

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

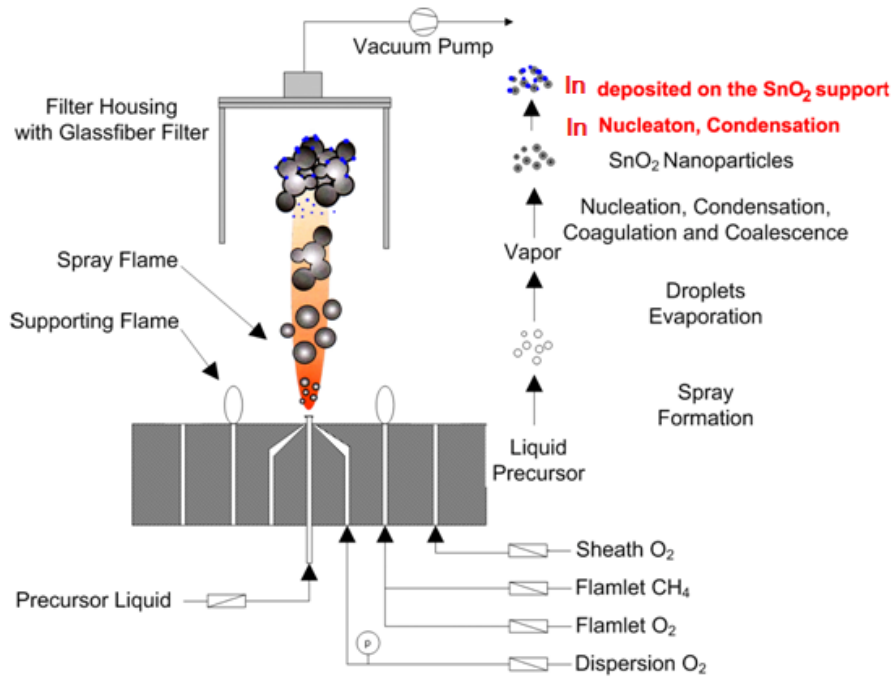
#### 4.1 สมบัติของอนุภาคนาโนและผงคอมโพสิต

##### 4.1.1 ผลจากการเตรียมอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส

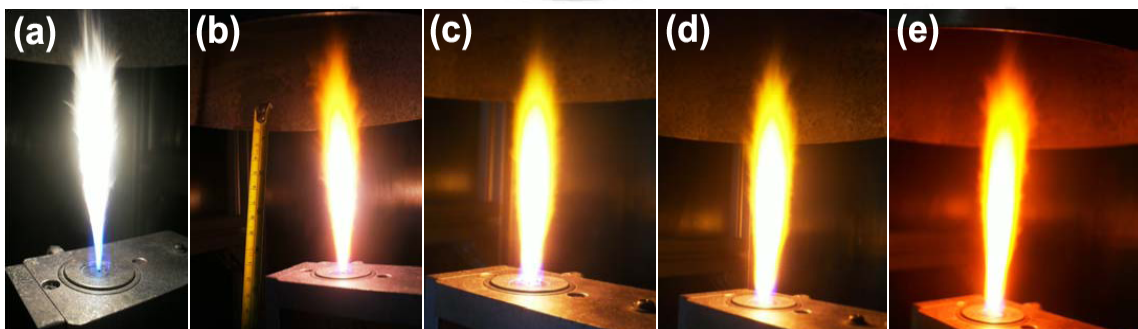
สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยอินเดียมนั้น ได้ทำการเตรียมสารละลายตั้งต้น โดยใช้ทินทูลเฮกซะโนเอทซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ตัวรองรับทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และใช้อินเดียมไนเตรทเป็นสารตั้งต้นของสารเจือในปริมาณต่างกันคือร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนักโดยสารตั้งต้นทั้งสองชนิดถูกละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดไฮดรอกซี สารละลายมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง และปราศจากการปนเปื้อนของน้ำและสารเคมีชนิดอื่น จากนั้นจึงนำสารละลายผสมเนื้อเดียวกันบรรจุในไซรินท์ หรือ กระจกชนิดสารละลายเพื่อพ่นเข้าไปในระบบการสังเคราะห์ เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดเปลวไฟได้ ในการสังเกตลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นพบว่าเมื่อทำการฉีดสารละลายตั้งต้นทินทูลเฮกซะโนเอทซึ่งละลายในตัวทำละลายไฮดรอกซี พบว่าเปลวไฟมีลักษณะที่ค่อนข้างเสถียรและสีที่สังเกตได้คือสีส้ม ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ ความสูงของเปลวไฟที่วัดได้มีความสูงประมาณ 10–12 เซนติเมตร ดังรูป 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 5/5 อัตราเร็วในการฉีดสารละลายตั้งต้นเข้าไปในระบบหน่วยเป็น มิลลิลิตรต่อนาที/อัตราเร็วในการพาแก๊สออกซิเจนซึ่งใช้ในการกระจายสารละลายตัวอย่างหน่วยเป็นลิตรต่อนาที

ในการสังเกตลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้น แสดงดังรูป 4.2 พบว่าเมื่อทำการฉีดสารละลายตั้งต้นภายใต้การเผาไหม้ความร้อนสูง เปลวไฟมีลักษณะที่ค่อนข้างเสถียร มีความตรง เกิดการแตกของเปลวไฟเพียงเล็กน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะการละลายที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันแตกต่างกันเมื่อมีปริมาณการละลายตัวของสารเจือและสารตั้งต้นในปริมาณที่แตกต่างกันไป และสีที่สังเกตได้จะแสดงลักษณะเฉพาะตัวของการเจือด้วยธาตุและปริมาณที่แตกต่างกันไป นั่นคือสำหรับไฮดรอกซีบริสุทธิ์จะสังเกตว่ามีลักษณะเปลวไฟสีขาวใส ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของตัวทำละลายชนิดไฮดรอกซี แต่เมื่อมีการผสมด้วยสารละลายตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ พบว่า เปลวไฟมีสีเหลืองส้มและเมื่อมีการเจือด้วยอินเดียมในปริมาณสูงขึ้นจากร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนักนั้น เปลวไฟจะมีสีที่เข้มขึ้นจากสีเหลืองส้มอ่อน กลายเป็นสีเหลืองส้มเข้ม ใกล้เคียงกับสีส้มแดงซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของอินเดียมและค่าเอนทัลปีของการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นด้วยการผสมสารละลายตั้งต้นและตัวเจือนั่นเอง

อีกทั้งยังมีความสอดคล้องทางด้านทฤษฎีและผลงานที่มีมาก่อนอย่างชัดเจน สำหรับผลการสังเคราะห์ จากกระบวนการเฟลมสเปรย์ไฟโรลิซิส ผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์มีสีขาว และมีเมื่อมีการเจือด้วยอินเดียมในปริมาณที่แตกต่างกัน ปรากฏว่าผงละเอียดยังคงมีสีขาวไม่เปลี่ยนแปลงไปจากทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพของวัสดุทั้งสองชนิด โดยในธรรมชาติมักเกิดเป็นสีขาว ดังรูป 4.2



รูป 4.1 ขั้นตอนการก่อตัวของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการพ่นสารละลายตั้งต้นทินทอเทิลเฮกซะโนเอทละลายในตัวทำละลายไซลีน



รูป 4.2 ลักษณะของเปลวไฟที่เกิดการพ่น (a) ตัวทำละลายชนิดไซลีนบริสุทธิ์และสารละลายตั้งต้นทินทอเทิลเฮกซะโนเอทผสมกับสารเจือชนิดอินเดียมในอัตราในตัวทำละลายไซลีนเพื่อสังเคราะห์ (b) ทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมความเข้มข้นร้อยละ (c) 0.2 (d) 0.5 และ (e) 1 โดยน้ำหนัก



รูป 4.3 ผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยอินเดียมในปริมาณการเจือร้อยละ 0.2, 0.5 และ 1 โดยน้ำหนัก

#### 4.1.2 ผลการก่อตัวระหว่างตัวรองรับและตัวเจือ

ระบบไบนารีไอโซมอร์ฟัส (binary isomorphous system) หรือสารละลายของแข็งสององค์ประกอบ (binary solid solution) คือระบบที่ธาตุสองชนิดละลายเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของฮูม-โรเธอรี (Hume-Rothery Rules) ที่กล่าวว่า

1. โครงสร้างผลึกของธาตุแต่ละชนิดต้องเหมือนกัน
2. ขนาดของอะตอมของธาตุทั้งสองต้องไม่ต่างกันเกินกว่าร้อยละ 15
3. ธาตุทั้งสองต้องมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีไม่ต่างกันมากนัก
4. ธาตุทั้งสองควรมีจำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดเท่ากัน

จากกฎของฮูม-โรเธอรี (Hume-Rothery) เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุทินและตัวเจืออินเดียมและกราฟีน(C) แสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.1 ค่าต่างๆประกอบการพิจารณาการก่อตัวของตัวรองรับและตัวเจือ

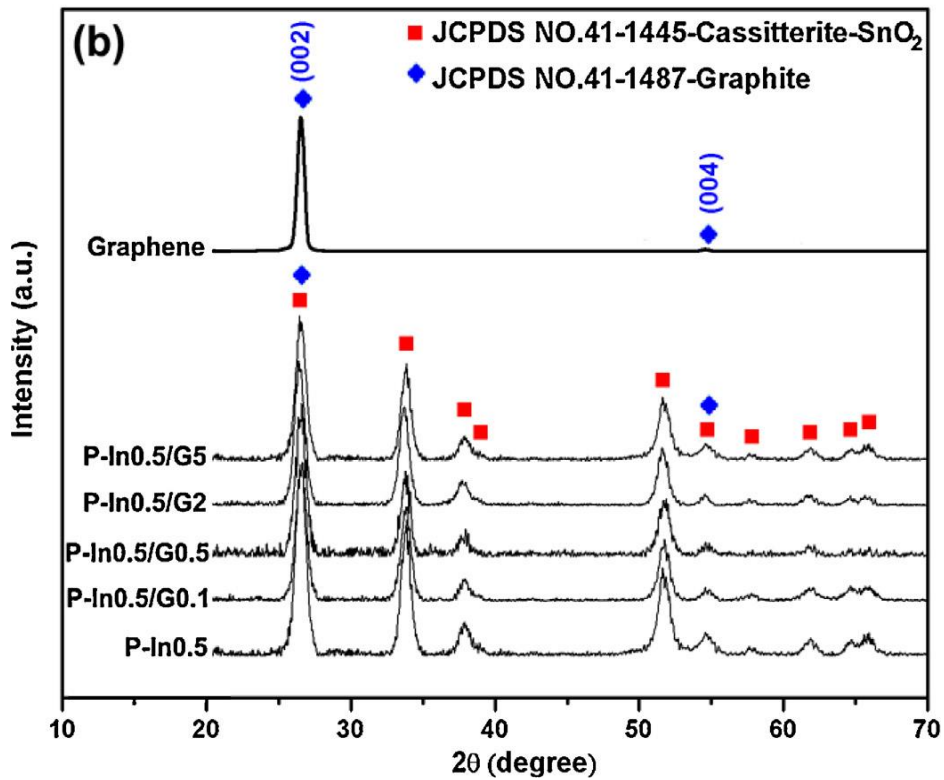
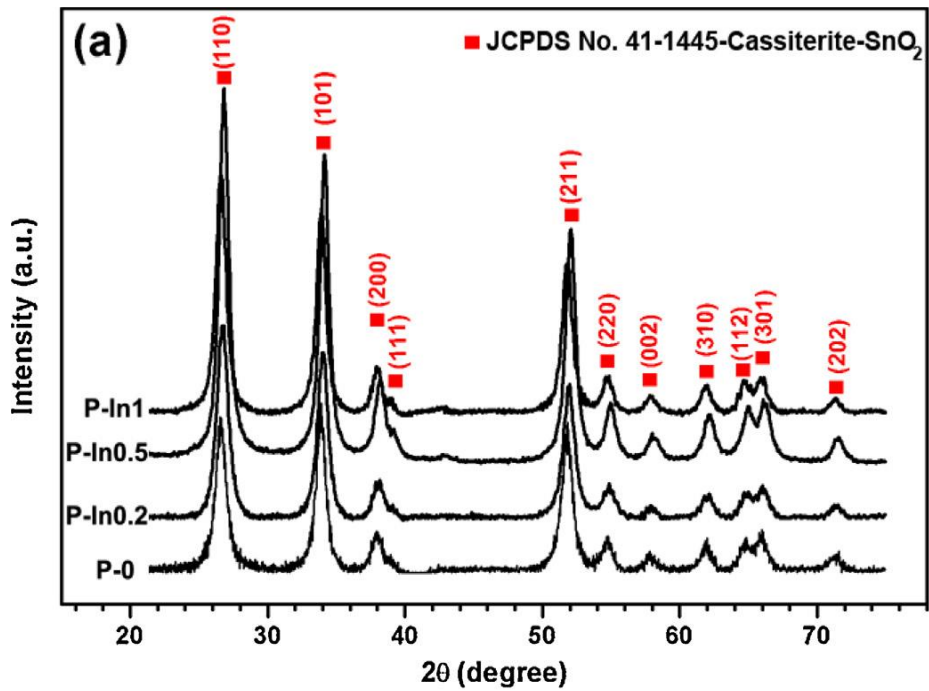
	Sn	In	C
โครงสร้างผลึก	Tetragonal	Tetragonal	Hexagonal
รัศมีอะตอม	145 pm	155 pm	27-500 $\mu\text{m}$
สถานะออกซิเดชัน	4, 2	+3 (+2, +1)	-4, -2, +4
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.96 (พอลิงสเกล)	1.78 (พอลิงสเกล)	2.55 (พอลิงสเกล)
เวเลนซ์อิเล็กตรอน	2, 8, 18, 18, 4	2, 8, 18, 18, 3	2, 4

จากการวิเคราะห์ลักษณะของการก่อตัวของตัวเจืออนุภาคอินเดียมต่ออนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ พบว่า ทินกับอินเดียมคาดว่าจะเป็นส่วนละลายของแข็งเนื่องจากตัวทำละลายและตัวละลายมีโครงสร้างผลึกเหมือนกัน รัศมีอะตอมของตัวเจืออินเดียมมีรัศมีอะตอมใหญ่กว่าอนุภาคทินซึ่งเป็นตัวรองรับมีรัศมีอะตอมต่างกันร้อยละ 6.45 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 15 สามารถแทนที่ได้ทั้งหมดหรือแทนที่ได้บางส่วนอีกทั้งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกันร้อยละ 9.18 มีสภาพไฟฟ้าลบ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน และวาเลนซ์อิเล็กตรอนใกล้เคียงกันคุณสมบัติของธาตุส่วนใหญ่แล้วสอดคล้องกับกฎของฮูม-โรเธอร์ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อนุภาคอินเดียมสามารถเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างผลึกของทินไดออกไซด์ได้ ในส่วนของธาตุทินกับกราฟีน จะเห็นว่ารัศมีอะตอมต่างกันเกินร้อยละ 15 อีกทั้งยังมีโครงสร้างผลึกและค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่างกันมาก ดังนั้นอนุภาคทินไดออกไซด์ไม่สามารถเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างผลึกกราฟีนได้ อาจจะมีการเกาะรอบๆบริเวณผิวของแผ่นกราฟีนเท่านั้น

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้น จะเป็นการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่เตรียมได้โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ซึ่งจะนำไปเป็นวัสดุหลักที่สำคัญในการประดิษฐ์ตัวรับรู้เพื่อทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สทดสอบ อีกทั้งยังจะทดสอบในส่วนของความเสถียรภาพของตัวรับรู้จากเครื่องมือที่ทำการประดิษฐ์ได้ด้วยโดยใช้ความต่างศักย์ 20 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 20 มิลลิแอมป์ และอัตราเร็วในการส่งกราดคือ 10 องศาต่อนาทีสำหรับการวิเคราะห์ผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนักที่เตรียมได้โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส รูป 4.4 (a) พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีลักษณะพีกที่เด่นชัด มีความเป็นผลึกสูง และเมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานจากข้อมูล JCPDS (Joint Committee Powder Diffraction Standard) พบว่าจะสอดคล้องกับหมายเลข 41–1445 โดยผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสนั้น ปรากฏเฟสหลักที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 26.5285, 33.8017, 37.8478 และ 51.7897 เป็นต้น ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยพจนานาโนทินไดออกไซด์สอดคล้องกับระนาบหลักคือ (1 1 0), (1 0 1), (2 0 0) และ (2 1 1) ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า ปรากฏเป็นเฟสของทินไดออกไซด์ชนิดคาสติเทอร์ไรต์ ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการเปรียบเทียบกับเส้นสเปกตรัมมาตรฐานใน JCPDS และมากกว่านั้น พบว่าไม่ปรากฏพีกของสารเจือชนิดอินเดียมแต่อย่างใด สาเหตุเนื่องจาก ปริมาณของการเจือมีค่าต่ำเกินไปที่รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะตรวจพบ อีกทั้ง อินเดียมมีการก่อตัวเป็นส่วนละลายของแข็งในเมทริกทินไดออกไซด์ ตามหลักการเชอเรอร์ (Sherrer's equation) ซึ่งการ





รูป 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ (a) ฟงนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมในระดับการเจือแตกต่างกัน (P-0 ถึง P-In1) และ (b) ฟงนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักโหลดด้วยกราฟีนในปริมาณที่แตกต่างกัน (P-In0.5/G0.1 ถึง P-In0.5/G5)

#### 4.1.4 สเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์

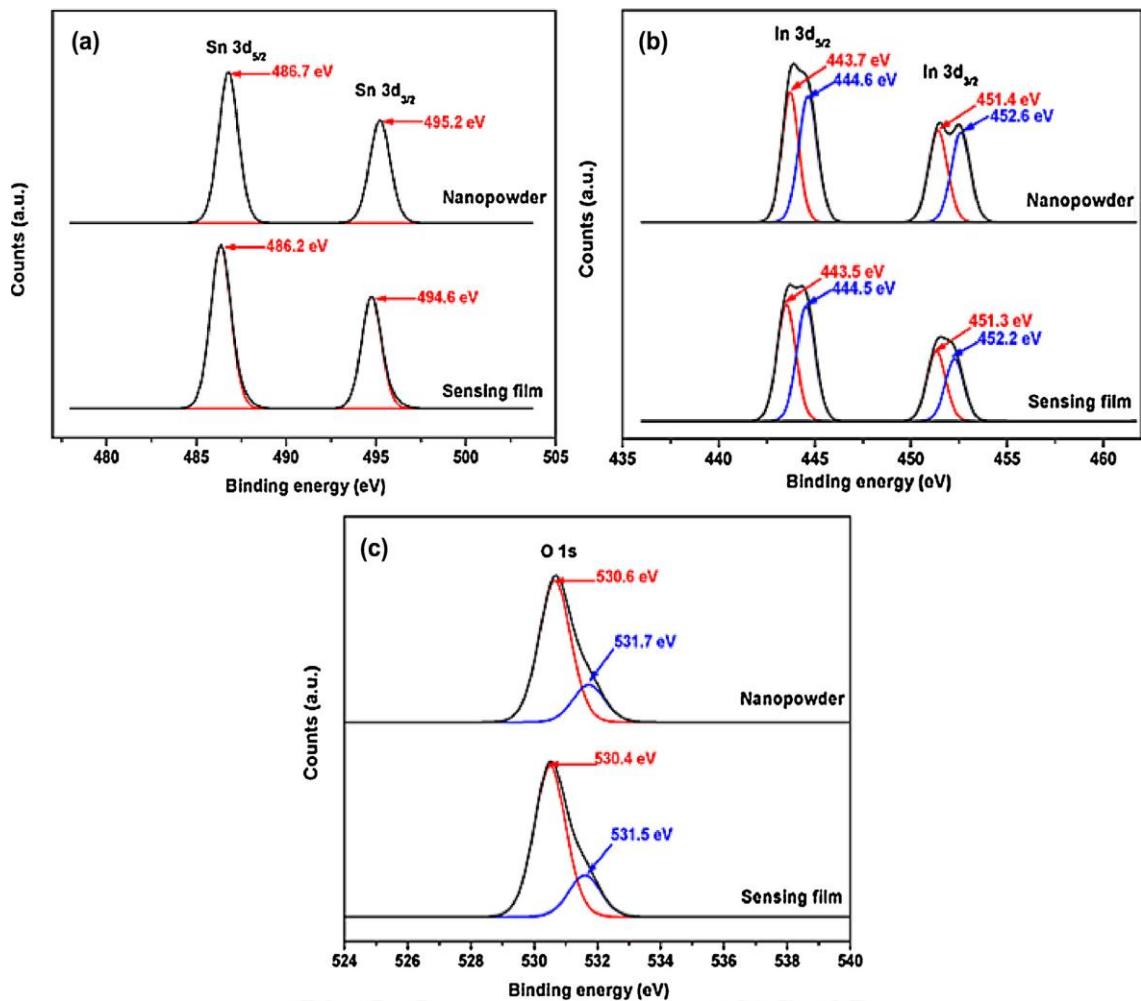
จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) และจำนวนนับของปริมาณความเข้ม (counts (a.u.)) ของผงนาโนและตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่า พบพีกของธาตุ อินเดียม, ออกซิเจน, และดีบุก ของผงนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (P-In1) และฟิล์มตอบสนอง (S-In1) หลังจากการหลอมและการทดสอบแก๊สพีกของดีบุก รูป 4.5.(a) แสดง Sn  $3d_{5/2}$  และ Sn  $3d_{3/2}$  ของ P-In1 เป็นพีกแหลมที่พลังงานยึดเหนี่ยว 486.7 และ 495.2 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ในขณะที่พีกที่สอดคล้องกันของตัวรับรู้ S-In1 มีการเลื่อนเล็กน้อยมาอยู่ที่ระดับพลังงาน 486.2 และ 494.6 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ความแตกต่างของตำแหน่งพีกไม่มีนัยสำคัญ สามารถกำหนดสถานะออกซิเดชันของ Sn<sup>4+</sup> ที่มีการก่อตัวเป็นสารประกอบทินไดออกไซด์ [83]

สำหรับสำหรับองค์ประกอบธาตุอินเดียมรูป 4.5.(b) พีก In3d (In  $3d_{5/2}$  และ In  $3d_{3/2}$ ) สามารถจำแนกออกเป็นสองพีกที่ประกอบไปด้วยพีกหลักและพีกรองที่ระดับพลังงานที่สูงขึ้นแสดงให้เห็นการปรากฏตัวของธาตุอินเดียม 2 ชนิดที่มีเลขออกซิเดชันที่แตกต่างกัน [84, 85] คือ In  $3d_{5/2}$  และ In  $3d_{3/2}$  คู่พีกของ P-In1 มีพีกคู่หลัก  $3d_{5/2}$  อยู่ที่ระดับพลังงาน 443.7 และ 451.4 อิเล็กตรอนโวลต์และพีกคู่รองลงมาที่ระดับพลังงาน  $3d_{3/2}$  คือ 444.6 และ 452.6 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ในขณะที่ขอดพีกที่สอดคล้องกันของ S-In1 มีการเคลื่อนของระดับพลังงานเล็กน้อยคือที่ระดับพลังงาน  $3d_{5/2}$  มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 443.5 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 451.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ระดับพลังงานนี้สามารถก่อตัวเป็นโลหะอินเดียมที่มีเลขออกซิเดชัน In<sup>0</sup> ที่ระดับพลังงาน  $3d_{3/2}$  พลังงานยึดเหนี่ยวที่ 444.5 และ 452.2 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ที่ระดับพลังงานนี้สามารถก่อตัวเป็นสารประกอบ InO<sub>x</sub> มีเลขออกซิเดชัน In<sup>3+</sup> [85, 86] อินเดียมคาดว่าจะเกิดเป็นสารละลายของแข็งในโครงผลึกทินไดออกไซด์ โดยที่ไอออน In<sup>3+</sup> จะเป็นตัวเข้าไปแทนที่ (substitution) ในขณะที่อะตอม In<sup>0</sup> อาจจะเป็นตัวแทรก (interstitial) สังเกตการผสมกันของสถานะอินเดียมมีความสอดคล้องกับรายงานอื่น ๆ ในการศึกษาสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ [85, 86] นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าการเตรียมผงนาโน (P-In1) มีความสัมพันธ์กับฟิล์มตอบสนองแสดงให้เห็นว่าโลหะเฟส In<sup>0</sup> มีส่วนสำคัญในการถูกออกซิไดซ์และเคลื่อนตัวไปแทนที่ในโครงผลึกทินไดออกไซด์หลังจากการหลอมและการทดสอบแก๊สอัตราส่วนของ In<sup>0</sup> ไปเป็น In<sup>3+</sup> สำหรับ P-In1 และ S-In1 คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟกับปัจจัยความไวในการตอบสนองมีค่าเป็นร้อยละ 61.3 ต่อ 38.7 และร้อยละ 62.8 ต่อ 37.2 ตามลำดับ ดังนั้นสถานะการก่อตัวของธาตุอินเดียมสำหรับผงทินได

ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิสคือ โลหะ  $\text{In}^0$  แล้วมีการก่อตัวเป็นสารประกอบออกไซด์  $\text{In}^{3+}$  หลังจากการเตรียมฟิล์มและการทดสอบแก๊ส

สำหรับองค์ประกอบออกซิเจน รูป 4.5.(c) ซึ่งเป็นระดับออกซิเจน (O1s) ของ P-In1 มีศูนย์กลางระดับพลังงานอยู่ที่ 530.6 และ 531.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่ S-In1 ประกอบด้วยระดับพลังงานที่ 530.4 และ 531.5 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ องค์ประกอบหลักของ O 1s มีระดับพลังงานที่ 530.4–530.7 อิเล็กตรอนโวลต์สำหรับ P-In1 และ S-In1 สามารถนำมาประกอบกับโครงสร้างผลึกออกซิเจน  $\text{O}^{2-}$  ของทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมบนพื้นผิวชั้นนอกสุด ในขณะที่พีกรองลงมาที่ระดับพลังงาน 531.7 อิเล็กตรอนโวลต์ของ P-In1 อาจเกิดการดูดซับออกซิเจนบนพื้นผิวทินไดออกไซด์[87] ในส่วนของ S-In1 พีกศูนย์กลางที่ 531.5 อิเล็กตรอนโวลต์อาจจะก่อตัวเป็นไฮดรอกไซด์ อันเนื่องมาจากการดูดซับน้ำบนพื้นผิว[88] อัตราส่วนของปริมาณสารสัมพันธ  $x/y$  ฟิล์ม  $\text{Sn}_x\text{O}_y$  ถูกวัดโดยใช้การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟและปัจจัยความไวในการตอบสนองของทินและออกซิเจนมีค่าเป็น 0.47 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมคือ 0.5 สำหรับทินไดออกไซด์ ดังนั้นสามารถยืนยันการก่อตัวของปริมาณสารสัมพันธ  $\text{Sn}_x\text{O}_y$  ของโครงสร้างทินไดออกไซด์[83]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

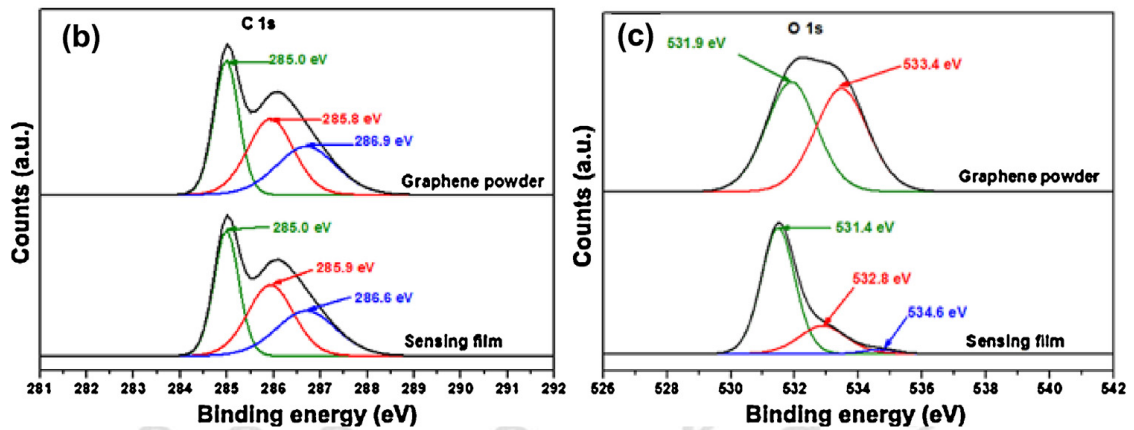
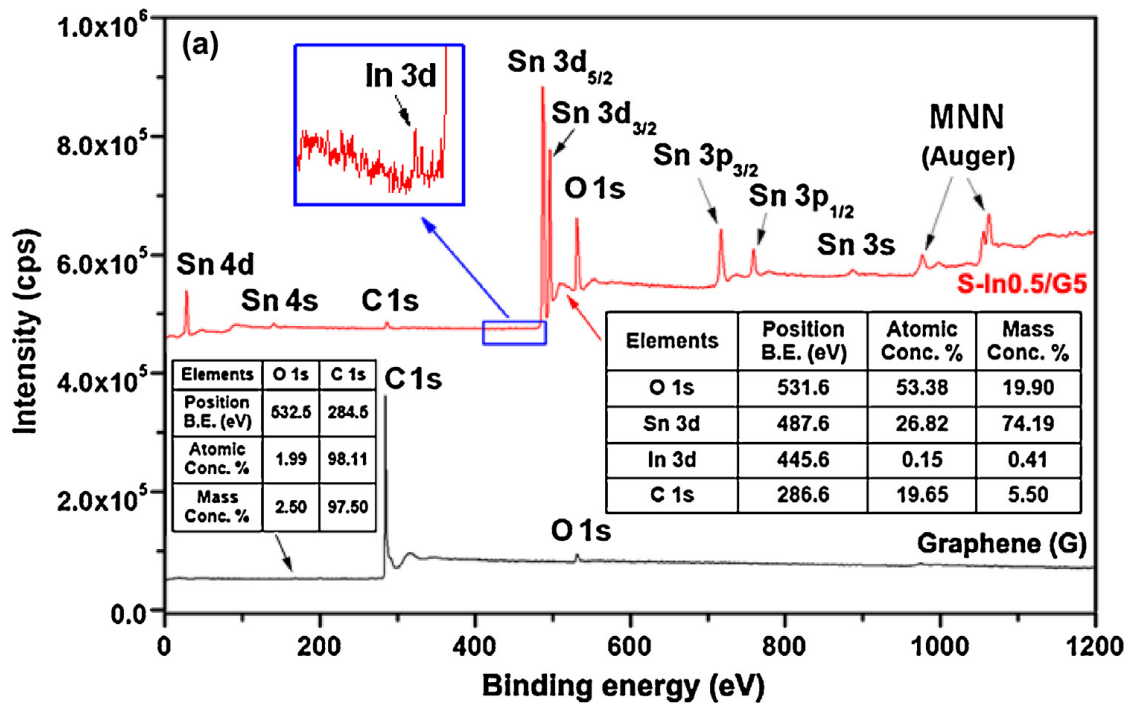


รูป 4.5 สเปกตรัมของผงนาโนและฟิล์มตอบสนองทิน ไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก หลังจากผ่านการอบอ่อนและทดสอบแก๊ส (a) Sn 3d (b) In 3d และ (c) O 1s

องค์ประกอบธาตุและสถานะออกซิเดชันของผงกราฟีนและฟิล์มตอบสนองทิน ไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (S-In0.5/G5) มีการวิเคราะห์โดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ แสดงดังรูป 4.6 (a) แสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมการสำรวจธาตุของ S-In0.5/G5 และผงกราฟีนเพื่อยืนยันการมีอยู่ของธาตุทิน อินเดียม คาร์บอนและออกซิเจนในฟิล์มตอบสนองทิน ไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม โหลดด้วยกราฟีน รูป 4.6(a) การสแกนแบบสำรวจ(เส้นสีแดง)แสดงปริมาณของอินเดียมและคาร์บอนใน S-In0.5/G5 มีค่าเป็นร้อยละ 0.41 และ 5.5 (ดูตารางภาพประกอบ) ตามลำดับ มีความสอดคล้องที่ดีกับปริมาณความเข้มข้นของวัสดุที่ใส่เข้าไปคือมีการเจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5

โดยน้ำหนักโพลดด้วยกราฟีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่ารูป 4.6 (a) การสแกนแบบสำรวจ(เส้นสีดำ)ของกราฟีนที่สังเคราะห์โดยวิธีการลอกผิวด้วยไฟฟ้าเคมีส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนร้อยละ 95.5 และมีปริมาณออกซิเจนที่ต่ำมากคือร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก (ดูตารางภาพประกอบ) ซึ่งมีค่าต่ำกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์(Reduced graphene oxides) ของกราฟีนปกติที่เตรียมโดยวิธีการการสังเคราะห์สารเคมีต่าง ๆ [83, 89] อัตราส่วนของปริมาณสารสัมพันธ์ Sn : O फिल्मตอบสนองถูกวัดโดยใช้การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟและปัจจัยความไวในการตอบสนองของทินและออกซิเจนมีค่าเป็นร้อยละ 26.82 และ 53.38 โดยอะตอมตามลำดับ (ดูตารางภาพประกอบ)คิดเป็นอัตราส่วน 1 : 2 ดังนั้นสามารถยืนยันการก่อตัวของปริมาณสารสัมพันธ์  $Sn_xO_y$  ของโครงสร้างทินไดออกไซด์ในสูตร  $SnO_2$  รูป 4.6 (b) C 1s แสดงระดับพลังงานยึดเหนี่ยวของคาร์บอน (C1s) ของผงกราฟีนและ S-In0.5/G5 พีกแรกที่ระดับพลังงาน 285.0 อิเล็กตรอน โวลต์เกิดเป็นสารประกอบ C—C โครงผลึกกราฟีนหลักและพีกรองลงมาดังแสดงในรูปที่ 4.6 (b) ที่ระดับพลังงาน 285.8 อิเล็กตรอน โวลต์และ 286.9 อิเล็กตรอน โวลต์สามารถเกิดเป็นสารประกอบ C—OH และ C=O บนพื้นผิวกราฟีนตามลำดับ ผลที่ได้บ่งชี้ว่า C1s จากฟิล์มคอมโพสิตส่วนใหญ่มาจากกราฟีนไม่ได้มาจากการปนเปื้อนพื้นผิวอื่น ๆ รูป 4.6 (c) แสดงให้เห็นว่าระดับพลังงานออกซิเจน (O 1s) ของผงกราฟีนมีความสมมาตรมากและสามารถแตกตัวออกเป็นสองพีกมีศูนย์กลางที่ 531.9 และ 533.4 อิเล็กตรอน โวลต์ซึ่งสามารถเกิดพันธะในกลุ่ม C=O และ C—OH บนพื้นผิวกราฟีนตามลำดับ [83, 86]

ในทางตรงกันข้ามรูปที่ 4.6 (c) แสดง O 1s ของ S-In0.5/G5 มีความเป็นสมมาตรมีศูนย์กลางระดับพลังงานที่ 531.4 อิเล็กตรอน โวลต์สามารถนำมาประกอบกับโครงข่ายออกซิเจน ( $O^{2-}$ ) ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและหมู่ฟังก์ชัน C=O จากกราฟีน ในขณะที่พีกรองลงมา มีศูนย์กลางที่ 532.8 และ 534.6 อิเล็กตรอน โวลต์อาจจะเป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์และหมู่ฟังก์ชัน C—OH จากกราฟีนตามลำดับ [86] จากการเปรียบเทียบสเปกตรัม O1s ของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีและไม่มีโพลดกราฟีนรูป 4.5 (c) และ 4.6 (c) จะเห็นได้ว่ากราฟีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีผลต่อการเกิดชนิดของออกซิเจนบนพื้นผิว



รูป 4.6 สเปกตรัมของผงกราฟีนและตัวรับรู้อินทรีย์ S-In<sub>0.5</sub>/G5 หลังจากการอบอ่อนและการทดสอบแก๊ส

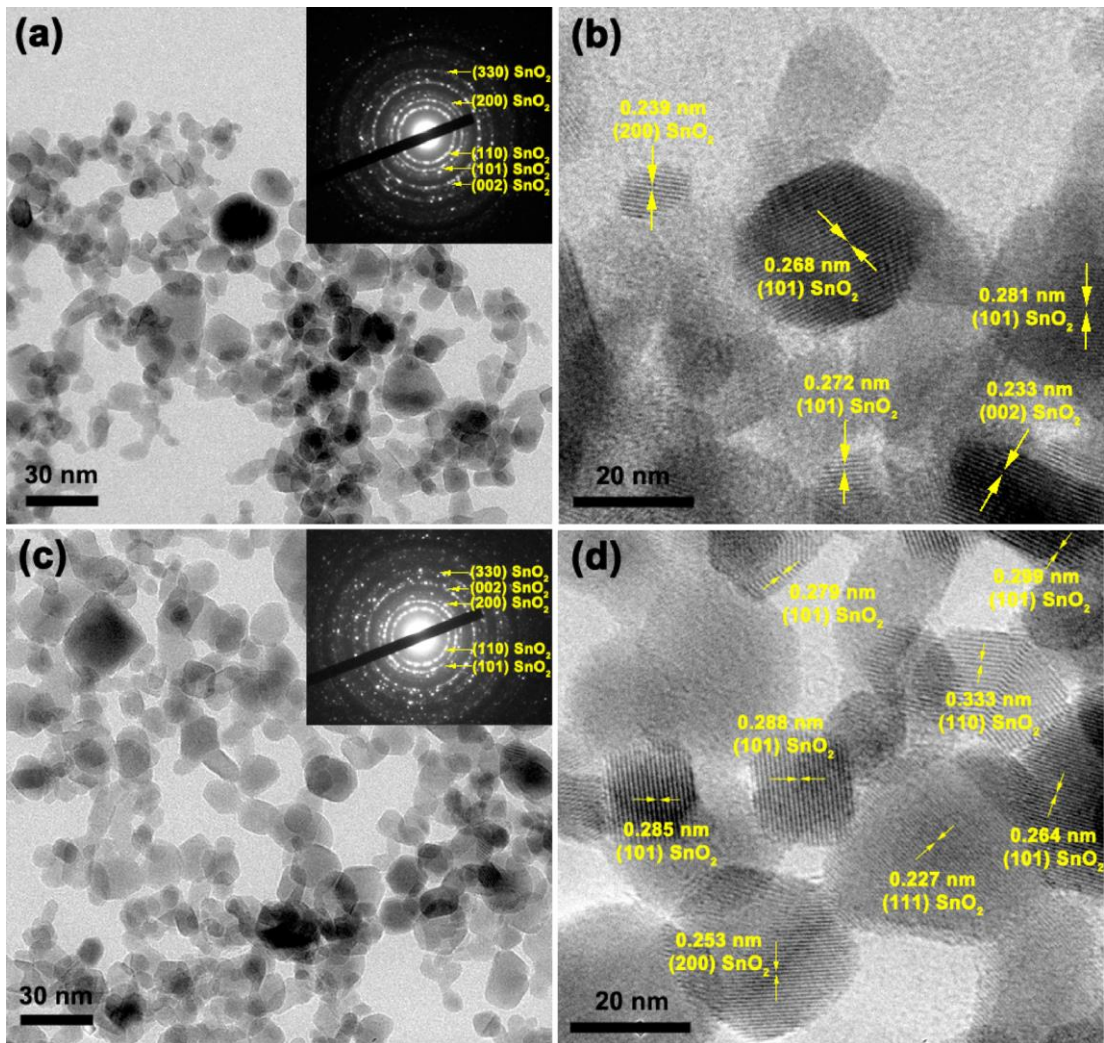
(a) การสแกนแบบสำรวจ (b) C 1s และ (c) O 1s

#### 4.1.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

ในการวิเคราะห์หาลักษณะพื้นฐานวิทยาและขนาดอนุภาคที่แท้จริงของสารตัวอย่างนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยอินเดียมด้วยปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไฟโรลิซิส ทำการวิเคราะห์โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง โดยใช้กำลังขยายที่สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งให้ข้อมูลที่ชัดเจนกว่า ดังนั้น จึงขอแสดงการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาอย่างละเอียดของอนุภาคนาโน โดยการวิเคราะห์ประเภทนี้เพียงอย่างเดียว ดังแสดงผลดังรูป 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนซึ่งแทรกอยู่ในแต่ละภาพ รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่วิเคราะห์ได้แสดงถึงอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์มีความเป็นผลึกสูงเนื่องจากการเรียงตัวของจุดเด่นชัดซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนอย่างเป็นระเบียบ จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา และขนาดที่แท้จริงของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ พบว่า อนุภาคที่ได้บางตำแหน่งมีลักษณะเป็นทรงกลมเป็นแบบแท่งเป็นลักษณะที่เป็นสี่เหลี่ยมและหกเหลี่ยมอย่างเห็นได้ชัดในแต่ละรูป การที่ลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์มีหลากหลายรูปแบบนั้น อาจเป็นผลมาจากการใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไฟโรลิซิส เนื่องจากผลงานวิจัยที่มีมานั้น การใช้เงื่อนไขในการสังเคราะห์ เช่น 5/5 จะสามารถควบคุมลักษณะพื้นฐานวิทยาให้มีรูปร่างเป็นแบบแท่ง มากไปกว่านั้นรูปแบบการจัดเรียงจุดของวงอิเล็กตรอนที่เกิดการเลี้ยวเบนใน โครงผลึก พบว่า ในกรณีที่มีการเจือด้วยอินเดียมนั้นจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนแตกต่างจากกรณีทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ระยะห่างระหว่างแลตทิซไม่เท่ากัน การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจึงเกิดการเลี้ยวเบนได้ในรูปแบบที่แตกต่างกันนั่นเอง ส่วนในด้านของขนาดอนุภาคนั้นจะวัดขนาดได้อย่างแม่นยำและเป็นขนาดที่แท้จริง เนื่องจากอนุภาคมีการกระจายตัวดี ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนมากนัก ถึงแม้จะเกิดการซ้อนกันของกลุ่มอนุภาคก็ยังสามารถวิเคราะห์ทะลุผ่านได้ ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของการใช้วิธีเฟลมสเปร์ย์ไฟโรลิซิสในการสังเคราะห์ ขนาดของอนุภาคมีความสม่ำเสมอ และ มีขนาดที่ค่อนข้างเล็กมากอยู่ในช่วง 5–20 นาโนเมตร ในการวิเคราะห์ถึงลักษณะของการเจือสารลงไปในตัวรองรับนั้น ในงานวิจัยนี้ เราพบว่า จากการวิเคราะห์ ผลของการเจือด้วยอินเดียม ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์แต่อย่างใด เนื่องจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงนั้น แสดงถึงขนาดและรูปร่างของอนุภาคทินไดออกไซด์ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเจือด้วยโลหะอินเดียมในทุกปริมาณของการเจือ

จากรูป 4.7(a) และ (c) แสดงให้เห็นถึงภาพไบร์ทฟิลด์ (BF-TEM) และการเลือกพื้นที่การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (SAED) ของผงละเอียดนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ (P-0) และทินได

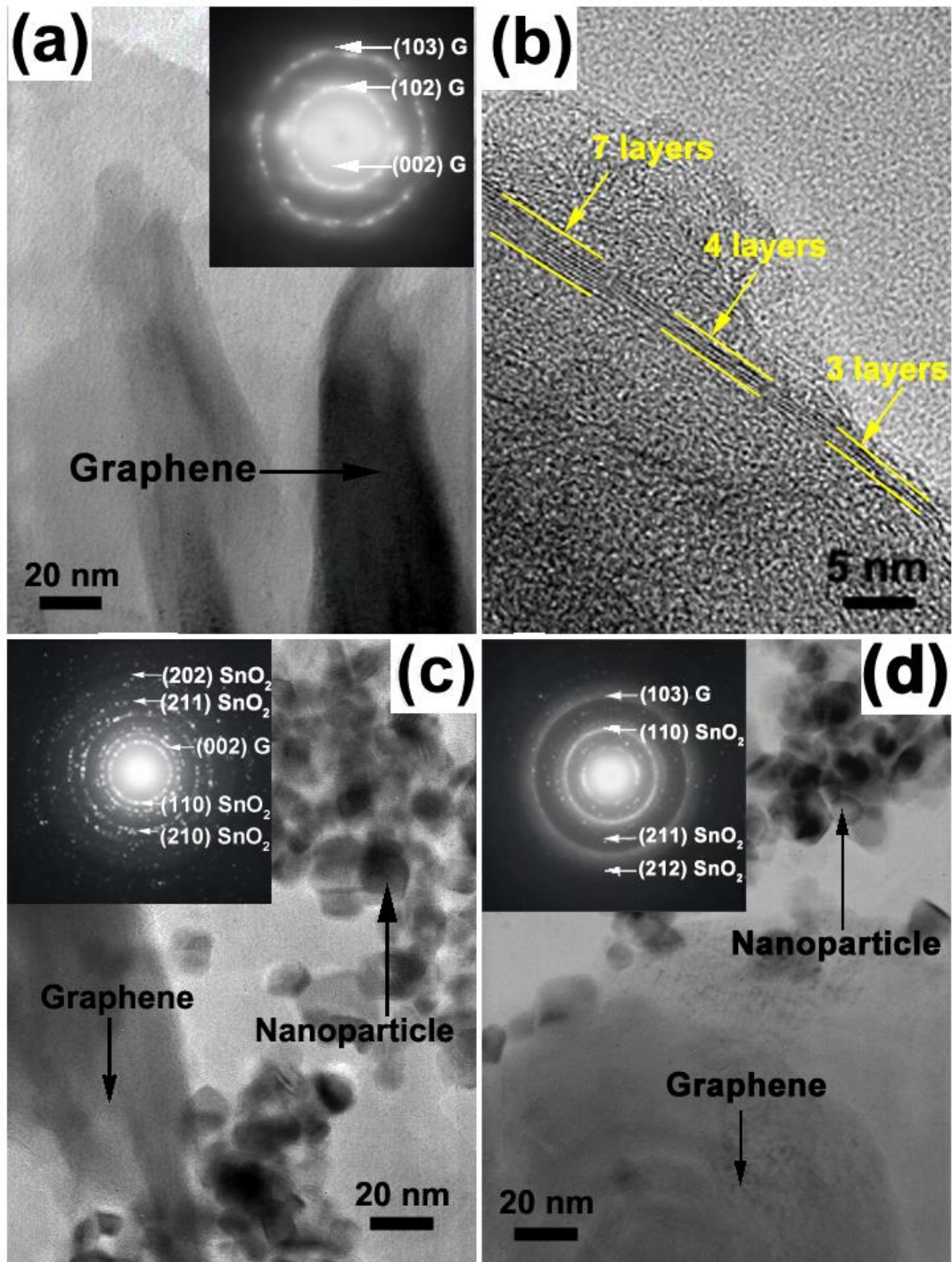
ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (P-In 1) ในขณะที่รูป 4.7 (b) และ (d) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูงของ P-0 และ P-In1 ตามลำดับ พบว่า ขนาดของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ไม่มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญจากการเจือด้วยอินเดียม รูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนของวัสดุทั้งสองเป็นวงกลมแสดงว่าบริเวณที่ศึกษาเป็นพหุผลึก มีลักษณะเป็นเส้นประกอบด้วยจุดเล็กๆเรียงตัวกันเป็นวง ที่ค่อนข้างชัดเจน แสดงว่าผลึกมีขนาดค่อนข้างใหญ่ และที่การเจือที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีความเป็นอสัณฐานมากยิ่งขึ้น โดยจะเห็นเป็นวงที่ชัดเจน อัตราความกว้างของวงมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับขนาดของผลึก ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับความกว้างหรือแคบของพีกที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ คือเมื่อพีกมีความกว้างแสดงว่าขนาดของผลึกก็จะเล็กตาม นอกจากนี้ตำแหน่งหลักของจุดที่เกิดขึ้นพบระนาบ (110), (101), (211) และ (200) ซึ่งเป็นพีกหลักที่สอดคล้องกับระนาบ hkl ที่ได้จากข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไฟล์ JCPDS หมายเลข 41-1447: ทินไดออกไซด์ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูงที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นถึงขอบเขตที่ขอบอนุภาคนาโน ที่มีระยะห่างระหว่างแลตทิซ ที่ตรงกันกับระนาบต่าง ๆ ของทินไดออกไซด์เฟสเตตระโกนอล นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นว่า ระยะห่างระหว่างระนาบของ P-In1 มีแนวโน้มที่จะมีระยะห่างใหญ่กว่า P-0 การเพิ่มค่าคงที่แลตทิซของการเจืออินเดียมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อาจจะบ่งชี้ถึงการแทนที่ของอินเดียม ผลการเจือมีความสอดคล้องกับกฎ Hume-Rothery และการศึกษาอีกหลากหลายของวัสดุทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม [84-86] ตามกฎ Hume-Rothery ไอออน  $\text{In}^{3+}$  ที่เสถียรสามารถแทนที่ไอออน  $\text{Sn}^{4+}$  ได้เนื่องจากรัศมีไอออนของ  $\text{Sn}^{4+}$  และ  $\text{In}^{3+}$  (0.069 และ 0.08 นาโนเมตร) อยู่ในขีดจำกัดของความแตกต่างร้อยละ 15 และระยะห่างโครงผลึกตาข่ายของการเจือทินไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยด้วยการแทนที่รัศมีขนาดใหญ่ของ  $\text{In}^{3+}$



รูป 4.7 (a) ภาพไบรท์ฟิลด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผงนาโนทินไดออกไซด์ (b) ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูงของผงนาโนทินไดออกไซด์ (c) ภาพไบรท์ฟิลด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและ (d) ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูงของผงนาโนทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ตัวแทรก: รูปแบบที่สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบน

รูป 4.8 (a) และ (b) แสดงให้เห็นถึงตัวแทนภาพไบรท์ฟิลด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนและภาพ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูงของกราฟีนตามลำดับรูป 4.8 (a) แสดงแผ่นกราฟีนที่มีความเรียบ เป็นแผ่นชั้นที่ม้วนพับและขนาดต่างกัน มีจำนวนชั้นของแผ่นกราฟีน 3 ชั้น 4 ชั้น แสดงถึงความหนาของแผ่นกราฟีนในระดับบางมาก และ 7 ชั้นแสดงถึงความหนาในระดับปานกลาง แผ่นชั้นที่ม้วนพับมีรูปร่างเหมือนกับรีว กว้างประมาณ 20–50 นาโนเมตรและมีความยาวกว่า 100 นาโนเมตร จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของแผ่นกราฟีนสามารถระบุระนาบได้คือ (0 0 2), (1 0 2) และ (1 0 3) เป็นระนาบของกราฟิต์โครงสร้างหกเหลี่ยมซึ่งสอดคล้องกับระนาบ hkl ที่ได้จาก JCPDS หมายเลข 41–1487 รูป 4.8 (b) สามารถยืนยันได้ว่าเป็นแผ่นกราฟีนหลายชั้นที่มีขอบ 3–7 ชั้น รูป 4.8 (c) และ (d) แสดงอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โพลดด้วยกราฟีนร้อยละ 0.5 และ 5 โดยน้ำหนัก หลังจากการอบอ่อนและการเผาไล่สารยึดเหนี่ยวในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสจะเห็นว่าอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์มีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบแผ่นกราฟีนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งไม่ได้เกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อน ที่ระดับการโพลดกราฟีนสูงสุดคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของวงพหุผลึกอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมมีการซ้อนทับกับกราฟีนที่มีโครงสร้างหกเหลี่ยมมีลักษณะเป็นแผ่น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

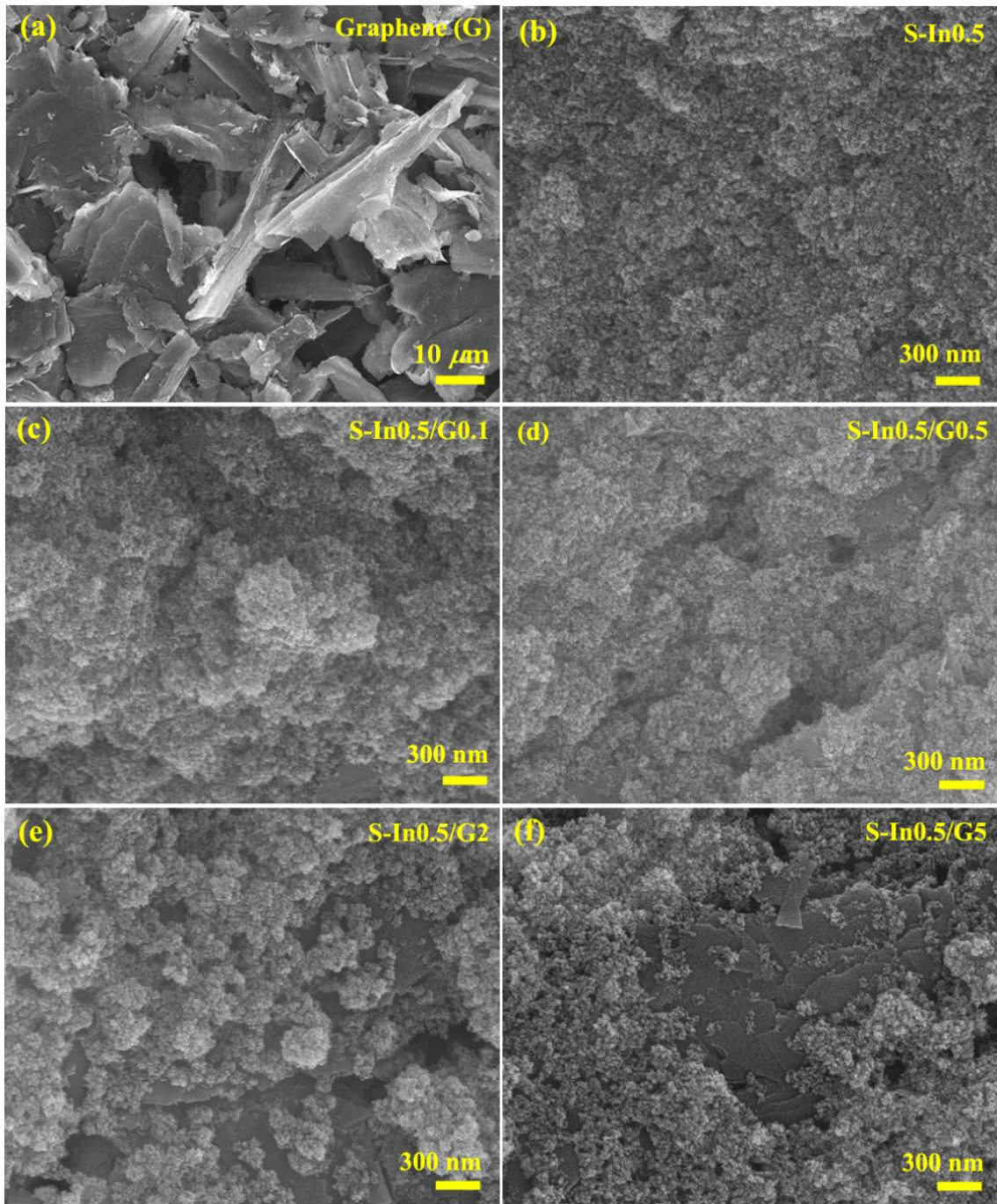


รูป 4.8 (a) ภาพไบรท์ฟิลด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูงของกราฟีนโดยวิธีการลอกผิวด้วยไฟฟ้าเคมี (c) ภาพไบรท์ฟิลด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของ P-In<sub>0.5</sub>/G<sub>0.5</sub> และ (d) P-In<sub>0.5</sub>/G<sub>5</sub>

#### 4.1.6 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยา อย่างหยาบของผงกราฟีนและผงละเอียดอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่เจือด้วยโลหะอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิสผสมกราฟีนในปริมาณร้อยละ 0.1–5 โดยน้ำหนัก รูป 4.9 (a) แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มุมมองด้านบนของแผ่นฟิล์มกราฟีนจะเห็นว่าแผ่นกราฟีนมีพื้นผิวที่เรียบ มีความหลากหลายของรูปร่างหลายเหลี่ยมที่มีขอบคมหรือกลมมีอัตราส่วนที่แตกต่างกันของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกราฟีนในทิศทางที่แตกต่างกันส่วนใหญ่มีขนาดตั้งแต่ร้อยนาโนเมตรไปถึงหลายไมครอน นอกจากนี้แผ่นกราฟีนมีแนวโน้มที่จะจับกันเป็นก้อน กอรวมกันหรือซ้อนกันเป็นชั้นๆ รูป 4.9 (b)-(e) แสดงมุมมองด้านบนของฟิล์มตอบสนองร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันคือร้อยละ 0 ถึง 5 โดยน้ำหนัก (S-In0.5 และ S-In0.5/G01 ถึง S-In0.5/G5) จะเห็นได้ว่าทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก รูป 4.9 (b) มีเพียงอนุภาคนาโนที่มีรูพรุนระดับนาโนและมีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ 20–30 นาโนเมตร รูป 4.9 (c)-(f) กราฟีนที่เพิ่มเข้าไปมีขนาดใหญ่คล้ายกับในรูป 4.9 (a) จะเห็นว่าการฝังอยู่ภายในเนื้อพื้นอนุภาคนาโนและความหนาแน่นของกราฟีนที่พบมีความสอดคล้องกับปริมาณความเข้มข้นที่โหลดเข้าไป กราฟีนที่มีความเข้มข้นต่ำสุดคือร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักสังเกตได้ว่าการแยกตัวหรือการแตกของแผ่นกราฟีนน้อยมาก รูป 4.9 (c) เมื่อเพิ่มเป็นปริมาณของกราฟีน แผ่นกราฟีนมีขนาดใหญ่และรวมกันมากขึ้นมีการกระจายบนพื้นผิวของกราฟีนอย่างชัดเจน ดังรูป 4.9 (d)-(f)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูป 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิว (a) กราฟีน (b) ตัวรับรู้ S-In0.5 (c) S-In0.5/G0.1 (d) S-In0.5/G0.5 (e) S-In0.5/G2 และ (f) ตัวรับรู้ S-In0.5/G5 บนแผ่นรองรับชนิดอะลูมิเนียมฟอยล์ลายอิเล็คโทรดด้วยทอง หลังการอบอ่อนและการทดสอบแก๊ส

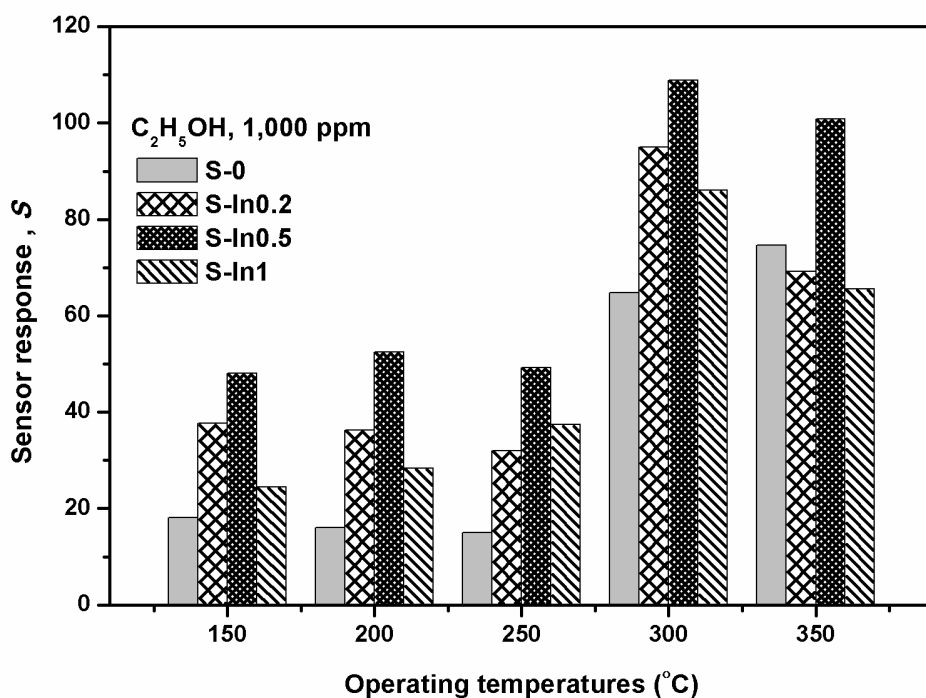
## 4.2 คุณสมบัติการตอบสนองต่อแก๊สสถานะแวดล้อมผลการทดสอบแก๊ส

### 4.2.1 ผลของการเจืออินเดียม

#### (1) ผลการทดสอบไอเอทานอล ( $C_2H_5OH$ )

##### (1.1) ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง (Temperature profile)

ผลของอุณหภูมิการทดสอบจาก 150–350 องศาเซลเซียส ต่อการตอบสนองไอเอทานอลของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณแตกต่างกัน ถูกแสดงในรูป 4.10 ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์มีการตอบสนองดีที่สุดในอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ผลการเจืออินเดียมในฟิล์มตอบสนองทินไดออกไซด์ทุกเงื่อนไขการเจืออินเดียมสามารถพัฒนาการตอบสนองได้ที่อุณหภูมิการทำงานที่ต่ำกว่าทินไดออกไซด์ซึ่งแสดงค่าการตอบสนองสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (S-In0.5) แสดงค่าการตอบสนองสูงที่สุดคือประมาณ 110 ต่อไอเอทานอลความเข้มข้น 1,000 ppm ที่อุณหภูมิการทดสอบดีที่สุดคือ 300 องศาเซลเซียส



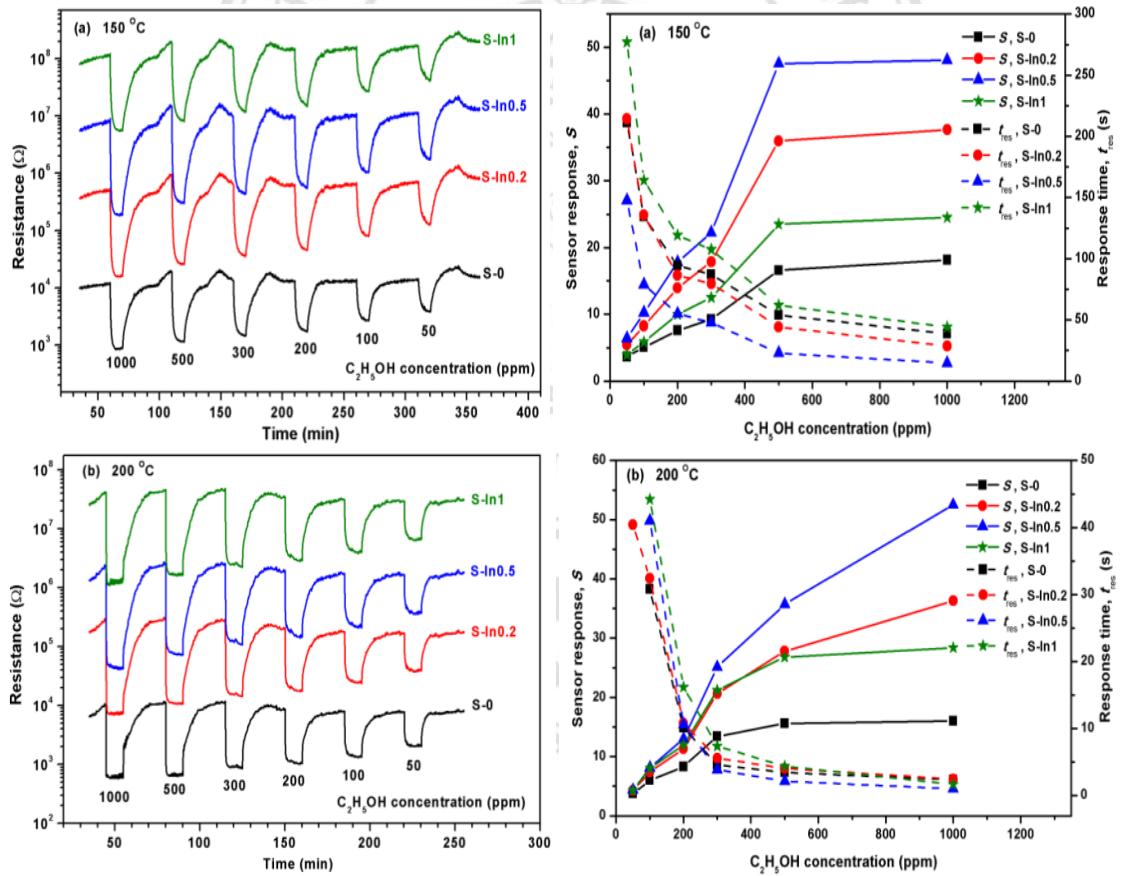
รูป 4.10 กราฟแสดงค่าการตอบสนองของตัวรับรู้ต่อไอเอทานอลที่ความเข้มข้น 1,000 ppm ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมปริมาณร้อยละ 0–1 โดยน้ำหนัก (S-0 ถึง S-In1) ที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ที่อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 150–350 องศาเซลเซียส

## (1.2) ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อไอเอทานอล

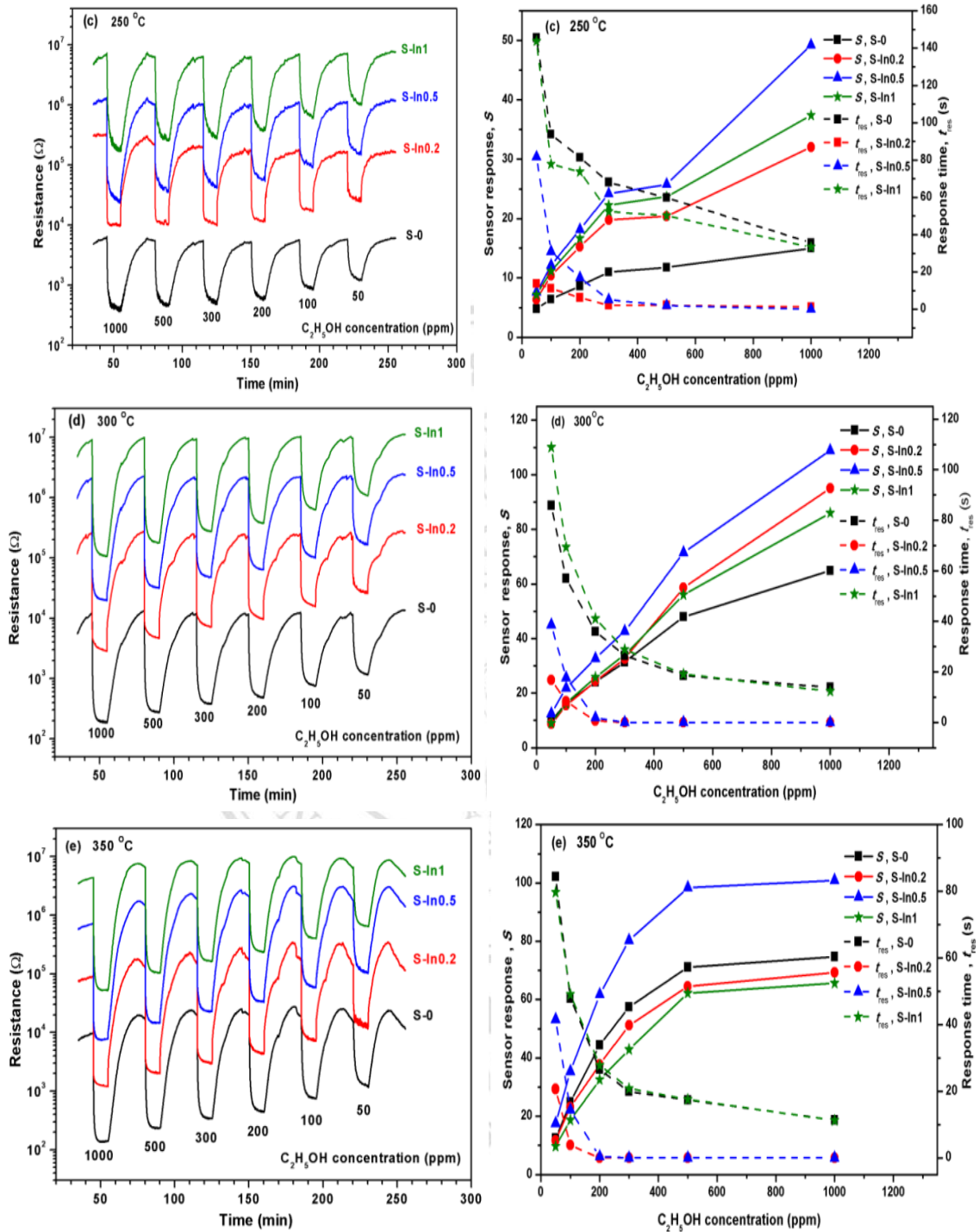
รูป 4.11–4.12 (ซ้าย) แสดงผลในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของฟิล์มตอบสนองที่ไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมความเข้มข้นร้อยละ 0–1 โดยน้ำหนัก ต่อไอเอทานอล โดยใช้ความเข้มข้นของไอเอทานอล 50–1,000 ppm ที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 150–350 องศาเซลเซียส เส้นฐานความต้านทานตัวรับรู้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อทำการเจือด้วยอินเดียมความเข้มข้นสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงความต้านทานอย่างรุนแรงสามารถอธิบายได้จากผลการเจือด้วยอินเดียมในทินไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีอิเล็กตรอนที่เกิดจากข้อบกพร่องทางธรรมชาติเช่นตำแหน่งช่องว่างออกซิเจนการเจือด้วยอินเดียมเป็นการเจือสารกึ่งตัวนำชนิดพีในทินไดออกไซด์ทำให้เกิดโฮล ซึ่งจะชดเชยอิเล็กตรอนของทินไดออกไซด์ ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีผลในการลดลงของความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและการเพิ่มขึ้นของความต้านทานไฟฟ้าที่การเจืออินเดียมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก วัสดุยังคงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีปริมาณความเข้มข้นของอิเล็กตรอนต่ำเมื่อทดสอบไอเอทานอลก็เห็นได้ชัดเจนว่าความต้านทานของตัวรับรู้ทั้งหมดลดลง เป็นพฤติกรรมทั่วไปของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นต่อแก๊สรีดิวซิง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเจือด้วยอินเดียมและการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมีแนวโน้มที่จะปรับตัวดีขึ้นด้วยการเพิ่มระดับการเจืออินเดียมและที่อุณหภูมิการทดสอบ 300 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิในการตอบสนองดีที่สุดของตัวรับรู้ที่มีปริมาณการเจือของอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักอีกทั้งการเจือโลหะอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ยังมีการตอบสนองดีที่สุดในทุกอุณหภูมิการทดสอบ พิจารณาดัง รูป 4.11–4.12 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีค่ามาก ก็จะส่งผลให้ตัวรับรู้มีสภาพความไวในการตอบสนองมากเช่นกัน และยังพบอีกว่าการเจืออินเดียมที่ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวรับรู้ได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีการเจือโลหะอินเดียมลง

เมื่อทดสอบไอเอทานอลก็เห็นได้ชัดเจนว่าความต้านทานของตัวรับรู้ทั้งหมดลดลง เป็นพฤติกรรมทั่วไปของ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นต่อแก๊สรีดิวซิง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ค่อนข้างซับซ้อนเมื่อเทียบกับการเจือด้วยอินเดียมและการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมีแนวโน้มที่จะปรับตัวดีขึ้นด้วยการเพิ่มระดับการเจืออินเดียมรูป 4.11–4.12 (ขวา) แสดงลักษณะที่สอดคล้องกับการตรวจวัดในด้านของการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา) ของตัวรับรู้ S-0 ถึง S-1a1 เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้น ไอเอทานอลจะเห็นได้ว่าเวลาตอบสนองตัวรับรู้และการตอบสนองในขั้นต้นปรับตัวดีขึ้นด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของอินเดียมจากร้อยละ 0–0.5 โดยน้ำหนัก แต่หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นต่อไปเป็นร้อยละ 1

โดยน้ำหนักมีการตอบสนองลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ในตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ (S-In0.5) แสดงการตอบสนองสูงที่สุดคือ 110 ที่ความเข้มข้นไอเอทานอล 1,000 ppm ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ (S-0) ประมาณสองเท่า ที่อุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสม คือ 300 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ทุกการตอบสนองตัวรับรู้เมื่อเทียบกับความเข้มข้นไอเอทานอลเป็นไปตามกฎกำลัง (Power law) ที่รู้จักกันดีที่มีค่าเลขยกกำลังอยู่ในช่วง 0.65–0.85 และลักษณะที่มีการประมาณเชิงเส้นในช่วงต่ำของความเข้มข้นของแก๊ส (50–500 ppm) นอกจากนี้ S-In0.5 และ S-In0.2 แสดงเวลาการตอบสนองสั้น ( $t_{res}$ ) คือ  $\square$  2 วินาทีซึ่งน้อยกว่า S-0 และ S-In1 (> 10 วินาที) ในขณะที่เวลาการคืนตัว (ไม่แสดง) ก็สอดคล้องกันมีเวลาการคืนตัวที่สั้นกว่าในช่วงของไม่กี่นาทีก่อน ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก เป็นการเจือที่ผสมที่เหมาะสมที่ทำให้พฤติกรรมการตรวจวัดเป็นที่น่าพอใจมากซึ่งให้ค่าการตอบสนองสูงและรวดเร็ว



รูป 4.11 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบ แกนซ้าย, -■-) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก ต่อไอเอทานอลที่อุณหภูมิ 150 และ 200 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สที่แตกต่างกัน



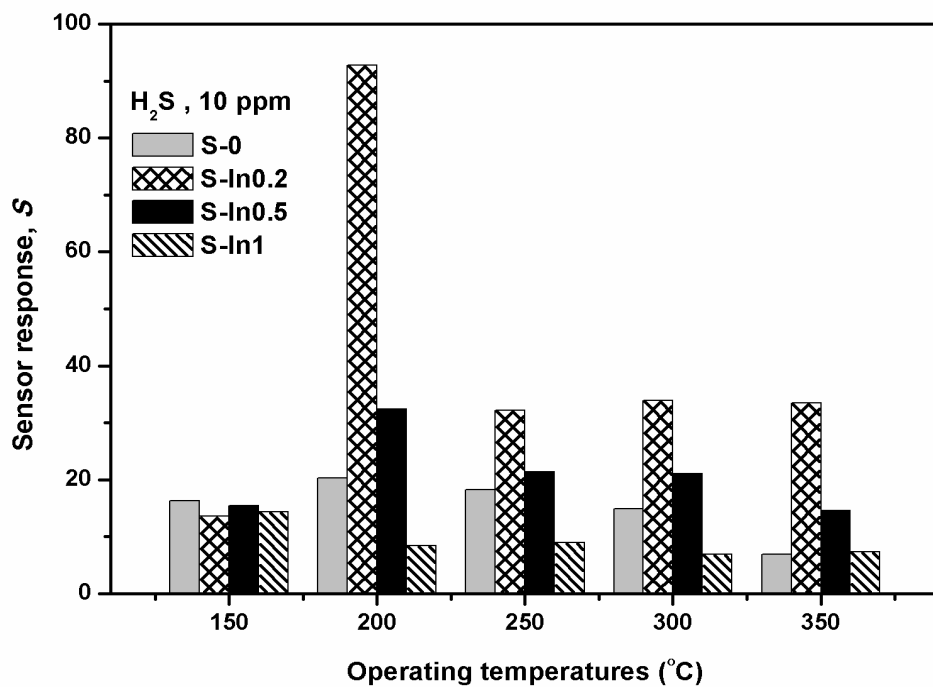
รูป 4.12 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบ แกนซ้าย, —) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - - -) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก ต่อไอเอทานอลที่อุณหภูมิ 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของแก๊สที่แตกต่างกัน

กลไกการตรวจวัดแก๊สของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ (150–300 องศาเซลเซียส) ต่างจากทินไดออกไซด์ซึ่งจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิสูง (350 องศาเซลเซียส) โดยทั่วไปตัวรับรู้สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น โมเลกุลไอเอทานอลมีการออกซิไดซ์โดยตรงจากการดูดซับออกซิเจนสปีชีส์ ( $O_2$ ,  $O^-$  และ  $O^{2-}$ ) และปล่อยอิเล็กตรอนจากสปีชีส์เหล่านี้เข้าไปในชั้นแถบการนำของสารกึ่งตัวนำที่มีผลในการลดความต้านทาน ไอออน  $O_2^-$  ที่พบส่วนใหญ่มาจากผิวทินไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียสและไอออน  $O_2^-$  จะเริ่มต้นที่จะเปลี่ยนไปเป็นไอออน  $O^-$  หรือ  $O^{2-}$  หนึ่งอุณหภูมินี้ ในขณะที่การคายออกของ  $O_2^-$  และ  $O^-$  หรือ  $O^{2-}$  จากพื้นผิวเกิดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 150 และ 560 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังนั้นอุณหภูมิในการทำงานขึ้นกับคุณสมบัติของการตรวจจับแก๊ส มีความสัมพันธ์กับการดูดซับและอัตราการคายออกของออกซิเจนไอออนที่อุณหภูมิต่างๆ ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์มักจะมีอุณหภูมิในการทำงานเหมาะสมที่สุดคือ 350 องศาเซลเซียส เมื่อการดูดซับหรือการคายออกของ  $O_2^-$ ,  $O^-$  และ  $O^{2-}$  เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม ตัวเจืออินเดียมอาจจะมีผลในการดูดซับหรือการคายออกของ  $O^-$  และ  $O^{2-}$  บนผิวอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ นำไปสู่การทำงานเหมาะสมที่สุดที่อุณหภูมิต่ำ [90] ซึ่งให้เห็นว่าสารเจืออินเดียมชนิดพีในทินไดออกไซด์ช่วยเพิ่มจำนวนของช่องว่างออกซิเจนและความสามารถในการแตกตัวของออกซิเจนโมเลกุลออกซิเจนและการดูดซับออกซิเจนสปีชีส์ [91] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของสารเจือของ  $In^{3+}$  ทำให้เกิด สปีชีส์ของออกซิเจนมากขึ้นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการเกิดออกซิเดชันของไอเอทานอลและการตอบสนองต่อไอเอทานอลสูงขึ้นที่อุณหภูมิในการทำงานที่ค่อนข้างต่ำนอกจากนี้ยังส่งผลในการลดเวลาการคืนตัวเนื่องจากเวลาการคืนตัวจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับอัตราการคายของออกซิเจนสปีชีส์ อย่างไรก็ตามในทางกลับกันระดับการเจืออินเดียมที่มากเกินไป อาจสร้างความผิดปกติของโครงสร้าง ที่บิดเบี้ยวมากเกินไปบนพื้นผิวอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับปริมาณออกซิเจนน้อยลงดังนั้นการตอบสนองแก๊สที่เหมาะสมในระดับการเจืออินเดียมปานกลาง (ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) เมื่อไอออน  $In^{3+}$  ที่ถูกสร้างขึ้นโดยไม่มีข้อบกพร่องที่ผิวมากเกินไป สมมติฐานนี้ได้รับการสนับสนุนโดยข้อมูลจากเทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ ตั้งข้อสังเกตว่าที่ระดับการเจือเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ถึงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก  $In^0$  ไอออนในอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49–51 เป็นร้อยละ 62–63 ในระดับการเจืออินเดียมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก การแทรกของ  $In^0$  ไอออนกลายเป็นตัวโดดเด่นกว่า  $In^{3+}$  ไอออน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการตอบสนองที่ลดลง

## (2) ผลการทดสอบแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ )

### (2.1) ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง (Temperature profile)

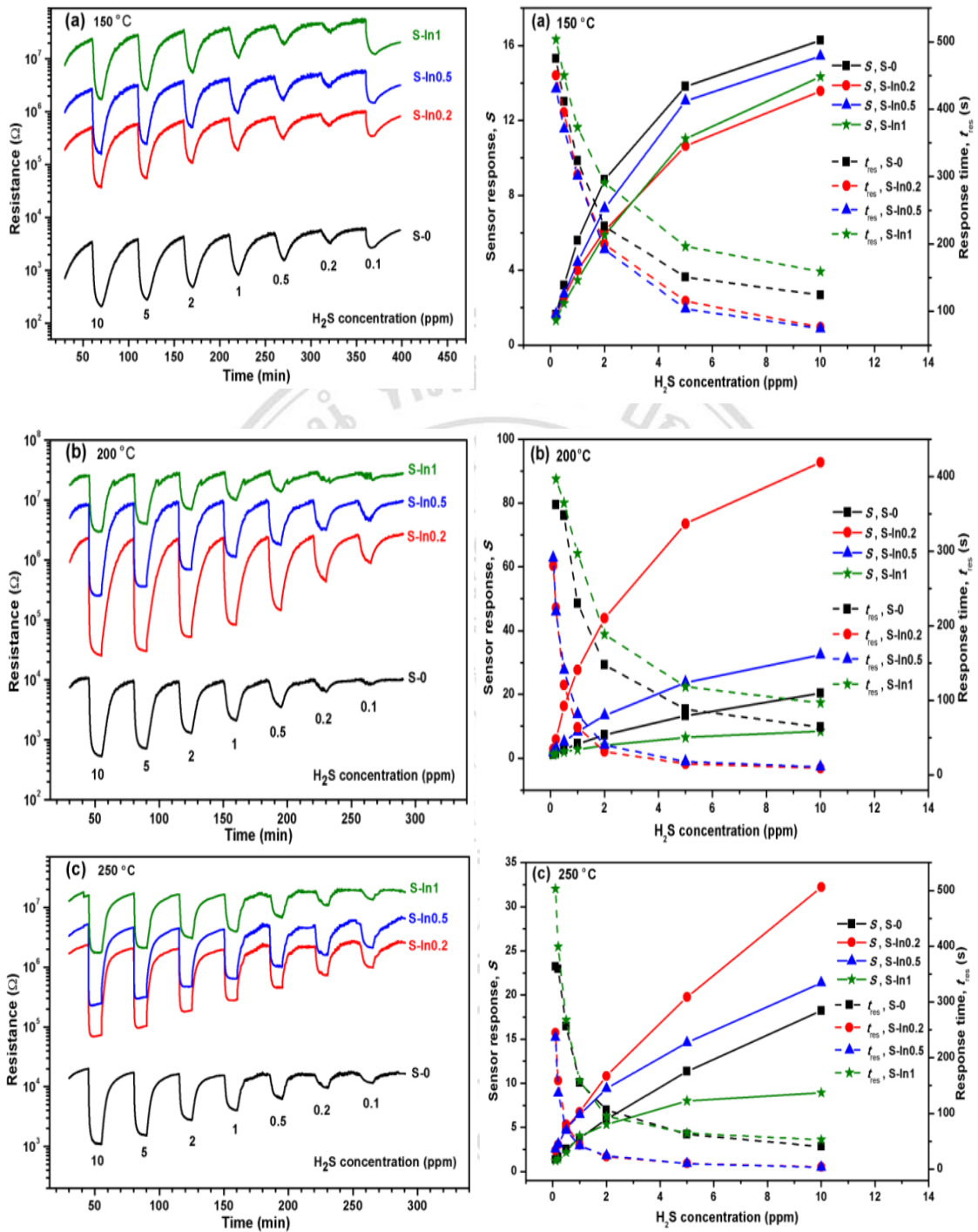
สำหรับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุด ของตัวรับรู้ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (0.1–10 ppm) ดังแสดงในรูป 4.13 ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ มีการตอบสนองได้ดีที่สุดประมาณ 20.34 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนเลยว่า ตัวรับรู้ที่ประดิษฐ์จากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส นั้น จะสามารถตอบสนองต่อแก๊สได้ดีที่สุดประมาณ 92.78 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเหมือนกัน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมไม่สามารถพัฒนาค่าการตอบสนองได้ ดังนั้น ที่อุณหภูมิการทำงานที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิการทำงานที่ดีที่สุด



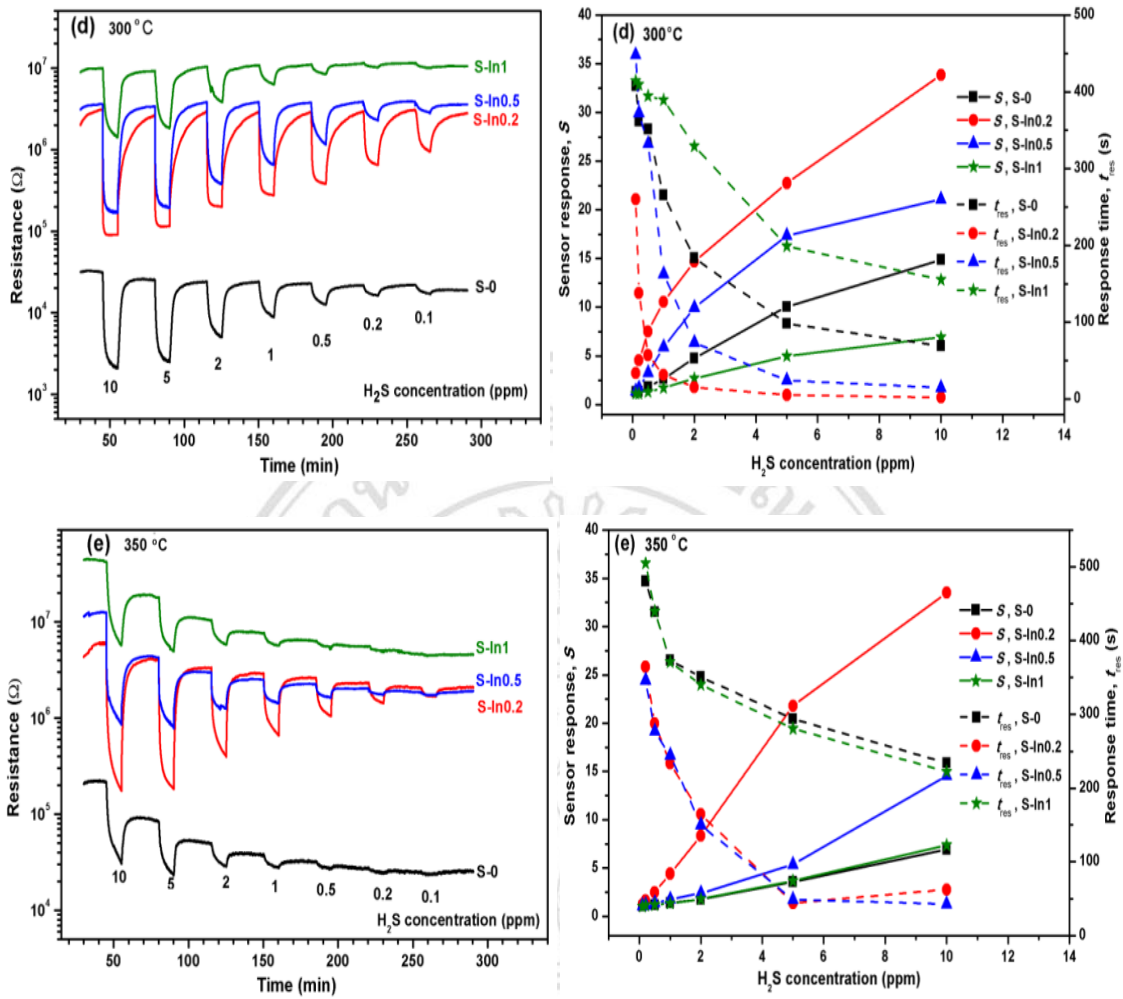
รูป 4.13 กราฟแสดงค่าการตอบสนองของตัวรับรู้ ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10 ppm ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (S-0 ถึง S-In1) ที่แตกต่างกันสังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ที่อุณหภูมิการทดสอบตั้งแต่ 150–350 องศาเซลเซียส

## (2.2) ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ )

ในการทดสอบการตอบสนองของตัวรับรู้ได้ทำการทดสอบกับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นต่ำมากในช่วง 0.1–10 ppm โดยใช้ตัวรับรู้ที่เตรียมจากอนุภาคนาโนทินออกไซด์ บริสุทธิ์และอนุภาคนาโนทินออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอากาศ ในทิศทางย้อนกลับความเข้มข้น เพื่อหาความเข้มข้นต่ำสุดที่ตัวรับรู้สามารถตอบสนองได้ ภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก มีสภาพการตอบสนองดีที่สุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำค่าสภาพต้านทานมีค่าลดต่ำลงตามทฤษฎี แสดงดังรูป 4.14–4.15 (ซ้ายมือ) พบว่า การลดต่ำลงของค่าความต้านทานจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีโมเลกุลแก๊สมาทำปฏิกิริยากับเนื้อสาร และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อมีโมเลกุลแก๊สน้อยลงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความไวในการตอบสนอง และเวลาในการตอบสนอง ที่อุณหภูมิ 150–300 องศาเซลเซียสเส้นฐานของตัวรับรู้ยังคงมีความเสถียรสามารถกลับคืนตัวไปยังตำแหน่งเดิมได้ แต่เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูง(350 องศาเซลเซียส) เส้นฐานของตัวรับรู้ทุกเงื่อนไขมีการเลื่อนตำแหน่งคือไม่สามารถกลับคืนไปยังตำแหน่งเดิมได้ดังรูป 4.14–4.15 (ขวามือ) แสดงสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูงมากขึ้น การตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้มีความไวในการตอบสนองค่อนข้างสูง เนื่องจากสามารถตอบสนองได้ที่มีความเข้มข้นของแก๊สปริมาณต่ำ แต่ยังคงแสดงค่าความไวสูง พบว่าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ ( $S=16.28$ ,  $t_{res}=124.3$  วินาที) มีค่าการตอบสนองสูงกว่าทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียม (ร้อยละ 0.2, 0.5, 1 โดยน้ำหนัก) ในทุกเงื่อนไข ( $S=13.56$ ,  $15.42$ ,  $14.33$ ) ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก มีค่าการตอบสนองประมาณ 92.78 และเวลาในการตอบสนองประมาณ 9.19 วินาที สูงกว่าทินไดออกไซด์ ( $S=20.34$ ,  $t_{res}=64.20$ ) ประมาณ 4 เท่า ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส ทินไดออกไซด์มีแนวโน้มของค่าการตอบสนองลดลงทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก มีค่าการตอบสนองสูงกว่า ทินไดออกไซด์ในทุกอุณหภูมิ ซึ่งแสดงปัจจัยทางด้านตัวรับรู้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงขึ้นแสดงการตอบสนองน้อยลงจนถึงขีดจำกัดการตอบสนอง



รูป 4.14(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบ แกนซ้าย,  $-■-$ ) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา,  $-■-$ ) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สที่แตกต่างกัน

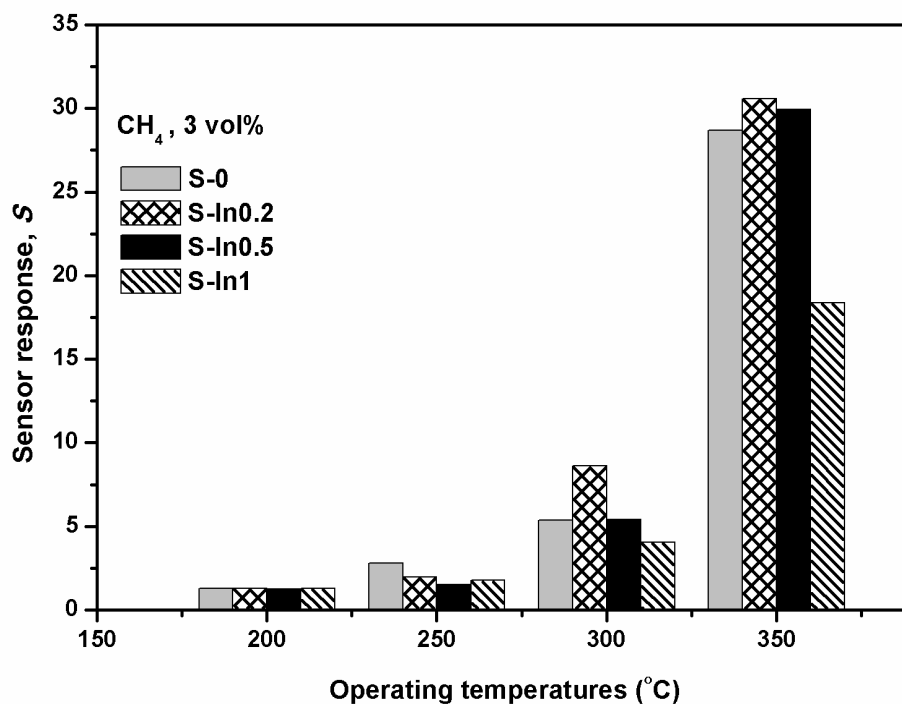


รูป 4.15 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบ แกนซ้าย, —) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - - -) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สที่แตกต่างกัน

### (3) ผลการทดสอบแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ )

#### (3.1) ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง (Temperature profile)

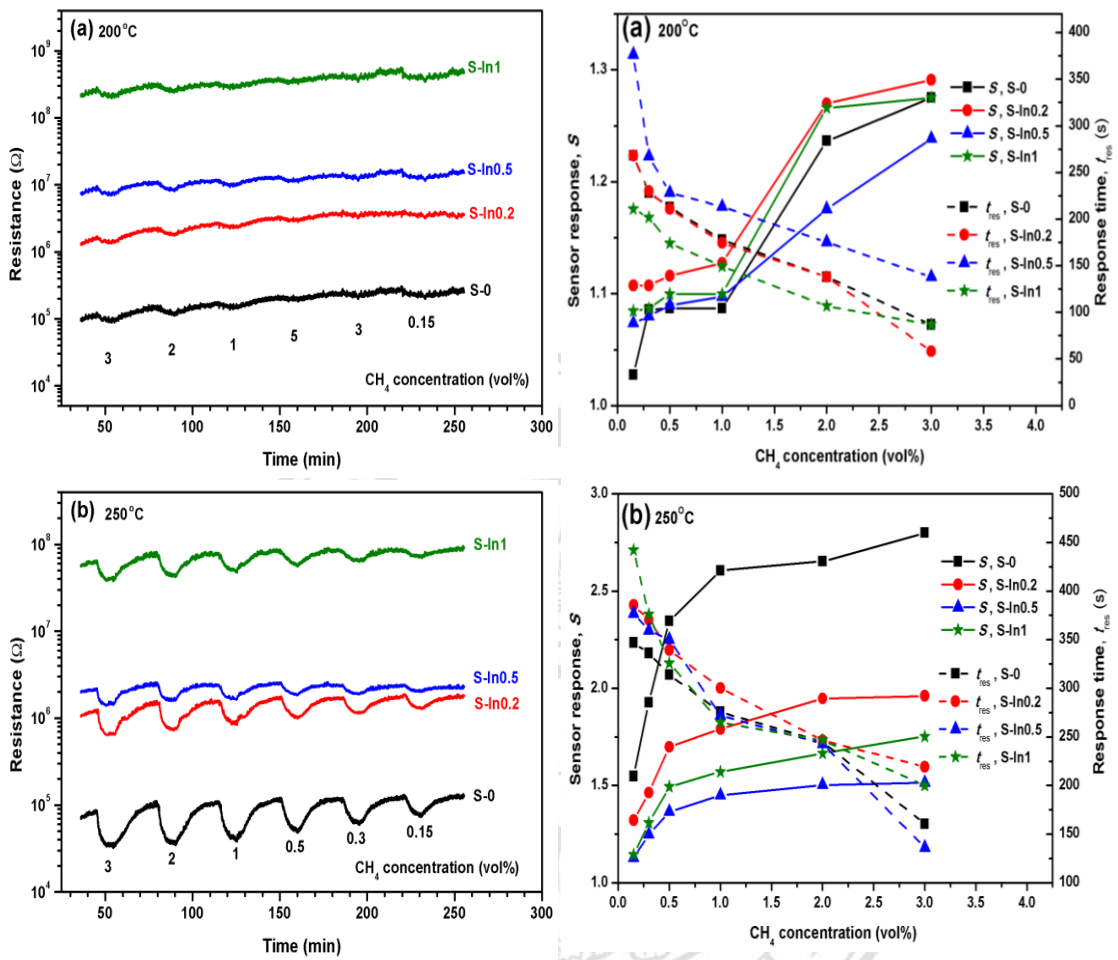
ผลของอุณหภูมิการทดสอบของแก๊สมีเทนซึ่งเป็นแก๊สติดไฟ ได้ทำการสอบที่ความเข้มข้นแก๊สสูงร้อยละ 0.15–3 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิการทดสอบ 200–350 องศาเซลเซียส ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณ (ร้อยละ 0–1 โดยน้ำหนัก) แสดงดังรูป 4.16 ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์มีแนวโน้มค่าการตอบสนองสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบ ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์มีการตอบสนองดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ผลการเจืออินเดียมในฟิล์มตอบสนองทินไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 200–250 องศาเซลเซียส ตัวเจืออินเดียมทุกเงื่อนไขไม่สามารถพัฒนาการตอบสนองได้ ที่อุณหภูมิ 300–350 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก สามารถพัฒนาการตอบสนองได้ โดยมีค่าการตอบสนองสูงที่สุดที่อุณหภูมิการทดสอบ 350 องศาเซลเซียส



รูป 4.16 กราฟแสดงค่าการตอบสนองของตัวรับรู้ต่อแก๊สมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0–1 โดยน้ำหนัก (S-0 ถึง S-In1) ที่แตกต่างกันสังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปร์ย์ไพโรลิซิสที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 200–350 องศาเซลเซียส

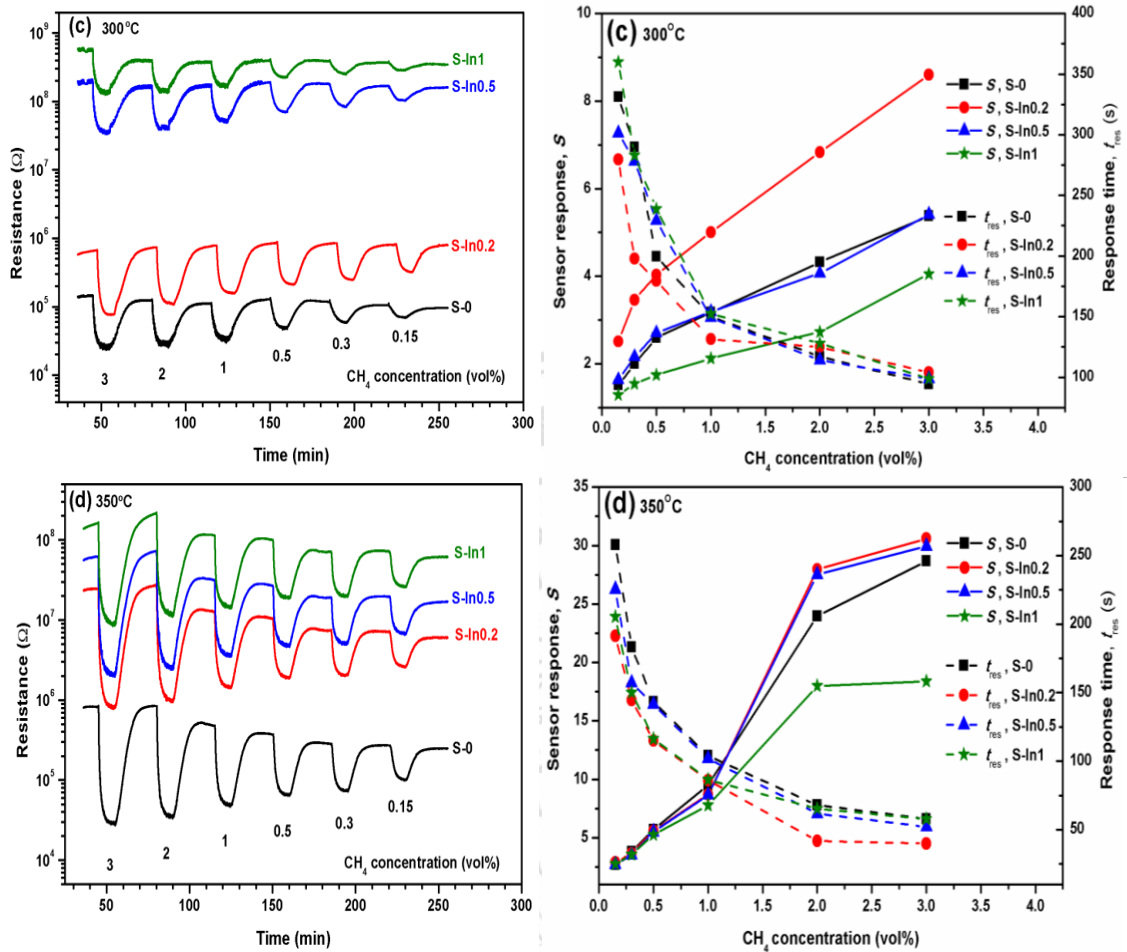
### (3.2) ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>)

ในการทดสอบการตอบสนองของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทน แสดงดังรูป 4.17–4.18 (ซ้าย) แสดงผลในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีแก๊สเข้าร่วมทำปฏิกิริยา การทดสอบได้ทำการทดสอบการตอบสนองของตัวรับรู้ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 350 องศาเซลเซียสที่ค่าความเข้มข้นในการวัดช่วงร้อยละ 0.15–3 โดยปริมาตรที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ทุกเงื่อนไขเกือบจะไม่ตอบสนองต่อแก๊สมีเทนแล้ว ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เส้นฐานของตัวรับรู้มีความเสถียร สามารถคืนตัวไปยังตำแหน่งเดิม และที่อุณหภูมิสูงคือ 350 องศาเซลเซียส เส้นฐานของตัวรับรู้มีการเลื่อนเล็กน้อย เส้นมีความเรียบถือว่าไม่มีสัญญาณรบกวน รูป 4.17–4.18 (ขวา) แสดงสภาพความไวและเวลาในการตอบสนองพบว่าที่อุณหภูมิและค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดสูงมากขึ้น ค่าสภาพความต้านทานจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์มีแนวโน้มค่าการตอบสนองสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ มีค่าการตอบสนองสูงที่สุดประมาณ 28.67 ที่อุณหภูมิการทดสอบ 350 องศาเซลเซียส มีเวลาการตอบสนองประมาณ 58 วินาทีที่ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส นั้น จะมีการตอบสนองได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตรมีค่าประมาณ 30.58 และเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สที่ความเข้มข้นสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนี้ มีค่าประมาณ 39.90 วินาที เวลาในการคืนกลับสู่สภาพเดิมค่อนข้างนานประมาณ 7 นาที



รูป 4.17 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบ แกนซ้าย, —) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - - -) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สมีเทนที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สที่แตกต่างกัน

Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูป 4.18 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทานและ (ขวา) ความสัมพันธ์ของสภาพความไว (เส้นทึบ แกนซ้าย, —) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - - -) ของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์และตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2–1 โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สมีเทนที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊สที่แตกต่างกัน

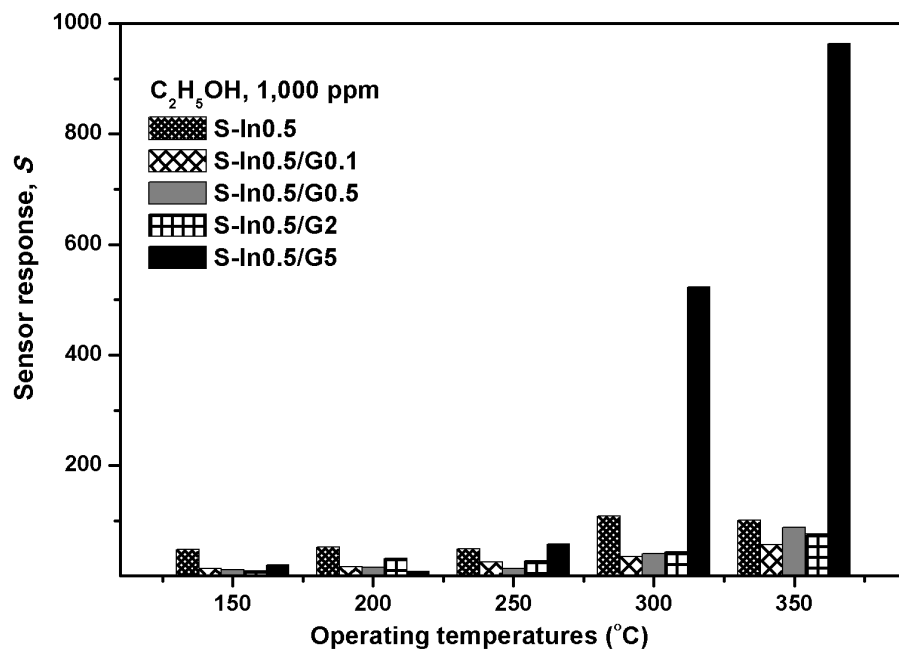
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

#### 4.2.2 ผลของการไหลกราฟีน

##### (1) ผลการทดสอบไอเอทานอล ( $C_2H_5OH$ )

##### (1.1) ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง (Temperature profile)

รูป 4.19 แสดงการตอบสนองของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่มีระดับการไหลกราฟีนที่แตกต่างกัน (S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5) ที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 150–350 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าตัวรับรู้ S-In0.5 มีอุณหภูมิการทำงานดีที่สุดที่ 300 องศาเซลเซียส เมื่อทำการไหลด้วยกราฟีนความเข้มข้นต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิการทดสอบ 150–200 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ที่ไหลด้วยกราฟีนไม่สามารถพัฒนาค่าการตอบสนองได้ โดยมีค่าการตอบสนองที่ต่ำกว่า S-In0.5 และที่อุณหภูมิการทดสอบ 250–350 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ S-In0.5/G5 แสดงการตอบสนองเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีค่าการตอบสนองสูงที่สุดคือ 965 ที่ความเข้มข้นเอทานอล 1,000 ppm ที่อุณหภูมิในการทำงานสูงคือ 350 องศาเซลเซียส ผลการไหลกราฟีนในระดับอื่น (ร้อยละ 0.1–2 โดยน้ำหนัก) ไม่สามารถพัฒนาค่าการตอบสนองได้ ดังนั้นตัวรับรู้ทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่มีระดับการไหลกราฟีนดีที่สุดคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าการตอบสนองที่สูงกว่าไม่มีการไหล แต่ต้องใช้อุณหภูมิในการทำงานที่สูงขึ้น



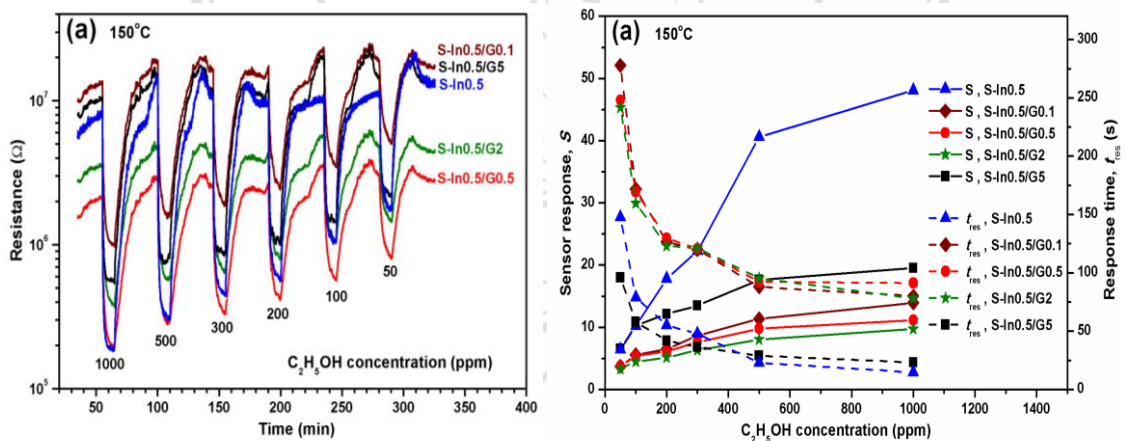
รูป 4.19 รูปแบบของอุณหภูมิในการตอบสนองของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ไหลด้วยกราฟีนในระดับการไหลกราฟีนที่แตกต่างกัน (S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5) ที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 150–350 องศาเซลเซียส ต่อไอเอทานอล

## (1.2) ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อไอเอทานอล

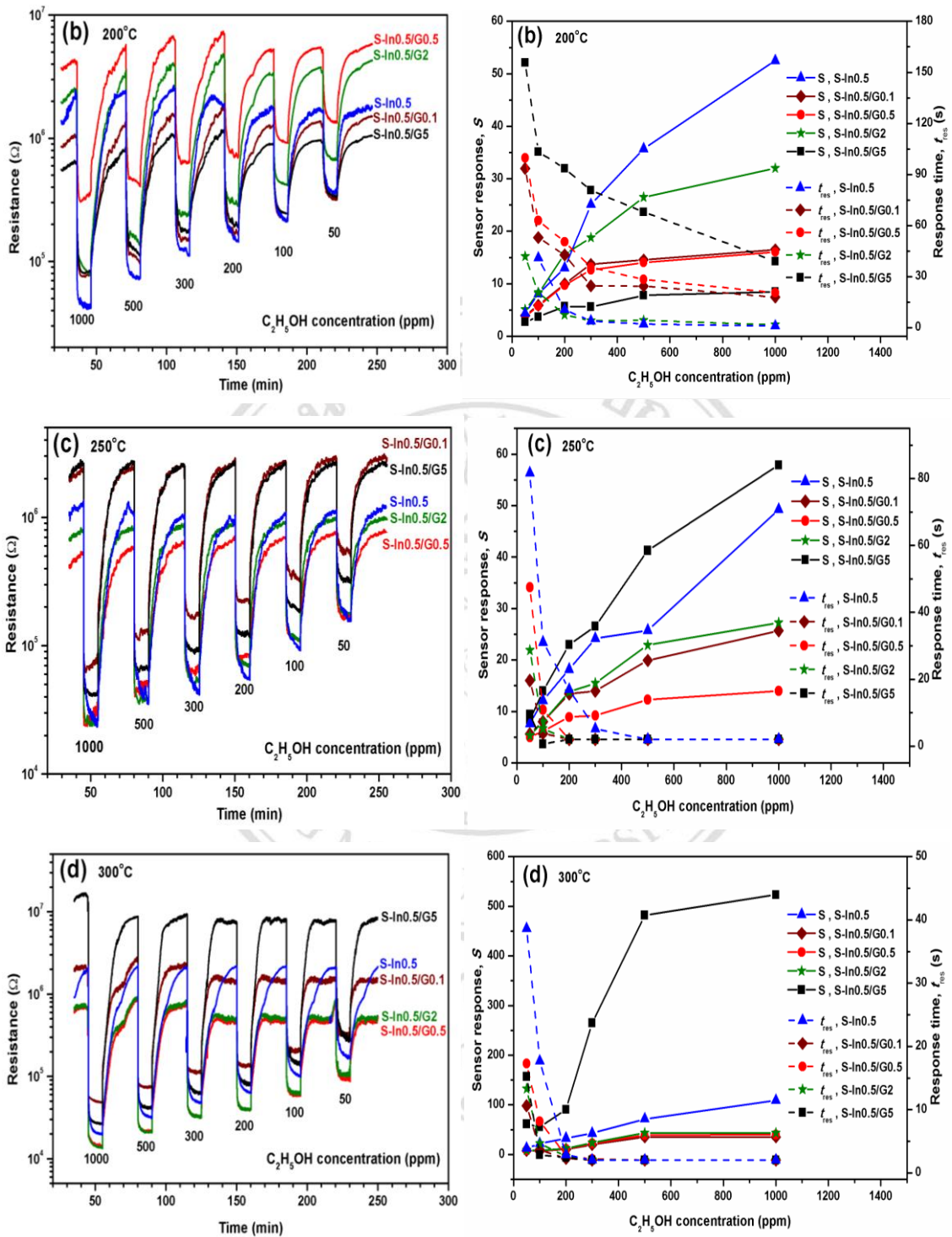
ผลของระดับการไหลคกราฟีนต่อการตอบสนองของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมต่อไอเอทานอลจะศึกษาต่อไปบนพื้นฐานของระดับการเจือที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก รูป 4.20–4.22 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักอินเดียมในฟิล์มตอบสนองทินไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นของกราฟีนที่แตกต่างกันในการไหลคกราฟีน (S-In0.5, S-In0.5/G0.1 และ S-In0.5/G5) ภายใต้ความเข้มข้นไอเอทานอลความเข้มข้นต่างๆที่อุณหภูมิในการทำงานที่ดีที่สุดคือ 350 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเส้นฐานความต้านทานตัวรับรู้ลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระดับการไหลคกราฟีนร้อยละ 0–2 โดยน้ำหนัก (S-In0.5, S-In0.5/G0.1 และ S-In0.5/G2) ในทางตรงกันข้ามเส้นฐานความต้านทานเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยการไหลคกราฟีนความเข้มข้นมากขึ้นคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก การลดลงของความต้านทานที่มีการเพิ่มระดับการไหลคกราฟีนอาจจะอธิบายตามผลของการนำไฟฟ้าของกราฟีนคือ กราฟีนที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก) การนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟีนมีการกระจายตัวภายในเนื้อสารทินไดออกไซด์การนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกึ่งฉนวน การนำไฟฟ้าส่วนใหญ่มาจากทินไดออกไซด์และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกราฟีน (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) แผ่นกราฟีนจะเริ่มก่อตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มีแนวโน้มที่จะแยกออกจากอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์เป็นที่สังเกตจากภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดส่งผลให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่และการเชื่อมต่อของกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง

หลังจากการสัมผัสไอเอทานอลตัวรับรู้ทั้งหมดแสดงการลดลงโดยทั่วไปของความต้านทานในการตอบสนองต่อแก๊สรีดิวซิง ตัวรับรู้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ชนิดเอ็นการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวรับรู้จะลดลงในขั้นต้นและจากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นในการไหลคกราฟีนจากร้อยละ 0–2 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงความต้านทานกลายเป็นเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อระดับการไหลคกราฟีนจากร้อยละ 2–5 โดยน้ำหนัก ตัวรับรู้กราฟีนไหลคกราฟีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่ค่อนข้างรวดเร็ว มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ตัวรับรู้มีความเสถียรภาพและการคืนตัวของเส้นฐานอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับตัวรับรู้ที่ไม่มีกราฟีนตั้งข้อสังเกตว่าการคอมโพสิตกราฟีนในระดับการไหลคกราฟีนที่สูงขึ้นคือร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ได้รับการทดสอบและพบว่าตัวรับรู้แสดงการตอบสนองเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการรวมตัวหรือจับตัวเป็นก้อนของแผ่นกราฟีนที่มากเกินไปทำให้วัสดุนำไฟฟ้ามากเกินไป ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระดับการไหลคกราฟีนที่เหมาะสมที่สุด สำหรับตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

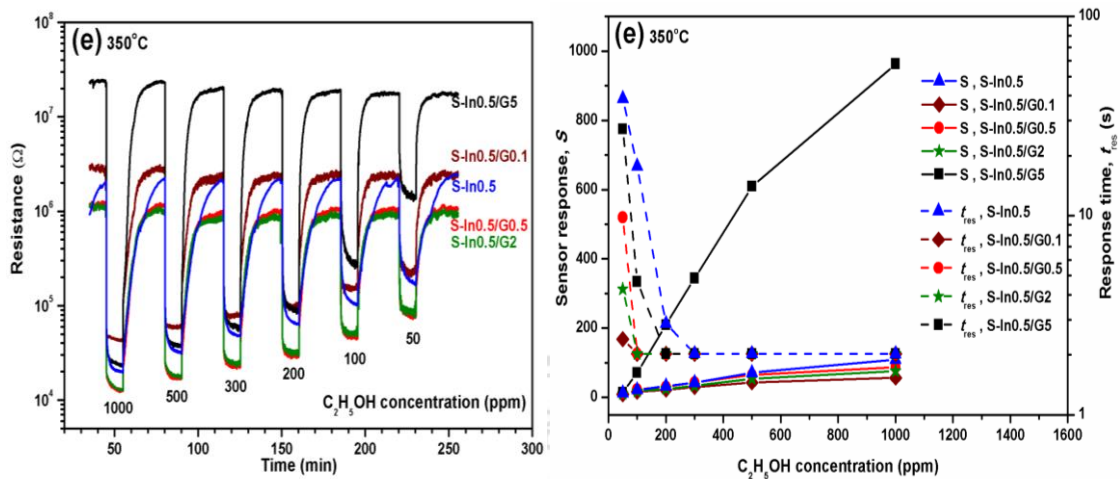
รูป 4.20—4.22 แสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สอดคล้องกันของการตรวจวัดในแง่ของการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย,  $\text{—}$ ) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา;  $\text{--}$ ) ของ S-In0.5 และ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นไอเอทานอลจะเห็นได้ว่าค่าการตอบสนองของตัวรับรู้และเวลาการตอบสนองในช่วงเริ่มต้นต่ำลงเล็กน้อยแล้วค่อยๆดีขึ้นด้วยการเพิ่มความเข้มข้นในการไหลคกราฟีนร้อยละ 0—2 โดยน้ำหนัก แต่แล้วก็เพิ่มขึ้นอย่างมากโดยการเพิ่มความเข้มข้นต่อไปเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวรับรู้ S-In0.5/G5 มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อไอเอทานอลดีที่สุด ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ทั้งในแง่ของการตอบสนอง ( $S = 965$  ที่ ความเข้มข้น 1,000 ppm) และเวลาตอบสนองที่สั้นมาก ( $t_{\text{res}} = 1.8$  s) เมื่อเทียบกับ S-In0.5/G0.1 ( $S = 57$ ,  $t_{\text{res}} = 1.8$  s), S-In0.5/G0.5 ( $S = 88$ ,  $t_{\text{res}} = 1.8$  s), S-In0.5/G2 ( $S = 76$ ,  $t_{\text{res}} = 1.8$  s) และ S-In0.5 ( $S = 110$ ,  $t_{\text{res}} = 2$  s) นอกจากนี้ยังพบว่ากราฟีนยังส่งผลในการลดลงอย่างมากของเวลาการคืนตัวสำหรับตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม ดังนั้น กราฟีนคอมโพสิตกับทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มสูงสำหรับใช้ตรวจวัดไอเอทานอล



รูป 4.20(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย,  $\text{—}$ ) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา,  $\text{--}$ ) กับความเข้มข้นเอทานอลของตัวรับรู้ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 150 องศาเซลเซียส



รูป 4.21 (ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้อุณหภูมิ (เส้นทึบแกนซ้าย, —) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -■-) กับความเข้มข้นเอทานอลของตัวรับรู้อุณหภูมิ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส



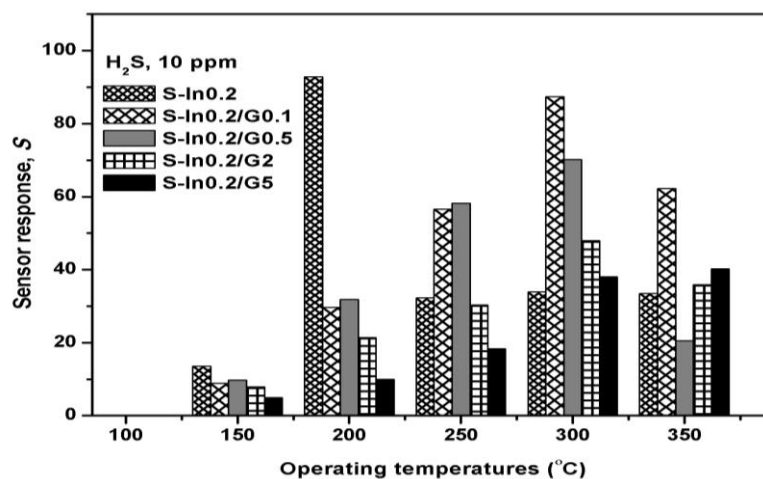
รูป 4.22(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, —) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - - -) กับความเข้มข้นเอทานอลของตัวรับรู้ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 350 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองพบว่า กราฟีนมีบทบาทสำคัญในกระบวนการตรวจวัดแก๊ส กลไกที่เป็นไปได้ของการเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดแก๊สโดยกราฟีนจะนำเสนอต่อไปนี้ ประการแรก กราฟีนจะให้พื้นที่ผิวสำหรับบริเวณดูดซับเพิ่มขึ้นและทำปฏิกิริยากับแก๊สเป้าหมายซึ่งอาจนำไปสู่ค่าการตอบสนองตัวรับรู้ที่สูงขึ้นและการตอบสนองอย่างรวดเร็วบริเวณพื้นผิวของกราฟีน ประการที่สองการตอบสนองของเอทานอลที่เพิ่มขึ้นมีสาเหตุหลักมาจากผลของการไหลของกราฟีนกราฟีนช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์และช่วยให้อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์มีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ ผลกระทบนี้ อาจนำไปสู่ประสิทธิภาพของการตรวจวัดแก๊สที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญนอกจากนี้กราฟีนมีการนำไฟฟ้าสูงอาจส่งผลในการขนส่งอย่างรวดเร็วของอิเล็กตรอนจากการทำปฏิกิริยากับแก๊สในชั้นฟิล์มซึ่งนำไปสู่การตอบสนองหรือเวลาการคืนตัวสั้น การไหลของกราฟีนในทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมสามารถเพิ่มการนำไฟฟ้าของวัสดุและการขนส่งอิเล็กตรอน เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่ากราฟีนเป็น โลหะที่มีแถบช่องว่างเท่ากับศูนย์มีความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสูง[92–94]

## (2) ผลการทดสอบแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ )

### (2.1) ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง (Temperature profile)

ในการทดสอบการตอบสนองของตัวรับรู้ต่อแก๊สชนิดต่าง ๆ นั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อทราบค่าที่เหมาะสมในการตอบสนองต่อแก๊สนั้น คือ อุณหภูมิในการทดสอบตัวรับรู้แต่ละชนิดที่มีการตอบสนองต่อแก๊สนั้น จะมีการตอบสนองที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในการตอบสนองของตัวรับรู้ต่อแก๊สบางชนิดนั้น สามารถตอบสนองได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ และบางชนิดก็สามารถตอบสนองได้ที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะทราบถึงความสามารถในการตอบสนองของตัวรับรู้ที่ดีที่สุดต่ออุณหภูมิค่าหนึ่ง จากการทดลองได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิทั้งหมด 5 ค่า คือ 150, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสจากผลการทดสอบตัวรับรู้ S-In0.2 มีค่าการตอบสนองสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ถือว่าตอบสนองได้ดีที่อุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิ 150–200 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ที่ประดิษฐ์จากทินไดออกไซด์ ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ผสมกับกราฟีนมีค่าการตอบสนองต่ำกว่าทินไดออกไซด์ ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่สามารถพัฒนาค่าการตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ที่อุณหภูมิ 250–350 องศาเซลเซียส การโหลดกราฟีนบางระดับสามารถพัฒนาค่าการตอบสนองได้ การโหลดกราฟีนในปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก นั้นจะสามารถตอบสนองต่อแก๊สได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

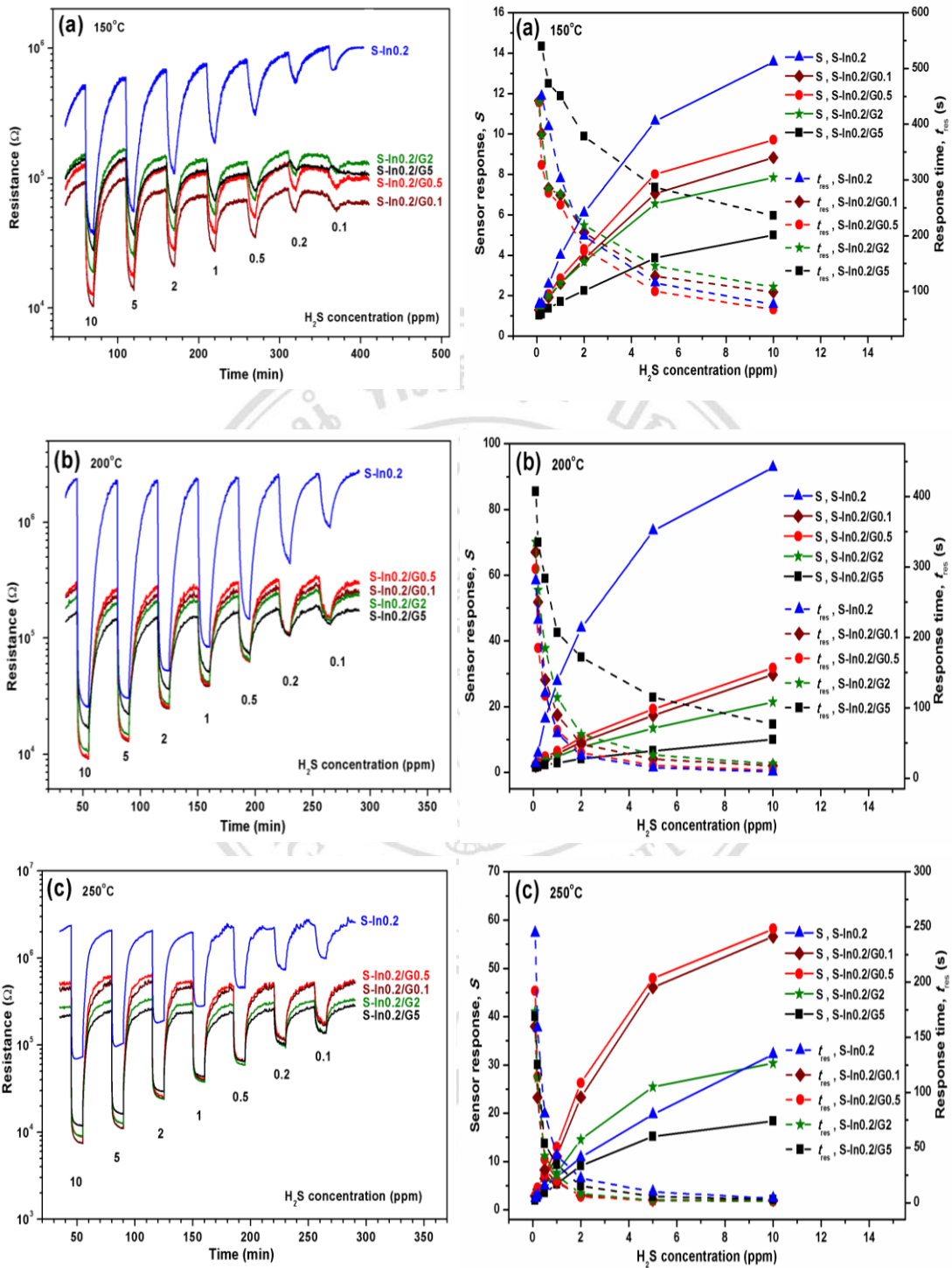


รูป 4.23 รูปแบบของอุณหภูมิในการตอบสนองของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนในระดับการโหลดกราฟีนที่แตกต่างกันคือร้อยละ 0.1–5 โดยน้ำหนัก (S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5) ต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 150–350 องศาเซลเซียส

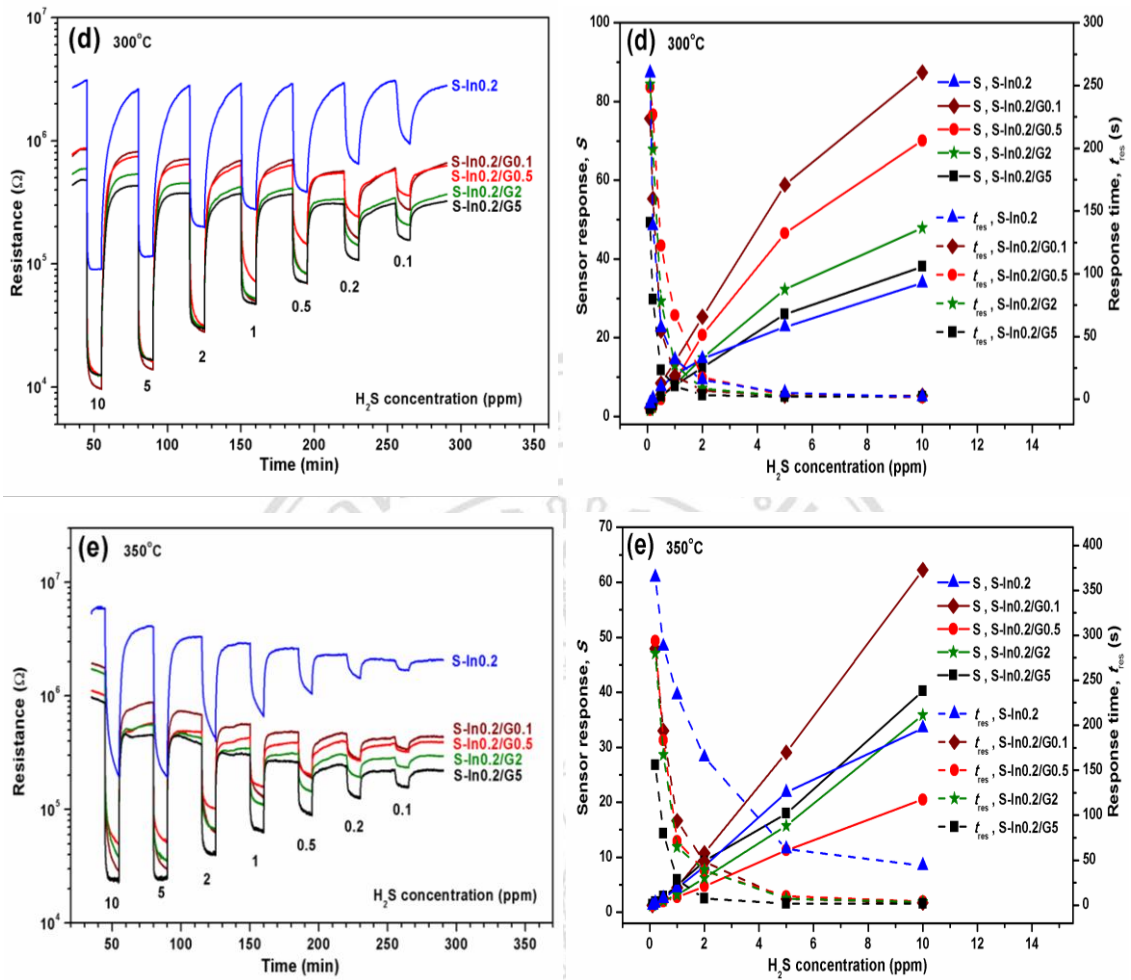
## (2.2) ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ )

เมื่อได้เงื่อนไขการเจือทินไดออกไซด์ด้วยอินเดียมเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก จึงนำมาผสมกับกราฟีนในปริมาณร้อยละ 0.1, 0.5, 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ได้ทำการทดสอบการตอบสนองของตัวรับรู้ที่อุณหภูมิ 150 ถึง 350 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของพิสัยในการวัดช่วง 0.1–10 ppm รูป 4.24–4.25 แสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สอดคล้องกันของการตรวจวัดในแง่ของการตอบสนองตัวรับรู้(เส้นทึบแกนซ้าย, -■-) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, -□-) ของ S-In0.2 และ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 พบว่า ที่อุณหภูมิ 150–200 องศาเซลเซียส เส้นฐานการคืนตัวของตัวรับรู้ยังคืนตัวไม่สมบูรณ์ตามเวลาที่กำหนด อาจจะต้องมีการเพิ่มเวลาในการคืนตัว การไหลลดกราฟีนที่อุณหภูมินี้ไม่สามารถพัฒนาค่าการตอบสนองได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น 250–350 องศาเซลเซียส เส้นฐานความต้านทานของตัวรับรู้มีความเสถียรภาพ สามารถคืนตัวมายังจุดเริ่มต้นได้ การตอบสนองต่อแก๊สชนิดนี้จะมีการตอบสนองได้ดีที่สุดที่เงื่อนไขการผสมกราฟีนในปริมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ค่าความเข้มข้นของแก๊สสูงสุด มีค่าความไวในการตอบสนอง(S) ประมาณ 87.39 เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สที่ค่าความเข้มข้นสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 1.84 วินาที เมื่อเทียบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ผสมกับกราฟีนในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีค่าความไวในการตอบสนอง(S)ประมาณ 31.77 เวลาในการตอบสนองต่อแก๊สที่ค่าความเข้มข้นสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ 11.46 วินาทีตัวรับรู้ที่ไหลลดด้วยกราฟีนมีเวลาการคืนตัวประมาณ 10–13 นาทีผลของการผสมกราฟีนนี้ช่วยลดเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สซึ่งสามารถตอบสนองได้เร็วขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved



รูป 4.24(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, —) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - -) กับความเข้มข้นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวรับรู้ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 150, 200 และ 250 องศาเซลเซียส

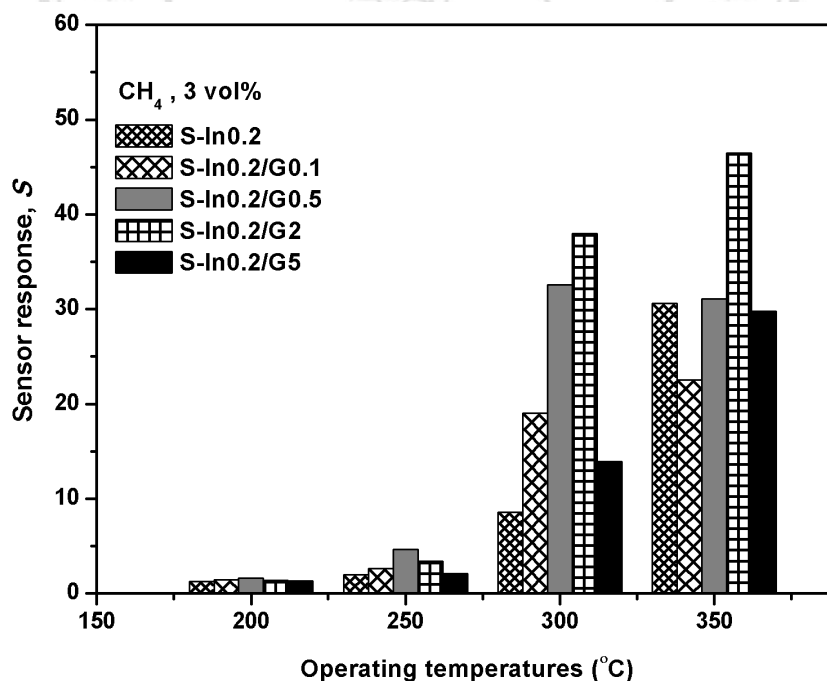


รูป 4.25(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, —) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - -) กับความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวรับรู้ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 300 และ 350 องศาเซลเซียส

### (3) ผลการทดสอบแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ )

#### (3.1) ผลการวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนอง (Temperature profile)

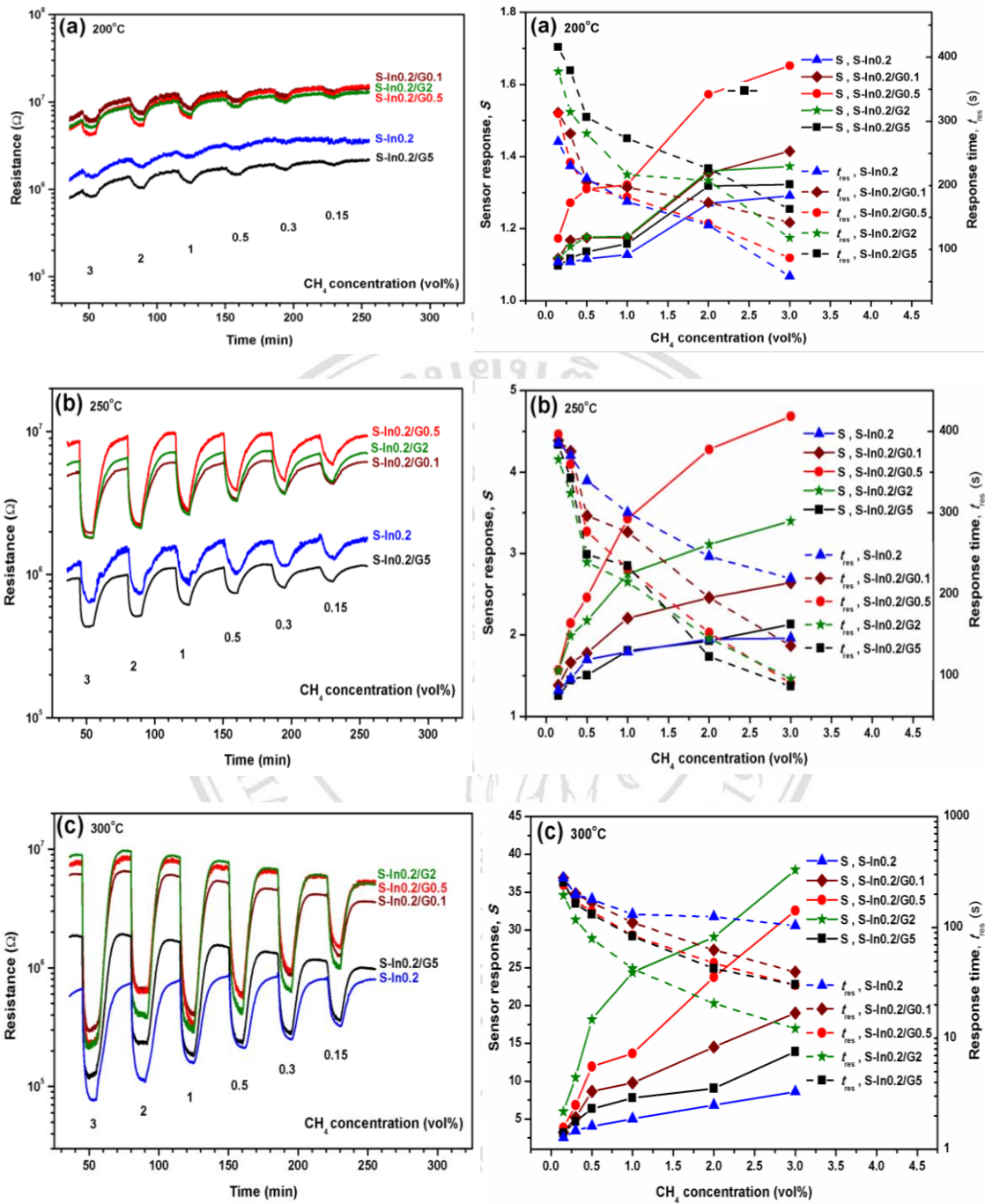
สำหรับแก๊สมีเทน สามารถวิเคราะห์รูปแบบอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุดของตัวรับรู้ต่อแก๊สมีเทน (ร้อยละ 0.15–3 โดยปริมาตร) ดังแสดงในรูป 4.26 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนเลยว่า ตัวรับรู้ที่ประดิษฐ์จากทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มของค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ มีค่าการตอบสนองสูงที่สุดที่อุณหภูมิการทดสอบ 350 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิ 200–250 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ผสมกับกราฟีนในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก สามารถพัฒนาค่าการตอบสนองได้ พิจารณาอุณหภูมิ 300–350 องศาเซลเซียส ตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ผสมกับกราฟีนในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (S-In0.2/G2) นั้นสามารถตอบสนองต่อแก๊สได้ดีที่สุดซึ่งถ้ามีการทดสอบในอุณหภูมิที่สูงกว่าและต่ำกว่าอุณหภูมินี้ พบว่า S-In0.2/G0.5 มีค่าการตอบสนองสูงกว่า S-In0.2/G2



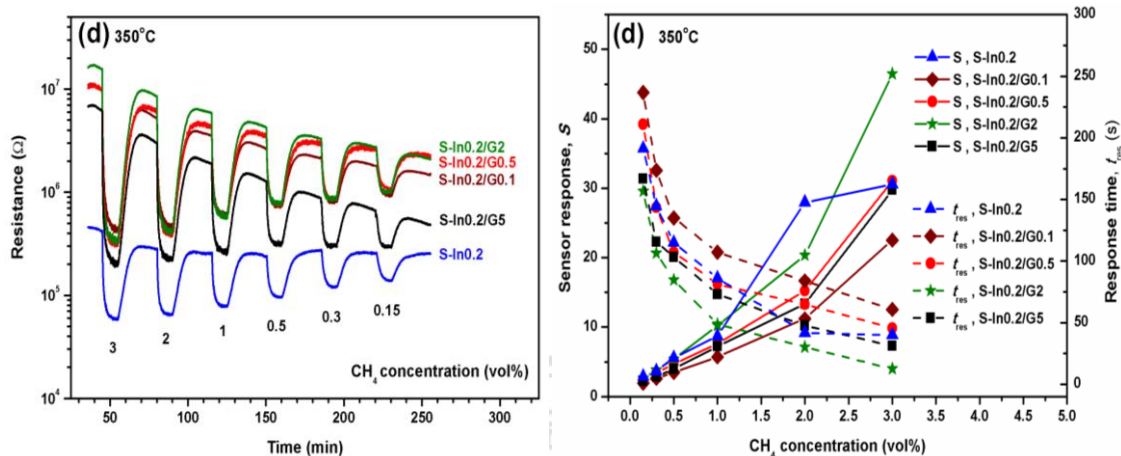
รูป 4.26 รูปแบบของอุณหภูมิในการตอบสนองของตัวรับรู้ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนในระดับการโหลดกราฟีนที่แตกต่างกันคือร้อยละ 0.1–5 โดยน้ำหนัก (S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5) ต่อแก๊สมีเทนที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 200–350 องศาเซลเซียส

### (3.2) ผลการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>)

รูป 4.27–4.28(ซ้าย) แสดงผลในลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของฟิล์มตอบสนองที่ไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมความเข้มข้นร้อยละ 0–1 โดยน้ำหนัก ต่อแก๊สมีเทน โดยใช้ความเข้มข้นของแก๊สร้อยละ 0.15–3 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิในทดสอบตั้งแต่ 200–350 องศาเซลเซียสและ (ขวา) การตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย) และเวลาตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - - -) ของ S-In0.5 และ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นแก๊สมีเทนที่อุณหภูมิการทดสอบ 350 องศาเซลเซียสและ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณการเจือของอินเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าความไวในการตอบสนอง(S) ต่อแก๊สมีเทนที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตรประมาณ 46.47 และ 37.94 ตามลำดับ มีเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สมีเทนประมาณ 12.47 วินาทีทั้งสองอุณหภูมิพิจารณาที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส การเจือโลหะอินเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีค่าการตอบสนองประมาณ 1.65 และ 4.68 ซึ่งสูงกว่าการเจือโลหะอินเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าการเจือโลหะอินเดียมที่ปริมาณร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนช่วยเพิ่มค่าความไวในการตอบสนองจากที่ไม่ได้โหลดกราฟีน สังเกตได้กราฟการเจือโลหะอินเดียมร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการทดสอบ 200 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าตัวรับรู้ส่วนใหญ่มีการตอบสนองน้อยหรือเกือบจะไม่ตอบสนองแล้ว (S-In0.2 มีค่าการตอบสนอง 1.29) การโหลดกราฟีน (S-In0.2/G0.5 มีค่าการตอบสนอง 1.65) สามารถเพิ่มการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวรับรู้ได้ดีกว่ากรณีที่ไม่มีการโหลดกราฟีนอีกทั้งยังช่วยลดเวลาในการตอบสนองต่อแก๊สสามารถตอบสนองได้เร็วขึ้นและมีเวลาการคืนตัวประมาณ 12–60 วินาที



รูป 4.27(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับ (เส้นทึบแกนซ้าย, —) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - - -) กับความเข้มข้นแก๊สมีเทนของตัวรับวัสดุ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 200, 250 และ 300 องศาเซลเซียส



รูป 4.28(ซ้าย) การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ขวา) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองตัวรับรู้ (เส้นทึบแกนซ้าย, —) และเวลาการตอบสนอง (เส้นประแกนขวา, - - -) กับความเข้มข้นแก๊สมีเทนของตัวรับรู้ S-In0.2/G0.1 ถึง S-In0.2/G5 ที่อุณหภูมิในการทำงาน 350 องศาเซลเซียส

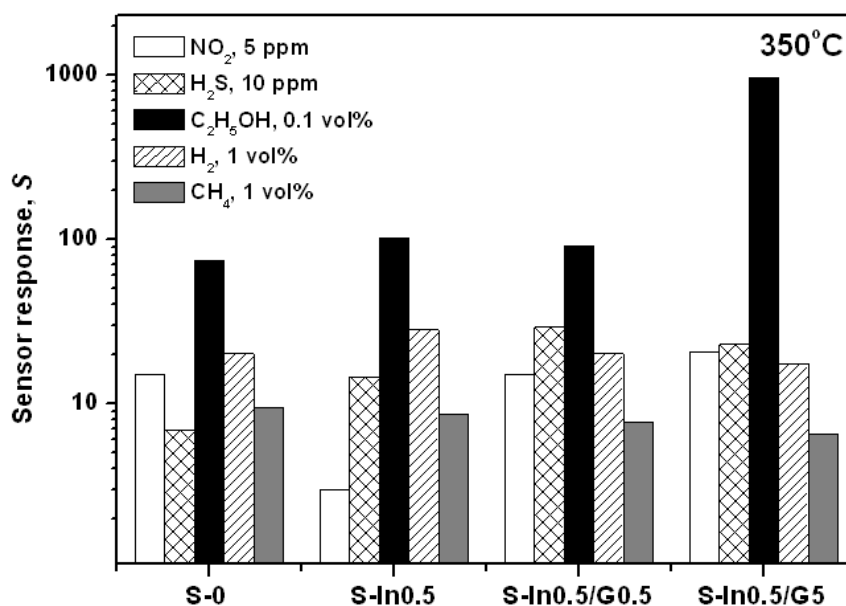
#### 4.2.3 การคัดสรรจำเพาะ (Selectivity)

การคัดสรรจำเพาะของฟิล์มตอบสนองทินไดออกไซด์, ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และกราฟีนโพลิตินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมได้รับทดสอบแก๊สต่อไอเอทานอล, ไฮโดรเจน, ไฮโดรเจนซัลไฟด์, มีเทนและไนโตรเจนไดออกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆและอุณหภูมิในการทำงานคือ 350 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน รูป 4.29 พบว่าตัวรับรู้มีการคัดสรรจำเพาะต่อไอเอทานอลขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการเจืออินเดียมและการโพลิตินกราฟีน

อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ แสดงการตอบสนองสูงต่อไอเอทานอล มีการตอบสนองระดับปานกลางต่อแก๊สไฮโดรเจนและไนโตรเจนไดออกไซด์และมีการตอบสนองต่ำต่อแก๊สมีเทนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ผลการเจืออินเดียมที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมคือร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีการตอบสนองต่อไอเอทานอลและไฮโดรเจนซัลไฟด์มีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่การตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์มีการลดลงอย่างมาก ดังนั้นทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีการคัดสรรจำเพาะต่อไอเอทานอลที่ดีขึ้น แต่กับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์มีการตอบสนองลดลง เมื่อเทียบกับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไฮโดรเจนและมีเทนไม่มีผลกระทบมากการปรับปรุงการคัดสรรจำเพาะต่อไอเอทานอลสัมพันธ์กับแก๊สอื่น ๆ โดยการเจืออินเดียมอาจนำมาประกอบกับการมีปฏิสัมพันธ์ที่เฉพาะเจาะจงระหว่างอินเดียมสปีชีส์และไอเอทานอลไอออน  $In^{3+}$  มีรายงานแสดงการมีปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งมากกับไฮดรอกซิลกรุป ( $OH^-$ ) ของเอทานอล [58] ส่งผลให้อัตราการดูดซับที่

ค่อนข้างสูงของเอทานอลเมื่อเทียบกับแก๊สรีดิวซิ่งอื่น ๆ นอกจากนี้สารเจืออินเดียมมีอัตราการดูดซับไฮโดรเจนและไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ลดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ซึ่งอาจจะอธิบายได้ด้วยผลของการดูดซับออกซิเจนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเจืออินเดียมช่วยเพิ่มการรับอิเล็กตรอนของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

สำหรับการไหลดกราฟีนระดับปานกลางคือร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าการตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การตอบสนองต่อเอทานอล, ไฮโดรเจน และ มีเทนไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นถึงการคัดสรรจำเพาะต่อไอเอทานอลลดลงเมื่อเทียบกับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีการตอบสนองมากขึ้นที่ระดับการไหลดกราฟีนเหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีการตอบสนองต่อไอเอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่การตอบสนองต่อแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและการตอบสนองต่อแก๊สอื่น ๆ ทั้งหมดยังคงเหมือนเดิม ดังนั้น การไหลดร้อยละ 5 โดยน้ำหนักไม่เพียงแต่มีค่าการตอบสนองสูง แต่ยังคัดสรรจำเพาะต่อไอเอทานอลสูงด้วย สังเกตได้จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอเอทานอลและบริเวณสัมผัสระหว่างกราฟีนกับอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมปฏิบัติสัมพันธ์การคัดสรรจำเพาะอาจจะประกอบกับการยึดเหนี่ยวที่แข็งแกร่งของกลุ่มไฮดรอกซีเอทานอลต่อการเชื่อมต่อ คาร์บอน-อินเดียม เมื่อระดับไหลดกราฟีนต่ำ (ร้อยละ 0.1–0.5 โดยน้ำหนัก) เพราะฟิล์มกราฟีน-อินเดียม-ทินไดออกไซด์มีรูพรุนน้อยการเชื่อมต่อส่วนใหญ่ฝังตัวอยู่ในฟิล์มและไม่ได้สัมผัสกับแก๊สนำไปสู่การตอบสนองต่อเอทานอลและการคัดสรรจำเพาะต่ำนอกจากนี้ การคัดสรรกับแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จะค่อนข้างต่ำ [90,95] ในทางตรงกันข้ามการตอบสนองมีเทนและไฮโดรเจนเกือบจะได้รับผลกระทบเนื่องจากอัตราการดูดซับที่ต่ำมากบนพื้นผิวกราฟีนและทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม



รูป 4.29 การคัดสรรจำเพาะของการตอบสนองตัวรับรู้ต่อไอเอทานอลความเข้มข้น 1,000 ppm, ไนโตรเจนไดออกไซด์ความเข้มข้น 5 ppm, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 10 ppm, ไฮโดรเจนความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตรและมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตรของตัวรับรู้ S-0, S-In0.5, S-In0.5/G0.5 และ S-In0.5/G5 ที่อุณหภูมิการทดสอบที่ดีที่สุดคือ 350 องศาเซลเซียส

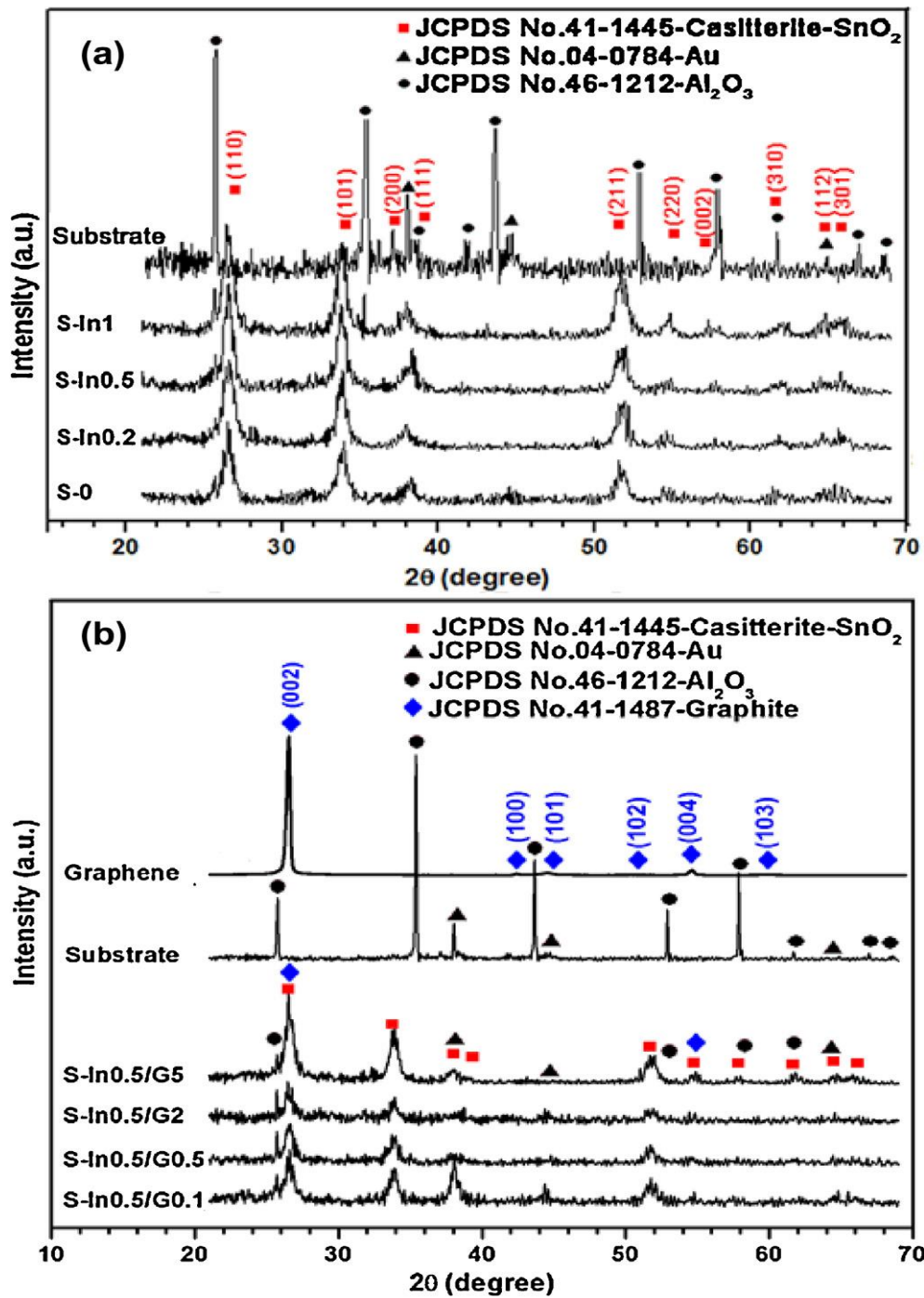
ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติตัวรับรู้ เช่น สภาพความไวและเวลาในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการทดสอบนี้จะทำให้ทราบความสามารถและปริมาณที่เหมาะสมในการเจืออินเดียมลงไปในตัวรับรู้ ซึ่งพบว่า อินเดียมในแต่ละปริมาณการเจือนั้นสามารถปรับปรุงสภาพความไวให้สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับตัวรับรู้ที่ทำการทดสอบที่ต่ำกว่า กลไกความสามารถของอินเดียมในปริมาณการเจือที่ต่ำนั้นสามารถอธิบายได้จากหลักการให้ความร้อนแก่ตัวรับรู้ เนื่องจากเมื่อมีการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า คือ 200 องศาเซลเซียสนั้นอนุภาคอินเดียมยังคงมีการกระจายตัวได้ดีบนพื้นผิวของตัวรับรู้ อีกทั้งอนุภาคอินเดียมยังคงไม่รวมตัวกันเป็นก้อนหยาบ เนื่องจากอุณหภูมิยังไม่สูงพอที่จะเกิดการรวมตัวกันได้ อนุภาคจึงยังไม่เพิ่มขนาดมากเกินไป แต่เมื่อมีการทดสอบตัวรับรู้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือ 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสนั้น จะพบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคอินเดียมนั้นเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อน ทำให้อนุภาคอินเดียมมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นซึ่งทำให้ความสามารถในการตอบสนองลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับตัวรับรู้ที่มีการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาการตอบสนองต่อแก๊สใด ๆ จะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวเป็นบริเวณแรก ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจึงมีพื้นผิวสัมผัสจำเพาะที่มีค่าสูง

กว่า มีการรับปริมาณโมเลกุลของแก๊สได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาในการตอบสนองได้มากกว่า  
นั่นเอง มากไปกว่านั้นในการเจือด้วยอินเดียมซึ่งถือว่าเป็นสารเจือที่เป็นโลหะทรานซิชันก่อกัมมันต์  
สูงทางไฟฟ้า (electroactive transition metal) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาเฉพาะกลุ่มฟังก์ชันของแก๊ส  
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้เพิ่มความสามารถและความรวดเร็วในการ  
ตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างสอดคล้องกัน ส่วนกราฟีนเป็นชั้นของคาร์บอนหนึ่ง  
ชั้นจากการจัดเรียงอะตอมเป็นพันธะแบบหกเหลี่ยมในแนวระนาบสองมิติหลายวงต่อกันคล้ายกับตา  
ข่าย มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี มีการนำความร้อนได้สูงตัวรับรู้อินไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยอินเดียม  
ผสมด้วยกราฟีนนั้นจึงมีการตอบสนองได้ดีที่อุณหภูมิสูง

### 4.3 สันฐานวิทยาของตัวรับรู้อีกหลังการทดสอบตัวรับรู้อีก

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มตอบสนองทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ  
0–1 โดยน้ำหนัก (S-0 ถึง S-In1) และทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก  
โหลดด้วยกราฟีนร้อยละ 0–5 โดยน้ำหนัก (S-In0.5 และ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5) บนซับ  
สเตรทชนิดอะลูมินาฟิล์มหลายอิเล็กโทรดด้วยทอง หลังจากการอบอ่อนเพื่อกำจัดสารยึดเหนี่ยวและ  
หลังการทดสอบแก๊สแสดงดังรูป 4.30 (a) และ (b) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มตอบสนองมีความ  
เป็นผลึกสอดคล้องกันกับอนุภาคผง มีพิกตรงกับไฟล์ JCPDS เดียวกันและพิกการเลี้ยวเบนของ  
อินเดียมก็ยังไม่ปรากฏนอกจากนี้ฟิล์มตอบสนอง S-0 ถึง S-In1 และ S-In0.5/G0.1 ถึง S-In0.5/G5 มี  
ความสัมพันธ์ของความสูงพิกสูงสุดที่คล้ายคลึงกันกับผงนาโน (P-0 ถึง P-In1 และ P-In0.5/G0.1 ถึง  
P-In0.5/G5) แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื้อสารของการจัดเรียงตัวของผลึกหลังจากที่  
เตรียมฟิล์มตอบสนองและหลังการทดสอบแก๊ส ทินไดออกไซด์ปรากฏเป็นเฟสของทินไดออกไซด์  
ชนิดคาสติเทอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอล รูปแบบการเลี้ยวเบนของซับสเตรทชนิด  
อะลูมินามีโครงสร้างแบบรอมโบฮีดรอล (JCPDS หมายเลข 46–1212) และอิเล็กโทรดที่ฟิล์มหลาย  
ด้วยทองมีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์แบบกลางหน้า (JCPDS หมายเลข 04–0784) และกราฟีนมี  
โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการเปรียบเทียบกับเส้นสเปกตรัมมาตรฐานใน  
JCPDS หมายเลข 41–1487 ซึ่งกราฟีนที่ผสมเข้าไบนั้น ปรากฏเฟสหลักที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 26.5  
และ 55.3

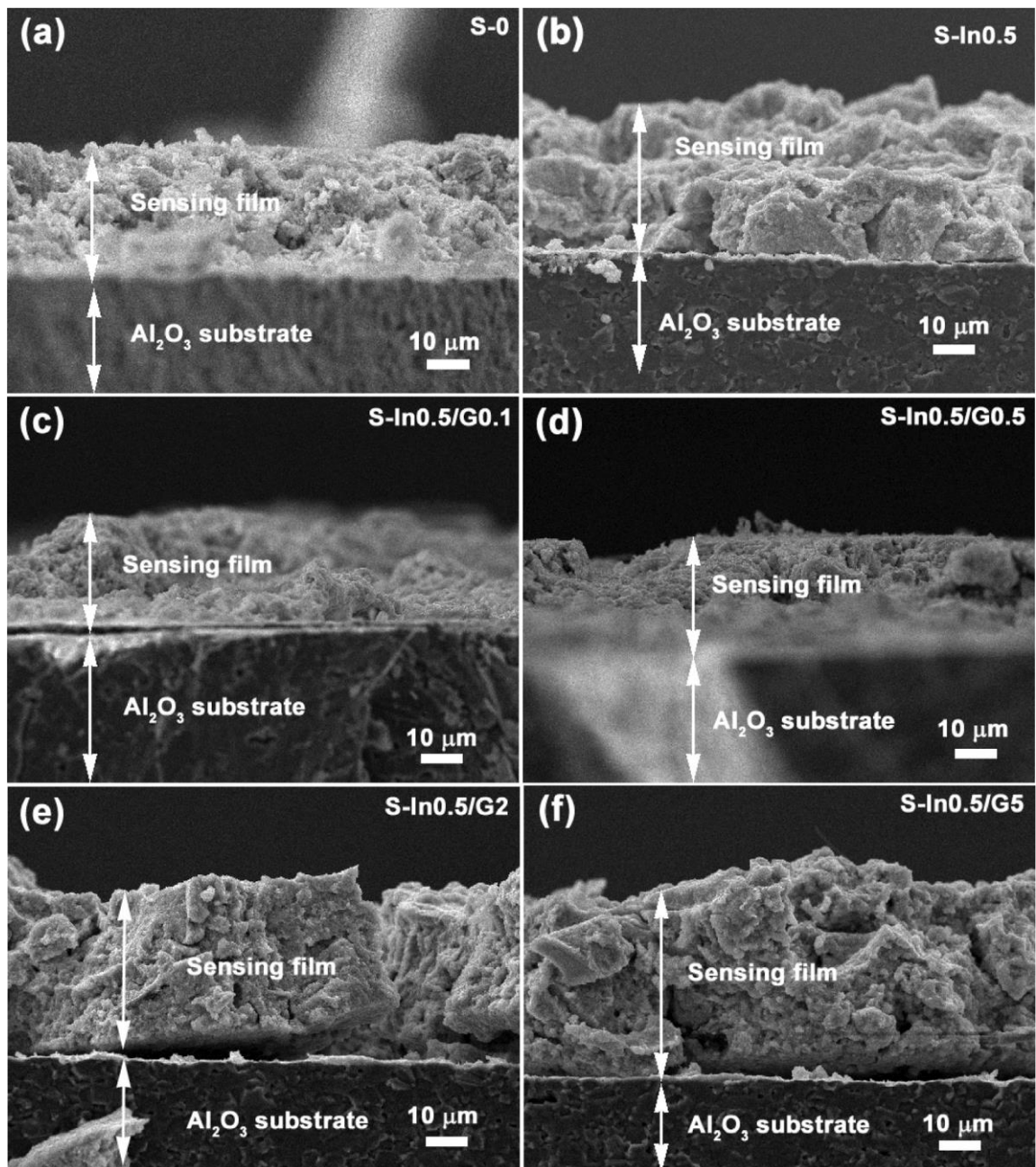


รูป 4.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มตอบสนองบนพื้นฐานของ (a) อนุภาคนาโน ทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0–1 โดยน้ำหนัก (S-0 ถึง S-In1) และ (b) ทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โทลด์ด้วยกราฟีนร้อยละ 0.1–5 โดยน้ำหนัก (S-In0.5/G0.1 S-In0.5/G5) บนชั้นสเตรทซนิกอะลูมินาพิมพ์ลายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทองหลังจากการอบอ่อนและการทดสอบแก๊ส

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

โครงสร้างภายหลังการทดสอบตัวรับรู้ สามารถวิเคราะห์ได้ดังรูป 4.31 ซึ่งแสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของตัวรับรู้ S-0, S-In0.5, S-In0.5/G0.1, S-In0.5/G0.5, S-In0.5/G2 และ S-In0.5/G5 फिल्मตอบสนองประคิษฐ์โดยวิธีการหมุนเหวี่ยงแบบกระจาย เคลือบบนพื้นผิวอะลูมินาฟิล์มหลายอิเล็กโทรดด้วยทองหลังจากการหลอมและการทดสอบแก๊ส แสดงให้เห็นถึงความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้ภายหลังการทดสอบแก๊ส จะเห็นได้ว่าฟิล์มทินไดออกไซด์ (S-0) มีความหนาประมาณ 20 ไมโครเมตร ประกอบด้วยอนุภาคนาโนอย่างหนาแน่นและมีอนุภาคละเอียดจัดเรียงตัวสม่ำเสมอบนพื้นผิวอะลูมินาที่เป็นของแข็ง สำหรับทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (S-In0.5) ฟิล์มจะค่อนข้างหนาและอนุภาคนาโนดูเหมือนจะมีการเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย การไหลคราฟิที่ความเข้มข้นต่ำ (S-In0.5/G0.1 และ S-In0.5/G0.5) ฟิล์มยังคงหนาแน่น มีความหนาต่ำ ในขณะที่แผ่นกราฟิที่เห็นได้ไม่ชัด ส่วนการไหลคราฟิที่ความเข้มข้นสูง (S-In0.5/G2 และ S-In0.5/G5) ฟิล์มที่ได้มีความหนา มีการรวมกันของแผ่นกราฟิที่เห็นได้ แผ่นฟิล์มมีการลอกออกเป็นแผ่นเกิดการหลุดออกได้ง่ายตามชั้นของกราฟิและมีช่องว่างขนาดใหญ่ภายในฟิล์ม ช่องว่างอาจเกิดจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างเกรนขนาดใหญ่ของแผ่นกราฟิและเกรนเล็ก ๆ ของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์โดยวิธีเฟลมสเปรย์ไพโรลิซิส ทำให้เกิดการแยกตัวของวัสดุหลังการกำจัดสารยึดเหนี่ยวโดยการอบอ่อนให้ความร้อน อย่างไรก็ตามฟิล์มตอบสนองทั้งหมดแสดงความสม่ำเสมอของความหนาของฟิล์ม ดังนั้น เทคนิคการเคลือบหมุนเหวี่ยงกระจาย มีศักยภาพสำหรับการผลิตฟิล์มตรวจวัดแก๊สให้ความสม่ำเสมอของความหนาและสามารถผลิตซ้ำได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

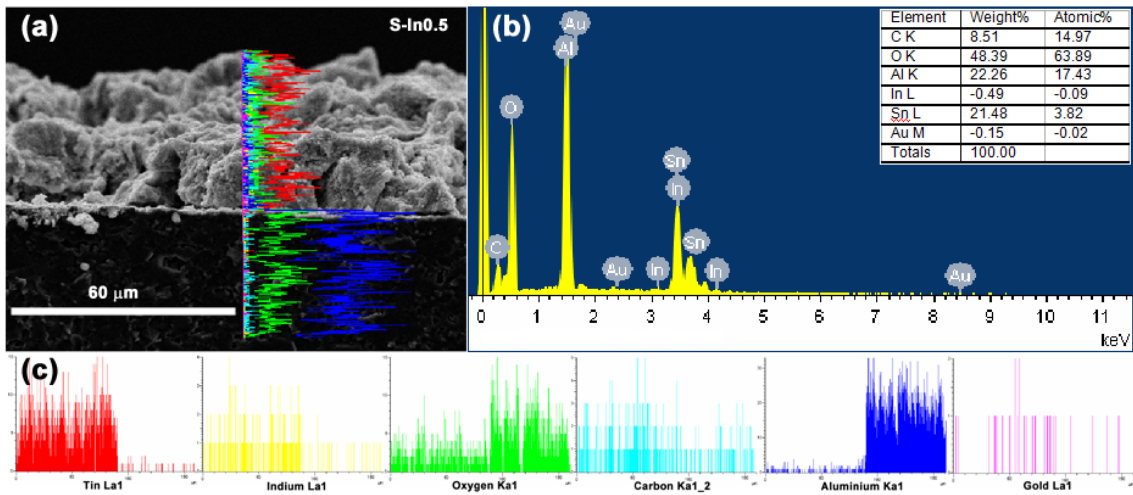


รูป 4.31 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาคตัดขวาง) ของตัวรับรู้ (a) S-0, (b) S-In0.5 (c) S-In0.5/G0.1, (d) S-In0.5/G0.5 (e) S-In0.5/G2 และ (f) S-In0.5/G5 บนชั้นสเตรทอะลูมินา พิมพ์ลายอิเล็กทรอนิกส์ด้วยทอง หลังจากการอบอ่อนและการทดสอบแก๊ส

### 4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

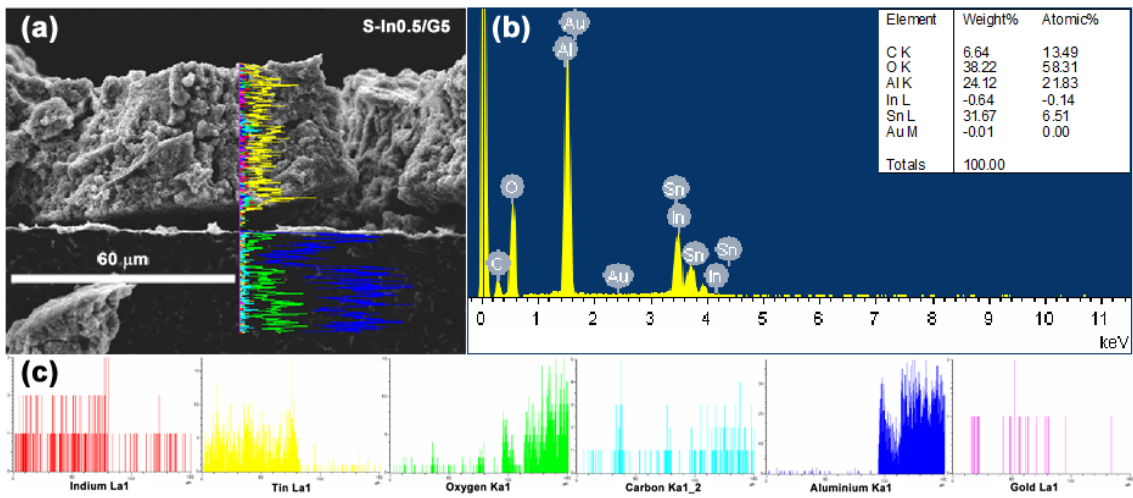
ในการวิเคราะห์ในส่วนนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบธาตุของสารตัวอย่างอนุภาคนาโนทิตานไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยโลหะอินเดียมในปริมาณที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก สำหรับไอเอทานอลที่ถูกขึ้นรูปแบบฟิล์มตอบสนองตัวรับรู้โดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์โดยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ชนิดสเปกตรัมและแบบเส้น แสดงได้ดังรูป 4.32 ของฟิล์มตอบสนองอนุภาคนาโนทิตานไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก นั้นจะพบว่าประกอบด้วยธาตุหลัก ๆ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ที่ทำการเตรียมโดยการหักขึ้นงานตามกระบวนการภาคตัดขวางและ ทำการเคลือบด้วยทองคำก่อนทำการวิเคราะห์ในบริเวณสเปกตรัมจากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อยังต่ำอิเล็กตรอนในยังบริเวณสเปกตรัมดังกล่าวอิเล็กตรอนพลังงานสูงจะเคลื่อนที่เข้าชนวงโคจรชั้นพลังงานต่าง ๆ (K, L, M,...) โดยเกิดการถ่ายโอนพลังงานแก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจร ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป และอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ ในการลดระดับพลังงานนี้จะเกิดการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอกซ์ ซึ่งค่าพลังงานส่วนเกินนี้จะมีพลังงานเท่ากับค่าความต่างของระดับชั้นพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจร ซึ่งจะมีความเฉพาะในแต่ละธาตุนั้น ๆ และปรากฏธาตุต่าง ๆ ให้เห็นได้ในการวิเคราะห์ ซึ่งในธาตุชนิดคาร์บอน (C), ออกซิเจน (O) และ อะลูมิเนียม (Al) จะแสดงสเปกตรัมที่ชั้น K เนื่องจากเป็นระดับชั้นพลังงานที่มีความเข้มของรังสีเอกซ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับระดับชั้นพลังงานอื่น ๆ และไม่เกิดการซ้อนทับของฟีกอื่นและ ธาตุชนิดทิตานและอินเดียมนั้น จะแสดงสเปกตรัมที่ชั้น L และ ธาตุชนิดทองจะแสดงสเปกตรัมที่ชั้น M ตามลำดับซึ่งเป็นระดับชั้นพลังงานที่มีความเข้มของรังสีเอกซ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับระดับชั้นพลังงานอื่น ๆ และไม่เกิดการซ้อนทับของฟีกอื่นเช่นกัน เห็นได้ว่าฟีกของอินเดียมทิตานและ ทองจะปรากฏหลายฟีกเนื่องจากการลดระดับพลังงานจากชั้น L และ M มาสู่ชั้น K และ ทองก็จะปรากฏหลายฟีกเช่นกัน เนื่องจากจะมีการลดระดับพลังงานจากชั้น N และ O มาสู่ชั้น M ซึ่งจะเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับชั้นพลังงานของวงโคจรต่าง ๆ คือ  $M_{\alpha}$  และ  $M_{\beta}$  ตามลำดับจากรูป 4.32 เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุทั้งหมดในการเตรียมตัวรับรู้ โดยการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ชนิดเชิงเส้น (a และ d) และสเปกตรัม (b) ของตัวรับรู้ที่เตรียมจากทิตานไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นเงื่อนไขการเจือที่ดีที่สุดในการตอบสนองต่อไอเอทานอลในการวิเคราะห์พบว่าไม่พบสเปกตรัมของสารเจืออินเดียมและทองที่เกิดจากการพิมพ์ลายอิเล็กโตรคาควาบริเวณที่วิเคราะห์อาจจะไม่ใช่ตำแหน่งที่พิมพ์ลายด้วยทองแต่จะสังเกตเห็นได้ว่าจะมีสเปกตรัมของคาร์บอนที่

สูงเป็นผลเนื่องมาจากการเคลือบคาร์บอนโดยวิธีสเปคโตรริง เพื่อให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้าก่อให้เกิดภาพที่คมชัดจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ



รูป 4.32 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

ผลการโหลดกราฟีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในทินไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นเงื่อนไขการเจือที่ดีที่สุดในการตอบสนองต่อไอเอทานอลแสดงดังรูป 4.33 ในการวิเคราะห์พบว่า พบธาตุของคาร์บอน, ออกซิเจน, ทิน, อะลูมิเนียมสังเกตเห็นได้ว่าสเปกตรัมของคาร์บอนมีปริมาณร้อยละ 6.64 โดยน้ำหนัก ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณการโหลดกราฟีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ส่วนธาตุอะลูมิเนียมพบตรงตำแหน่งจับสเตรททอนอะลูมินา ไม่พบสเปกตรัมของสารเจืออินเดียมและทองที่เกิดจากการพิมพ์ลายอิเล็กทรอนิกส์ที่บริเวณที่วิเคราะห์อาจจะไม่ใช่ตำแหน่งที่พิมพ์ลายด้วยทอง

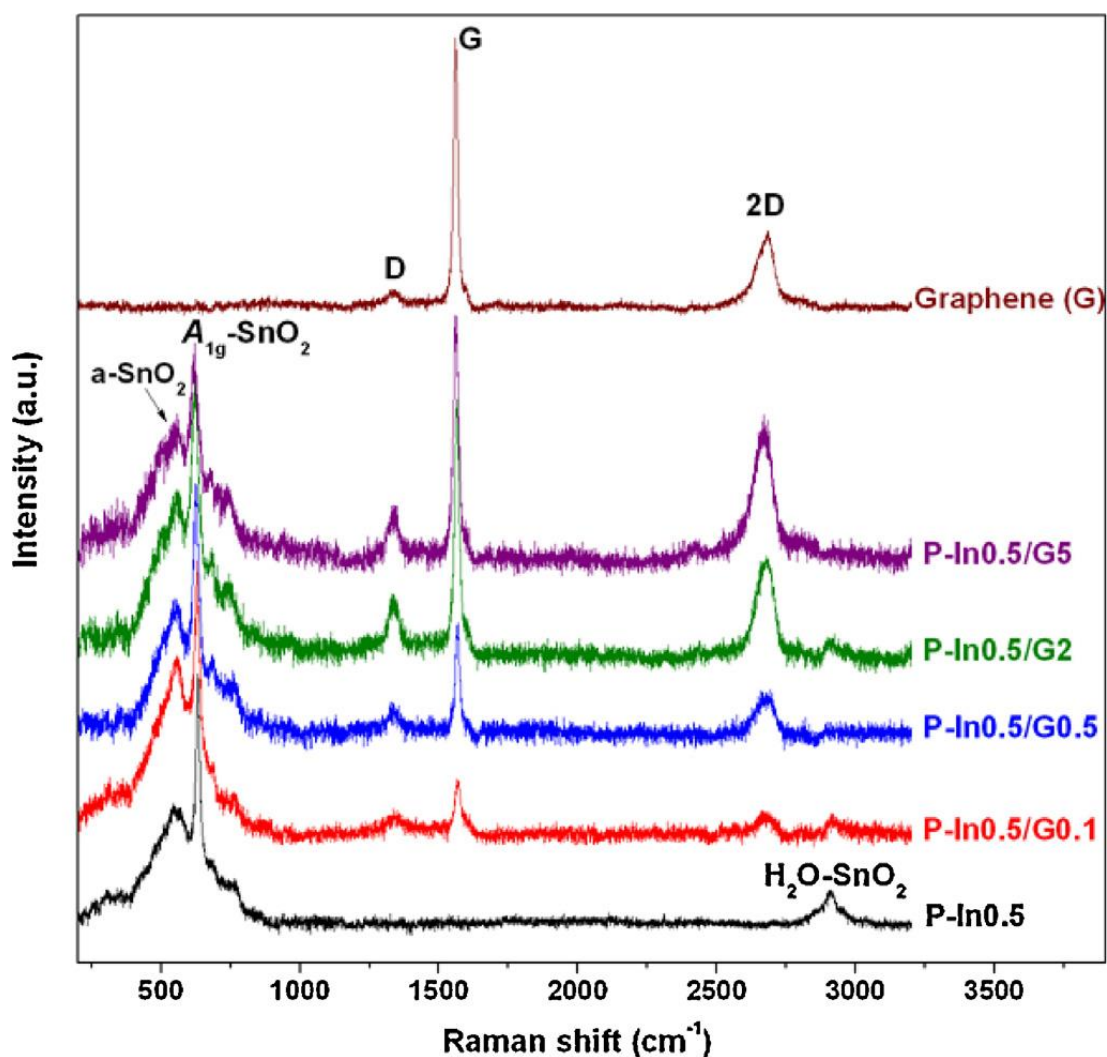


รูป 4.33 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์อนุภาคนาโนทินไดออกไซด์บริสุทธิ์และเจือด้วยโลหะอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ผสมกราฟีนในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

#### 4.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน

รูป 4.34 แสดงสเปกตรัมรามานของกราฟีนและอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก โหลดด้วยกราฟีนที่ความเข้มข้นต่างๆตั้งแต่ร้อยละ 0–5 โดยน้ำหนัก หลังจากการอบอ่อนและเผาไล่สารยึดเหนี่ยวในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าอนุภาคนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก พิกรามานแหลมที่สุดที่  $632 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับ  $A_{1g}$  โหมดการสั่นของผลึกทินไดออกไซด์เฟสแคสซิสมเทอไรต์ [96] นอกจากนี้ยังมีศูนย์กลางแถบวงกว้างสองแถบ ที่  $568$  และ  $2,930 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งอาจจะกำหนดรูปแบบการสั่นแบบผสมระหว่างเฟสดีบุกออกไซด์แบบออสถฐาน [97] และการสั่นความถี่สูง อันเนื่องมาจากการดูดซับน้ำบนพื้นผิวทินไดออกไซด์ [98] ตามลำดับ นอกจากนี้ไม่สามารถมองเห็นพีกของ  $\text{InO}_x$  ได้ในสเปกตรัมสำหรับกราฟีนมีสามพีกหลักของคาร์บอน D ที่ประมาณ  $1,330 \text{ cm}^{-1}$ , G ที่ประมาณ  $1,574 \text{ cm}^{-1}$  และ 2D ที่ประมาณ  $2,648 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับลำดับแรกการสั่นสะเทือนของพันธะ  $sp^3$  การสั่นสะเทือนในระนาบของพันธะ  $sp^2$  และลำดับที่สองการสั่นสะเทือนของพันธะ  $sp^3$  ตามลำดับ G ที่แข็งแกร่งพีกคุณลักษณะที่ต่ำมาก D พอประมาณและ 2D ที่เป็นพีกกราฟีนโครงสร้างหลายชั้นพีกมีความสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณการโหลดกราฟีนแสดงปริมาณชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้นด้วย โครงผลึก  $sp^2$  ขอบกพร่องแบบขอบ  $sp^3$  ต่ำและลำดับที่สองขอบกพร่อง โชนขอบเขตในระดับปานกลางที่เกี่ยวข้องกับการ

กำหนดค่าของกราฟีนผนังหลายชั้น [99] หลังจากโหลดกราฟีนผงทินไดออกไซด์, พิก G, 2D และ D ปรากฏขึ้นพร้อมกับการเพิ่มความเข้มที่สอดคล้องกับความเข้มข้นของกราฟีนในขณะที่พิกทินไดออกไซด์ยังคงเกี่ยวกับจุดสูงสุดเหมือนกันและมีการดูดซับน้ำที่ประมาณ  $2,930\text{ cm}^{-1}$  ผลลัพธ์ยืนยันว่ากราฟีนยังคงรักษาลักษณะของมันหลังจากการผสมและการอบอ่อนในอากาศที่  $450\text{ องศาเซลเซียส}$



รูป 4.34 สเปกตรัมรามานของกราฟีนโดยวิธีลอกผิวด้วยไฟฟ้าเคมีและผงนาโนทินไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่มีระดับการโหลดกราฟีนแตกต่างกัน (P-In0.5 และ P-In0.5/G0.1 ถึง P-In0.5/G5)