

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

การสร้างหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดผลตอบสนองที่มีต่อชนิดของก๊าซไอโซนนั่น ได้ทำการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนลงบนฐานรองซิลิคอนไดอะแฟรม โดยมีโครงสร้างประกอบด้วย ไมโครฮีเตอร์, ตัววัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน, ขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า, และชั้นฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) ที่ผ่านการเติมสารตะกั่วไดต์ อลูมิเนียม (Al), แพลทินัม (Pt), พลาเดียม (Pd), และเหล็ก (Fe) ซึ่งมีลำดับขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. การศึกษาคุณสมบัติของไมโครฮีเตอร์

- เปรียบเทียบอุณหภูมิและกำลังงานที่ใช้ของไมโครฮีเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนไดอะแฟรมและไมโครฮีเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอน

2. ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ที่ผ่านการปลูกฟิล์มด้วยระบบอาร์เอฟสปีดเตอร์ริง และการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์

- วิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะทางโครงสร้างของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ด้วยเครื่อง

XRD

- วิเคราะห์พื้นผิวฟิล์มอินเดียมออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM
- วิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าด้วย Hall Effect
- ทำการวัดผลการตอบสนองของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่มีต่อก๊าซไอโซน

3. การศึกษาและพัฒนาหัวตรวจวัดก๊าซไอโซน

- ศึกษาอุณหภูมิทำงานของหัวตรวจวัดก๊าซไอโซน
- ทำการวัดผลตอบสนองของหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนที่มีต่อก๊าซไอโซน และก๊าซชนิดต่างๆ ก่อนและหลังการเติมสารตะกั่วไดต์

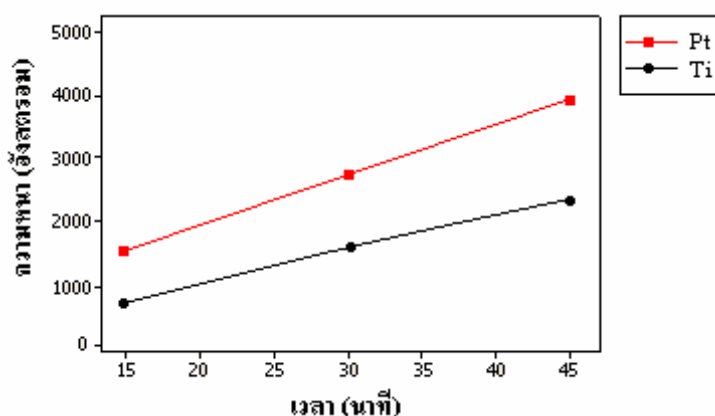
6.1 การศึกษาคุณสมบัติของไมโครฮีเตอร์

ไมโครฮีเตอร์ทำหน้าที่ผลิตความร้อนให้กับหัวตรวจวัดก๊าซ มีประโยชน์เพื่อเร่งปฏิกิริยาในการตรวจจับก๊าซและทำหน้าที่ไล่ความชื้นออกจากหัวตรวจวัดก๊าซ งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างไมโครฮีเตอร์ขึ้นจากโลหะแพลทินัม (Pt) โดยมีโลหะไททาเนียม (Ti) ทำหน้าที่เป็นชั้นประสานระหว่างแพลทินัมกับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และทำการศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์มของโลหะแพลทินัมและไททาเนียมที่สร้างขึ้นจากระบบการสปีดเตอร์ริงแบบคิซี สปีดเตอร์ริง รวมทั้ง

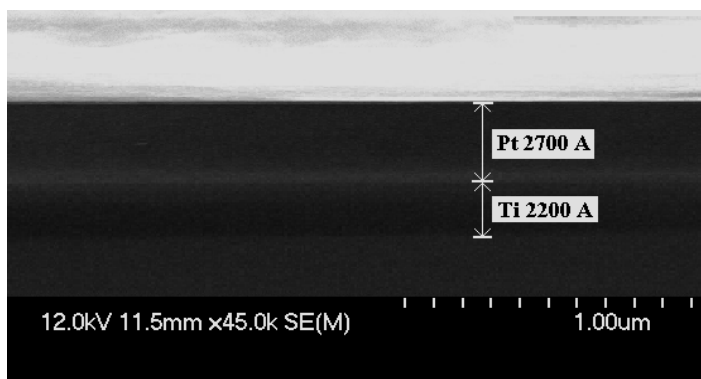
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับอุณหภูมิที่ได้ของไมโครฮีตเตอร์ ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอน ไดอะแฟรมและไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานใน กระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนต่อไป

6.1.1 การหาค่าความหนาของฟิล์มแพลทินัม

การทดลองปลูกฟิล์มแพลทินัม (Pt) และไททาเนียม (Ti) ด้วยระบบการสปัตเตอร์ริงแบบดี ซี สปัตเตอร์ริง โดยทำการจ่ายก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ (Ar100%) เข้าสู่ห้องสปัตเตอร์ริง ควบคุมกำลังงานการสปัตเตอร์ริงเท่ากับ 115 วัตต์ ควบคุมความดัน 0.15 Torr และทำการสปัตเตอร์ริงเป็นเวลา 15, 30, และ 45 นาที จากรูปที่ 6.1 พบว่าฟิล์มบางแพลทินัมมีอัตราการเคลือบฟิล์มประมาณ 88 อังสตรอม ต่อนาที และฟิล์มบางไททาเนียมมีอัตราการเคลือบฟิล์มประมาณ 49 อังสตรอม ต่อนาที ลักษณะภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มแพลทินัมที่เวลาการเคลือบฟิล์ม 30 นาที กับฟิล์มไททาเนียมที่เวลาการเคลือบฟิล์ม 45 นาที บนชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 6.2



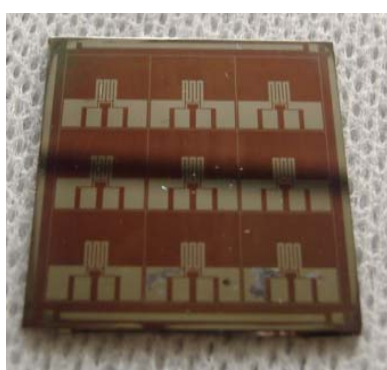
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มแพลทินัมและไททาเนียมกับเวลาการสปัตเตอร์ริง



รูปที่ 6.2 ภาพถ่ายตัดขวางฟิล์มบางแพลทินัมและไททาเนียม

6.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับอุณหภูมิที่ได้ของไมโครฮีตเตอร์

ไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างขึ้นจากโลหะแพลทินัมและไททาเนียม กำหนดความหนาที่ 2700 และ 2200 อังสตรอม ตามลำดับ หลังจากทำการซินเตอร์ (Sintering) ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการกัดลวดลายที่ขนาดเส้นของไมโครฮีตเตอร์เท่ากับ 100 ไมครอน ทำการจ่ายศักย์ตรงให้แก่ไมโครฮีตเตอร์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับอุณหภูมิที่ได้ของไมโครฮีตเตอร์ และทำการเปรียบเทียบระหว่างไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอน กับไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนไดอะแฟรมขนาด 2000×2000 ไมครอน ผลแสดงดังรูปที่ 6.4

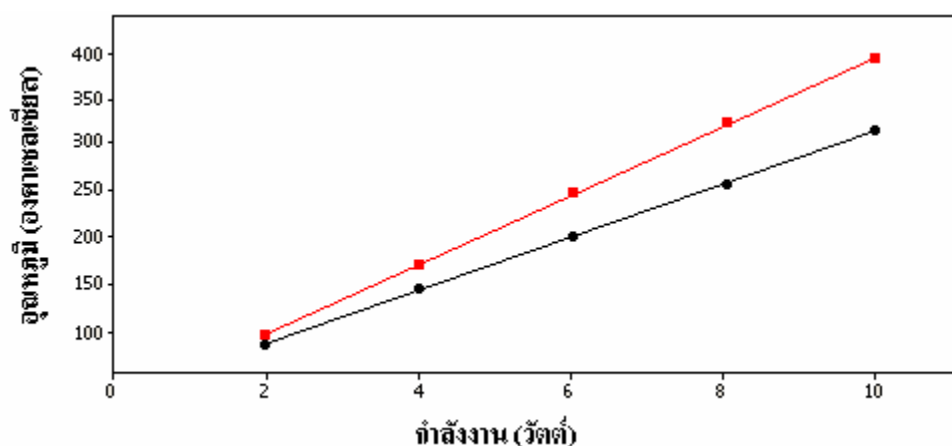


(ก)



(ข)

รูปที่ 6.3 ภาพถ่ายของ (ก) ไมโครฮีตเตอร์ และ (ข) ไดอะแฟรม



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานกับอุณหภูมิที่ได้ของไมโครฮีตเตอร์ขนาด 100 ไมครอน

ไมโครฮีตเตอร์ที่สร้างบน (■) ฐานรองซิลิคอนไดอะแฟรม และ (■) ฐานรองซิลิคอน

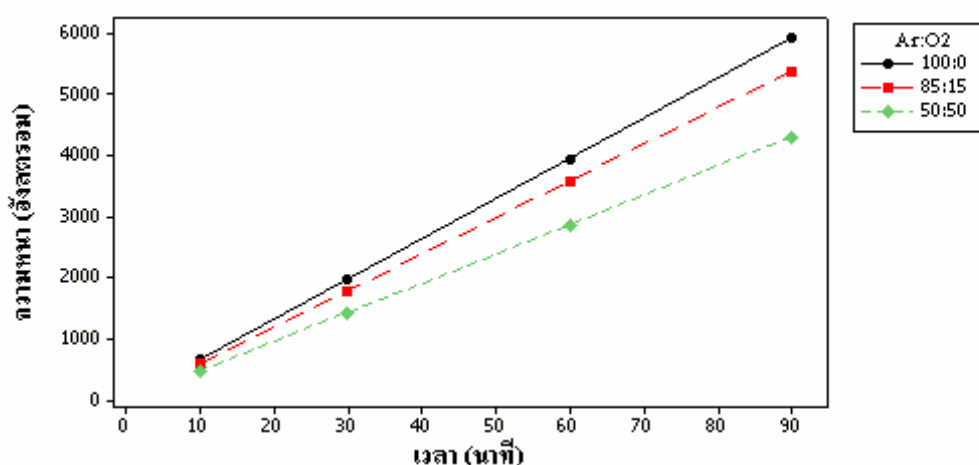
จากรูปที่ 6.4 พบว่าไมโครฮีทเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนไดอะแฟรมใช้ทำงานงานน้อยกว่าไมโครฮีทเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอน เนื่องจากลดการสูญเสียของการกระจายความร้อนภายในเนื้อซิลิคอน ดังนั้น ไมโครฮีทเตอร์ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนไดอะแฟรม ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 2 วัตต์, อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 3.5 วัตต์, อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 4.5 วัตต์, อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 6 วัตต์, อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 7.5 วัตต์, อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 9 วัตต์, อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้กำลังงาน 10 วัตต์ ตามลำดับ

6.2 การปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์โดยระบบอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง

6.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเคลือบฟิล์ม กับอัตราส่วนก๊าซผสม Ar กับ O₂

การปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ (In₂O₃) ด้วยระบบการสปีดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง โดยจ่ายก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอน (Ar) และก๊าซออกซิเจน (O₂) เข้าสู่ห้องสปีดเตอร์ริง เพื่อศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์ม ศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม และการประยุกต์ใช้งานในกระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์

กระบวนการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ได้ทำการควบคุมอัตราส่วนของก๊าซผสมที่จ่ายเข้าสู่ห้องสปีดเตอร์ริง ด้วยอัตราส่วนของก๊าซ Ar: O₂ เท่ากับ 50: 50, 85: 15, และ 100: 0 และควบคุมกำลังงานของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF) เท่ากับ 120 วัตต์ ที่ความดัน 1.5×10^{-2} Torr ผลของการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ด้วยเทคนิคอาร์เอฟ สปีดเตอร์ริง แสดงดังรูป 6.5



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบาง In₂O₃ กับเวลาการสปีดเตอร์ริง

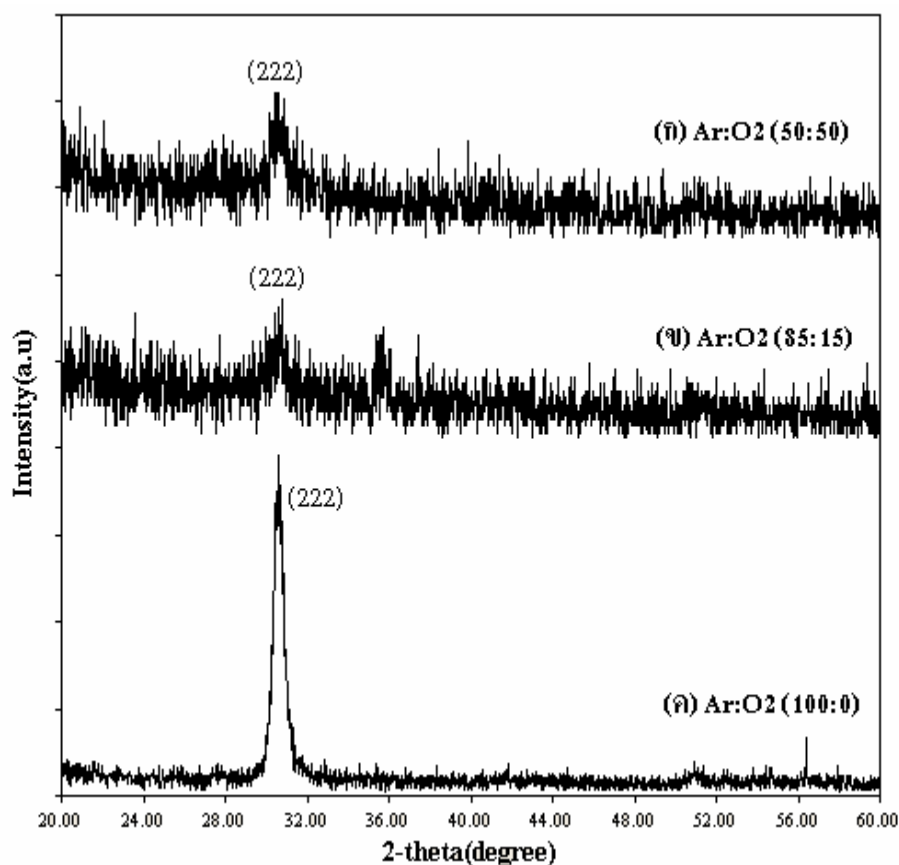
จากผลการทดลองการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ พบว่าอัตราการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์จากการสปัตเตอร์ริงด้วยอัตราส่วนก๊าซผสม Ar: O₂ อัตราส่วน 50: 50 มีอัตราการเคลือบฟิล์มเท่ากับ 48 อังสตรอม ต่อนาที่, Ar: O₂ อัตราส่วน 85: 15 มีอัตราการเคลือบฟิล์มเท่ากับ 60 อังสตรอม ต่อนาที่, และ Ar: O₂ อัตราส่วน 100: 0 มีอัตราการเคลือบฟิล์มเท่ากับ 66 อังสตรอม ต่อนาที่ เมื่อพิจารณาลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ กับเวลาการสปัตเตอร์ริง แสดงลักษณะของความเป็นเชิงเส้นตรง ทำให้สามารถกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มบางได้จากการควบคุมเวลาในการสปัตเตอร์ริง และอัตราส่วนของก๊าซผสม Ar: O₂ ที่อัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนมากกว่าก๊าซออกซิเจน เช่น ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ (Ar100%) จะมีการไอออไนซ์และพุ่งชนเป้าสารเคลือบที่มีประสิทธิผลสูงกว่า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนมากกว่า ทำให้ได้อัตราการเคลือบฟิล์มที่สูงกว่า

6.2.2 การวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ปลูกในบรรยากาศก๊าซผสม Ar: O₂

ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มจากระบบอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซผสม Ar: O₂ อัตราส่วน 50: 50, 85: 15, และ 100: 0 ทำการทดลองเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มที่ความดัน 1.5×10^{-2} Torr กำลังงานของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF) เท่ากับ 120 วัตต์ อุณหภูมิฐานรอง 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ได้มาทำการศึกษาและวิเคราะห์ อันประกอบด้วย

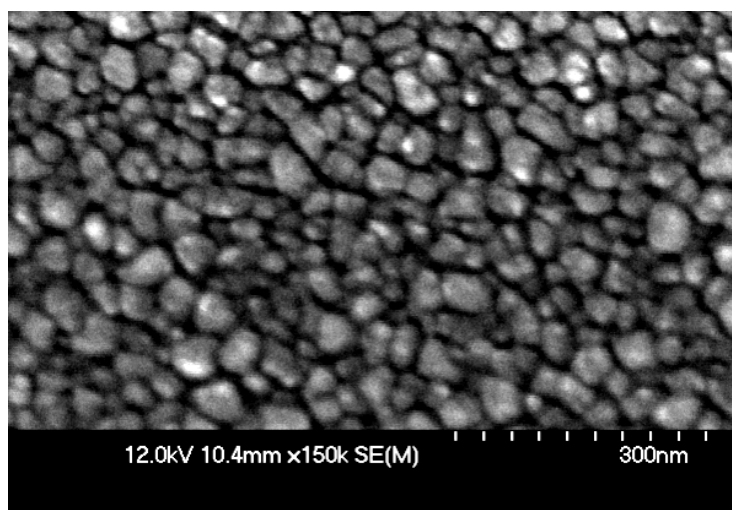
- เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างฟิล์ม เช่น มีการจัดเรียงตัวของผลึกและมีลักษณะแลตทิซเป็นอย่างไร (ดังรูป 6.6)
- ทำการถ่ายภาพผิวหน้าฟิล์มอินเดียมออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะและขนาดของเม็ดเกรน (ดังรูป 6.7 ถึง 6.10)

จากรูปที่ 6.6 การวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ด้วยเครื่อง XRD พบยอดของการเลี้ยวเบนเด่นชัด คือ ที่มุม 30.581 องศา แสดงการจัดเรียงตัวของผลึกในระนาบ (222) โดยที่ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ได้จากการสปัตเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซ Ar: O₂ (100: 0) มีการจัดเรียงตัวของผลึกในระนาบ (222) มากที่สุด พิจารณาได้จากยอดของการเลี้ยวเบนในรูป 6.6 (ค) พบว่าลักษณะของสัญญาณมีความเข้มสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณในรูป 6.6 (ก) และ (ข) ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่าฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์นั้น มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะแลตทิซแบบลูกบาศก์บอดีเซ็นเตอร์ (body-centered cubic: bcc) และมีค่าคงที่ผลึก (a) เท่ากับ 10.118 อังสตรอม

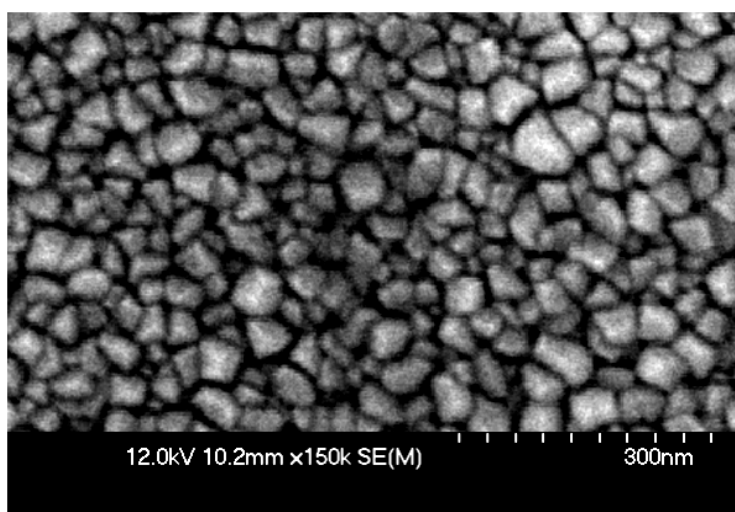


รูปที่ 6.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ปลูกแบบควบคุม อัตราส่วนก๊าซผสม Ar: O₂ (ก) 50: 50, (ข) 85: 15, และ (ค) 100: 0

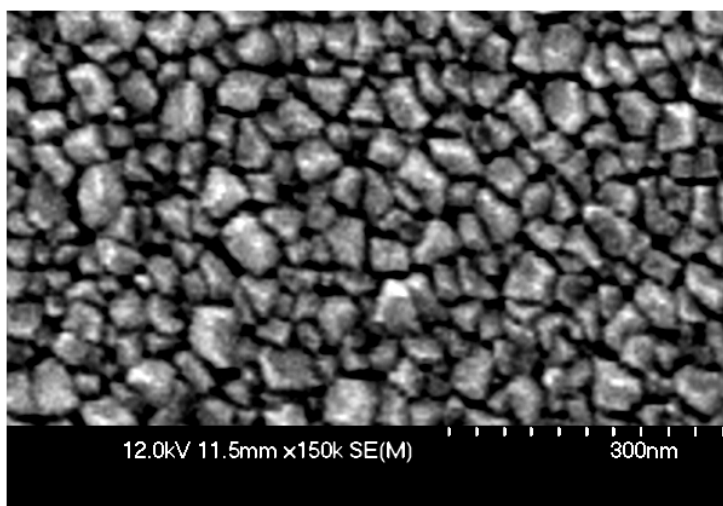
จากนั้นทำการถ่ายรูปผิวหน้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) ที่อัตราขยาย 150,000 เท่า พบว่าฟิล์มอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มในบรรยากาศของก๊าซผสม Ar: O₂ อัตราส่วน 50: 50, 85: 15, และ 100: 0 มีลักษณะผิวหน้าที่สม่ำเสมอประกอบด้วยเม็ดเกรนขนาดเล็ก โดยมีขนาดของเม็ดเกรนเฉลี่ยประมาณ 30 ถึง 60 นาโนเมตร โดยรูปที่ 6.7 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มด้วยอัตราส่วนก๊าซผสม Ar: O₂ (50: 50), รูปที่ 6.8 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มด้วยอัตราส่วนก๊าซผสม Ar: O₂ (85: 15), และรูปที่ 6.9 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มด้วยอัตราส่วนก๊าซผสม Ar: O₂ (100: 0) โดยทั้งหมดเป็นฟิล์มที่ยังไม่ผ่านการแอนนیل ส่วนในรูปที่ 6.10 แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ที่ปลูกในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์และไม่ผ่านการแอนนิล พบว่าฟิล์มมีการจัดเรียงตัวเป็นลำแถว (column) อย่างเป็นระเบียบ แสดงความเป็นผลึกที่สมบูรณ์



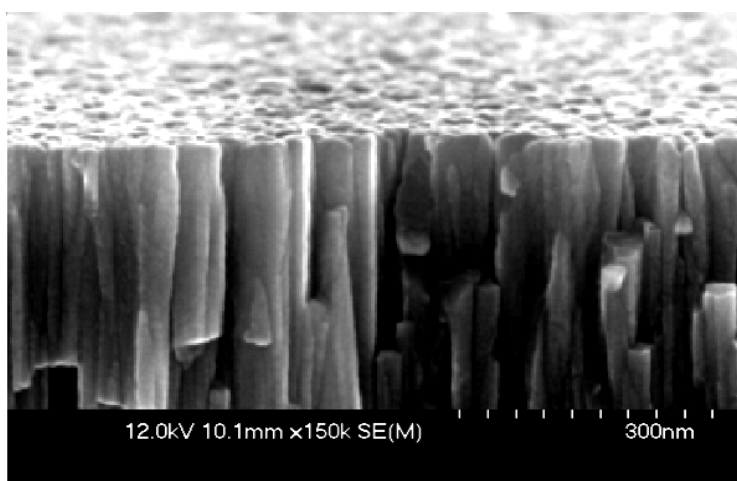
รูปที่ 6.7 รูปถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซผสม Ar: O₂ (50: 50) และไม่ผ่านการแอนนัล



รูปที่ 6.8 รูปถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซผสม Ar: O₂ (85: 15) และไม่ผ่านการแอนนัล



รูปที่ 6.9 รูปถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซผสม Ar: O₂ (100: 0) และไม่ผ่านการแอนนัล



รูปที่ 6.10 ภาพตัดขวางของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์และไม่ผ่านการแอนนัล

6.2.3 การศึกษาผลตอบสนองของชั้นฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่มีต่อก๊าซโอโซน

การศึกษาผลตอบสนองของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่มีต่อก๊าซโอโซน (O₃) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซน กับฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซ Ar: O₂ อัตราส่วน 50: 50, 85: 15, และ 100:0 ที่ความหนาฟิล์มต่างๆ และวิเคราะห์ผลของโครงสร้างผลึกของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ที่มีต่อค่าความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซน

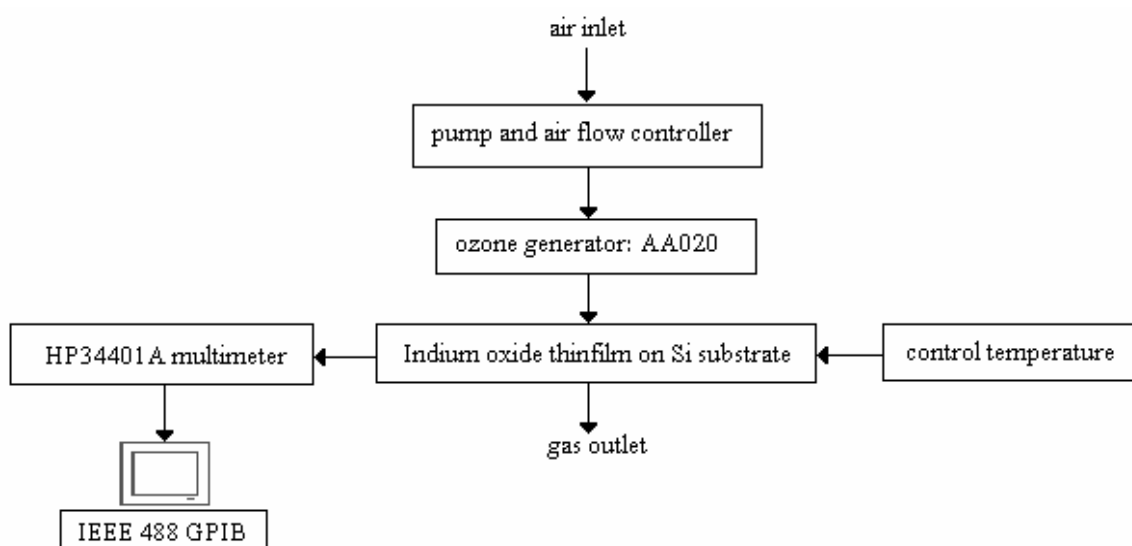
โดยทำการทดลองวัดผลการตอบสนองของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ที่มีต่อก๊าซโอโซน ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ต่อชั่วโมง ระบบการวัดผลตอบสนองต่อก๊าซโอโซนแสดงดังรูป 6.11 ทดลองวัดผลตอบสนอง ที่เงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการสปีดเตอร์ริงใน บรรยากาศก๊าซผสม Ar: O₂ อัตราส่วน 50: 50, 85: 15, และ 100: 0 กำหนดความหนาฟิล์มที่ 1000, 2000, 3000, และ 4000 อังสตรอม ความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนแสดงดังสมการ (6.1)

$$S = Ro_3 / R_{air} \quad (6.1)$$

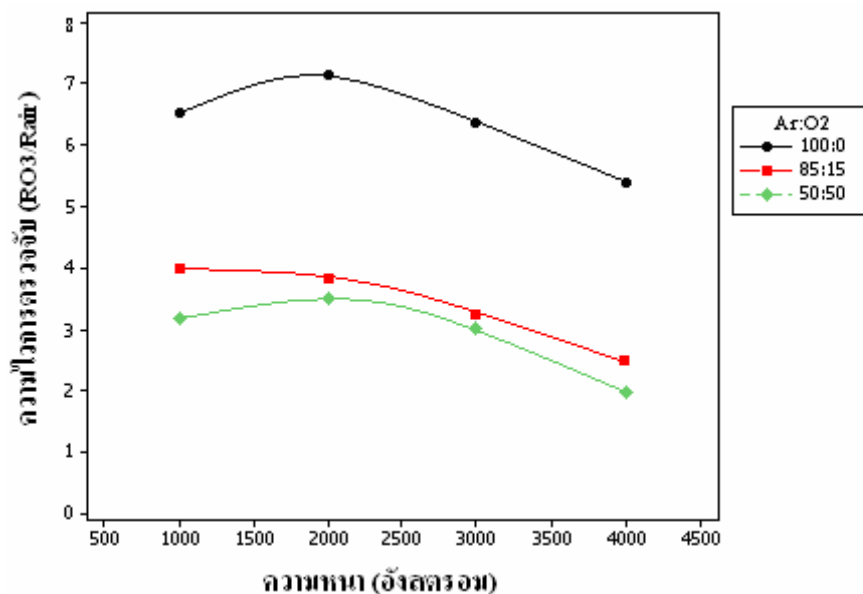
โดยที่ S คือ ค่าความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซน

Ro_3 คือ ค่าความต้านทานของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในบรรยากาศก๊าซโอโซน

R_{air} คือ ค่าความต้านทานของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่สภาวะปกติ



รูปที่ 6.11 แผนผังระบบวัดผลตอบสนองของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่มีต่อก๊าซโอโซน



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนกับความหนาของฟิล์มบาง In_2O_3 ที่สปีดเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซผสม Ar: O_2 (100: 0, 85:15, และ 50:50)

เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซน กับฟิล์มที่ผ่านการสปีดเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซผสมที่มีความหนาฟิล์มค่าต่างๆ โดยทั้งหมดใช้เวลาในการตรวจจับก๊าซเป็นเวลา 5 นาที เพื่อศึกษาความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนสูงสุด พบว่า การปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซผสมอาร์กอน: ออกซิเจน อัตราส่วน 100: 0 ที่ความหนาฟิล์มบาง 2,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนสูงสุด เนื่องจากชั้นฟิล์มบางที่มีความหนาน้อยกว่า 2,000 อังสตรอม ยังมีการจัดเรียงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ คือ มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่เป็นอะมอร์ฟัสเป็นส่วนประกอบอยู่มาก ส่วนฟิล์มที่หนากว่า 2,000 อังสตรอม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ ฟิล์มที่มีความหนามากๆ จึงมีความไวในการตรวจจับลดลงตามลำดับ

จากรูปที่ 6.12 พบว่า การปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซผสมอาร์กอน: ออกซิเจน อัตราส่วน 50: 50 ที่ความหนาของฟิล์มบาง 1,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 3.2, ที่ความหนาของฟิล์มบาง 2,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 3.5, ที่ความหนาของฟิล์มบาง 3,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 3.0, ที่ความหนาของฟิล์มบาง 4,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 2.2

การปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซผสมอาร์กอน: ออกซิเจน อัตราส่วน 85: 15 ที่ความหนาของฟิล์มบาง 1,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 4.0, ที่ความหนาของฟิล์มบาง 2,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 3.7, ที่ความหนาของฟิล์ม

บาง 3,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 3.3, ที่ความหนาของฟิล์มบาง 4,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 2.8

การปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซผสมอาร์กอน: ออกซิเจน อัตราส่วน 100: 0 ที่ความหนาของฟิล์มบาง 1,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 6.5, ที่ความหนาของฟิล์มบาง 2,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 7.0, ที่ความหนาของฟิล์มบาง 3,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 6.2, ที่ความหนาของฟิล์มบาง 4,000 อังสตรอม มีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนเท่ากับ 5.5

จากผลการทดลอง ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ทำการปลูกที่อัตราส่วนของก๊าซผสม Ar: O₂ ที่ผ่านการปลูกฟิล์มบางในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ ที่ความหนาฟิล์ม 2,000 อังสตรอม มีความไวในการตอบสนองต่อก๊าซสูงที่สุด (≈ 7.0) จึงทำการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ และวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มเพื่อปรับปรุงความไวในการตอบสนองต่อการโอโซนที่ดีขึ้นต่อไป

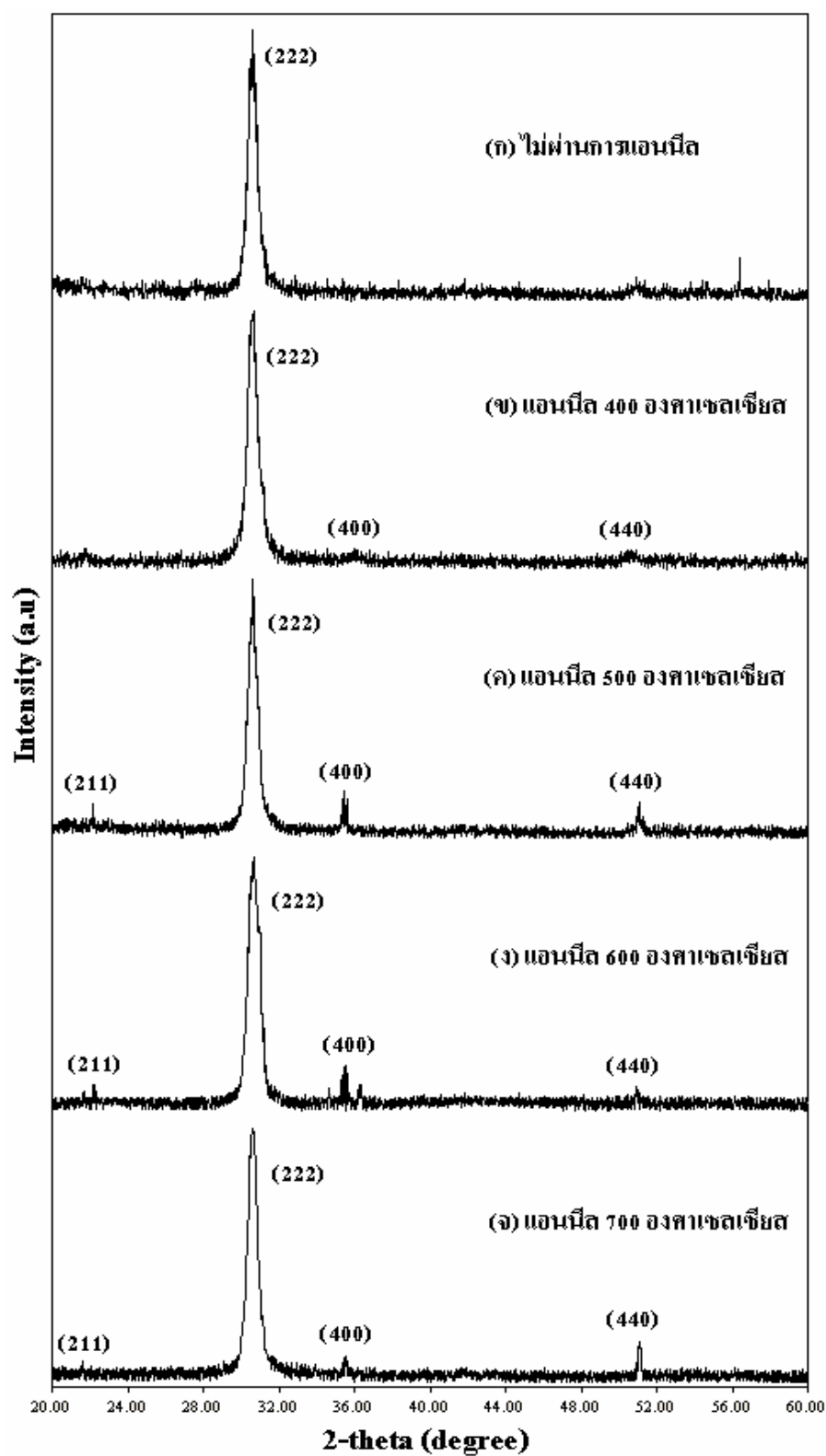
6.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ปลูกใน

บรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์

ทำการปรับปรุงความเป็นผลึกของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยกระบวนการแอนนัล หรือการอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้กับชั้นฟิล์ม โดยนำฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการสปีดเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ กำหนดความหนาของชั้นฟิล์ม 2,000 อังสตรอม ทำการแอนนัลด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิที่ 400, 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างฟิล์ม, ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ทางไฟฟ้าของฟิล์ม, และการตอบสนองที่มีต่อก๊าซโอโซน

6.3.1 ผลต่อการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการสปีดเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อทำการศึกษาผลจากการแอนนัลฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ว่ามีผลอย่างไรกับสัญญาณการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และฟิล์มมีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างไร



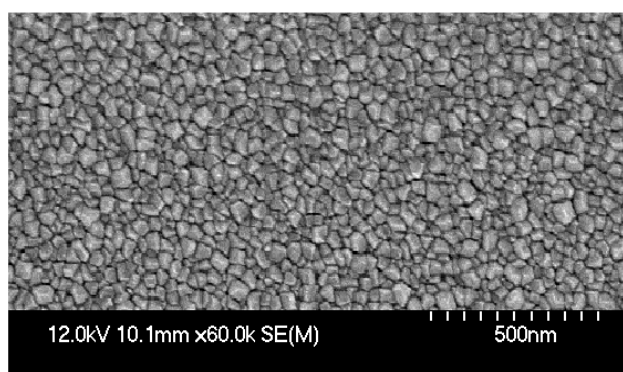
รูปที่ 6.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการปลูกฟิล์มในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และแอนนิตที่อุณหภูมิ 400 ถึง 700 องศาเซลเซียส

จากผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ด้วยเครื่อง XRD (รูป 6.13) พบยอดของสัญญาณการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่ง 2θ ที่มุม 20 ถึง 60 องศา คือ 21.499, 30.581, 35.467, และ 51.039 เป็นการจัดเรียงตัวของผลึกในระนาบ (211), (222), (400), และ (440) ตามลำดับ เป็นมุมมาตรฐานของโพลิคริสตอลอินเดียมออกไซด์ และแสดงโครงสร้างผลึกในลักษณะแลตทิซที่เป็นลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์ (body-centered cubic: bcc) โดยฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียส มีระนาบของ (211), (400), และ (440) เกิดขึ้นมากกว่าฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พิจารณาจากความเข้มของยอดสัญญาณที่มุมของระนาบดังกล่าว ผลเนื่องจากกระบวนการแอนนัลด้วยความร้อนสูง ความร้อนจะทำให้โครงสร้างของแลตทิซเกิดการสั่นและจัดเรียงโครงสร้างใหม่

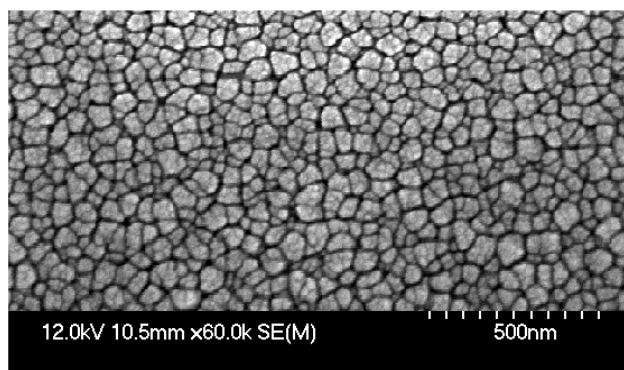
เนื่องจากโครงสร้างฟิล์มแบบโพลิคริสตอลนั้น มีความสามารถในการนำมาประยุกต์ใช้ตรวจจับก๊าซได้ดี ผลจากการแลกเปลี่ยนประจุอิเล็กตรอนบริเวณขอบเกรน ดังนั้น จากการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ด้วยการแอนนัล พบว่า ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างแบบโพลิคริสตอลที่สมบูรณ์ รวมทั้งผลจากขนาดของเม็ดเกรนก็ส่งผลต่อความไวในการตรวจจับก๊าซเช่นกัน จึงต้องทำการศึกษาขนาดของเม็ดเกรนในหัวข้อถัดไป

6.3.2 ผลต่อเม็ดเกรน

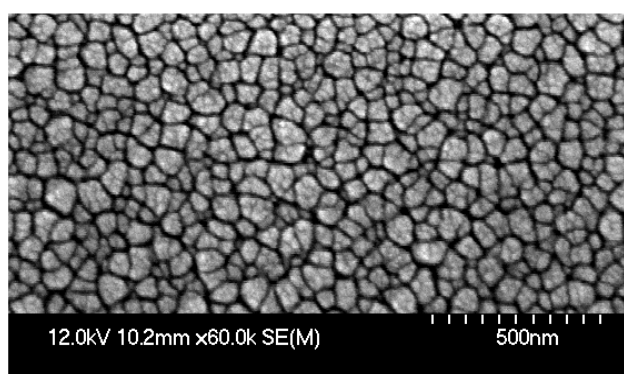
ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการสปัตเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) อัตราขยาย 60,000 เท่า



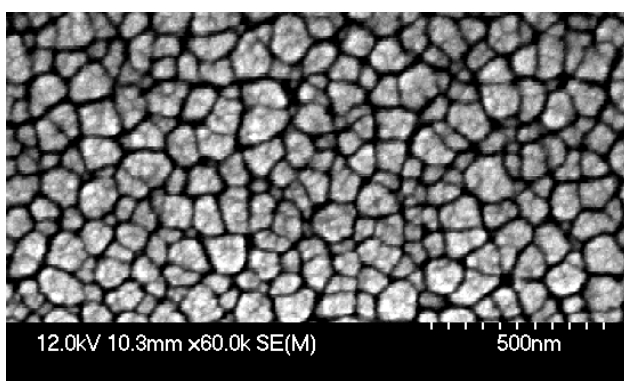
รูปที่ 6.14 รูปถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ไม่ผ่านการแอนนัล



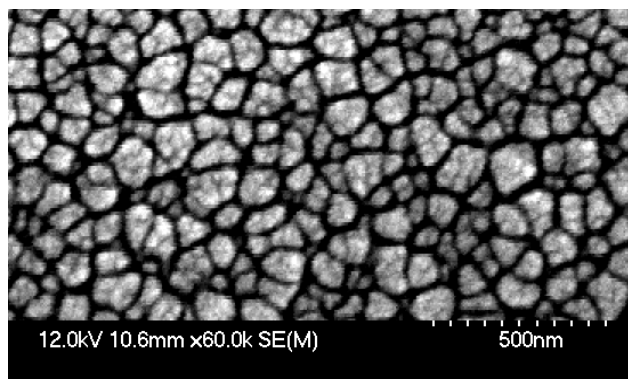
รูปที่ 6.15 รูปถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ แอนนิตที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.16 รูปถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ แอนนิตที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.17 รูปถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ แอนนิตที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส



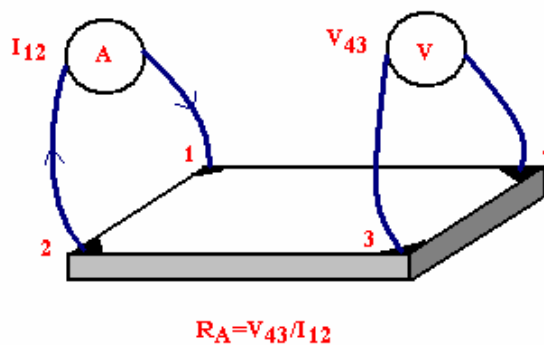
รูปที่ 6.18 รูปถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ แอนนัลที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

จากภาพถ่ายผิวหน้าฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (SEM) พบว่า ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มประกอบด้วยเม็ดเกรน (Grain size) ขนาดเล็กสม่ำเสมอ และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีขนาดของเม็ดเกรนเฉลี่ยประมาณ 50 ถึง 150 นาโนเมตร

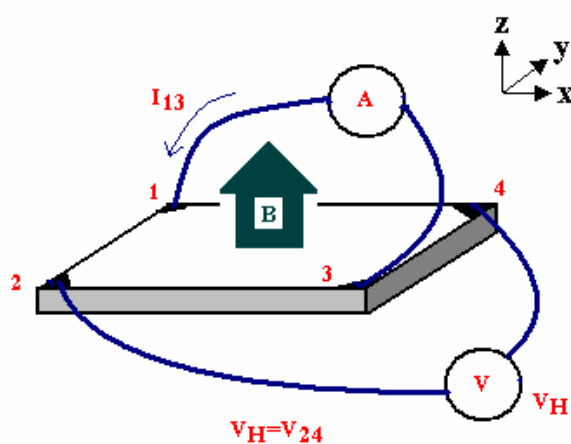
เนื่องจากขนาดของเม็ดเกรนส่งผลต่อความไวในการตรวจจับก๊าซ โดยฟิล์มที่มีเม็ดเกรนขนาดเล็กจะมีเส้นทางเดินกระแสสั้นกว่า ทำให้มีความไวในการตรวจจับก๊าซที่ดีกว่า จากการวิเคราะห์โครงสร้างฟิล์มด้วยเครื่อง XRD ที่ผ่านมานั้น ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบโพลีคริสตัลที่สมบูรณ์ และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พิจารณาฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส พบว่า ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีขนาดเม็ดเกรนเล็กที่สุด การศึกษาในหัวข้อถัดไปจึงทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ และการตอบสนองของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่มีต่อก๊าซไอโซน

6.3.3 การศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์

การศึกษารากฏการณ์ฮอลล์จะทำให้ได้ค่าตัวแปรทางไฟฟ้า ดังอย่างเช่น ค่าสภาพความต้านทาน (Resistivity: ρ), ความหนาแน่นของประจุพาหะ (Electron Concentration: n_H), และค่าความคล่องตัว (Electron Mobility: μ_H) โดยนำฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ และควบคุมความหนาฟิล์มที่ 2,000 อังสตรอม มาทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) โดยอาศัยเทคนิคของ van der Pauw Hall โดยใช้สนามไฟฟ้า 5,000 เกาส์ และจ่ายกระแสคงที่ 1 มิลลิแอมแปร์



รูปที่ 6.19 ลักษณะชิ้นงานและวงจรที่ใช้หาค่าสภาพความต้านทานของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์



รูปที่ 6.20 ลักษณะชิ้นงานและวงจรที่ใช้หาค่าความหนาแน่นประจุพาหะและค่าความคล่องตัวของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์

โดยที่ค่าสภาพต้านทานผิวของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์หาได้จากสมการ (6.2)

$$\rho = \frac{\pi t}{I} \cdot \frac{V_R}{\ln 2} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (6.2)$$

เนื่องจากความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) มีหน่วยเป็น Teslas (T) หรือ Gauss (G) โดยที่ $1\text{T} = 1 \frac{\text{Weber}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$ และ $1(\text{T}) = 10^4 (\text{G})$ สามารถหาค่า Hall coefficient จากสมการ (6.3)

$$R_H = \frac{10^8 \cdot t \cdot V_H}{BI} \quad (\text{cm}^3/\text{C}) \quad (6.3)$$

ค่าความหนาแน่นประจุพาหะหาได้จากสมการ (6.4)

$$n_H = \frac{1}{qR_H} \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (6.4)$$

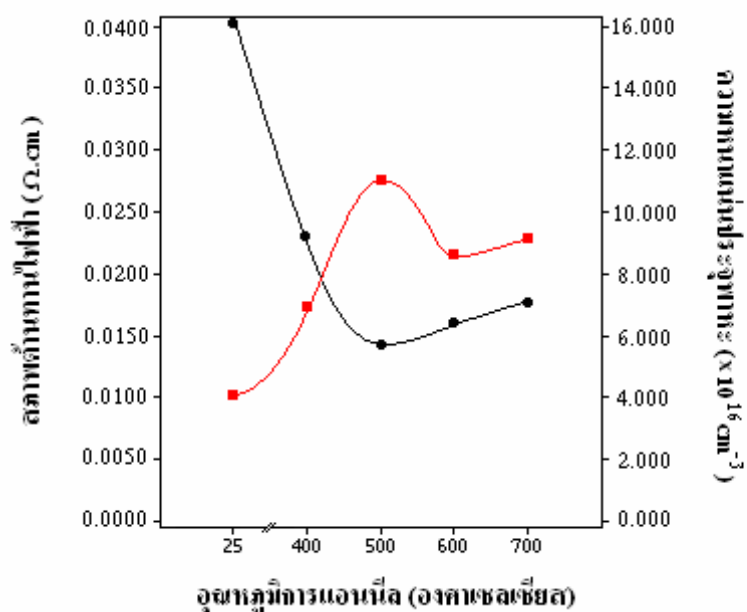
และค่าความคล่องตัวของประจุพาหะจากสมการ (6.5)

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho} \quad (\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}) \quad (6.5)$$

โดยที่	V_R	คือ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว 43
	V_H	คือ ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว 24
	t	คือ ความหนาของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์
	I	คือ กระแสไฟฟ้า
	R_H	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์
	B	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก
	n	คือ ความหนาแน่นประจุพาหะ
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอน
	μ_H	คือ ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางไฟฟ้าที่คำนวณจากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	V_R (V)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	σ ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	V_H (V)	R_H (cm^3/C)	n_H ($\times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)	μ_H ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)
25	0.44	0.0398	25.066	0.38	152	4.1118	3819
400	0.25	0.0226	44.117	0.21	84	7.4404	3716
500	0.16	0.0145	68.933	0.14	56	11.1607	3862
600	0.18	0.0163	61.274	0.16	72	8.6805	4417
700	0.19	0.0172	58.049	0.17	68	9.1911	3953

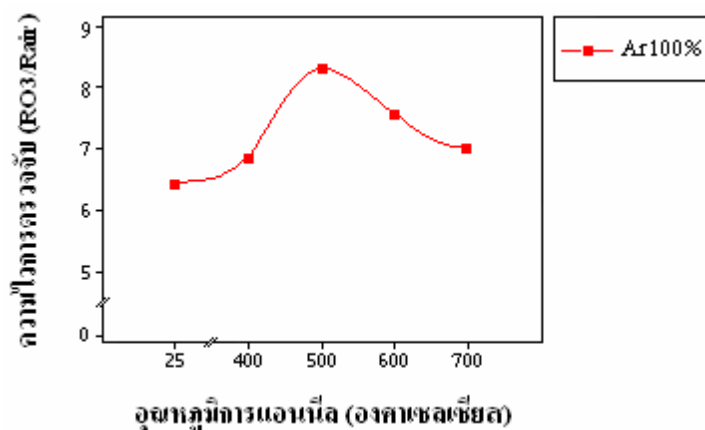


รูปที่ 6.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ), ความหนาแน่นประจุพาหะ (n_H) ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 6.1 จะเห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิการแอนนัลของฟิล์มบางที่ 400, 500, และ 600 องศาเซลเซียส จะได้ค่า σ , μ_H , และ n_H มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ค่า σ , μ_H , และ n_H จะมีค่าลดลง จากการทดลองสรุปได้ว่าอุณหภูมิการแอนนัลที่ 500 องศาเซลเซียส มีการปรับปรุงโครงสร้างผลึกแบบโพลีคริสตัลไลน์ที่สมบูรณ์ ทำให้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีดังรูปที่ 6.21

6.3.4 ผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซไอโซน

ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการสปีเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อนำมาวัดผลตอบสนองของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่มีต่อก๊าซไอโซนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ต่อชั่วโมง โดยควบคุมอัตราการจ่ายก๊าซไอโซนที่ 150 ซีซี ต่อนาที และวัดผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ด้วยระบบ IEEE 488 GPIB เพื่อศึกษาค่าความไวในการตรวจจับก๊าซไอโซน อันเป็นผลสืบเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิต่างๆ รวมถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ระบบวัดผลตอบสนองต่อก๊าซไอโซนแสดงไว้ดังรูปที่ 6.11



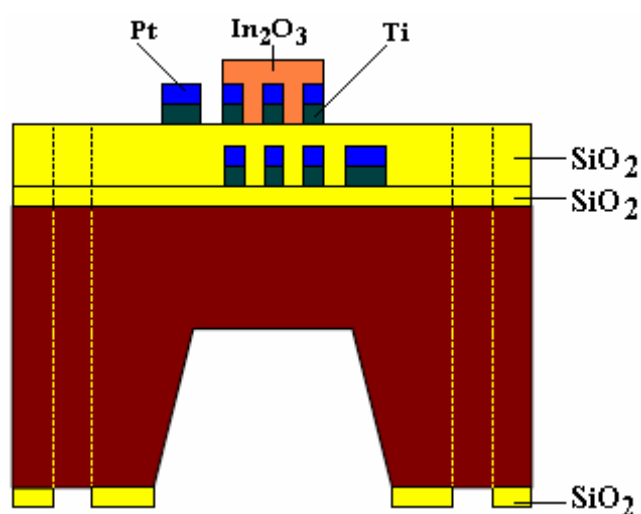
รูปที่ 6.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวการตรวจจับก๊าซไอโซนกับเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิต่างๆ

การศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ที่มีผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง พบว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการแอนนัลมีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนเท่ากับ 6.4, ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนเท่ากับ 6.9, ที่อุณหภูมิการแอนนัล 500 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนเท่ากับ 8.3, ที่อุณหภูมิการแอนนัล 600 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนเท่ากับ 7.6, และที่อุณหภูมิการแอนนัล 700 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนเท่ากับ 7.0 เวลาที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองต่อก๊าซไอโซนเท่ากับ 5 นาที จากการทดลองพบว่าฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนสูงที่สุด

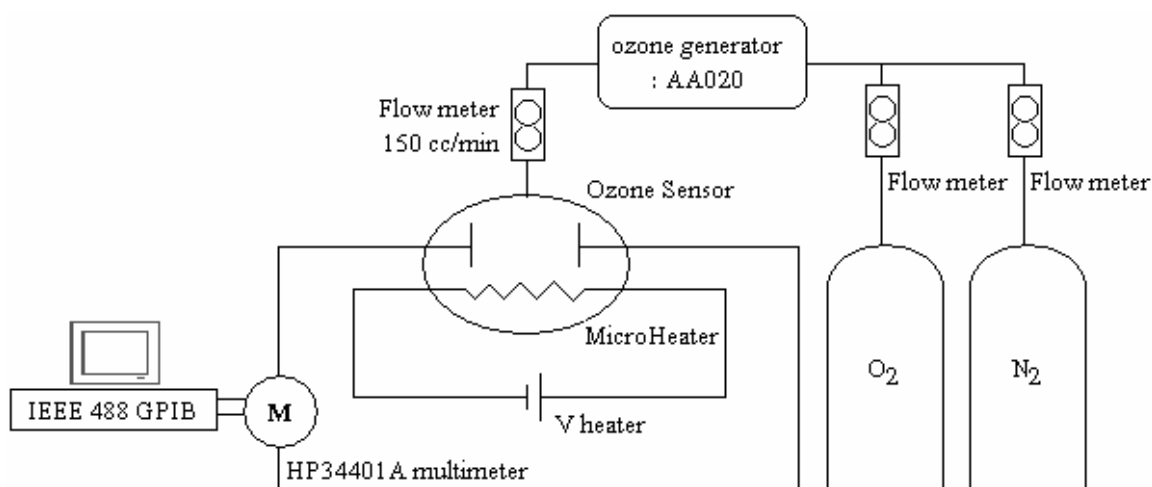
ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการสปัตเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ ที่ความหนาฟิล์ม 2,000 อังสตรอม และผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซนสูงสุด เนื่องจากการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นการปรับปรุงโครงสร้างผลึกให้มีความเป็นโพลีคริสตัล รวมทั้งเม็ดเกรนขนาดเล็ก ส่งผลให้มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยากับก๊าซไอโซนบริเวณขอบเกรนของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ได้มาก โดยฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดเท่ากับ $0.0145 \Omega \cdot \text{cm}$ มีค่าความหนาแน่นประจุพาหะมากที่สุดเท่ากับ $11.1607 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (รูป 6.21) และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยารีดักชัน คือก๊าซไอโซนจะถูกรีดิวซ์ดึงอิเล็กตรอนออกจากฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ และฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ มีผลทำให้ค่าความต้านทานของฟิล์มเพิ่มขึ้น

6.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิขณะตรวจจับก๊าซโอโซนของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซน

การทดลองใช้ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในการตรวจจับก๊าซโอโซนที่ผ่านมานั้น ทดลองที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าค่าความไวในการตรวจจับก๊าซยังคงมีความไวน้อย จึงทำการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนโครงสร้างดังรูปที่ 6.23 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิทำงานของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนขณะตรวจจับก๊าซโอโซน ว่าอุณหภูมิทำงานที่ได้จากไมโครฮีเตอร์ของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซน จะมีผลอย่างไรกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซน และเป็นการเร่งการเกิดปฏิกิริยาอย่างไร แผนผังการติดตั้งเครื่องที่ใช้วัดผลตอบสนองต่อก๊าซโอโซนแสดงดังรูป 6.24

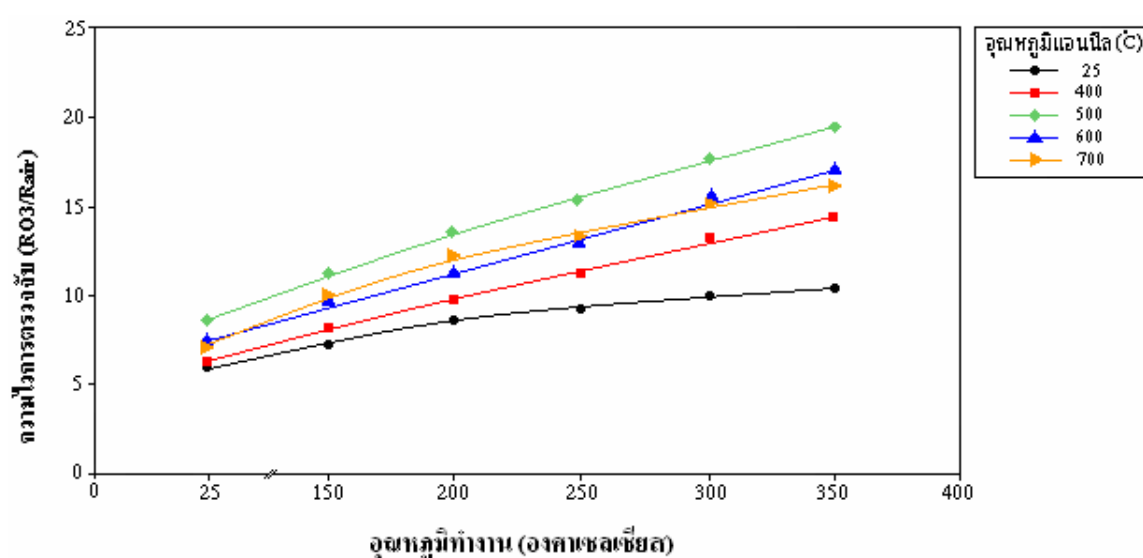


รูปที่ 6.23 โครงสร้างของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนที่ใช้ทำการทดลอง



รูปที่ 6.24 แผนผังการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อก๊าซโอโซน

ในส่วนของชั้นฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซน ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ถูกเตรียมด้วยเงื่อนไขการสปีดเตอร์ริงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ ที่ความหนาฟิล์ม 2,000 อังสตรอม ผ่านการแอนนัลฟิล์มด้วยอุณหภูมิ 400, 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนดังกล่าวมาทดสอบความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ต่อชั่วโมง ที่อัตราการจ่ายก๊าซโอโซน 150 ซีซี ต่อนาที ระบบวัดผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 6.24 โดยป้อนอุณหภูมิทำงานหรืออุณหภูมิขณะตรวจจับก๊าซโอโซนที่ได้จากไมโครฮีเตอร์ของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซน ด้วยอุณหภูมิ 25, 150, 200, 250, 300, และ 350 องศาเซลเซียส และวัดความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซน



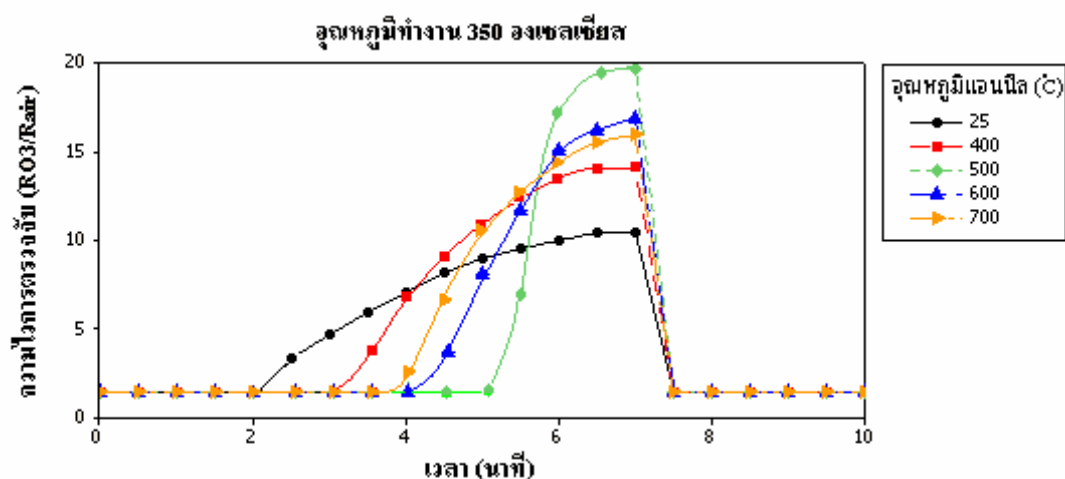
รูปที่ 6.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ กับอุณหภูมิทำงานค่าต่างๆ

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 6.25 พบว่า ฟิล์มที่ไม่ผ่านการแอนนัลมีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนที่อุณหภูมิทำงาน 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 6.4, ที่อุณหภูมิทำงาน 150 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนเท่ากับ 7.4, ที่อุณหภูมิทำงาน 200 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนเท่ากับ 8.5, ที่อุณหภูมิทำงาน 250 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนเท่ากับ 9.2, ที่อุณหภูมิทำงาน 300 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนเท่ากับ 10.0, และที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนเท่ากับ 11.5 ตามลำดับ

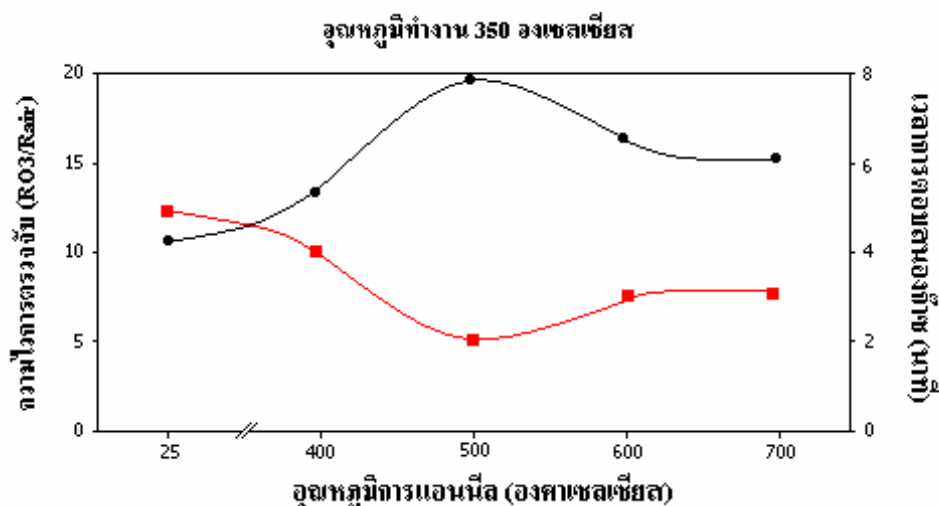
ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัล 400 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนที่อุณหภูมิทำงาน 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 6.9, ที่อุณหภูมิทำงาน 150 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนเท่ากับ 7.5, ที่อุณหภูมิทำงาน 200 องศาเซลเซียส มีค่าความไวในการ

ของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ได้ และเพื่อความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรรวมหรือเป็นอุปกรณ์ต้นแบบ อุณหภูมิทำงานของหัวตรวจวัดก๊าซโดยทั่วไปจะไม่เกิน 350 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซน ที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ไม่ผ่านการแอนนัลใช้เวลาในการตรวจจับก๊าซ 300 วินาที และใช้เวลาฟื้นคืนสภาพ 30 วินาที, ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการตรวจจับก๊าซ 240 วินาที และใช้เวลาฟื้นคืนสภาพ 30 วินาที, ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการตรวจจับก๊าซ 120 วินาที และใช้เวลาฟื้นคืนสภาพ 30 วินาที, ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการตรวจจับก๊าซ 180 วินาที และใช้เวลาฟื้นคืนสภาพ 30 วินาที, และฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการตรวจจับก๊าซ 180 วินาที และใช้เวลาฟื้นคืนสภาพ 30 วินาที ดังรูปที่ 6.26 และ 6.27



รูปที่ 6.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนกับเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซน ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการแอนนีสที่มีต่อ (●) ความไวในการตรวจจับก๊าซไอโซน และ (■) เวลาการตอบสนองต่อก๊าซไอโซน

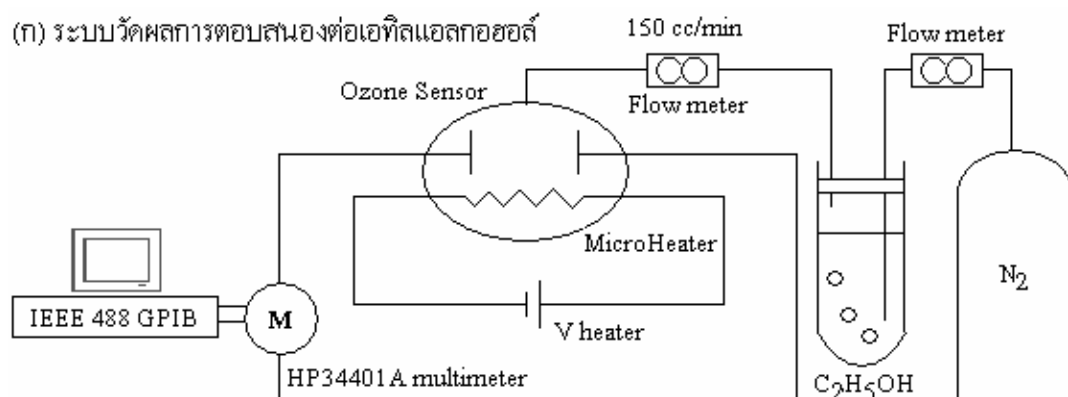
จากการทดลองที่ผ่านมาข้างต้นสรุปได้ว่า หัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์มีความสามารถในการตรวจจับก๊าซไอโซนได้เป็นอย่างดี โดยฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการเตรียมด้วยเทคนิคอาร์เอฟ สปีดเทอริง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และผ่านการปรับปรุงโครงสร้างผลึกด้วยการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยทำการตรวจจับก๊าซไอโซนที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส มีความไวในการตอบสนองสูงที่สุด ($RO_3/R_{air} \approx 20$) โดยใช้เวลาในการตรวจจับก๊าซ 120 วินาที และใช้เวลาฟื้นคืนสภาพ 30 วินาที

6.5 การตอบสนองที่มีต่อก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซ

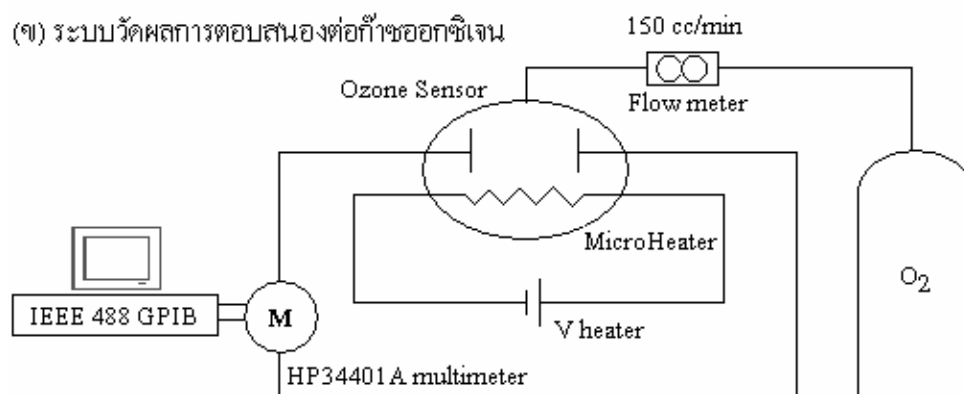
6.5.1 การศึกษาความไวในการตรวจจับก๊าซชนิดต่างๆ

หัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่สร้างขึ้น ถูกนำมาวัดผลตอบสนองที่มีต่อก๊าซต่างๆ เช่น เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น 99.5 เปอร์เซ็นต์, ก๊าซออกซิเจนความเข้มข้น 99.8 เปอร์เซ็นต์, และก๊าซไอโซนที่ความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ (10 มิลลิกรัม ต่อชั่วโมง) โดยทำการจ่ายก๊าซชนิดต่างๆ ด้วยอัตราการจ่ายก๊าซ 150 ซีซี ต่อนาที ทำการตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิทำงานของหัวตรวจวัดก๊าซ 350 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาความสามารถในการตรวจจับก๊าซชนิดต่างๆ และความสามารถในการตรวจจับต่อชนิดของก๊าซไอโซน โดยทำการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลตอบสนองต่อก๊าซดังรูปที่ 6.28 แสดงแผนผังการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อก๊าซชนิดต่างๆ

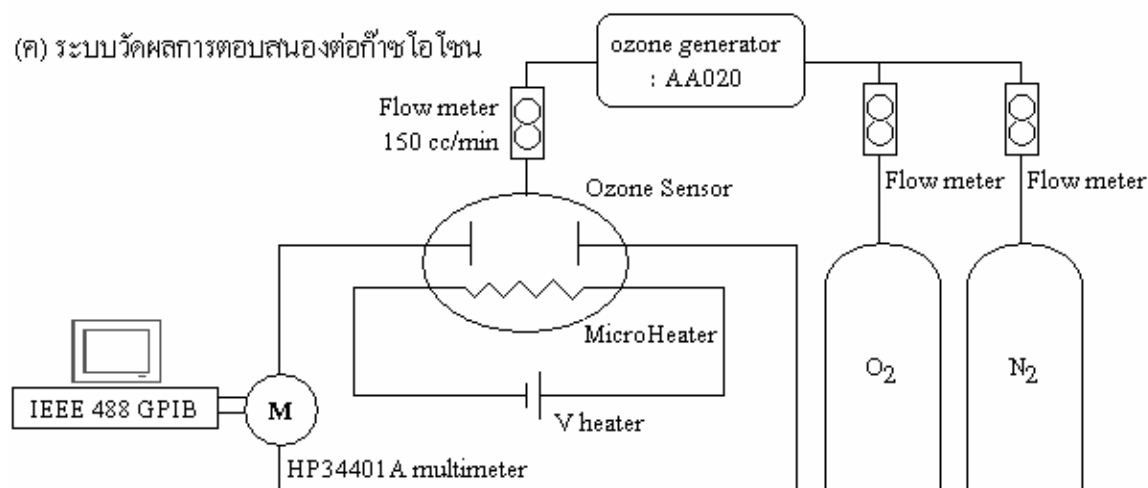
(ก) ระบบวัดผลการตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์



(ข) ระบบวัดผลการตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน



(ค) ระบบวัดผลการตอบสนองต่อก๊าซโอโซน



รูปที่ 6.28 แผนผังการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อก๊าซชนิดต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ความไวในการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์ แสดงดังสมการที่ (6.6)

$$\Delta R = [(R_{gas} - R_{air}) / R_{air}] \times 100\% \quad (6.6)$$

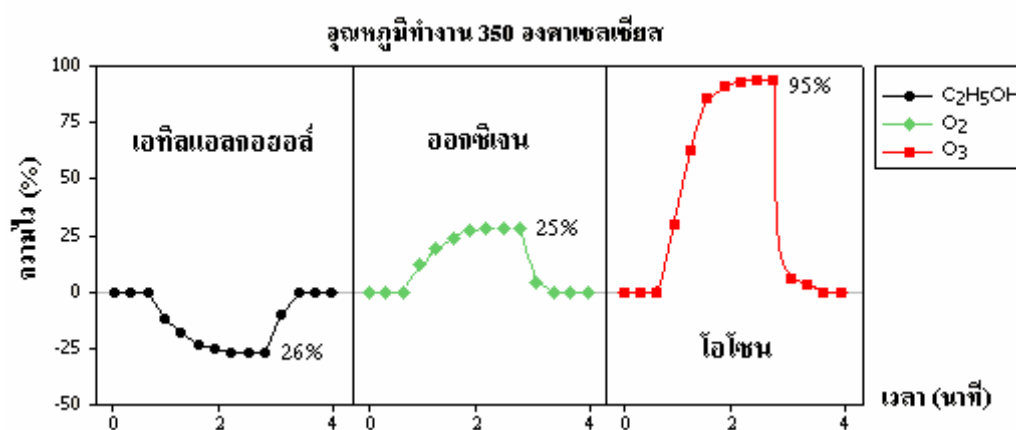
เปอร์เซ็นต์ความไวในการตรวจจับก๊าซออกซิเจน และ โอโซน แสดงดังสมการที่ (6.7)

$$\Delta R = [(R_{gas} - R_{air}) / R_{gas}] \times 100\% \quad (6.7)$$

โดยที่ ΔR คือ ค่าความไวการตรวจจับก๊าซ

R_{gas} คือ ค่าความต้านทานของฟิล์มบางขณะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซ

R_{air} คือ ค่าความต้านทานของฟิล์มบางที่สภาวะปกติ



รูปที่ 6.29 ความไวในการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์, ออกซิเจน, และโอโซน ของหัวตรวจวัดก๊าซแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส

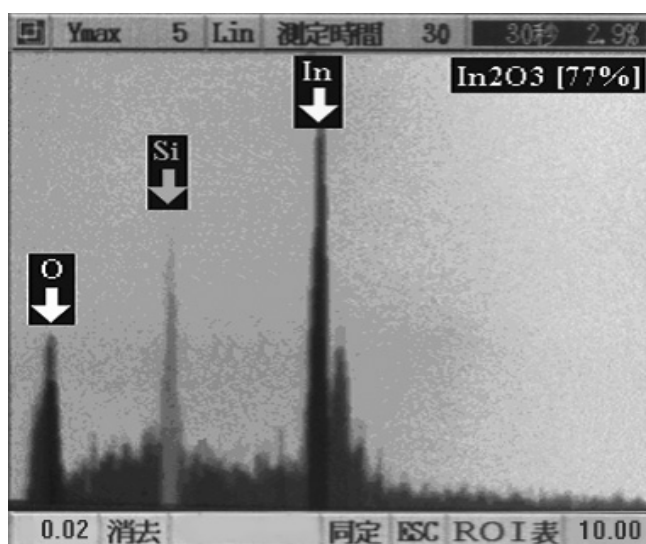
จากรูปที่ 6.29 แสดงผลการทดลองเมื่อนำหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ มาทำการตรวจจับก๊าซชนิดต่าง ๆ ในการทำงานที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์กับเอทิลแอลกอฮอล์เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากผลของไอออนไฮโดรเจน ก๊าซทดสอบจะถูกออกซิไดซ์ (ให้อิเล็กตรอนแก่ฟิล์มบาง) ทำให้ค่าความต้านทานของฟิล์มลดลง และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์กับก๊าซออกซิเจน และก๊าซโอโซน เป็นปฏิกิริยารีดักชัน เนื่องจากผลของไอออนออกซิเจน ก๊าซทดสอบจะถูกรีดิวซ์ (ดึงอิเล็กตรอนออกจากฟิล์มบาง) ทำให้ค่าความต้านทานของฟิล์มเพิ่มขึ้น

โดยมีความไวในการตรวจวัด เอทิลแอลกอฮอล์ เท่ากับ 26 เปอร์เซ็นต์, ก๊าซออกซิเจน เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์, และ ก๊าซโอโซน เท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนมีความสามารถในการตรวจจับก๊าซชนิดต่างๆ โดยเฉพาะก๊าซโอโซนได้อย่างเด่นชัด ซึ่งใช้เวลาในการตอบสนองต่อก๊าซโอโซน 120 วินาที และใช้เวลาคืนสภาพ 30 วินาที เนื่องจากความต้องการหัวตรวจวัดที่มีความสามารถในการตรวจจับต่อชนิดของก๊าซโอโซน จึงทำการทดลองการเติมสารคะตะไลต์ เพื่อเพิ่มความไวของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ต่อชนิดของก๊าซโอโซนต่อไป

6.5.2 การศึกษาผลการเติมสารคะตะไลต์ Al, Pd, Pt, และ Fe ที่มีต่อการตรวจจับก๊าซ

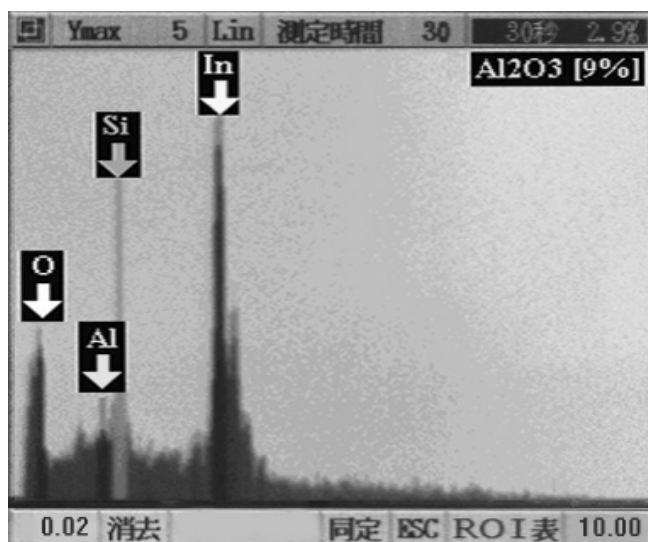
การเติมสารคะตะไลต์ลงบนเนื้อฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับต่อชนิดของก๊าซ และลดระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซ (Response time) สารคะตะไลต์ที่ทำการเติมลงบนเนื้อฟิล์ม ประกอบด้วย อลูมิเนียม (Al), พลาเดียม (Pd), แพลทินัม (Pt), และเหล็ก (Fe)

โดยทำการเคลือบโลหะ อลูมิเนียม, แพลทินัม, พลาเดียม, และเหล็ก ลงบนชั้นฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยเทคนิคดีซี สปีดเตอร์ริง เป็นเวลา 20 วินาที ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ จากนั้นทำการซินเตอร์ริง (Sintering) ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis) ที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

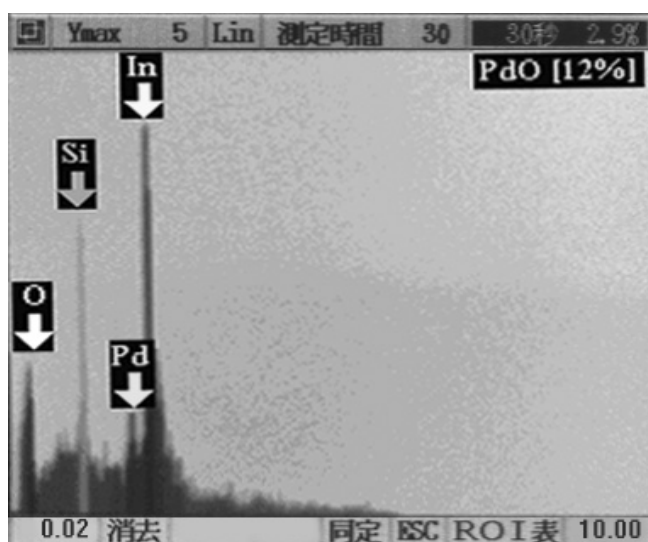


รูปที่ 6.30 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยเครื่อง EDX

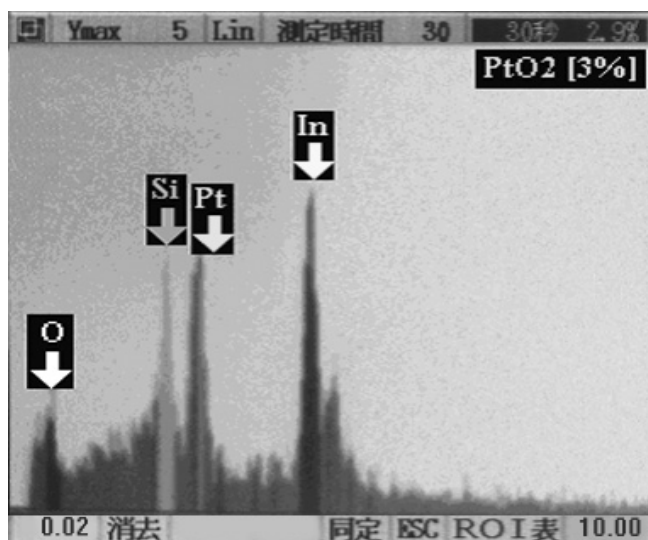
จากรูปที่ 6.30 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX พบพลังงานของอิเล็กตรอนลำดับที่สองใน K-shell เท่ากับ 0.525, 1.740, และ 24.21 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงองค์ประกอบของธาตุ ออกซิเจน (O), ซิลิคอน (Si), และอินเดียม (In) ตามลำดับ โดยบริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบสารประกอบ In_2O_3 เท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์



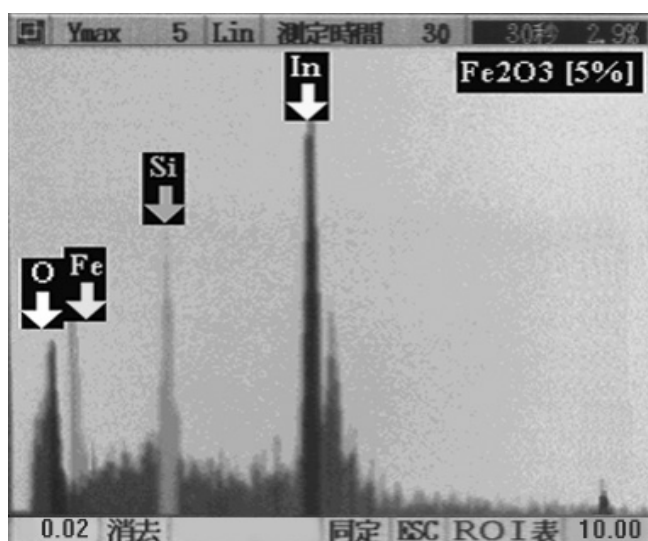
รูปที่ 6.31 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยเครื่อง EDX ที่ผ่านการเดิมสารคะตะไลต์ อลูมิเนียม



รูปที่ 6.32 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยเครื่อง EDX ที่ผ่านการเดิมสารคะตะไลต์ พลาเดียม



รูปที่ 6.33 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยเครื่อง EDX ที่ผ่านการเดิมสารคะตะไลต์แพลทินัม



รูปที่ 6.34 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ด้วยเครื่อง EDX ที่ผ่านการเดิมสารคะตะไลต์เหล็ก

รูปที่ 6.31 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX พบพลังงานของอิเล็กตรอนลำดับที่สองใน K-shell เท่ากับ 1.487 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงองค์ประกอบของธาตุ อลูมิเนียม (Al) โดยบริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบสารประกอบ Al₂O₃ เท่ากับ 13 เปอร์เซ็นต์

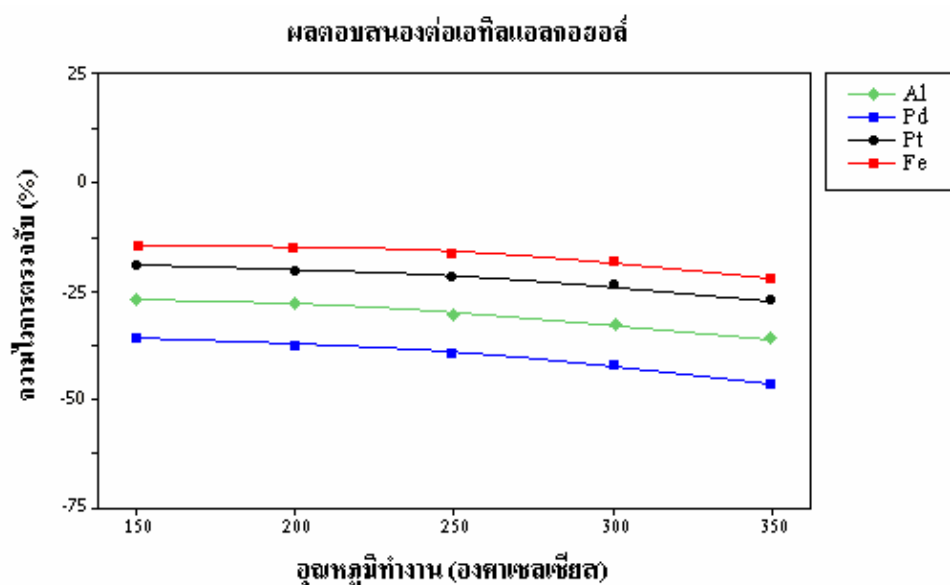
รูปที่ 6.32 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX พบพลังงานของอิเล็กตรอนลำดับที่สองใน L-shell เท่ากับ 2.839 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงองค์ประกอบของธาตุ พลาเดียม (Pd) โดยบริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบสารประกอบ PdO เท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 6.33 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX พบพลังงานของอิเล็กตรอนลำดับที่สองใน L-shell เท่ากับ 9.442 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงองค์ประกอบของธาตุ แพลตินัม (Pt) โดยบริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบสารประกอบ PtO₂ เท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 6.34 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX พบพลังงานของอิเล็กตรอนลำดับที่สองใน L-shell เท่ากับ 0.705 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงองค์ประกอบของธาตุ เหล็ก (Fe) โดยบริเวณที่ทำการวิเคราะห์พบสารประกอบ Fe₂O₃ เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์

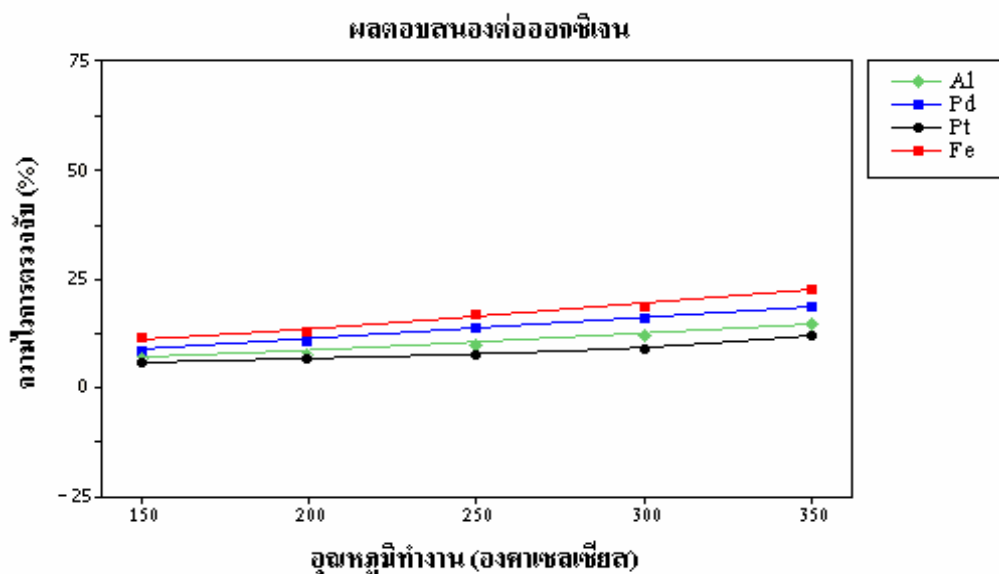
ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDX พบว่าการเติมสารละลายไลต์ส่วนมากจะตรวจพบอิเล็กตรอนลำดับที่สองที่พลังในชั้น L-shell เนื่องจากมีปริมาณอะตอมของสารที่เดิมมีจำนวนน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถตรวจจับพลังงานในชั้น K-shell ได้

จากนั้นนำหัวตรวจวัดก๊าซที่ผ่านการเติมสารละลายไลต์ มาทำการวัดผลตอบสนองที่มีต่อเอทิลแอลกอฮอล์ 99.5 เปอร์เซ็นต์, ก๊าซออกซิเจน 99.8 เปอร์เซ็นต์, และ ก๊าซไอโซน 100 เปอร์เซ็นต์ (ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม ต่อชั่วโมง) ทำการจ่ายก๊าซด้วยอัตราการจ่ายก๊าซ 150 ซีซี ต่อ นาที โดยติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามแผนผังการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อก๊าซชนิดต่างๆ ดังรูป 6.28 เพื่อศึกษาผลของค่าความไวที่มีต่อก๊าซชนิดต่างๆ กับการเติมสารละลายไลต์ชนิดต่างๆ รวมทั้งผลของอุณหภูมิทำงานจากไมโครฮีเตอร์ของหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์



รูปที่ 6.35 ความไวการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการเติมสารละลายไลต์และอุณหภูมิทำงานต่างๆ

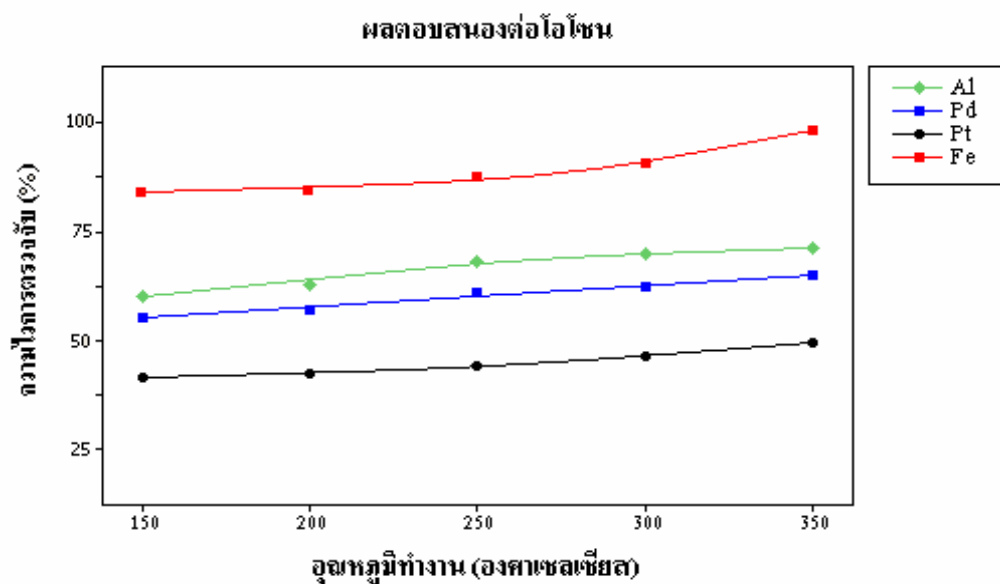
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.35 ฟิล์มอินเดียมออกไซด์ที่ผ่านการเติมสารคะตะไลต์ อลูมิเนียม (Al), พลาเดียม (Pd), แพลทินัม (Pt), และเหล็ก (Fe) ตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ ที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส พบว่า ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่เติมสารคะตะไลต์ Pd มีความไวในการตอบสนองมากที่สุด เท่ากับ -45 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Al มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ -36 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Pt มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ -27 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Fe มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ -20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



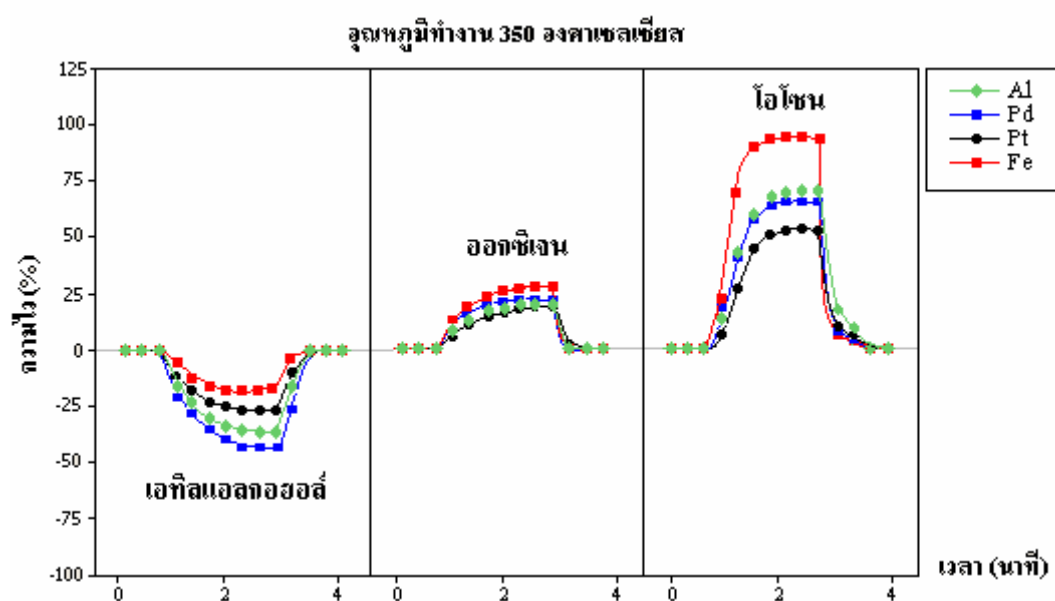
รูปที่ 6.36 ความไวในการตรวจจับก๊าซออกซิเจนที่ผ่านการเติมสารคะตะไลต์และอุณหภูมิทำงานต่างๆ

จากรูปที่ 6.36 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่เติมสารคะตะไลต์ Fe มีความไวในการตอบสนองมากที่สุด เท่ากับ 23 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Pd มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Al มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ 11 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Pt มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากรูปที่ 6.37 ผลการตอบสนองต่อก๊าซไอโซน ที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่เติมสารคะตะไลต์ Fe มีความไวในการตอบสนองมากที่สุด เท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Al มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Pd มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ 66 เปอร์เซ็นต์, สารคะตะไลต์ Pt มีความไวในการตอบสนอง เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 6.37 ความไวในการตรวจจับก๊าซไอโซนที่ผ่านการเดิมสารคะตะไลต์และอุณหภูมิทำงานต่างๆ



รูปที่ 6.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับก๊าซของหัวตรวจวัดก๊าซที่ผ่านการเดิมสารคะตะไลต์ กับเวลาการตรวจจับก๊าซที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลอง (รูปที่ 6.38) เมื่อนำหัวตรวจวัดก๊าซแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์มาทำการตรวจจับก๊าซชนิดต่างๆ ในการทำงานที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์กับเอทิลแอลกอฮอล์เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากก๊าซทดสอบจะถูกออกซิไดซ์ (ให้อิเล็กตรอนแก่ฟิล์มบาง) ทำให้ค่าความต้านทานของฟิล์มลดลง และยัง

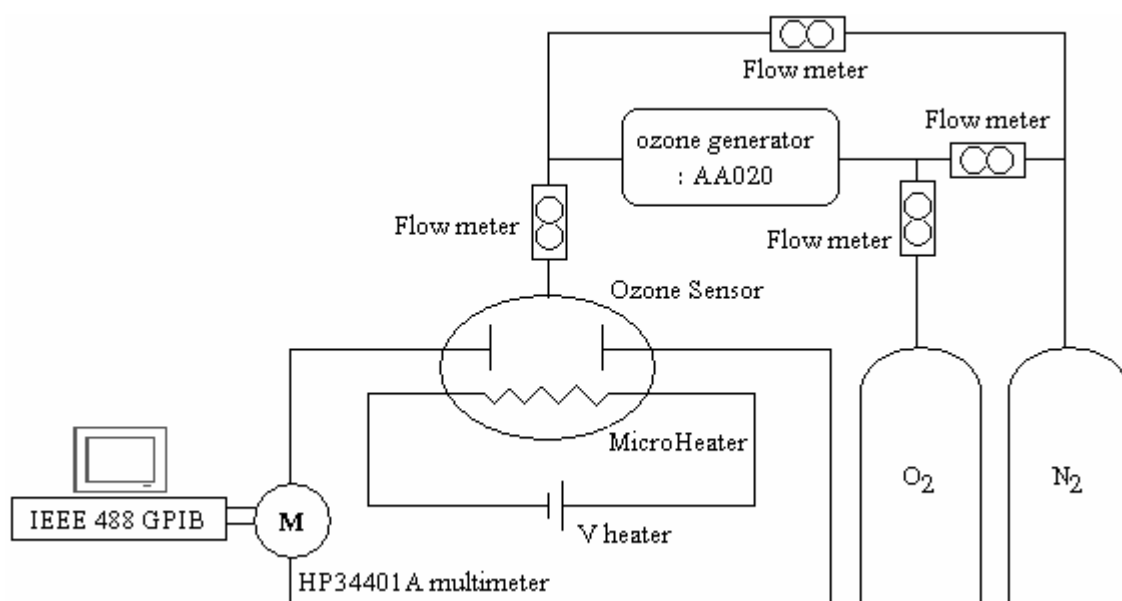
พบว่าเมื่อทำการเติมสารคะตะไลต์ลงบนเนื้อฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ทำให้ไอออนไฮโดรเจนมีการแลกเปลี่ยนประจุที่ผิวฟิล์มมากขึ้น

ส่วนปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์กับก๊าซออกซิเจน และก๊าซไอโซน เป็นปฏิกิริยารีดักชัน เนื่องจากก๊าซทดสอบจะถูกรีดิวซ์ (ดึงอิเล็กตรอนออกจากฟิล์มบาง) ทำให้ค่าความต้านทานของฟิล์มเพิ่มขึ้น และยังพบว่าเมื่อทำการเติมสารคะตะไลต์ลงบนเนื้อฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ทำให้ไอออนออกซิเจนมีจำนวนมากขึ้นบริเวณผิวฟิล์มและมีการแลกเปลี่ยนประจุกันมากขึ้น

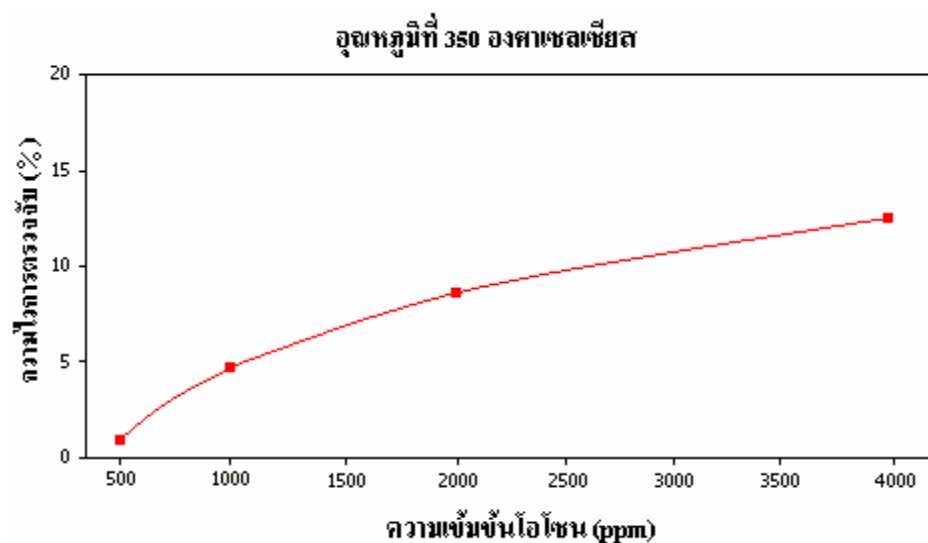
จากผลการทดลองที่ผ่านมาสรุปได้ว่า หัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์เมื่อผ่านการเติมสารคะตะไลต์ชนิดต่างๆ ทำให้ค่าความไวของหัวตรวจวัดก๊าซต่อก๊าซชนิดต่างๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาไปที่ความต้องการ ในการตอบสนองของหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนที่มีต่อชนิดของก๊าซไอโซนเพียงชนิดเดียว จะพบว่า ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ทำการเติมสารคะตะไลต์ Fe จะทำให้ความไวที่มีต่อเอทิลแอลกอฮอล์ลดลง และความไวที่มีต่อก๊าซออกซิเจนแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนความไวที่มีต่อก๊าซไอโซนเพิ่มขึ้นอีกอย่างชัดเจน จึงเลือกใช้สารคะตะไลต์ Fe ในการเติมลงไปในเนื้อฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ โดยมีความไวของหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนต่อก๊าซไอโซน เท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการตอบสนองต่อก๊าซไอโซน 90 วินาที และใช้เวลาคืนสภาพ 30 วินาที จากนั้นจึงนำหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนที่ผ่านการเติมสารคะตะไลต์ Fe มาทำการทดลองวัดผลตอบสนองต่อก๊าซไอโซนที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อไป

6.5.3 การตอบสนองของหัวตรวจวัดก๊าซต่อก๊าซไอโซนที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่ามีหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่เติมสารคะตะไลต์เหล็ก (Fe) แอนนิลที่ 500 องศาเซลเซียส ทำการตรวจวัดก๊าซไอโซนที่อุณหภูมิทำงาน 350 องศาเซลเซียส มีความไวในการตอบสนองต่อชนิดของก๊าซไอโซนสูงสุด ดังนั้นจึงทำการทดลองนำหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนดังกล่าว มาทำการวัดก๊าซไอโซนที่ความเข้มข้น 500, 1000, 2000, และ 4000 ppm (point per million) โดยปริมาตร แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด และผลการตอบสนองที่มีต่อก๊าซไอโซนของหัวตรวจวัดก๊าซไอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 6.39 และ 6.40 ตามลำดับ



รูปที่ 6.39 แผนผังการติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซโอโซน



รูปที่ 6.40 การตอบสนองต่อก๊าซโอโซนความเข้มข้น 500, 1000, 2000, และ 4000 ppm ของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์

จากรูปที่ 6.40 แสดงผลการตอบสนองของหัวตรวจวัดก๊าซโอโซน พบว่ามีความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 500 ppm เท่ากับ 1.5 เปอร์เซ็นต์, ความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 1000 ppm เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์, ความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนที่ความ

เข้มข้น 2000 ppm เท่ากับ 8.5 เปอร์เซ็นต์, ความไวในการตรวจจับก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 4000 ppm เท่ากับ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หัวตรวจวัดก๊าซโอโซนแบบฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างแม่นยำ