

## บทที่ 4

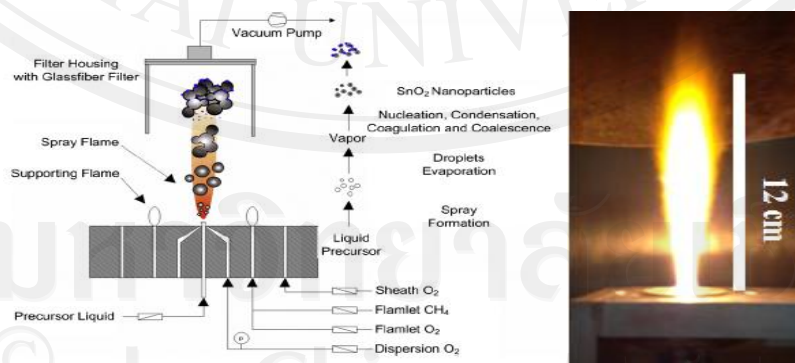
### ผลการทดลอง

ในส่วนของการทดลอง ได้ทำการรายงานโดยละเอียด ถึงผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของอนุภาคและวัสดุเซนเซอร์ และ คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมแต่ละประเภท แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 คุณสมบัติของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชันแมงกานีส และ โมลิบดีนัม

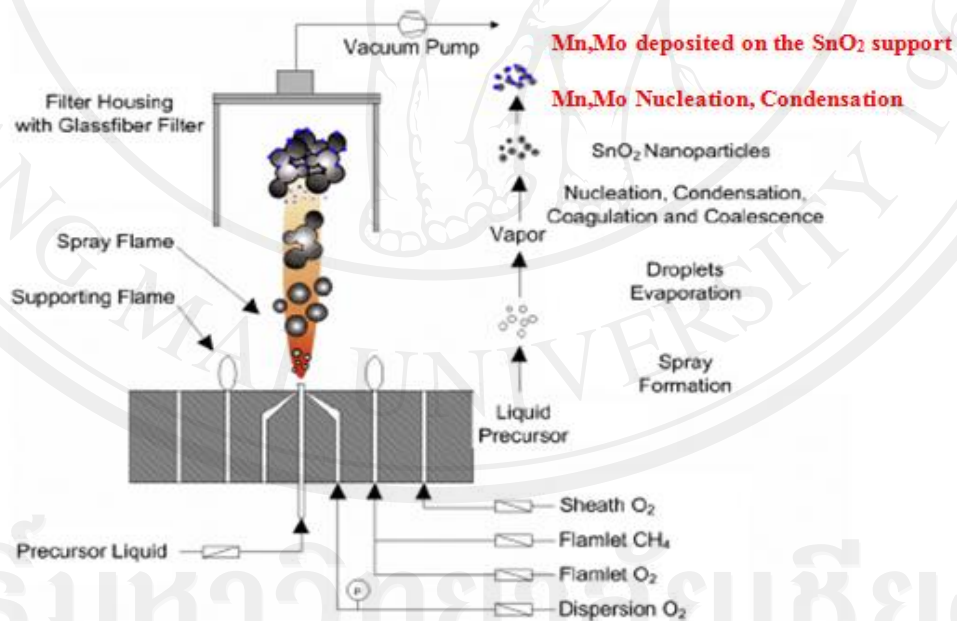
##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของเปลวไฟ

ในการสังเกตลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น พบว่า เมื่อทำการฉีดสารละลายตั้งต้น Tin (II) ethylhexanoate ที่ผสมแมงกานีสและ โมลิบดีนัม ซึ่งละลายในตัวทำละลายไซลีน พบว่า เปลวไฟมีลักษณะที่ค่อนข้างเสถียร และ สีที่สังเกตได้คือสีส้ม ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นด้วยที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยความสูงของเปลวไฟที่วัดได้มีความสูงโดยเฉลี่ยประมาณ 13 เซนติเมตรดังรูป 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 5/5 (อัตราเร็วในการฉีดสารละลายตั้งต้นเข้าไปในระบบ) หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที / อัตราเร็วในการพาแก๊สออกซิเจนซึ่งใช้ในการกระจายตัวสารตัวอย่างหน่วยเป็น ลิตรต่อนาที)

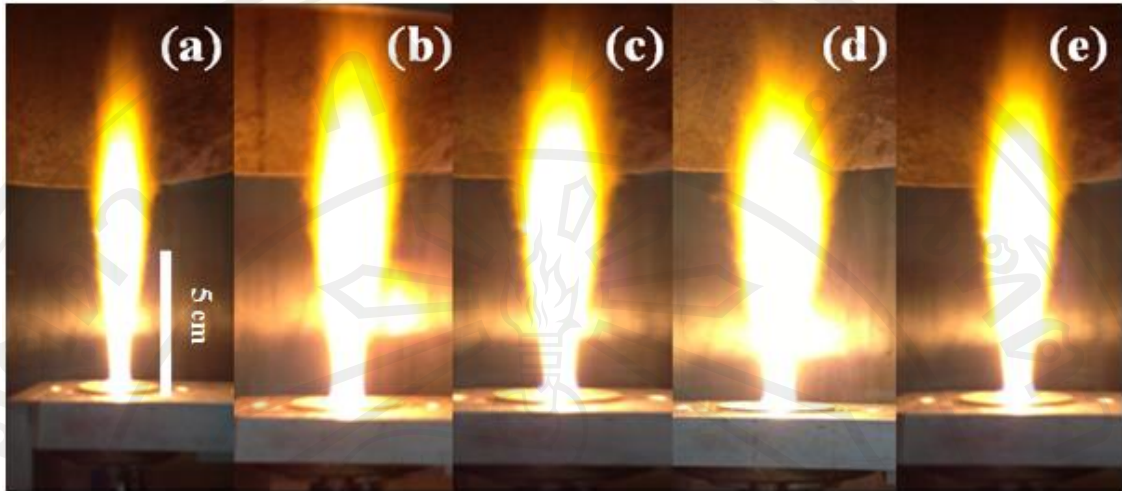


รูป 4.1 ขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการพ่นสารละลายตั้งต้น Tin (II) ethylhexanoate ละลายในตัวทำละลายไซลีน

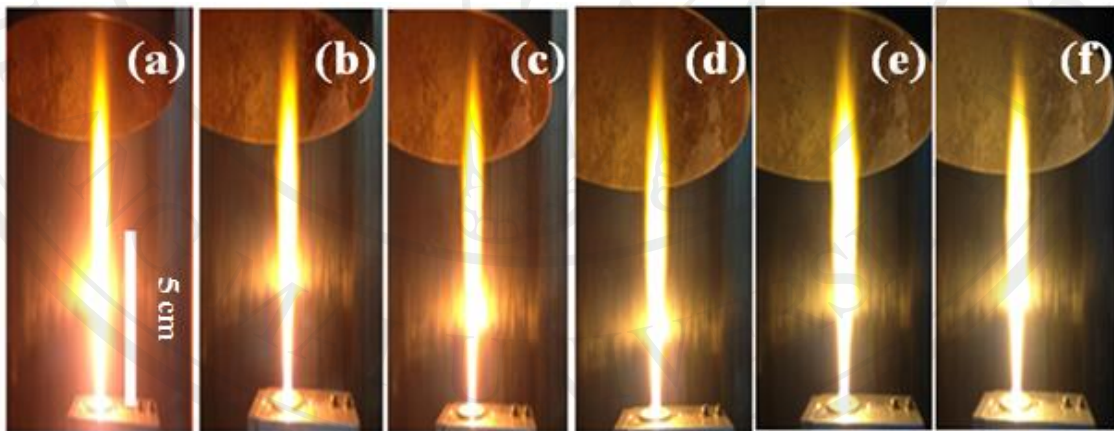
สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และมีการเจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชัน เช่น โมลิบดีนัม และ แมงกานีส แสดงขั้นตอนการก่อตัวเป็นอนุภาคดังรูป 4.2 การก่อตัวจะเริ่มขึ้นจากการสังเคราะห์หัวสคูล์หลักก่อนเพื่อให้เกิดเป็นโลหะออกไซด์ที่สมบูรณ์ ในส่วนการก่อตัวโลหะในกลุ่มทรานซิชันนั้นตะกาะบริเวณผิวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ แต่มีการก่อตัวในขั้นตอนสุดท้ายของเปลวไฟ ในการสังเกตลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น พบว่า เมื่อทำการฉีดสารละลายตั้งต้น ภายใต้การเผาไหม้ความร้อนสูง เปลวไฟมีลักษณะที่ค่อนข้างเสถียร และ สีที่สังเกตได้คือสีเหลืองอมส้ม เมื่อมีการเจือมากขึ้นสีจะออกส้มมากขึ้นในส่วนของแมงกานีส และ โมลิบดีนัมเมื่อมีการเจือส่วผสมมากขึ้นจะออกสีเหลืองขาวนวล ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ ความสูงของเปลวไฟที่วัดได้มีค่าเป็น 10-15 เซนติเมตร เมื่อมีการเจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชันในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละโดยน้ำหนัก สำหรับ โมลิบดีนัม และ 0.1-1 ร้อยละโดยน้ำหนัก สำหรับแมงกานีส แสดงดังรูป 4.3, 4.4 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 5/5 (อัตราเร็วในการฉีดสารละลายตั้งต้นเข้าไปในระบบ) หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที / อัตราเร็วในการพาแก๊สออกซิเจนซึ่งใช้ในการกระจายตัวสารตัวอย่างหน่วยเป็น ลิตรต่อนาที)



รูป 4.2 ขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชันแมงกานีส และ โมลิบดีนัม



รูป 4.3 ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการฟอสฟอเรสcence ของสารละลายตั้งต้น Tin (II) ethylhexanoate ผสมกับสารเจือชนิด Manganese acethylacetonate ในตัวทำละลายโทลูอีนเพื่อสังเคราะห์แมงกานีส และในตัวทำละลายไซลีนเพื่อสังเคราะห์ทินไดออกไซด์ (a)  $\text{SnO}_2$  และ  $\text{Mn/SnO}_2$  ความเข้มข้น (b) 0.1, (c) 0.2, (d) 0.5, (e) 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก



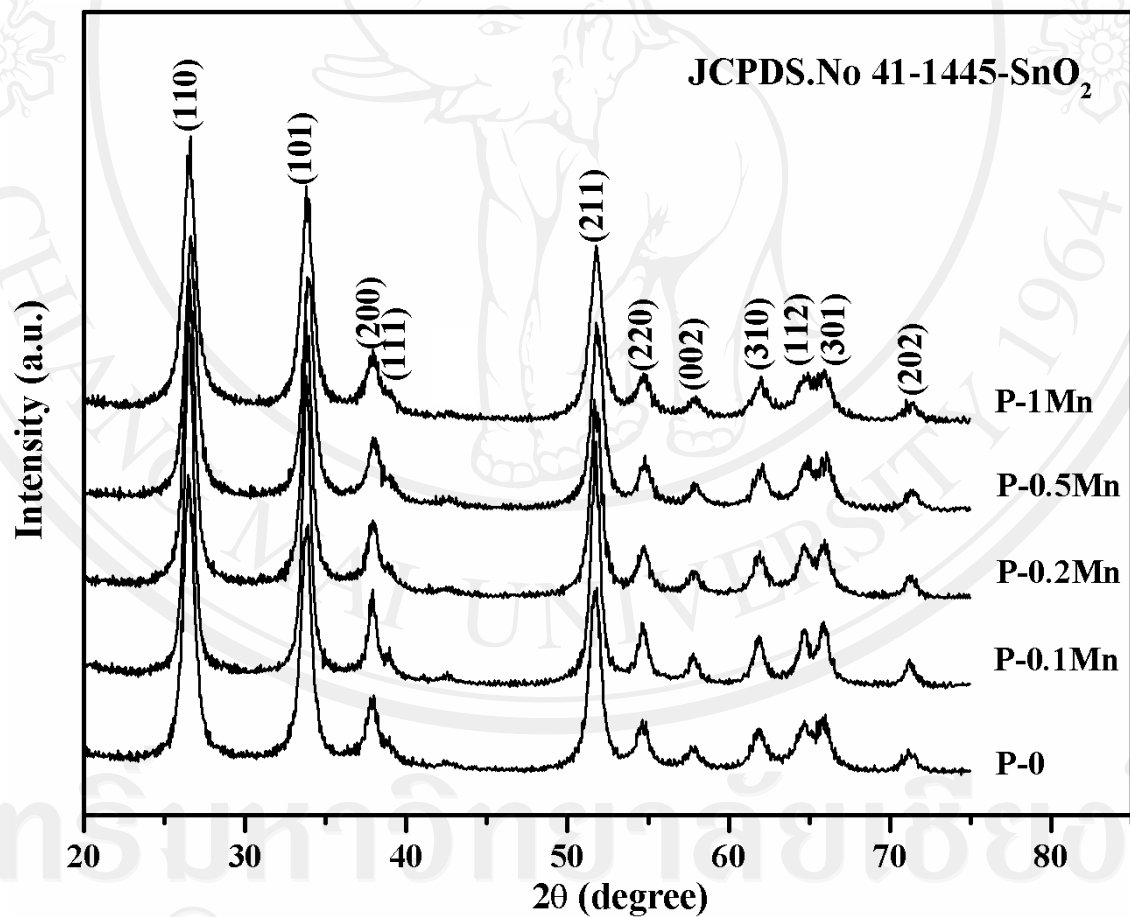
รูป 4.4 ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการฟอสฟอเรสcence ของสารละลายตั้งต้น Tin (II) ethylhexanoate ผสมกับสารเจือชนิด Molybdenum ในตัวทำละลายไซลีนเพื่อสังเคราะห์ (a)  $\text{SnO}_2$  และ  $\text{Mo/SnO}_2$  ความเข้มข้น (b) 0.1, (c) 0.2, (d) 0.5, (e) 1, (f) 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโน

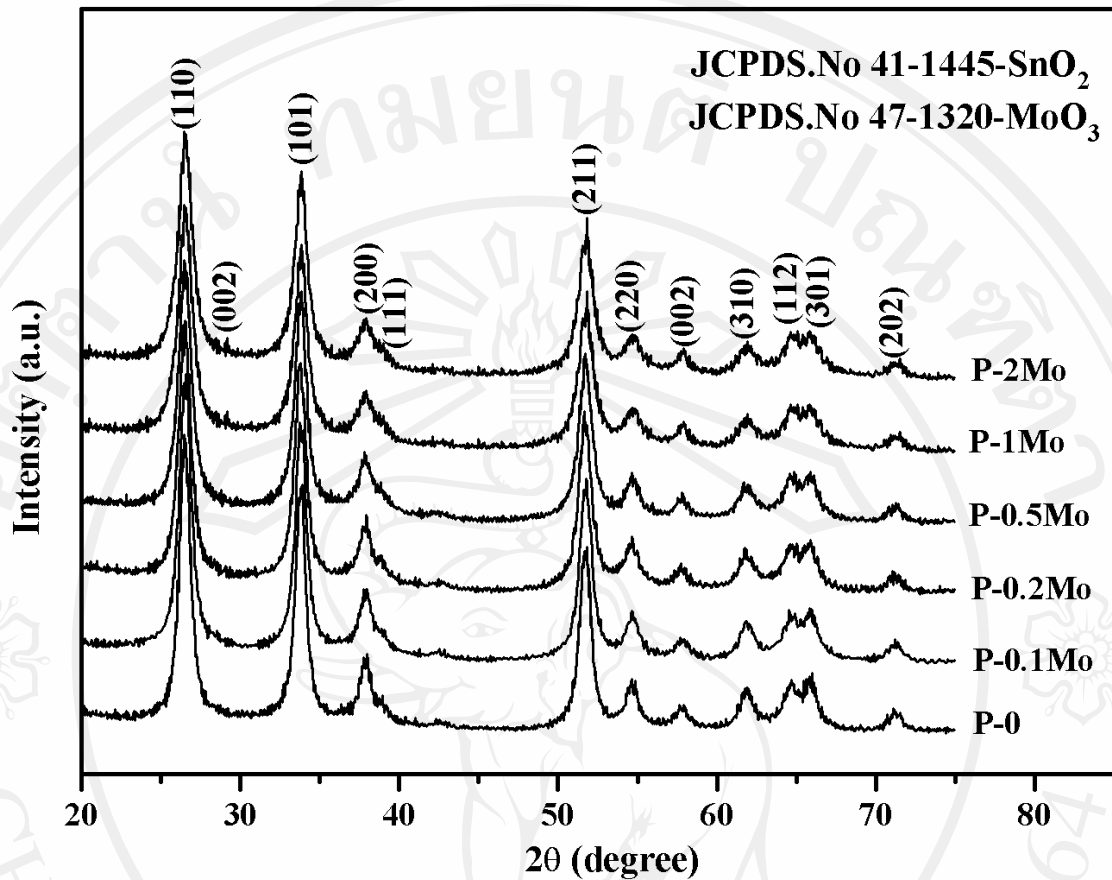
ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้น จะเป็นการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่เตรียมได้โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส โดยใช้ความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมป์ และ อัตราเร็วในการทำสแกนคือ 3 องศาต่อนาที สำหรับการวิเคราะห์ผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ แสดงการวิเคราะห์ดังรูป 4.5-4.6 พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีลักษณะพีกที่เด่นชัด มีความเป็นผลึกสูง และเมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานจากข้อมูล JCPDS พบว่าจะสอดคล้องกับหมายเลข 41-1445 โดยผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสนั้น มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล ซึ่งการวิเคราะห์ในส่วนนี้สามารถยืนยันเฟส และ โครงสร้างที่แท้จริงของสารที่ถูกสังเคราะห์ จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังสามารถทำนายขนาดของอนุภาคได้ เนื่องจากพีกที่มีความกว้างมาก ขนาดของอนุภาคก็จะมีขนาดเล็กมากตาม ซึ่งเมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากขึ้นพีกจะมีความแหลมมากขึ้นมากขึ้น ซึ่งอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามการที่พีกสูงขึ้นอย่างชัดเจน ย่อมแสดงว่าอนุภาคมีความเป็นผลึกสูงขึ้นไปกว่าลักษณะที่เป็นอสัณฐาน

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่วิเคราะห์จากผงละเอียดตัวอย่างทินไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยโลหะในกลุ่มแทรนซิชันทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ แมงกานีส และ โมลิบดีนัม แสดงดังรูป 4.5, 4.6 ตามลำดับนั้น สำหรับการวิเคราะห์พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะพีกที่เด่นชัด มีความเป็นผลึกสูง และเมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานจากข้อมูล JCPDS พบว่าจะสอดคล้องกับหมายเลข 41-1445 โดยผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ และ เจือด้วยโลหะที่อยู่ในกลุ่มแทรนซิชันที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสนั้น พบว่าจะปรากฏเฟสหลักซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยในทุกสารตัวอย่าง และ เฟสที่ไม่ได้มีการคิดเผื่อแต่อย่างใดเมื่อเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า ปรากฏเฟสของทินไดออกไซด์ชนิดคาสติเทอร์ไรต์ ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล มากไปกว่านั้นพบว่า ไม่ปรากฏพีกของสารเจือโลหะแมงกานีสแต่อย่างใด สาเหตุเนื่องจาก ปริมาณของการเจือมีค่าต่ำเกินไปที่รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะตรวจพบ อีกทั้ง ขนาดของอนุภาคนาโนของโลหะในกลุ่มแทรนซิชันน่าจะมีความที่เล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของตัวรองรับชนิดทินไดออกไซด์ ซึ่งขนาดที่เล็กมากกว่า 10 นาโนเมตร จะมีผลอย่างในการแสดงพีกของการเลี้ยวเบน เนื่องจากขนาดของอนุภาคนาโนที่เล็กเกินไป พีกจะมีความกว้างอย่างมากจนเป็นเส้นราบ และไม่สามารถแสดงผลให้เห็นอย่างชัดเจน แต่ในส่วนของตัวเจือโมลิบดีนัมนั้นสามารถพบได้ โดยเราได้ทำการเทียบพีกมาตรฐานได้ตรงกับสาร โมลิบดีนัมออกไซด์ที่ตรงกับ JCPDS หมายเลข 47-

1320 ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าตัวเจือ โมลิบดีนัม นั้นมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารจาก โมลิบดีนัม เป็น โมลิบดีนัมออกไซด์ตั้งแต่กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มสเปรย์ไพโรไลซิสแล้ว ซึ่งการวิเคราะห์ในส่วนนี้สามารถยืนยันเฟส และ โครงสร้างที่แท้จริงของสารที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังสามารถทำนายขนาดของอนุภาคนาโนได้ด้วย เนื่องจากพีกที่มีความกว้างมาก ขนาดของอนุภาคก็จะเล็กตาม ซึ่งเมื่อมีการเจือโลหะในกลุ่มทรานซิชันลงไป ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นนั้นพบว่า ไม่มีผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนแต่อย่างใด อาจจะมีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อย แต่อยู่ในระดับไม่เกิน 5 นาโนเมตรซึ่งถือว่าน้อยมาก และไม่มีผลต่อขนาดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เลย อย่างไรก็ตามการที่พีกสูงขึ้นอย่างชัดเจนนั้น ย่อมแสดงว่า อนุภาคมีความเป็นผลึก สูงขึ้น ไม่ใช่ลักษณะที่เป็นอสัณฐาน



รูป 4.5 การวิเคราะห์เฟสของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



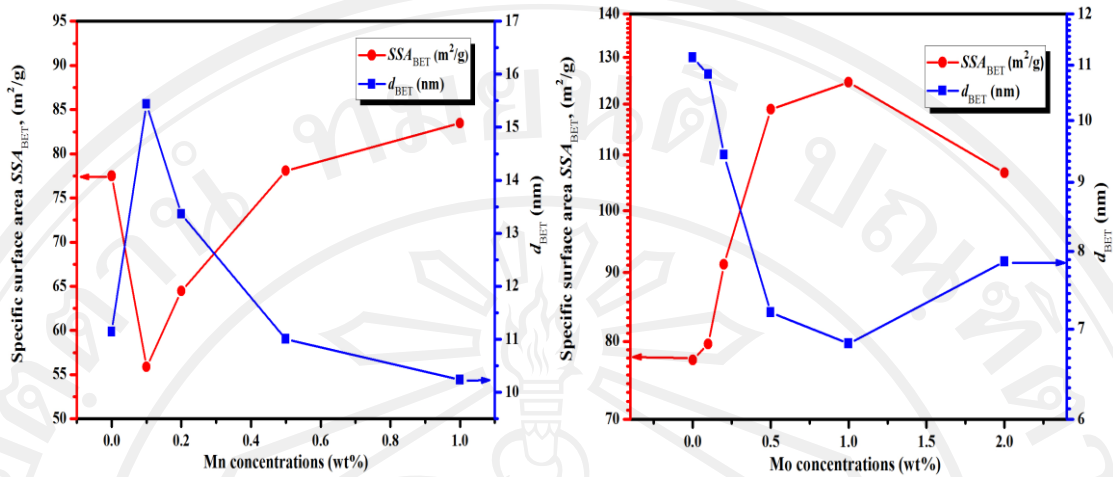
รูป 4.6 การวิเคราะห์เฟสของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ เจือด้วยโมลิบดีนัมใน ปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและการคำนวณขนาดอนุภาคนาโนโดยวิธีการดูดซับและคายแก๊สไนโตรเจนโดยวิธีการ บีอีที

ในการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ สามารถวิเคราะห์ได้โดยการดูดซับ โมเลกุลของแก๊ส ไนโตรเจนบนพื้นผิวอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ เจือด้วยโลหะในกลุ่มแทรนซิชันทั้ง 2 ชนิด ในปริมาณที่แตกต่างกันระหว่าง 0.1-1 ร้อยละโดยน้ำหนัก แมงกานีส และ 0.1-2 ร้อยละโดย น้ำหนัก โมลิบดีนัม ในการวิเคราะห์จะทำการไล่แก๊สบนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็น เวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะดูดซับที่โมเลกุลชั้นเดียว จำนวน 5 จุดการ วิเคราะห์ ภายหลังจากทดลองพบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์มีค่า พื้นที่ผิวจำเพาะคือ มีค่าเท่ากับ 77.5 ตารางมิลลิเมตรต่อกรัม พิจารณาดังรูป 4.7 ทำให้สามารถคำนวณ ขนาดจากทฤษฎีของบีอีทีได้เท่ากับ 11.4 นาโนเมตร พิจารณาดังรูป 4.7 และ 4.8 โดยใช้สมการที่ 4.1

ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กและมีขนาดที่สม่ำเสมอเท่ากัน การกระจายตัวดีมาก แต่เมื่อมีการเจือโลหะแตรนซิซันทั้งสองชนิดลงไปปริมาณที่ต่างกัน พบว่า ปริมาณโลหะแตรนซิซันแมงกานีสที่ปริมาณการเจือต่ำที่สุดคือ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก และในขณะที่เดียวกันก็พบว่าปริมาณ โลหะแตรนซิซัน โมลิบดีนัมที่มีปริมาณการเจือที่ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่าพื้นที่ผิวจำเพาะได้สูงมาก และมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณอื่นๆ ซึ่งจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นแนวเชิงเส้นเมื่อมีการเจือปริมาณของโลหะแตรนซิซันที่สูงมากขึ้น พิจารณาตาราง 4.1 ประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนอนุภาคของสารมีปริมาณการเจือที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเจือในปริมาณที่สูงส่งผลให้เกิดการเกาะตัวกันมากขึ้น โดยการเกาะกลุ่มกันเป็นการเกาะกลุ่มกันเป็นแบบอ่อน ทำให้ การวัดอัตราการดูดซับและการคายแก๊สในโตรเจนมีค่าน้อยลงเพราะผิวปกคลุมในลักษณะที่มีการเกาะตัวกันมากขึ้น จึงทำให้ขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น นั่นหมายถึงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจึงมีค่าลดลงตามปริมาณการเจือ มากไปกว่านี้ อนุภาคของสารเจือทั้งสองชนิดไม่สามารถเข้าไปก่อตัวใน โครงผลึกของทินไดออกไซด์ได้ในลักษณะของการแทนที่ของสารละลายของแข็งแทนที่ เพียงแต่เกาะบริเวณพื้นผิวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เท่านั้น จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือขนาดของอนุภาคแต่อย่างไรการคำนวณขนาดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ มีการเจือด้วยโลหะแตรนซิซันนั้นสามารถคำนวณจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยใช้สมการที่ 4.1 เช่นกันแสดงถึง ความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของทินไดออกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของ โมลิบดีนัม และ แมงกานีส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.28 และ 7.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาคสามารถวิเคราะห์และเห็นได้อย่างชัดเจนจากการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและส่องผ่านในหัวข้อต่อไป

$$d_{BET} = \frac{6000}{\{(\rho_{SnO_2} \times SSA_{BET} \times wt\%SnO_2) + (\rho_{Mn} \times SSA_{BET} \times wt\%Mn)\}} \quad (4.1)$$



รูป 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของอนุภาคนาโนของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ในทางด้านซ้ายมือและ ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ทางด้านขวามือโดยวิธีบีอีที

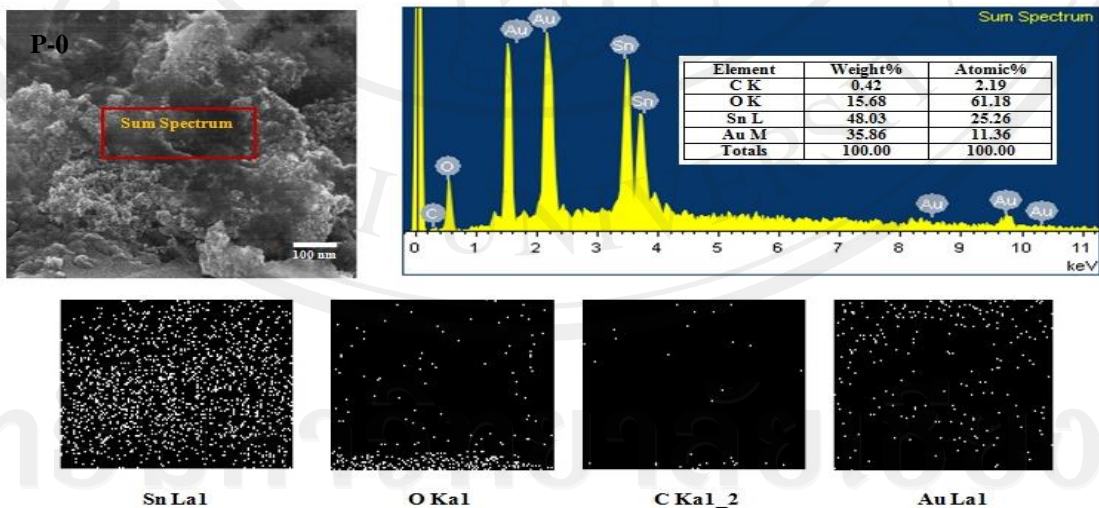
ตาราง 4.1 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และ ขนาดจากการคำนวณของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยโลหะแทรนซิชันทั้งสองชนิด

wt%	Mo/SnO <sub>2</sub>		Mn/SnO <sub>2</sub>	
	SSA <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	d <sub>BET</sub> (nm)	SSA <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	d <sub>BET</sub> (nm)
0	77.5	11.14	77.5	11.14
0.1	79.65	10.83	55.87	15.45
0.2	91.27	9.45	64.47	13.39
0.5	118.97	7.24	78.05	11.06
1	124.55	6.90	83.46	10.34
2	106.72	8.01	-	-

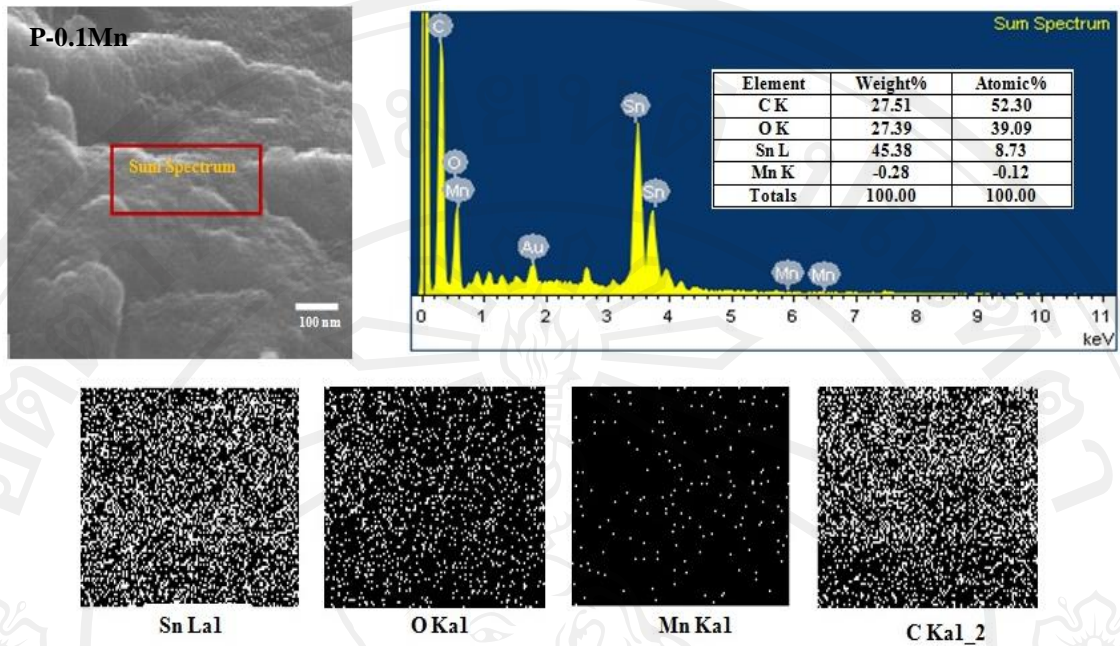


#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์

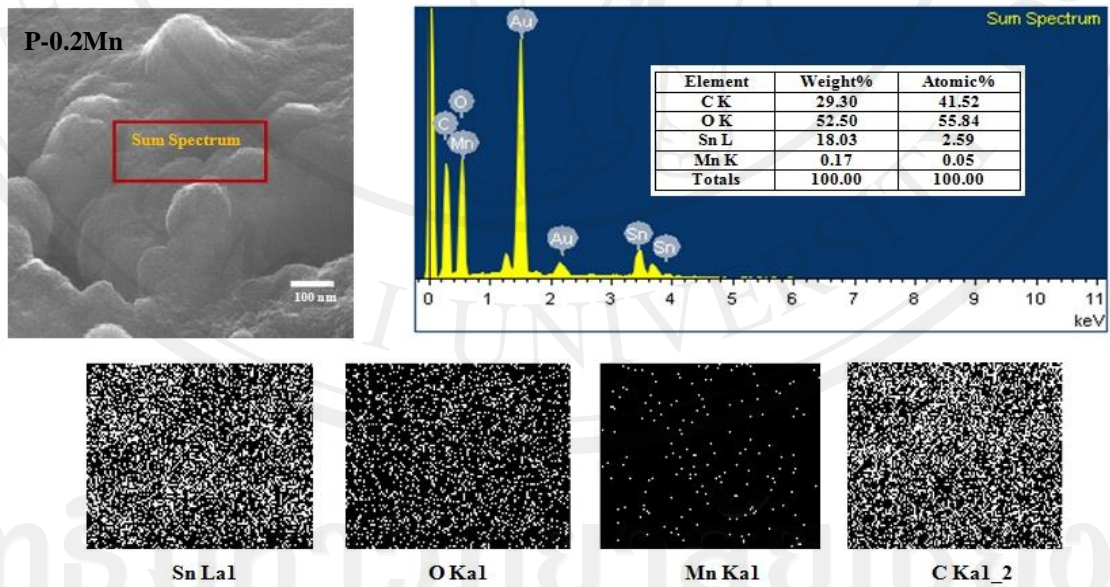
ในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาอย่างหยาบของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และ เจือด้วยโลหะในหมู่ทรานซิชันทั้งสองชนิดได้แก่ แมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก และ โมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส โดยการวิเคราะห์นี้ได้ถ่ายที่กำลังขยาย 50,000 เท่า โคนเท่าที่สังเกตจะเห็นว่าจะไม่สามารถวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของสารเจือได้ของโลหะในกลุ่มทรานซิชันทั้งสองชนิด โดยอย่างไรก็ตามในการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนๆหนึ่งนั้น อาจจะประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก ๆ หลายอนุภาคมารวมกัน ซึ่งจะแสดงใน EDS แบบ จุดแต่การวิเคราะห์จาก SEM นั้นอาจไม่ทราบถึงขนาดของอนุภาคที่แท้จริงของอนุภาค อีกทั้งไม่สามารถสังเกตเห็นสัณฐานวิทยา และ ขนาดของอนุภาคสารเจือโลหะในกลุ่มทรานซิชันทั้ง แมงกานีส และ โมลิบดีนัมได้เนื่องจากมีขนาดเล็กมากกว่า 5 นาโนเมตร อ้างอิงจากรูปส่องได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ที่จะแสดงผลในหัวข้อถัดไป และอีกปัจจัยคือกำลังขยายที่ใช้นั้นมีค่าต่ำมาก องค์ประกอบของการแยกตัวมีค่าไม่สูงมากพอ จึงไม่สังเกตเห็นสัณฐานวิทยาที่แท้จริงของอนุภาคดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคที่แท้จริงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านมายืนยันเพื่อแสดงให้เห็นว่าอนุภาคแต่ละอนุภาคนั้นมีขนาดที่แท้จริงและลักษณะรูปร่างเป็นอย่างไร ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป



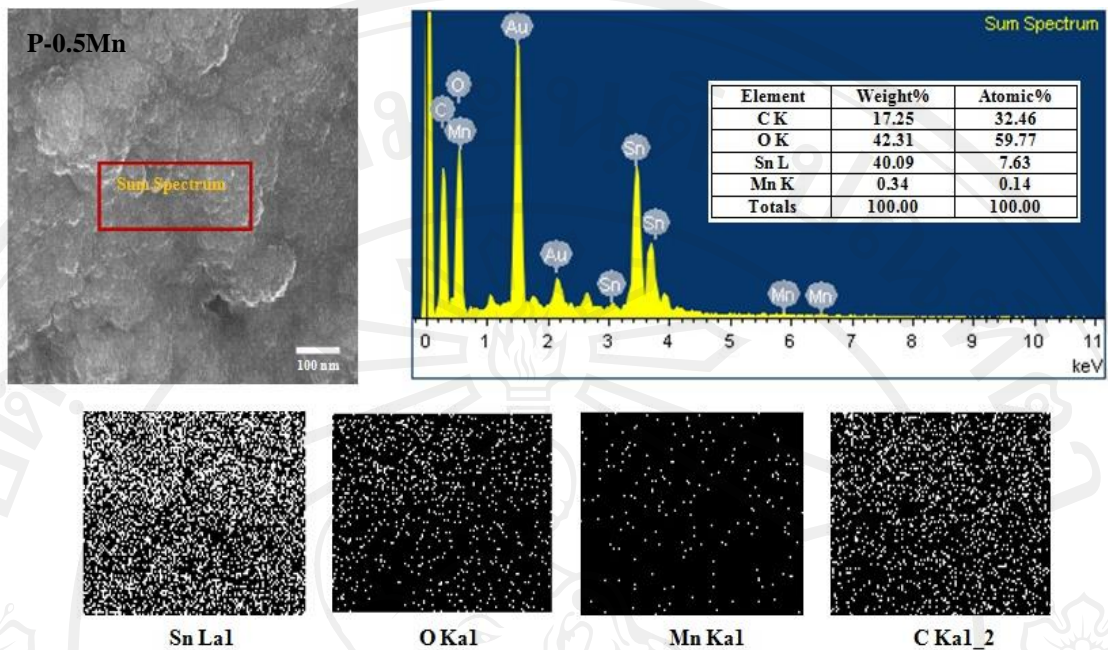
รูป 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



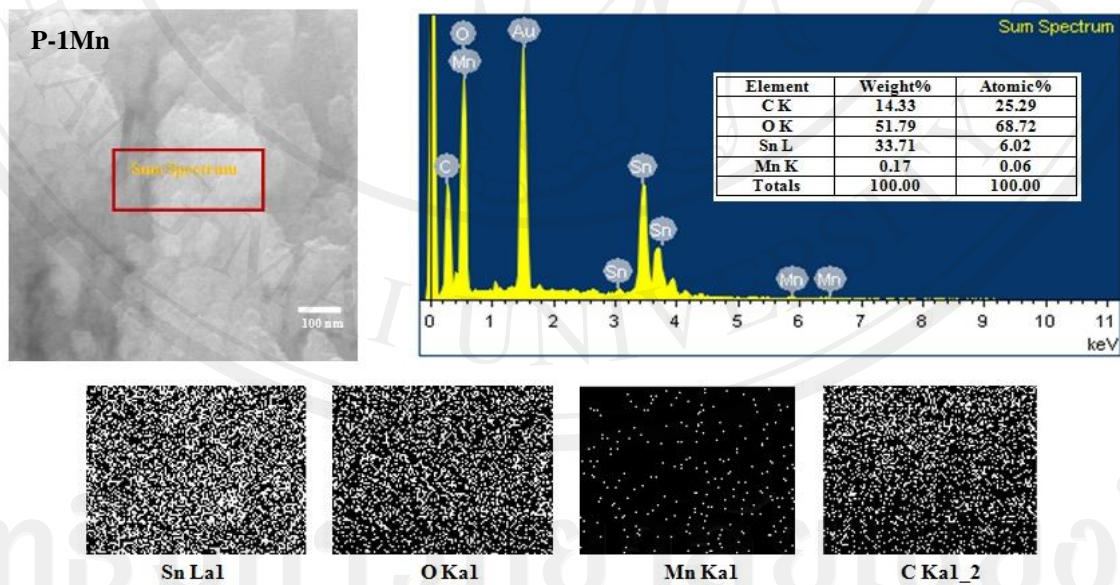
รูป 4.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



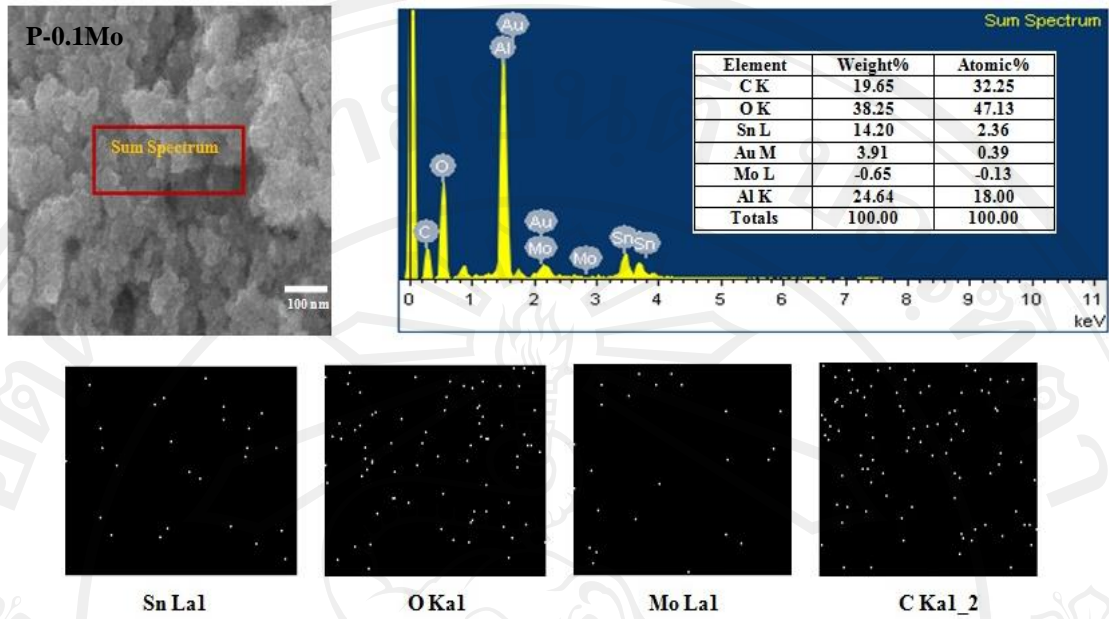
รูป 4.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



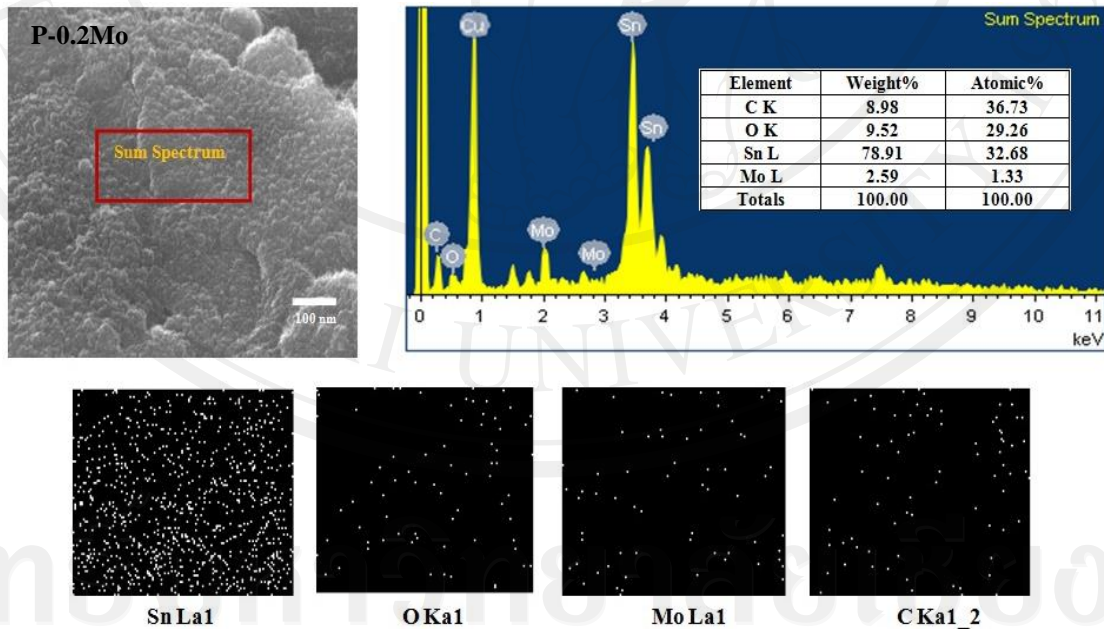
รูป 4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



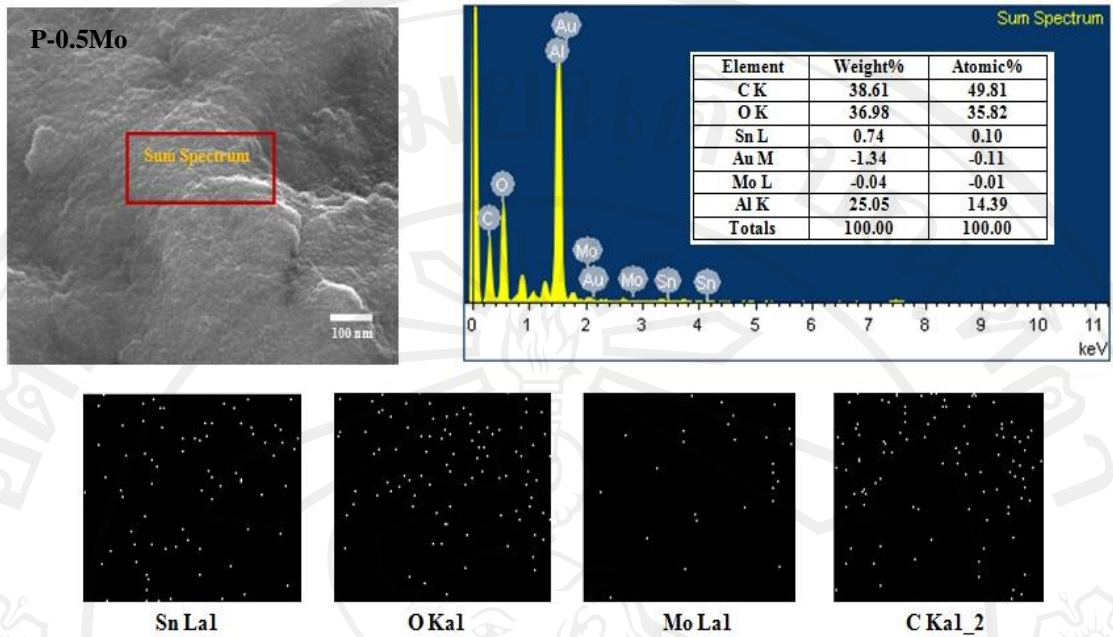
รูป 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



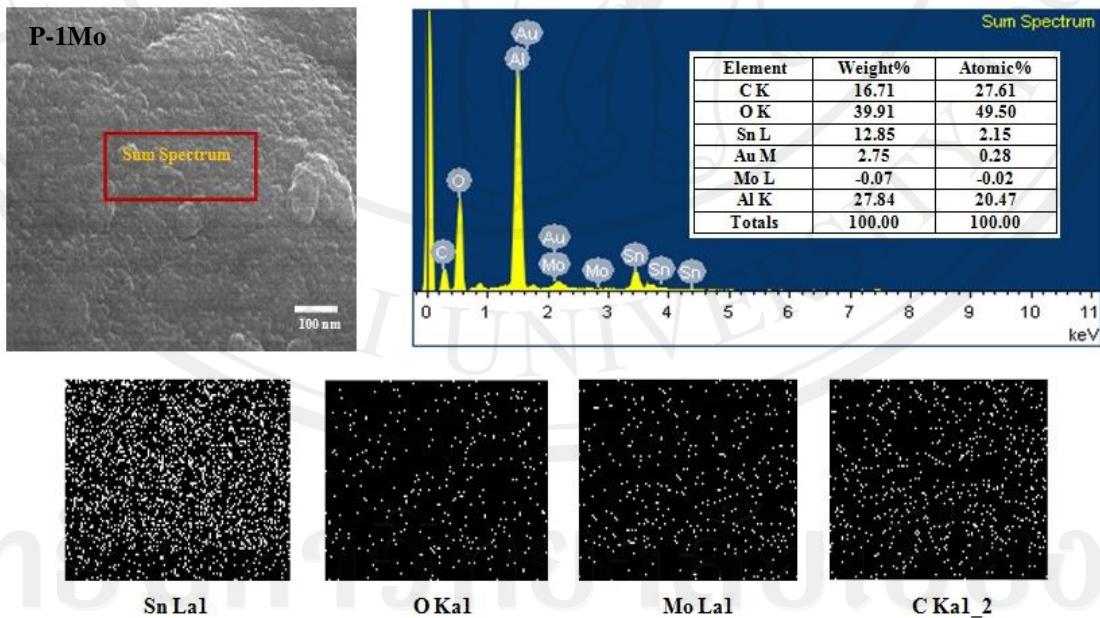
รูป 4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



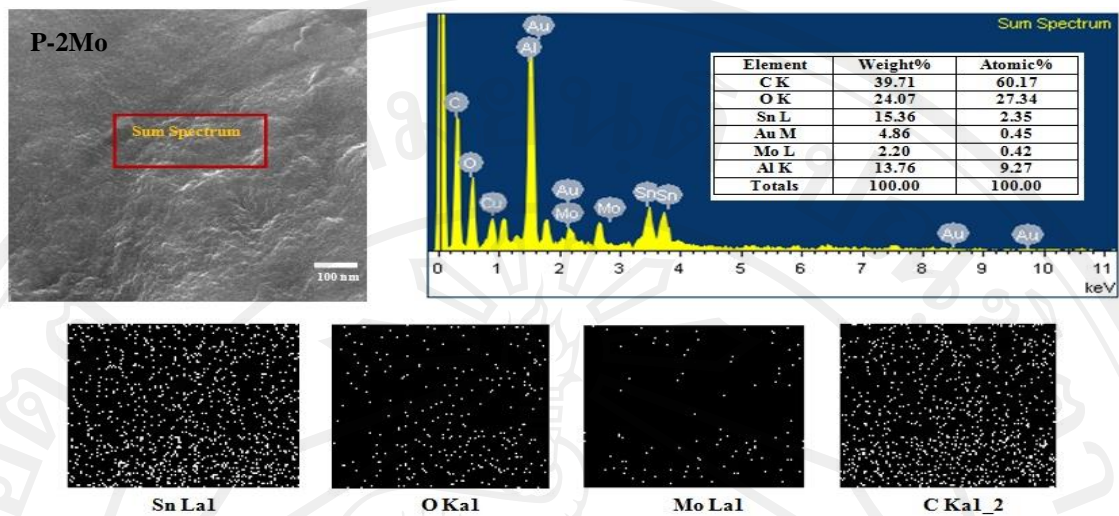
รูป 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



รูป 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



รูป 4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส



รูป 4.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์การกระจายตัวของพลังงานรังสีเอกซ์ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส

#### 4.1.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

##### 4.1.5.1 การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์แบบสเปกตรัม

ในการวิเคราะห์ส่วนนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบของธาตุของสารตัวอย่างอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์และเจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชัน 2 ชนิด ได้แก่ แมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละโดยน้ำหนัก และ โมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยจะทำการวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS ในการวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์นั้นจะพบว่าประกอบด้วยธาตุหลักๆ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นโดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังรูป 4.8-4.17 แสดงถึงการวิเคราะห์โดยเทคนิค EDS ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ (รูป 4.8), เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละโดยน้ำหนัก (รูป 4.9-4.11) และเจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละโดยน้ำหนัก (รูป 4.12-4.17) โดยจะมีตารางแสดงถึงปริมาณของธาตุแต่ละชนิดในแต่ละรูปด้วย ชนิดเส้นสเปกตรัม ที่ทำการหยดลงบนเทปทองแดง และ ทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนทำการวิเคราะห์ในบริเวณ สเปกตรัม จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อยิงลำอิเล็กตรอนไปยังบริเวณสเปกตรัม ดังกล่าว อิเล็กตรอนพลังงานสูงจะเคลื่อนที่เข้าวงโคจรชั้นพลังงานต่างๆ (K, L, M, ....) โดยเกิดการถ่ายโอนพลังงานแก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจร ซึ่งจะมีความเฉพาะในแต่ละธาตุนั้นๆ และปรากฏธาตุต่างๆ ให้เห็นได้ในการ

วิเคราะห์ ซึ่งในธาตุชนิด O และ Cu จะแสดงสเปกตรัมที่ชั้น K เนื่องจากระดับชั้นพลังงานที่มีความเข้มของรังสีเอกซ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับระดับชั้นพลังงานอื่นๆ และไม่เกิดการซ้อนทับของฟีกอื่นและธาตุชนิด Sn และ Au นั้นจะแสดงสเปกตรัมที่ชั้น L และ M ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับชั้นพลังงานที่มีความเข้มของรังสีเอกซ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับระดับชั้นพลังงานอื่นๆ และไม่เกิดการซ้อนทับกันของฟีกอื่นเช่นกัน และเห็นได้ว่าฟีกของ Cu, Sn และ Au จะปรากฏหลายฟีกเนื่องจากการลดระดับชั้นพลังงานจากชั้น L, M มาสู่ชั้น K ซึ่งจะเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับชั้นพลังงานวง โคจรต่างๆ คือ  $K_{\alpha}$  และ  $K_{\beta}$  ตามลำดับ สำหรับ ธาตุ Cu ส่วน Sn ก็จะมีปรากฏหลายฟีกเช่นกัน เนื่องจากจะมีการลดระดับชั้นพลังงานจากชั้น M และ N มาสู่ชั้น L ซึ่งจะเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับชั้นพลังงานวง โคจรต่างๆ คือ  $L_{\alpha}$  และ  $L_{\beta}$  ตามลำดับ และ Au ก็จะมีปรากฏหลายฟีกเช่นเดียวกัน เนื่องจากจะมีการลดระดับชั้นพลังงานจากชั้น N และ O มาสู่ชั้น M ซึ่งจะเกิดเฉพาะรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับชั้นพลังงานวง โคจรต่างๆ คือ  $M_{\alpha}$  และ  $M_{\beta}$  ตามลำดับ จากรูป 4.8 แสดงถึงการกระจายตัวของสเปกตรัมที่เกี่ยวข้องกับธาตุทั้งหมดที่ประกอบในสารตัวอย่าง ในการวิเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์พบว่า มีความบริสุทธิ์มาก พบธาตุทุกชนิดที่ประกอบอยู่ในสารตัวอย่าง ไม่พบธาตุอื่นเจือปนเลย แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าจะมีสเปกตรัมของ Au และ Cu สูงมาก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเคลือบทองและการใช้เทปทองแดงระหว่างการเตรียมสารตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์นั่นเอง ซึ่งเมื่อมีการเจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชันทั้งสองชนิดมากขึ้นแสดงดังรูป 4.9-4.16 เมื่อมีการเจือในปริมาณ 0.1 และ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ในแมงกานีส และเมื่อมีการเจือ 0.1 และ 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ในโมลิบดีนัม พบว่าจะปรากฏสเปกตรัมของสารเจือเพิ่มขึ้นมา นั้นแสดงให้เห็นว่ามีการเจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชันทั้งสองชนิดจริง ในการเจือบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์

#### 4.1.5.2 การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์แบบกลุ่มจุด

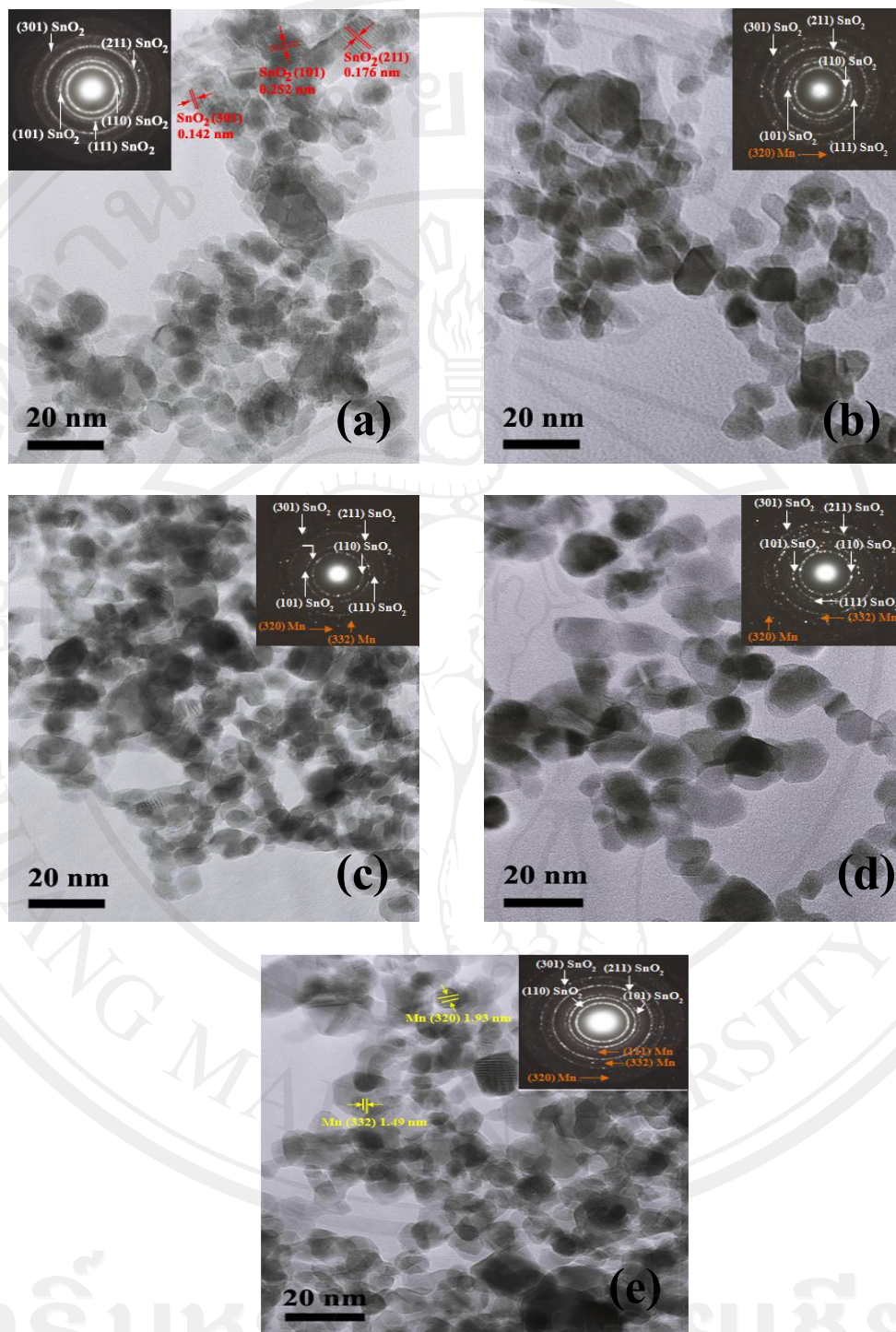
ในการวิเคราะห์ส่วนนี้ จะเป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวพลังงานของอนุภาคตัวเจือที่มีขนาดเล็กเนื่องจากการสังเกตจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดไม่สามารถยืนยันการกระจายตัวได้การวิเคราะห์ในส่วนนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการยืนยันการเกาะตัวของอนุภาคโลหะมีตระกูลบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ อีกทั้งยังสามารถยืนยันปริมาณการกระจายตัวที่ขึ้นกับปริมาตรการเจือสารในระดับที่ต่างกันไป ในการวิเคราะห์รูปแบบกลุ่มจุดของอิเล็กตรอนที่กระจายตัวออกมาตามค่าพลังงานที่ต่างกัน เกิดจากการลดระดับชั้นพลังงานของอะตอม ซึ่งสามารถยืนยันลักษณะเฉพาะของธาตุนั้นๆ ได้ เนื่องจากพลังงานที่กระจายตัวออกมามีค่าไม่เท่ากัน ในการ

วิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์โดยค่าคงตัวของเวลาที่เท่ากันคือ 180 วินาที ซึ่งสามารถยืนยันปริมาณของธาตุทุกชนิดที่สังเคราะห์ขึ้นมาในแต่ละเงื่อนไขได้ โดยจะแสดงรูปแบบการวิเคราะห์ที่แตกต่างจากชนิดสเปกตรัมดั้งหัวข้อที่ได้กล่าวมา เนื่องจาก รูปแบบนี้สามารถพิจารณาพื้นที่ผิววิเคราะห์ได้ และสามารถยืนยันการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคตัวเจือรวมถึง สามารถพิจารณาการกระจายตัวที่แตกต่างกันไปเมื่อมีการเจือที่สูงมากขึ้น แสดงดังรูป 4.9-4.17 โดยรูปด้านล่างแสดงถึงปริมาณแบบจุดของแต่ละธาตุซึ่งเป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบที่มีการเจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชันทั้งสองชนิดบนอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ ได้แก่ แมงกานีส แสดงดังรูป 4.9-4.11 และ โมลิบดีนัม แสดงดังรูป 4.12-4.17 พบว่าที่ปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของแมงกานีสและ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของโมลิบดีนัม มีการกระจายตัวแบบจุดแตกต่างกันออกไป เมื่อค่าคงตัวของเวลาเท่ากัน ปริมาณการเจือของสารในปริมาณที่สูงมากขึ้น ส่งผลถึงการกระจายตัวแบบกลุ่มจุดมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณการเจือของสารเจือที่สูงมากขึ้นจึงทำให้เกิดการลดระดับพลังงาน และ มีการคายพลังงานออกมาในปริมาณที่สูงมากขึ้น จึงส่งผลให้มีปริมาณกลุ่มจุดที่สูงมากขึ้น มากไปกว่านั้น พบว่า เมื่อมีการเจือที่ปริมาณสูงขึ้น ลักษณะของพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์มีการเกาะตัวกันสูงขึ้นของกลุ่มจุด จึงเป็นการยืนยันได้ว่า เมื่อมีการเจือที่สูงขึ้นน่าจะมีโอกาสที่อนุภาคตัวเจือ เกิดการเกาะตัวกันที่สูงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานในการเกาะตัวกันเมื่อมีการเจือในปริมาณที่สูงมากขึ้น สอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่วิเคราะห์ได้โดยวิธีการของบีอีที พบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าลดต่ำลง เมื่อมีปริมาณการเจือที่สูงขึ้น จากการวิเคราะห์การกระจายตัวแบบกลุ่มจุด พบว่า สามารถพบกลุ่มจุดขององค์ประกอบธาตุทุกชนิดที่เกิดจากการสังเคราะห์ได้ มากไปกว่านั้น ยังพบองค์ประกอบของทุกธาตุที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้ จากการพิจารณาจะพบว่าปริมาณของคาร์บอน มากเป็นพิเศษ เนื่องจากก่อนการวิเคราะห์ได้ทำการฉาบด้วยคาร์บอน ก่อนนำไปวิเคราะห์เพื่อให้เกิดสภาวะการนำไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถพบปริมาณของดีบุก หรือ ทิน, ออกซิเจน และสารเจือทั้งในกรณีที่เจือด้วย แมงกานีส และ โมลิบดีนัม ได้ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันองค์ประกอบของธาตุและลักษณะการกระจายตัวจากการเจือได้อย่างชัดเจนอีกประเภทหนึ่ง

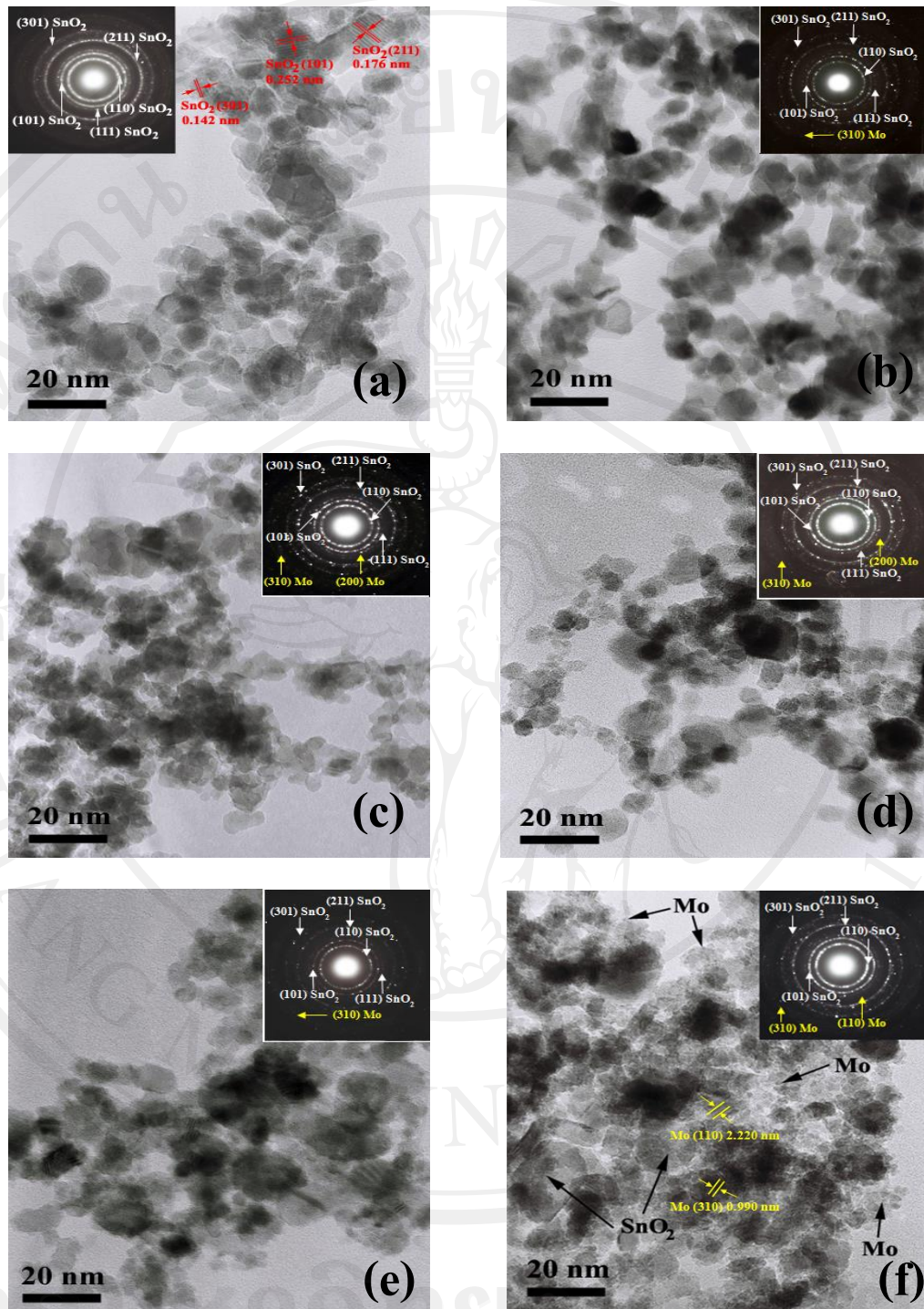


#### 4.1.6 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ในการวิเคราะห์หลักขณะสัณฐานวิทยา และขนาดอนุภาคที่แท้จริงของสารตัวอย่างนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยโลหะแทรนซิชันสองชนิดที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส จะทำการวิเคราะห์โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โดยใช้กำลังขยายที่สูงกว่า SEM แสดงดังรูป 4.18-4.19 และ รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนซึ่งแทรกอยู่ในแต่ละภาพ รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่วิเคราะห์ได้แสดงถึงอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากการเรียงตัวแบบของจุดเด่นชัดซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนอย่างเป็นระเบียบ จากการวิเคราะห์หลักขณะสัณฐานวิทยา และขนาดที่แท้จริงของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์พบว่า อนุภาคที่ได้บางตำแหน่งมีลักษณะเป็นทรงกลม, เป็นแบบแท่ง, เป็นลักษณะที่เป็น 4 เหลี่ยม และ 6 เหลี่ยม อย่างเห็นได้ชัดในแต่ละรูป การที่สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์มีหลากหลายรูปแบบนั้น อาจเป็นผลมาจากการใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส เนื่องจากผลงานวิจัยที่มีมานั้น การใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์ เช่น 5/5 จะสามารถควบคุมสัณฐานวิทยาให้มีรูปร่างที่เป็นแท่ง ส่วนในด้านของขนาดอนุภาคนั้นจะวัดขนาดได้แม่นยำเนื่องจากอนุภาคมีการกระจายตัวดี ไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนมากนัก ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของการใช้วิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสในการสังเคราะห์ ขนาดของอนุภาคนาโนมีความสม่ำเสมอ และมีความที่ค่อนข้างเล็กมากอยู่ในช่วง 5-10 นาโนเมตร ในการวิเคราะห์ถึงลักษณะของการเจือสารลงไปในตัวรองรับนั้น ในงานวิจัยนี้เราพบว่า จากการวิเคราะห์ ผลของการเจือด้วยโลหะในกลุ่มแทรนซิชันทั้งสองชนิด ได้แก่ แมงกานีสในรูป 4.18 และ โมลิบดีนัมในรูป 4.19 ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์แต่อย่างใด เนื่องจากภาพถ่าย TEM นั้น แสดงถึงขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ภายหลังจากการเจือด้วยโลหะในกลุ่มแทรนซิชันทั้งสองชนิด ดังนั้นจึงเชื่อว่าอนุภาคนาโนขนาดเล็กของโลหะในกลุ่มแทรนซิชันทั้งสองชนิดไม่สามารถเข้าไปแทนที่ในโครงผลึกของทินไดออกไซด์ได้ เพียงแต่เกาะตัวกัน หรือกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของทินไดออกไซด์เท่านั้น โดยเราสามารถยืนยันผลได้จากภาพ TEM ที่กำลังขยาย 300,000 เท่าที่ความเข้มขั้นสูงสุดคือ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนักของปริมาณการเจือโมลิบดีนัม ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ว่า เมื่อมีการเจือสารในปริมาณที่สูงขึ้นการกระจายตัวของอนุภาคสารเจือจะมีปริมาณมากขึ้น โดยในรูปภาพจะชี้ลูกศรไปยังอนุภาคนาโนขนาดเล็กของสารเจือ โมลิบดีนัมที่เกาะติดอยู่บริเวณผลึกของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์อยู่ ดังนั้นการวิเคราะห์หลักขณะสัณฐานวิทยาได้ดีที่สุด



รูป 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ (a) และเจือด้วยโลหะแมงกานีส 0.1-1 ไร่้อยละโดยน้ำหนัก (b-e) ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนซึ่งแทรกอยู่ สันฐานวิทยาของอนุภาคมีหลายลักษณะ และการกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างดี อนุภาคมีขนาดประมาณ 5-10 นาโนเมตร



รูป 4.19 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ (a) และเจือด้วยโลหะ โมลิบดีนัม 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก (b-f) ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสปรายไฟโรลิซิส และรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนซึ่งแทรกอยู่ สันฐานวิทยาของอนุภาคมีหลายลักษณะ และการกระจายตัวของอนุภาคค่อนข้างดี อนุภาคมีขนาดประมาณ 5-10 นาโนเมตร

จากรูป 4.18-4.19 ทางด้านขวาบนของรูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ และอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละโดยน้ำหนัก และอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 300,000 เท่า พบว่าอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (211), (301) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (211), (301), (320) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (211), (301), (320), (322) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (211), (301), (320), (322) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (211), (301), (320), (322) ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (hkl) ที่ได้จาก JCPDS หมายเลข 41-0445 และหมายเลข 21-0547 ของทินไดออกไซด์และแมงกานีส [51,52] ตามลำดับ สำหรับการคำนวณระนาบ hkl จำนวนจากสูตรดังนี้

$$\lambda L = Rd \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\lambda L$  คือ camera constant เท่ากับ 24.9630 (mmÅ)

R คือ รัศมีของวงกลม (มิลลิเมตร)

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

สำหรับตัวอย่างการคำนวณหาระนาบผลึก (hkl) มีวิธีการดังนี้

1) ระนาบ (110) SnO<sub>2</sub> ลำดับวงแหวนที่ 1 ของสาร SnO<sub>2</sub>

$$\lambda L = Rd$$

$$\text{เมื่อ } \lambda L = 24.9630 \text{ (mmÅ)}$$

$$R = 7.75 \text{ (mm)}$$

$$\text{แทนค่าจากสูตรได้ } 24.9630 \text{ (mmÅ)} = 7.75 \text{ (mm)}d$$

$$\text{ได้ } d = 3.220 \text{ Å}$$

เมื่อนำไปเทียบ JCPDS หมายเลข 41-1445 และ 21-0547 ของทินไดออกไซด์และแมงกานีสพบว่าค่า d ที่ได้ใกล้เคียงกับ JCPDS หมายเลข 41-1445 ของ SnO<sub>2</sub> ระนาบ (110) มากที่สุด ดังนั้นวงแหวนลำดับที่ 1 ของสารทินไดออกไซด์คือระนาบ (110) SnO<sub>2</sub>

- 2) ระนาบ (320) Mn ลำดับวงแหวนที่ 6 ของสารทินไดออกไซด์ที่เจือแมงกานีส 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก

$$\lambda L = R d$$

$$\text{เมื่อ } \lambda L = 24.9630 \text{ (mm}\mathring{\text{A}}\text{)}$$

$$R = 12.93 \text{ (mm)}$$

$$\text{แทนค่าจากสูตรได้ } 24.9630(\text{mm}\mathring{\text{A}}) = 12.93 \text{ (mm)}d$$

$$\text{ได้ } d = 1.935 \text{ \AA}$$

เมื่อนำไปเทียบ JCPDS หมายเลข 41-1445 และ 21-0547 ของทินไดออกไซด์และแมงกานีส พบว่าค่า  $d$  ที่ได้ใกล้เคียงกับ JCPDS หมายเลข 21-0547 ของแมงกานีสระนาบ (320) มากที่สุด ดังนั้นวงแหวนลำดับที่ 6 ของสารทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก คือ ระนาบ (320) Mn

โดยในขณะเดียวกันรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผงอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 300k พบว่าอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (211), (301), (310) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (200), (211), (301), (310) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.5 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (200), (211), (301), (310) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (211), (301), (310) อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วยระนาบ (110), (101), (111), (211), (301), (310) ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (hkl) ที่ได้จาก JCPDS หมายเลข 41-0445 และหมายเลข 01-1208 ของทินไดออกไซด์และโมลิบดีนัม [51,53] ตามลำดับ สำหรับการคำนวณระนาบ hkl จะแสดงตัวอย่างของทินไดออกไซด์ที่ทำการเจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ในระนาบ (310) ซึ่งเป็นลำดับวงแหวนที่ 6 ของสารเจือชนิดนี้โดยคำนวณจากสูตรได้ดังนี้

- 3) ระนาบ (310) Mo ลำดับวงแหวนที่ 6 ของสารทินไดออกไซด์ที่เจือโมลิบดีนัม 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก

$$\lambda L = Rd$$

$$\text{เมื่อ } \lambda L = 24.9630 \text{ (mm}\mathring{\text{A}})$$

$$R = 25.21533 \text{ (mm)}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าจากสูตรได้} \quad & 24.9630 \text{ (mm}\mathring{\text{A}}) = 25.21533 \text{ (mm)}d \\ \text{ได้} \quad & d = 0.990 \text{ \AA} \end{aligned}$$

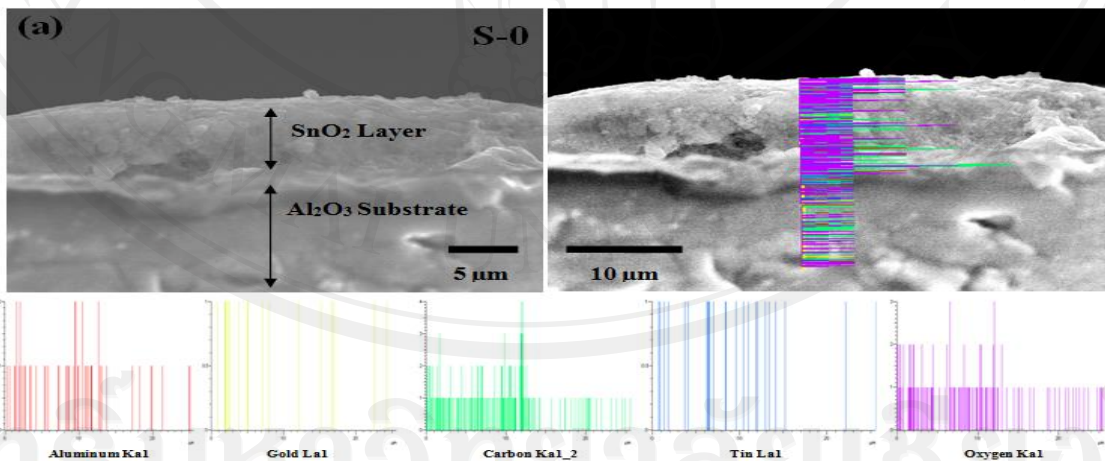
เมื่อนำไปเทียบ JCPDS หมายเลข 41-1445 และ 01-1208 ของทินไดออกไซด์และโมลิบดีนัมพบว่าค่า  $d$  ที่ได้ใกล้เคียงกับ JCPDS หมายเลข 01-1208 ของโมลิบดีนัมระนาบ (310) มากที่สุด ดังนั้นวงแหวนลำดับที่ 6 ของสารทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก คือระนาบ (310) Mo

และจากการรูปภาพ TEM ที่ความเข้มข้นสูงสุดของสารแต่ละตัวไม่ว่าจะเป็นแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมที่ความเข้มข้น 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก รวมไปถึงทินไดออกไซด์บริสุทธิ์เราได้ทำการวัดขนาดของผลึกที่ค่อนข้างสมบูรณ์ โดยแสดงดังรูปโดยใช้โปรแกรม Image J กำหนดขนาดสเกลจากสเกลบาร์ของผลึกที่สมบูรณ์ที่สุดในรูปภาพหลังจากนั้นทำการเซตสเกล แล้วลากเส้นจากตำแหน่งของผลึกทิศหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งเพื่อกำหนดระยะห่างระหว่างแลตทิซแล้วนำไปเทียบกับ JCPDS ไฟล์พบว่าทินไดออกไซด์บริสุทธิ์พบที่ระนาบ (101), (211), และ (301) ตามลำดับ และแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1 ร้อยละโดยน้ำหนักพบที่ระนาบ (320) และ (332) ตามลำดับ และโมลิบดีนัมที่ความเข้มข้น 2 ร้อยละโดยน้ำหนักพบที่ระนาบ (110) และ (310) ตามลำดับ โดยการหาผลึกที่สมบูรณ์จะต้องมีการกำหนดตำแหน่งจากภาพระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกที่ชัดเจนเท่านั้น ข้อมูลจึงจะสมบูรณ์

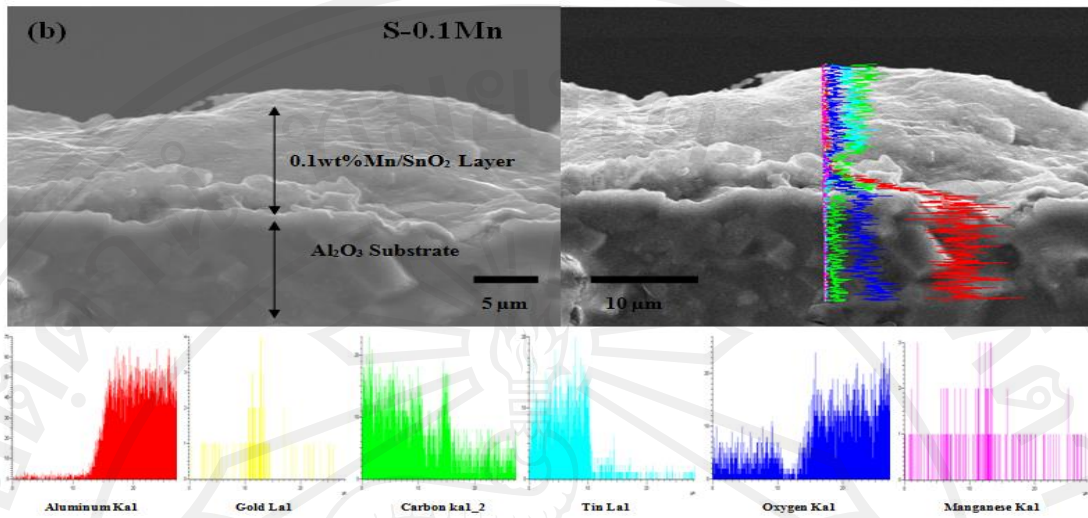
## 4.2 คุณสมบัติของเซนเซอร์ฟิล์มบางทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยโลหะในกลุ่มทรานซิชันแมงกานีส และ โมลิบดีนัม

### 4.2.1 สัณฐานวิทยาของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบเซนเซอร์

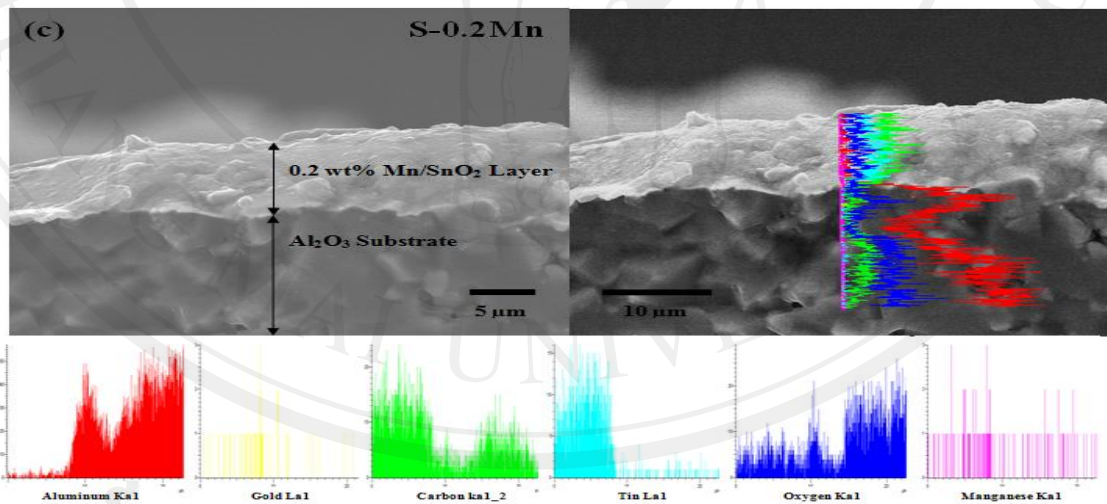
องค์ประกอบของเฟสที่ต่างกัน, สัณฐานวิทยาของฟิล์มตอบสนอง และ โครงสร้างภายหลังการทดสอบเซนเซอร์ต่อแก๊สประเภทต่างๆ สามารถวิเคราะห์ได้ดังรูป 4.20-4.29 ซึ่งแสดงถึงภาพถ่ายภาคตัดขวางของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบการตอบสนอง พบว่า สามารถวิเคราะห์โครงสร้างแน่นตัวระดับไมครอนของชั้นเสตรทชนิดอะลูมินาความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้ ภายหลังการทดสอบ สามารถวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มได้ประมาณ 7-10 ไมโครเมตร ซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ขนาดอนุภาคมีการเติบโตขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการทดสอบภายใต้อุณหภูมิที่สูงเป็นระยะเวลานาน มากไปกว่านั้น การวิเคราะห์พบว่า ยังมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น แสดงดังรูป 4.20-4.29 ของตัวอย่างเซนเซอร์ในสารแต่ละชนิด พบว่าองค์ประกอบของธาตุทุกตัวจะพบได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิคนี้ ไม่ว่าจะเป็นธาตุที่ประกอบกันเป็นชั้นเสตรทและธาตุของอนุภาคนาโนที่เตรียมได้จากเทคนิคเฟลมสเปรย์ไฟ โรลิสซึสนั่นเองและด้านขวามือของรูปแสดงถึงสเปกตรัมแบบเส้นที่บ่งบอกปริมาณของธาตุว่ามีสารที่เราต้องการวิเคราะห์อยู่จริง



รูป 4.20 ความหนาของฟิล์มประมาณ 8 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการหึงกระจายบนชั้นเสตรทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวของ ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สภาวะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด แสดงในรูป (a)

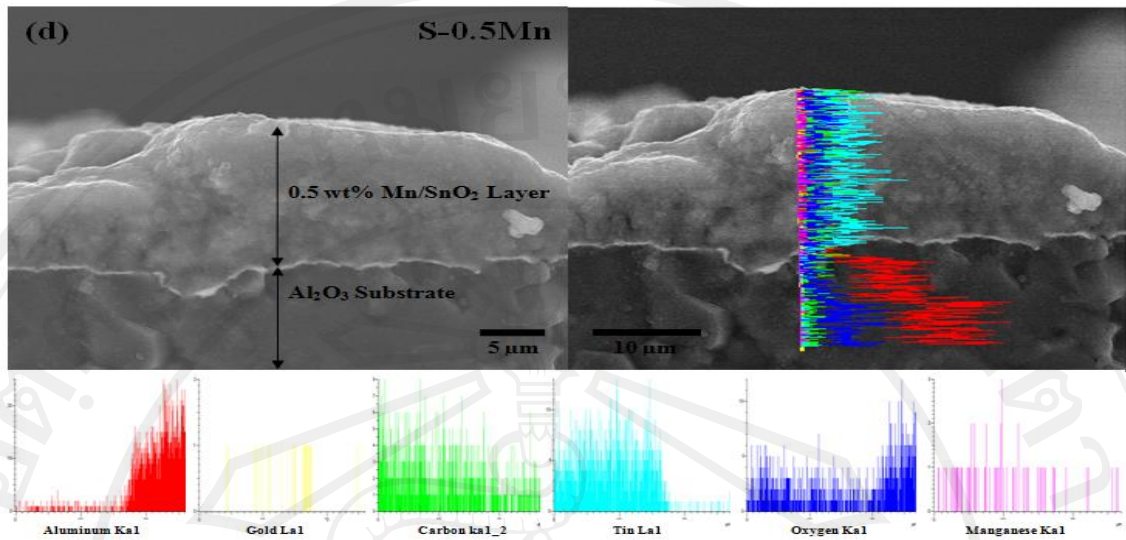


รูป 4.21 ความหนาของฟิล์มประมาณ 7-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเสตรทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด

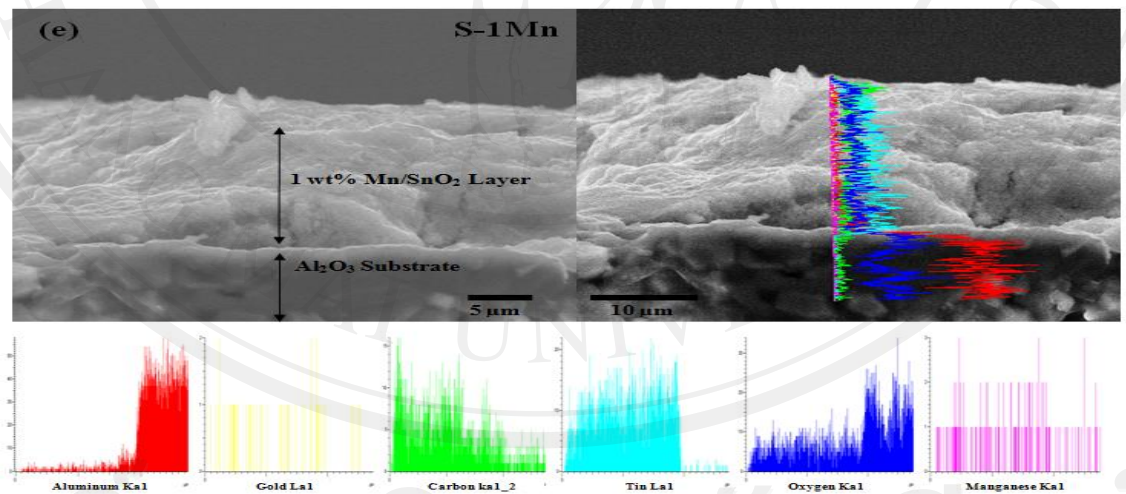


รูป 4.22 ความหนาของฟิล์มประมาณ 7-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเสตรทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด

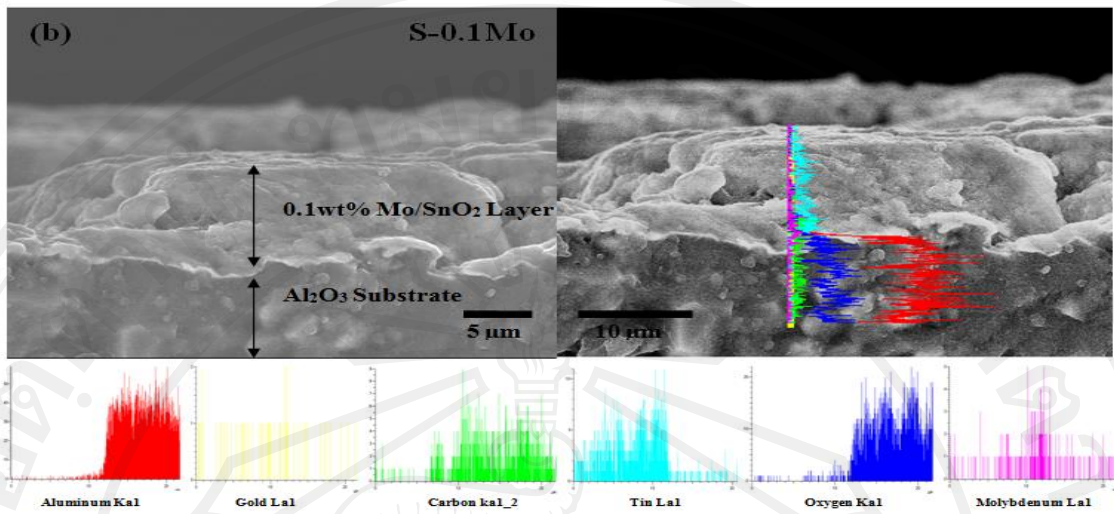




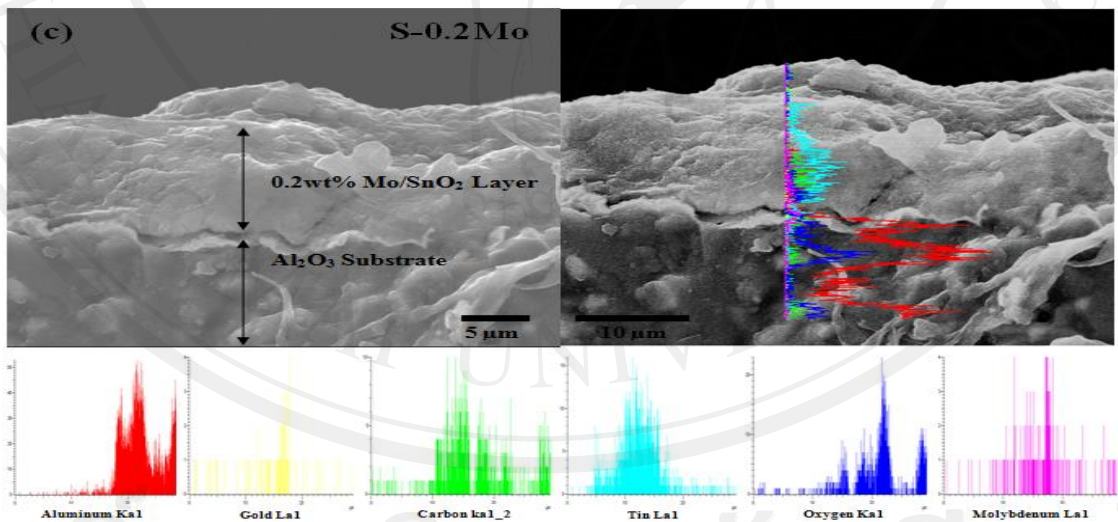
รูป 4.23 ความหนาของฟิล์มประมาณ 7-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเซตทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.5 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สสภาวะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด



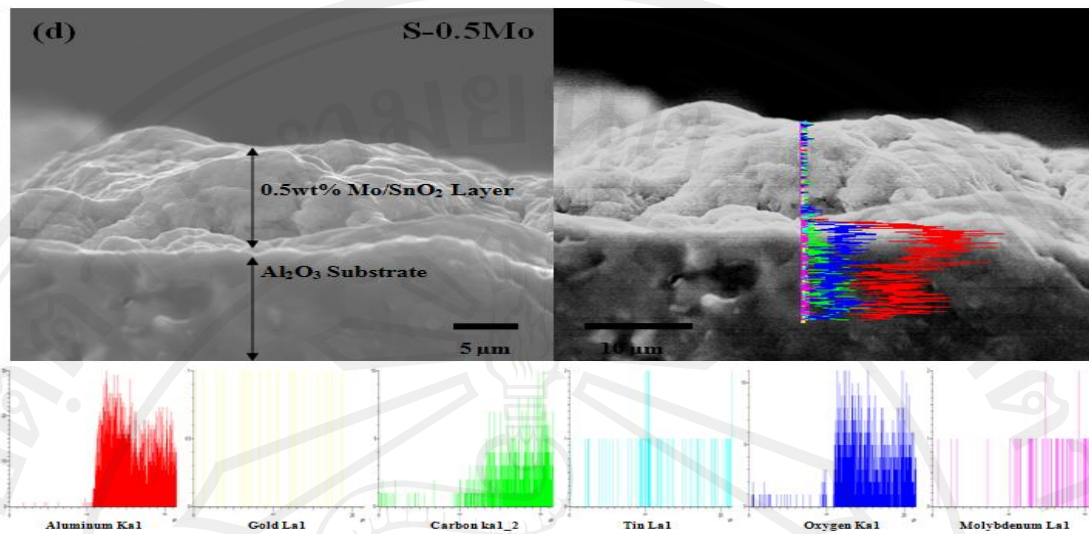
รูป 4.24 ความหนาของฟิล์มประมาณ 7-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเซตทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สสภาวะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด



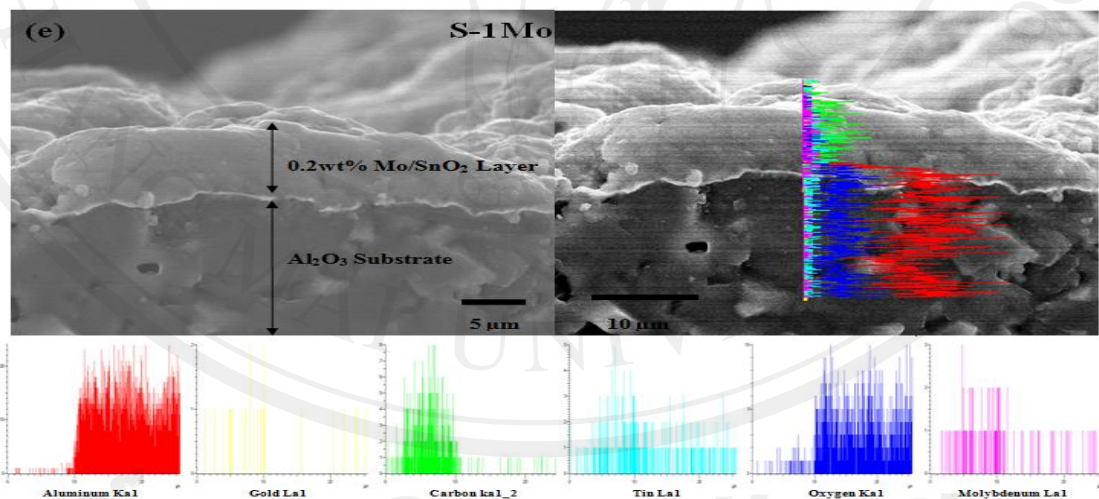
รูป 4.25 ความหนาของฟิล์มประมาณ 6-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเซเตรทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สภาวะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด



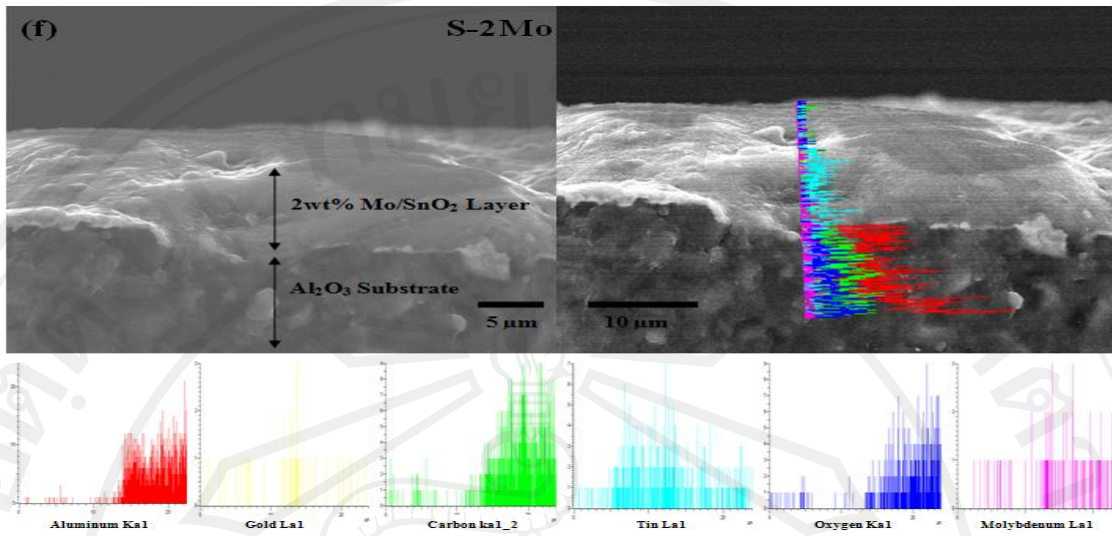
รูป 4.26 ความหนาของฟิล์มประมาณ 6-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเซเตรทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สภาวะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด



รูป 4.27 ความหนาของฟิล์มประมาณ 6-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเซตทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.5 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สสภาวะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด



รูป 4.28 ความหนาของฟิล์มประมาณ 6-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเซตทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สสภาวะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด

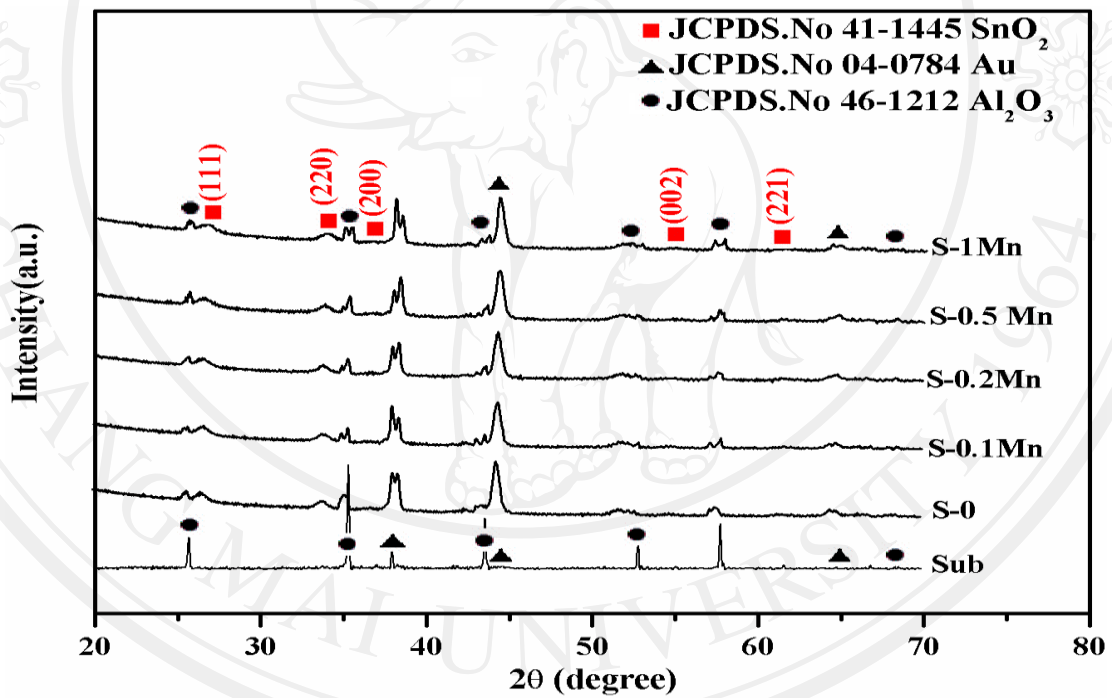


รูป 4.29 ความหนาของฟิล์มประมาณ 6-10 ไมโครเมตรซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างแน่นตัวและมีรูพรุน ถูกทำการเหวี่ยงกระจายบนชั้นเซตทชนิดอะลูมินาพิมพ์ลายตัวทอง ด้านล่างคือการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดินัมในปริมาณ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดแบบเส้น ที่ตอบสนองต่อแก๊สภาวะแวดล้อมทั้งหมด 5 ชนิด

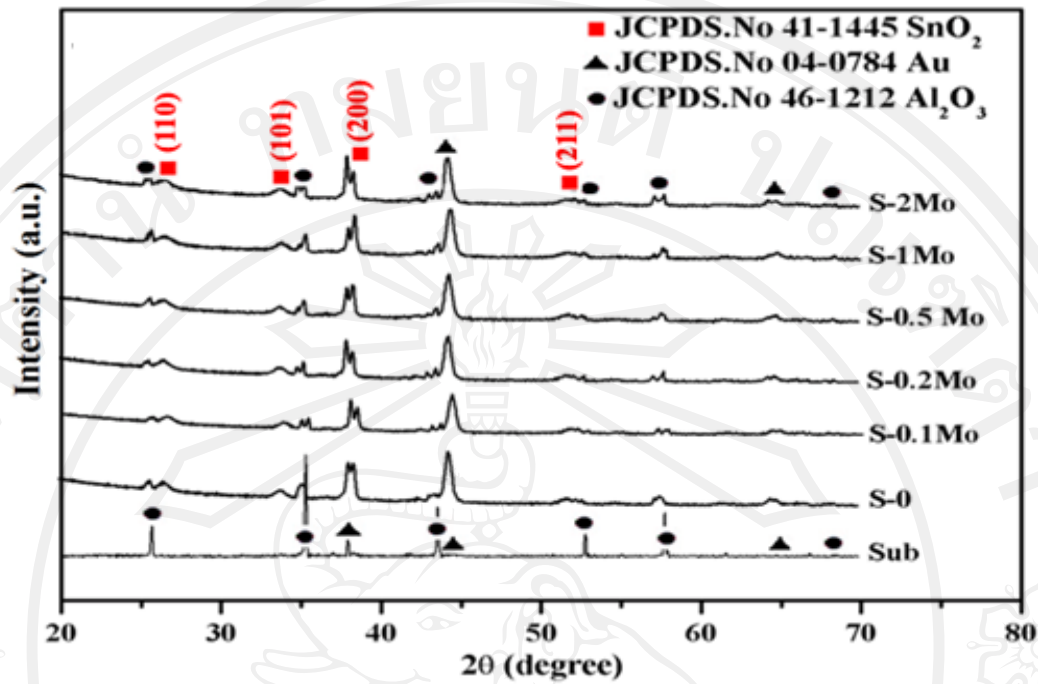
#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเซนเซอร์ภายหลังการทดสอบเซนเซอร์

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้น จะเป็นการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่เตรียมได้โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส โดยใช้ความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมป์ และ Scanning speed คือ 3 องศาต่อนาที สำหรับการวิเคราะห์เซนเซอร์นาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ แสดงการวิเคราะห์ดังรูป พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีลักษณะพีกที่เด่นชัด มีความเป็นผลึกสูง และเมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานจากข้อมูล JCPDS พบว่าจะสอดคล้องกับหมายเลข 41-1445 โดยเซนเซอร์ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสนั้น มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล ซึ่งการวิเคราะห์ในส่วนนี้สามารถยืนยันเฟส และโครงสร้างที่แท้จริงของสารที่ถูกสังเคราะห์ โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่วิเคราะห์จากตัวอย่างของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยโลหะในกลุ่มแทรนซิชันทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ แมงกานีส และ โมลิบดินัม แสดงดังรูป 4.30-4.31 ตามลำดับนั้น สำหรับการวิเคราะห์พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะพีกที่เด่นชัด มีความเป็นผลึกสูง และเมื่อนำไปเทียบกับ

ค่ามาตรฐานจากข้อมูล JCPDS พบว่าจะสอดคล้องกับหมายเลข 41-1445 โดยเซนเซอร์ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ และ ที่มีการเจือด้วยโลหะที่อยู่ในกลุ่มทรานซิชันที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์โรโรลิซิส นั้น พบว่า ไม่ปรากฏพีกของสารเจือทั้งสองชนิดแต่อย่างใด สาเหตุเนื่องจาก ปริมาณของการเจือมีค่าต่ำเกินไปที่รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะตรวจพบ อีกทั้ง ขนาดของอนุภาคนาโนของโลหะในกลุ่มทรานซิชันน่าจะมีขนาดที่เล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของตัวรองรับชนิดทินไดออกไซด์ ซึ่งขนาดที่เล็กมากกว่า 10 นาโนเมตร จะมีผลอย่างในการแสดงพีกของการเลี้ยวเบน เนื่องจากขนาดของอนุภาคนาโนที่เล็กเกินไป พีกจะมีความกว้างอย่างมากจนเป็นเส้นราบ และไม่สามารถแสดงผลให้เห็นอย่างชัดเจน



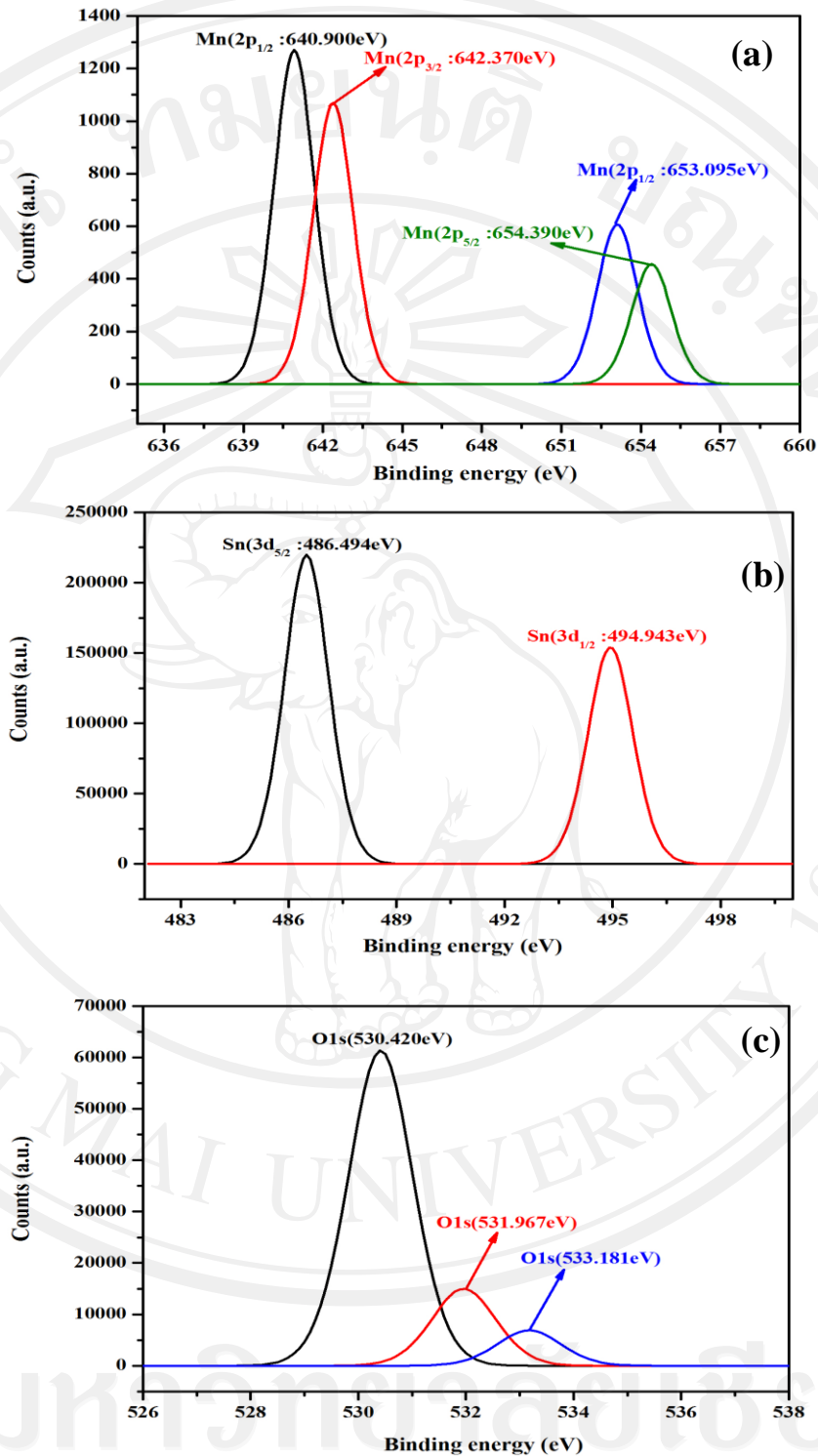
รูป 4.30 การวิเคราะห์เฟสของเซนเซอร์ฟิล์มหนาของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูป 4.31 การวิเคราะห์เฟสของเซนเซอร์ฟิล์มหนาของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

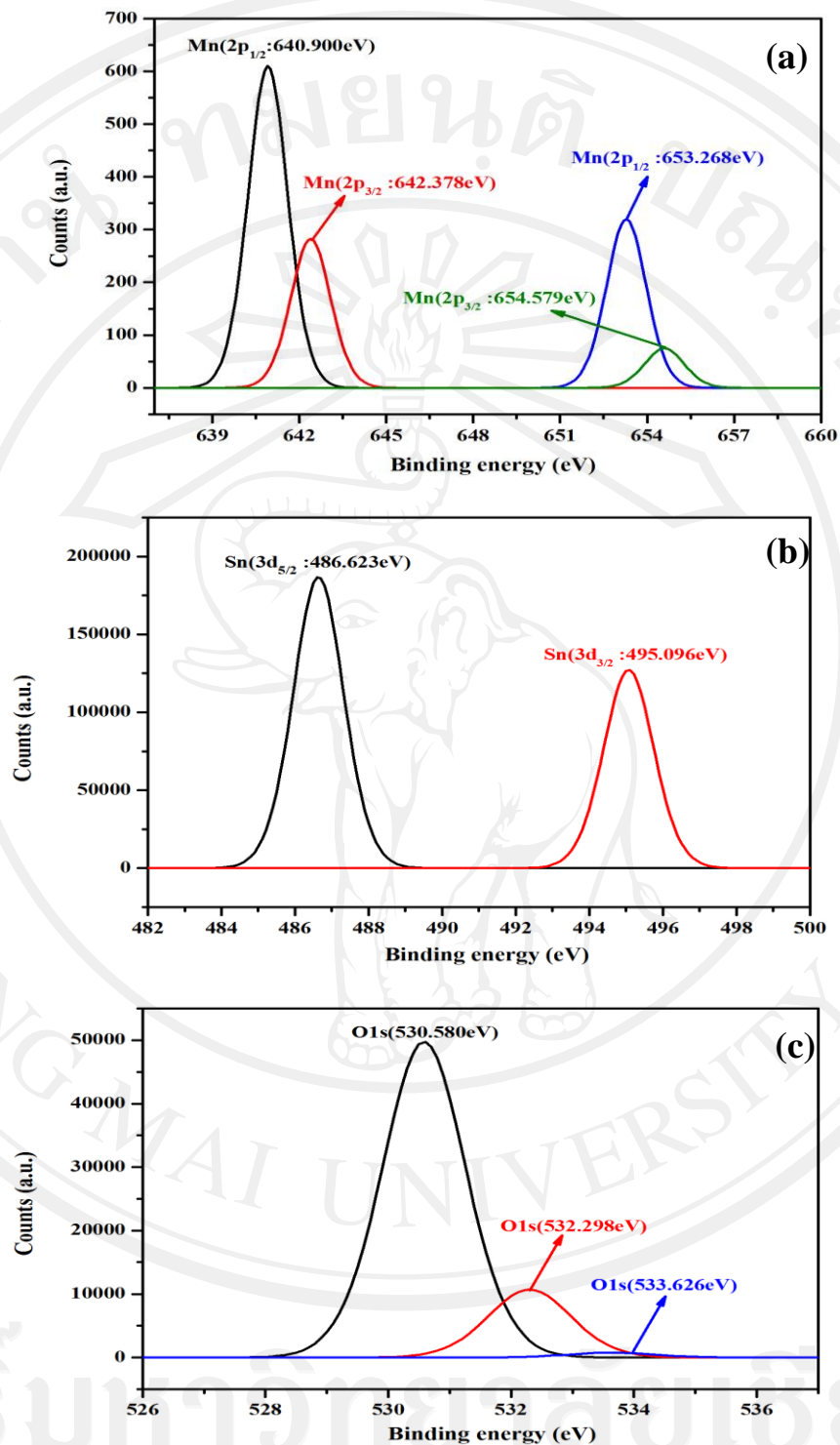
#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ผง และตัวเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

ในการวิเคราะห์สารด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ เป็นการวิเคราะห์สารที่มีลักษณะเป็นผงที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส และตัวเซนเซอร์ที่ถูกเตรียมขึ้นจากด้วยกระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงกระจาย รูป 4.32 แสดงผลการวิเคราะห์ผงอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ในรูป 4.33 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเซนเซอร์ทินไดออกไซด์เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ในรูป 4.34 แสดงผลการวิเคราะห์ผงอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ และรูป 4.35 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวเซนเซอร์ทินไดออกไซด์เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ส่วนตารางที่ 4.2 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของผงและตัวเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก และโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์

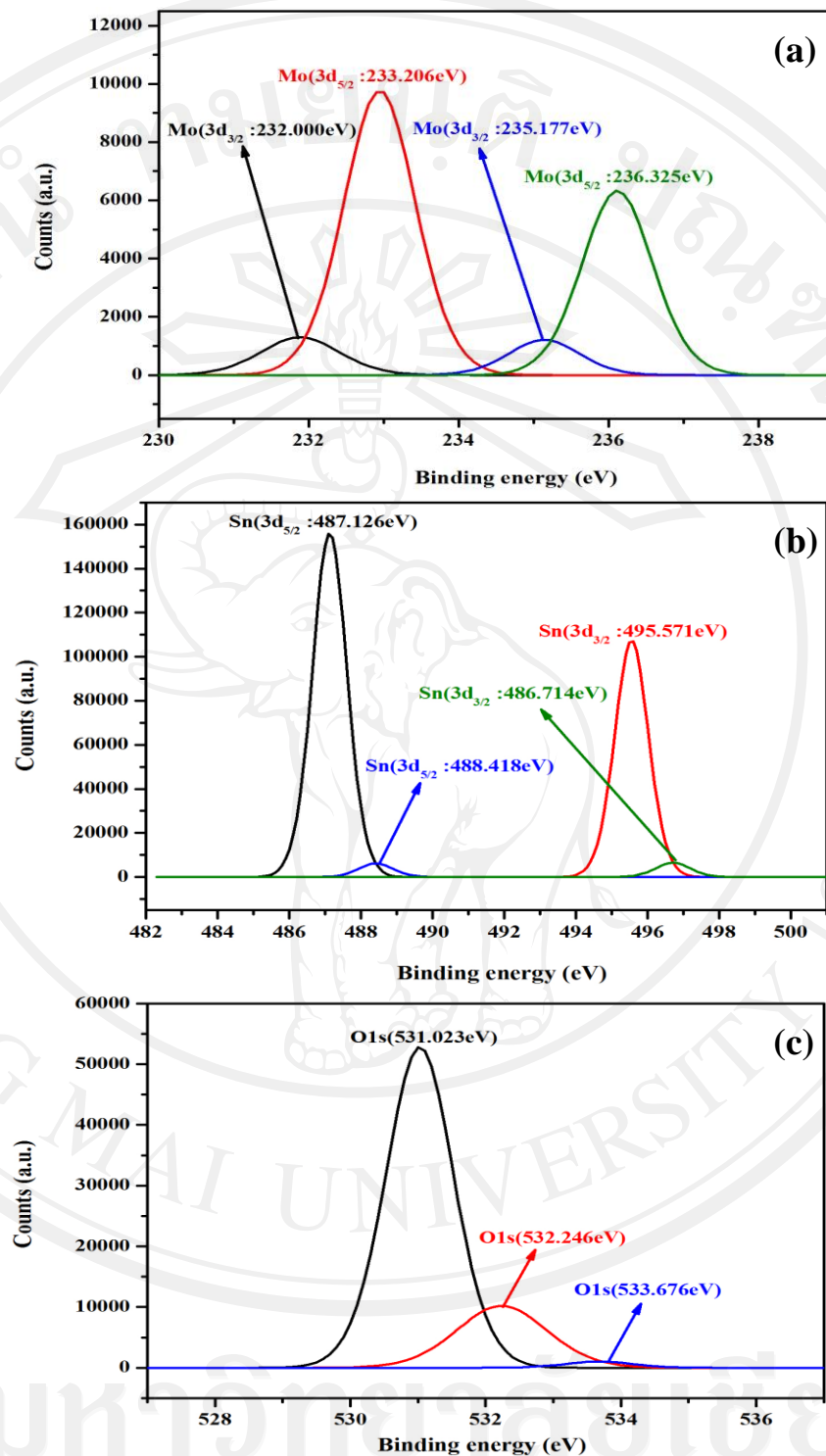


รูป 4.32 แสดงผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อย ละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (a) แมงกานีส (b) ทิน และ (c) ออกซิเจน

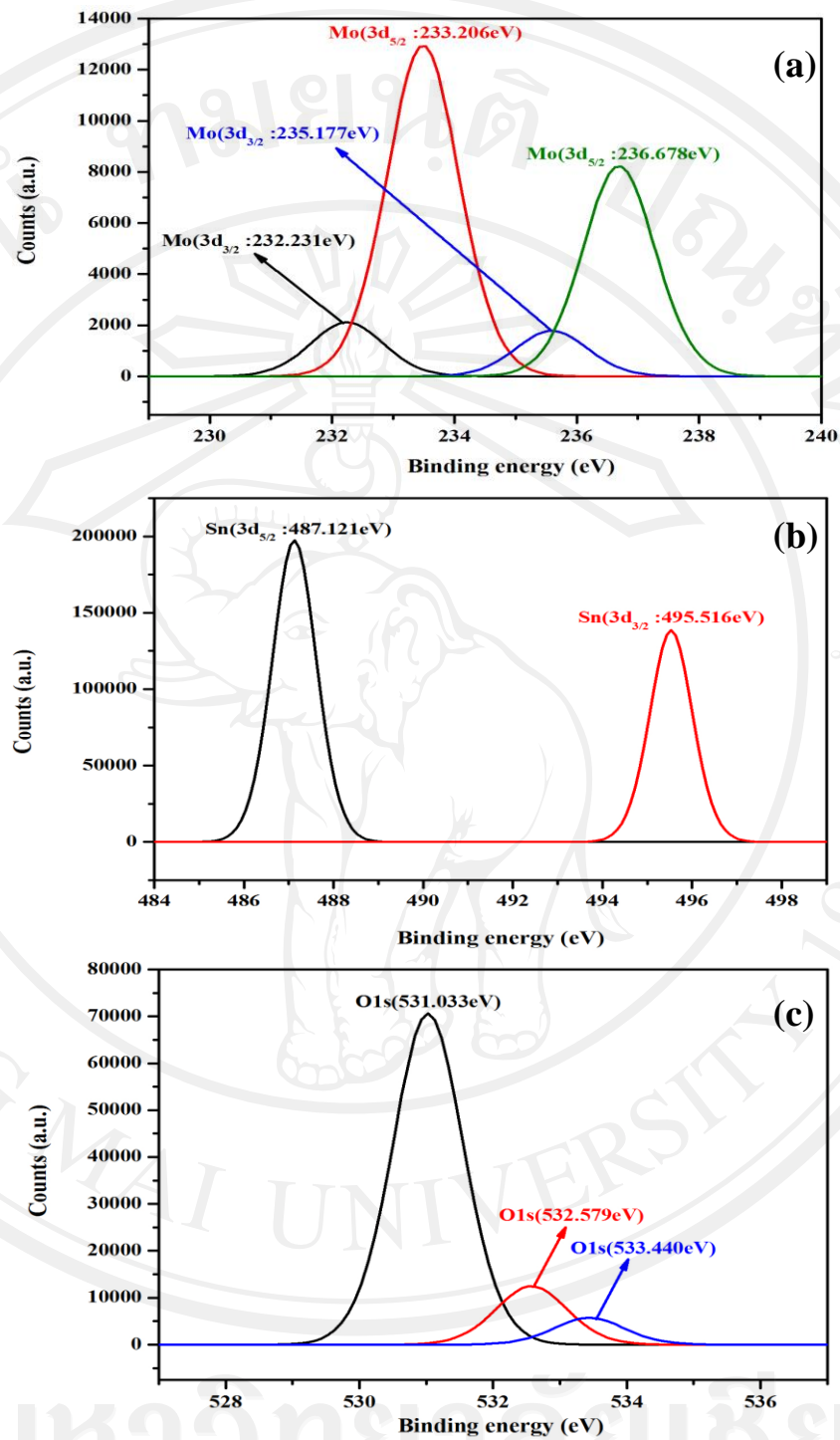




รูป 4.33 แสดงผลการวิเคราะห์เซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์(a) แมงกานีส (b) ทิน และ (c) ออกซิเจน



รูป 4.34 แสดงผลการวิเคราะห์ผงอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (a) โมลิบดีนัม (b) ทิน และ (c) ออกซิเจน



รูป 4.35 แสดงผลการวิเคราะห์เซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (a) โมลิบดีนัม (b) ทิน และ (c) ออกซิเจน

ตาราง 4.2 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของผง และตัวเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เชื่อมด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

ผง

สารประกอบ	เลขออกซิเดชัน	ระดับชั้นพลังงาน	พลังงานยึดเหนี่ยว			อ้างอิง
			Mn	O	Sn	
MnO	Mn <sup>2+</sup> , O <sup>2-</sup>	2p <sub>3/2</sub>	640.900	-	-	[49]
MnO <sub>2</sub>	Mn <sup>4+</sup> , O <sup>2-</sup>	2p <sub>3/2</sub>	642.370	-	-	[49]
MnO	Mn <sup>2+</sup> , O <sup>2-</sup>	2p <sub>1/2</sub>	653.095	-	-	[49]
MnO	Mn <sup>2+</sup> , O <sup>2-</sup>	2p <sub>1/2</sub>	654.390	-	-	[49]
		1s	-	530.420	-	[48]
		1s	-	533.181	-	[48]
SnO <sub>2</sub>	Sn <sup>4+</sup> , O <sup>2-</sup>	3d <sub>5/2</sub>	-	-	486.494	[48]
		3d <sub>3/2</sub>	-	-	494.943	[48]
		1s	-	531.967	-	[48]

เซนเซอร์

สารประกอบ	เลขออกซิเดชัน	ระดับชั้น	พลังงานยึดเหนี่ยว			อ้างอิง
			พลังงาน	Mn	O	
MnO	Mn <sup>2+</sup> , O <sup>2-</sup>	2p <sub>3/2</sub>	643.041	-	-	[48]
MnO <sub>2</sub>	Mn <sup>4+</sup> , O <sup>2-</sup>	2p <sub>3/2</sub>	643.217	-	-	[49]
MnO <sub>2</sub>	Mn <sup>4+</sup> , O <sup>2-</sup>	2p <sub>3/2</sub>	643.217	-	-	[49]
MnO <sub>2</sub>	Mn <sup>4+</sup> , O <sup>2-</sup>	2p <sub>1/2</sub>	653.243	-	-	[49]
		1s	-	529.999	-	[49]
		1s	-	531.213	-	[49]
SnO <sub>2</sub>	Sn <sup>4+</sup> , O <sup>2-</sup>	3d <sub>5/2</sub>	-	-	486.224	[48]
		3d <sub>5/2</sub>	-	-	497.497	[48]
		3d <sub>3/2</sub>	-	-	494.695	[48]
		3d <sub>3/2</sub>	-	-	496.330	[48]

ตาราง 4.3 แสดงค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของผง และตัวเซนเซอร์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

ผง

สารประกอบ	เลขออกซิเดชัน	ระดับชั้นพลังงาน	พลังงานยึดเหนี่ยว			อ้างอิง
			Mo	O	Sn	
MoO <sub>3</sub>	Mo <sup>6+</sup> , O <sup>3-</sup>	3d <sub>3/2</sub>	232.200	-	-	[48]
MoO <sub>2</sub>	Mo <sup>5+</sup> , O <sup>2-</sup>	3d <sub>5/2</sub>	235.177	-	-	[50]
MoO <sub>3</sub>	Mo <sup>6+</sup> , O <sup>3-</sup>	3d <sub>3/2</sub>	233.206	-	-	[50]
MoO <sub>2</sub>	Mo <sup>5+</sup> , O <sup>2-</sup>	3d <sub>5/2</sub>	236.325	-	-	[50]
			-	531.023	-	[50]
		1s	-	533.676	-	[48]
		1s				[48]
SnO <sub>2</sub>	Sn <sup>4+</sup> , O <sup>2-</sup>	3d <sub>3/2</sub>	-	-	486.714	[48]
		3d <sub>5/2</sub>	-	-	488.418	[48]
		3d <sub>3/2</sub>	-	-	495.571	[48]
		3d <sub>5/2</sub>	-	-	487.126	[48]
		1s	-	532.246	-	[48]

เซนเซอร์

สารประกอบ	เลขออกซิเดชัน	ระดับชั้นพลังงาน	พลังงานยึดเหนี่ยว			อ้างอิง
			Mo	O	Sn	
MoO <sub>3</sub>	Mo <sup>6+</sup> , O <sup>3-</sup>	3d <sub>3/2</sub>	235.177	-	-	[50]
MoO <sub>2</sub>	Mo <sup>5+</sup> , O <sup>2-</sup>	3d <sub>5/2</sub>	236.678	-	-	[50]
MoO <sub>3</sub>	Mo <sup>6+</sup> , O <sup>3-</sup>	3d <sub>3/2</sub>	232.231	-	-	[50]
MoO <sub>2</sub>	Mo <sup>5+</sup> , O <sup>2-</sup>	3d <sub>5/2</sub>	233.206	-	-	[50]
			-	531.033	-	[50]
		1s	-	533.440	-	[50]
		1s				[50]
SnO <sub>2</sub>	Sn <sup>4+</sup> , O <sup>2-</sup>	3d <sub>3/2</sub>	-	-	495.516	[48]
		3d <sub>5/2</sub>	-	-	487.121	[48]
		3d <sub>3/2</sub>	-	-	-	[48]
		3d <sub>5/2</sub>	-	-	-	[48]
		1s	-	532.579	-	[48]

จากการวิเคราะห์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ พบว่า แมงกานีสที่เกิดขึ้นเป็นแมงกานีส มีเลขออกซิเดชันเป็น Mn<sup>4+</sup> และ O<sup>2-</sup> และทินที่เกิดขึ้นเป็นทินไดออกไซด์ มีเลขออกซิเดชันเป็น Sn<sup>4+</sup> และ O<sup>2-</sup> ซึ่งเป็นสารที่พบในผงนี้ โดยสารที่วิเคราะห์ได้มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้ยืนยันได้ ส่วนตัวเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ พบว่า แมงกานีสที่เกิดขึ้นเป็นแมงกานีส มีเลขออกซิเดชันเป็น Mn<sup>4+</sup> และ O<sup>2-</sup> และทินที่เกิดขึ้นเป็นทินไดออกไซด์ มีเลขออกซิเดชันเป็น Sn<sup>4+</sup> และ O<sup>2-</sup> ซึ่งเป็นสารที่พบในเซนเซอร์นี้ โดยสารที่วิเคราะห์ได้มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้ยืนยันสารที่เกิดขึ้นได้ เช่นเดียวกันจากการวิเคราะห์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วย

โมลิบดีนัมนั้นในปริมาณ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ พบว่า โมลิบดีนัมที่เกิดขึ้นเป็นโมลิบดีนัม มีเลขออกซิเดชันเป็น  $\text{Mo}^{6+}$  และ  $\text{O}^{3-}$  และมีเลขออกซิเดชันอีกชนิดคือ  $\text{Mo}^{5+}$  และ  $\text{O}^{2-}$  และทินที่เกิดขึ้นเป็นทินไดออกไซด์ มีเลขออกซิเดชันเป็น  $\text{Sn}^{4+}$  และ  $\text{O}^{2-}$  ซึ่งเป็นสารที่พบในผงนี้โดยสารที่วิเคราะห์ได้มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวสอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้ยืนยันได้ ส่วนตัวเซนเซอร์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมนั้นในปริมาณ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องสเปกโทรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ พบว่า โมลิบดีนัมที่เกิดขึ้นเป็นโมลิบดีนัม มีเลขออกซิเดชันเป็น  $\text{Mo}^{6+}$  และ  $\text{O}^{3-}$  และมีเลขออกซิเดชันอีกชนิดคือ  $\text{Mo}^{5+}$  และ  $\text{O}^{2-}$  และทินที่เกิดขึ้นเป็นทินไดออกไซด์ มีเลขออกซิเดชันเป็น  $\text{Sn}^{4+}$  และ  $\text{O}^{2-}$  ซึ่งเป็นสารที่พบในเซนเซอร์นี้ โดยสารที่วิเคราะห์ได้มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้ยืนยันสารที่เกิดขึ้นได้



#### 4.3 คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อม

##### 4.3.1 คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีส

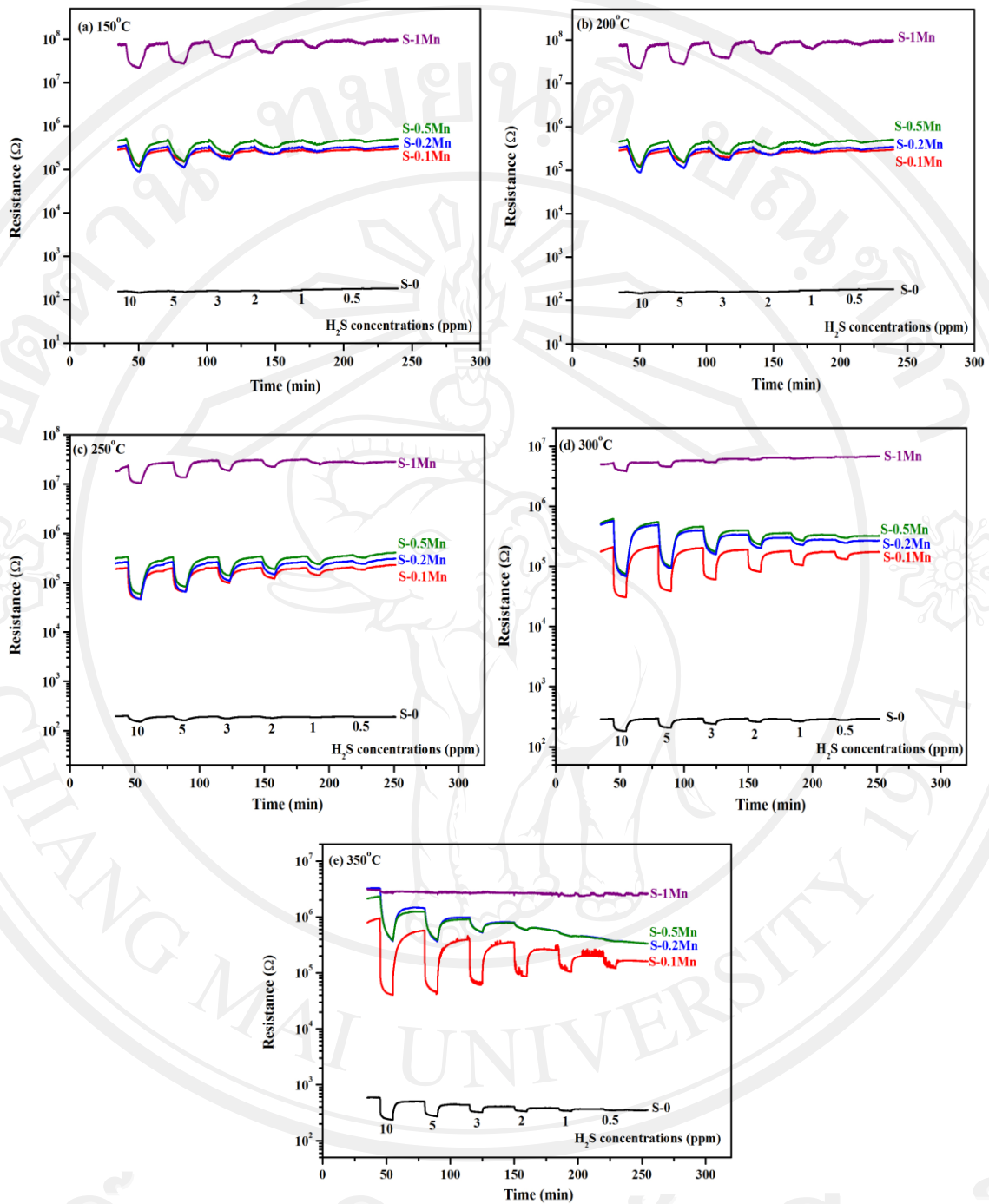
###### 4.3.1.1 แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

###### 4.3.1.1.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

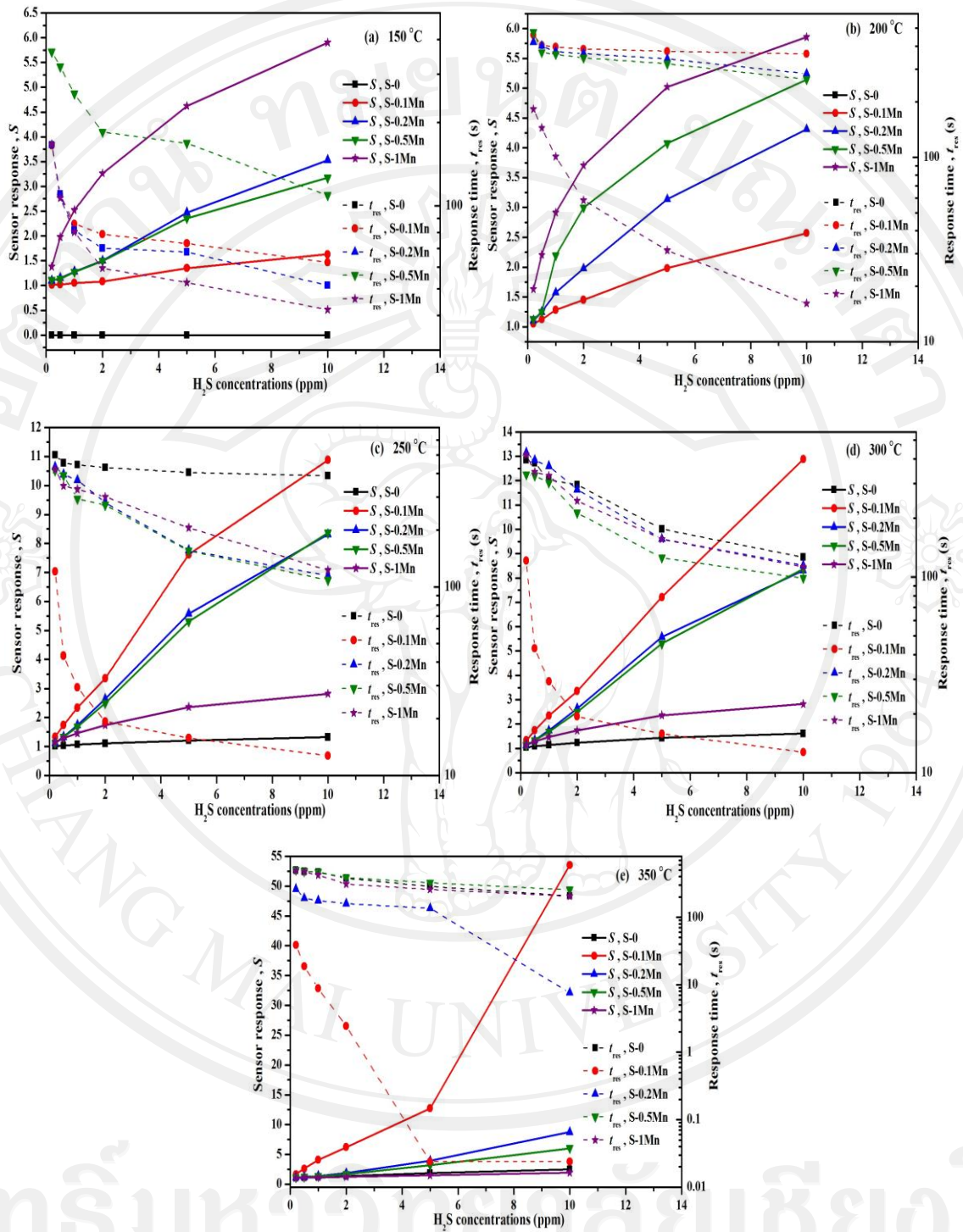
ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิต่ำหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สทั้งช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของเซนเซอร์ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (0.5-10 ppm) จากรูป 4.36 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์และที่เจือด้วยแมงกานีสที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไฟโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิต่ำกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมและไม่ใช่ว่าจะดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนอง ได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

#### 4.3.1.1.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นต่ำมากในช่วง 0.5-10 ppm โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.36 และ 4.37 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎี แสดงดังรูป 4.36 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สมาทำปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.37 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น การตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้มีความไวในการตอบสนองค่อนข้างสูง เนื่องจากสามารถตอบสนองได้ที่ความเข้มข้นของแก๊สในปริมาณต่ำ แต่ยังคงแสดงค่าความไวสูง พบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 10 ppm มีการตอบสนองความไวประมาณ 54 และเวลาในการตอบสนองประมาณ 0.1 วินาทีที่ความเข้มข้น 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของแมงกานีส โดยแนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั่นเองและเมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่สูงอย่างปริมาณ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ค่าการตอบสนองกลับน้อยกว่าที่ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก อาจเกิดจากการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนของอนุภาคนาโนแมงกานีสเพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบนั้นสูงพอสมควรคือ 350 องศาเซลเซียสเมื่อขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาต่อแก๊สมีค่าลดลงตามลำดับ



รูป 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊ส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นต่ำ 0.5-10 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นต่ำ 0.5-10 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊สภายใต้สภาวะบรรยากาศ

#### 4.3.1.2 แก๊สไฮโดรเจน

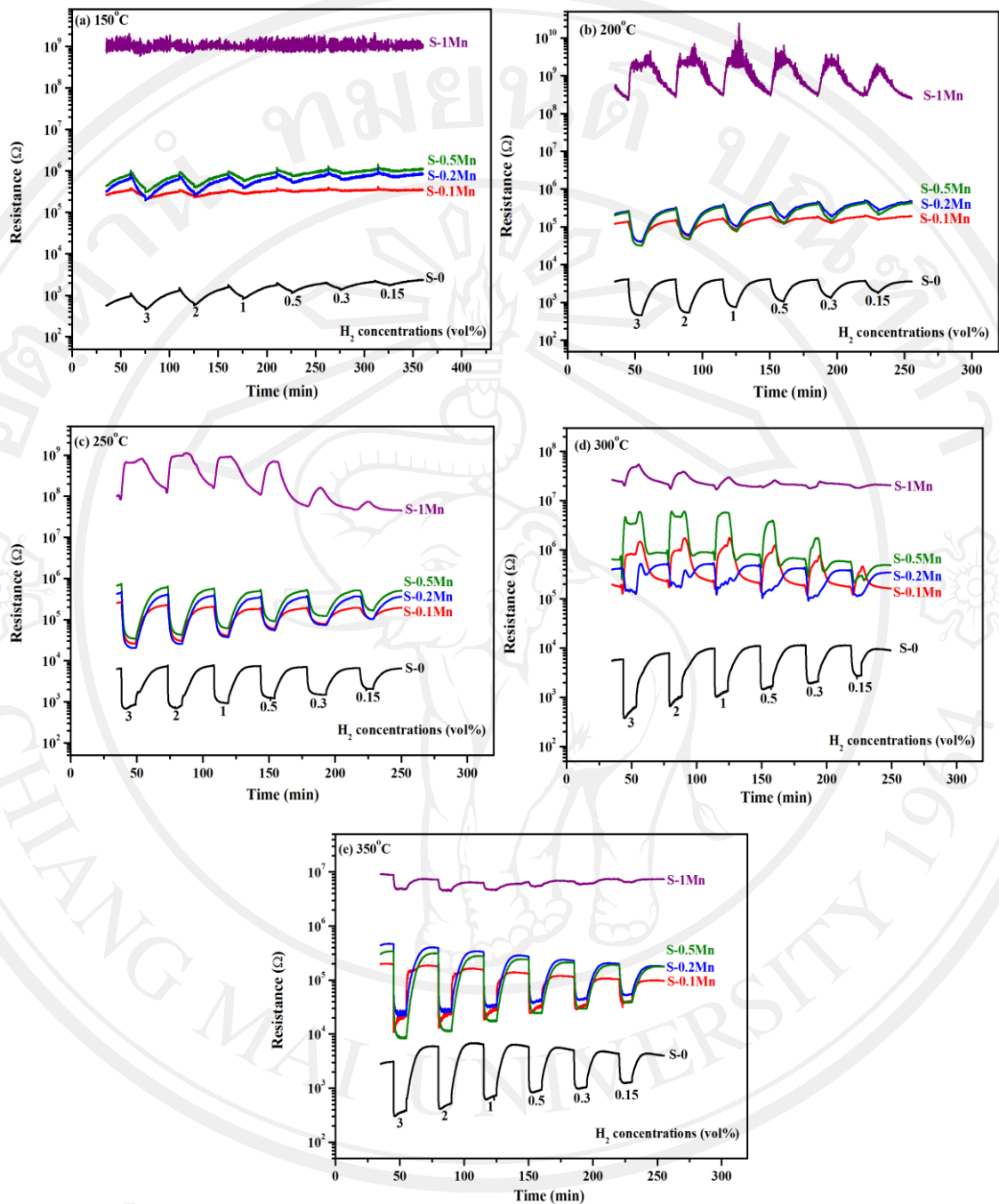
##### 4.3.1.2.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิค่าหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของเซนเซอร์ต่อแก๊สไฮโดรเจน (1.5-3 vol%) จากรูป 4.38 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนดีบุกออกไซด์และที่เจือด้วยแมงกานีสที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปย์ไฟโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมและไม่ใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

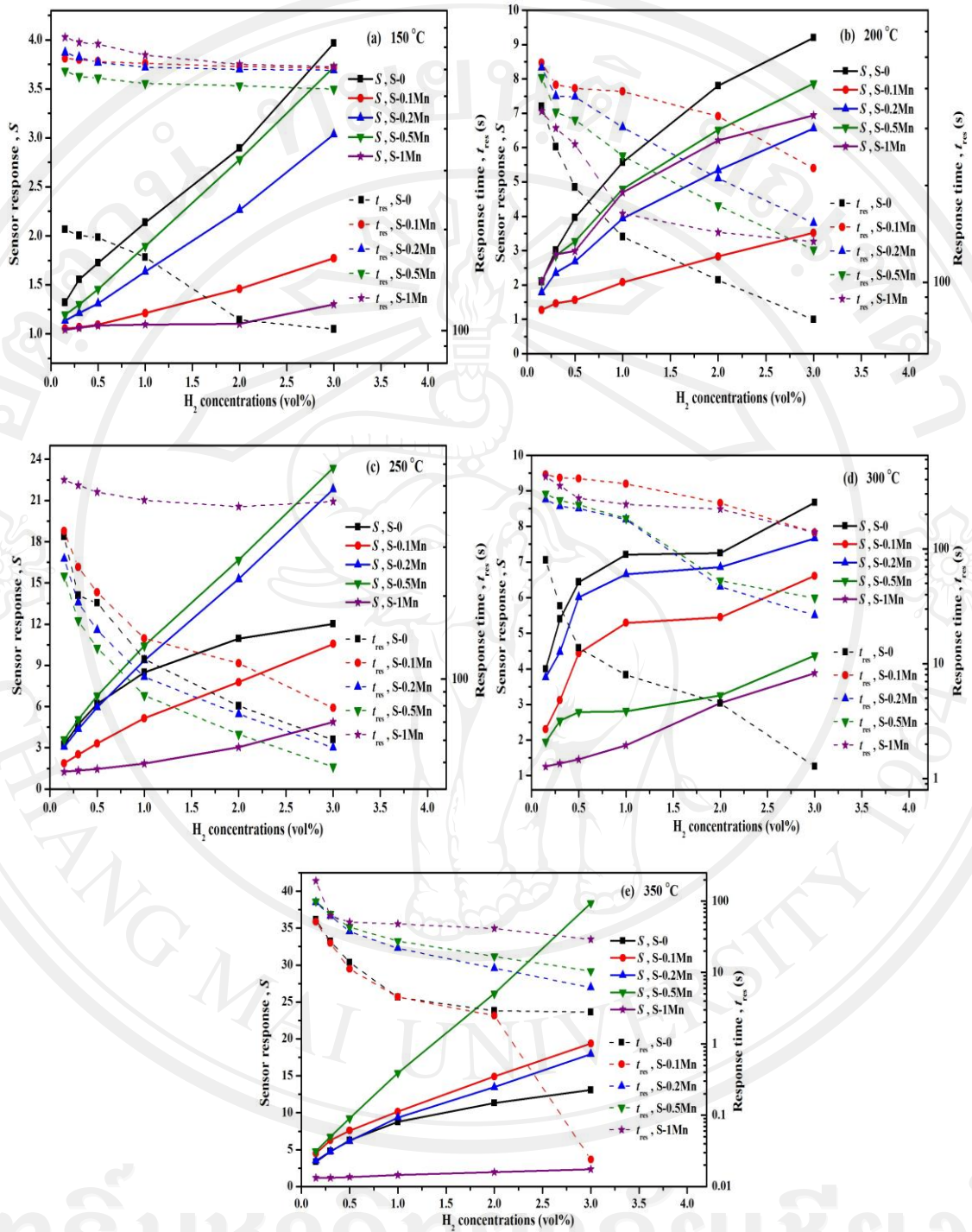
##### 4.3.1.2.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สไฮโดรเจน ที่ความเข้มข้นสูงมากในช่วง 1.5-3 vol% โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ไร่ยะ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสดังรูป 4.38 และ 4.39 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎีแสดงดังรูป 4.37 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สมาทำ

ปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.39 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น การตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้มีความไวในการตอบสนองค่อนข้างสูง เนื่องจากสามารถตอบสนองได้ถึงความเข้มข้นของแก๊สในปริมาณสูง และเมื่อแก๊สมีปริมาณมากขึ้นย่อมส่งผลให้การตอบสนองดีขึ้นตามเพราะไฮโดรเจนไม่ใช้แก๊สในกลุ่มแก๊สพิษจึงสามารถทดสอบที่ความเข้มข้นสูงๆ ได้และผลการทดสอบ พบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 3 vol% มีการตอบสนองความไวประมาณ 37 และเวลาในการตอบสนองประมาณ 0.1 วินาทีที่ 0.5 รั้อยละ โดยน้ำหนัก ของแมงกานีส แนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั่นเอง โดยที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นจะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนนั้นไม่ตอบสนองได้ดีเลยต่อเซนเซอร์ที่มีการเจืออนุภาคนาโนแมงกานีสลงไป แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นตัวเจือแมงกานีสกับมีผลอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั้นจะสามารถแสดงผลได้ดีกว่าอุณหภูมิ 300, 250, 200 และ 150 องศาเซลเซียส โดยปริมาณที่เจือลงไปก็มีผลเช่นกันจะสังเกตได้จากที่ปริมาณ 1 รั้อยละ โดยน้ำหนัก และ 0.5 รั้อยละ โดยน้ำหนัก ของแมงกานีสนั้นจะมีค่าการตอบสนองที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากอาจจะเกิดจากการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนของอนุภาคนาโนแมงกานีสเพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบนั้นสูงพอสมควรคือ 350 องศาเซลเซียสเมื่อขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาต่อแก๊สมีค่าลดลงตามลำดับ เพราะปริมาณ 1 รั้อยละ โดยน้ำหนัก นั้นมีการกระจายตัวของแมงกานีสในปริมาณที่มากกว่าด้วยนั่นเอง



รูป 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิคงรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน ที่ความเข้มข้น 1.5-3 vol% ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิคงที่เรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น 1.5-3 vol% ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



#### 4.3.1.3 แก๊สเอทานอล

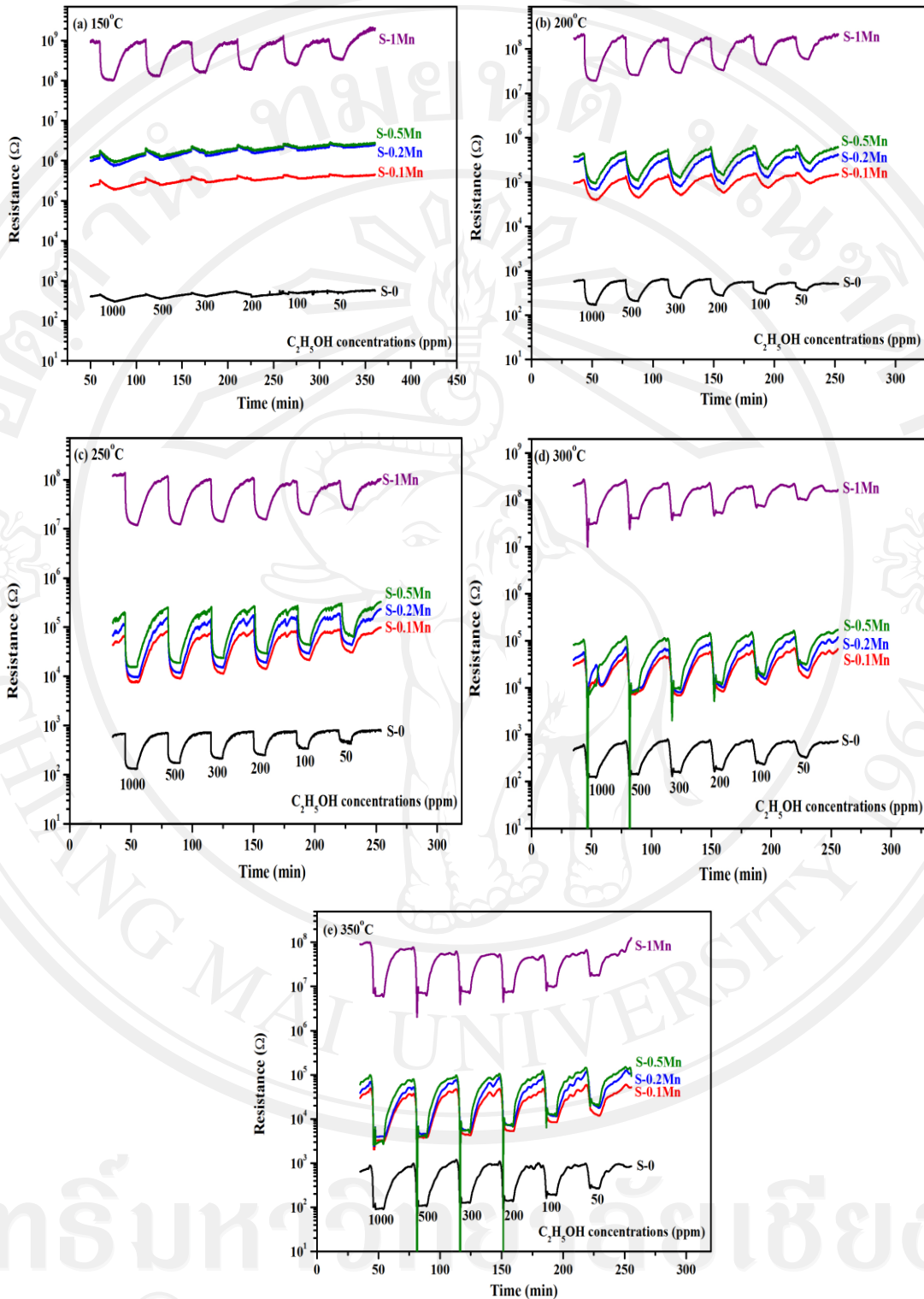
##### 4.3.1.3.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิค่าหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของเซนเซอร์ต่อแก๊สเอทานอล (50-1,000 ppm) จากรูป 4.40 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนดีบุกออกไซด์และที่เจือด้วยแมงกานีสที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปย์ไฟโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมและไม่ใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

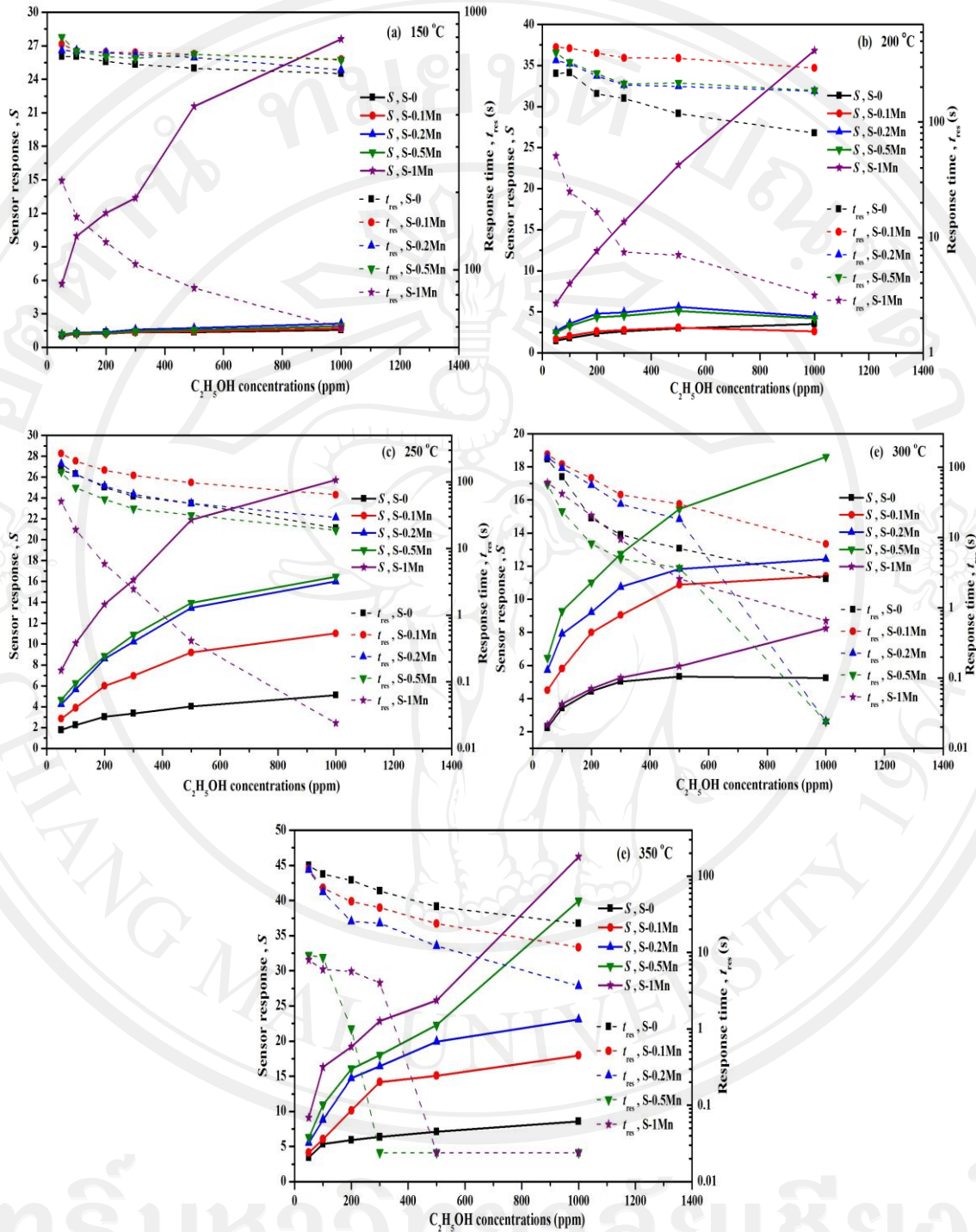
##### 4.3.1.3.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สเอทานอล ที่ความเข้มข้นในช่วง 50-1,000 ppm โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสดังรูป 4.40 และ 4.41 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎีแสดงดังรูป 4.39 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สมาทำ

ปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.41 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สเอทานอลสูงขึ้น และเมื่อแก๊สมีปริมาณมากขึ้นย่อมส่งผลให้การตอบสนองดีขึ้นตาม และจากการทดสอบ พบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 1,000 ppm มีการตอบสนองความไวประมาณ 47 และเวลาในการตอบสนองประมาณ 0.2 วินาทีที่ปริมาณการเจือ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของแมงกานีส แนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั่นเอง โดยที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นจะเห็นได้ว่าเอทานอลนั้นไม่ตอบสนองได้ดีเลยต่อเซนเซอร์ที่มีการเจืออนุภาคนาโนแมงกานีสลงไปในทุกปริมาณการเจือ ยกเว้นการเจือลงไปที 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของแมงกานีสที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสยังมีการตอบสนองต่อแก๊สซึ่งจะสังเกตได้จากค่าความต้านทานที่ลดลงจากรูป 4.39 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟค่าการตอบสนองในรูป 4.40 ด้วยแล้วจะเห็นว่าค่าการตอบสนองนั้นตั้งแต่ทีนไดออกไซด์บริสุทธิ์รวมไปถึงปริมาณในการเจือแมงกานีสตั้งแต่ 0.1-0.5 ร้อยละ โดยน้ำหนัก นั้นค่าการตอบสนองไม่ถึง 5 ( $S \sim 5$ ) เลยที่ความเข้มข้น 1000 ppm ของแก๊สเอทานอลเพราะฉะนั้นไม่ว่าถ้าเราทำการทดสอบลงไปที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้แล้วซึ่ง 150 นั้นถือว่าเป็นพิษของอุณหภูมิในการวัดที่ต่ำที่สุดที่เครื่องทดสอบเซนเซอร์ได้ตั้งค่าไว้ โดยถ้าเราทดสอบที่อุณหภูมิที่มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องก็อาจจะนำสารเจือตัวนี้ไปใช้งานได้จริง และพัฒนาต่อในระดับอุตสาหกรรมก็เป็นได้



รูป 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิคงรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล ที่ความเข้มข้น 50-1,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 50-1,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ

#### 4.3.1.4 แก๊สแอมโมเนีย

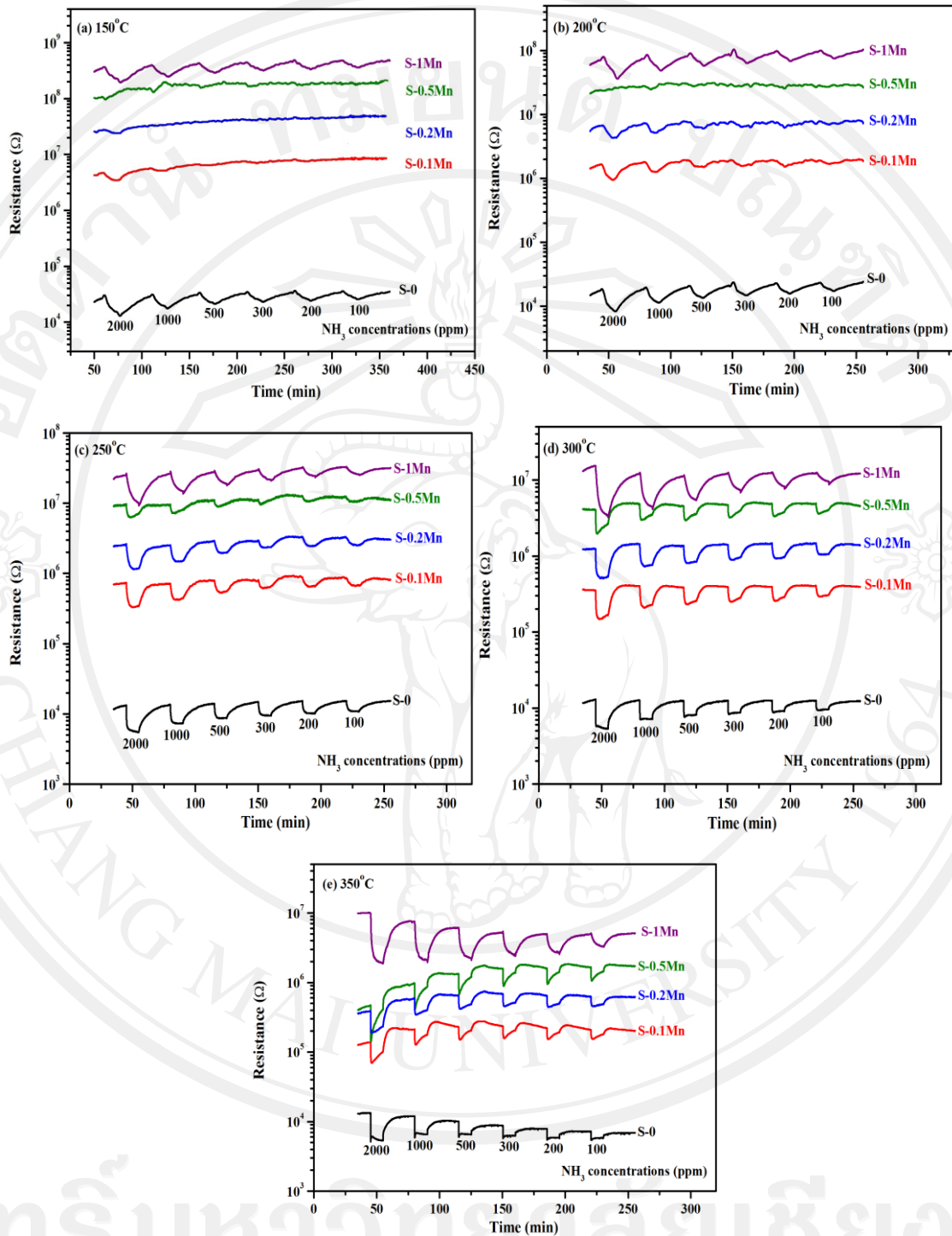
##### 4.3.1.4.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิต่ำหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุดของเซนเซอร์ต่อแก๊สแอมโมเนีย (100-2,000 ppm) จากรูป 4.42 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนดีบุกออกไซด์และที่เจือด้วยแมงกานีสที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไฟโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมและไม่ใช่ว่าจะดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

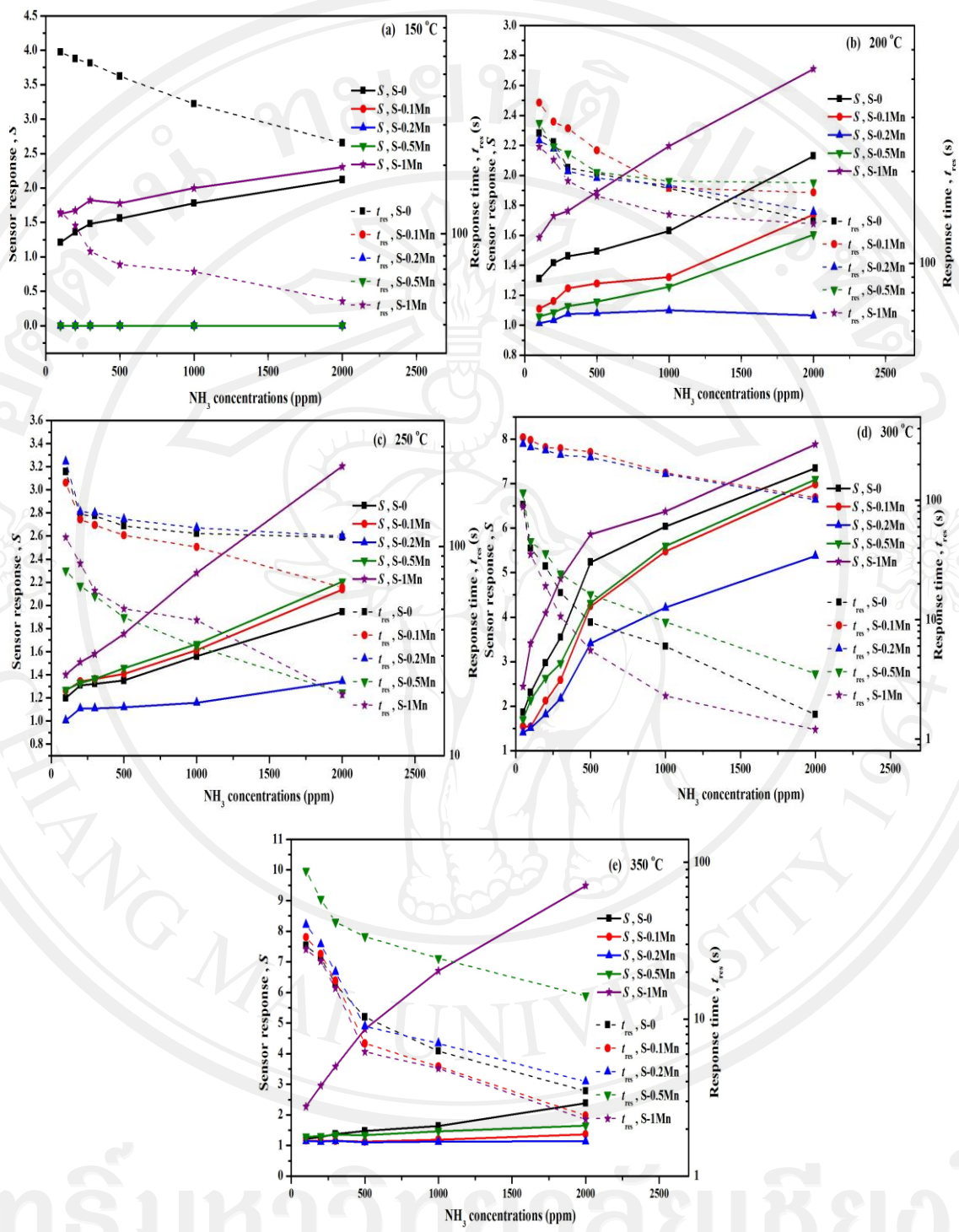
##### 4.3.1.4.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สแอมโมเนีย ที่ความเข้มข้นในช่วง 100-2,000 ppm โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสดังรูป 4.42 และ 4.43 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎีแสดงดังรูป 4.42 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สมาทำ

ปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.43 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สแอมโมเนียสูงขึ้น และเมื่อแก๊สมีปริมาณมากขึ้นย่อมส่งผลให้การตอบสนองดีขึ้นตาม และจากการทดสอบ พบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 2,000 ppm มีการตอบสนองความไวประมาณ 9.7 และเวลาในการตอบสนองประมาณ 2 วินาทีที่ปริมาณการเจือ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของแมงกานีส แนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั่นเอง โดยที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นจะเห็นได้ว่าแอมโมเนีย นั้นไม่ตอบสนองได้ดีเลยต่อเซนเซอร์ที่มีการเจืออนุภาคนาโนแมงกานีสลงไปในทุกปริมาณการเจือ แต่สิ่งที่สามารถยืนยันได้คือค่าการตอบสนองนั้นมีความมากขึ้นเมื่อมีการเจือโลหะในกลุ่มทรานซิชันแมงกานีสลงไป ในทินไดออกไซด์โดยเมื่อเทียบกับค่าการตอบสนองของทินไดออกไซด์ปกติอยู่ที่ประมาณ 2 ( $S=2$ ) ที่เงื่อนไขเดียวกันคืออุณหภูมิในการทดสอบเซนเซอร์ 350 องศาเซลเซียสที่ความเข้มข้น 2,000 ppm เป็นการยืนยันได้ว่าสารที่เจือลงไปเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นนั่นเอง



รูป 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิคงรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100-2,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊สภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิคงรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100-2,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



#### 4.3.1.5 แก๊สอะซิโตน

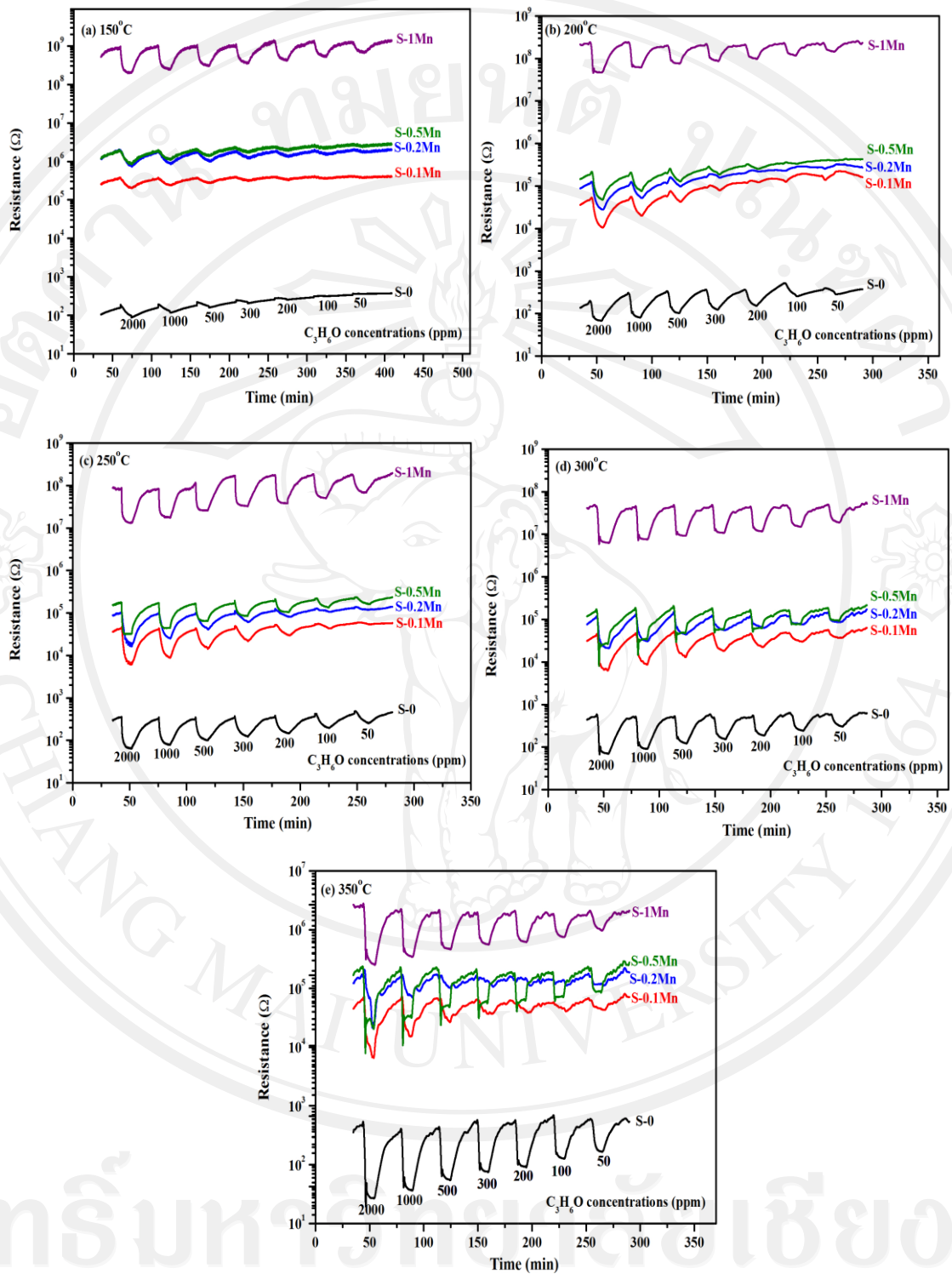
##### 4.3.1.5.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิต่ำหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุดของเซนเซอร์ต่อแก๊สอะซิโตน (50-2,000 ppm) จากรูป 4.44 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนดีบุกออกไซด์และที่เจือด้วยแมงกานีสที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปย์ไฟโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมและไม่ใช่ว่าจะดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

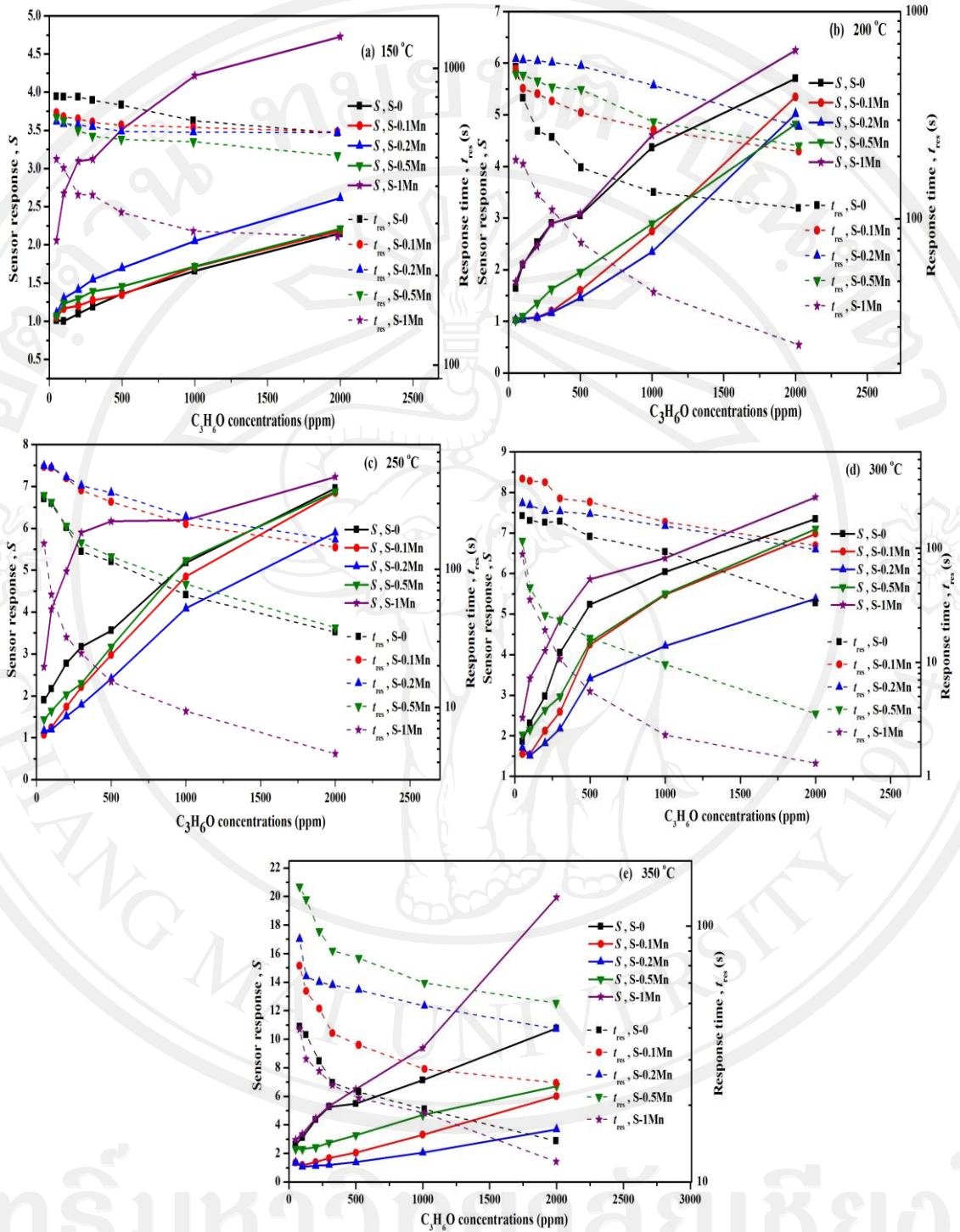
##### 4.3.1.5.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตน

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สอะซิโตน ที่ความเข้มข้นในช่วง 50-2,000 ppm โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสดังรูป 4.44 และ 4.45 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎีแสดงดังรูป 4.44 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สมาทำ

ปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.45 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สอะซิโตนสูงขึ้น และเมื่อแก๊สมีปริมาณมากขึ้นย่อมส่งผลให้การตอบสนองดีขึ้นตาม และจากการทดสอบ พบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 2,000 ppm มีการตอบสนองความไวประมาณ 20.5 และเวลาในการตอบสนองประมาณ 11 วินาทีที่ปริมาณการเจือ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของแมงกานีส แนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลง เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั่นเอง โดยเวลาในการตอบสนองต่ออะซิโตนจะนานที่สุด เพราะปัจจัยหนึ่งคือแก๊สอะซิโตนจัดเป็นแก๊สที่อยู่ในกลุ่มแก๊สสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ เพราะฉะนั้น โมเลกุลนั้นจะมีการเคลื่อนตัวที่ค่อนข้างอิสระเป็นอย่างมาก ทำให้แก๊สนั้นจะจับตัวตัวผิวหน้าของฟิล์มบางบนเซนเซอร์ได้ยากเช่นเดียวกัน



รูป 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตน ที่ความเข้มข้น 50-2,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนที่ความเข้มข้น 50-2,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ

#### 4.3.2 คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และที่ เจือด้วยโมลิบดีนัม

##### 4.3.2.1 แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

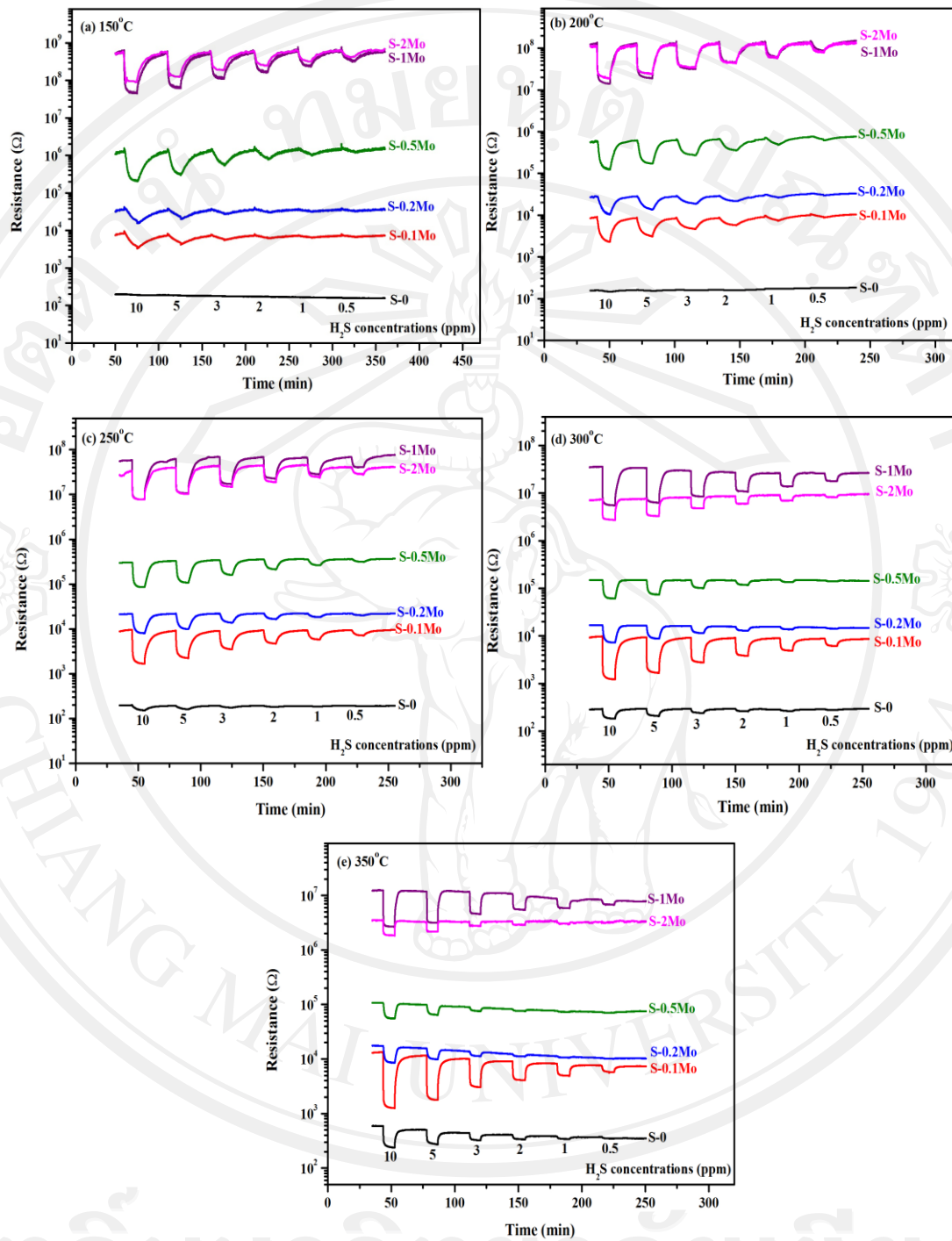
##### 4.3.2.1.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิค่าหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของเซนเซอร์ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (0.5-10 ppm) จากรูป 4.46 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสม และไม่ใช่ว่าใจที่ดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆนี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

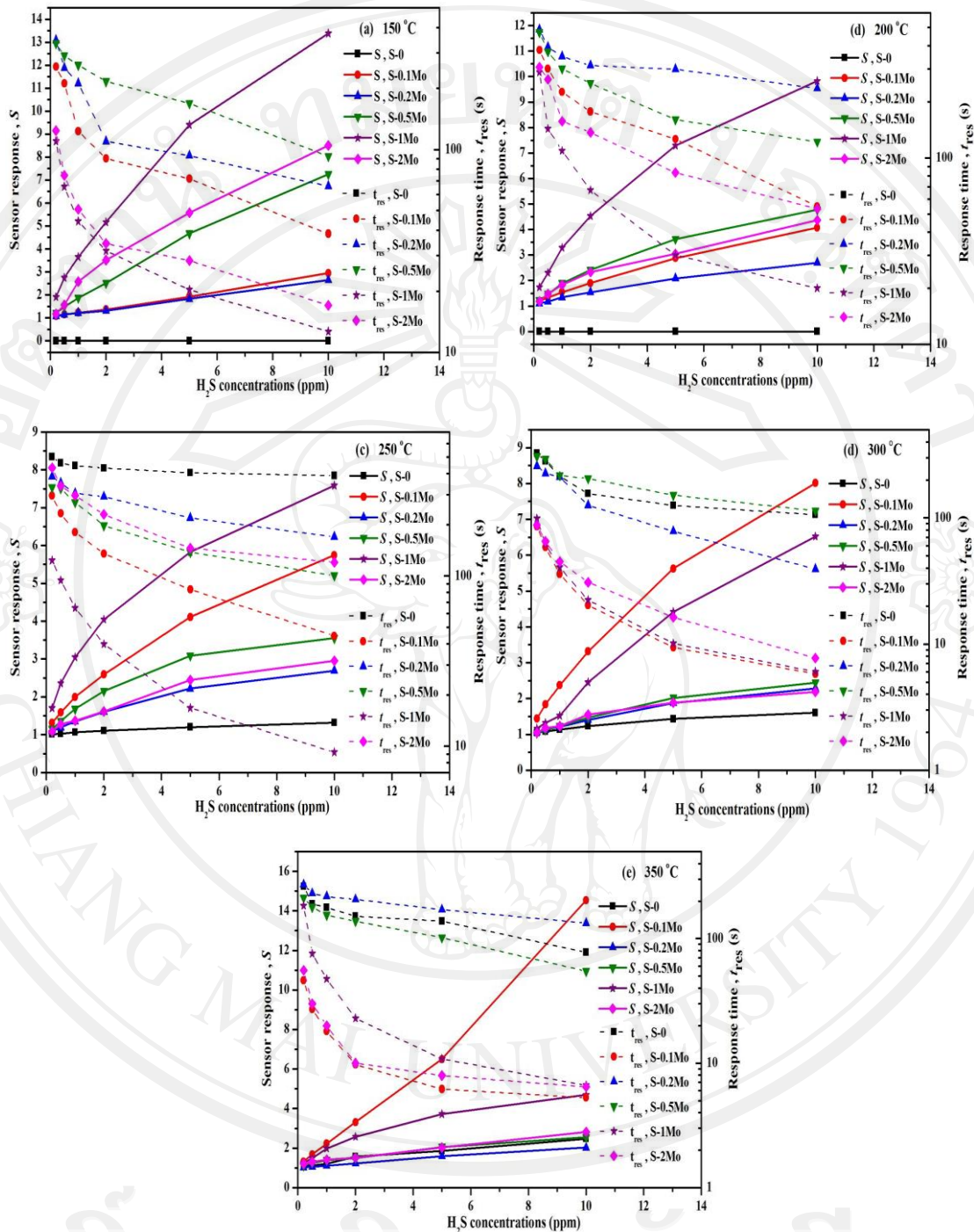
##### 4.3.2.1.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นต่ำมากในช่วง 0.5-10 ppm โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสดังรูป 4.46 และ 4.47 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำ

ปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎี แสดงดังรูป 4.46 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สมาทำปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.47 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงขึ้น พบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 10 ppm มีการตอบสนองความไวประมาณ 15 ( $S=15$ ) และเวลาในการตอบสนองประมาณ 4 วินาทีที่ความเข้มข้น 0.1 ไร่ยะ โดยน้ำหนัก ของโมลิบดีนัม โดยแนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมี โมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั่นเองและเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีสในปริมาณ 0.1 ไร่ยะ โดยน้ำหนัก ค่าการตอบสนองของเซนเซอร์จะมีค่าที่ต่ำกว่าโดยถ้าเราเทียบสองสารนี้ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันเหมือนกันพบว่าตัวเจือแมงกานีสจะตอบสนองต่อแก๊สจำพวกแก๊สพิษได้ดีกว่าโมลิบดีนัม โดยโมลิบดีนัมจะสามารถตอบสนองได้ดีกว่าในกลุ่มของแก๊สสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ โดยจะสามารถทราบได้จากผลการทดสอบเซนเซอร์ในหัวข้อถัดไป



รูป 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิคงรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊ส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 0.5-10 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิคงรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้น 0.5-10 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊สภายใต้สภาวะบรรยากาศ



#### 4.3.2.2 แก๊สไฮโดรเจน

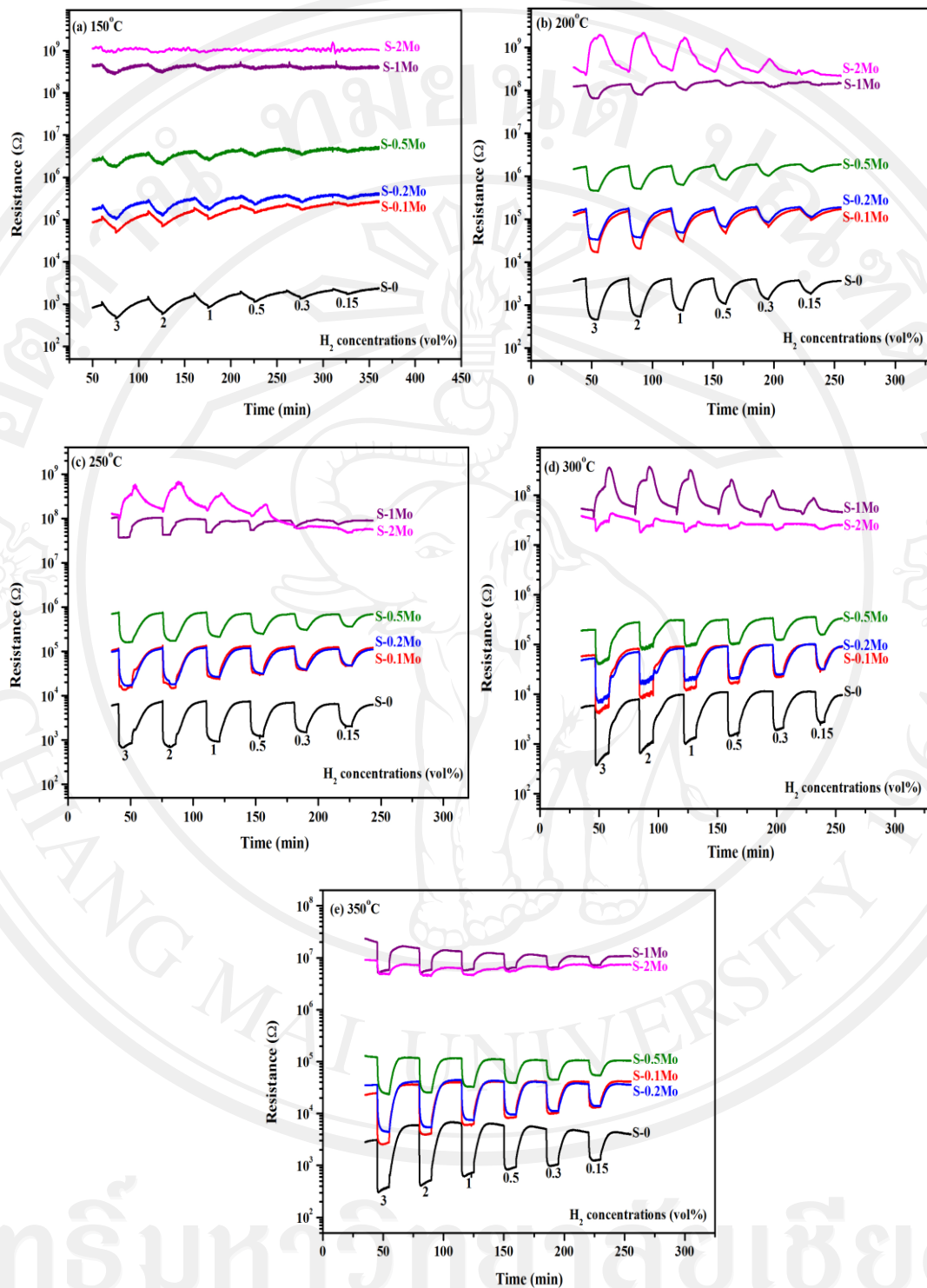
##### 4.3.2.2.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิค่าหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของเซนเซอร์ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (1.5-3 vol%) จากรูป 4.48 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนดีบุกออกไซด์และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปย์ไพโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสม และไม่ใช่ว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

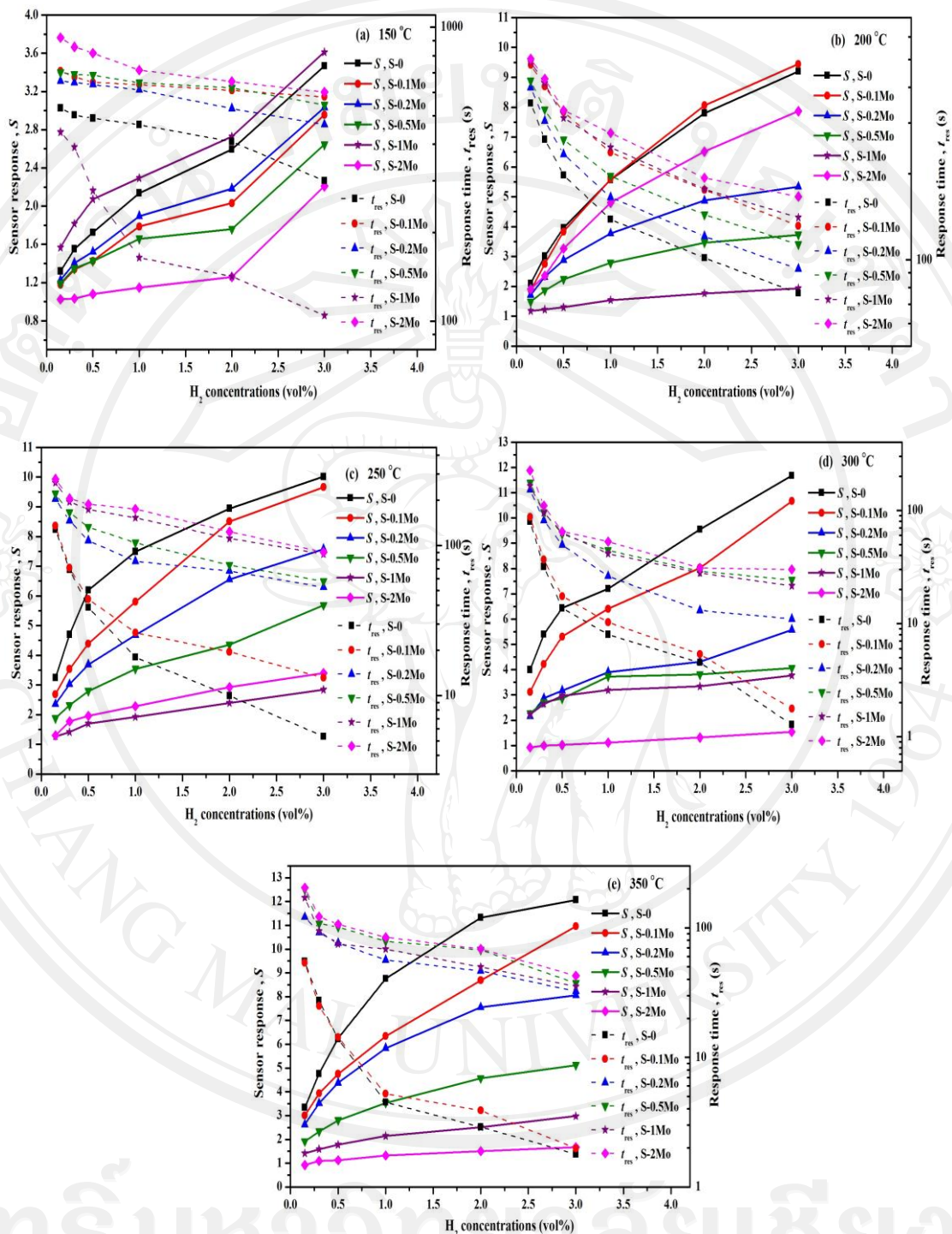
##### 4.3.2.2.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สไฮโดรเจน ที่ความเข้มข้นต่ำมากในช่วง 1.5-3 vol% โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.48 และ 4.49 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎี แสดงดังรูป 4.48 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของ

แก๊สมาทำปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.49 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสูงขึ้น การตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้มีความไวในการตอบสนองค่อนข้างต่ำ เพราะว่ามีปริมาณแก๊สที่ใช้ในการทดสอบนั้นมีความเข้มข้นออกจากถังมาค่อนข้างเยอะคือ 3 vol% แต่ผลการตอบสนองนั้นยังไม่ดีเท่าที่ควร โดยจากผลการทดสอบพบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 3 vol% มีการตอบสนองความไวประมาณ 10.5 ( $S=10.5$ ) และเวลาในการตอบสนองประมาณ 2 วินาทีที่ความเข้มข้น 0.1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ของโมลิบดีนัม โดยแนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนั่นเองแต่เมื่อเทียบกับค่าการตอบสนองของทินไดออกไซด์บริสุทธิ์แล้วพบว่า การตอบสนองต่อเซนเซอร์ไฮโดรเจนจะมีค่าการตอบสนองที่ดีกว่าคือ 12 ( $S=12.5$ ) ซึ่งเป็นข้อสรุปที่ได้คืออีกว่าเซนเซอร์ที่เจือด้วยแมงกานีสในเงื่อนไขการทดสอบเดียวกันนั้นมีการตอบสนองต่อเซนเซอร์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในแก๊สไฮโดรเจน โดยค่าการตอบสนองที่ได้นั้นมีค่ามากกว่า 3-4 เท่าตัวเพราะฉะนั้นจึงพอสรุปได้ว่า เซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมจะตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนได้ไม่ดำนักเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยแมงกานีส



รูป 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน ที่ความเข้มข้น 1.5-3 vol% ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนที่ความเข้มข้น 1.5-3 vol% ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ

#### 4.3.2.3 แก๊สเอทานอล

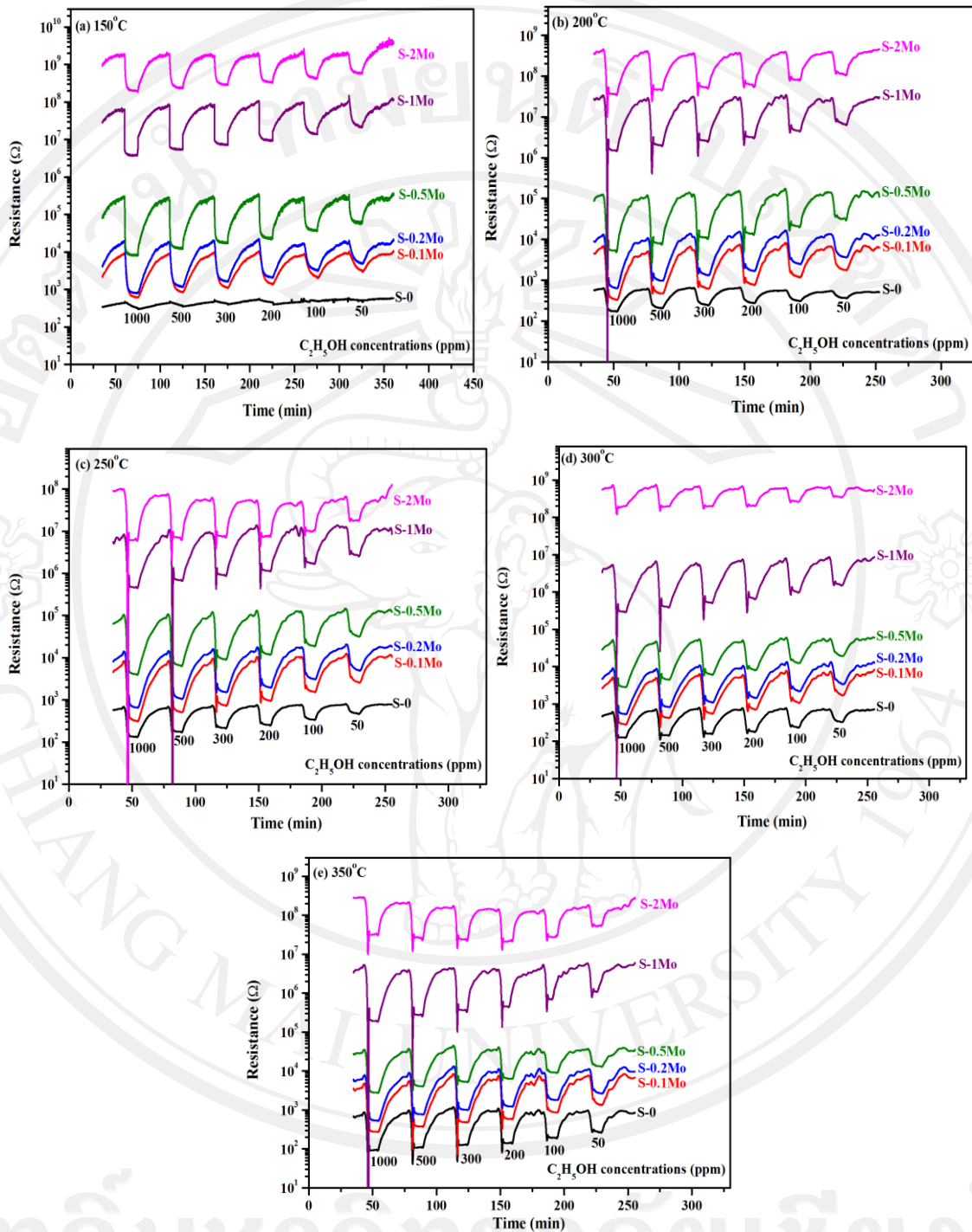
##### 4.3.2.3.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิค่าหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของเซนเซอร์ต่อแก๊สเอทานอล (50-1,000 ppm) จากรูป 4.50 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนดีบุกออกไซด์และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปย์ไพโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสม และไม่ใช่ว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการสื่อสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

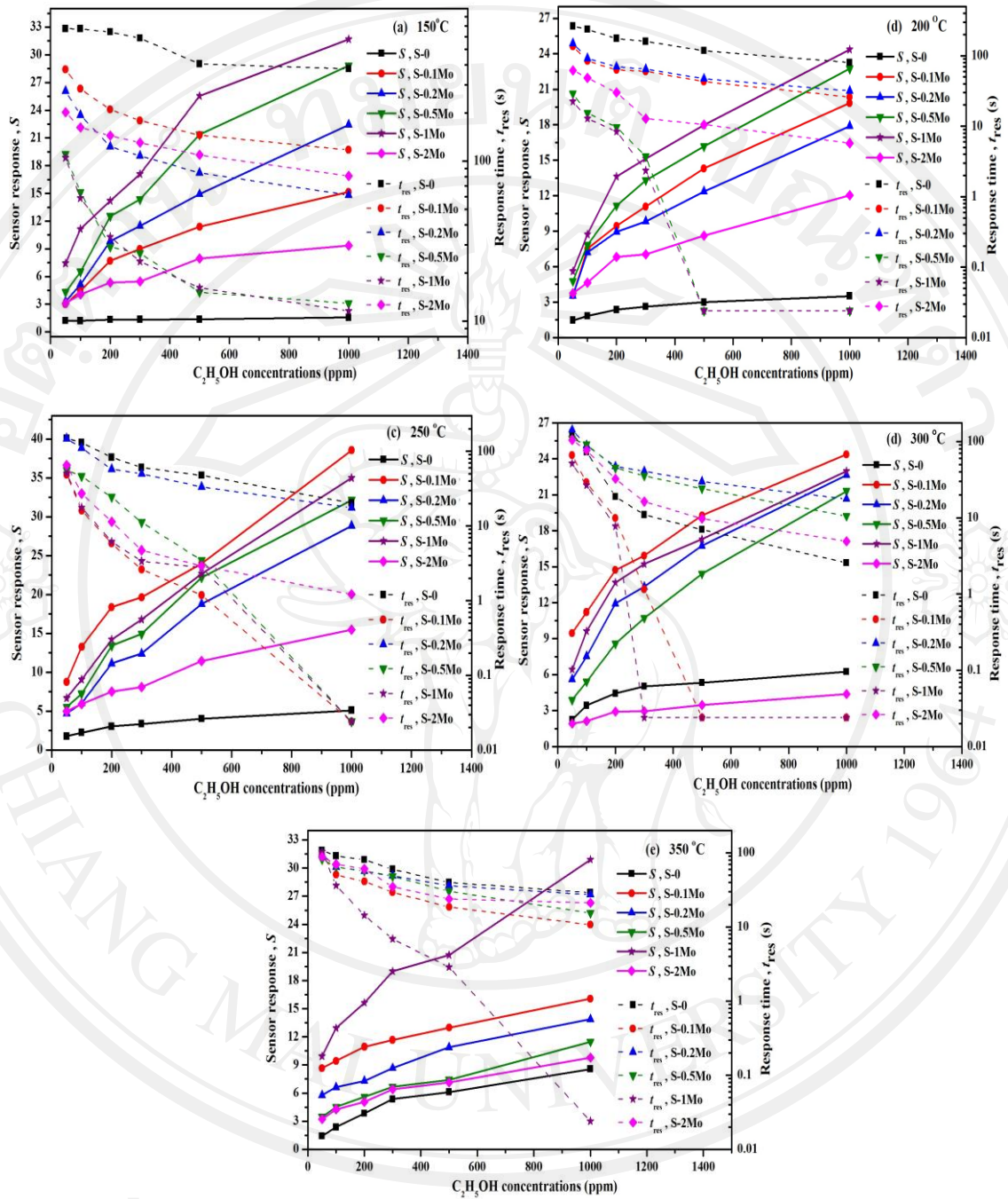
##### 4.3.2.3.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สเอทานอล ที่ความเข้มข้นต่ำในช่วง 50-1,000 ppm โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสดังรูป 4.50 และ 4.51 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎีแสดงดังรูป 4.50 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของแก๊สมาทำ

ปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.51 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สเอทานอลสูงขึ้น การตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้มีความไวในการตอบสนองค่อนข้างสูง โดยจากผลการทดสอบพบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 1,000 ppm มีการตอบสนองความไวประมาณ 39.5 ( $S=39.5$ ) และเวลาในการตอบสนองประมาณ 0.2 วินาทีที่ความเข้มข้น 0.1 ร้อยละโดยน้ำหนัก ของโมลิบดีนัม โดยแนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยผลจากการทดสอบในส่วนนี้เป็นไปตามทฤษฎี แต่หลังจากการทำทดสอบเซนเซอร์แล้ว พบว่าค่าการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียสยังมีการตอบสนองได้ดีโดยค่าการตอบสนองอยู่ที่ประมาณ 30 ( $S\sim 30$ ) ซึ่งถ้าหากเราสังเกตดีๆจะพบว่าถ้าเราทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำลงไปนั้นเซนเซอร์อาจจะตอบสนองอยู่ก็เป็นได้ โดยถ้าหากเราลดพิสัยของอุณหภูมิในการทดสอบเซนเซอร์ลงแล้ว อาจจะพบว่าเซนเซอร์ที่ไนโคออกไซด์ที่เจือด้วยโมลิบดีนัมอาจจะใช้งานได้จริงที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจจะนำไปถึงการพัฒนาในรูปแบบของการใช้งานได้จริงต่อไปซึ่งเซนเซอร์ที่เจือสารในกลุ่มโลหะทรานซิชันลงไปนั้นทั้งสองชนิดไม่ว่าจะเป็น โมลิบดีนัม หรือ แมงกานีสนั้นจะตอบสนองต่ออุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงคือ 350 องศาเซลเซียสในเกือบทุกแก๊สที่ทดสอบ โดยถ้าเราสามารถลดอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุดได้ ก็สามารที่จะนำไปใช้งานได้จริง



รูป 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิคงรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล ที่ความเข้มข้น 50-1,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ความเข้มข้น 50-1,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



#### 4.3.2.4 แก๊สแอมโมเนีย

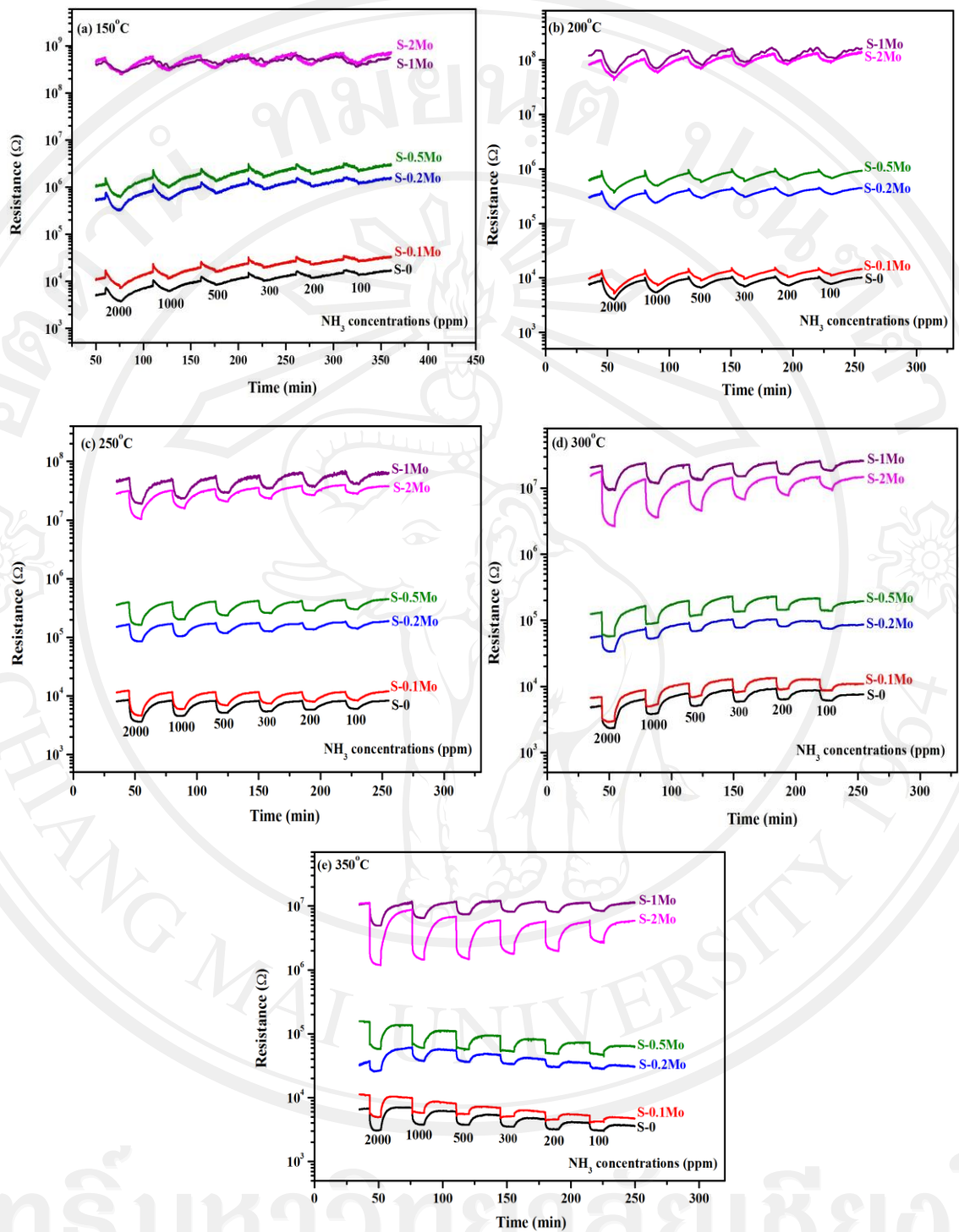
##### 4.3.2.4.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิต่ำหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของเซนเซอร์ต่อแก๊สแอมโมเนีย (100-2,000 ppm) จากรูป 4.52 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนดีบุกออกไซด์และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปย์ไพโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสม และไม่ใช่ว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

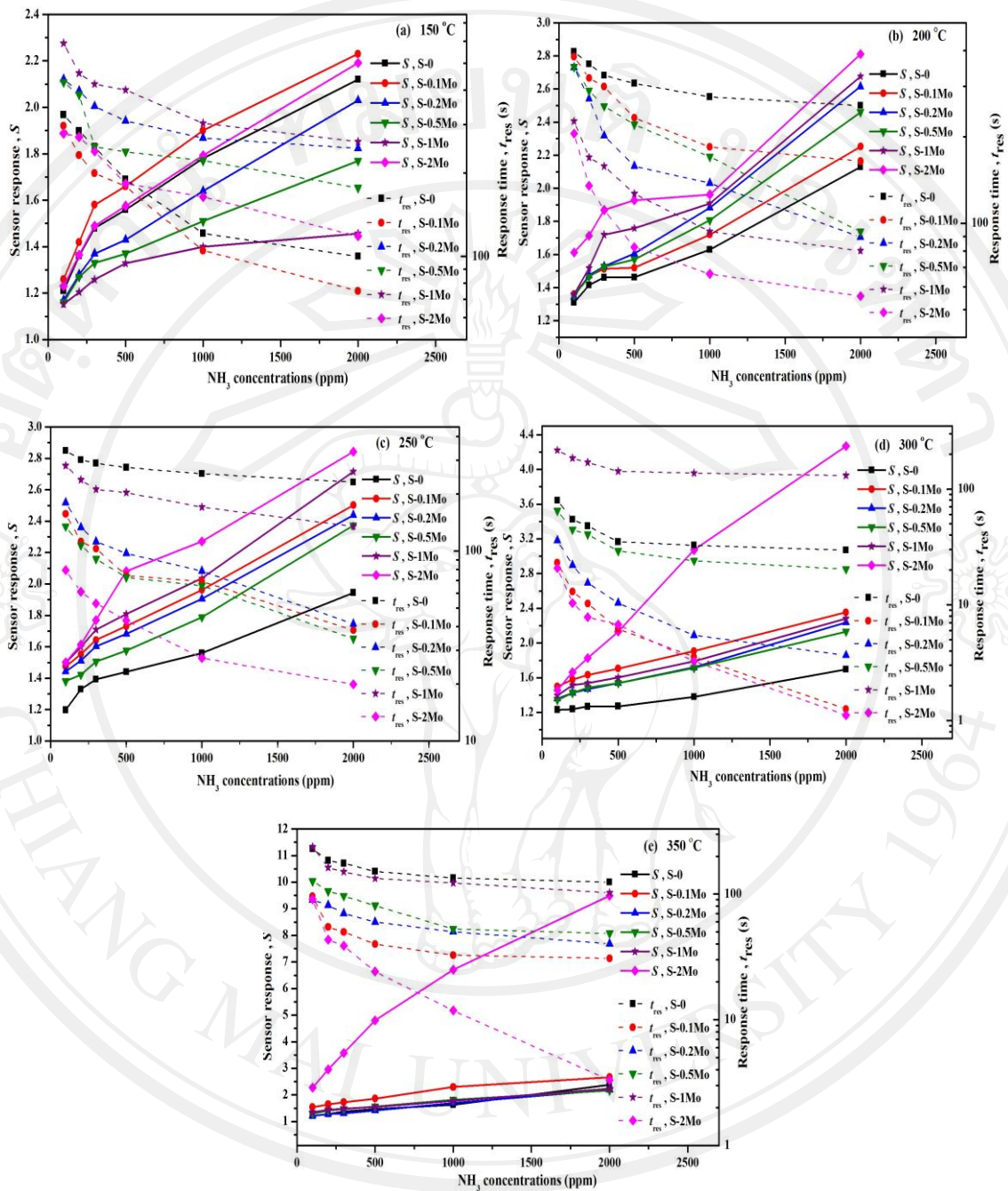
##### 4.3.2.4.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนีย

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สแอมโมเนีย ที่ความเข้มข้นต่ำมากในช่วง 100-2,000 ppm โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.52 และ 4.53 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎี แสดงดังรูป 4.52 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของ

แก๊สมาทำปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.53 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สแอมโมเนียสูงขึ้น การตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้มีความไวในการตอบสนองค่อนข้างต่ำ โดยจากผลการทดสอบพบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 2,000 ppm มีการตอบสนองความไวประมาณ 9.7 ( $S=9.7$ ) และเวลาในการตอบสนองประมาณ 3 วินาทีที่ความเข้มข้น 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของโมลิบดีนัม โดยแนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยผลจากการทดสอบในส่วนนี้เป็นไปตามทฤษฎี โดยในทั้งสารในกลุ่มโลหะทรานซิชันทั้งสองชนิดที่เจอลงไปในตัวไดออกไซด์เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์นั้น ไม่สามารถตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียได้ดีทั้งคู่โดยค่าการตอบสนองนั้นสามารถยืนยันได้ว่าตัวเจอทั้งสองชนิดไม่ค่อยมีผลต่อการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียสักเท่าไร



รูป 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100-2,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



รูป 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิคงรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100-2,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ

#### 4.3.2.5 แก๊สอะซิโตน

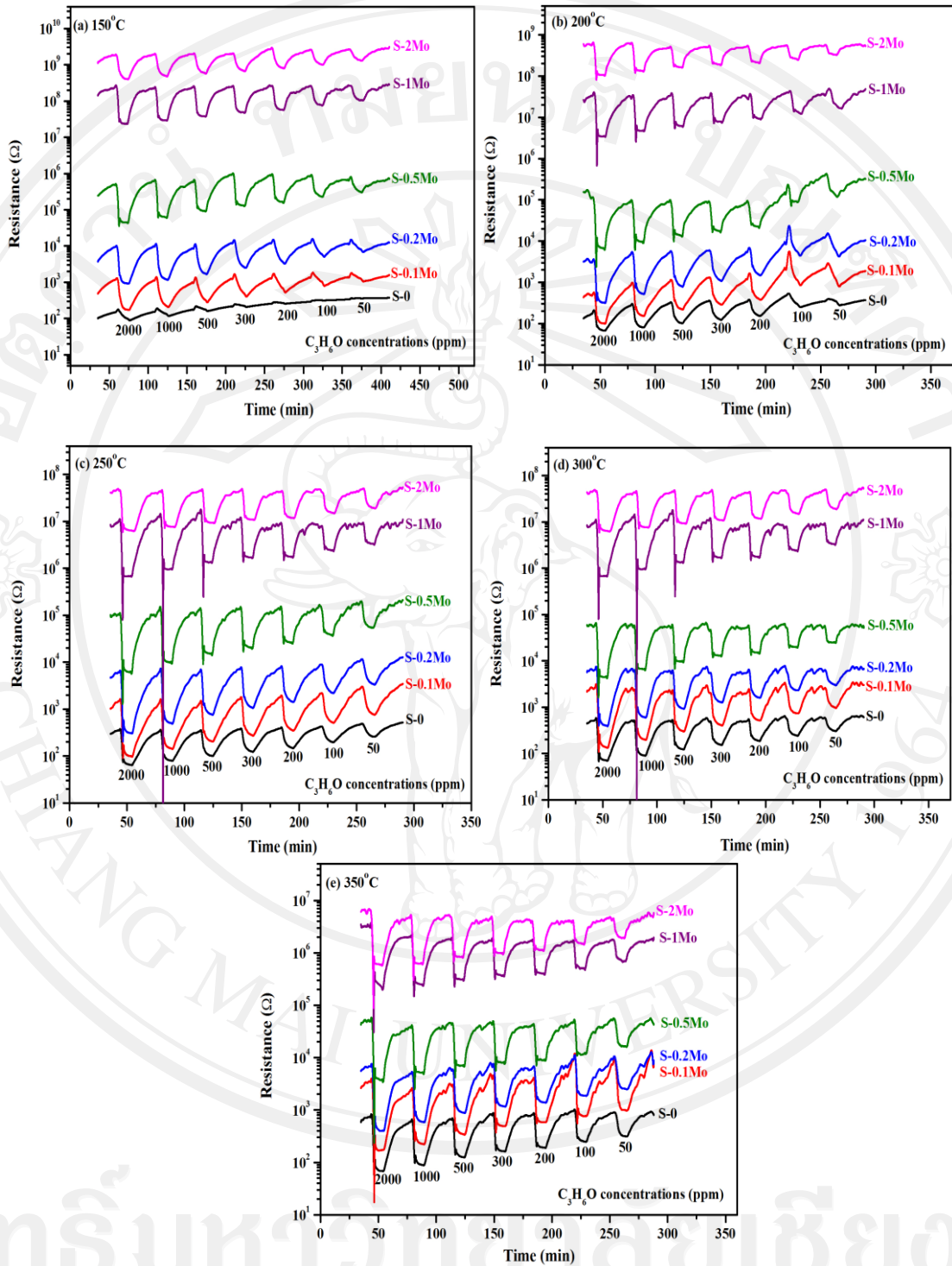
##### 4.3.2.5.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์แก๊สชนิดต่างๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบ เซนเซอร์แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิต่ำ และ บางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของเซนเซอร์ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิค่าหนึ่ง จากการทดลอง ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแก๊สในช่วงความเข้มข้นสูงและความเข้มข้นต่ำ พบว่า สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของเซนเซอร์ต่อแก๊สอะซิโตน (50-2,000 ppm) จากรูป 4.54 โดยเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนดีบุกออกไซด์และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปย์ไฟโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่านี้หรือต่ำกว่านี้ พบว่าการตอบสนองจะมีค่าต่ำกว่า ซึ่งถือว่าไม่เหมาะสมและไม่ใช่ว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทดสอบของการตอบสนอง การวิเคราะห์รูปแบบการตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างๆ นี้ จะสามารถช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการตอบสนองเพื่อที่จะนำไปพัฒนาในส่วนของการเจือสารที่มีผลช่วยลดอุณหภูมิในการตอบสนองได้ดีขึ้นเมื่อต้องการพัฒนาเซนเซอร์ต่อไปในอนาคต

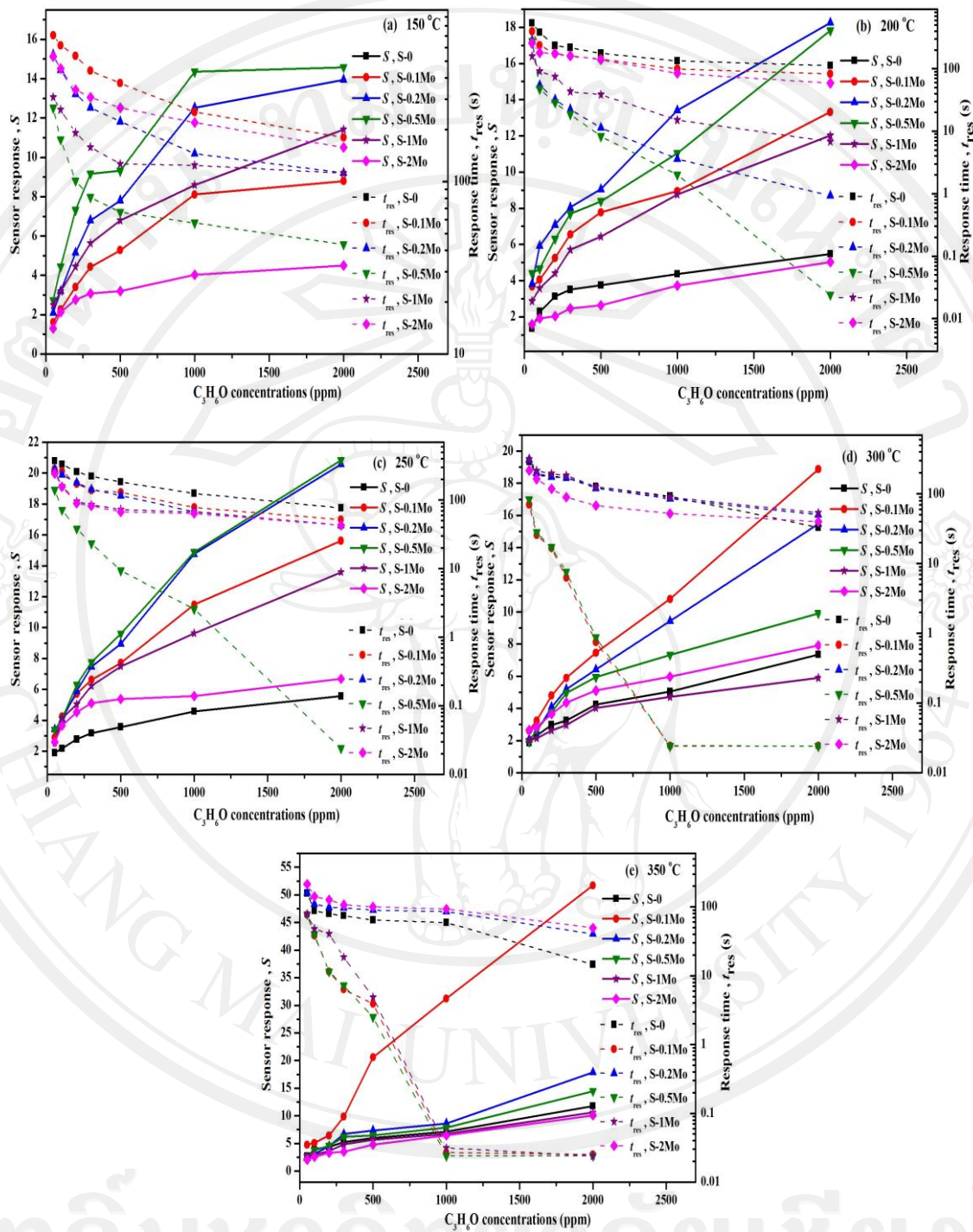
##### 4.3.2.5.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตน

ในการทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์ ได้ทำการทดสอบกับแก๊สอะซิโตน ที่ความเข้มข้นต่ำมากในช่วง 50-2,000 ppm โดยใช้เซนเซอร์ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และที่เจือด้วยโมลิบดีนัมในปริมาณ 0.1-2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่เซนเซอร์สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าการตอบสนองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.54 และ 4.55 ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดสภาพการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงตามทฤษฎี แสดงดังรูป 4.54 พบว่า การลดต่ำลงของความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลของ

แก๊สมาทำปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ดังรูป 4.55 สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สอะซิโตนสูงขึ้น การตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้มีความไวในการตอบสนองค่อนข้างสูง โดยจากผลการทดสอบพบว่าที่ค่าความเข้มข้นสูงสุด 2,000 ppm มีการตอบสนองความไวประมาณ 52 ( $S=52$ ) และเวลาในการตอบสนองประมาณ 0.2 วินาทีที่ความเข้มข้น 2 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ของโมลิบดีนัม โดยแนวโน้มเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีค่าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีโมเลกุลแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยามากขึ้นเช่นกัน ซึ่งแสดงถึงปัจจัยทางด้านเซนเซอร์ดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยจากผลการทดสอบพอสรุปได้ว่าการตอบสนองในส่วนของตัวเชื้อโมลิบดีนัมนั้นค่าการตอบสนองต่อเซนเซอร์ชนิดนี้ ดีกับแก๊สจำพวกแก๊สในกลุ่มที่เป็นกลุ่มแก๊สสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้เพราะค่าการตอบสนองนั้นสูงที่สุดในการทดสอบกับแก๊สทั้งสี่ชนิด



รูป 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คือ อุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตน ที่ความเข้มข้น 50-2,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



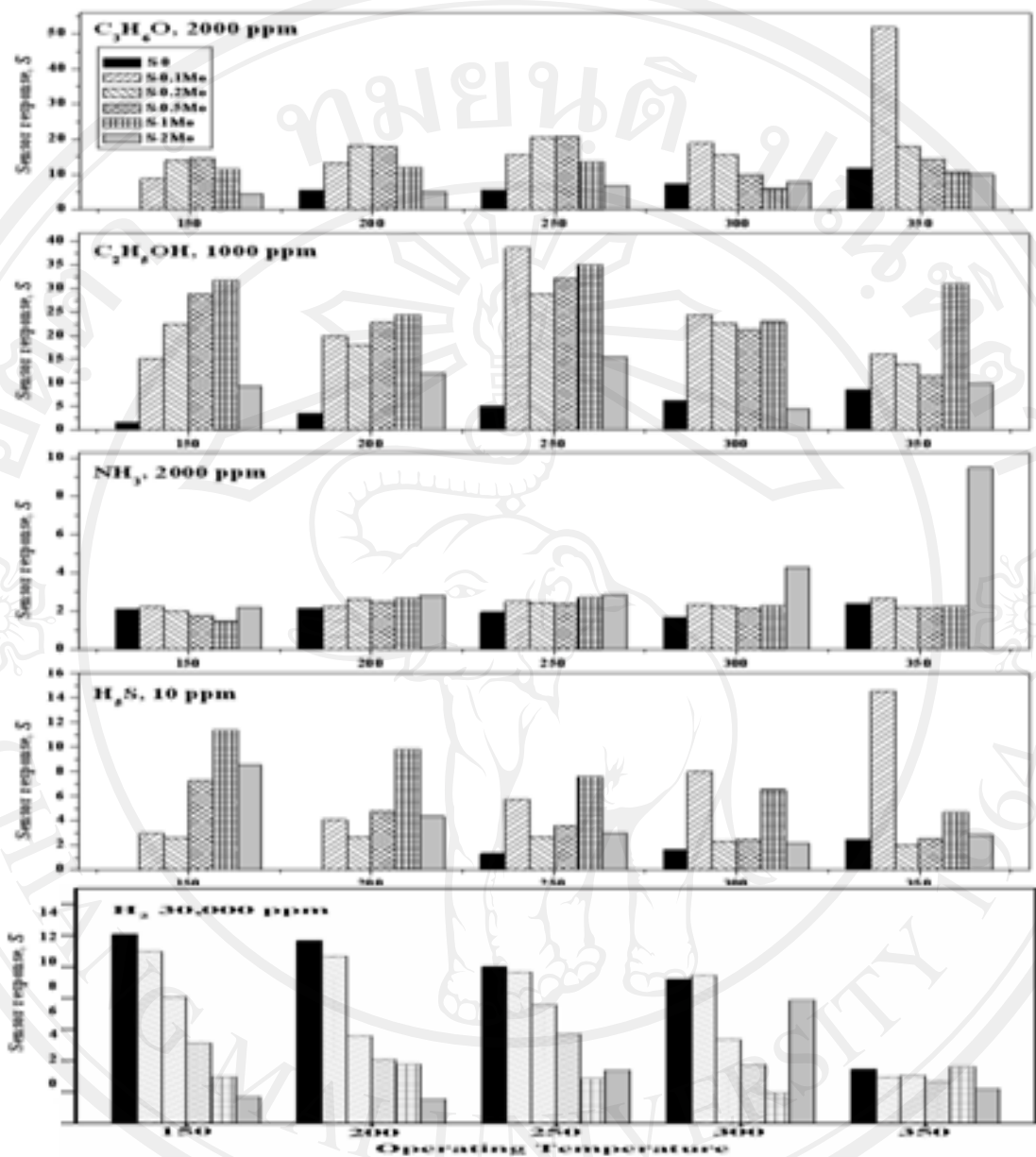
รูป 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและเวลาในการตอบสนองต่ออุณหภูมิดังรูปเรียงตามตัวอักษร (a-e) คืออุณหภูมิ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สอะซิโตนที่ความเข้มข้น 50-2,000 ppm ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้นของแก๊ส ภายใต้สภาวะบรรยากาศ



### 4.3.3 การคัดสรรจำเพาะต่อแก๊สภาวะแวดล้อม

#### 4.3.3.1 เซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยโลหะโมลิบดีนัม

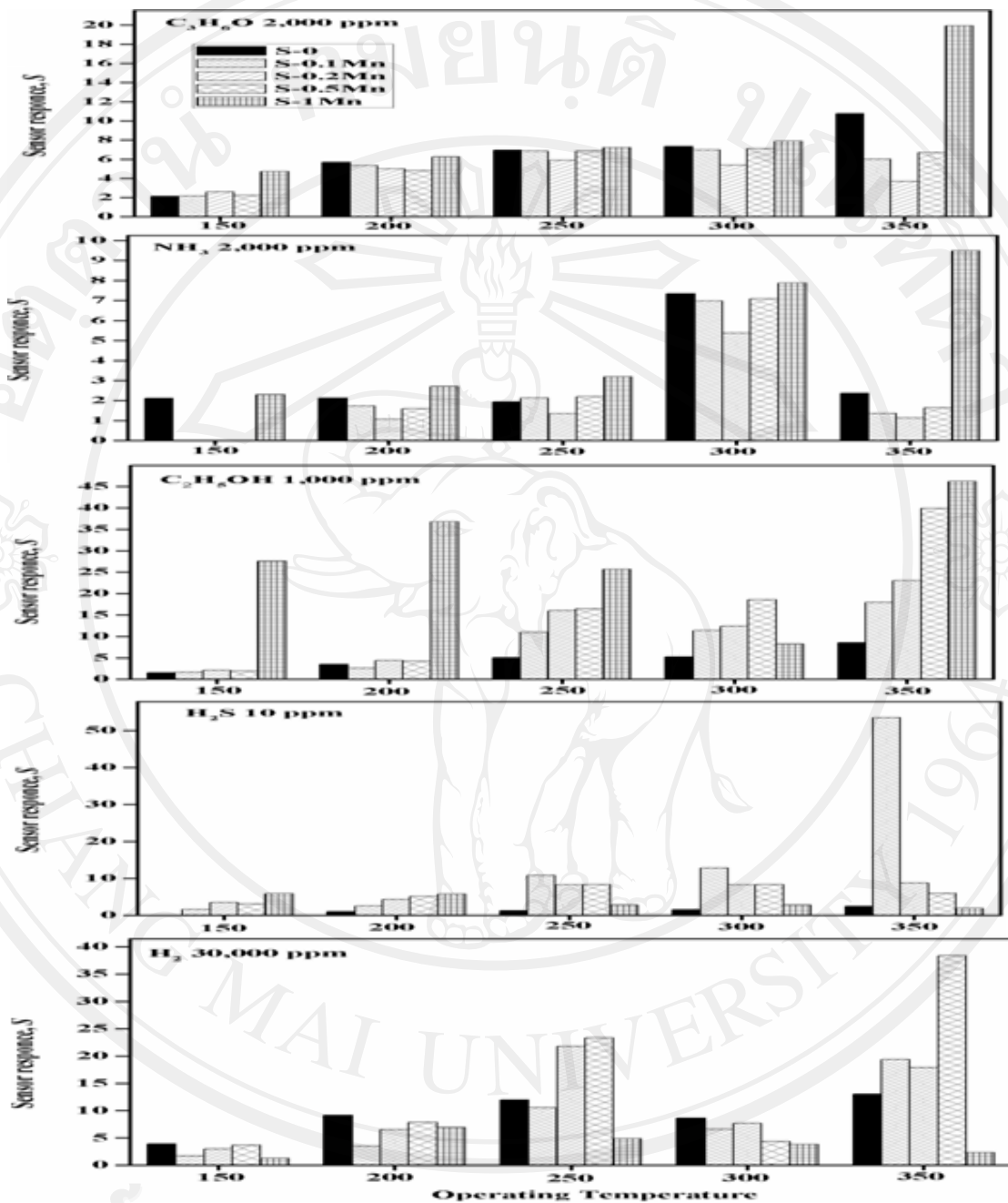
จากการวิเคราะห์ความสามารถของเซนเซอร์ในรูปแบบการคัดสรรจำเพาะนั้น แสดงดังรูป 4.56 ได้ทำการเปรียบเทียบสภาพความไวในการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ เจือด้วยโลหะโมลิบดีนัมที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.5, 1 และ 2 ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อแก๊สภาวะแวดล้อม 5 ชนิด และที่ความเข้มข้นของแก๊สต่างชนิดกัน เพื่อเปรียบเทียบกับแก๊สในกลุ่มเดียวกันคือ แก๊สในกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยได้ ได้แก่ อะซิโตน และ เอทานอล และในกลุ่มแก๊สพิษ ได้แก่ แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ รวมไปถึงแก๊สในกลุ่มที่ติดไฟได้ พบว่า การตอบสนองของเซนเซอร์ที่มีการเจือด้วยโลหะโมลิบดีนัมปริมาณ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อแก๊สอะซิโตนนั้น มีค่าสภาพความไวสูงสุดอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับแก๊สประเภทอื่นๆ ซึ่งมีค่าการตอบสนองอยู่ในช่วง 1-40 ในขณะที่การตอบสนองที่ความเข้มข้นในการเจือโลหะโมลิบดีนัม 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนักนั้นมีการตอบสนองมากกว่า 50 ดังนั้นเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะโมลิบดีนัมปริมาณ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับแก๊สภาวะแวดล้อมชนิดอะซิโตนได้



รูป 4.56 การคัดสรรจำเพาะของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยโลหะโมลิบดีนัมปริมาณ 0.1-2 รั้อยละ โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สสถานะแวดล้อมชนิด อะซิโตน เอทานอล แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ภายใต้อุณหภูมิการทดสอบตั้งแต่ 150-350 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3.2 เซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยโลหะแมงกานีส

จากการวิเคราะห์ความสามารถของเซนเซอร์ในรูปแบบการคัดสรรจำเพาะนั้น แสดงดังรูป 4.57 ได้ทำการเปรียบเทียบสภาพความไวในการตอบสนองของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ และเจือด้วยโลหะแมงกานีสที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.5, และ 1 ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อแก๊สสถานะแวดล้อม 5 ชนิด และที่ความเข้มข้นของแก๊สต่างชนิดกัน เพื่อเปรียบเทียบกับแก๊สในกลุ่มเดียวกันคือ แก๊สในกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยได้ ได้แก่ อะซิโตน และ เอทานอล และในกลุ่มแก๊สพิษ ได้แก่ แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ รวมไปถึงแก๊สในกลุ่มดีไฟด์ ได้แก่ ไฮโดรเจน พบว่า การตอบสนองของเซนเซอร์ที่มีการเจือด้วยโลหะแมงกานีสปริมาณ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนักต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น มีค่าสภาพความไวสูงสุดอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับแก๊สประเภทอื่นๆ ซึ่งมีการตอบสนองในช่วง 1-40 ในขณะที่การตอบสนองที่ความเข้มข้นในการเจือแมงกานีส 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนักนั้นมีการตอบสนองมากกว่า 50 ดังนั้นเซนเซอร์ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะแมงกานีสปริมาณ 0.1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับแก๊สสถานะแวดล้อมชนิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้



รูป 4.57 การคัดสรรจำเพาะของเซนเซอร์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยโลหะแมงกานีสปริมาณ 0.1-1 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สภาวะแวดล้อมชนิด อะซิโตน เอทานอล แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ภายใต้อุณหภูมิการทดสอบตั้งแต่ 150-350 องศาเซลเซียส