

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของเสียอุตสาหกรรมหรือกากอุตสาหกรรม

“ของเสียอุตสาหกรรม” หรือ “กากอุตสาหกรรม” ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม คือ “สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว” นั้น หมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่ไม่ใช้แล้วที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงาน ตั้งแต่กระบวนการรับวัตถุดิบ การผลิต การตรวจสอบคุณภาพ การบำบัดมลพิษ การซ่อมบำรุง เครื่องจักร อุปกรณ์ การรื้อถอน ก่อสร้างอาคารภายในบริเวณโรงงาน รวมทั้งกากตะกอน หรือสิ่งตกค้างจากสิ่งเหล่านั้น ทั้งที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว กึ่งแข็ง กึ่งเหลวหรือแก๊ส ทั้งนี้ รวมถึงของเสียอันตรายที่เกิดจากอาคารสำนักงานและที่พักคนงานที่อยู่ภายในบริเวณโรงงาน (สนธิสัญญาฉบับที่ 2564)

กากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1 กากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตราย (Non - Hazardous waste)

“กากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตราย” หมายถึง ของเสียหรือกากอุตสาหกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ขนอ้อย เศษทองแดง ขี้เลื่อย กล่องกระดาก เศษกระดาก เป็นต้น กากอุตสาหกรรมประเภทนี้จะไม่เป็นอันตราย แต่หากไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้อง จะส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิต ระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมได้ โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะส่งกากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตรายไปรีไซเคิล โดยวิธีการคัดแยกเพื่อจำหน่ายต่อหรือการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุที่ใช้แล้วให้กลับมามีคุณภาพดั้งเดิมและนำไปใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้ง (สนธิสัญญาฉบับที่ 2564)

2.1.2 กากอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย (Hazardous waste)

“กากอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย” หมายถึง กากอุตสาหกรรมที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนสารอันตราย หรืออาจมีคุณสมบัติที่เป็นอันตราย ตามที่กำหนดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ยกเว้นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วหรือกากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตรายจากสำนักงาน บ้านพักอาศัย และร้านอาหารในบริเวณโรงงาน

กากกัมมันตรังสี และมูลฝอยตามพระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 และน้ำเสียที่ส่งไปบำบัดนอกโรงงานทางท่อส่งน้ำ หรือหมายถึงสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วหรือกากอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ดังนี้

- (1) ประเภทสารไวไฟ (Ignitable substances)
- (2) ประเภทสารกัดกร่อน (Corrosive substances)
- (3) ประเภทสารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances)
- (4) ประเภทสารพิษ (Toxic substances)
- (5) สารที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน ตามที่กำหนดไว้ในกฎหมาย

กากอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย ได้แก่ กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย เศษสายไฟฟ้า น้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ใช้แล้ว เศษใยหิน เป็นต้น

2.2 การจัดการของเสียอุตสาหกรรม

การจัดการของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง การบำบัด การทำลายฤทธิ์ ทั้งกำจัด จำหน่ายจ่ายแจก แลกเปลี่ยน หรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงการกักเก็บไว้เพื่อกระทำการดังกล่าวข้างต้น (คงวุฒิ ยอดพยุง, 2551)

2.2.1 การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse/Recycle/Recovery)

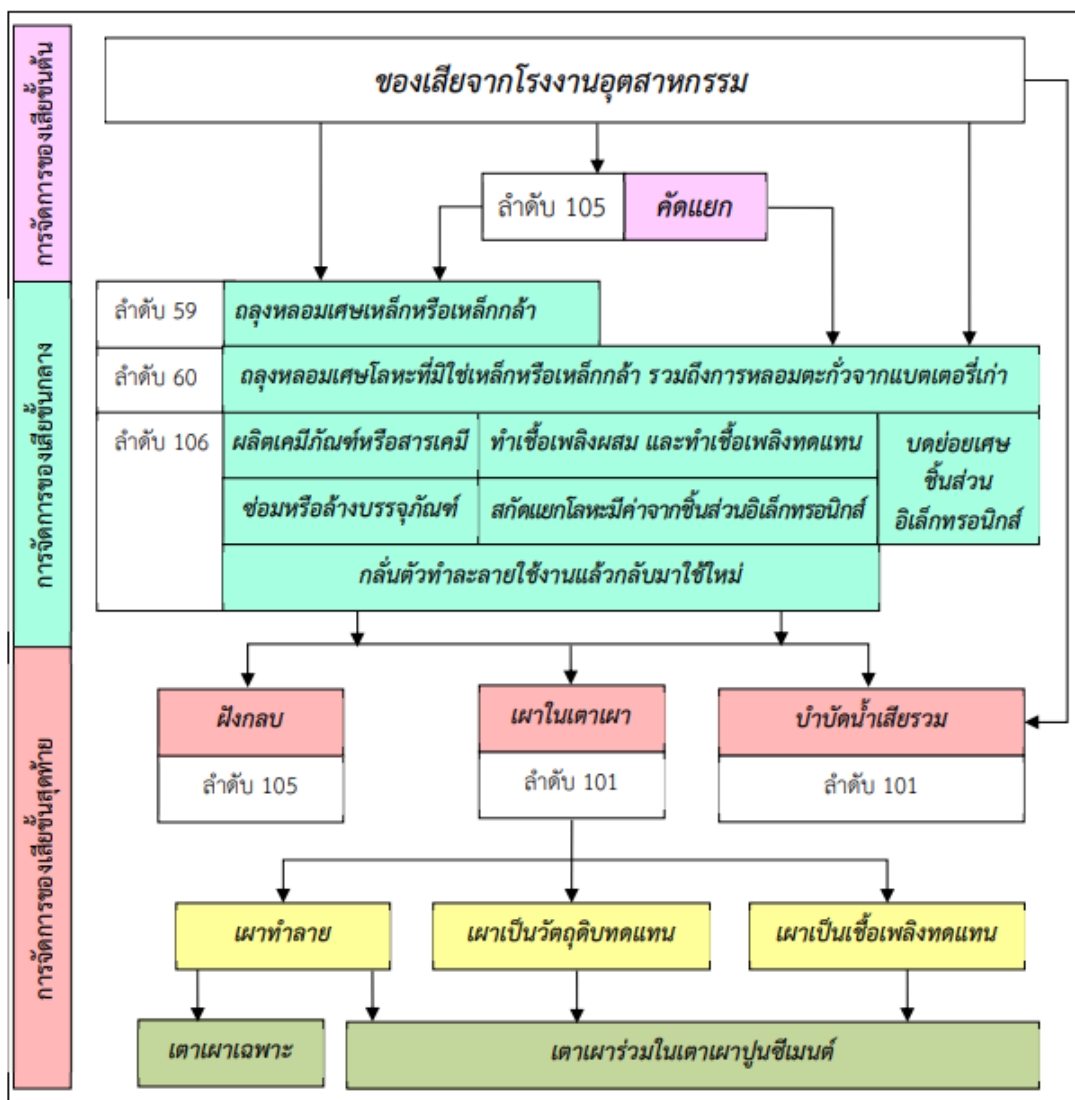
ยกตัวอย่าง เช่น การนำมาเป็นวัตถุดิบทดแทน การส่งกลับผู้ขายเพื่อนำกลับไปบรรจุใหม่ เป็นเชื้อเพลิงทดแทน เชื้อเพลิงผสม เผาเพื่อเอาพลังงาน นำเข้ากระบวนการนำตัวทำลายกลับมาใหม่ กระบวนการนำโลหะกลับมาใหม่ กระบวนการคืนสภาพกรด-ด่าง และกระบวนการคืนสภาพเร่งปฏิกิริยา

2.2.2 การบำบัด (Treatment)

ไม่ว่าจะด้วยวิธีการทางชีวภาพ ทางเคมี ทางกายภาพ การเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย การปรับเสถียรภาพทางเคมีโดยใช้ซีเมนต์หรือวัสดุปอซโซลาน รวมไปถึงการเผาทำลายทั้งในเตาเผาขยะทั่วไป และเผาในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย

2.2.3 การกำจัด (Disposal)

การกำจัดโดยวิธีฝังกลบ (Land fill) ทั้งตามหลักสุขาภิบาล เฉพาะสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ไม่เป็นอันตราย และการฝังกลบของเสียอันตรายโดยต้องมีการปรับให้อยู่ในรูปคงตัวก่อน และนำไปฝังในหลุมฝังกลบแบบ Secured landfill



รูปที่ 2.1 ลักษณะการจัดการของเสียในประเทศไทย

(ที่มา: https://www.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/elaw_parcy/download/article/article_e_20230620101143.docx)

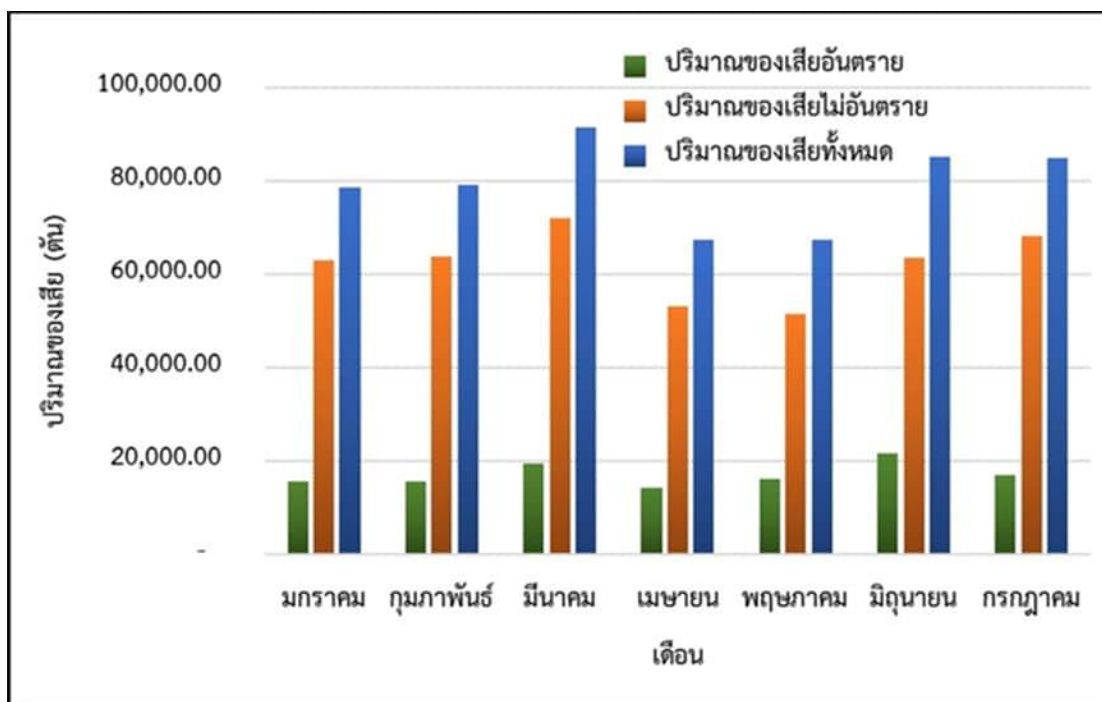
2.3 ปริมาณของเสียในอุตสาหกรรมยานยนต์

กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2566) สรุปข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณการแจ้งรับกากของเสียเข้ามาในบริเวณโรงงานโดยผู้รับกำจัด ได้มีการจำแนกของเสียออกเป็น 21 กลุ่ม แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าเดือนมกราคม-เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566 มีปริมาณของเสียรวมกันประมาณ 7,690,000 ตัน หรือประมาณ 1,100,000 ตันต่อเดือน โดยมาจากของเสียอุตสาหกรรมการผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ 7%

ตารางที่ 2.1 สรุปการแจ้งรับกากของเสียเข้ามาในบริเวณโรงงาน โดยผู้รับกำจัด เดือนมกราคม-เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2566)

ลำดับกลุ่มที่	กลุ่มอุตสาหกรรม
1	ผลิตภัณฑ์จากพืช
2	อุตสาหกรรมอาหาร
3	อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม
4	สิ่งทอ
5	อุตสาหกรรมเครื่องแต่งกายยกเว้นรองเท้า
6	ผลิตหนังสือและผลิตภัณฑ์จากหนังสือ
7	แปรรูปไม้และผลิตภัณฑ์จากไม้
8	เครื่องเรือนหรือเครื่องตกแต่งในอาคารจากไม้ แก้ว ยาง หรือโลหะอื่นๆ
9	ผลิตกระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ
10	การพิมพ์ การเย็บเล่ม ทำปกหรือการทำแม่พิมพ์
11	เคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เคมี
12	ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม
13	ยางและผลิตภัณฑ์ยาง
14	ผลิตภัณฑ์พลาสติก
15	ผลิตภัณฑ์โลหะ
16	ผลิตโลหะขั้นมูลฐาน
17	ผลิตภัณฑ์โลหะ
18	ผลิตเครื่องจักรและเครื่องกล
19	ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์
20	ผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ รวมทั้งการซ่อมยานพาหนะและอุปกรณ์
21	การผลิตอื่นๆ

จากรูปที่ 2.2 แสดงปริมาณของเสียที่มาจากอุตสาหกรรมการผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ทั้งหมดประมาณ 550,000 ตัน หรือประมาณ 80,000 ตันต่อเดือน ซึ่งจัดเป็นของเสียอันตรายร้อยละ 21 และของเสียไม่อันตรายร้อยละ 79 ของของเสียอุตสาหกรรมการผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์



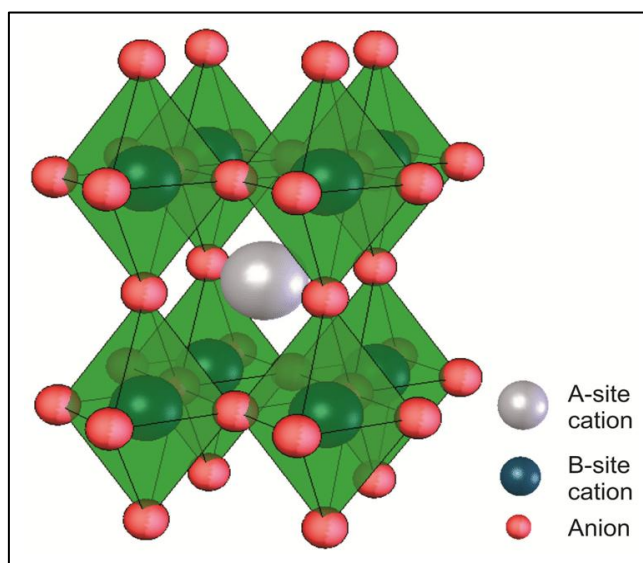
รูปที่ 2.2 ปริมาณของเสียอุตสาหกรรมผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ เดือนมกราคม-เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2566)

จากปริมาณของเสียดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ประเภทผงเหล็ก ซึ่งเป็นการลดปริมาณของเสียและเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเสีย โดยการนำมาผ่านกระบวนการจัดการให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานเป็นสารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์เป็นสารประกอบชนิดใหม่ และใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้ เช่น วัสดุสังเคราะห์โครงสร้างเพอรอฟสไกต์

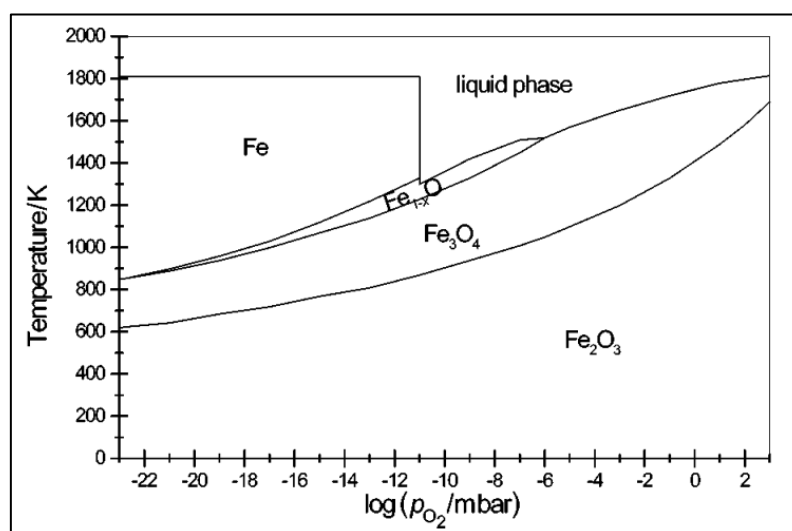
2.4 วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (Perovskite structure)

วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (C.N.R. Rao, 2021) (ชนกานต์ พันสา, 2019) มีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ ABO_3 เมื่อ A คือ ไอออนบวกขนาดใหญ่ ได้แก่ Ba Sr หรือ La ส่วน B คือ ไอออนบวกขนาดเล็ก ได้แก่ Ni Fe หรือ Mn และไอออนลบ โดยไอออนบวกขนาดเล็กและไอออนลบจะประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างคล้ายเพชร เรียงสลับกันไปกับไอออนบวกขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ ถือเป็นโครงสร้างของวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความสามารถในการตรวจจับแก๊สพิษ เช่น CO_x H_2 CH_4 NO_x (Gh. Korotcenkov, 2020) ที่มักเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ที่มีสูตรทางเคมี คือ $LaFeO_{3\pm\delta}$ ซึ่งมีผู้ที่เคยศึกษามาแล้วว่ามีความสามารถในการตรวจจับแก๊สพิษดังกล่าวได้ โดยในตำแหน่ง B-site จะประยุกต์นำ

ของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านกระบวนการจัดการให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นและเปลี่ยนสูตรเคมีให้อยู่ในรูปเหล็กออกไซด์ ใช้วิธีการบำบัดโดยวิธี Thermal etching ด้วยการศึกษการเปลี่ยนแปลงวิฤภาคของ Fe-O ระหว่างอุณหภูมิและความดัน ดังรูปที่ 2.4 (G. Ketteler, 2001) ซึ่งศึกษาเฉพาะการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา (ความดันคงที่) เพื่อเปลี่ยนให้ของเสีย (Fe-waste) เกิดเป็นวิฤภาคเดียวของ Fe_2O_3 ก่อนนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุโครงสร้าง เพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์ (Nikonov, 2018)



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันของ Fe-O

2.5 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)

เซนเซอร์ (Sensor) คืออุปกรณ์ มาตรฐาน ระบบตรวจจับการเปลี่ยนแปลง หรือปริมาณของตัวแปรต่าง ๆ และถ่ายทอดข้อมูลไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ประมวลผลคอมพิวเตอร์ เซนเซอร์จะแปลงปรากฏการณ์ทางกายภาพในลักษณะของสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่วัดได้ (M. Javaid, 2021) ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่

1. ส่วนเซนเซอร์ ทำหน้าที่รับรู้ปริมาณตัวแปรที่เราต้องการทราบค่า เช่น แสงสว่าง อุณหภูมิ การกระจัด ความชื้น ความดัน เป็นต้น แล้วแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าส่งไปยังภาควงจรปรับแต่งสัญญาณต่อไป
2. วงจรปรับแต่งสัญญาณ สัญญาณจากส่วนเซนเซอร์อาจเบาเกินไป ไม่เพียงพอสำหรับส่วนแสดงผลหรือส่งเข้ากระบวนการทางไฟฟ้า หรือมีสัญญาณรบกวนมากจึงต้องมีการปรับแต่งสัญญาณให้ดีขึ้นก่อน
3. อุปกรณ์แสดงผล ทำหน้าที่แสดงค่าที่ได้จากการวัด

เซนเซอร์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เซนเซอร์ประเภททางตรง (Direct sensor) เป็นเซนเซอร์ที่สามารถแปลงสิ่งเร้าที่ไม่ใช่ไฟฟ้าเป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และเซนเซอร์ประเภททางอ้อม (Indirect sensor) เป็นเซนเซอร์ที่แปลงหลายขั้นตอนเพื่อแปลงสัญญาณที่วัดได้ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์ Fiber-optic displacement ทำหน้าที่แปลงแสงให้เป็นโฟตอนจากนั้นแปลงเป็นกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกประเภทของเซนเซอร์ ตามประเภทการตรวจจับ (Classification based on broad area of detection) เช่น เซนเซอร์ไฟฟ้า แม่เหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้า เสียง เคมี แสง ความร้อน อุณหภูมิ เครื่องกล รังสี ชีวภาพ และเซนเซอร์ตรวจจับแก๊ส ฯลฯ (Gh. Korotcenkov, 2020)

เซนเซอร์ตรวจจับแก๊ส (Gas sensor) เป็นเซนเซอร์ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพอากาศ ตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ และตรวจจับแก๊สพิษ สามารถจำแนกประเภทตามกลไกการทำงานได้ 6 ประเภท ดังตารางที่ 2 และยังสามารถแบ่งตามความเหมาะสมของวัสดุกับแก๊สที่สามารถตรวจจับได้ ดังตารางที่ 3

ความสามารถในการตรวจจับแก๊ส นอกจากจะเกี่ยวข้องกับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นเซนเซอร์แล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อความสามารถในการตรวจจับแก๊สด้วย ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์มีดังนี้

1. การตอบสนองที่ดีต่อแก๊สเป้าหมาย
2. ขนาดของอนุภาค
3. ความพรุนตัวของวัสดุ
4. พื้นที่ผิวจำเพาะ

5. ช่วงการวัดกว้าง
6. อายุการใช้งานยาวนาน
7. ความไวต่อความชื้นในอากาศ
8. ระยะเวลาในการตอบสนอง
9. ความสามารถในการดูดซับแก๊ส
10. จำนวนรอบในการใช้งาน
11. ความสามารถในการยึดเกาะกับวัสดุรองรับ
12. เชื่อมต่อกับชุดควบคุมได้ง่าย
13. เทคโนโลยีต้นทุนต่ำที่มีประสิทธิภาพ
14. อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการตรวจจับแก๊ส
15. ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สามารถตรวจจับได้

ตารางที่ 2.2 การจัดประเภทของแก๊สเซนเซอร์ในปี 1991 ของ IUPAC

ลำดับที่	ประเภทของแก๊สเซนเซอร์	หลักการทำงาน
1	ไฟฟ้าเคมี	การเปลี่ยนแปลงกระแส แรงดัน ความจุ/อิมพีแดนซ์ - Voltammetry - Potentiometry - Chemically sensitized - Potentiometry
2	ไฟฟ้า	การนำไฟฟ้าของโลหะออกไซด์ การนำไฟฟ้าอินทรีย์ การนำไฟฟ้าแบบเฮเทอโรจังค์ชัน (Schottky Diode, FET, MOS) ฟังก์ชันการทำงานการยอมให้ไฟฟ้า (ความจุ)
3	ความไวต่อมวล	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แอมพลิจูด เฟสหรือความถี่ ขนาด รูปร่าง หรือตำแหน่ง - Quartz crystal microbalance - Surface acoustic wave propagation - Cantilever
4	แม่เหล็ก	การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแก๊สพาราแมกเนติก
5	อุปกรณ์เชิงแสง	การเปลี่ยนแปลงความเข้ม สี หรือสเปกตรัมการปล่อยแสง - Absorbance - Reflectance - Luminescence - Refractive index - Optothermal effect - Light scattering
6	อุณหภูมิ	ผลกระทบจากความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีจำเพาะ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การไหลของความร้อน - Thermoelectric - Pyroelectric - Catalytic bead (pellistors) - Thermal conductivity

ตารางที่ 2.3 ประเภทของวัสดุและความสามารถในการตรวจจับแก๊สต่าง ๆ (Gh. Korotcenkov, 2020)

Material	Examples	Analyte (function in sensors)
Metals	Pt, Pd, Ni, Ag, Au, Sb, Rh	Gases (H ₂ , etc.) (electrodes, sensing materials, catalysts, membranes)
Semiconductors	Si, GaAs, InP, SiC, GaN, etc.	Gases (O ₂ , CO ₂ , H ₂ S, CH ₄ , NO ₂ , O ₃ , etc.); H ₂ O, etc. (sensing materials)
Metal oxides	Electronic conductors (SnO ₂ , TiO ₂ , In ₂ O ₃ , etc.); mixed conductors (Ga ₂ O ₃ , WO ₃ , SrTiO ₃ , perovskites); ionic conductors (ZrO ₂ , CeO ₂ , etc.); metal oxides with metallic-type conductivity (RuO ₂ , Co ₃ O ₄ , PbO _x , etc.)	Gases (CO, H ₂ , CH ₄ , NO _x , O ₂ , Cl ₂ , etc. vapor, alcohol; dissolved oxygen O ₂ , Cl ₂ in solutions; dissolved oxygen in molten metals, etc. (electrodes, sensing materials, membranes)
Ionic compounds	Ionic conductors [LaF ₃ , CaF ₂ , Na ₂ CO ₃ , AgCl, Zr(HPO ₄) ₂ , SrCl ₂ , Na ₂ SO ₄ , AgBr, Ag ₂ S, CuBr, Nasicon, Nafion]	Gases (CO ₂ , SO ₂ , CO, etc.), ions, etc. (sensing materials, electrodes, membranes)
Molecular crystals	Phthalocyanines [PbPc, LuPc ₂ , LiPc, FePc, CuPc, NiPc, (PcAlF) _n , (PcGaF), etc.]	Gases, vapors, ions (sensing materials, membranes)
Carbon	Carbon nanotubes, black carbon, diamond, fullerenes, graphene	Gases, vapors (sensing materials, electrodes, membranes)
Polymers, organic semiconductors	Polyethers, polyurethanes, polysiloxanes, polypyrroles, polythiophenes, polyolefins, polyphenyl acetylene, phthalocyanine, polyamides, polyimides, Nafion, etc.	Gases (CO, CO ₂ , CH ₄ , NO _x , etc.), H ₂ O, chlorinated, hydrocarbons, etc. (sensing materials, membranes)

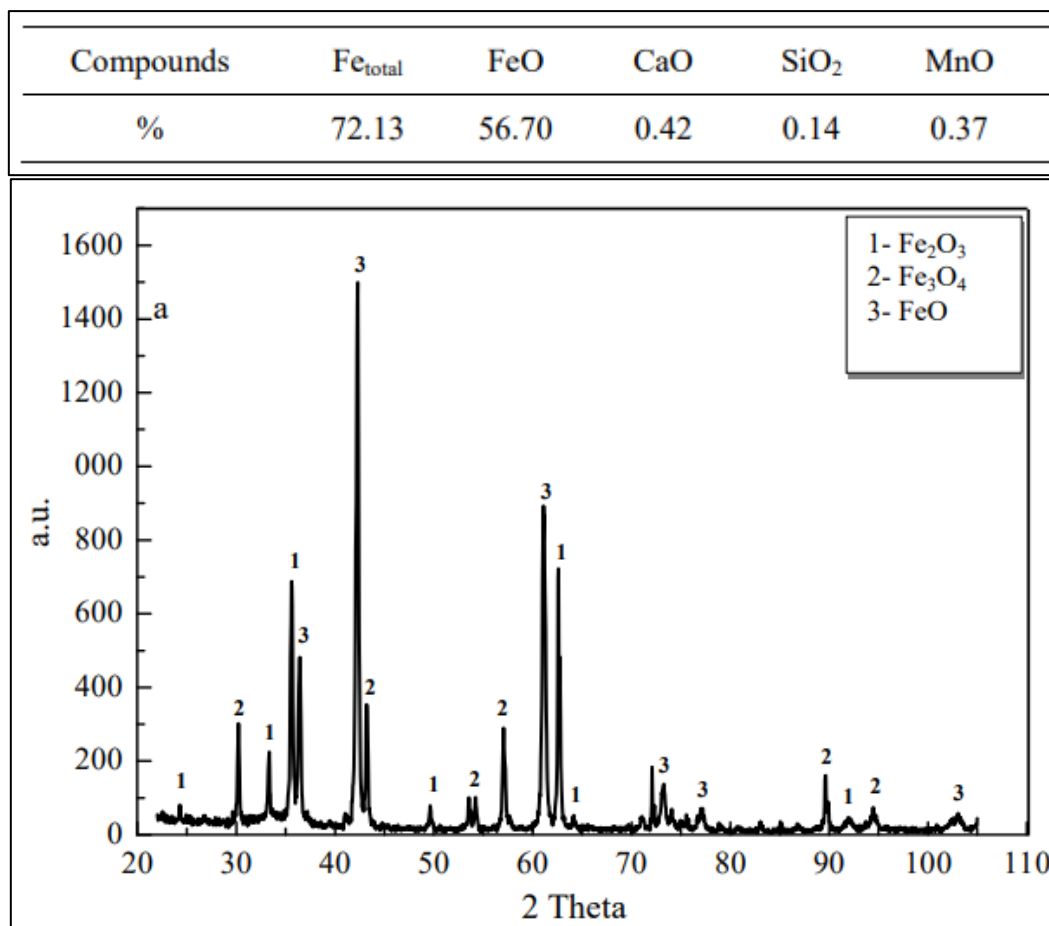
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอุตสาหกรรมโลหะและอุตสาหกรรมยานยนต์มีวิธีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นหลากหลาย เพื่อลดปริมาณของเสีย ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดและใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด ไม่ว่าจะเป็นด้วยการหาวิธีเพื่อลดการเกิดของเสีย การนำกลับมาใช้ หรือแม้แต่การนำไปปรับปรุงสมบัติให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ โดยนักวิจัยได้ทำการศึกษาและตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

O. Benchiheb และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาของเสีย ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการรีดเหล็กและเหล็กกล้าด้วยความร้อน โดยเรียกของเสียนี้ว่า Mill scale ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.5 โดยการบำบัด Mill scale ด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพื่อผลิตผงเหล็กที่มีลักษณะเฉพาะตามต้องการ จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า Mill scale ประกอบด้วยเหล็กประมาณ 72.13% โดยมีโลหะนอกกลุ่มเหล็กและสารประกอบอัลคาไลน์เจืออยู่เล็กน้อย ดังรูปที่ 2.6 โดย Mill Scale ประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ 3 โครงสร้าง คือ Wustite (FeO), Hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) และ Magnetite (Fe_3O_4)

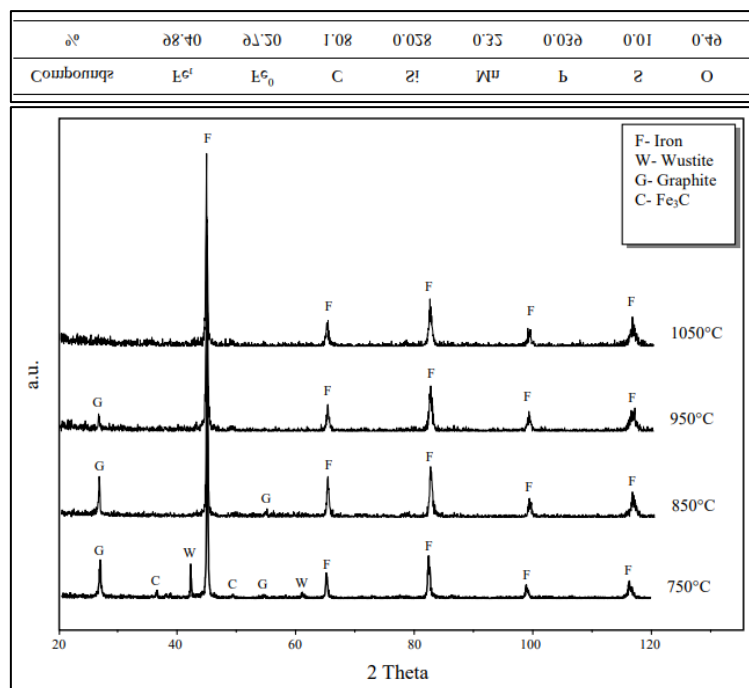


รูปที่ 2.5 ลักษณะของเสีย Mill scale



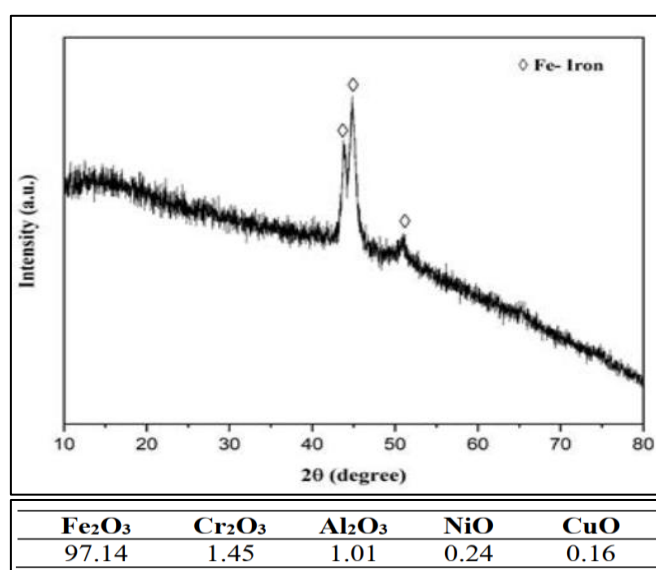
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของ Mill scale

การลดการเกิดเหล็กออกไซด์ของ Mill Scale จะศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 750-1,050 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาที่แตกต่างกันระหว่าง 40 ถึง 180 นาที ในบรรยากาศของ CO บริสุทธิ์ หลังจากทำการทดลอง พบว่า การลดการเกิดเหล็กออกไซด์ของ Mill Scale ที่ดีที่สุดได้แก่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส แซ่ด้วยเวลา 180 นาที ในบรรยากาศ CO บริสุทธิ์ ยืนยันโดยการวิเคราะห์ทางเคมี ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งพบผงเหล็กในปริมาณสูงถึง 98.4%



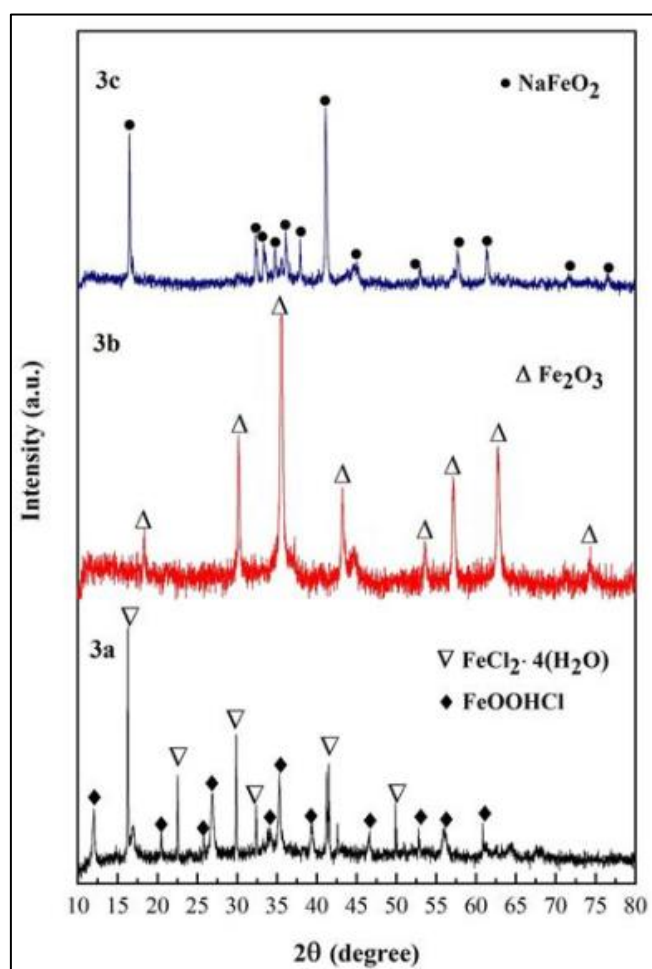
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของ Mill Scale ที่บำบัดด้วยแก๊สรีดิวซ์ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

N. Chuprasoet และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษาของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยนำมาวิเคราะห์ด้วย XRD และหาองค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF พบว่า ของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 97.14% โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และองค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF

ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการวิเคราะห์เบื้องต้นแล้วนำไปจัดการทำให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นโดยการล้างด้วยน้ำและกำจัดสิ่งเจือปนด้วยการดูดด้วยแม่เหล็ก จากนั้นอบให้แห้งจะทำให้ได้ผงเหล็กบริสุทธิ์ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น จึงนำไปศึกษาการเปลี่ยนสูตรทางเคมี โดยการทดลองนำไปทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไนตริก (HNO₃) และด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำของเสียที่ผ่านการจัดการแล้วไปทำปฏิกิริยากับกรด HCl ทำให้เหล็กเปลี่ยนโครงสร้างอยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ของ FeCl₂·4(H₂O) เมื่อนำของเสียที่ผ่านการจัดการแล้วไปทำปฏิกิริยากับกรด HNO₃ ทำให้เปลี่ยนโครงสร้างเป็นวัฏภาคเดี่ยวของ Fe₂O₃ และเมื่อนำของเสียที่ผ่านการจัดการแล้วไปทำปฏิกิริยากับด่าง NaOH ทำให้เปลี่ยนโครงสร้างเป็น NaFeO₂ แสดงผลดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ (a) ของเสียทำปฏิกิริยากับกรด HCl (b) ของเสียทำปฏิกิริยากับกรด HNO₃ (c) ของเสียทำปฏิกิริยากับ NaOH

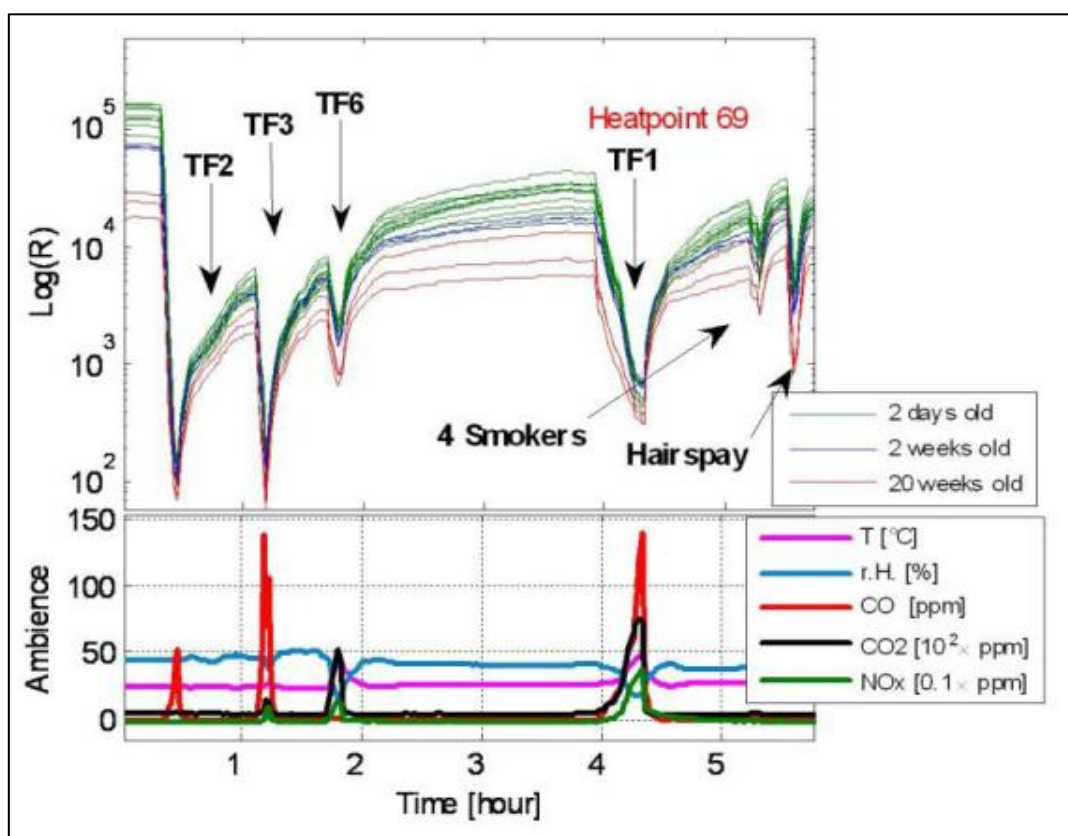
หลังจากการจัดการของเสียให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นและสามารถทำให้เกิดเป็นวัสดุภาคเดียวของ Fe_2O_3 ด้วยการปรับเปลี่ยนสูตรเคมีของของเสียทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น ลำดับถัดไปคือการนำของเสียที่ผ่านการจัดการแล้วไปประยุกต์ใช้งาน จากการศึกษางานวิจัยพบว่า สามารถนำ Fe_2O_3 มาใช้สังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน หนึ่งในนั้นคือการใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับแก๊ส โดยเฉพาะแก๊สพิษที่เกิดจากเหตุไฟไหม้ ซึ่งได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ เซนเซอร์ตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ ตลอดจนการศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ในการตรวจจับแก๊สพิษต่าง ๆ ดังนี้

U. Hoefer and D. Gutmachera. (2012) นำเสนอเทคโนโลยีการตรวจจับแก๊สที่มีศักยภาพในการแก้ไขหรือแทนที่ระบบที่มีอยู่เพื่อใช้โดยเฉพาะ ในเครื่องตรวจจับอัคคีภัยในที่พักอาศัย โดยระบุข้อดีและความสามารถของเทคโนโลยีการตรวจจับแก๊ส โดยการทดสอบเซนเซอร์โลหะออกไซด์ (Metal oxide sensors) เนื่องจากเทคโนโลยีส่วนใหญ่ไม่ได้เลือกแก๊สเป้าหมายอย่างจำเพาะ และเนื่องจากการเผาไหม้มีส่วนผสมของแก๊สเผาไหม้มากกว่า 1 ชนิด จึงเป็นประโยชน์ที่จะรวมการตรวจจับแก๊สหลายชนิดเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งสามารถใช้เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการทำนายและลดการแจ้งเตือนที่ผิดพลาดโดยมุ่งเน้นไปที่แก๊สเผาไหม้ทั่วไป โดยตารางที่ 4 แสดงรายการไฟที่ทดสอบตามมาตรฐาน (EN-54) และสารประกอบแก๊สหลัก โดยพบ ว่าแก๊ส CO_2 CO H_2 H_2O NO และ NO_2 สามารถพบได้ในการเกิดไฟทุกประเภท สารประกอบหลักคือ CO และ H_2 ในไฟที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่ CO_2 และ NO_2 จะถูกปล่อยออกมาในกระบวนการเผาไหม้ที่ร้อนและสมบูรณ์ การใช้เซนเซอร์ที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกแยะประเภทไฟเหล่านั้นได้

ตารางที่ 2.4 การทดสอบเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน EN-54 และสารประกอบที่เป็นแก๊ส (แก๊สเป้าหมายหลักจะแสดงเป็นตัวหนา) (U. Hoefer and D. Gutmachera, 2012)

Test - fire	Combustion material	Combustion products
TF1	Open beech wood fire	CO_2 , CO , H_2 , H_2O , NO , NO_2 , methane, ...
TF2	Smoldering beech wood fire	CO_2 , CO , H_2 , H_2O , NO , HCl , methane, ...
TF3	Growing Smoldering cotton	CO_2 , CO , H_2 , H_2O , NO , methane, ...
TF4	Open polyurethane foam fire	CO_2 , CO , H_2 , H_2O , NO , NO_2 , N_2O , NH_3 , ...
TF5	Open n-heptane fire (3%Toluol)	CO_2 , CO , H_2 , H_2O , NO , NO_2 , ethane, ...
TF6	Open ethanol/alcohol fire (liquid)	CO_2 , CO , H_2 , H_2O , NO , NO_2 , ethane, ...

จากตัวอย่างการทดสอบความต้านทานของเซนเซอร์โลหะออกไซด์ SnO_2 ดังรูปที่ 2.10 ระหว่างการทดสอบไฟประเภทต่าง ๆ และเหตุการณ์ที่มีอิทธิพลต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ พบว่าสามารถตรวจจับได้ ทั้งแก๊สที่เกิดจาก ไฟของการเผาไหม้ไม้ที่จุดไฟด้วยเอทานอล (TF1) ไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ไม้ (TF2) ไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ฝ้าย (TF3) และไฟที่เกิดขึ้นจากเอทานอล/แอลกอฮอล์ (TF6) รวมไปถึงควันและไฮโดรเจน โดยประสิทธิภาพจะลดลงตามเวลาใช้งานที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจะเหมาะกับบรรยากาศที่เต็มไปด้วย CO นอกจากนี้ยังสามารถตรวจจับแก๊ส CO_2 และ NO_x แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อมีความชื้นในอากาศและอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ SnO_2 ยังมีการศึกษาโลหะออกไซด์ประเภทอื่นที่สามารถตรวจจับแก๊สพิษและแก๊สที่เกิดจากไฟไหม้ได้ เช่น $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่สามารถตรวจจับแก๊สประเภท NO_x , CH_4 , H_2 , CO และ CO_2 ได้



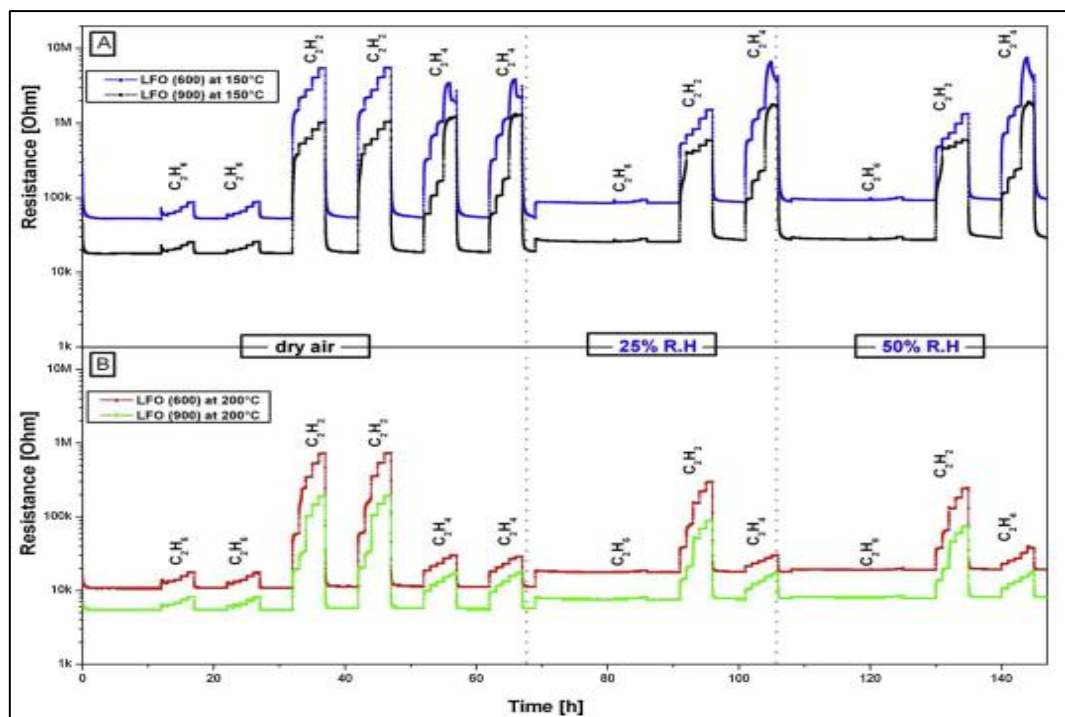
รูปที่ 2.10 ความต้านทานของเซนเซอร์โลหะออกไซด์ SnO_2 ระหว่างการทดสอบไฟต่าง ๆ และเหตุการณ์ที่มีอิทธิพลต่อการตอบสนองของเซนเซอร์

A.A. Alharbi และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล (Sol gel) เฝ้าแคลไซน์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 500-900 องศาเซลเซียส แล้วนำไปศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สต่าง ๆ คือ C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CH_4 , CO , CO_2 และ H_2 ที่อุณหภูมิใช้งาน 150-300 องศา

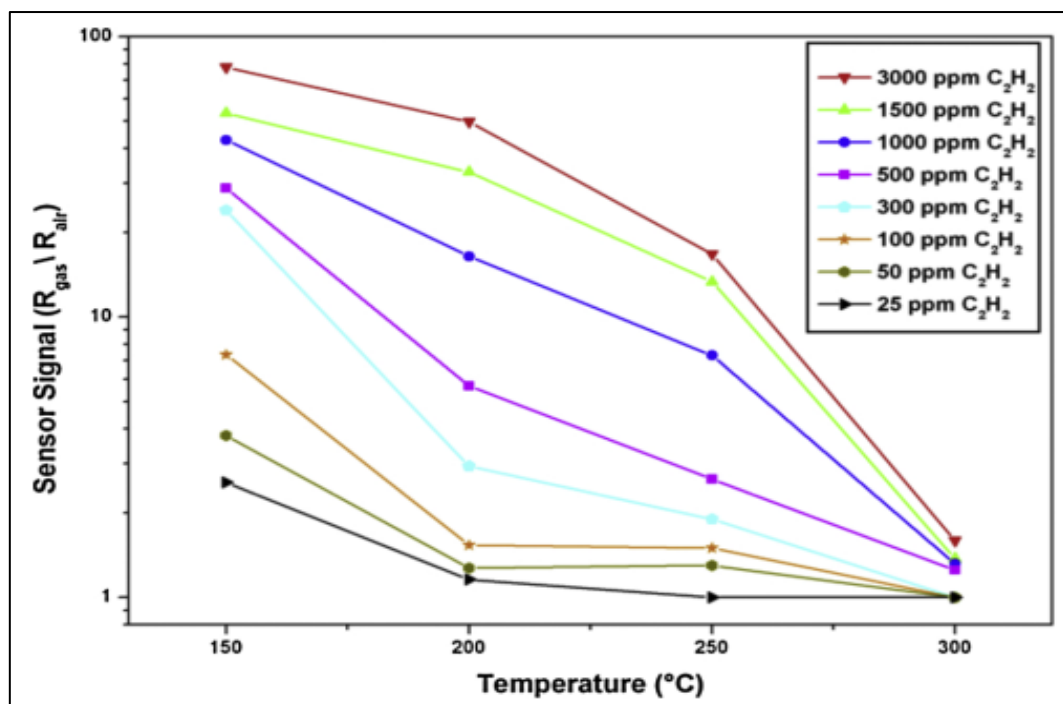
เซลเซียส ทั้งในที่บรรยากาศแห้ง และบรรยากาศที่มีความชื้นในอากาศ 25% และ 50% นอกจากนี้ยังศึกษาความเข้มข้นของแก๊สที่ต่างกัน ผลการทดลอง พบว่า แก๊สที่สามารถตรวจจับได้ดีที่สุด คือ C_2H_2 และ C_2H_4 แต่ในส่วน CO CO_2 C_2H_6 CH_4 และ H_2 สามารถตรวจจับได้ แต่ตรวจจับได้น้อยมาก และอุณหภูมิแคลไซน์วัสดุที่ทำให้วัสดุมีประสิทธิภาพในการตรวจจับสัญญาณได้ดีที่สุด คือ 600 องศาเซลเซียส โดยค่าสัญญาณของเซนเซอร์แสดงดังตารางที่ 5 จากนั้นนำไปวัดค่าความต้านทานที่มีความชื้นในอากาศแตกต่างกัน จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อความชื้นในอากาศสูงขึ้น ค่าความต้านทานจะต่ำลง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊สจะต่ำลง เมื่อความชื้นในอากาศสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิในการใช้งานและความเข้มข้นยังส่งผลต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์อีกด้วย จากรูปที่ 2.12 ทำการทดสอบประสิทธิภาพที่อุณหภูมิใช้งาน 150-300 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สามารถตรวจจับแก๊สได้ดีที่สุด คือ 150 องศาเซลเซียส และยิ่งความเข้มข้นสูงขึ้นค่าความต้านทานที่วัดได้จะสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 2.5 ค่าสัญญาณของเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับแก๊สในแต่ละประเภทของ $LaFeO_{3\pm\delta}$ ที่ใช้อุณหภูมิเผาแคลไซน์ต่างกัน สำหรับความเข้มข้น 500 ppm

Sensor signals of LFO(500), LFO(600), LFO(700), LFO(800) and LFO(900) sensors for 500 ppm of different dissolved gases in power transformer oil.							
Sensor	Sensor Signal						
	Gas						
	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CH_4	CO_2	CO	H_2
LFO(500)	22.1	5.5	1.3	1.2	1.1	1.2	1.3
LFO(600)	28.8	6.4	1.7	1.2	1.1	1.2	1.3
LFO(700)	21.7	5.9	1.3	1.2	1.1	1.2	1.3
LFO(800)	18.7	4.4	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2
LFO(900)	21.7	3.4	1.4	1.2	1.1	1.2	1.2

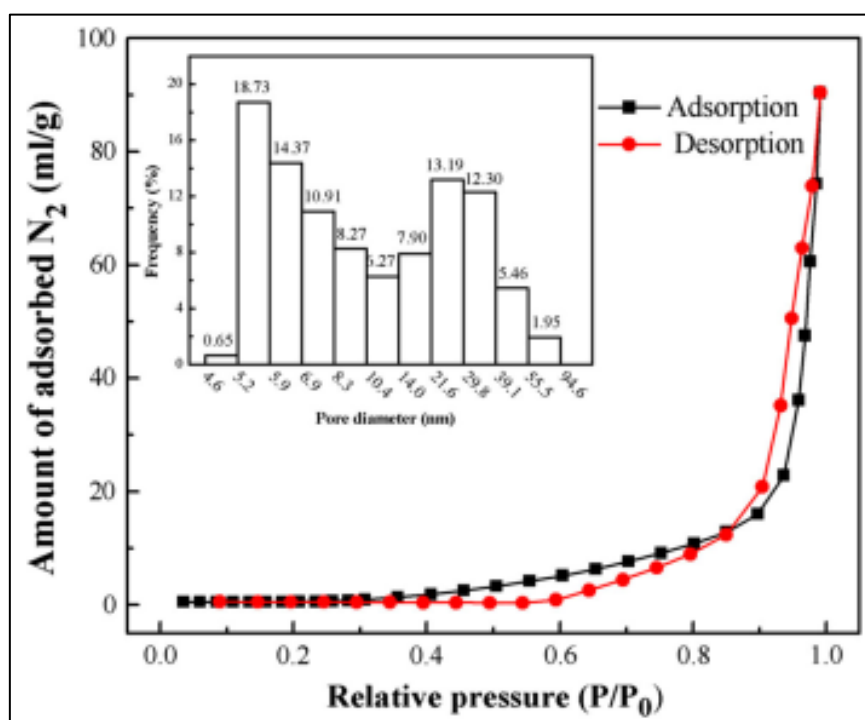


รูปที่ 2.11 ความต้านทานที่สามารถวัดได้เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊ส เมื่อความชื้นในอากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 150 และ 200 องศาเซลเซียส



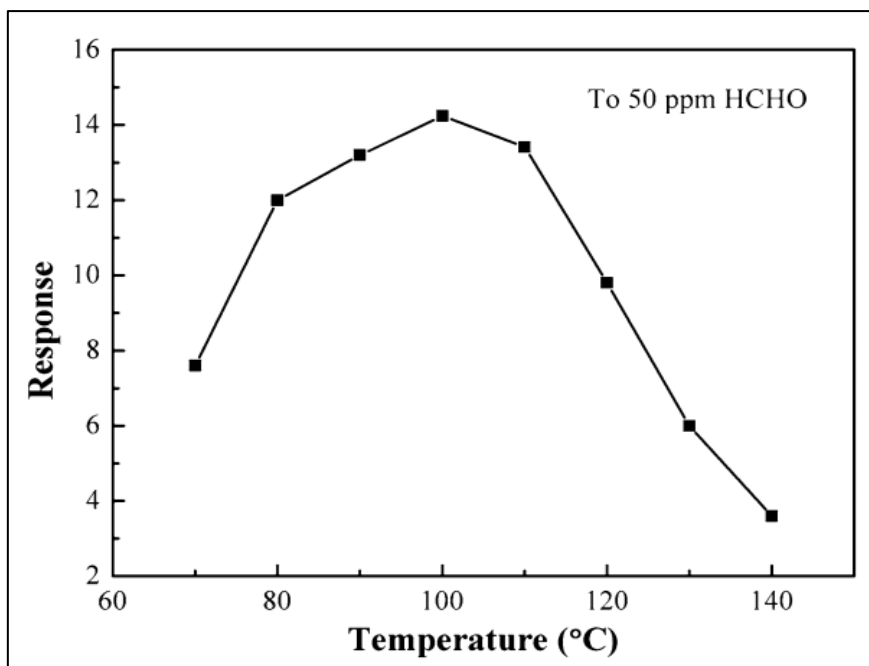
รูปที่ 2.12 อุณหภูมิในการใช้งานและความเข้มข้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์

Y. Zhang และคณะ (2016) ได้นำวัสดุสารกึ่งตัวนำ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ชนิด P-Type มาใช้สำหรับตรวจจับแก๊สฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde; HCHO) กับวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล (Citrate sol gel) หลังจากสังเคราะห์ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่า มีอนุภาคนาโนขนาด 300 นาโนเมตร และนอกจากนี้ยังศึกษาการกระจายขนาดของรูพรุนด้วยการวิเคราะห์การดูดซับแก๊ส N_2 พบว่ามีรูพรุนขนาด 2-50 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 2.13

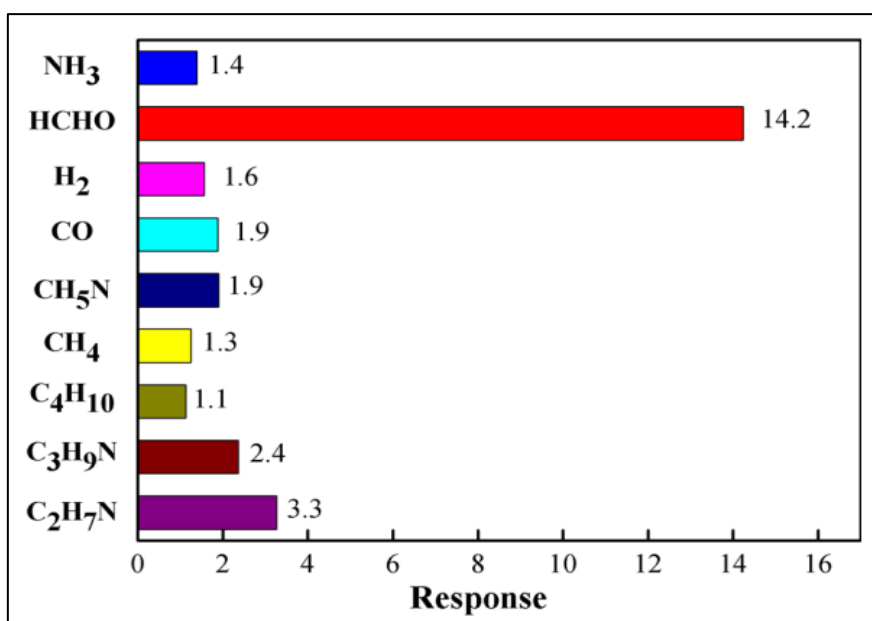


รูปที่ 2.13 การกระจายขนาดของรูพรุนด้วยการวัดการดูดซับแก๊ส N_2

เมื่อนำ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ไปทดสอบวัดประสิทธิภาพด้วยการดูดซับแก๊ส HCHO ความเข้มข้น 50 ppm ที่อุณหภูมิใช้งานตั้งแต่ 70-140 องศาเซลเซียส พบว่า การตอบสนองต่อแก๊สจะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีการตอบสนองต่อการตรวจจับแก๊สที่ดีที่สุด เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส การตอบสนองจะค่อย ๆ ลดลง โดยแสดงดังรูปที่ 2.14 และเมื่อนำไปเทียบกับแก๊สชนิดอื่น ๆ ที่ความเข้มข้น 50 ppm โดยใช้อุณหภูมิเดียวกัน พบว่า วัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ สามารถตอบสนองได้ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สชนิดอื่นที่ทำการทดสอบ ดังรูปที่ 2.15



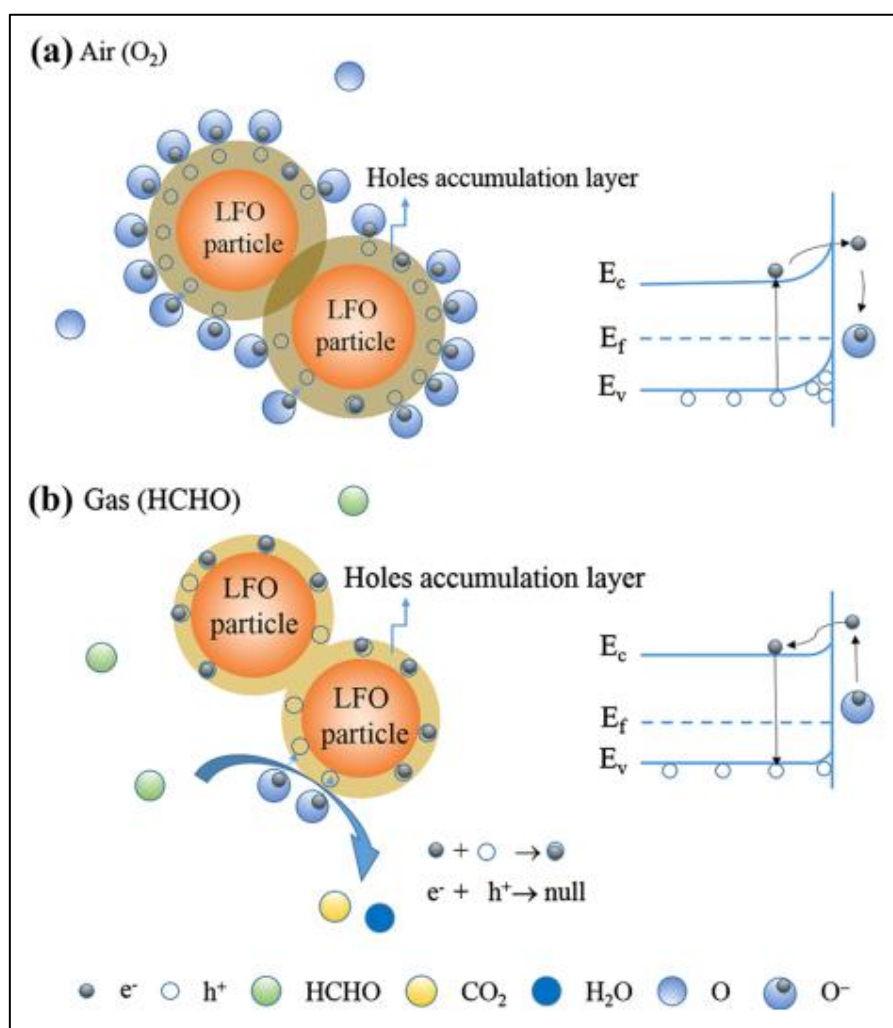
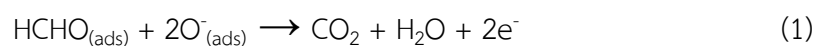
รูปที่ 2.14 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส HCHO ที่ความเข้มข้น 50 ppm ณ อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 2.15 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 50 ppm ณ อุณหภูมิเดียวกัน

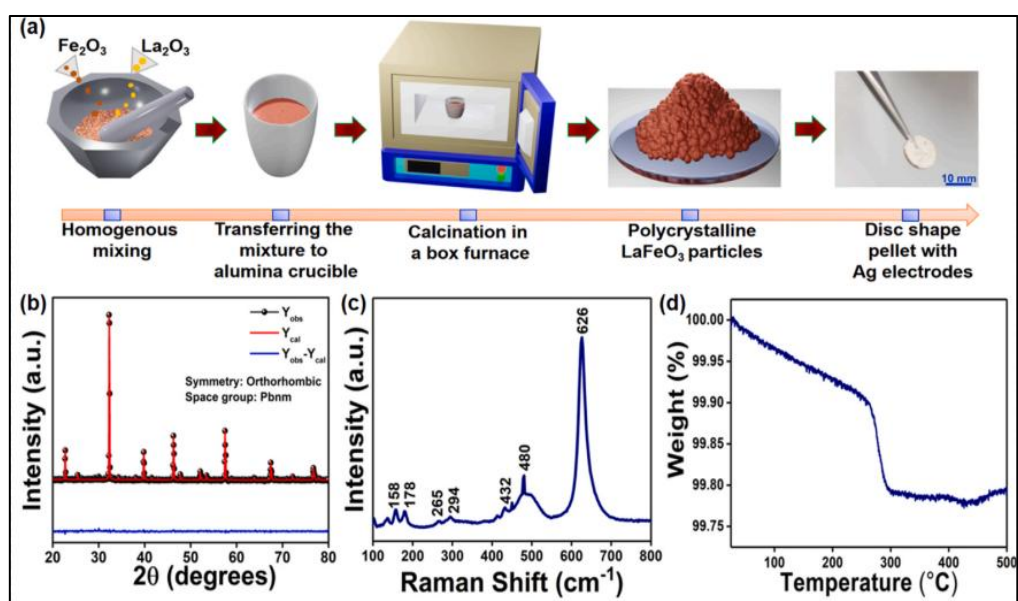
การตอบสนองต่อแก๊ส HCHO ของวัสดุ LaFeO_{3±6} อาศัยกลไกทางไฟฟ้าเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ จากรูปที่ 2.16a ในบรรยากาศที่อุดมไปด้วยออกซิเจน

อนุภาคของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จะดูดซับออกซิเจน โดยการจับกับอิเล็กตรอน (e^-) ที่บริเวณผิวอนุภาค (O^- , O_2^- , O_2^{2-}) ทำให้ Valence band มีช่องว่าง (Holes) ที่เป็นประจุบวก (h^+) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าแบบ P-Type และความสามารถในการตอบสนองต่อแก๊ส HCHO สามารถตรวจจับได้จากการวัดค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นเมื่อดูดซับแก๊ส HCHO โดยอาศัยกลไกการตรวจจับ แสดงดังรูปที่ 2.16b โดยคาร์บอนในโครงสร้างของแก๊ส HCHO จะไปจับกับออกซิเจนที่เกาะอยู่กับอิเล็กตรอนบริเวณผิววัสดุ เกิดการสร้างพันธะใหม่เป็นแก๊ส CO_2 และ H_2O ดังสมการที่ 1 เมื่ออิเล็กตรอนที่เคยจับกับออกซิเจนกลับไปอยู่ในตำแหน่งช่องว่างซึ่งเป็นประจุบวก ประจุมจะมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงหรือมีความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น

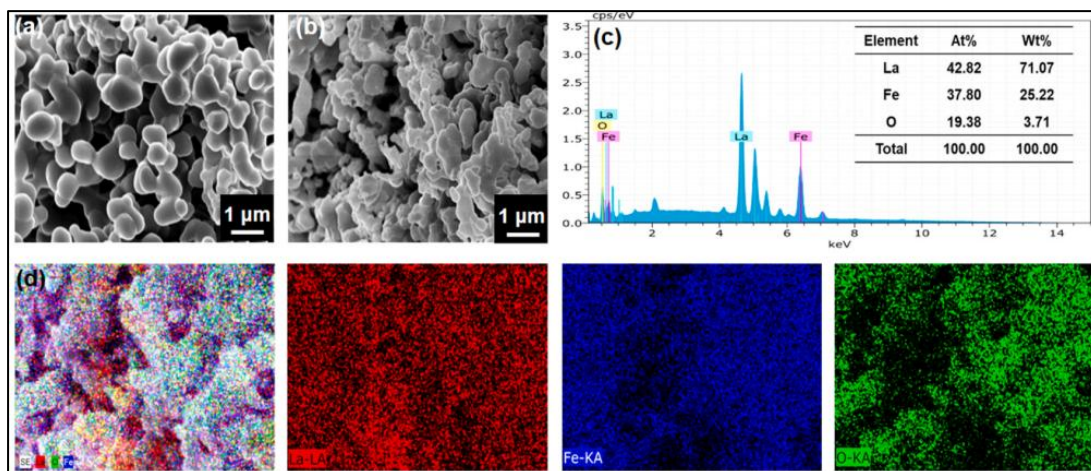


รูปที่ 2.16 กลไกการตรวจจับแก๊ส (a) ในอากาศที่อุดมไปด้วยออกซิเจน (b) ในแก๊ส HCHO

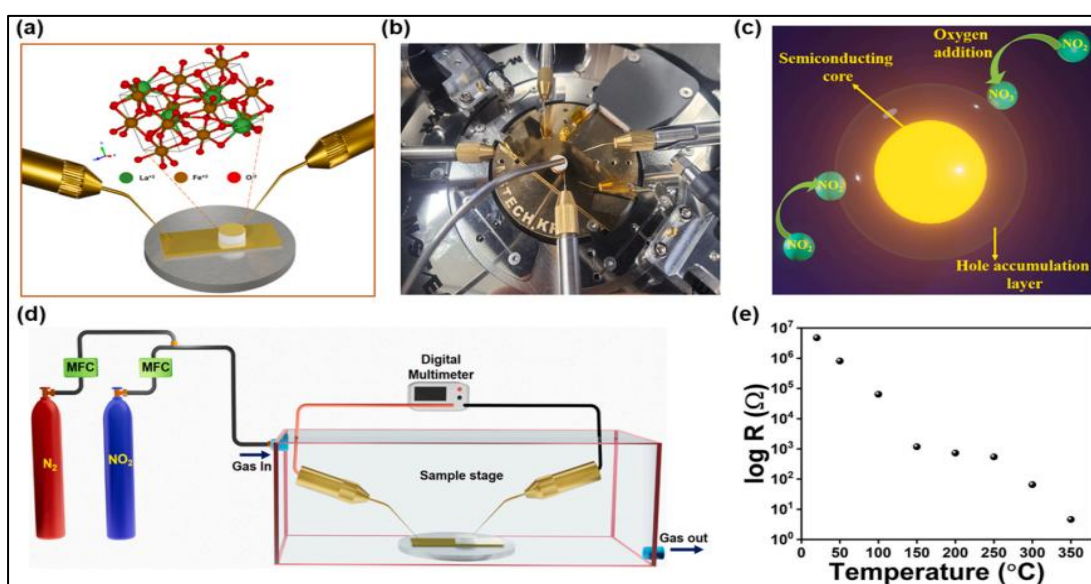
K. Lee และคณะ (2021) ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ด้วยวิธีบดผสม มีขั้นตอนดังรูปที่ 2.17a โดยการนำ La_2O_3 และ Fe_2O_3 บดผสมในโกร่ง จากนั้นนำไปใส่ถ้วยรองเผาที่ทำจาก Al_2O_3 นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้ร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาด โดยเติม PVA ความเข้มข้น 2% เพื่อทำให้เกิดเป็นเม็ดกลมและช่วยให้สามารถไหลเข้าแบบได้ดี จากนั้นอัดขึ้นรูปชิ้นงานแล้วเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้วิธีการให้อุณหภูมิในการเผา 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์ของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ด้วย XRD ดังรูปที่ 2.17b และวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ดังรูปที่ 2.17c และได้ทำการวัดพื้นที่ผิวอนุภาคของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ด้วย BET พบว่ามีพื้นที่ผิว $1.6056 \text{ m}^2/\text{g}$ ในขณะที่ความกว้างของรูพรุน มีค่ามัธยฐานเท่ากับ 1.2805 นาโนเมตร จากรูปที่ 2.17d แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 25-500 องศาเซลเซียส พบว่า ช่วงแรกอุณหภูมิ 25-280 องศาเซลเซียส น้ำหนักค่อย ๆ ลดลง เกิดจากการระเหยของสารอินทรีย์ ระเหยง่าย จากนั้นน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วช่วงอุณหภูมิ 280-465 องศาเซลเซียส เกิดจากการเผาไหม้ของสารอินทรีย์ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ หลังจากขึ้นรูปชิ้นงานแล้วนำไปศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ด้วยการวิเคราะห์ร่วมกับ EDS แสดงดังรูปที่ 2.18a และ 2.18b ทำให้ทราบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ แสดงดังรูปที่ 2.18c สามารถเห็นการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีได้จากรูปที่ 2.18d



รูปที่ 2.17 (a) ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ (b) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย XRD
(c) ผลการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy (d) ผลการวิเคราะห์ทางความร้อน



รูปที่ 2.18 (a) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปของวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ (b) โครงสร้างจุลภาคของผงวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ (c) EDS สเปกตรัมของวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ (d) แผนภาพระบุตำแหน่งองค์ประกอบเคมีของวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$

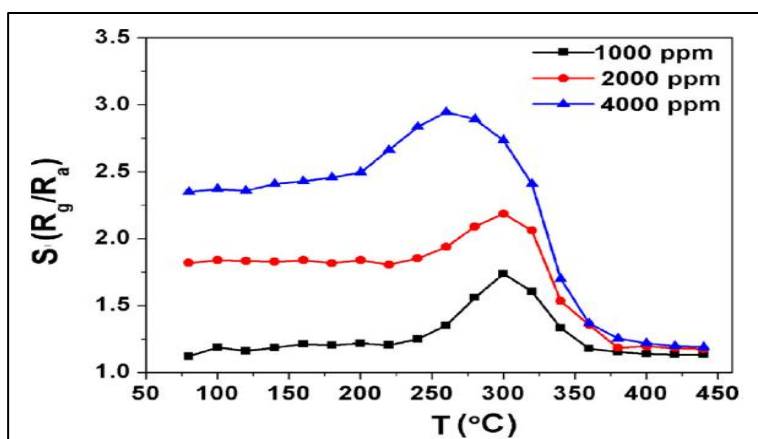


รูปที่ 2.19 (a) แผนผังโครงสร้างโมเลกุล $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ และการเตรียมทดสอบตัวอย่าง (b) ภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทานตัวอย่าง (c) กลไกการตรวจจับแก๊สของวัสดุ LaFeO_3 (d) แผนผังการตั้งค่าการทดลองตรวจจับแก๊ส (e) ความต้านทานของเซนเซอร์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ในอุณหภูมิต่าง ๆ

ในการเตรียมการทดสอบค่าความต้านทานเมื่อตรวจจับแก๊สโดยเครื่องมือที่เตรียมสำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.19a, 2.19b และ 2.19d ซึ่งแก๊สที่ทำการทดสอบ คือ NO_2 จากรูปที่ 2.19c เป็นภาพจำลองกลไกการตรวจจับแก๊สของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ออกซิเจนจะไปจับกับอิเล็กตรอนที่ผิวของวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ทำให้เกิดช่องว่างที่มีประจุบวกเกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าแบบ P-Type เมื่อปล่อยแก๊ส NO_2 เข้าไปในระบบ NO_2 จะไปจับกับออกซิเจนที่ผิวของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ส่งผลให้อิเล็กตรอนกลับไปในตำแหน่งช่องว่างที่มีประจุบวกเช่นเดิม แสดงดังสมการที่ 2 ทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการนำไฟฟ้าลดลง จากรูปที่ 2.19e แสดงผลการทดสอบค่าความต้านทานของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ เมื่อดูดซับแก๊สที่อุณหภูมิ 25-350 องศาเซลเซียส พบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊ส NO_2 ของวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จะลดลง

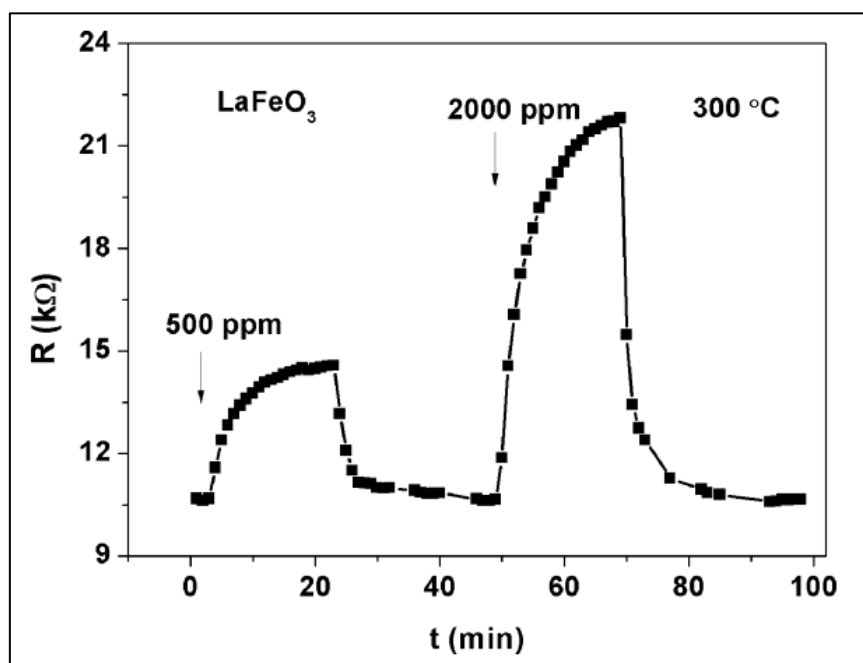


X. Wang และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษา $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ซึ่งเตรียมโดยใช้วิธีโซลเจล หลังจากนั้นทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปบนวัสดุรองรับที่ทำจากเซรามิกอะลูมินา ที่มีลักษณะทรงกระบอกด้านในกลวงแล้วทำการเคลือบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติในการตรวจจับแก๊ส CO_2 โดยวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 80-440 องศาเซลเซียส ในอากาศที่ไม่มีความชื้น แล้ววิเคราะห์การตอบสนองด้วยการเปรียบเทียบความแตกต่างของความต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลังปล่อยแก๊ส CO_2 เข้าไปในระบบ



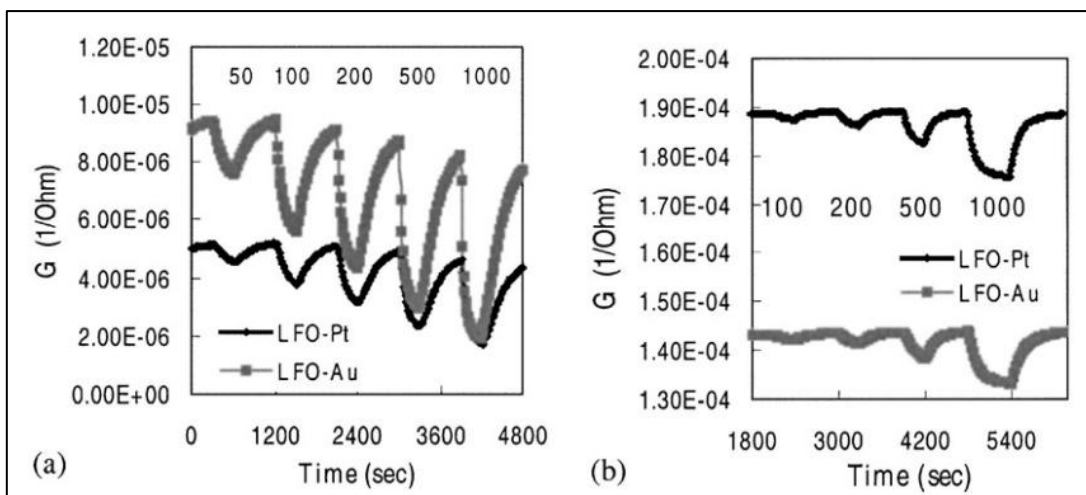
รูปที่ 2.20 การตอบสนองต่อแก๊ส CO_2 ของวัสดุ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของแก๊สแตกต่างกัน

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาการตอบสนองของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ พบว่าสามารถตอบสนองต่อแก๊ส CO_2 โดยทดสอบที่ความเข้มข้น 1000 2000 และ 4000 ppm ซึ่งสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่ อุณหภูมิ 300 300 และ 260 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (โดยมีค่าการตอบสนอง 1.74 2.19 และ 2.94 ตามลำดับ) พบว่า ยิ่งมีความเข้มข้นสูงขึ้นความสามารถในการตอบสนองก็จะยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 2.20 จากนั้นนำไปศึกษาระยะเวลาในการตอบสนองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.21 พบว่า $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จะเริ่มตอบสนองต่อแก๊ส CO_2 หลังจากปล่อยแก๊สไปประมาณ 4-8 นาที ความต้านทานไฟฟ้าจะเริ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าสัญญาณเซนเซอร์สูงสุดจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที ความต้านทานไฟฟ้าจะคงที่



รูปที่ 2.21 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของ LaFeO_3 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ต่างกันในอากาศที่ไม่มีความชื้น

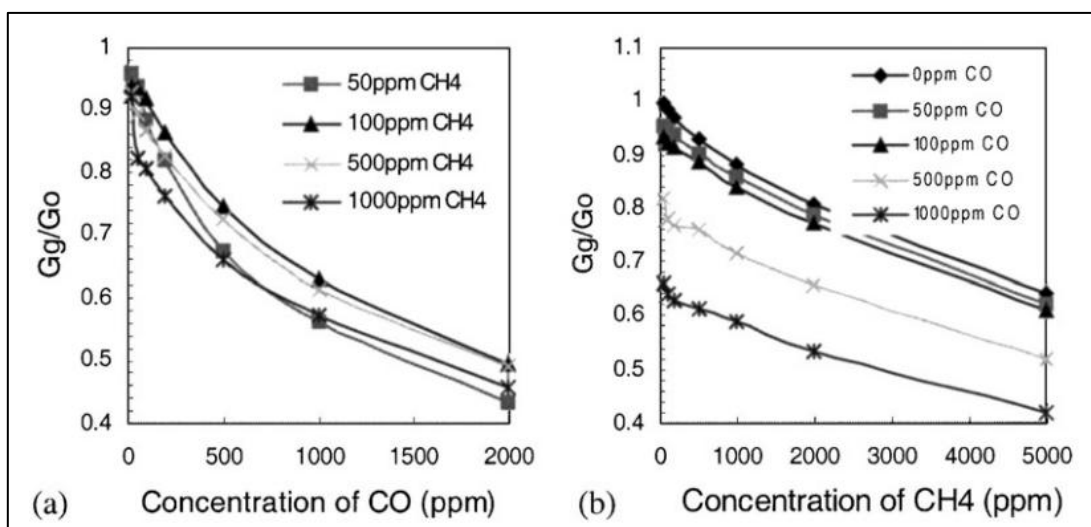
N.N. Toan และคณะ (2003) ได้ศึกษาวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล และขึ้นรูปเป็นฟิล์มหนา นำไปทดสอบด้วย BET พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $14.87 \text{ m}^2/\text{g}$ แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการตรวจจับแก๊ส CO (อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 50-1000 ppm) และ CH_4 (อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 100-1000 ppm) ด้วยการวัดค่าการนำไฟฟ้าโดยทดสอบกับวัสดุอิเล็กโทรด 2 ชนิด ได้แก่ ทองคำ (Au) และแพลทินัม (Pt) แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงผลการวัดค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ เมื่อดูดซับแก๊ส

(a) แก๊ส CO ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 50-1000 ppm

(b) แก๊ส CH₄ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 100-1000 ppm



รูปที่ 2.23 แสดงผลการตอบสนองต่อแก๊สผสม CO-CH₄ ของวัสดุโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$

ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทองคำ (a) อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

(b) อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 2.22a ผลการวัดค่าการนำไฟฟ้าเมื่อดูดซับแก๊ส CO ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 50-1000 ppm พบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นค่าการนำไฟฟ้าจะต่ำลง (ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น) โดยที่อิเล็กทรอนิกส์ทองคำสามารถวัดการนำไฟฟ้าและวัดความแตกต่างของการนำ

ไฟฟ้าได้ดีกว่า จากรูปที่ 2.22b ผลการวัดค่าการนำไฟฟ้าเมื่อดูดซับแก๊ส CH_4 ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความเข้มข้น 100-1000 ppm พบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นค่าการนำไฟฟ้าจะต่ำลงเช่นกัน โดยที่อิเล็กโทรดชนิดแพลทินัมวัดค่าการนำไฟฟ้าได้ดีว่าทองคำ แต่สามารถวัดความแตกต่างของการนำไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้อิเล็กโทรดชนิดทองคำในการทดสอบเรื่องการตอบสนองต่อแก๊ส ในช่วงความเข้มข้นต่างของแก๊สผสม CO-CH_4 แสดงดังรูปที่ 2.23 พบว่า ยิ่งความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองชนิดสูงขึ้นการนำไฟฟ้าจะยิ่งลดต่ำลง

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัสดุโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ มีความสามารถในการตรวจจับแก๊สได้อย่างหลากหลาย โดยเฉพาะแก๊สพิษที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งการประยุกต์ใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ที่นำมาผ่านกระบวนการจัดการให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น และนำไปเปลี่ยนสูตรเคมีเพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ถือเป็นการลดปริมาณของเสีย ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียด้วยวิธีดั้งเดิมคือการฝังกลบที่อาจเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของสิ่งมีชีวิต อีกทั้งยังเป็นการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ได้อีกทางหนึ่ง