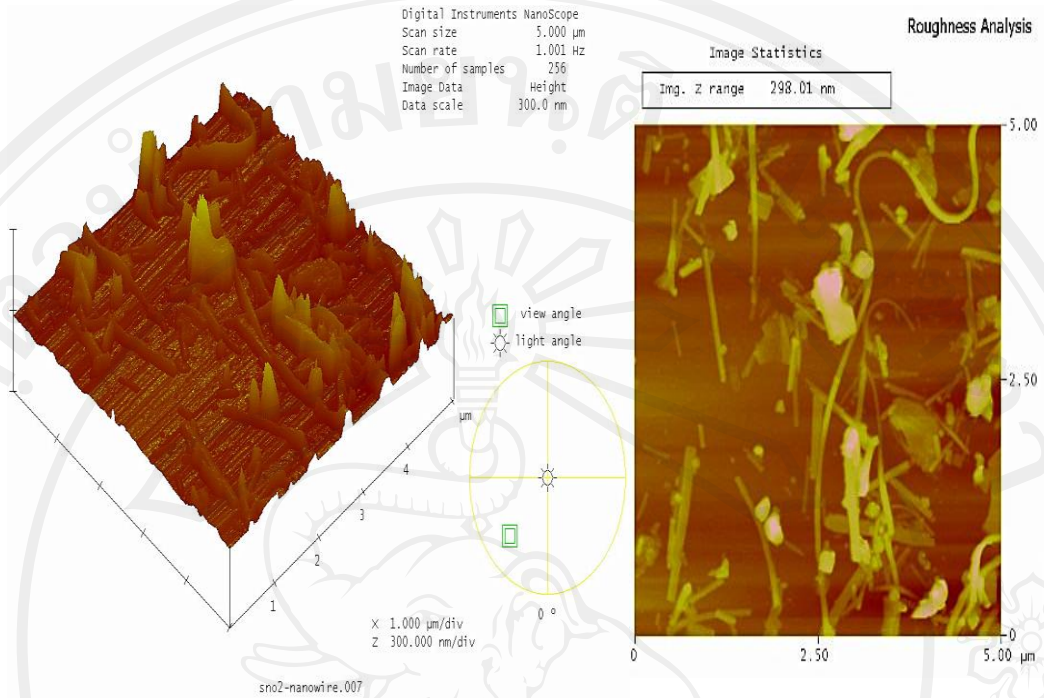
จากตาราง 4.2 ธาตุแต่ละธาตุมีลักษณะเฉพาะของพลังงานยึดเหนี่ยวที่เกี่ยวข้องกับแต่ละออร์บิทัลแกนของอะตอม ดังนั้นจะพบว่า ในสารทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 3 วิธีนั้น ประกอบด้วยธาตุชนิดเดียวกันคือ ธาตุดีบุกหรือทินและ ออกซิเจน ที่อยู่ในเลขออกซิเดชัน Sn^{4+} , O^{2-} เหมือนกันแต่มีค่าความเข้มของพีกหรือพลังงานยึดเหนี่ยวที่แตกต่างกันดังนี้ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส มีพีกหลักของธาตุดีบุกหรือทินเกิดขึ้นที่พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 531.5 และ 532.8 eV ส่วนพีกหลักของธาตุดีบุกหรือทินเกิดขึ้นที่พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 486.0, 487.6, 488.8, 496.0, 497.2 eV ตามลำดับ เส้นโยนาโนทินไดออกไซด์โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงมีพีกหลักของธาตุดีบุกหรือทินเกิดขึ้นที่พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 530.3, 531.5 และ 532.8 eV ส่วนพีกหลักของธาตุดีบุกหรือทินเกิดขึ้นที่พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 486.2, 487.7, 489.0, 496.8, 497.5 eV ตามลำดับ และอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldric หมายเลข 549657 นั้นมีพีกหลักของธาตุดีบุกหรือทินเกิดขึ้นที่พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 530.8 และ 532.3 eV ส่วนพีกหลักของธาตุดีบุกหรือทินเกิดขึ้นที่พลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 485.2, 486.9, 488.3, 495.3, 496.6 eV ตามลำดับ

4.2.7 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

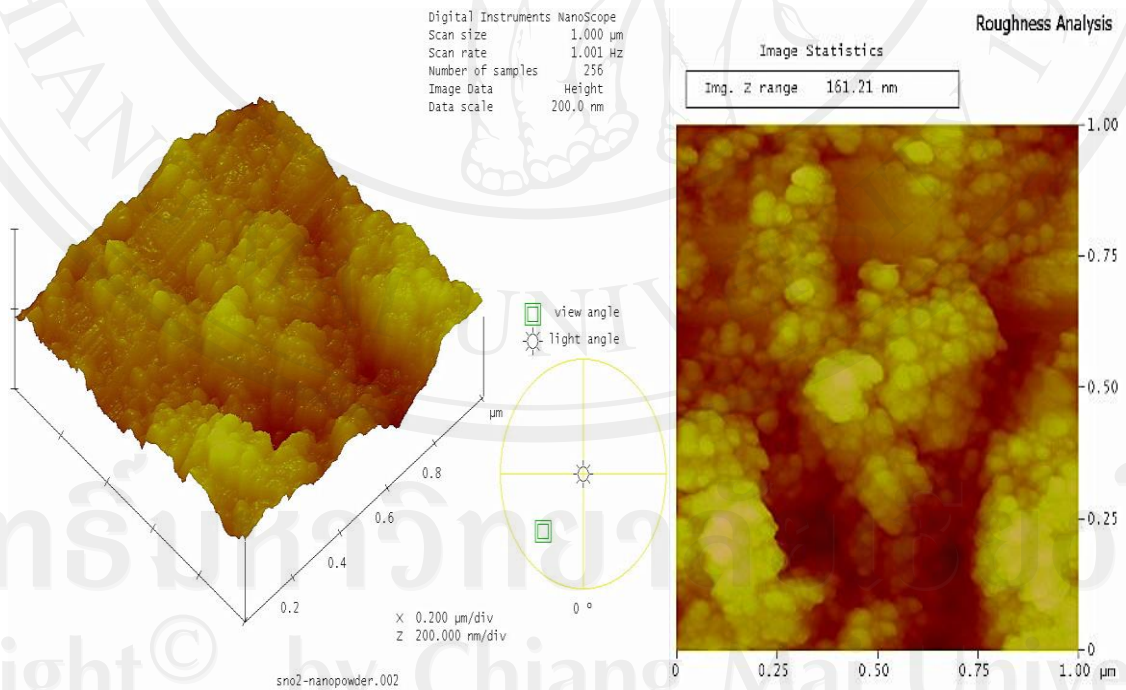
ภาพจากการศึกษาขนาดและรูปร่างของสารทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีแตกต่างกัน



รูป 4.16 แสดงการวิเคราะห์พื้นผิวแบบ 3 มิติ ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



รูป 4.17 แสดงขนาดและรูปร่างแบบสามมิติของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

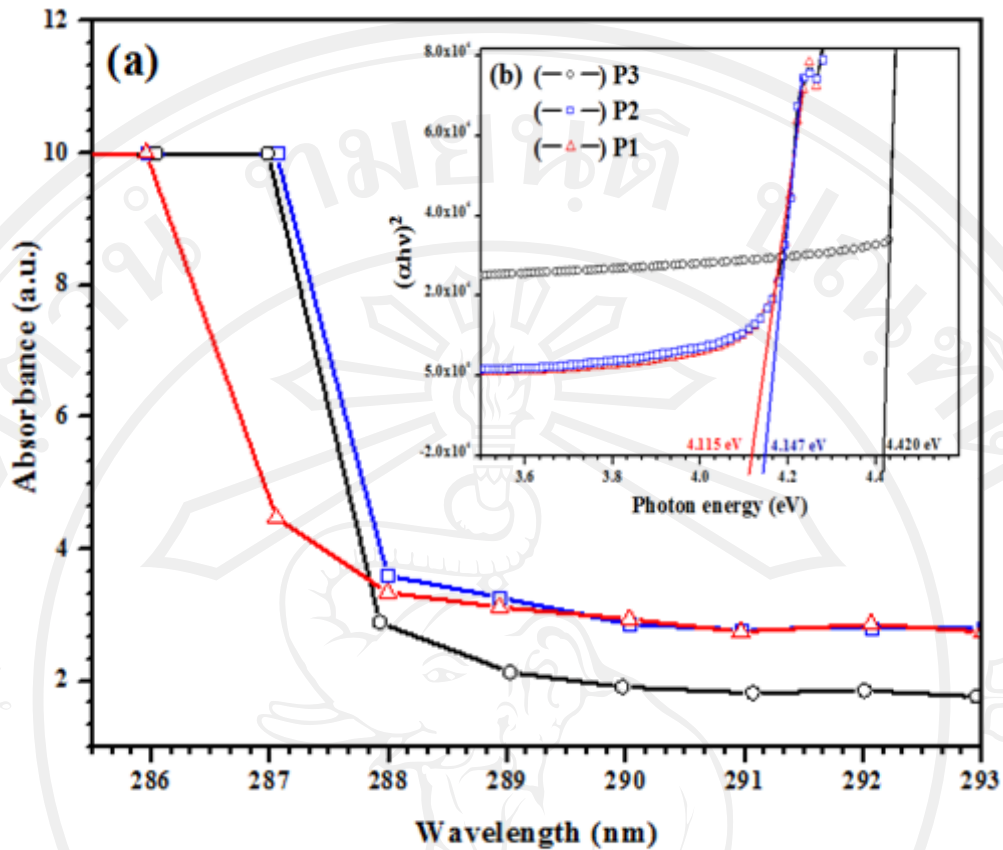


รูป 4.18 แสดงการวิเคราะห์พื้นผิวแบบ 3 มิติ ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

จากรูป 4.16 - 4.18 ได้ศึกษาขนาดและรูปร่างของสารทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์แตกต่างกันทั้ง 3 วิธีด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ทำให้ทราบลักษณะพื้นผิวของวัสดุในแบบ 3 มิติ ว่ามีหลุมมีเนินในบริเวณใดบ้าง เมื่อนำเอาแรงที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆ นี้มาประกอบกันก็จะได้เป็นภาพรวมของพื้นผิวดังกล่าวและสามารถวิเคราะห์พื้นผิวว่ามีความขรุขระมากน้อยเพียงใด จากภาพถ่ายข้างต้นพบว่า พื้นผิวแบบ 3 มิติของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิสนั้นมีลักษณะอนุภาคเป็นเม็ดทรงกลม ขนาดเล็ก วางตัวกันอย่างกระจัดกระจาย รวมกันเป็นกลุ่มแต่ไม่หนาแน่นจนเกินไป เมื่อสุ่มวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส โดยเฉลี่ยนั้น มีค่าเท่ากับ 116.17 นาโนเมตร สำหรับขนาดและรูปร่างแบบสามมิติของเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมพบว่า มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว มีขนาดเล็ก วางเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายหลายทิศทาง มีทั้งวางเป็นเส้นเดี่ยวและเกาะติดกันหลายเส้น เมื่อสุ่มวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวเส้นใยมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 298.01 นาโนเมตร และพื้นผิวแบบ 3 มิติของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 พบว่ามีลักษณะคล้ายกับพื้นผิวแบบ 3 มิติของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส โดยมีลักษณะอนุภาคเป็นเม็ดทรงกลม ขนาดเล็ก สม่ำเสมอ แต่มีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน หนาแน่น ไม่กระจายตัว เมื่อสุ่มวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 161.21 นาโนเมตร

4.2.8 ผลการศึกษาสมบัติเชิงแสงด้วยเครื่องตรวจวัดปริมาณแสง และค่าความเข้มของแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาว (UV-Visible Spectrophotometer)

โดยทำการเปรียบเทียบของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ P2 เส้นสีน้ำเงิน)กับ อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ P1 เส้นสีแดง) และอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ P3 เส้นสีดำ) เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงของสารทินไดออกไซด์โดยอาศัยหลักการการดูดกลืนของแสงที่อยู่ในช่วง UV และ Visible light และหาค่าพลังงานที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าได้



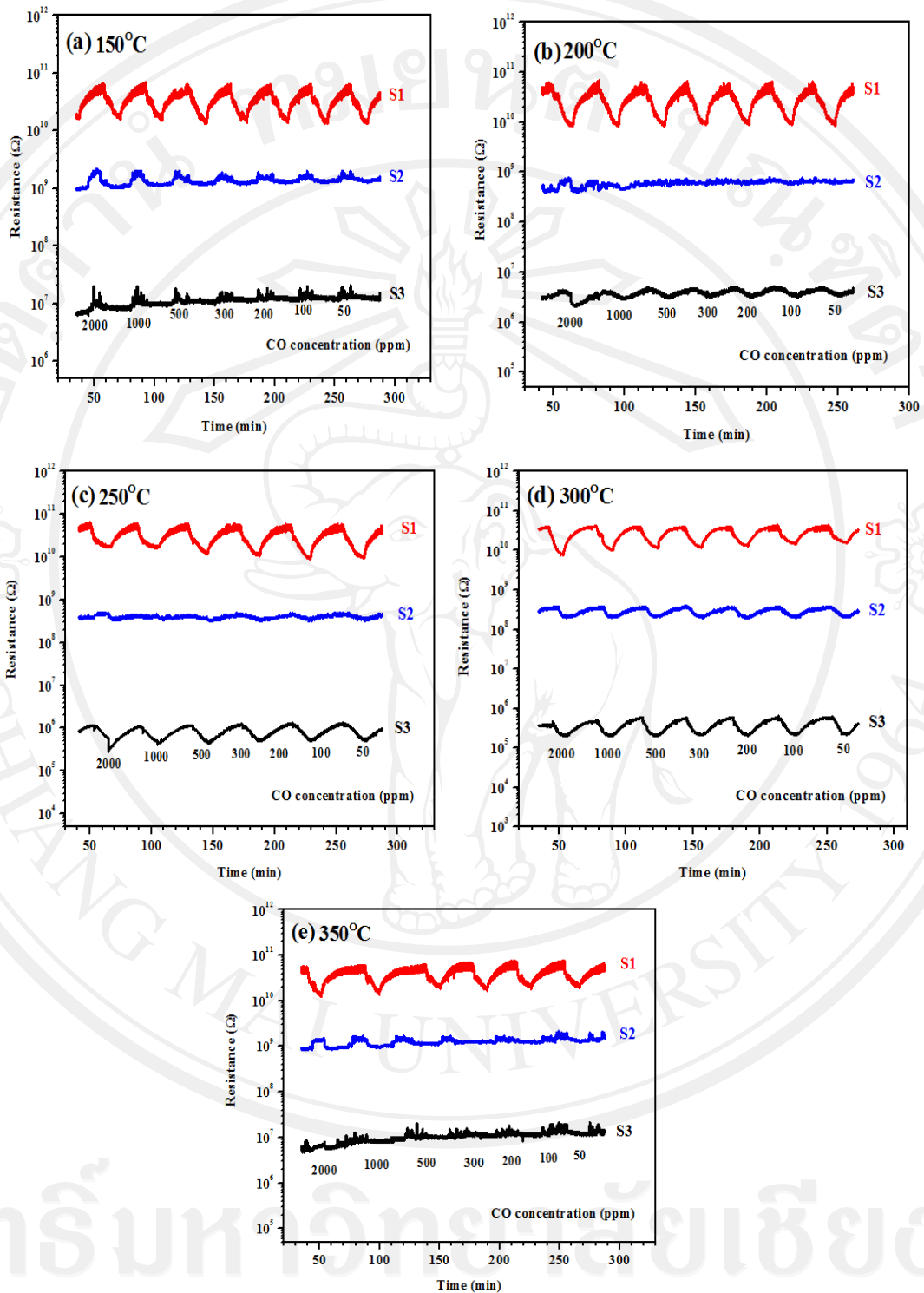
รูป 4.19 กราฟแสดงสมบัติเชิงแสงของสารทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์แตกต่างกันทั้ง 3 วิธี

จากกราฟในรูป 4.19 การศึกษาสมบัติทางแสงของสารทินไดออกไซด์โดยอาศัยหลักการดูดกลืนของแสงที่อยู่ในช่วง UV และ Visible light และหาค่าพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าได้พบว่า อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 287.05 นาโนเมตรและมีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 4.115 eV ส่วนเส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 288.38 นาโนเมตรและมีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 4.147 eV อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 288.14 นาโนเมตร และมีค่าแถบพลังงานเท่ากับ 4.0420 eV จากข้อมูลดังกล่าวสรุปได้ว่า อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 มีสมบัติเชิงแสงดีที่สุด ทราบได้จากการมีค่าพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงมีค่าสูงที่สุด

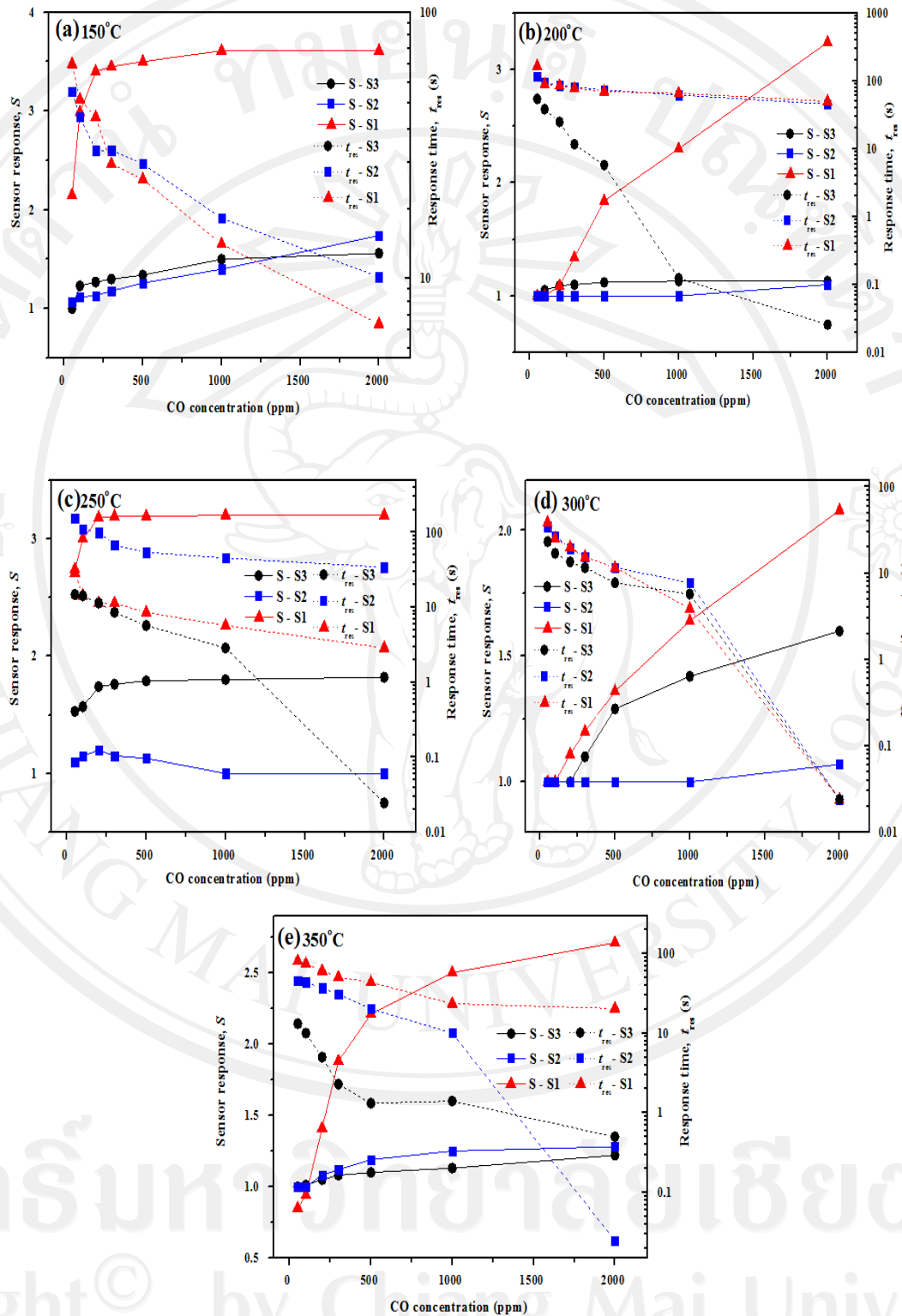
4.3 คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์แต่ละประเภท

4.3.1 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์แสดงดังรูป 4.20 (a-e) แสดงผลในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้าร่วมทำปฏิกิริยา การทดสอบภายใต้สภาวะอากาศที่มีอัตราส่วนของแก๊สในโตรเจนและออกซิเจนที่เหมาะสมที่อุณหภูมิทดสอบ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ในช่วงความเข้มข้น 50-2000 ppm ความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ S2 เส้นสีน้ำเงิน) กับ เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ S1 เส้นสีแดง) และเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ S3 เส้นสีดำ) โดยเปรียบเทียบเพื่อศึกษาการแตกต่างทางขนาดและรูปร่างของทินไดออกไซด์ แสดงได้ดังรูป 4.20 และรูป 4.21 พบว่า เซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิดมีอุณหภูมิและค่าความเข้มข้นของพิสัยการวัดสูงขึ้น ค่าสภาพความต้านทานจะลดลงต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์นี้ S1 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 2000 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 3.61 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 6.718 วินาที, S2 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 2000 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 1.74 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 10.10 วินาที, S3 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 2000 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 1.82 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 0.025 วินาที เพราะฉะนั้นในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิทดสอบ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ในช่วงความเข้มข้น 50-2000 ppm นั้น เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสมีการตอบสนองดีที่สุดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส



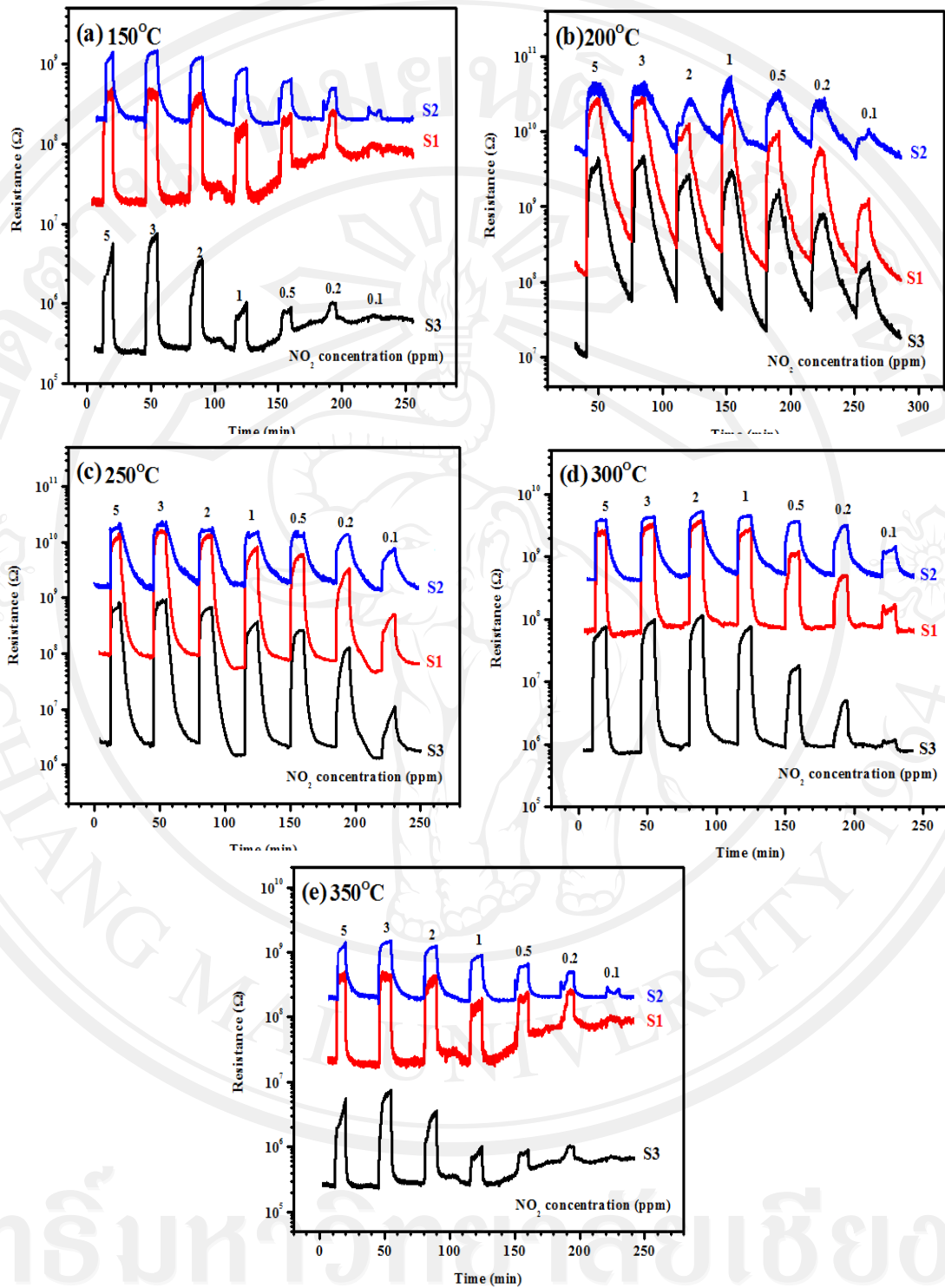
รูป 4.20 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิษในการวัดช่วง 50-2000 ppm ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์



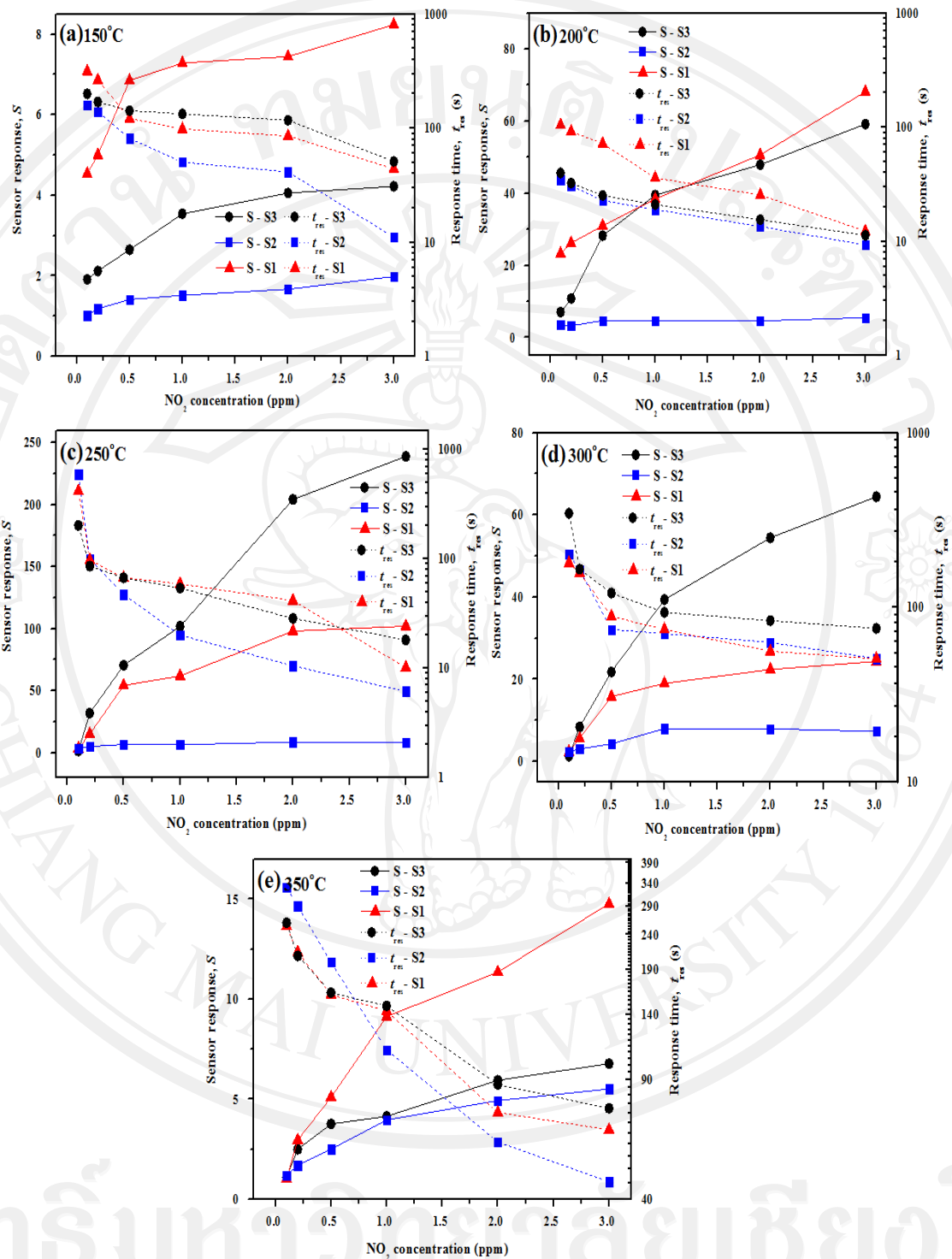
รูป 4.21 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

4.3.2 แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ แสดงดังรูป 4.22(a-e) แสดงผลในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้าร่วมทำปฏิกิริยา การทดสอบเซนเซอร์ทำภายใต้สภาวะอากาศที่มีอัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนที่พอเหมาะ การทดสอบได้ทำการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 0.1-3 ppm เนื่องจากว่าเป็นแก๊สพิษที่อันตรายอย่างมาก จึงทดสอบที่ค่าความเข้มข้นต่ำซึ่งมีความปลอดภัยกว่าที่ความเข้มข้นสูง ความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ S2 เส้นสีน้ำเงิน) กับ เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ S1 เส้นสีแดง) และเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ S3 เส้นสีดำ) โดยเปรียบเทียบเพื่อศึกษาการแตกต่างทางขนาดและรูปร่างของทินไดออกไซด์ แสดงได้ดังรูป 4.22 และรูป 4.23 พบว่า เซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิดมีอุณหภูมิและค่าความเข้มข้นของพิสัยการวัดสูงขึ้น ค่าสภาพความต้านทานจะลดลงต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์นี้ S1 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 3 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 102.10 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 10.149 วินาที, S2 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 3 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 8.27 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 6.15 วินาที, S3 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 3 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 239.04 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 18.15 วินาที เพราะฉะนั้นในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิทดสอบ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ในช่วงความเข้มข้น 0.1-3 ppm นั้น เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 มีการตอบสนองดีที่สุดที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



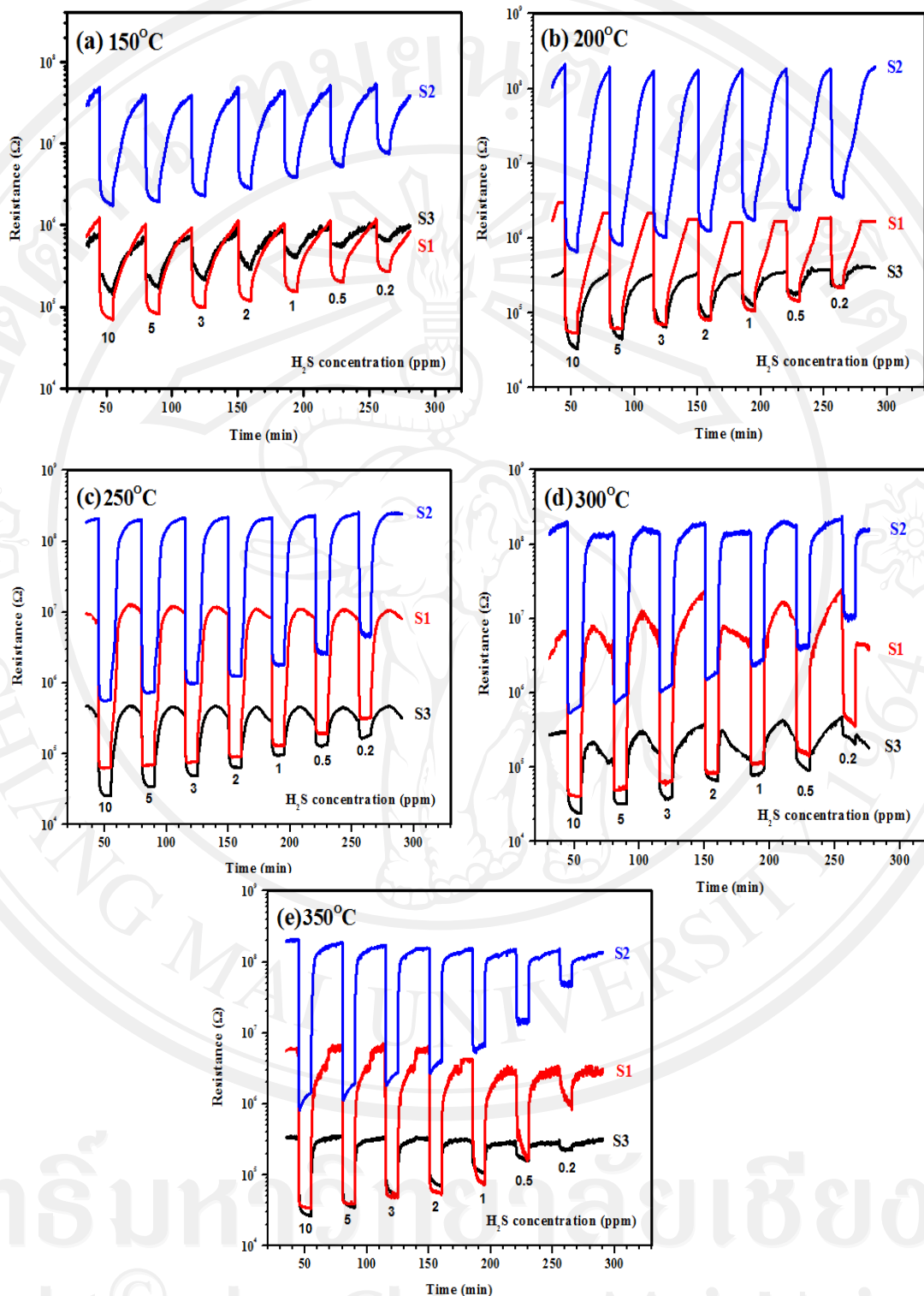
รูป 4.22 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิษในการวัดช่วง 0.1-3 ppm ของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์



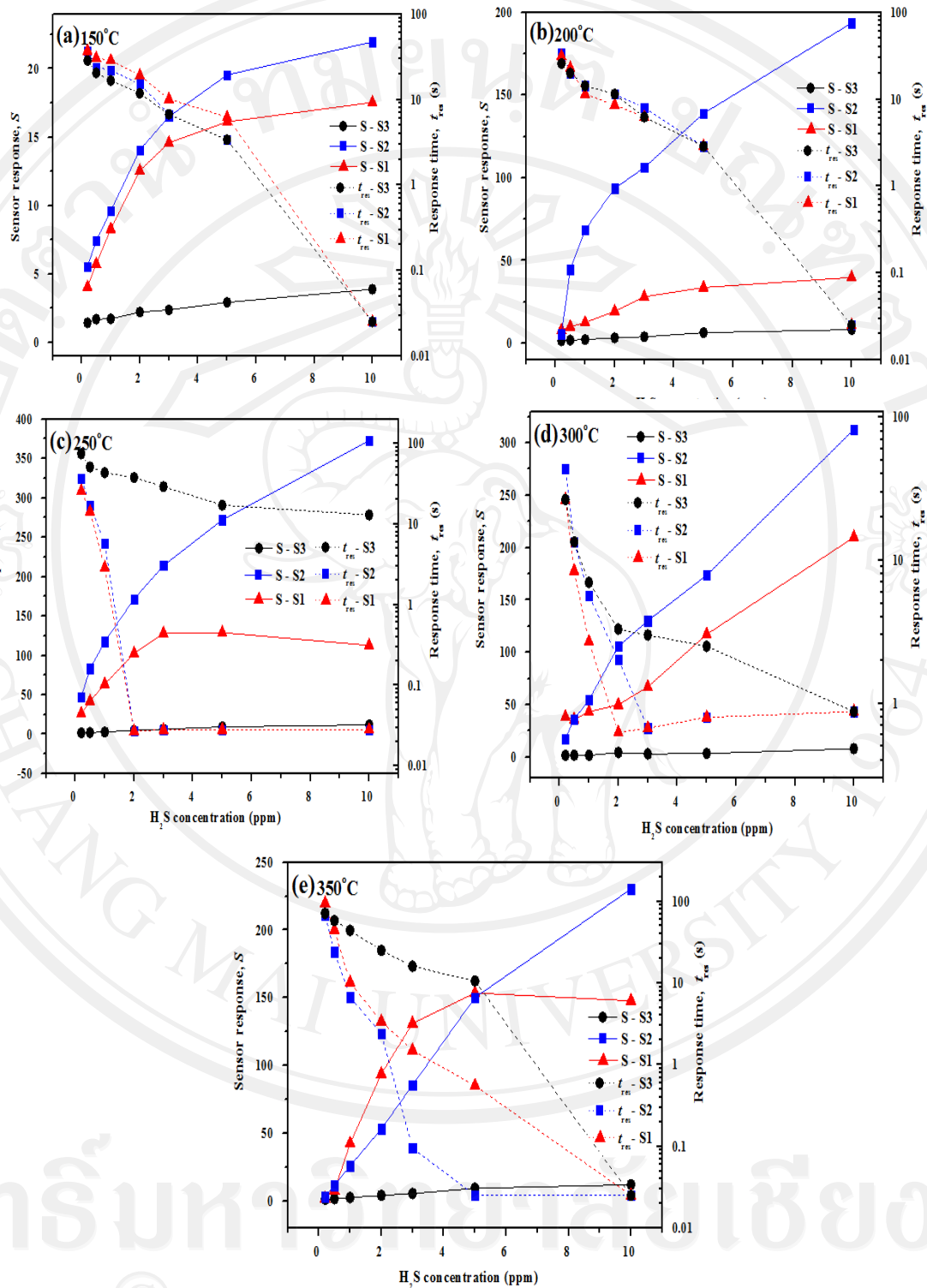
รูป 4.23 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 0.1-3 ppm ของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์

4.3.3 แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

สำหรับการทดสอบเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แสดงได้ดังรูป 4.24 และรูป 4.25 แสดงผลในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้าร่วมทำปฏิกิริยา การทดสอบเซนเซอร์ทำภายใต้สภาวะอากาศที่มีอัตราส่วนของแก๊สที่เหมาะสม การทดสอบได้ทำการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 0.2-10 ppm ความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ S2 เส้นสีน้ำเงิน) กับ เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสปร์ย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ S1 เส้นสีแดง) และเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ S3 เส้นสีดำ) โดยเปรียบเทียบเพื่อศึกษาคูการแตกต่างทางขนาดและรูปร่างของทินไดออกไซด์ แสดงได้ดังรูป 4.24 และรูป 4.25 พบว่า เซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิด มีอุณหภูมิและค่าความเข้มข้นของพิสัยการวัดสูงขึ้น ค่าสภาพความต้านทานจะลดลงต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดสำหรับการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์นี้ S1 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 10 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 209.89 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 0.873 วินาที, S2 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 10 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 372.67 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 0.0282 วินาที ค่าสภาพความไวของเซนเซอร์มีลักษณะเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นและเวลาในการตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อการเข้าร่วมทำปฏิกิริยาของแก๊สในปริมาณที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นอย่างมีนัย สามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดของการตอบสนองเพื่อที่จะสามารถนำไปพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต, S3 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 10 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 12.01 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 0.025 วินาที เพราะฉะนั้นในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิทดสอบ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ในช่วงความเข้มข้น 0.2-10 ppm นั้น เซนเซอร์ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง มีการตอบสนองดีที่สุดในอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



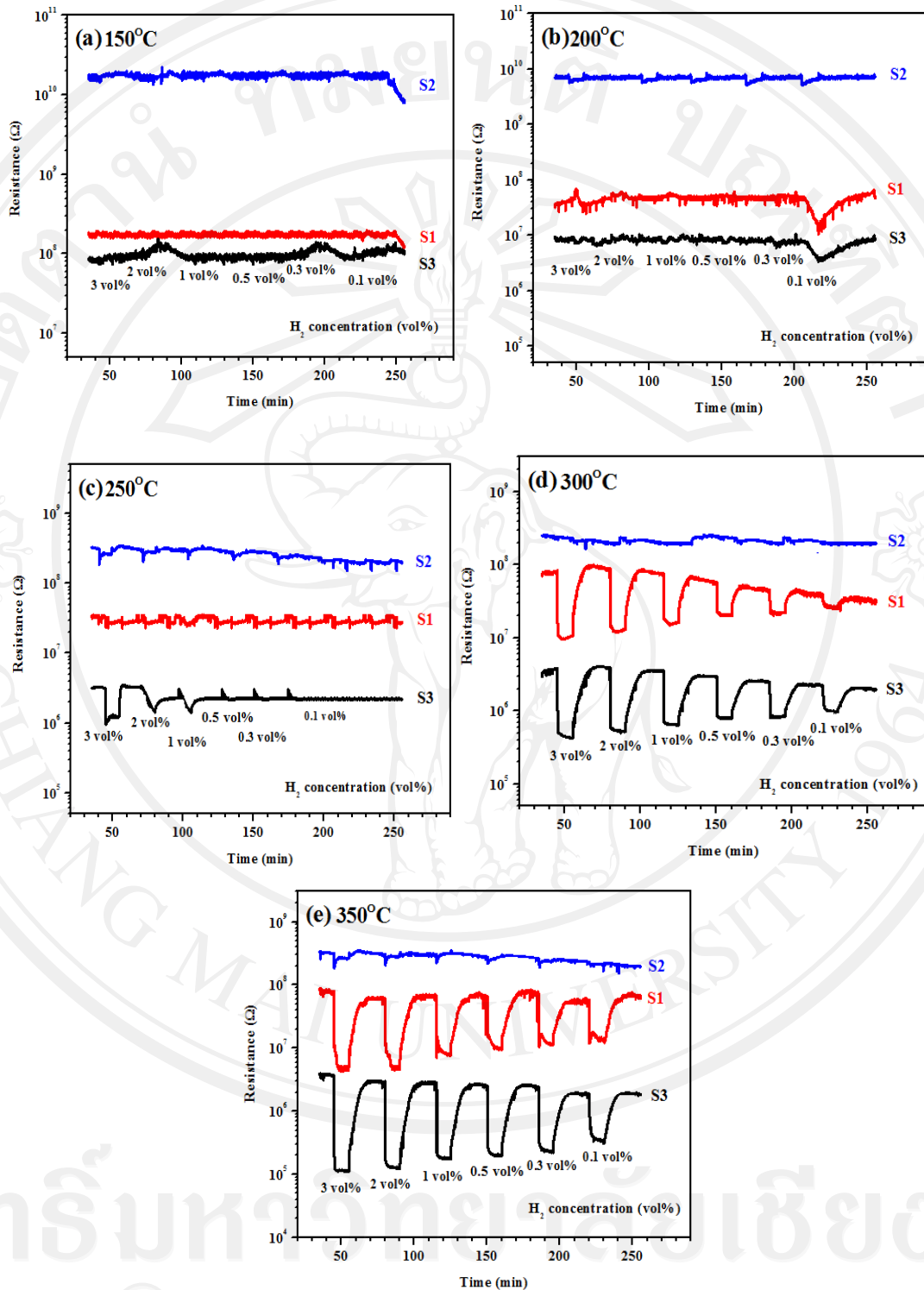
รูป 4.24 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิษในการวัดช่วง 0.2-10 ppm ของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์



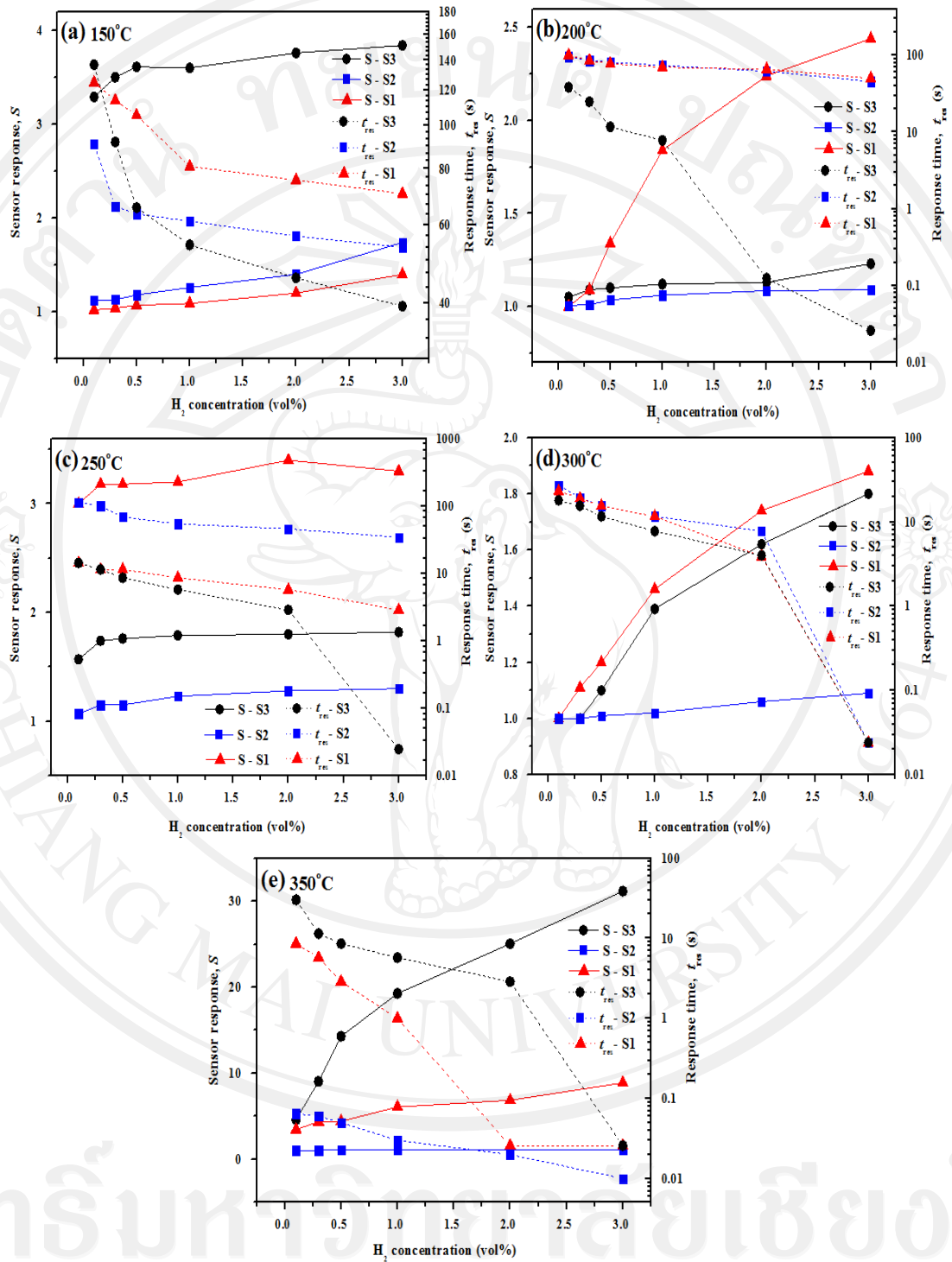
รูป 4.25 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

4.3.4 แก๊สไฮโดรเจน

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊ส การทดสอบได้ทำการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 0.1-3 vol% ความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจน โดยได้ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ S2 เส้นสีน้ำเงิน) กับ เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ S1 เส้นสีแดง) และเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ S3 เส้นสีดำ) โดยเปรียบเทียบเพื่อศึกษาการแตกต่างทางขนาดและรูปร่างของทินไดออกไซด์ แสดงได้ดังรูป 4.26 และรูป 4.27 พบว่า เซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิด มีอุณหภูมิและค่าความเข้มข้นของพิสัยการวัดสูงขึ้น ค่าสภาพความต้านทานจะลดลงต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนนี้ S1 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 3 vol% โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 8.87 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 0.026 วินาที, S2 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 3 vol% โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 1.74 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 53.324 วินาที ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่าและต่ำกว่าอุณหภูมินี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าที่ต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมและไม่ใช่งานวิจัยที่ดีที่สุดของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดของการตอบสนองเพื่อที่จะสามารถนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการเพื่อที่จะสามารถนำไปพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต, S3 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 3 vol% โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 31.15 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 0.025 วินาที เพราะฉะนั้นในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิทดสอบ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ในช่วงความเข้มข้น 0.1-3 vol% นั้น เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 มีการตอบสนองดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส



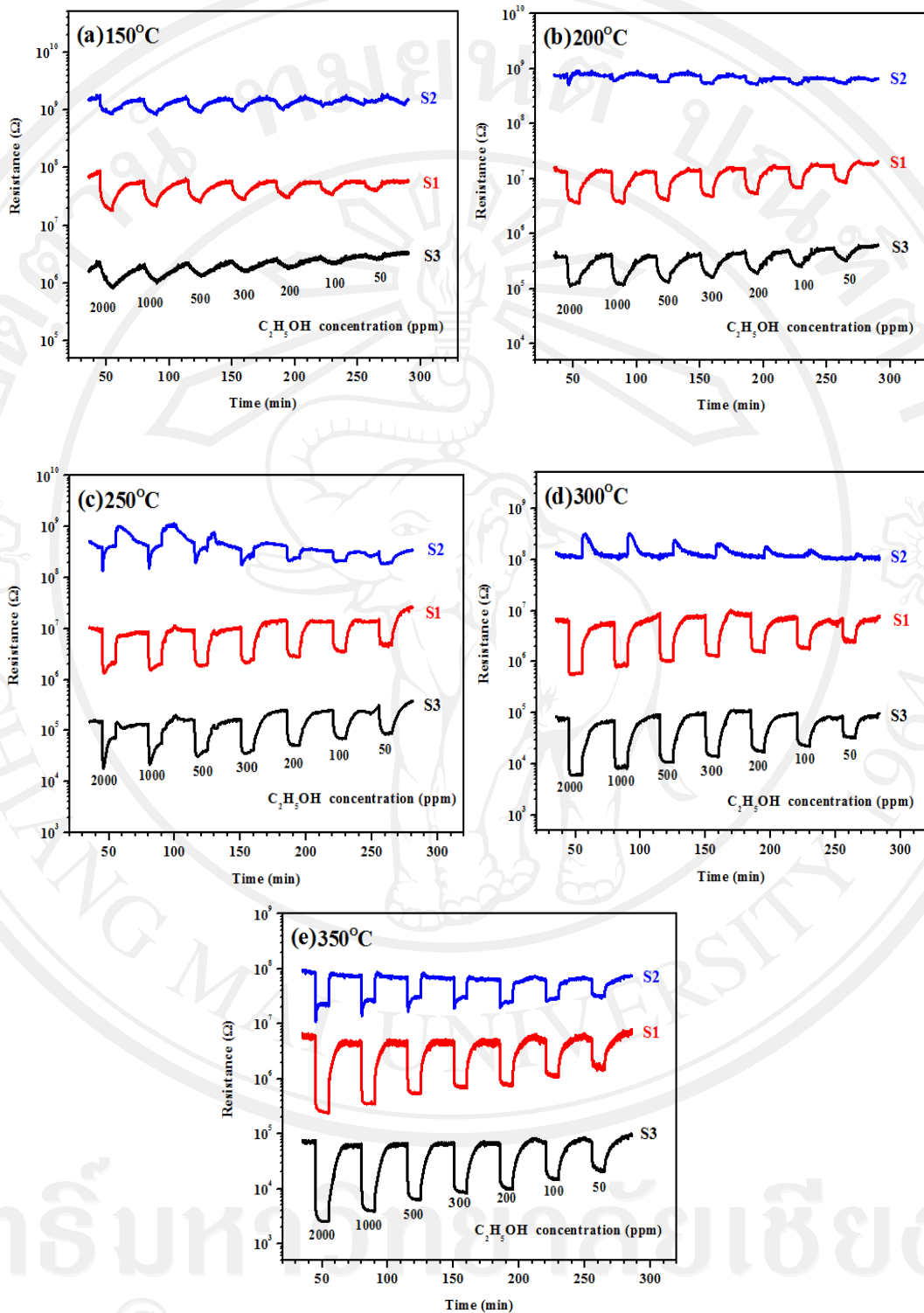
รูป 4.26 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของฟิสิกส์ในการวัดช่วง 0.1-3 vol% ของแก๊สไฮโดรเจน



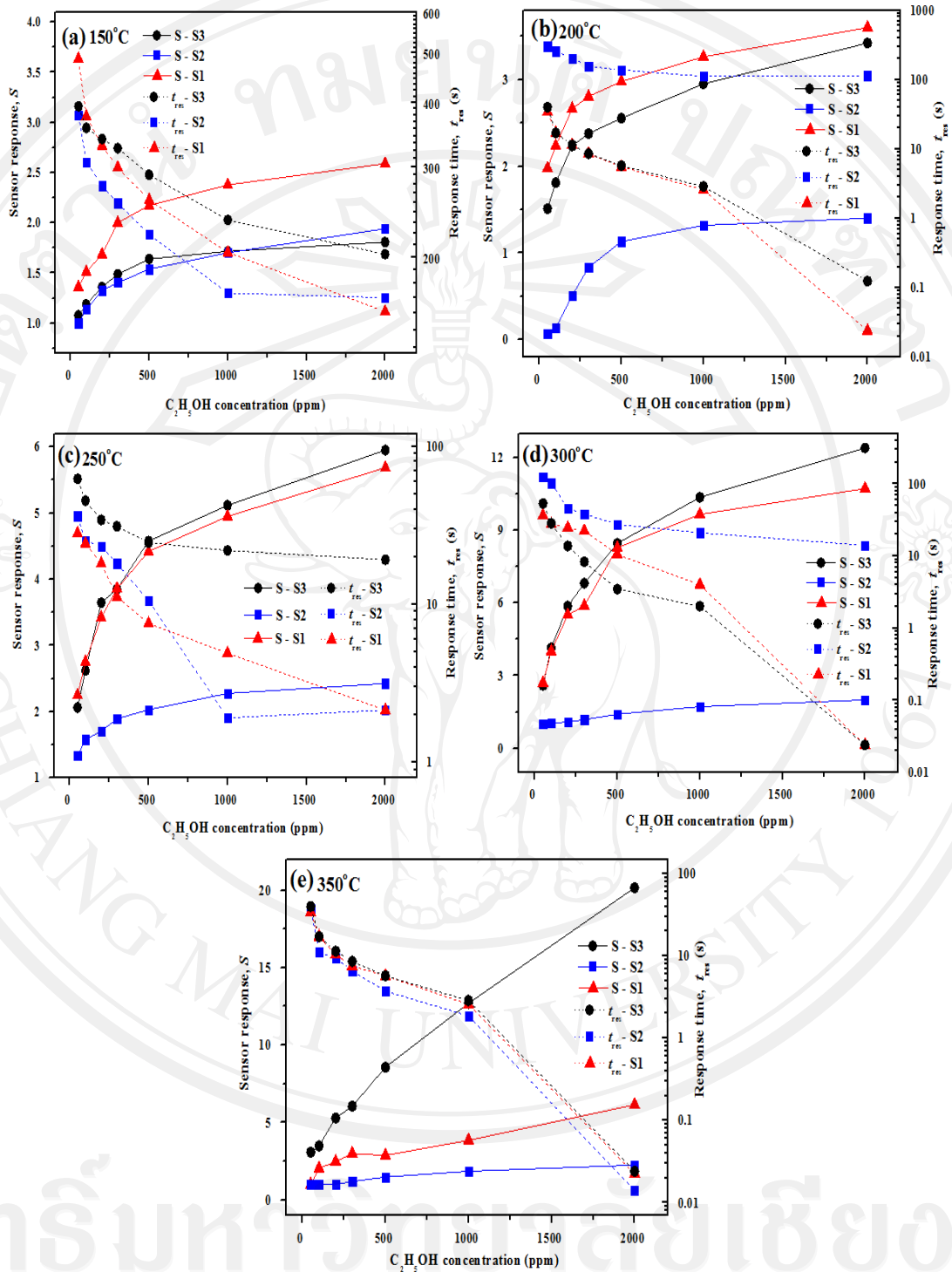
รูป 4.27 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สไฮโดรเจน ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 0.1-3 vol% ของแก๊สไฮโดรเจน

4.3.5 เอทานอล

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอล แสดงผลในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้าร่วมทำปฏิกิริยา การทดสอบเซนเซอร์ทำภายใต้สภาวะอากาศที่มีอัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจน และ ออกซิเจนที่เหมาะสม การทดสอบได้ทำการทดสอบการตอบสนองเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 50-2000 ppm ความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอล โดยได้ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ S2 เส้นสีน้ำเงิน) กับ เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ S1 เส้นสีแดง) และเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ S3 เส้นสีดำ) โดยเปรียบเทียบเพื่อศึกษาการแตกต่างทางขนาดและรูปร่างของทินไดออกไซด์ แสดงได้ดังรูป 4.28 และรูป 4.29 พบว่า เซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิดมีอุณหภูมิและค่าความเข้มข้นของพิสัยการวัดสูงขึ้น ค่าสภาพความต้านทานจะลดลงต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลนี้ S1 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 2000 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 10.72 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 0.024 วินาที, S2 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 2000 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 2.42 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 2.140 วินาที, S3 จะมีการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลได้ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด 2000 ppm โดยมีสภาพความไวเท่ากับ 20.16 และใช้เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สประมาณ 0.024 วินาที เพราะฉะนั้นในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิทดสอบ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ในช่วงความเข้มข้น 50-2000 ppm นั้น เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 มีการตอบสนองดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส



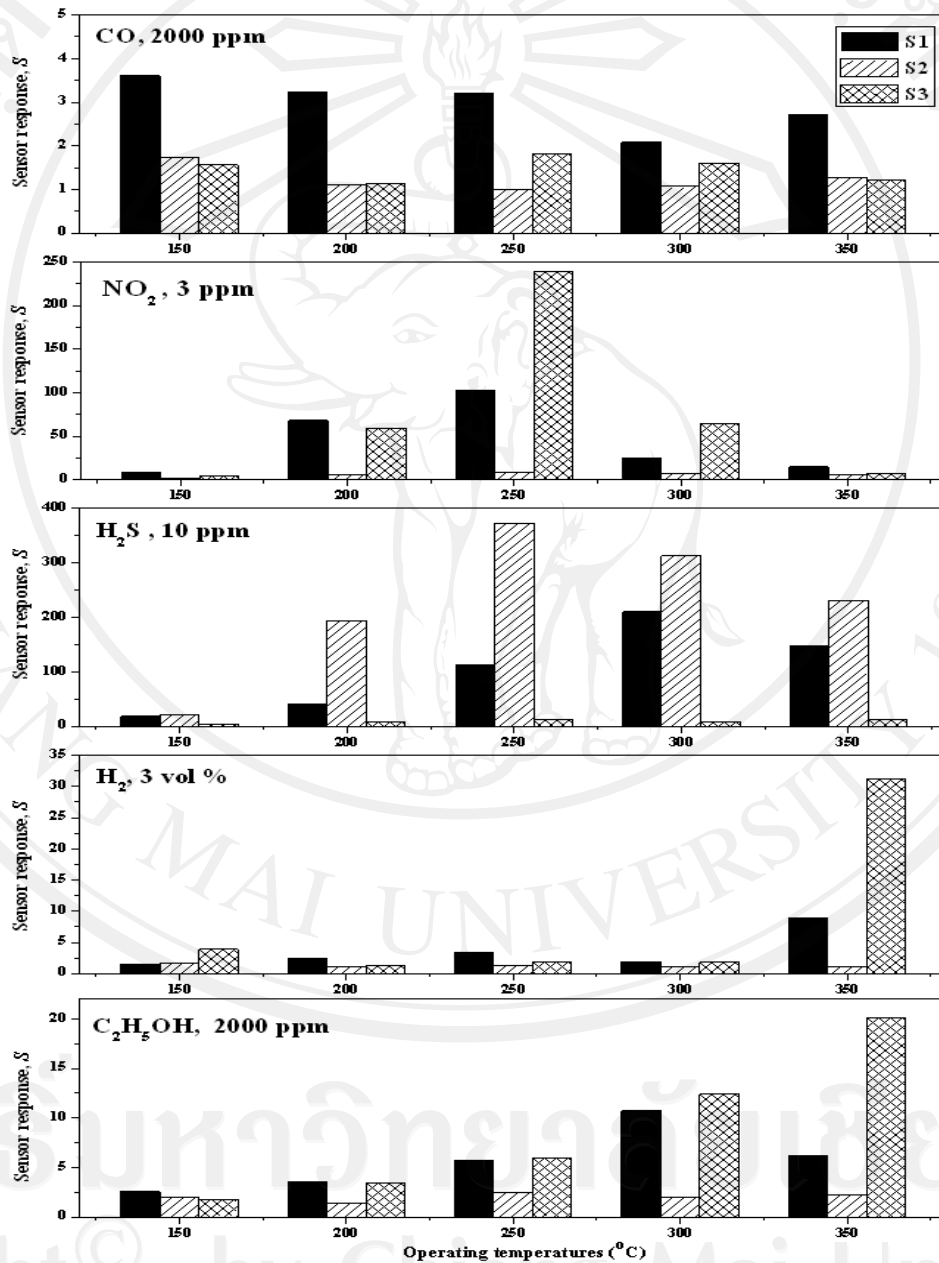
รูป 4.28 (a-e) แสดงการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความต้านทานการทดสอบของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 50-2000 ppm ของแก๊สเอทานอล



รูป 4.29 (a-e) แสดงความสัมพันธ์ของสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มข้นในการทดสอบของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 50-2000 ppm ของแก๊ส เอทานอล

4.3.6 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์แต่ละประเภท

คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์แต่ละประเภทสามารถสรุปออกมาเป็นรูปภาพเปรียบเทียบได้ดังรูป 4.30

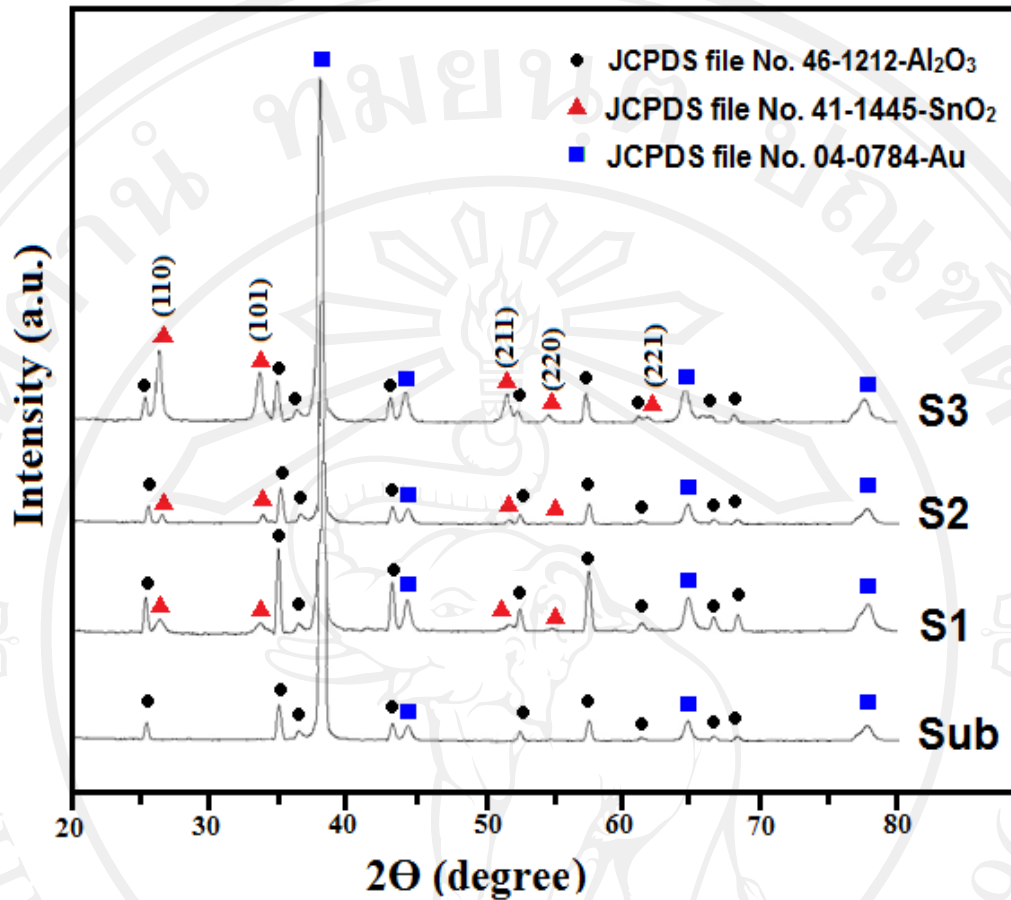


รูป 4.30 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์แต่ละประเภท

4.4 ลักษณะวิทยาของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบ

4.4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มทินไดออกไซด์โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

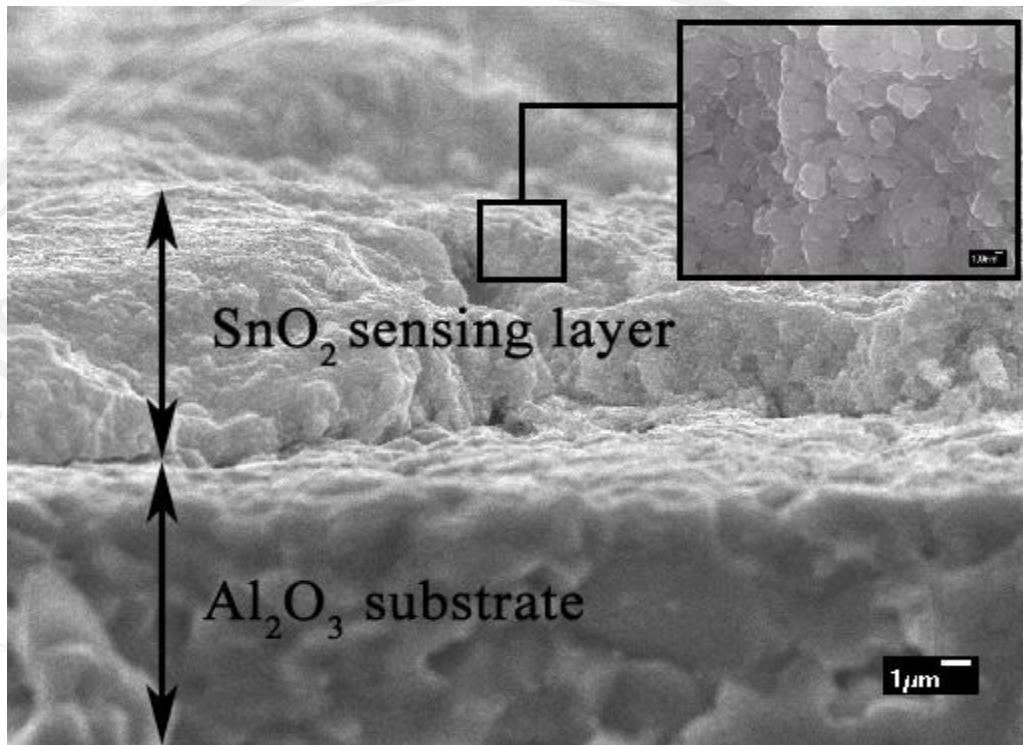
ในการวิเคราะห์เซนเซอร์ภายหลังการทดสอบการตอบสนองด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้น ได้ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์ของเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง (แทนด้วยสัญลักษณ์ S2) กับ เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่าที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส (แทนด้วยสัญลักษณ์ S1), เซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 (แทนด้วยสัญลักษณ์ S3) โดยเปรียบเทียบเพื่อศึกษาการแตกต่างทางขนาดและรูปร่างของทินไดออกไซด์ และชั้นสเตรทเพลตอะลูมินาพิมพ์ลาย (interdigitate) ด้วยทงบริสุทธิ์ก่อนนำมาเตรียมเซนเซอร์ (แทนด้วยสัญลักษณ์ Sub) รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มทินไดออกไซด์ที่แสดงในรูป 4.31 ประกอบไปด้วยอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีโครงสร้างแบบรวมโบฮีตรอล, ทอง (Au) มีโครงสร้างเป็นคิวบิกแบบ FCC และรูปแบบการเลี้ยวเบนแสดงถึงทินไดออกไซด์ (SnO_2) ที่มีโครงสร้างเป็นรูไทล์ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการเปรียบเทียบกับเส้นสเปกตรัมมาตรฐานใน JCPDS หมายเลข 46-1212, 04-0784 และ 41-1445 ตามลำดับ จากกราฟพบพีกของทินไดออกไซด์ (SnO_2) ที่ระนาบ (110), (101), (211), (220), (221) จะเห็นได้ว่าความเข้มของพีกทินไดออกไซด์ (SnO_2) ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.61° , 33.89° , 51.78° , 54.57° , 62.59° จึงสามารถยืนยันได้ว่ามีฟิล์มทินไดออกไซด์ (SnO_2) เคลือบบนชั้นสเตรทอยู่จริง แต่ความเข้มของทินไดออกไซด์ (SnO_2) และทองที่ตรวจวัดได้ถือว่ามีความเข้มที่น้อยมากเมื่อเทียบกับความเข้มของอะลูมินา ทำให้ความสามารถในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีค่าความเข้มของเส้นสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้



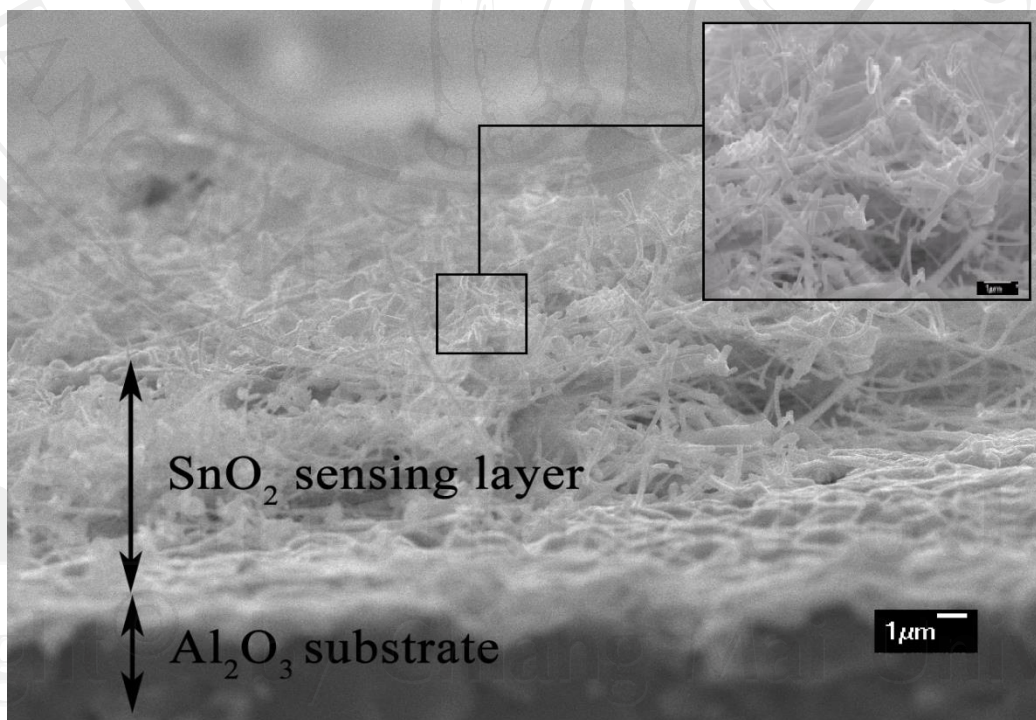
รูป 4.31 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มทินไดออกไซด์

4.4.2 ผลการวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์(EDS)

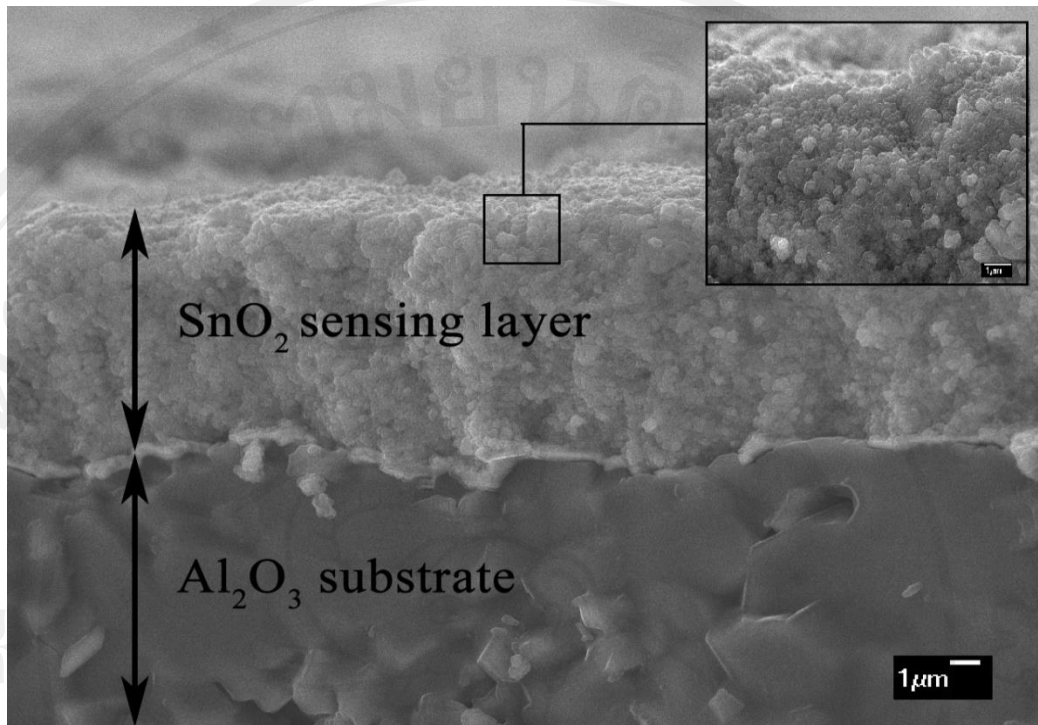
การศึกษาโครงสร้างภายหลังการทดสอบเซนเซอร์ แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบการตอบสนอง ทำให้ทราบถึงโครงสร้างแนบตัวระดับไมโครเมตรของชั้นสเตรททอนิตอะลูมินาและทำการพิมพ์ลายตัวนำไฟฟ้าชนิดทอง อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้ ภายหลังการทดสอบ สามารถวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มได้ประมาณ 1 ไมโครเมตร ซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแนบตัวและมีรูพรุน และเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์โดยการกระจายตัวของรังสีชนิดแบบเส้น ของตัวอย่างเซนเซอร์ที่มีการตอบสนองต่อแก๊สทั้ง 5 ชนิด ที่เป็นตัวอย่างแก๊สสถานะแวดล้อม



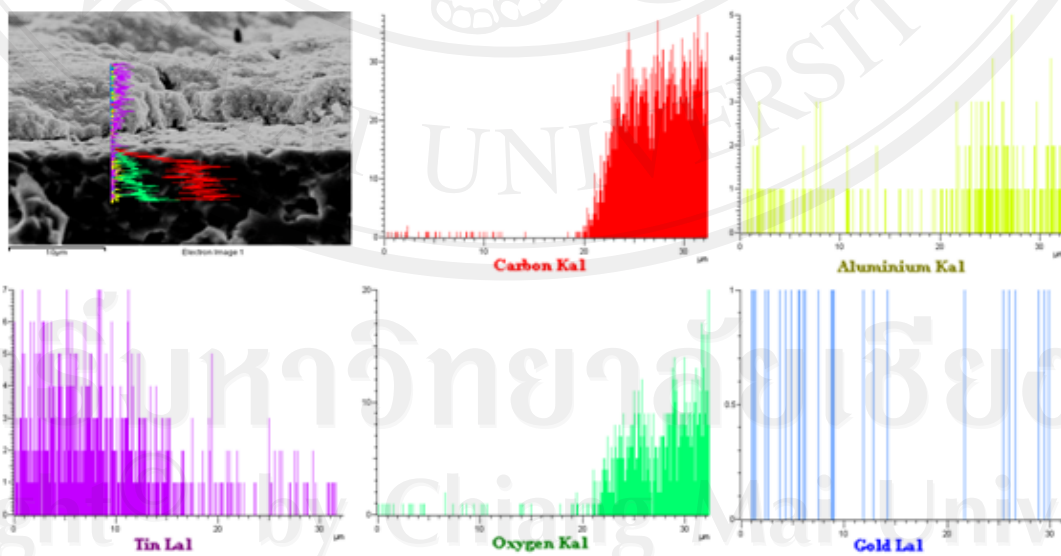
รูป 4.32 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



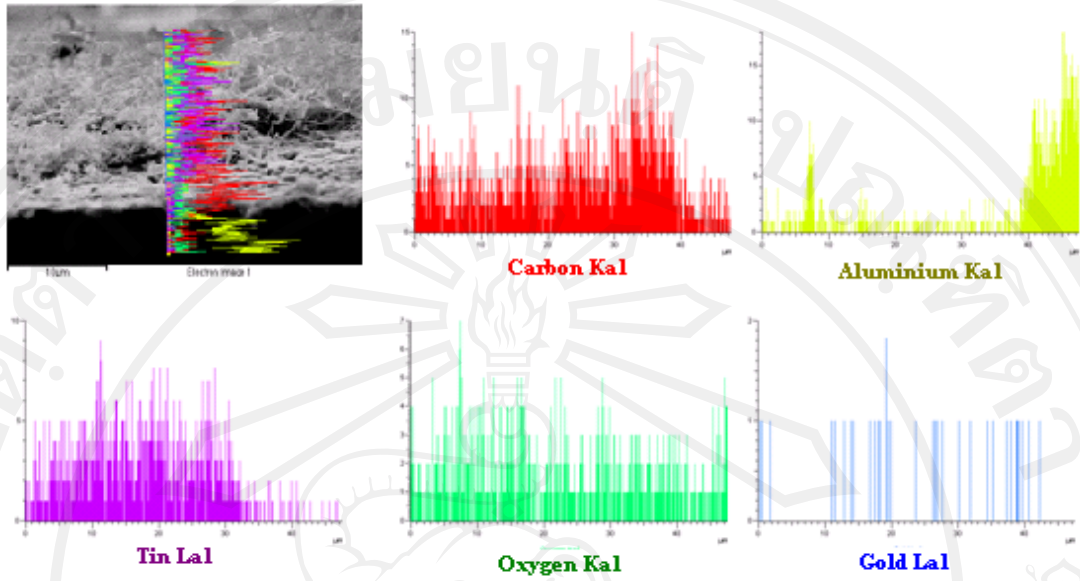
รูป 4.33 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์หลังการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง



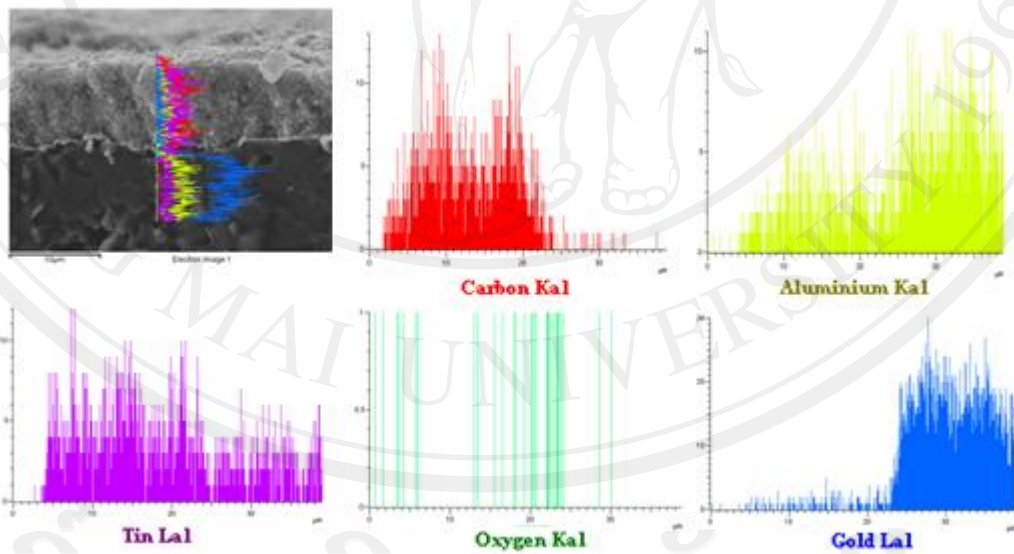
รูป 4.34 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์หลังการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด



รูป 4.35 แสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชั้นสตรุทที่ใช้ และธาตุของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส



รูป 4.36 แสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ และธาตุของเซนเซอร์เส้นใยนาโนทิงไดออกไซด์โดยการตกสะสมแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง



รูป 4.37 แสดงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ และธาตุของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทิงไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657

จากรูป 4.32 - 4.34 เป็นการศึกษาโครงสร้างภายหลังการทดสอบเซนเซอร์ เพื่อดูความหนาของฟิล์ม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ทำให้ทราบถึงโครงสร้างแน่นตัวระดับไมโครเมตรของเซนเซอร์ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้ จากรูป 4.32 เซนเซอร์ภายหลังการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส นั้น พบว่าเซนเซอร์นี้มีอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสอยู่จริง มีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ ขนาดเล็กเกาะกลุ่มและซ้อนทับกันอย่างแน่นหนา อยู่บนชั้นสเตรทชนิดอะลูมินาโดยมีความหนาของชั้น SnO₂ sensing ประมาณ 3 ไมโครเมตร จากรูป 4.33 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์หลังการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูง แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า มีเส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงอยู่จริง มีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็ก เรียงตัวกันอยู่อย่างกระจัดกระจายซ้อนทับกันไปมา มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 3 ไมโครเมตร ส่วนของเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 ก็เช่นเดียวกันสามารถมองเห็นจากรูปได้ว่ามีอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 อยู่บนเซนเซอร์จริง โดยมีลักษณะคล้ายกับอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส และมีความหนาประมาณ 3-5 ไมโครเมตร

จากรูป 4.35 – 4.37 เป็นการศึกษาองค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ซึ่งพบว่าเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่ตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด อันประกอบด้วยเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส, เซนเซอร์เส้นใยนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้โดยการตกตะกอนแบบให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าสูงและเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีการจำหน่ายทางการค้าของบริษัท Aldrich หมายเลข 549657 นั้นสามารถพบองค์ประกอบของธาตุ ทุกตัวได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคนี้ ทั้งธาตุที่เป็นองค์ประกอบของชั้นสเตรทที่ใช้ และธาตุของทินไดออกไซด์ได้ โดยเซนเซอร์ทั้ง 3 มีองค์ประกอบของธาตุที่พบเหมือนกัน คือ คาร์บอน, อะลูมิเนียม, ดิบุกหรือทิน, ออกซิเจนและทอง ในปริมาณที่ต่างกันในแต่ละเซนเซอร์