



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



Rekayasa Material Semikonduktor Oksida Logam untuk Aplikasi Sensor Lingkungan

Profesor Ahmad Nuruddin

**Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
21 Juni 2025**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**REKAYASA MATERIAL
SEMIKONDUKTOR OKSIDA LOGAM
UNTUK APLIKASI SENSOR
LINGKUNGAN**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

REKAYASA MATERIAL SEMIKONDUKTOR OKSIDA LOGAM UNTUK APLIKASI SENSOR LINGKUNGAN

Prof. Ahmad Nuruddin

21 Juni 2025
Aula Barat ITB

Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Rekayasa Material Semikonduktor Oksida Logam untuk Aplikasi Sensor Lingkungan

Penulis : Prof. Ahmad Nuruddin

Reviewer : Prof. Hermawan K. Dipojono

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2025

ISBN : 978-623-297-726-6

e-ISBN : 978-623-297-727-3 (PDF)



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

" Iqro "

Bacalah! Tuhanmulah Yang Maha Mulia. Yang mengajarkan manusia dengan perantaraan pena.

PRAKATA

Dengan asma Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang

Segala puji bagi Allah, Tuhan semesta alam. Atas rahmat dan karunia-Nya semata penulis dapat menyelesaikan penulisan buku orasi ilmiah ini. Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada Forum Guru Besar ITB atas kesempatan yang diberikan untuk menyusun buku ini dan disampaikan dalam acara orasi ilmiah Guru Besar. Penulis juga mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian buku ini.

Buku ini berisi paparan tentang pengembangan sensor lingkungan berbasis material semikonduktor oksida logam. Pengembangan sensor untuk gas polutan sangat penting untuk menghadapi tantangan global terkait pencemaran udara yang semakin meningkat. Gas-gas berbahaya seperti karbon monoksida dan belerang dioksida dapat berdampak serius terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, sehingga diperlukan sistem pemantauan yang andal, sensitif, dan efisien untuk mendeteksi keberadaan gas-gas tersebut. Sensor gas berbasis semikonduktor oksida logam menawarkan solusi yang menjanjikan karena memiliki sensitivitas tinggi, waktu respons yang cepat, serta biaya produksi yang relatif rendah. Buku ini memaparkan hasil penelitian tentang upaya berkelanjutan dalam peningkatan performa deteksi sensor. Fungsionalisasi material semikonduktor oksida logam - melalui teknik seperti doping logam, pembentukan struktur nano, modifikasi struktur material atau pembentukan material komposit - dilakukan untuk meningkatkan sensitivitas, selektivitas, dan stabilitas sensor terhadap gas polutan.

Penulis berharap semoga tulisan ini berkontribusi menambah khasanah pengetahuan yang dapat memperluas wawasan dan menjadi sumber inspirasi para peneliti.

Bandung, 21 Juni 2025

Penulis

SINOPSIS

Buku ini memaparkan hasil penelitian terkait pengembangan sensor gas, khususnya untuk gas polutan udara berbasis semikonduktor logam oksida, yang merupakan bagian dari beberapa minat penelitian penulis, yaitu pengembangan material fungsional untuk penyimpanan dan konversi energi elektrik, dan material fungsional untuk aplikasi sensor lingkungan dan kesehatan. Buku ini secara khusus memaparkan hasil penelitian penulis bersama-sama rekan sejawat kelompok keahlian Material Fungsional Maju dan mahasiswa bimbingan terkait penelitian material untuk aplikasi sensor lingkungan.

Buku ini terdiri atas 5 bab, yaitu Bab 1 merupakan pendahuluan, Bab 2 tentang sensor gas dan material semikonduktor oksida logam, Bab 3 menguraikan hasil penelitian sensor gas berbasis semikonduktor oksida logam dan modifikasinya, Bab 4 tantangan dan arah pengembangan, dan Bab 5 kata penutup. Pada bab pendahuluan disampaikan tentang dampak kemajuan perkembangan industri dan peningkatan aktivitas urbanisasi terhadap polusi udara. Bab ini juga memaparkan secara ringkas jenis-jenis gas polutan dan batasan paparan yang diperkenankan untuk menghindari dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, metode deteksi gas, serta pilihan semikonduktor logam oksida sebagai material pendeteksi gas polutan. Pada Bab 2 dipaparkan tentang prinsip dasar bekerjanya sensor gas berbasis semikonduktor logam oksida tipe-n dan tipe-p ketika terpapar gas polutan, serta kinerja sensor yang penting untuk mengukur keefektifan sensor dalam merespons keberadaan gas polutan. Bab 3 dipaparkan capaian penelitian dalam pengembangan sensor gas, khususnya karbon monoksida (CO), belerang dioksida (SO₂), dan etanol (C₂H₅OH). Hasil penelitian yang dijabarkan pada Bab ini merupakan rangkaian penelitian dalam rangka peningkatan kinerja sensor gas berbasis semikonduktor oksida logam, khususnya material seng oksida (ZnO) dan tungsten trioksida (WO₃). Bab 4 menyampaikan tantangan dan arah pengembangan sensor. Bab 5 disampaikan tentang usaha penelitian berkelanjutan yang diperlukan dalam pengembangan sensor gas berbasis semikonduktor oksida logam di Laboratorium Material Fungsional Maju FTI ITB.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	VII
SINOPSIS	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR.....	XIII
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Gas Polutan.....	2
1.2 Metode Deteksi Gas	3
1.3 Material Semikonduktor Oksida Logam	4
2 SENSOR GAS SEMIKONDUKTOR OKSIDA LOGAM.....	9
2.1 Prinsip Dasar Sensor Gas	9
2.2 Indikator Kinerja Sensor Gas	12
3. FUNGSIONALISASI MATERIAL SEMIKONDUKTOR LOGAM OKSIDA UNTUK SENSOR GAS	15
3.1 Sensor CO Berbasis ZnO	16
3.2 Sensor Etanol Berbasis ZnO Doping Aluminium.....	21
3.3 Sensor SO ₂ Berbasis Komposit MWCNT-ZnO	25
3.4 Sensor CO Berbasis Komposit rGO-ZnO	29
3.5 Sensor CO Berbasis Komposit Grafena-WO ₃	33
4 TANTANGAN DAN ARAH PENGEMBANGAN.....	41
5 PENUTUP.....	43
6 UCAPAN TERIMA KASIH	45
DAFTAR PUSTAKA	47
CURRICULUM VITAE	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	(a) Perangkat pendeteksi gas karbon monoksida di tambang batu bara menggunakan burung kenari sebagai penanda hadirnya gas berbahaya (https://www.bbc.co.uk/ahistoryoftheworld/objects/ILTjS4h4RNYMWRLXSYW0oA), (b) lampu Davy (https://www.bbc.co.uk/ahistoryoftheworld/objects/ILTjS4h4RNYMWRLXSYW0oA)2
Gambar 2	Diagram skematik mekanisme sensing semikonduktor oksida logam tipe-n terhadap gas pereduksi H ₂ S. Direproduksi dari Referensi Li dkk, 2019, dengan izin dari Royal Society of Chemistry..... 10
Gambar 3	Diagram skematik mekanisme sensing semikonduktor oksida logam tipe-p terhadap gas pereduksi NH ₃ . Direproduksi dari Referensi Li dkk, 2019, dengan izin dari Royal Society of Chemistry..... 11
Gambar 4	Diagram skematik yang menunjukkan waktu respons dan pulih dari resistansi sensor gas MOS tipe-n dalam gas target oksidator. Wilayah I ketika adsorpsi spesies oksigen, wilayah II ketika gas target dideteksi, dan wilayah III ketika aliran gas target dihentikan (Isaac dkk., 2022) Hak cipta 2022, Springer Nature. 12
Gambar 5	Skema diagram sistem pengukuran sensor dilengkapi pengatur suhu sampel dan aliran gas. 17
Gambar 6	Pola difraksi sinar-X bubuk ZnO hasil presipitasi dan dikalsinasi pada suhu 110 °C, 400 °C, dan 900 °C. 18
Gambar 7	Morfologi permukaan ZnO hasil presipitasi dan dikalsinasi pada suhu (a) 110 °C, (b) 400 °C, (c) 700 °C, dan (d) 900 °C. 18
Gambar 8	Sensitivitas sensor ZnO komersial dan sensor ZnO hasil sintesis dikalsinasi pada temperatur 200 °C – 900 °C. Sensor dioperasikan dalam ruang pada temperatur 350 °C terhadap gas target CO 1000 ppm (Nuruddin dkk., 2007). 19

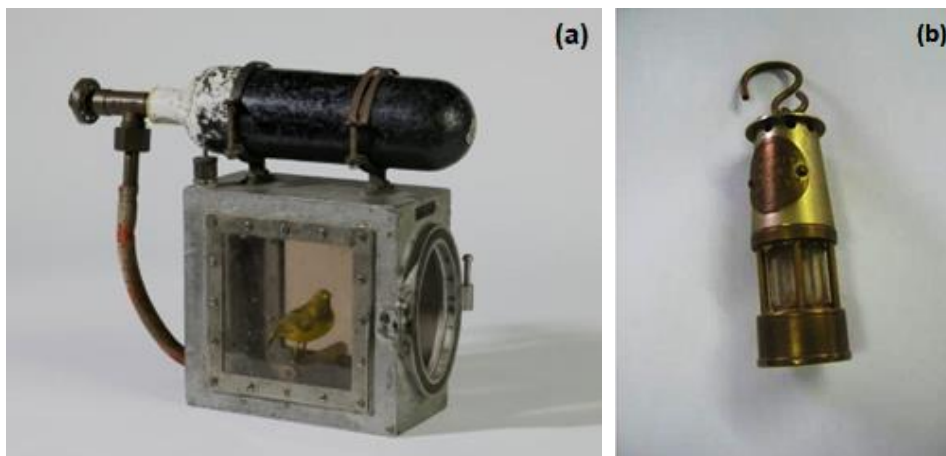
Gambar 9	Sensitivitas sensor ZnO, hasil sintesis yang dianil pada suhu 700 °C, terhadap gas CO konsentrasi 1000 ppm yang dioperasikan pada suhu 200 hingga 500 °C (Nuruddin dkk., 2007).	20
Gambar 10	Diagram alir proses deposisi ZnO dan AZO menggunakan metode <i>Chemical Bath Deposition</i>	22
Gambar 11	Perangkat sistem pengukuran kinerja sensor etanol menggunakan elemen sensor ZnO doping Al (Yulianto dkk., 2015) Hak cipta 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.....	23
Gambar 12	Pola difraksi ZnO dan AZO dengan berbagai kandungan atom aluminium (Yulianto dkk., 2015) Hak cipta 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.	23
Gambar 13	Morfologi permukaan lapisan tipis (a) ZnO dan ZnO didoping (b) 3% mol aluminium, (c) 5% mol aluminium, dan (d) 7% mol aluminium (Yulianto dkk., 2015) Hak cipta 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.	24
Gambar 14	Ilustrasi mekanisme deteksi uap etanol pada permukaan (a) ZnO murni dan (b) ZnO didoping aluminium (Yulianto dkk., 2015) Hak cipta 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.	25
Gambar 15	Perangkat sistem pengukuran kinerja sensor SO ₂ menggunakan elemen sensor ZnO-MWCNT (Iqbal dkk., 2014) Hak cipta 2014, Trans Tech Publications.....	27
Gambar 16	Pola difraksi material komposit ZnO-MWCNT (Iqbal dkk., 2014) Hak cipta 2014, Trans Tech Publications, Ltd.	27
Gambar 17	Morfologi permukaan (a) MWCNT dan (b) komposit ZnO-MWCNT (Iqbal dkk., 2014) Hak cipta 2014, Trans Tech Publications, Ltd.	28
Gambar 18	Respons dinamik komposit ZnO-MWCNT terhadap paparan gas SO ₂ 30, 50, dan 70 ppm dioperasikan pada suhu 150 °C (Iqbal dkk., 2014) Hak cipta 2014, Trans Tech Publications, Ltd.	28

Gambar 19	Pola difraksi material komposit rGO-ZnO (GZ) dengan perbandingan (a) 0:1, (b) 1:3, (c) 1:1, (d) 3:1, dan (e) 1:0 (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.	30
Gambar 20	Morfologi permukaan sampel (a) rGO, (b) rGO-ZnO (1:1), dan (c) ZnO (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.	30
Gambar 21	Respons dinamik sensor terhadap gas CO 30 ppm dari (a) ZnO, (b) GZ 1:3, (c) GZ 1:1, (d) GZ 3:1 dan (e) rGO sebagai fungsi waktu untuk suhu operasi 25 °C sampai 300 °C (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.	31
Gambar 22	Respons sensor terhadap gas CO 30 ppm dari (a) ZnO, (b) GZ 1:3, (c) GZ 1:1, (d) GZ 3:1 dan (e) rGO sebagai fungsi suhu operasi 25 °C sampai 300 °C (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.	32
Gambar 23	(a) Skema mekanisme deteksi pada ZnO murni dan (b) pada sensor komposit rGO-ZnO (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.	33
Gambar 24	Pola difraksi (i) WO ₃ murni, (ii) WG21, (iii) WG11, dan (iv) WG12 (Estananto dkk., 2021) Hak cipta 2021, Taylor & Francis.	34
Gambar 25	Morfologi (a) WO ₃ murni (WG10), (b) WG21, (c) WG11, (d) WG12, dan (e) TEM WG11 (Estananto dkk., 2021) Hak cipta 2021, Taylor & Francis.	36
Gambar 26	Selektivitas komposit WO ₃ -Grafena (WG21) terhadap gas CO, SO ₂ , NO, CO ₂ , dan NO ₂ konsentrasi 10 ppm (Estananto dkk., 2021) Hak cipta 2021, Taylor & Francis.	37
Gambar 27	Respons dinamis komposit WG21 terhadap gas CO selama 5 hari secara berturutan (Estananto dkk., 2021) Hak cipta 2021, Taylor & Francis.	38
Gambar 28	Morfologi komposit WO ₃ -Grafena disintesis dengan penambahan (a) 1 mg grafena, (b) 5 mg grafena, (c) 10 mg grafena (Estananto, 2023).	38
Gambar 29	Selektivitas komposit WO ₃ -Grafena (20-20-5) terhadap gas CO, etanol, methanol, aseton, dan toluen 10 ppm pada suhu operasi 200°C (Estananto, 2023).	39

1 PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi telah secara nyata mengubah kehidupan manusia, membawa kenyamanan yang lebih besar, peningkatan layanan kesehatan, transportasi yang efisien, dan kota-kota yang lebih cerdas. Dari otomasi industri hingga konektivitas digital, inovasi-inovasi ini telah secara signifikan meningkatkan kualitas hidup, memungkinkan orang untuk hidup lebih lama, bekerja lebih efisien, dan mengakses layanan dengan lebih mudah. Namun, kemajuan teknologi yang pesat ini juga membawa dampak negatif terhadap lingkungan—khususnya pada penurunan kualitas udara. Peningkatan aktivitas industri, emisi kendaraan bermotor, produksi energi, dan timbunan limbah telah menyebabkan pelepasan gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), dan senyawa organik volatil (VOC) ke atmosfer. Polutan-polutan ini tidak hanya berkontribusi terhadap pemanasan global, tetapi juga menimbulkan risiko kesehatan yang serius bagi manusia dan ekosistem. Studi menunjukkan bahwa kualitas udara yang buruk berkorelasi dengan peningkatan kejadian penyakit pernapasan, kondisi kardiovaskular. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) memperkirakan bahwa sekitar 7 juta kematian dini setiap tahunnya dapat dikaitkan dengan polusi udara, di mana sebagian besar terkait dengan paparan gas-gas berbahaya ini (Pathi dkk., 2023). Sehingga kebutuhan akan sistem monitoring gas berbahaya ini merupakan kebutuhan yang penting.

Usaha untuk mendeteksi keberadaan gas berbahaya di udara telah dimulai jauh hari sebelum ditemukannya material semikonduktor oksida logam yang dikembangkan menjadi perangkat sensor gas saat ini. Perangkat pendeteksi gas pertama dapat ditemukan di tambang batu bara, di mana burung kenari digunakan sebagai sistem peringatan kebocoran gas (Gambar 1). Penggunaan burung kenari sebagai sistem deteksi gas yang menyedihkan tersebut dihentikan setelah ditemukannya lampu Davy pada tahun 1815, yang merupakan perangkat pendeteksi gas buatan manusia pertama untuk mengidentifikasi metanol dan menipisnya konsentrasi oksigen di dalam tambang batu bara. Kemudian, produk sensor resistif untuk mendeteksi gas berbahaya diluncurkan oleh Seiyama dan Taguchi, menandai lahirnya sensor gas semikonduktor oksida logam (Patowary, 2018; Nadargi dkk., 2023).



Gambar 1 (a) Perangkat pendeteksi gas karbon monoksida di tambang batu bara menggunakan burung kenari sebagai penanda hadirnya gas berbahaya (<https://www.bbc.co.uk/ahistoryoftheworld/objects/ILTjS4h4RNyMWRLXSYW0oA>), (b) lampu Davy (<https://www.bbc.co.uk/ahistoryoftheworld/objects/ILTjS4h4RNyMWRLXSYW0oA>.)

1.1 Gas Polutan

Polutan adalah zat berbahaya di udara yang berasal dari sumber alami dan buatan manusia, termasuk emisi kendaraan, proses industri, pembangkit listrik, dan kegiatan pertanian. Gas-gas ini sering tidak terlihat oleh mata atau tercium baunya, namun memiliki dampak besar pada kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Beberapa polutan gas yang paling umum dan berbahaya adalah karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), sulfur dioksida (SO₂), ozon (O₃), amonia (NH₃), dan senyawa organik volatil (VOC). Gas-gas ini dapat memicu berbagai masalah kesehatan, mulai dari iritasi ringan pada mata dan tenggorokan hingga kondisi serius seperti asma, penyakit jantung, dan bahkan kanker dengan paparan jangka panjang.

Untuk mengurangi risiko ini, badan kesehatan dan lingkungan seperti Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), Administrasi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (OSHA), dan Badan Perlindungan Lingkungan (EPA) telah menetapkan standar keselamatan yang dikenal sebagai batas paparan. Batas ini mendefinisikan konsentrasi maksimum setiap gas yang dapat diterima untuk paparan aman dalam jangka waktu tertentu. Ada beberapa jenis batas paparan: *Time-Weighted Average (TWA)*, yang merupakan rata-rata konsentrasi selama 8 jam sehari; *Short-Term Exposure Limit (STEL)*, yang merupakan

paparan maksimum dalam periode pendek selama 15 menit; dan *Ceiling Limit*, yang tidak boleh dilampaui dalam waktu berapa pun.

Setiap gas memiliki nilai ambang tertentu berdasarkan toksisitas dan potensi dampak kesehatannya. Misalnya, OSHA mengizinkan paparan 50 ppm untuk karbon monoksida, sementara WHO merekomendasikan 35 ppm selama satu jam. Nitrogen dioksida, polutan yang banyak ditemukan di jalan raya, memiliki batas paparan jangka pendek sebesar 5 ppm, dan WHO menetapkan pedoman satu jam pada 0,1 ppm. Ozon, meskipun bermanfaat di atmosfer atas, berbahaya di permukaan tanah; OSHA membatasi paparan 8 jamnya hingga 0,1 ppm. Begitu juga dengan amonia yang dibatasi pada 25 ppm (TWA) dan 35 ppm (STEL), sementara VOC yang bersifat karsinogenik seperti benzena dibatasi pada 1 ppm karena risiko kesehatan jangka panjangnya.

Penegakan batas paparan ini memerlukan penggunaan sistem deteksi dan pemantauan gas yang handal, terutama di area berisiko tinggi seperti lokasi industri, laboratorium, dan lingkungan perkotaan yang padat penduduk. Sensor modern dan teknologi pemantauan kualitas udara kini menyediakan data *real-time*, memungkinkan respons cepat terhadap tingkat gas berbahaya. Dengan terus memantau konsentrasi polutan, industri dapat mematuhi peraturan lingkungan dan mengambil tindakan korektif sebelum paparan menjadi berbahaya.

1.2 Metode Deteksi Gas

Dalam menghadapi tantangan global terkait pencemaran udara, deteksi dini dan pemantauan berkelanjutan terhadap gas-gas polutan menjadi kebutuhan yang tidak dapat ditawar. Metode deteksi gas merupakan fondasi bagi sistem pemantauan kualitas udara, baik untuk keperluan lingkungan, industri, maupun kesehatan masyarakat. Berbagai metode telah dikembangkan sepanjang dekade terakhir, mulai dari pendekatan konvensional yang berbasis teknik laboratorium, hingga sensor cerdas yang dapat dipasang secara langsung di lapangan.

Metode konvensional seperti kromatografi gas (*Gas Chromatography*), spektroskopi inframerah (FTIR), dan spektroskopi UV-Vis memang telah terbukti memiliki akurasi yang sangat tinggi. Teknik-teknik ini mampu mendeteksi berbagai jenis gas secara simultan dengan sensitivitas yang sangat baik. Namun, di balik kecanggihannya, metode-metode ini juga memiliki

keterbatasan: peralatan yang digunakan berukuran besar, mahal, dan memerlukan keahlian khusus dalam pengoperasiannya. Lebih dari itu, metode ini umumnya tidak mampu memberikan hasil secara real-time di lapangan, sehingga kurang ideal untuk pemantauan dinamis dan berkelanjutan.

Sebagai respons terhadap keterbatasan tersebut, para peneliti mulai mengembangkan solusi yang lebih praktis dan ekonomis, yaitu penggunaan sensor berbasis material semikonduktor oksida logam (*Metal Oxide Semiconductor* / MOS). Sensor jenis ini bekerja berdasarkan prinsip perubahan resistansi listrik akibat interaksi antara gas polutan dan permukaan material semikonduktor. Gas-gas seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), dan senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compound* / VOC) dapat terdeteksi melalui perubahan nilai hambatan listrik yang terukur. Keunggulan utama dari sensor ini adalah kecepatan responsnya, konsumsi daya yang rendah, dan kemudahan untuk diproduksi dalam skala kecil—sehingga sangat ideal untuk aplikasi portabel.

Kemajuan dalam nanoteknologi juga telah memperkuat kinerja sensor MOS secara signifikan. Dengan memanfaatkan struktur nanomaterial seperti nanopartikel, nanorod, dan film tipis, luas permukaan aktif dari sensor dapat ditingkatkan, sehingga memperbesar kemungkinan interaksi dengan molekul gas. Ini berdampak langsung pada peningkatan sensitivitas dan selektivitas sensor.

1.3 Material Semikonduktor Oksida Logam

Material semikonduktor logam oksida (*Metal Oxide Semiconductor*/MOS) memiliki peran penting dalam dunia elektronik modern karena sifatnya yang serbaguna dan aplikasinya yang luas. Semikonduktor ini, yang memiliki rentang celah pita energi yang beragam serta ketersediaan yang tinggi, cocok untuk berbagai teknologi, termasuk fotovoltaiik, sensor gas, dan transistor lapisan tipis. Sebuah studi menunjukkan bahwa logam oksida murni tidak hanya melimpah dan murah, tetapi juga mudah disintesis, sehingga menjadikannya sebagai kandidat yang menjanjikan untuk perangkat fotovoltaiik (Zhu dkk., 2011). Fleksibilitas material ini melampaui aplikasi energi, sebagaimana dibuktikan oleh perannya sebagai lapisan transportasi elektron yang efektif dalam *quantum dot light-emitting diodes* (QD-LEDs), di

mana mobilitas elektronnya yang tinggi meningkatkan injeksi dan transportasi muatan, sehingga secara signifikan meningkatkan efisiensi luminansi (Park dkk., 2020). Selain itu, logam oksida menunjukkan kemampuan deteksi gas yang luar biasa karena reaktivitasnya yang tinggi dan keberadaan vakansi oksigen yang memfasilitasi adsorpsi permukaan secara signifikan, menjadikannya sangat cocok untuk mendeteksi berbagai jenis gas (Guan dkk., 2020).

Sejarah penemuan material semikonduktor oksida logam berawal dari pengamatan terhadap fenomena interaksi gas dengan permukaan padatan pada awal abad ke-20. Pada tahun 1938, P. Brauer dan rekan-rekannya menemukan bahwa adsorpsi uap air dapat memengaruhi konduktivitas listrik Cu_2O , menandai awal pemahaman bahwa permukaan oksida logam memiliki sensitivitas terhadap lingkungan. Penemuan penting lainnya terjadi pada tahun 1952, ketika Brattain dan Bardeen menunjukkan bahwa molekul gas yang teradsorpsi pada permukaan semikonduktor dapat mengubah sifat listriknya. Penelitian ini membuka jalan bagi pemanfaatan oksida logam sebagai bahan aktif dalam sensor gas. Kemudian pada tahun 1954, G. Heiland menemukan bahwa ZnO dapat merespons gas pereduksi seperti hidrogen. Tonggak penting lainnya terjadi pada tahun 1962, ketika T. Seiyama dan timnya merancang sensor gas resistif pertama menggunakan lapisan ZnO . Inovasi ini diikuti oleh komersialisasi besar-besaran oleh Naoyoshi Taguchi pada tahun 1970, yang memproduksi sensor gas berbasis SnO_2 (Chesler dan Harnoiu, 2023).

Struktur kristal dari bahan semikonduktor logam oksida merupakan aspek fundamental yang menentukan sifat elektronik dan aplikasinya. Banyak logam oksida, seperti seng oksida (ZnO), memiliki struktur wurtzit heksagonal yang dikenal dengan stabilitas termal dan kimianya yang tinggi, yang secara signifikan meningkatkan sifat piezoelektrik dan semikonduktornya (Wang dkk., 2004). Sebagai contoh, susunan atomik ZnO terdiri atas lapisan seng dan oksigen yang berselang-seling, menghasilkan geometri koordinasi unik yang memengaruhi konduktivitas dan perilaku optiknya (Wang dkk., 2004). Selain itu, material semacam ini dapat menampilkan berbagai fase kristal, termasuk struktur perovskit, rutil, dan spinel, yang masing-masing memberikan kontribusi berbeda terhadap kinerja elektronik dan adaptabilitas semikonduktor secara keseluruhan (Wang dkk., 2004).

Lebih lanjut, penambahan dopan atau variasi dalam teknik sintesis dapat menyebabkan perubahan signifikan pada fase kristal dan morfologi semikonduktor tersebut, yang pada akhirnya memengaruhi karakteristik listriknya. Seperti yang diamati dalam penelitian oleh Meng dkk., pengendalian kondisi pertumbuhan selama proses uap-cair-padat dapat menghasilkan berbagai fase kristal pada nanowire indium-tin oxide (ITO), yang menggambarkan pentingnya kondisi pemrosesan terhadap sifat material (Meng dkk., 2014). Selain itu, Li dkk. melaporkan bahwa penambahan unsur tanah jarang dapat meningkatkan struktur elektronik dan kemampuan deteksi gas dari material seperti molibdenum oksida yang didoping dengan selenium, sehingga memengaruhi fungsionalitasnya dalam aplikasi semikonduktor (Li dkk., 2017). Secara keseluruhan, pemahaman terhadap struktur kristal ini dan sifat-sifat yang dihasilkannya sangat penting untuk pengembangan teknologi semikonduktor logam oksida yang efisien dan inovatif.

Semikonduktor logam oksida dapat diklasifikasikan secara umum menjadi dua jenis utama, yaitu semikonduktor tipe-n dan tipe-p, yang masing-masing memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi elektronik dan optoelektronik. Semikonduktor tipe-n, seperti seng oksida (ZnO) dan timah oksida (SnO_2), memiliki konsentrasi tinggi elektron bebas yang meningkatkan konduktivitas listriknya. ZnO secara khusus dikenal karena sifat-sifatnya yang telah banyak diteliti, kemudahan dalam fabrikasi, dan aplikasinya yang luas, termasuk sebagai elektroda konduktif transparan dan fotodetektor (Shoute dkk., 2016). Material tipe-n sering digunakan sebagai sensor gas, di mana perubahan resistansi diamati akibat interaksi antara permukaan oksida dan molekul gas yang diserap (Li dkk., 2016). Efektivitas material tipe-n sebagian besar disebabkan oleh kemampuannya bereaksi dengan berbagai jenis gas, menyebabkan perubahan konsentrasi pembawa muatan yang sangat penting bagi kinerja sensor (Fine dkk., 2010).

Semikonduktor logam oksida tipe-n ditandai dengan kemampuannya menghantarkan listrik melalui pergerakan elektron, yang menjadi sangat penting saat menelaah struktur pita elektroniknya. Salah satu contoh umum semikonduktor tipe-n adalah seng oksida (ZnO), yang memiliki celah pita (*bandgap*) lebar sekitar 3,3 eV (Kim & Jang, 2016). Diagram pita energi dari logam oksida tipe-n umumnya menunjukkan posisi minimum pita konduksi (*Conduction Band Minimum/CBM*), yang terutama terdiri atas orbital-s logam,

yang terpisah dari posisi maksimum pita valensi (*Valence Band Maximum/VBM*) oleh celah pita tersebut (Wang dkk., 2016). Kepadatan elektron yang tinggi sering dicapai melalui mekanisme seperti penciptaan kekosongan oksigen, yang berperan sebagai tingkat donor di dalam celah pita, memfasilitasi konduksi elektron dan meningkatkan konduktivitas material secara keseluruhan (Wang dkk., 2016).

Mekanisme konduksi dalam semikonduktor tipe-n sangat bergantung pada delokalisasi elektron, terutama dalam keberadaan kation logam berat, yang dapat meningkatkan mobilitas elektron dengan mengurangi massa efektif pembawa muatan dalam pita konduksi (Koçer dkk., 2019). Sifat ini menjadikan logam oksida tipe-n sangat cocok untuk aplikasi pada perangkat elektronik seperti transistor film tipis (*thin-film transistors*), yang memanfaatkan mobilitas efek medan (*field-effect mobility*) yang optimal untuk meningkatkan kinerja (Lee dkk., 2018). Selain itu, material tipe-n seperti indium gallium zinc oxide (IGZO) dan timah oksida (SnO_2) telah mendapatkan perhatian dalam industri elektronik karena stabilitas dan efisiensinya yang sangat baik, yang berdampak besar pada teknologi seperti layar tampilan dan sel surya (Kim & Jang, 2016; Jang & Lee, 2019).

Sebaliknya, semikonduktor logam oksida tipe-p, seperti kuprus oksida (Cu_2O) dan nikel oksida (NiO), umumnya memiliki mobilitas pembawa muatan yang lebih rendah dibandingkan dengan semikonduktor tipe-n. Material ini memiliki *hole* intrinsik dalam struktur elektroniknya, memungkinkan pembentukan sambungan p-n secara efektif, yang penting untuk pembuatan berbagai komponen elektronik seperti dioda dan transistor (Liu dkk., 2016). Namun, pengembangan semikonduktor tipe-p dengan kinerja tinggi masih menjadi tantangan karena keterbatasan material yang mampu memberikan konduktivitas dan stabilitas yang memadai (Liu dkk., 2020). Kemajuan terbaru dalam rekayasa material dan kombinasi hibrida, seperti pembuatan lapisan tipe-p dalam kerangka logam-organik (MOFs), telah membuka peluang baru untuk meningkatkan sifat-sifat ini dan memperluas aplikasinya dalam sensor dan fotokatoda untuk konversi energi surya (Jang & Lee, 2019).

Selain klasifikasi tipe-n dan tipe-p, semikonduktor logam oksida juga dapat direkayasa menjadi struktur komposit atau *heterojunction* untuk meningkatkan sifat fungsionalnya. Sebagai contoh, pengembangan struktur

logam oksida ganda meningkatkan efisiensi transportasi muatan dalam perangkat seperti *quantum dot light-emitting diodes* (QD-LEDs) dengan menggabungkan berbagai jenis oksida pada lapisan transportasi elektronnya (Park dkk., 2020). Demikian pula, heterostruktur logam oksida memungkinkan interaksi unik antara dua material semikonduktor, yang dapat meningkatkan aktivitas fotokimia seperti fotokatalisis (Sakib dkk., 2021). Fleksibilitas material ini memungkinkan penggunaannya dalam berbagai aplikasi, mulai dari sensor lingkungan hingga sistem pemanen energi, sehingga studi mengenai jenis dan strukturnya menjadi sangat penting untuk kemajuan teknologi semikonduktor (Jiang dkk., 2012; Concina & Vomiero, 2014).

2 SENSOR GAS SEMIKONDUKTOR OKSIDA LOGAM

2.1 Prinsip Dasar Sensor Gas

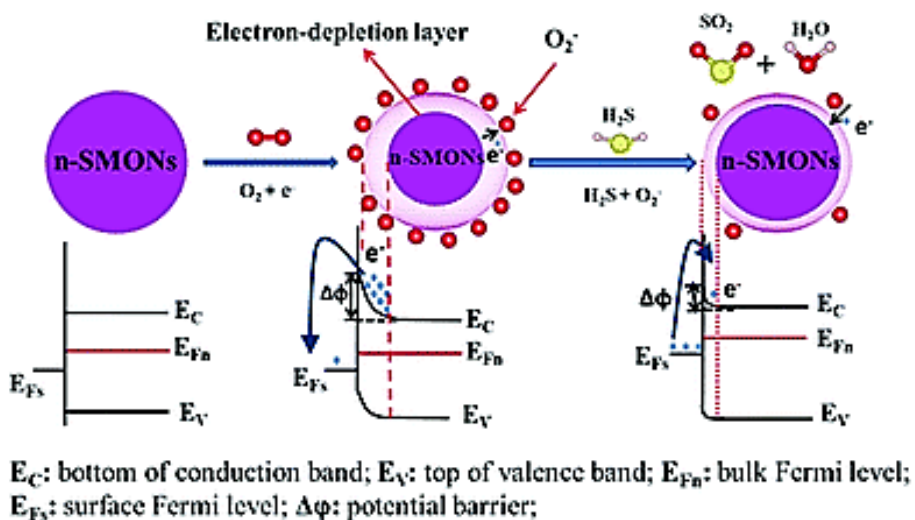
Mekanisme pendeteksian gas pada sensor resistif berbasis oksida semikonduktor sebagian besar didasarkan pada perubahan resistansi setelah sensor terpapar gas target atau gas oksigen. Perubahan resistansi sensor dipicu oleh interaksi kimia antara molekul gas target dan ion oksigen yang teradsorpsi pada permukaan material oksida semikonduktor.

Konduktivitas pada material oksida semikonduktor tipe-n didominasi oleh elektron pembawa muatan negatif. Ketika material oksida semikonduktor tipe-n berada di lingkungan udara, yang mengandung kurang lebih 20% molekul oksigen, molekul oksigen akan teradsorpsi di permukaannya. Molekul oksigen yang teradsorpsi ini akan menarik elektron dari pita konduksi ke permukaan material sensor, menghasilkan ion oksigen kimisorpsi bermuatan negatif, seperti O_2^- , O^- , dan O^{2-} , tergantung pada suhu operasional sensor. Akibatnya, densitas elektron di pita konduksi berkurang dan pada permukaan material sensor terbentuk lapisan deplesi elektron dan penghalang potensial. Sehingga konduktivitas material oksida semikonduktor menurun atau resistansi meningkat.

Suhu operasi sensor gas menentukan terbentuknya jenis ion oksigen kimisorpsi. Pada suhu operasi di bawah 100 °C, molekul oksigen, $O_{2(gas)}$ yang teradsorpsi di permukaan menangkap elektron membentuk ion $O_{2(ads)}^-$. Jika suhu operasi dinaikkan ke kisaran antara 100 °C dan 300 °C, ion $O_{2(ads)}^-$ akan menangkap elektron dan berubah menjadi ion $O_{(ads)}^-$. Pada suhu operasi yang lebih tinggi dari 300 °C, ion $O_{(ads)}^-$ ini dikonversi lebih lanjut menjadi ion $O_{(ads)}^{2-}$. Proses pembentukan ion oksigen pada permukaan material sensor ini dapat dirangkum dalam persamaan reaksi sebagai berikut:



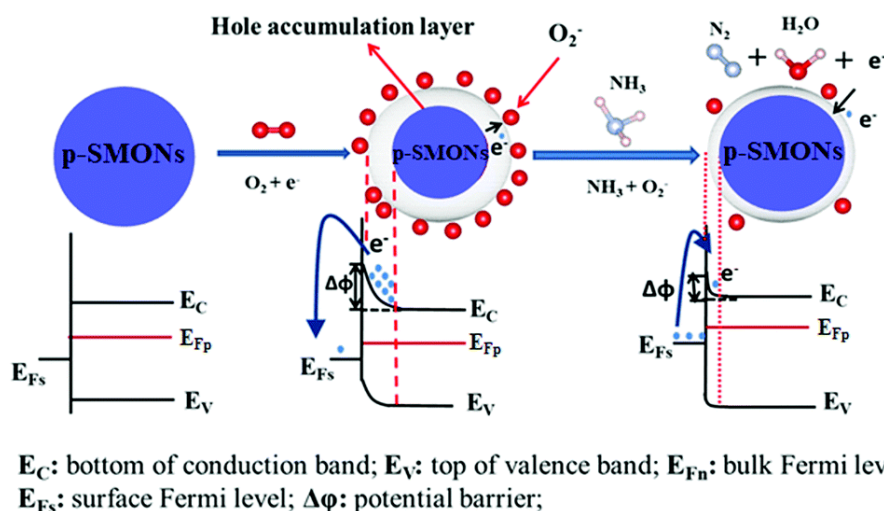
Ketika sensor terpapar molekul gas target yang teradsorpsi di permukaan material semikonduktor pada suhu operasi tertentu, gas target akan bereaksi dengan ion oksigen kimisorpsi tersebut. Jika gas target merupakan gas pereduksi, seperti CO, H₂S, SO₂, H₂, NH₃, CH₄, HCHO, atau C₂H₅OH, reaksi kimia yang terjadi akan melepaskan elektron, yang kemudian diinjeksikan kembali ke dalam lapisan deplesi elektron, seperti terlihat pada Gambar 2, diagram skematik mekanisme pendeteksian gas H₂S. Hal ini menyebabkan penyusutan lapisan deplesi elektron dan menurunkan energi penghalang potensial ($\Delta\phi$). Akibatnya, resistansi permukaan dari material sensor menurun. Pada Gambar 2 Li dan kawan-kawan menggunakan istilah *semiconducting metal oxide nanostructures* (SMON) untuk material semikonduktor oksida logam (Li dkk., 2019). Sebaliknya, jika gas target merupakan gas pengoksidasi, seperti NO, NO₂, N₂O, Cl₂, dan O₃, reaksi dengan ion oksigen kimisorpsi akan menangkap elektron, yang menyebabkan lapisan deplesi elektron melebar, sehingga meningkatkan energi penghalang potensial ($\Delta\phi$). Sehingga, resistansi permukaan material sensor akan meningkat.



Gambar 2 Diagram skematik mekanisme sensing semikonduktor oksida logam tipe-n terhadap gas pereduksi H₂S. Direproduksi dari Referensi Li dkk, 2019, dengan izin dari Royal Society of Chemistry.

Mekanisme pendeteksian pada material semikonduktor oksida logam tipe-p didasarkan pada perubahan resistansi permukaan material sensor akibat perubahan konsentrasi *hole*, sebagai pembawa muatan positif, yang disebabkan oleh reaksi redoks dengan gas target. Ketika sensor berada pada

lingkungan udara dan dioperasikan pada suhu rendah, ion O_2^- terbentuk dari molekul oksigen yang teradsorpsi di permukaan semikonduktor tipe-p dan menangkap elektron dari pita konduksi material sensor. Proses ini menyebabkan densitas hole meningkat, mengakibatkan penurunan energi Fermi permukaan. Pembentukan lapisan akumulasi hole di permukaan material sensor tipe-p menyebabkan peningkatan konduktivitas atau penurunan resistansi sensor. Hal ini berkebalikan dengan mekanisme pendeteksian pada sensor material semikonduktor oksida logam tipe-n (Li dkk., 2019).



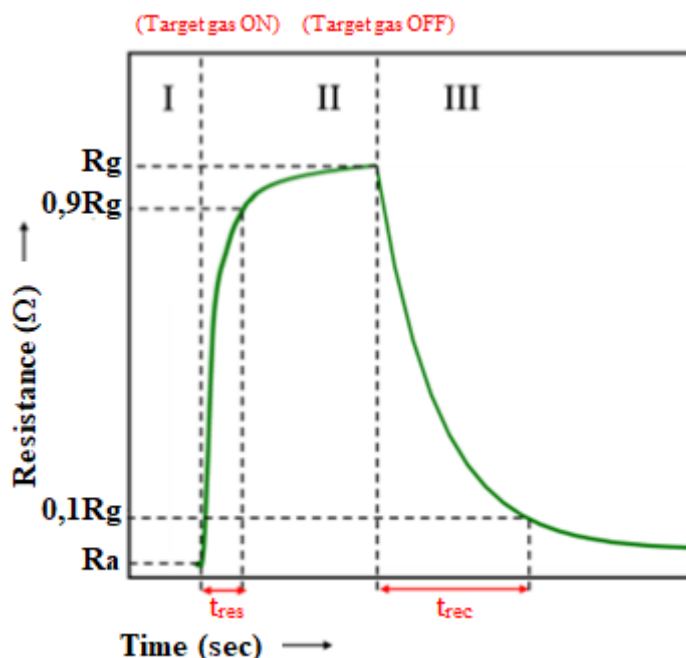
Gambar 3 Diagram skematik mekanisme sensing semikonduktor oksida logam tipe-p terhadap gas pereduksi NH_3 . Direproduksi dari Referensi Li dkk, 2019, dengan izin dari Royal Society of Chemistry.

Mekanisme pendeteksian material semikonduktor oksida logam tipe-p terhadap gas pereduksi seperti NH_3 , ditunjukkan secara skematik pada Gambar 3. Ketika molekul gas pereduksi teradsorpsi di permukaan material sensor, reaksi antara NH_3 dengan ion akan melepaskan elektron, yang kemudian bergabung dengan *hole* menghasilkan peningkatan energi Fermi dan pengurangan lapisan akumulasi *hole*. Akibatnya, konduktivitas lapisan material sensor menurun. Sebaliknya, untuk gas pengoksidasi, lebih banyak elektron bebas akan ditangkap dari permukaan material sensor tipe-p. Proses ini akan meningkatkan konsentrasi *hole*, menghasilkan peningkatan konduktivitas pada sensor berbasis material semikonduktor oksida logam tipe-p. Resistansi sensor berbasis material semikonduktor oksida logam tipe-

p akan meningkat jika terpapar gas pereduksi, menurun jika terpapar gas pengoksidasi (Li dkk., 2019).

2.2 Indikator Kinerja Sensor Gas

Ketika molekul gas target teradsorpsi pada permukaan semikonduktor oksida logam, resistansi listrik material sensor berubah proporsional dengan konsentrasi gas target. Jenis gas target (bersifat pereduksi atau pengoksidasi) dan tipe material sensor (tipe-n atau tipe-p) memengaruhi perubahan resistansi listrik. Perubahan resistansi sensor terhadap waktu ketika terpapar gas target dan tanpa hadirnya gas target diilustrasikan pada Gambar 3, untuk sensor MOS tipe-n dalam gas target bersifat oksidator.



Gambar 4 Diagram skematik yang menunjukkan waktu respons dan pulih dari resistansi sensor gas MOS tipe-n dalam gas target oksidator. Wilayah I ketika adsorpsi spesies oksigen, wilayah II ketika gas target dideteksi, dan wilayah III ketika aliran gas target dihentikan (Isaac dkk., 2022) Hak cipta 2022, Springer Nature.

Dari Gambar 4 dapat diturunkan indikator kinerja sensor gas, yaitu (i) sensitivitas/respons sensor, (ii) waktu respons dan waktu pulih, (iii) selektivitas sensor, dan (iv) stabilitas sensor.

- Sensitivitas/Respons Sensor

Sensitivitas sensor menentukan konsentrasi minimum gas target yang dapat terdeteksi oleh sensor. Sensitivitas menunjukkan seberapa peka sensor terhadap kuantitas gas yang diukur. Semakin tinggi sensitivitas, semakin kecil perubahan konsentrasi gas yang bisa dideteksi oleh sensor. Ini berarti sensor dengan sensitivitas tinggi akan lebih peka terhadap perubahan konsentrasi gas target dan dapat mendeteksi konsentrasi gas yang lebih rendah. Ada dua cara menentukan besarnya sensitivitas sensor, yaitu:

Sensitivitas sensor untuk gas pereduksi dapat dihitung dengan rumus berikut: $S = R_a / R_g$ atau $S = (R_g - R_a) / R_g$, di mana R_g adalah nilai resistansi sensor saat ada gas pereduksi, dan R_a adalah nilai resistansi sensor saat tidak ada gas pereduksi. Sensitivitas sensor untuk gas pengoksidasi adalah $S = R_g / R_a$ atau $S = (R_a - R_g) / R_a$, di mana R_a adalah resistansi sensor saat tidak ada gas pengoksidasi dan R_g adalah resistansi sensor saat ada gas pengoksidasi.

- Waktu Respons dan Waktu Pulih

Seperti terlihat pada Gambar 4 di atas, waktu respons didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh perubahan resistansi sejak sensor terpapar gas target hingga mencapai 90% dari keadaan stabil. Sedangkan waktu pulih adalah waktu yang diperlukan agar resistansi dari material sensor kembali ke nilai awalnya saat tidak ada gas target yang terdeteksi. Biasanya, waktu pulih didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai yang sekitar 10% lebih tinggi dari resistansi awal. Penggunaan batas 90% untuk waktu respons dan 10% untuk waktu pulih adalah untuk tujuan kepraktisan. Hal ini karena banyak sensor gas, terutama yang berbasis semikonduktor oksida logam (MOS), memiliki kinetika adsorpsi dan desorpsi yang lambat. Akibatnya, untuk mencapai nilai jenuh penuh atau kembali ke nilai dasar secara keseluruhan bisa memakan waktu yang sangat lama, bahkan beberapa jam.

- Selektivitas Sensor

Selektivitas adalah kemampuan sensor gas untuk mengenali gas target di antara berbagai jenis gas lainnya. Untuk sensor udara, selektivitas merupakan parameter yang sangat penting karena banyaknya spesies gas yang ada di udara ambien pada tingkat konsentrasi *ppb* (*parts per billion*) atau *ppt* (*parts per trillion*) dapat menyebabkan perubahan resistansi pada material MOS dengan cara yang mirip seperti gas target.

Secara umum, untuk spesies gas yang biasanya hadir dalam konsentrasi tinggi di atmosfer (misalnya di atas beberapa puluh hingga ratusan *ppm*, seperti CO₂ dan H₂O), pengembangan sensor gas yang selektif lebih mudah dilakukan, karena tidak banyak senyawa atmosfer lain yang terdapat dalam jumlah sebanyak itu.

- Stabilitas Sensor

Stabilitas sensor adalah kemampuan sensor untuk mempertahankan sifat-sifatnya dalam jangka waktu yang lama. Sensor gas stabilitas yang tinggi apabila memiliki keandalan operasi dan kekuatan sinyal yang stabil selama setidaknya 2–3 tahun tanpa terjadi pergeseran (*drift*) pada keluaran sensor.

Stabilitas juga merupakan karakteristik penting, terutama bagi sensor yang digunakan dalam aplikasi pemantauan jangka panjang. Aspek ini mengacu pada kemampuan sensor untuk mempertahankan performa dari waktu ke waktu melalui paparan berulang terhadap gas target tanpa mengalami penyimpangan atau penurunan sensitivitas yang signifikan (Minska dkk., 2024).

3. FUNGSIONALISASI MATERIAL SEMIKONDUKTOR LOGAM OKSIDA UNTUK SENSOR GAS

Pengembangan sensor gas berbasis semikonduktor oksida-logam (MOS) di Laboratorium Material Fungsional Maju, Teknik Fisika FTI telah dimulai sejak awal tahun 2000 (Nuruddin, 2007). Semikonduktor oksida-logam dipilih sebagai material sensor gas karena memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap berbagai jenis gas, khususnya gas polutan, stabilitas kimia dan termal yang baik, serta kemampuan untuk dimodifikasi struktur dan sifatnya. Di samping itu, semikonduktor oksida logam mudah diproduksi dengan biaya relatif rendah melalui metode sintesis yang sederhana.

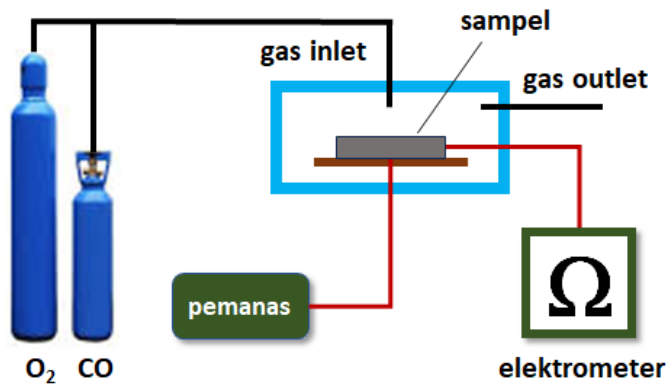
Beberapa material semikonduktor oksida-logam, seperti ZnO, SnO₂, TiO₂, dan WO₃ telah disintesis dalam bentuk bubuk, lapisan tebal, dan lapisan tipis menggunakan metode sol-gel, presipitat, refluks, *chemical bath deposition* (CBD), dan solvothermal. Elemen sensor dikembangkan dalam bentuk pellet atau lapisan tebal/tipis yang didepositkan pada substrat. Lapisan tebal material sensor didepositkan pada substrat alumina, dilengkapi elektroda material perak-paladium (Ag-Pd) berstruktur jari, dengan metode *doktor blade* atau *screen printing*. Lapisan tipis material sensor dibentuk menggunakan metode perkaitan mandiri (*self assembly*).

Karakterisasi struktur mikroskopi, morfologi, komposisi elemen kimiawi, gugus fungsi dan struktur molekul, melengkapi hasil pengukuran kinerja sensor berdasarkan perubahan resistansi listrik akibat paparan gas target. Berbagai metode sintesis material sensor dikembangkan, sistem karakterisasi kinerja elemen sensor disempurnakan untuk menjamin akurasi dalam pengukuran. Menggunakan fasilitas sintesis material dan ketersediaan peralatan karakterisasi yang lebih lengkap memungkinkan pengembangan sensor gas lebih baik. Beberapa sensor berbasis semikonduktor oksida-logam seperti ZnO dan WO₃, dan material fungsionalisasinya seperti ZnO-Al, ZnO-MWCNT, ZnO-rGO, WO₃-Grafena telah dikembangkan untuk mendeteksi gas-gas berbahaya seperti CO₂, CO, SO₂, dan senyawa organik mudah terbakar (*Volatile Organic Compound*, VOC) seperti etanol, diuraikan lebih detail pada subbab berikut.

3.1 Sensor CO Berbasis ZnO

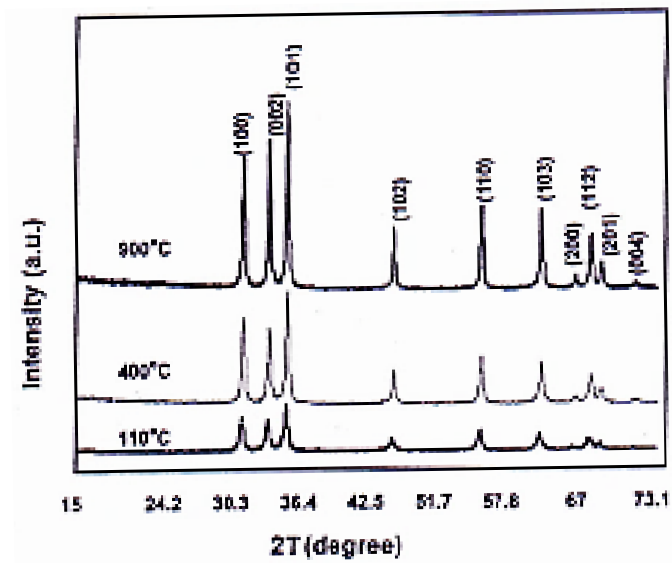
Pada awal tahun 2000, penelitian sensor gas berbasis semikonduktor logam-oksida dikembangkan secara masif menjadi perangkat yang dominan untuk alarm gas yang digunakan di tempat tinggal, komersial, dan industri. Salah satu material logam-oksida yang populer dikembangkan adalah *Zinc Oxide* (ZnO), mudah diperoleh di pasaran dengan harga yang relatif murah, tidak beracun, dan mudah diproses menjadi elemen sensor. ZnO juga mudah disintesis, diatur struktur kristal dan morfologinya, dan dipadukan dengan unsur lainnya. Berbagai macam perangkat sensor keramik, lapisan tebal, dan lapisan tipis telah dikembangkan secara empiris. Namun demikian, masih tersedia ruang cukup besar untuk perbaikan kinerja sensor karena kompleksitas sistem, material, dan kinetika reaksi sensor.

Berbagai bentuk dan komposisi elemen gas sensor berbasis ZnO juga telah dikembangkan di Laboratorium Material Fungsional Maju untuk mendeteksi gas CO. Elemen sensor berbentuk pelet difabrikasi dari bubuk ZnO komersial dan dari bubuk ZnO hasil sintesis menggunakan metode presipitasi dengan pelarut campuran methanol dan air-deionisasi. Presipitat warna putih terbentuk setelah penambahan larutan ammonia ke dalam larutan seng asetat. Bubuk hasil presipitasi dikalsinasi pada suhu 110 °C hingga 900 °C. Bubuk ZnO komersial dan bubuk presipitat ditekan secara uniaksial membentuk pelet diameter 10 mm dan tebal 2 mm sebagai sampel elemen sensor. Kawat emas dilekatkan pada permukaan pellet menggunakan pasta AgPd dan dihubungkan dengan multimeter digital untuk mengukur konduktansi elemen sensor. Sistem pengukuran konduktansi dan perubahannya ditunjukkan pada Gambar 5. Gas CO 1000 ppm digunakan untuk menguji daya deteksi elemen sensor pada suhu operasi 350 °C. Elemen sensor yang memberikan respons terbaik diuji pada suhu 200 hingga 500 °C. Perubahan konduktansi ketika tanpa paparan dan ketika terpapar gas CO dimonitor dengan elektrometer. Sensitivitas sensor didefinisikan sebagai rasio konduktansi sensor terpapar udara (G_o) dan konduktansi sensor terpapar gas CO (G), yaitu $S = G/G_o$.

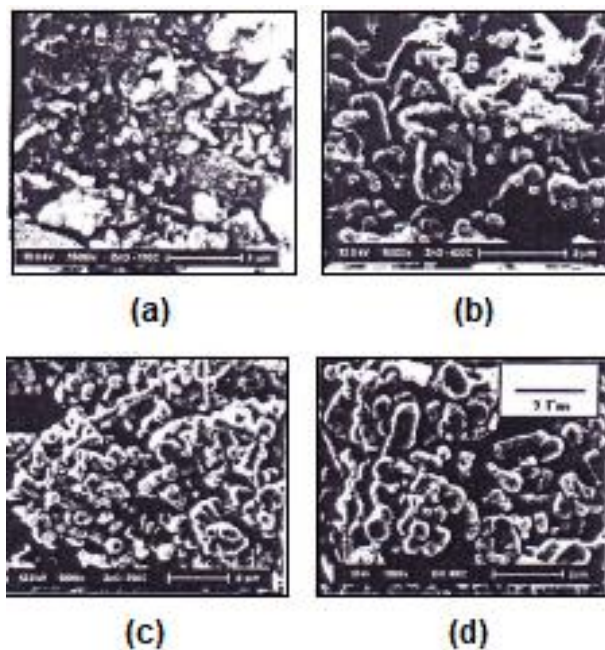


Gambar 5 Skema diagram sistem pengukuran sensor dilengkapi pengatur suhu sampel dan aliran gas.

Bubuk ZnO hasil proses presipitasi dikalsinasi pada suhu 110, 400 dan 900 °C, dan dikarakterisasi mikrostrukturnya dengan difraksi sinar-X (XRD) dan *scanning electron microscope* (SEM). Pola difraksi ketiga sampel menunjukkan fasa multikristalin, sesuai dengan nilai standar XRD JCPDS 36-1451 (Gambar 6). Puncak-puncak difraksi diindeks dan memiliki struktur heksagonal ZnO dengan nilai kisi $a = 3,207 \text{ \AA}$ dan $c = 5,140 \text{ \AA}$. Pola difraksi mengindikasikan terbentuknya fasa kristalin pada suhu yang relatif rendah, hanya beberapa derajat ketika kandungan air dalam sampel menguap. Kalsinasi lebih lanjut pada suhu 400 °C menghasilkan intensitas puncak bidang (002) tumbuh lebih cepat daripada puncak lainnya, yang menunjukkan pertumbuhan cenderung berorientasi kristal pada sumbu c .

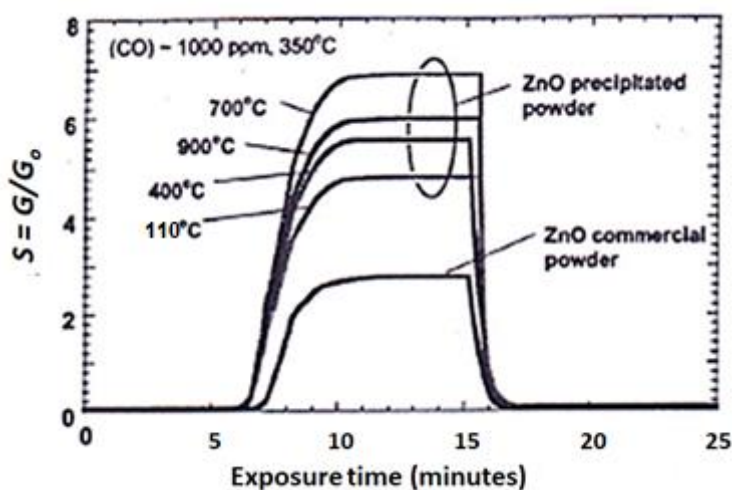


Gambar 6 Pola difraksi sinar-X bubuk ZnO hasil presipitasi dan dikalsinasi pada suhu 110 °C, 400 °C, dan 900 °C.



Gambar 7 Morfologi permukaan ZnO hasil presipitasi dan dikalsinasi pada suhu (a) 110 °C, (b) 400 °C, (c) 700 °C, dan (d) 900 °C.

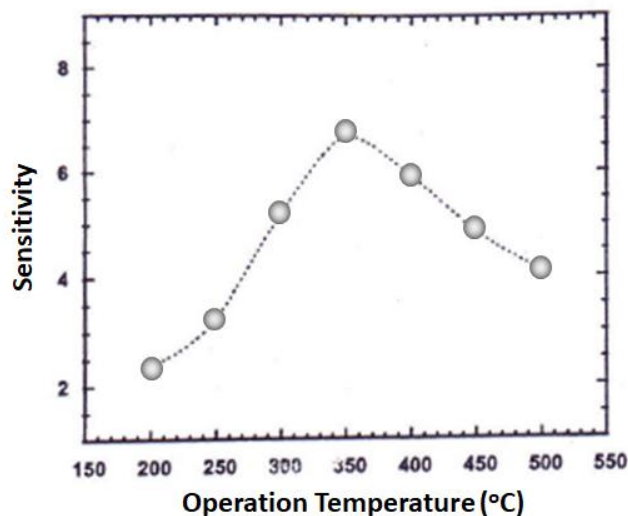
Bubuk ZnO yang dikalsinasi pada suhu berbeda memiliki morfologi permukaan yang berbeda (Gambar 7). Setelah kalsinasi pada suhu 110 °C (Gambar 7a), tampak adanya sisa-sisa bahan organik. Bahan organik ini terurai saat bubuk dikalsinasi pada suhu 400 °C. Ukuran partikel pada kondisi ini berada pada kisaran 100-300 nm (Gambar 7b). Molekul organik sepenuhnya menghilang setelah kalsinasi pada suhu 700 °C, dan partikel ZnO tumbuh secara unisotropik untuk membentuk partikel seperti batang (Gambar 7c dan 7d).



Gambar 8 Sensitivitas sensor ZnO komersial dan sensor ZnO hasil sintesis dikalsinasi pada temperatur 200 °C – 900 °C. Sensor dioperasikan dalam ruang pada tempertur 350 °C terhadap gas target CO 1000 ppm (Nuruddin dkk., 2007).

Respons elemen sensor terhadap gas CO 1000 ppm diukur pada suhu operasi 350 °C. Sensitivitas (S) sensor terhadap gas CO merupakan rasio konduktansi elemen sensor terpapar gas target terhadap konduktansi elemen sensor dalam lingkungan udara. Hasil pengukuran menunjukkan keunggulan material hasil sintesis sol-gel terhadap material komersial, seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Jelas terlihat bahwa sensor ZnO hasil sintesis lebih sensitif dibandingkan sensor yang dibentuk dari bubuk produk komersial. Sensitivitas tertinggi diperoleh untuk sensor ZnO hasil sintesis yang dikalsinasi pada suhu 700 °C. Fenomena ini terkait dengan efek struktural di mana konduktivitas sensor ditentukan oleh ketersediaan situs aktif permukaan yang menangkap oksigen. Ukuran butiran ZnO yang dikalsinasi pada temperatur 700 °C memiliki ukuran lebih kecil dibanding butiran ZnO komersial. Hal ini mengindikasikan ZnO hasil sintesis memiliki luas permukaan yang lebih

besar dan menyediakan situs aktif lebih banyak untuk adsorpsi gas oksigen dan mengambil elektron dari pita konduksi menuju permukaan. Molekul gas CO yang hadir pada permukaan ZnO bereaksi dengan ion oksigen menjadi gas CO₂ menyebabkan turunnya penghalang energi permukaan karena melepaskan kembali elektron ke pita konduksi dan konsekuensinya meningkatkan konduktansi sensor.



Gambar 9 Sensitivitas sensor ZnO, hasil sintesis yang dianil pada suhu 700 °C, terhadap gas CO konsentrasi 1000 ppm yang dioperasikan pada suhu 200 hingga 500 °C (Nuruddin dkk., 2007).

ZnO hasil sintesis yang dikalsinasi pada suhu 700 °C dipapar dengan gas CO konsentrasi 1000 ppm pada berbagai suhu operasi untuk menentukan suhu operasi optimum. Hubungan antara suhu operasi dengan sensitivitas sensor terhadap gas CO 1000 ppm ditunjukkan pada Gambar 9. Pada suhu operasi antara 100 - 300 °C ion oksigen stabil pada permukaan ZnO adalah O²⁻ dan O⁻. Reaksi yang relevan pada permukaan ZnO pada suhu ini adalah $2\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{e}^-$ dan $2\text{CO} + \text{O}^- \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{e}^-$. Tampak sensitivitas sensor tertinggi dicapai sensor dioperasikan pada suhu 350 °C. Pada suhu 350 °C, sebelum sensor terpapar gas CO, permukaan ZnO menyediakan situs aktif untuk bereaksi dengan molekul oksigen di udara. Molekul oksigen yang teradsorpsi pada permukaan ZnO menarik elektron dari pita konduksi untuk mendekomposisi dan mengionisasi molekul oksigen, $\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$ (Takata dkk., 1976). Akibatnya, pada material dekat permukaan ZnO terbentuk daerah deplesi yang meningkatkan resistansi ZnO. Ketika sensor terpapar gas CO, ion

oksigen pada permukaan ZnO bereaksi dengan molekul reduktor CO menjadi CO₂ sambil melepaskan elektron ke pita konduksi, berdampak pada penurunan resistansi ZnO. Reaksi permukaan yang relevan terjadi pada suhu ini adalah $2\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^-$, di mana energi termal cukup untuk melewati energi penghalang bagi CO bereaksi dengan O²⁻ untuk meningkatkan konduktansi sensor. Pada suhu di atas 350 °C sensitivitas menurun akibat berkurangnya konsentrasi ion oksigen teradsorpsi pada permukaan ZnO. Banyaknya situs aktif pada permukaan sensor terpapar gas reduksi dan banyaknya ion oksigen teradsorpsi menentukan sensitivitas sensor. Pada suhu operasi > 400 °C ion O²⁻ mulai terdesorpsi dari permukaan ZnO mengakibatkan penurunan konduktansi sensor (Ikohura dkk., 1994).

Hasil penting yang diperoleh dari penelitian ini adalah proses sintesis ZnO menggunakan metode presipitasi memiliki keleluasaan untuk mengatur ukuran dan struktur partikel yang turut menentukan luas permukaan ZnO. Namun, sensor berbasis ZnO hanya sensitif terhadap gas CO konsentrasi gas tinggi pada suhu ≥ 300 °C.

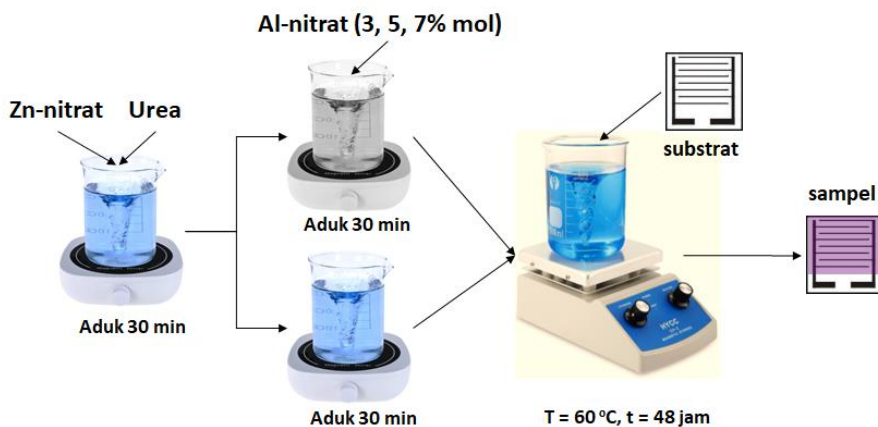
3.2 Sensor Etanol Berbasis ZnO Doping Aluminium

Peningkatan potensi kinerja sensor dalam deteksi uap etanol berasal dari tingginya luas permukaan struktur nano sebagai wahana interaksi antara gas yang ditargetkan untuk dideteksi dengan permukaan material sensor. Doping logam ke dalam logam oksida telah diketahui memengaruhi morfologi permukaan, penyerapan oksigen, suhu operasi, dan konsentrasi pembawa muatan pada permukaan material sensor. Karena pada realitasnya deteksi gas terjadi pada permukaan material sensor tempat gas diserap dan reaksi permukaan terjadi, idealnya sensor dikembangkan dalam bentuk lapisan tipis. Tersedianya metode deposisi lapisan tipis yang relatif sederhana dan mudah dioperasikan, seperti *Chemical Bath Deposition* (CBD), memungkinkan untuk mengembangkan sensor lapisan tipis berbasis ZnO untuk deteksi gas pereduksi termasuk uap etanol.

Doping Al dalam ZnO bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas listrik dan kinerja sensor. Ketika ion Al dimasukkan ke dalam kisi ZnO, ion tersebut menggantikan ion Zn²⁺ karena jari-jari ion Al³⁺ lebih kecil (0,053 nm) dibandingkan ion Zn²⁺ (0,074 nm), memfasilitasi pembentukan elektron bebas

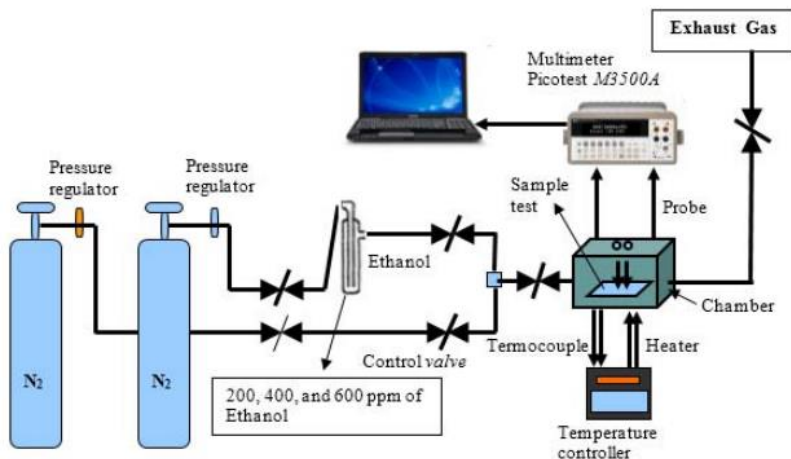
dan meningkatkan kerapatan pembawa muatan dalam semikonduktor (Huang dkk., 2009).

Pada penelitian ini dilakukan pengembangan sensor berbasis ZnO untuk mendeteksi uap etanol (C_2H_5OH). Lapisan tipis ZnO dan ZnO di doping aluminium (AZO) didepositkan pada substrat alumina yang dilengkapi elektroda material perak-paladium (Ag-Pd) berstruktur jari menggunakan metode CBD. Detil proses deposisi lapisan tipis ZnO dan AZO digambarkan dalam diagram alir berikut (Gambar 10):

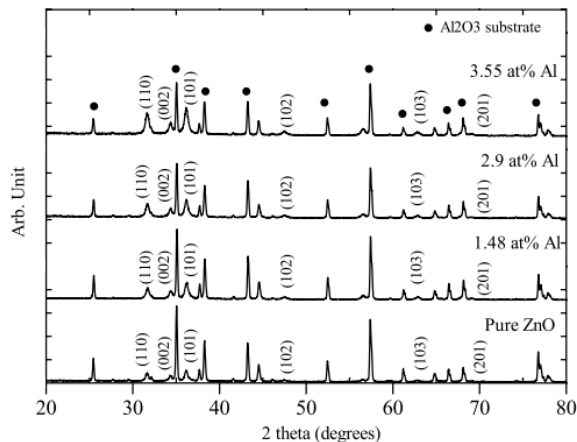


Gambar 10 Diagram alir proses deposisi ZnO dan AZO menggunakan metode *Chemical Bath Deposition*.

Prekursor ZnO konsentrasi 0,15 M dibuat dengan melarutkan bubuk seng nitrat tetrahidrat ke dalam pelarut terdiri atas campuran air terdeionisasi dan etanol. Untuk mempercepat proses larutan campuran diaduk menggunakan pengaduk magnetik dilengkapi pemanas selama 30 menit. Selanjutnya urea ditambahkan sedikit demi sedikit kedalam larutan seng nitrat sambil diaduk selama 30 menit. Bubuk aluminium nitrat nonahidrat dimasukkan ke dalam larutan nitrat dengan variasi komposisi 3% mol, 5% mol dan 7% mol. Substrat alumina dilapis elektroda jari direndam dalam larutan seng nitrat dan larutan aluminium-seng nitrat dengan posisi berdiri selama 48 jam pada suhu 60 °C untuk membuat lapisan tipis ZnO dan AZO. Hasil deposisi lapisan dikeringkan dalam oven pada suhu 60 °C selama 30 menit. Struktur mikro dan morfologi permukaan ZnO dan AZO diobservasi dengan XRD dan SEM. Sedangkan karakteristik ZnO dan AZO sebagai elemen sensor uap etanol dievaluasi menggunakan sistem pengukuran khusus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.

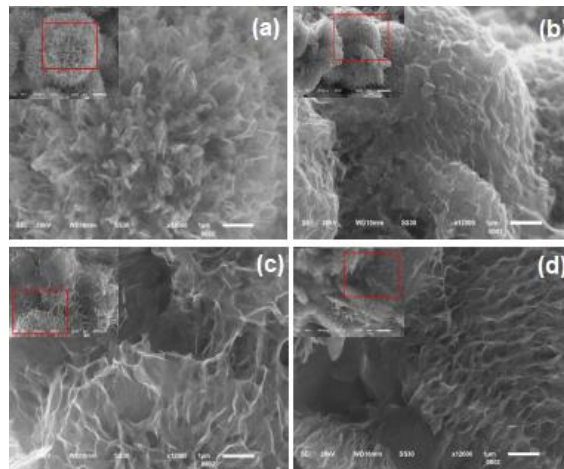


Gambar 11 Perangkat sistem pengukuran kinerja sensor etanol menggunakan elemen sensor ZnO doping Al (Yuliarto dkk., 2015) Hak cipta 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.



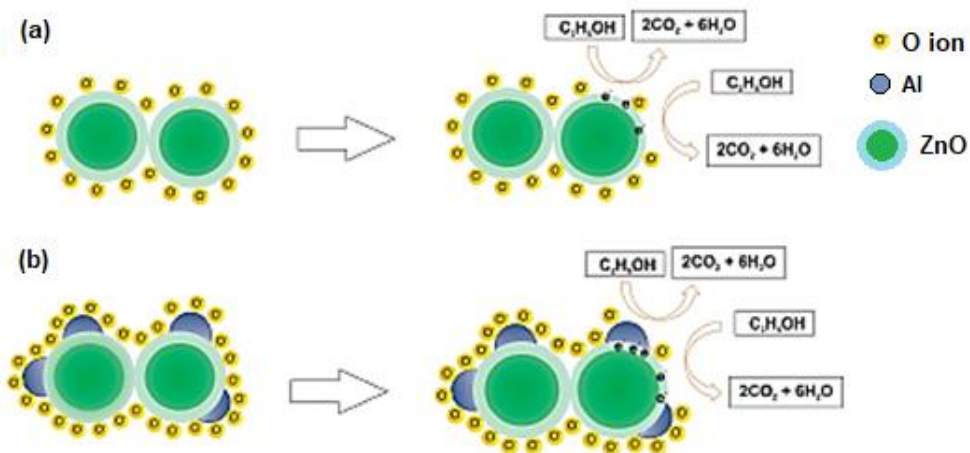
Gambar 12 Pola difraksi ZnO dan AZO dengan berbagai kandungan atom aluminium (Yuliarto dkk., 2015) Hak cipta 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Pola difraksi ZnO dan AZO mirip dan menunjukkan struktur polikristalin heksagonal wurtzite ZnO (Gambar 12). Pengaruh penambahan aluminium terhadap pola difraksi sulit dibedakan. Analisis komposisi elemen Al, Zn dan O dengan EDS menunjukkan adanya penurunan konsentrasi elemen terkandung dalam lapisan tipis AZO, berturut-turut sebesar 1,48 at%, 2,90 at% dan 3,55 at%.



Gambar 13 Morfologi permukaan lapisan tipis (a) ZnO dan ZnO didoping (b) 3% mol aluminium, (c) 5% mol aluminium, dan (d) 7% mol aluminium (Yuliarto dkk., 2015) Hak cipta 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Penambahan aluminium berpengaruh terhadap morfologi permukaan material. Gambar 13(a) menunjukkan struktur permukaan ZnO seperti bunga dan (b-d) morfologi permukaan AZO berbagai konsentrasi doping menyerupai lembaran berpori transparan yang saling terhubung. Banyaknya pori yang terbentuk memungkinkan oksigen menyebar dan terserap pada permukaan, sehingga penambahan aluminium sebagai dopan donor dalam ZnO menciptakan kekosongan oksigen yang berfungsi sebagai situs aktif tempat adsorpsi molekul etanol. Hal ini menyebabkan peningkatan sensitivitas ZnO terdoping aluminium terhadap etanol. AZO lebih responsif terhadap etanol daripada ZnO tanpa doping, terutama karena tebal lapisan deplesi dan tinggi penghalang potensial yang berkurang secara signifikan setelah terpapar uap etanol. Peningkatan sensitivitas berasal dari bertambahnya elektron bebas, yang berkorelasi langsung dengan peningkatan karakteristik deteksi gas. Mekanisme deteksi etanol pada permukaan ZnO dan AZO diilustrasikan pada Gambar 14.



Gambar 14 Ilustrasi mekanisme deteksi uap etanol pada permukaan (a) ZnO murni dan (b) ZnO didoping aluminium (Yuliarto dkk., 2015) Hak cipta 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

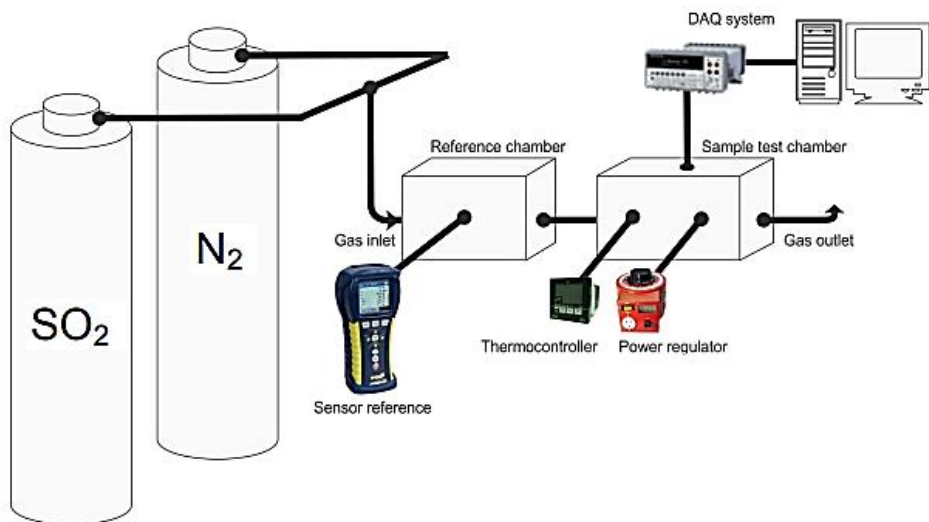
Penting dicatat bahwa banyaknya penambahan aluminium ke dalam lapisan tipis ZnO tidak menjamin pada peningkatan sensitivitas sensor. Nilai sensitivitas optimum hanya diperoleh jika ZnO didoping aluminium sebanyak 2,9% atom. Doping aluminium ke dalam ZnO lebih besar daripada 2,9% atom justru menurunkan sensitivitas sensor. Fenomena ini terjadi akibat akumulasi konsentrasi ion aluminium. Selama proses doping terjadi substitusi Al^{3+} menggantikan posisi Zn^{2+} . Jika konsentrasi doping melampaui nilai optimumnya cacat struktural terjadi dalam lapisan tipis, yang berdampak pada peningkatan resistansi dan penurunan mobilitas elektron. Penambahan doping aluminium tidak hanya meningkatkan sensitivitas sensor terhadap uap etanol, tetapi juga selektivitas yang tinggi terhadap uap etanol dibandingkan terhadap uap methanol. Meskipun demikian, suhu operasi sensor AZO untuk mencapai sensitivitas sensor optimum masih cukup tinggi (Yuliarto dkk., 2015).

3.3 Sensor SO_2 Berbasis Komposit MWCNT-ZnO

Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) termasuk jenis khusus material nano-karbon yang memiliki struktur tubular multilapis. Setiap MWCNT tersusun atas beberapa lembar grafena yang digulung dan ditempatkan secara koaksial pada sumbu yang sama, memberikan sifat mekanik, listrik, dan termal yang baik. Jumlah dinding mencerminkan kompleksitas strukturnya, semakin

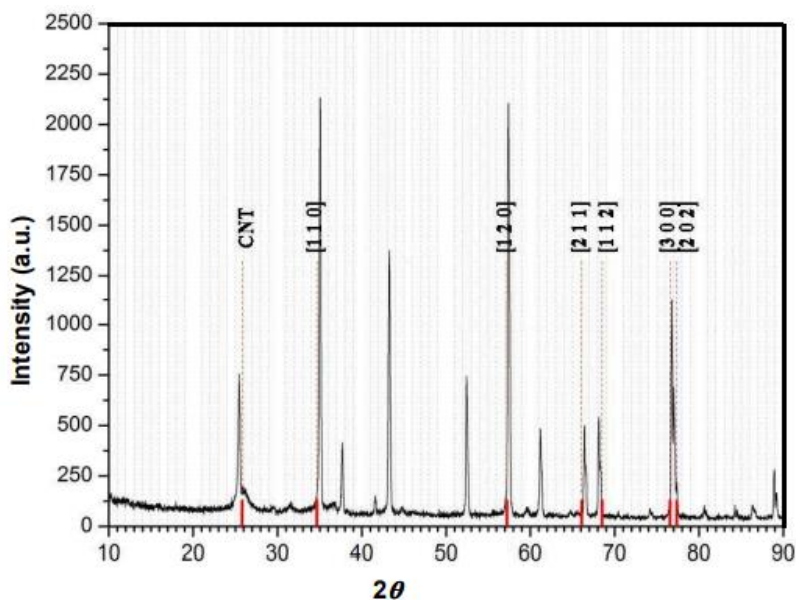
banyak jumlah dindingnya menunjukkan peningkatan besarnya ketahanan dan stabilitas. MWCNT memiliki sifat mekanik yang baik, dengan kekuatan tarik antara 11 hingga 63 GPa dan modulus elastisitas antara 0,27 hingga 0,95 TPa, yang cocok untuk aplikasi sebagai material komposit. Di samping itu MWCNT memiliki konduktivitas termal hingga 2000 W/m.K dan konduktivitas listrik yang tinggi, dengan rapat arus maksimum hingga 10^9 A/cm², cocok digunakan sebagai elemen sensor gas kemosensitif. Di sisi lain, lapisan ZnO sensitif terhadap paparan gas pada permukaannya. ZnO berstruktur nano juga memiliki rasio luas permukaan-volume spesifik yang tinggi sehingga banyak digunakan untuk aplikasi sensor gas. Namun banyak peneliti melaporkan bahwa ZnO berstruktur nano sebagai sensor gas semikonduktor memerlukan suhu yang relatif tinggi untuk beroperasi. Fungsionalisasi MWCNT untuk mengikat ZnO terstruktur nano akan mengubah sifat permukaan MWNT. Dengan demikian, potensi ZnO berstruktur nano pada MWCNT templat untuk aplikasi sensor gas perlu penyelidikan lebih lanjut. Dalam penelitian ini studi, SO₂ sebagai salah satu gas berbahaya di lingkungan digunakan sebagai gas target.

Sintesis ZnO-MWCNT diawali dengan proses pemurnian MWCNT dalam asam nitrat. Teknik perlakuan asam ini dapat membangkitkan gugus kimia seperti karboksil (-COOH), karbonil (-CO), dan hidroksil (-OH) pada permukaan MWCNT. Hasilnya dicampur dengan seng nitrat, polivinil alkohol, dan etilen glikol untuk diproses refluks pada suhu 197 °C selama 12 jam. Komposit ZnO-MWCNT terbentuk setelah disaring dan dikeringkan pada suhu 300 °C selama 1 jam. Pasta ZnO-MWCNT dideposit pada substrat alumina yang dilengkapi pasangan elektroda jari AgPd. Elemen sensor ZnO-MWCNT dikarakterisasi menggunakan XRD, SEM dan EDS. Kinerja sensor diukur menggunakan perangkat uji sensor, seperti terlihat dalam Gambar 15. Perangkat uji sensor ini dibangun sendiri, dilengkapi dengan sensor rujukan untuk mendeteksi konsentrasi gas target secara akurat yang dialirkan ke dalam ruang sampel. Perangkat uji juga dilengkapi sistem akuisisi data dinamika deteksi sampel sensor.

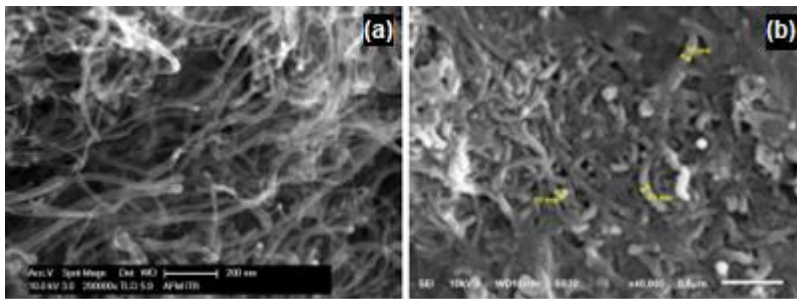


Gambar 15 Perangkat sistem pengukuran kinerja sensor SO_2 menggunakan elemen sensor ZnO-MWCNT (Iqbal dkk., 2014) Hak cipta 2014, Trans Tech Publications.

Pola difraksi komposit ZnO-MWCNT ditunjukkan pada Gambar 16. Terlihat jelas pola difraksi mengandung puncak difraksi MWCNT pada sudut $26,07^\circ$ dan puncak-puncak difraksi ZnO struktur heksagonal, bersesuaian dengan standar JCPDS No. 36-1451.

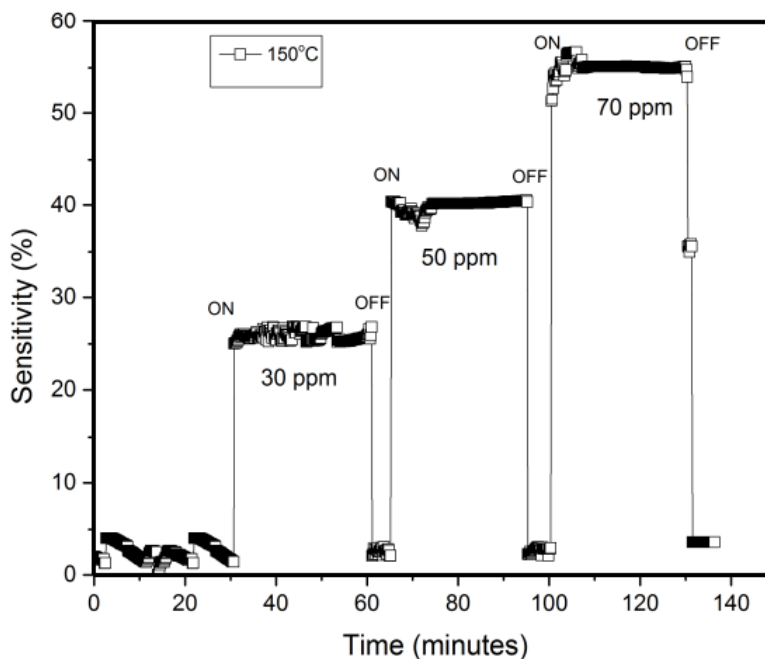


Gambar 16 Pola difraksi material komposit ZnO-MWCNT (Iqbal dkk., 2014) Hak cipta 2014, Trans Tech Publications, Ltd.



Gambar 17 Morfologi permukaan (a) MWCNT dan (b) komposit ZnO-MWCNT (Iqbal dkk., 2014) Hak cipta 2014, Trans Tech Publications, Ltd.

Morfologi permukaan MWCNT dan komposit ZnO-MWCNT ditunjukkan pada Gambar 17. Pada Gambar 8a terlihat dengan jelas bahwa morfologi MWCNT memiliki struktur tubular panjang dengan diameter ~ 25 nm. Struktur permukaan ZnO-MWCNT (Gambar 17b) membentuk seperti morfologi MWCNT berupa tubular yang saling terjalin dengan diameter rata-rata 50 nm. Diameter komposit ZnO-MWCNT lebih besar dibanding diameter MWCNT, mengindikasikan ZnO melapisi MWCNT.



Gambar 18 Respons dinamik komposit ZnO-MWCNT terhadap paparan gas SO_2 30, 50, dan 70 ppm dioperasikan pada suhu 150°C (Iqbal dkk., 2014) Hak cipta 2014, Trans Tech Publications, Ltd.

Uji paparan gas SO_2 pada komposit ZnO-MWCNT dilakukan pada suhu operasi 150 °C, lebih rendah dari suhu operasi ZnO (Gambar 18). Sensitivitas sensor meningkat seiring dengan peningkatan konsentrasi gas SO_2 .

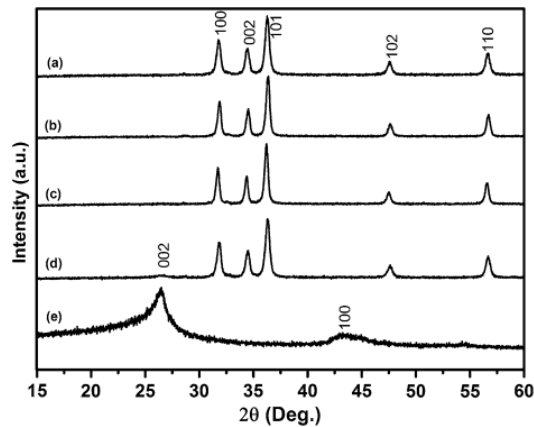
Campuran MWCNT dan ZnO berstruktur nano sebagai lapisan yang peka terhadap gas target memberikan beberapa keuntungan. Pertama, penambahan MWCNT memperluas permukaan spesifik ZnO sehingga lebih banyak molekul gas target yang dapat diserap dan bereaksi dengan permukaan ZnO. Kedua, struktur tubular MWCNT memfasilitasi transfer oksigen dan molekul gas target dari dan ke daerah terjadinya reaksi. Ketiga, lapisan komposit ZnO-MWCNT memiliki resistansi lebih rendah daripada ZnO murni, sehingga terdapat lebih banyak elektron bebas dalam matriks ZnO dan sensitivitas lapisan ZnO-MWCNT meningkat. Komposit ZnO-MWCNT memiliki waktu respons (τ_r) 9 detik dan waktu pulih (τ_p) 10,2 detik jika sensor dioperasikan pada suhu 150 °C. Besarnya waktu pulih terkait dengan waktu yang diperlukan untuk mengikat kembali permukaan lapisan ZnO-MWCNT dengan molekul gas oksigen di udara sekitar (Iqbal dkk., 2014).

3.4 Sensor CO Berbasis Komposit rGO-ZnO

Oksida Grafena Tereduksi (rGO) merupakan bentuk oksida grafena (GO) yang telah mengalami proses reduksi untuk menghilangkan sebagian besar gugus oksigen dan mengembalikan sifat listrik serta strukturalnya agar lebih mendekati grafena murni. Oksida grafena tereduksi (rGO) memiliki beberapa keunggulan dibandingkan grafena biasa dan oksida grafena (GO) untuk sensor gas, antara lain efisiensi sinyal transduksi, kemampuan adsorpsi gas yang tinggi, selektif terhadap gas tertentu, dan waktu respons dan pulih yang cepat. Hal ini menjadikan rGO sebagai material yang sangat cocok untuk sensor gas karena tingginya konduktivitas listrik, yang sangat penting untuk mendeteksi perubahan kecil akibat interaksi dengan gas target.

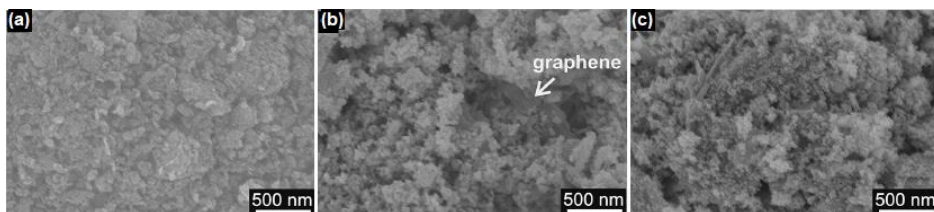
Berdasarkan penelitian sebelumnya terbukti bahwa pemaduan rGO semikonduktor logam-oksida meningkatkan sensitivitas sensor pada suhu relatif rendah (Liu dkk., 2014). Pada penelitian ini komposit rGO-ZnO disintesis menggunakan metode refluks dari bahan rGO komersial dan seng nitrat tetrahidrat dalam pelarut etilen glikol. Prekursor dibuat variasi konsentrasi rGO yang ditambahkan dalam ZnO, dengan perbandingan mol antara rGO dan ZnO (GZ) 1:0, 3:1, 1:1, 1:3, dan 0:1. Proses refluks dilakukan

pada suhu 190 °C selama 12 jam. Hasil refluks disaring dan dicuci dengan etanol dan aquabides, dan dikalsinasi pada suhu 450 °C selama 2 jam.



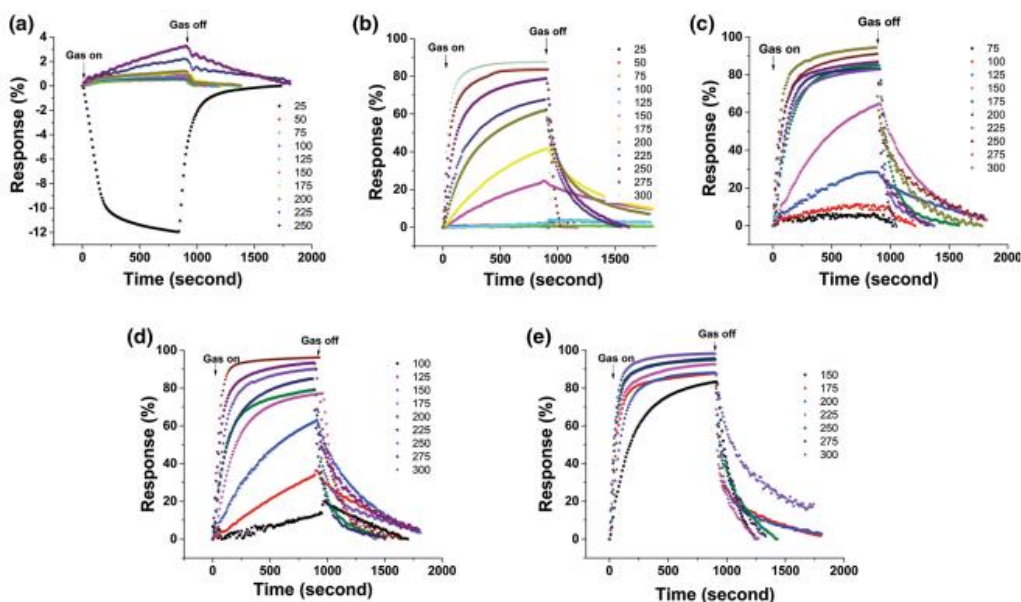
Gambar 19 Pola difraksi material komposit rGO-ZnO (GZ) dengan perbandingan (a) 0:1, (b) 1:3, (c) 1:1, (d) 3:1, dan (e) 1:0 (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.

Uji difraksi sinar-X terhadap bubuk hasil refluks dan kalsinasi menunjukkan penambahan rGO ke dalam ZnO tidak mengubah pola difraksi ZnO (Gambar 19a-d), namun difraksi rGO jelas terpisah dari difraksi ZnO di mana puncak lebar terlihat di sudut 26,5°. Penambahan rGO terlihat pengaruhnya terhadap perubahan luas permukaan spesifik sampel dari 53 m²/g untuk ZnO murni menjadi 94 m²/g untuk GZ (3:1) (Gambar 20). Observasi sampel komposit rGO-ZnO dengan SEM (GZ 1:1) menunjukkan terbentuknya partikel ZnO berukuran antara 50 nm hingga 137 nm menempel pada permukaan lembaran rGO, yang sulit teramati oleh SEM. Untuk sampel GZ 1:3 ukuran partikel ZnO yang menempel pada permukaan rGO lebih kecil daripada partikel ZnO pada GZ 1:1. Penambahan rGO lebih banyak ke dalam ZnO berkontribusi pada pengintian dan pertumbuhan rGO sendiri maupun ZnO. Refluks ZnO tanpa rGO menghasilkan partikel berbentuk bulat sedikit teraglomerasi.

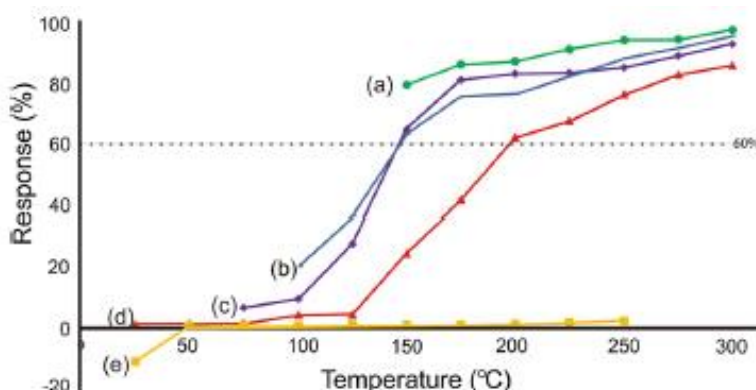


Gambar 20 Morfologi permukaan sampel (a) rGO, (b) rGO-ZnO (1:1), dan (c) ZnO (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.

Respons dinamik semua sampel sensor terbuat dari rGO murni, ZnO murni, dan komposit rGO-ZnO (GZ 1:3, GZ 1:1, GZ 3:1) yang terpapar 30 ppm gas CO, dioperasikan pada suhu dari 25 °C sampai 300 °C ditunjukkan pada Gambar 21. Semua sensor selain rGO (Gambar 21a) menunjukkan respons positif, yaitu menurunnya resistansi ketika dipapar gas target. Karena gas target adalah CO yang merupakan gas pereduksi, turunnya resistansi ini mengonfirmasi sensor adalah semikonduktor tipe-n. Sedangkan sensor rGO murni adalah semikonduktor tipe-p pada suhu kamar. Ketika berinteraksi dengan CO, resistansi rGO meningkat yang mengindikasikan rGO adalah semikonduktor tipe-p. Namun, ketika suhu dinaikkan, resistansi rGO menurun (Gambar 21a) yang menunjukkan perilaku semikonduktor tipe-n. Sehingga, pada suhu tinggi (> 50 °C) semua sensor, termasuk rGO dan komposit rGO-ZnO bekerja mengikuti perilaku ZnO.



Gambar 21 Respons dinamik sensor terhadap gas CO 30 ppm dari (a) ZnO, (b) GZ 1:3, (c) GZ 1:1, (d) GZ 3:1 dan (e) rGO sebagai fungsi waktu untuk suhu operasi 25 °C sampai 300 °C (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.

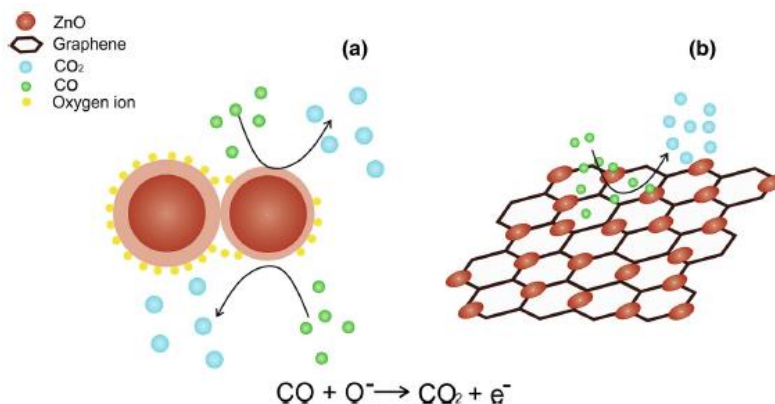


Gambar 22 Respons sensor terhadap gas CO 30 ppm dari (a) ZnO, (b) GZ 1:3, (c) GZ 1:1, (d) GZ 3:1 dan (e) rGO sebagai fungsi suhu operasi 25 °C sampai 300 °C (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.

Hasil pengujian respons sampel rGO-ZnO terhadap gas CO 30 ppm yang dilakukan pada suhu ruang hingga 300 °C ditunjukkan pada Gambar 22. Untuk semua sampel, respons sensor meningkat seiring dengan peningkatan suhu operasi. Suhu tinggi memberi gas target energi yang cukup untuk mengatasi energi aktivasi untuk reaksi permukaan, oleh karena itu semakin tinggi suhu, semakin tinggi responsnya. Lebih jauh, nanokomposit rGO-ZnO menunjukkan respons pada suhu rendah di bawah 150 °C, sementara ZnO murni hanya mulai menunjukkan respons pada suhu 150 °C. Terlihat bahwa suhu operasi minimum sensor nanokomposit rGO-ZnO dengan rasio 3:1, 1:1, dan 1:3 masing-masing adalah 25 °C (suhu ruangan), 75 °C, dan 100 °C, yang jelas lebih rendah daripada nilai 150 °C untuk ZnO murni. Hasil ini dengan jelas membuktikan bahwa penambahan grafena ke ZnO dapat menurunkan suhu operasi sensor ke daerah suhu rendah antara suhu kamar dan 125 °C. Selain itu, sensitivitas di atas 60% diamati pada suhu operasi 150 °C untuk nanokomposit rGO-ZnO dengan rasio 1:1 atau 1:3. Dalam kisaran 175 °C hingga 300 °C, respons komposit grafena-ZnO dengan rasio 1:1 dan 1:3 mengikuti pola untuk ZnO, tetapi menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah (Muchtar dkk., 2018).

Model mekanisme reaksi permukaan rGO-ZnO ditunjukkan pada Gambar 23. Pada suhu ruangan, rGO murni bertindak sebagai semikonduktor tipe-p, yang resistansinya akan meningkat saat berinteraksi dengan gas CO. Namun, pada suhu tinggi, resistansi rGO menurun saat berinteraksi dengan gas CO. Respons semikonduktor tipe-p rGO pada suhu ruangan ini sesuai dengan

beberapa laporan sebelumnya (Fowler dkk., 2009, Qazi dkk., 2007, Phan dkk., 2013), yang membuktikan bahwa grafena bertindak sebagai semikonduktor tipe-p pada suhu ruangan. Respons negatif rGO pada suhu ruangan dan respons positif pada suhu yang lebih tinggi menunjukkan perubahan tipe semikonduktor, dari tipe-p menjadi tipe-n, saat suhu dinaikkan. Biasanya, rGO bertindak sebagai semikonduktor tipe-p dengan *hole* sebagai pembawa muatan utama. Perubahan pada suhu tinggi ini menunjukkan perubahan pembawa muatan. Dalam kasus komposit, semua sampel menunjukkan perilaku tipe-n, dengan resistansi yang menurun saat terpapar gas CO. Fenomena ini menunjukkan bahwa sensor mengikuti perilaku ZnO, dengan grafena menghasilkan konduktivitas yang ditingkatkan dan penyerapan gas (Meng dkk., 2015). Dalam proses deteksi, mirip dengan ZnO murni, ionsorpsi oksigen pada permukaan ZnO berperan penting. Dalam lingkungan atmosfer, oksigen yang diserap permukaan ZnO terionisasi untuk membentuk O^- dengan mengambil elektron dari pita konduksi, dan menciptakan lapisan deplesi. Interaksi antara CO dan O^- akan membentuk CO_2 dan melepaskan elektron kembali ke pita konduksi, yang menyebabkan penurunan resistansi. Lebih jauh, keberadaan CO juga dapat mengubah potensial penghalang (Muchtar dkk., 2018).



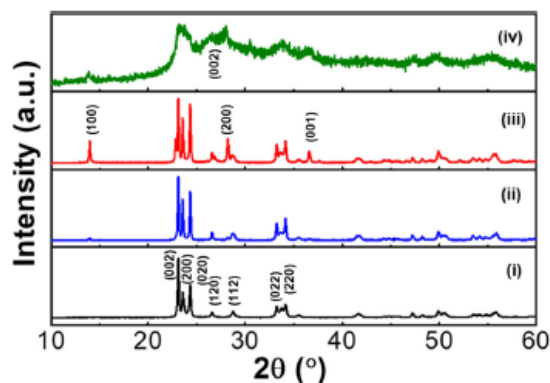
Gambar 23 (a) Skema mekanisme deteksi pada ZnO murni dan (b) pada sensor komposit rGO–ZnO (Muchtar dkk., 2018) Hak cipta 2018, Springer Nature.

3.5 Sensor CO Berbasis Komposit Grafena– WO_3

Diketahui bahwa grafena merupakan bentuk karbon yang terdiri atas satu lapisan atom karbon yang tersusun dalam struktur heksagonal seperti sarang lebah. Sebagai material dua dimensi seluruh atomnya berada di permukaan,

yang membuat grafena memiliki luas permukaan yang sangat besar ($2630 \text{ m}^2/\text{g}$), dapat berinteraksi langsung dengan molekul gas. Grafena juga memiliki konduktivitas listrik dan termal yang sangat tinggi, karena bentuknya yang sangat tipis, hanya satu lapisan atom, interaksi kecil dengan gas dapat menyebabkan perubahan besar sifat listriknya dan sensitif terhadap konsentrasi gas yang rendah. Sayangnya grafena kurang selektif terhadap berbagai gas yang menyebabkan kesalahan dalam deteksi gas tertentu, dan kurang stabil pada suhu tinggi dan lingkungan yang lembab. Alternatif solusi terhadap kelemahan ini dapat dikembangkan sensor berbasis grafena terfungsionalisasi dengan semikonduktor logam-oksida.

Tungsten oksida (WO_3) merupakan semikonduktor tipe-n dengan celah pita yang relatif sempit, yaitu $2,4 - 2,8 \text{ eV}$ pada suhu kamar dan memiliki banyak kemungkinan untuk diaplikasikan sebagai sensor gas NO_2 , SO_2 , dan H_2S (Dong dkk., 2020), namun laporan mengenai deteksi CO masih jarang ditemukan, sehingga selektivitasnya terhadap gas CO masih menjadi tantangan besar. Strategi lain untuk meningkatkan sensitivitas WO_3 terhadap CO adalah dengan menggabungkannya dengan karbon nanomaterial seperti grafena. Interaksi antara gugus kimia aktif pada permukaan grafena dan gas CO, serta transfer elektron langsungnya, menjadikan kombinasi keduanya sebagai pilihan yang baik untuk meningkatkan sensitivitas dan selektivitas WO_3 terhadap CO.



Gambar 24 Pola difraksi (i) WO_3 murni, (ii) WG21, (iii) WG11, dan (iv) WG12 (Estananto dkk., 2021) Hak cipta 2021, Taylor & Francis.

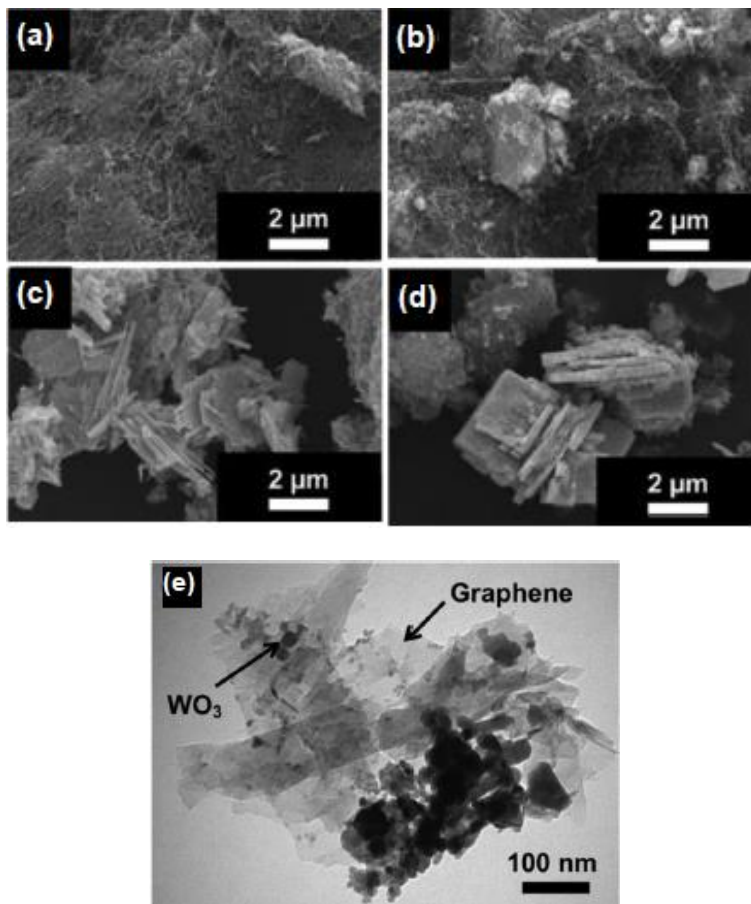
Pada penelitian ini komposit tungsten oksida (WO_3) dan grafena disintesis menggunakan metode solvotermal dengan perbandingan mol WO_3 : Grafena 0:1 (WG01), 1:0 (WG21), 2:1 (WG11), 1:1 (WG11), dan 1:2 (WG12) pada suhu 200

°C selama 15 jam. Bubuk yang dihasilkan dikeringkan pada suhu 60 °C selama 12 jam, dan dikalsinasi pada suhu 350 °C selama 3 jam. Pola difraksi secara jelas menunjukkan struktur kristal monoklinik, dan penambahan mol grafena hingga sebanding dengan mol WO₃ tidak mempengaruhi struktur kristal komposit, seperti terlihat pada Gambar 24. Kehadiran grafena dalam komposit tidak terlihat dalam pola difraksi. Ketika penambahan grafena ke dalam komposit mencapai dua kali lipat mol WO₃, pola difraksi didominasi oleh grafena.

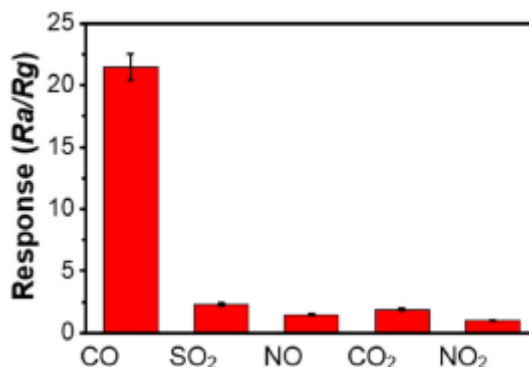
Morfologi WO₃ murni dan komposit WO₃-Grafena ditunjukkan pada Gambar 25. SEM WO₃ murni berbentuk kawat nano (*nano wire*) dengan diameter dalam kisaran 50-100 nm dan panjang beberapa mikrometer, seperti terlihat pada Gambar 25(a). Gambar 25(b, c) menunjukkan morfologi komposit WO₃-Grafena (WG21 dan WG11) yang memperlihatkan adanya campuran kawat nano WO₃ dan lembaran grafena. TEM WG11 memperlihatkan nano partikel WO₃ tersebar pada permukaan grafena. Penambahan grafena mengubah morfologi komposit seperti pelat dengan ketebalan sekitar 500 nm.

Uji dinamik respons sensor terhadap gas CO konsentrasi 10 ppm dilakukan pada tiga suhu yang berbeda, yaitu suhu ruang, suhu 150 °C dan 300 °C. Pada suhu tinggi (300 °C), respons WO₃ murni mencapai 19,5, dan meningkat nilainya menjadi 21,5 dengan penambahan grafena (WG21). Tingginya respons komposit WG21 disebabkan oleh peran grafena yang memiliki celah pita nol dan konduktivitas tinggi, menyediakan lebih banyak saluran konduksi dalam sistem oksida sehingga mengurangi resistansinya. Respons komposit WG11 sangat rendah, dan komposit WG12 tidak memberikan respons terhadap gas CO. Hal ini disebabkan grafena bersifat semi-metalik dan pada suhu tinggi grafena bertindak serupa dengan logam, dan tidak cocok untuk digunakan sebagai material sensor pada suhu tinggi (Yin dkk., 2014). Pada suhu operasi 150 °C WO₃ murni (WG10) menunjukkan respons tertinggi terhadap gas CO 10 ppm. Pada suhu ini, diduga bahwa penyerapan kimia molekul oksigen mulai terjadi. Namun, efek sinergis tampaknya tidak terjadi dan pada suhu ini, grafena dan WO₃ aktif sebagai material sensor. Sifat grafena tipe-p menyebabkan resistensinya terhadap interaksi dengan CO meningkat, berbeda dengan WO₃ yang memiliki sifat tipe-n. Fenomena ini dapat menyebabkan respons yang rendah dari semua komposit. Berlawanan

dengan apa yang terjadi pada suhu tinggi, grafena memiliki peran utama dalam deteksi CO pada suhu ruangan. Pada suhu ruang, WO_3 murni maupun komposit WO_3 -Grafena tidak merespons terhadap gas CO 10 ppm. Jelas bahwa graphene memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi. Bentuk dua dimensinya memungkinkan lebih banyak gas CO untuk diserap dan menyediakan lebih banyak jalur difusi gas untuk mengakses lebih banyak situs aktif. Keunggulan ini meningkatkan laju reaksi permukaan dan menghasilkan waktu respons dan waktu pulih yang lebih singkat dibandingkan dengan WO_3 murni. Pada suhu tinggi, waktu yang dibutuhkan WO_3 untuk mencapai 90% dari respons akhirnya adalah 960 detik. Dengan adanya graphene dalam komposit WG21, waktu respons berkurang 270 detik atau 13 menit lebih pendek daripada yang murni. Waktu pulih juga tercatat berkurang dari 265 menjadi 70 detik.



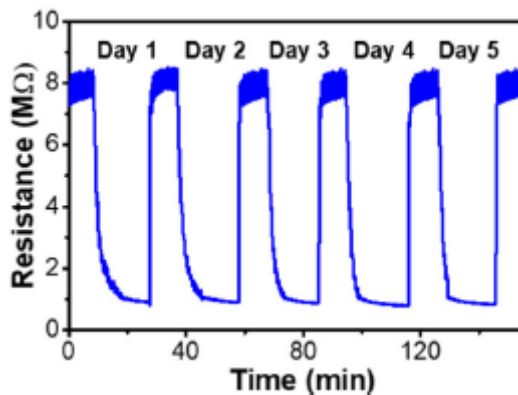
Gambar 25 Morfologi (a) WO_3 murni (WG10), (b) WG21, (c) WG11, (d) WG12, dan (e) TEM WG11 (Estananto dkk., 2021) Hak cipta 2021, Taylor & Francis.



Gambar 26 Selektivitas komposit WO₃-Grafena (WG21) terhadap gas CO, SO₂, NO, CO₂, dan NO₂ konsentrasi 10 ppm (Estananto dkk, 2021) Hak cipta 2021, Taylor & Francis.

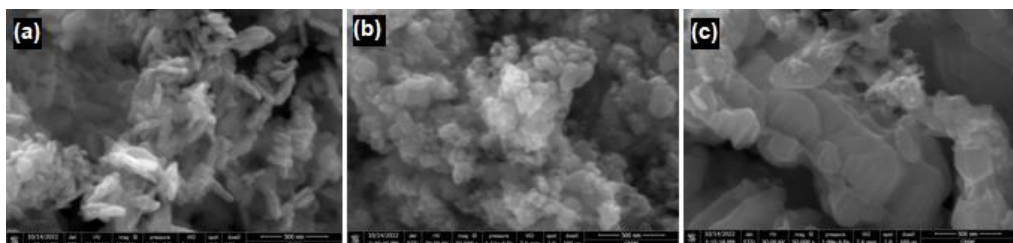
Selektivitas komposit WG21 ditunjukkan dengan memaparkan gas berbahaya lainnya, yaitu SO₂, NO, CO₂, dan NO₂ dengan konsentrasi 10 ppm pada suhu optimalnya. Seperti yang terlihat pada Gambar 26, sensor menunjukkan selektivitas yang baik terhadap gas CO dibandingkan dengan keempat gas lainnya. Seperti diketahui bahwa WO₃ telah dilaporkan memiliki sensitivitas dan selektivitas yang sangat tinggi terhadap NO₂ (Shendage dkk., 2017, You dkk., 2012, Teoh dkk., 2003). Namun, dengan adanya grafena, selektivitas oksida terhadap gas CO meningkat secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh adanya gugus fungsi oksigen pada permukaan grafena yang sangat reaktif terhadap gas CO (Ha dkk., 2018, Panda dkk., 2016). Interaksi yang kuat ini juga didukung oleh posisi orbital molekul yang terisi tertinggi (HOMO) dan orbital molekul yang tidak terisi terendah (LUMO) dari molekul CO yang memungkinkan terjadinya transfer elektron secara langsung. Untuk memeriksa kemampuannya dalam menghasilkan respons yang sama, respons komposit WG21 terhadap gas CO pada suhu 300 °C diukur setiap hari selama lima hari dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 27. Kelima kurva respons dinamis menunjukkan pola yang sama yang menunjukkan stabilitas sensor yang baik (Estananto, 2021).

Penggunaan katalis atau *capping agent*, 2-Methoxyethanol, dalam sintesis komposit WO₃-Grafena menciptakan struktur kristal dan respons sensor terhadap gas CO yang berbeda. Proses sintesis WO₃-Grafena menggunakan 20 ml 2-Propanol dan 20 ml 2-Methoxyethanol dengan penambahan variasi berat grafena x: 1 – 10 mg (20-20-x). Proses solvothermal dan fabrikasi sampel sensor dilakukan seperti sintesis komposit WO₃-Grafena tanpa katalis.



Gambar 27 Respons dinamis komposit WG21 terhadap gas CO selama 5 hari secara berturutan (Estananto dkk., 2021) Hak cipta 2021, Taylor & Francis.

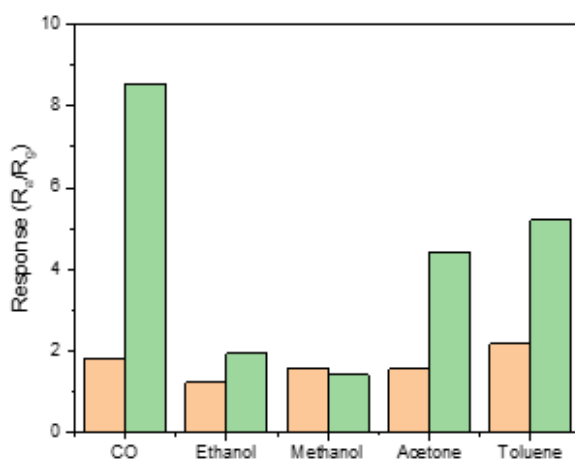
WO₃-Grafena yang dihasilkan menunjukkan struktur monoklinik sedikit bersifat sub-stoikiometrik, dengan ukuran kristalit terkecil 11,2 nm pada komposit 20-20-5. Morfologi komposit WO₃-Grafena setelah kalsinasi pada suhu 500 °C selama 2 jam ditunjukkan pada Gambar 16. Terlihat pada penambahan grafena 1 mg terbentuk komposit batang nano (Gambar 28(a)), penambahan grafena 5 mg terbentuk komposit partikel nano (Gambar 28(b)), dan penambahan grafena 10 mg terbentuk komposit lamella nano (Gambar 28(c)). Penambahan grafena juga menurunkan konsentrasi oksigen dalam komposit.



Gambar 28 Morfologi komposit WO₃-Grafena disintesis dengan penambahan (a) 1 mg grafena, (b) 5 mg grafena, (c) 10 mg grafena (Estananto, 2023).

Respons komposit WO₃-Grafena terhadap gas target CO 10 ppm diukur pada suhu operasi 200 °C. Respons WO₃ tanpa penambahan grafena (20-20-0) adalah 1,82. Penambahan grafena 1 mg (20-20-1) membentuk komposit WO₃-Grafena dengan respons 5,97 dan penambahan grafena 5 mg (20-20-5) respons sensor sebesar 8,54. Penambahan grafena lebih besar 10 mg (20-20-10) memberikan respons 1,5. Komposit WO₃-Grafena 20-20-5 memiliki luas

permukaan sebesar 11,52 m²/g yang paling optimum dibandingkan dengan luas permukaan komposit lainnya. Luas permukaan dan *volume pore* yang lebar ini sangat mendukung semakin banyaknya situs aktif di atas permukaan WO₃-Grafena yang berinteraksi dengan molekul CO. Besarnya nilai respons sensor terhadap gas CO ketika dipaparkan pada 10 ppm gas CO disebabkan oleh luasnya permukaan komposit dan rendahnya resistansi yang memfasilitasi pergerakan elektron dari permukaan ke pita konduksi dan sebaliknya. Komposit WO₃-Grafena 20-20-5 juga selektif terhadap beberapa gas senyawa organik volatil (VOC), seperti ditunjukkan pada Gambar 29. Penggunaan katalis atau *capping agent* berhasil meningkatkan respons sensor menurunkan suhu operasi komposit WO₃-Grafena untuk deteksi gas CO konsentrasi rendah.



Gambar 29 Selektivitas komposit WO₃-Grafena (20-20-5) terhadap gas CO, etanol, methanol, aseton, dan toluen 10 ppm pada suhu operasi 200°C (Estananto, 2023).

4 TANTANGAN DAN ARAH PENGEMBANGAN

Di era modern ini, kebutuhan akan sensor gas yang andal, sensitif, dan efisien semakin meningkat, terutama dalam konteks pemantauan kualitas udara, deteksi kebocoran gas, sistem keamanan, serta aplikasi kesehatan dan industri. Salah satu kandidat material yang menjanjikan dalam teknologi sensor gas adalah semikonduktor oksida logam atau *metal oxide semiconductors* (MOS), seperti ZnO, SnO₂, TiO₂, dan WO₃.

Material ini memiliki keunggulan dalam hal kestabilan kimia, kemudahan sintesis, serta kepekaan terhadap berbagai jenis gas. Namun, kemajuan teknologi sensor berbasis MOS masih dihadapkan pada sejumlah tantangan fundamental yang harus dijawab oleh komunitas ilmiah.

Lima tantangan utama adalah (i) **selektivitas yang rendah**. Sensor berbasis oksida logam sering kali memberikan respons terhadap berbagai jenis gas secara bersamaan, sehingga sulit mengidentifikasi gas target secara spesifik. Ini menjadi penghalang besar bagi aplikasi *real-time* dan multikomponen, (ii) **kebutuhan akan suhu operasi tinggi** menjadi kendala dalam efisiensi energi. Banyak sensor MOS memerlukan suhu di atas 200 °C untuk beroperasi optimal. Ini membatasi penggunaannya pada perangkat portabel atau hemat energi, (iii) **waktu respons dan waktu pulih yang lambat**, yang menyulitkan deteksi cepat pada kondisi dinamis, (iv) **stabilitas jangka panjang** di mana material dapat mengalami degradasi akibat interaksi terus-menerus dengan lingkungan, termasuk gas korosif, kelembaban tinggi, dan fluktuasi suhu. Hal ini menurunkan kinerja dan akurasi sensor.

Dua tantangan opsional, yaitu (i) **pengaruh kelembaban udara** sangat signifikan dalam mengganggu sinyal sensor, terutama dalam lingkungan terbuka atau tropis, (ii) tantangan dalam **miniaturisasi dan integrasi**. Perangkat sensor harus dapat diintegrasikan ke dalam sistem elektronik modern seperti IoT dan perangkat *wearable* tanpa mengorbankan performa.

Menghadapi tantangan tersebut, arah penelitian dan pengembangan sensor berbasis oksida logam harus diarahkan pada pendekatan-pendekatan inovatif, antara lain:

1. **Rekayasa nanostruktur** menjadi kunci. Pengembangan bentuk nano seperti *nanowire*, *nanotube*, dan *hollow sphere* mampu meningkatkan luas permukaan aktif dan efisiensi penyerapan gas.
2. **Modifikasi permukaan melalui doping dan sensitisasi**. Penambahan unsur logam mulia seperti Pt, Pd, atau integrasi dengan bahan 2D seperti grafena terbukti dapat meningkatkan selektivitas dan sensitivitas.
3. **Pengembangan heterostruktur dan junction** antarmaterial semikonduktor berbeda untuk membentuk antarmuka aktif yang responsif terhadap gas tertentu.
4. **Pendekatan suhu kamar** melalui aktivasi menggunakan sinar ultraviolet, medan listrik, atau bahkan pendekatan fotokatalitik untuk menurunkan suhu operasi sensor.
5. **Integrasi dengan kecerdasan buatan dan teknologi Internet of Things (IoT)**. Penggunaan *machine learning* dapat mengklasifikasikan pola sinyal dengan lebih akurat, bahkan dalam kondisi interferensi yang kompleks.
6. **Pendekatan green chemistry** dalam sintesis material, guna memastikan bahwa proses produksi sensor tidak hanya efisien tetapi juga ramah lingkungan.

5 PENUTUP

Pengembangan sensor gas polutan berbasis semikonduktor oksida logam telah menunjukkan kemajuan signifikan, terutama melalui pendekatan fungsionalisasi material. Dengan memodifikasi struktur dan komposisi permukaan semikonduktor seperti ZnO, SnO₂, dan WO₃, para peneliti berhasil meningkatkan sensitivitas, selektivitas, dan waktu respons sensor terhadap gas-gas polutan seperti CO, SO₂, dan NH₃, serta senyawa organik volatil (VOC). Teknik fungsionalisasi yang digunakan meliputi doping dengan logam transisi (misalnya Pt, Pd, atau Cu), pembentukan struktur nanomaterial (seperti *nanorod*, *nanowire*, atau *hollow spheres*), serta penggabungan dengan material konduktif lain seperti grafena atau karbon nanotube. Hasilnya, sensor mampu mendeteksi gas pada konsentrasi rendah (ppm hingga ppb) dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dan stabilitas jangka panjang yang lebih baik dibandingkan material oksida logam murni.

Pengembangan sensor gas polutan berbasis semikonduktor oksida logam juga telah dirintis di Laboratorium Material Fungsional Maju sejak tahun 2000. Dalam pengembangan material sensor, proses kimia basah (*wet chemical process*) dipilih dalam pembuatan material sensor gas, khususnya yang berbasis semikonduktor oksida logam, karena kesederhanaan proses dan biaya relatif murah, kemudahan dalam doping, fungsionalisasi, kontrol komposisi dan struktur, memungkinkan pembentukan struktur material nano. Berbagai metode sintesis material dikembangkan, sistem karakterisasi kinerja elemen sensor disempurnakan untuk menjamin akurasi dalam pengukuran. Berdirinya Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi (PPNN) pada tahun 2016 turut mempercepat dalam pengembangan sensor gas polutan. Menggunakan fasilitas sintesis material dan ketersediaan peralatan karakterisasi yang lebih lengkap memungkinkan pengembangan sensor gas lebih baik. Material sensor berbasis semikonduktor oksida-logam seperti ZnO dan WO₃, dan material fungsionalisasinya seperti ZnO-Al, ZnO-MWCNT, ZnO-rGO, WO₃-Grafena telah dikembangkan untuk mendeteksi gas-gas berbahaya seperti CO₂, CO, SO₂, dan senyawa organik mudah terbakar (*Volatile Organic Compound*, VOC) seperti etanol. Ke depan, peningkatan kinerja sensor dapat dicapai melalui inovasi dan perbaikan proses pembuatan material. Melalui strategi fungsionalisasi yang tepat, sensor-sensor ini dapat dimodifikasi untuk mendeteksi berbagai jenis gas berbahaya dengan akurasi

dan keandalan yang tinggi. Namun demikian, setiap kemajuan dalam pengembangan sensor selalu disertai munculnya tantangan dan persoalan baru. Hal ini membuka kesempatan dan ruang yang lebar bagi perbaikan kinerja sensor secara berkelanjutan.

Meskipun telah banyak keberhasilan dicapai, sejumlah tantangan teknis masih perlu diatasi. Salah satu tantangan utama adalah menyeimbangkan sensitivitas dan selektivitas, karena sensor cenderung merespons lebih dari satu jenis gas pada kondisi lingkungan yang kompleks. Selain itu, stabilitas operasional sensor dalam berbagai kondisi seperti fluktuasi suhu dan kelembaban udara masih menjadi masalah kritis. Proses fabrikasi sensor dengan struktur fungsional yang kompleks juga kerap sulit untuk diskalakan ke tingkat produksi massal secara konsisten. Untuk itu, studi lanjutan pada dinamika interaksi gas-material secara atomistik menggunakan simulasi komputasi dan karakterisasi permukaan yang lebih maju penting untuk dilakukan untuk memperkuat pemahaman dasar yang mendukung pengembangan sensor gas.

Dengan keberhasilan yang telah dicapai dan dukungan dari penelitian lanjutan yang lebih terarah, sensor gas berbasis semikonduktor oksida logam yang telah difungsionalisasi memiliki potensi besar untuk menjadi solusi yang andal dalam pemantauan polusi udara, sistem peringatan dini lingkungan, dan aplikasi industri yang membutuhkan deteksi gas berbahaya secara presisi.

6 UCAPAN TERIMA KASIH

Puji Syukur dipanjatkan kepada Allah Azza wa Jalla atas semua ni'mat, rahmat dan hidayah yang telah dikaruniakan kepada penulis, sehingga terselesaikan buku orasi ilmiah ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada Prof. Hermawan K. Dipojono yang telah meluangkan waktu mereviu dan memberikan saran berharga untuk perbaikan draf orasi ilmiah ini.

Terima kasih disampaikan kepada pimpinan dan seluruh anggota Forum Guru Besar, Senat Akademik, dan pimpinan Institut Teknologi Bandung atas kepercayaan dan dukungan yang diberikan untuk mengemban amanah sebagai guru besar.

Terima kasih disampaikan kepada para guru besar yang telah berkenan memberikan rekomendasi dalam pengusulan guru besar: Prof. Hermawan K. Dipojono, Prof. Brian Yulianto, Prof. Bambang S. Kartasasmita (alm.), Prof. Suprijanto, Prof. Kadarsah Suryadi, Prof. Veinardi Suendo, Prof. Sri Harjanto (Universitas Indonesia), Prof. Hyungjun Kim (Yonsei University, Korea Selatan).

Terima kasih dan apresiasi disampaikan kepada pimpinan dan seluruh jajaran Fakultas Teknologi Industri dan program studi Teknik Fisika atas dorongan dan bantuan menyiapkan usulan guru besar.

Terima kasih disampaikan kepada rekan sejawat anggota kelompok keahlian Teknologi Nano dan Kuantum (Prof. Hermawan K. Dipojono, Prof. Brian Yulianto, Dr. Ir. Nugraha, Dr. M. Kemal Agusta, Dr. Aditya G. Saputro, Dr. Damar R. Adhika, Dr. Fajar Fathurrahman, Dr. Muhammad H. Mahyuddin, Dr. M. Iqbal, Dr. Ganes Shukri), dan para mahasiswa di laboratorium Material Fungsional Maju atas semua dukungan, kerja sama, dan bantuan dalam melaksanakan tridarma.

Terima kasih juga disampaikan kepada para guru senior Teknik Fisika: Ir. Soelardjo Kertoatmodjo, M.Sc. Met. (alm), Prof. Dr. Ir. Arifin Wardiman (alm), Prof. Dr. Ir. Andrianto Handojo (alm), Dr. Ir. Ardhana Putra (alm), Prof. Hermawan K. Dipojono, MSEE., yang telah memberikan banyak nasehat selama mengikuti perkuliahan dan menjadi dosen di program studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

Terima kasih disampaikan kepada pembimbing tugas akhir program sarjana di Teknik Fisika ITB: Ir. Soelardjo Kertoatmodjo, M.Sc. Met. (alm), yang telah memperkenalkan ilmu dan dunia material. Terima kasih juga disampaikan kepada Prof. John R. Abelson, sebagai pembimbing akademik sekaligus pembimbing tesis dan disertasi pada program magister dan doktor di Department of Materials Science and Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, atas jasanya memperkenalkan ilmu dan dunia semikonduktor.

Terima kasih tidak lupa disampaikan kepada istri, Vera Ratnauli yang setia memberikan semangat dan selalu mendo'akan, anak-anak: Alifa Rasyida, Yodha Pramudita (mantu) dan Irsyad Aulia, serta cucu Ryuta F. Arsyandendra sebagai cahaya penyejuk mata keluarga, dan keluarga besar ayahanda Muljowijono (alm) dan mertua Syarkawie Hasan (alm) atas do'a yang dipanjatkan.

Semoga Allah Swt. membalas semua kebaikan dengan balasan yang berlipat ganda.

DAFTAR PUSTAKA

- Chesler, P.; Hornoiau, C. (2023). MOX-Based Resistive Gas Sensors with Different Types of Sensitive Materials (Powders, Pellets, Films), Used in Environmental Chemistry. *Chemosensors*, 11, 95.
<https://doi.org/10.3390/chemosensors11020095>
- Concina, I. and Vomiero, A. (2014). Metal oxide semiconductors for dye- and quantum-dot-sensitized solar cells. *Small*, 11(15), 1744-1774.
<https://doi.org/10.1002/sml.201402334>
- Dong, C., Zhao, R., Yao, L., Ran, Y., Zhang, X., Wang, Y. (2020): A review on WO₃ based gas sensors: Morphology control and enhanced sensing properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153194.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153194>.
- Estananto, Septiani, N. L. W., Iqbal, M., Suyatman, Nuruddin, A., & Yulianto, B. (2021). Nanocomposite of graphene and WO₃ nanowires for carbon monoxide sensors. *Nanocomposites*, 7(1), 225-236.
<https://doi.org/10.1080/20550324.2021.2008207>
- Estananto (2023): Sintesis dan karakterisasi nanokomposit logam oksida-grafena dengan metode solvothermal untuk deteksi karbon monoksida. Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Bandung, 63 – 72.
- Fine, G., Cavanagh, L., Afonja, A., & Binions, R. (2010). Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*, 10(6), 5469-5502. <https://doi.org/10.3390/s100605469>
- Fowler J.D., Allen M.J., Tung V.C., Yang Y., Kaner R.B., and Weiller B.H. (2009). Practical chemical sensors from chemically derived graphene, *ACS Nano* 3, 301-306. <https://doi.org/10.1021/nn800593m>
- Guan, W., Tang, N., He, K., Hu, X., Li, M., & Li, K. (2020). Gas-sensing performances of metal oxide nanostructures for detecting dissolved gases: a mini review. *Frontiers in Chemistry*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00076>
- Ha, N.H., Thinh, D.D., Huong, N.T. (2018). Fast response of carbon monoxide gas sensors using a highly porous network of ZnO

- nanoparticles decorated on 3D reduced graphene oxide. *Appl Surf Sci.* 434: 1048–1054. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.047>
- Huang, S., Xiao, Q., Zhou, H., Wang, D., Jiang, W. (2009). Hydrothermal synthesis and conductive properties of Al-doped ZnO rod-like whiskers, *Journal of Alloys and Compounds.* 486, 1–2, 3, L24-L26. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.07.033>
- Ikohura, K., Watson, J. (1994). The stannic oxide gas sensor: Principles and Applications. Boca Raton: CRC Press. Inc.
- Iqbal, M., Marintan, E., Septiani, N. L. W., Suyatman, S., Nuruddin, A., Nugraha, N., & Yuliarto, B. (2014). Synthesis and harmful gas sensing properties of zinc oxide modified multi-walled carbon nanotubes composites. *Advanced Materials Research*, 1044, 172-175.
- Isaac, N. A., Pikaar, I., & Biskos, G. (2022). Metal oxide semiconducting nanomaterials for air quality gas sensors: operating principles, performance, and synthesis techniques. *Microchimica Acta*, 189(5), 196. <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05254-0>
- Jang, Y. and Lee, J. (2019). Photoelectrochemical water splitting with p-type metal oxide semiconductor photocathodes. *Chemsuschem*, 12(9), 1835-1845. <https://doi.org/10.1002/cssc.201802596>
- Jiang, J., Li, Y., Liu, J., Huang, X., Yuan, C., & Lou, X. (2012). Recent advances in metal oxide-based electrode architecture design for electrochemical energy storage. *Advanced Materials*, 24(38), 5166-5180. <https://doi.org/10.1002/adma.201202146>
- Kim, H. and Jang, J. (2016). 48-2: invited paper: n- and p-type metal-oxides for quantum dot light emitting diodes. *Sid Symposium Digest of Technical Papers*, 47(1), 648-651. <https://doi.org/10.1002/sdtp.10760>
- Koçer, C., Griffith, K., Grey, C., & Morris, A. (2019). First-principles study of localized and delocalized electronic states in crystallographic shear phases of niobium oxide. *Physical Review B*, 99(7). <https://doi.org/10.1103/physrevb.99.075151>
- Lee, J., Yoon, K., Lim, K., Park, J., Lee, D., Cho, N., Kim, Y. (2018). Vertical transport control of electrical charge carriers in insulator/oxide semiconductor hetero-structure. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23990-3>

- Li, Y., Deng, D., Xing, X., Chen, N., Liu, X., Xiao, X., Wang, Y. (2016). A high-performance methanol gas sensor based on palladium-platinum-In₂O₃ composited nanocrystalline SnO₂. *Sensors and Actuators B Chemical*, 237, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.06.088>
- Li, Z., Wang, W., Zhao, Z., Liu, X., & Song, P. (2017). One-step hydrothermal preparation of Ce-doped MoO₃ nanobelts with enhanced gas sensing properties. *RSC Advances*, 7(45), 28366-28372. <https://doi.org/10.1039/c7ra02893h>
- Li, Z., Li, H., Wu, Z., Wang, M., Luo, J., Torun, H., Hu, P., Yang, C., Grundmann, M., Liu, X. and Fu, Y., (2019). Advances in designs and mechanisms of semiconducting metal oxide nanostructures for high-precision gas sensors operated at room temperature. *Materials Horizons*, 6(3), pp.470-506. <https://doi.org/10.1039/C8MH01365A>
- Liu, A., Zhu, H., & Noh, Y. (2020). Molecule charge transfer doping for p-channel solution-processed copper oxide transistors. *Advanced Functional Materials*, 30(24). <https://doi.org/10.1002/adfm.202002625>
- Liu, W., Zhang, H., Shi, J., Wang, Z., Song, C., Wang, X., Lu, S., Zhou, X., Gu, L., Louzguine-Luzgin, D., Chen, M., Yao, K., Chen, N. (2016). A room-temperature magnetic semiconductor from a ferromagnetic metallic glass. *Nature Communications*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms13497>
- Liu S., Yu B., Zhang H., Fei T., and Zhang T. (2014). Enhancing NO₂ gas sensing performances at room temperature based on reduced graphene oxide-ZnO nanoparticles hybrids, *Sensors Actuators B* 202, 272-278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2014.05.086>
- Meng, G., Yanagida, T., Yoshida, H., Nagashima, K., Kanai, M., Zhuge, F., He, Y., Klamchuen, A., Rahong, S., Fang, X., Takeda, S., Kawai, T. (2014). A flux induced crystal phase transition in the vapor-liquid-solid growth of indium-tin oxide nanowires. *Nanoscale*, 6(12), 7033. <https://doi.org/10.1039/c4nr01016g>
- Minska, N., Bas, O., Hvozď, V., Hryhorenko, O., Levterov, A., Murat, M., Matiushenko, M., Tarasov, S., Chernysh, R., Shevchenko, O. (2024). Design of ammonia sensor based on ZnO for analyzing hazards at critical infrastructure. *Eastern-European Journal of Enterprise*

Technologies, 1(5 (127)), 41-47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298512>

- Muchtar, A. R., Septiani, N. L. W., Iqbal, M., Nuruddin, A., & Yulianto, B. (2018). Preparation of graphene–zinc oxide nanostructure composite for carbon monoxide gas sensing. *Journal of Electronic Materials*, 47, 3647-3656. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6213-x>
- Nadargi, D.Y., Umar, A., Nadargi, J.D., Lokare, S.A., Akbar, S., Mulla, I.S., Suryavanshi, S.S., Bhandari, N.L., Chaskar, M.G. (2023). Gas sensors and factors influencing sensing mechanism with a special focus on MOS sensors. *J Mater Sci* **58**, 559–582. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-08072-0>
- Nulhakim, L., Nugraha, Nuruddin, A., Suyatman, & Yulianto, B. (2011). Al-doped ZnO Thin Films for Ethanol Sensors. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1415, No. 1, pp. 227-230). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.3667262>.
- Nuruddin, A. (2007). Development of ZnO Nano-Powder for Co Gas Sensor. *Prosiding Seminar Nasional Keramik VI*, 1-7.
- Panda, D., Nandi, A., Datta, S.K., Saha, H., Majumdar, M. (2016). Selective detection of carbon monoxide (CO) gas by reduced graphene oxide (rGO) at room temperature. *RSC Adv.* 2016;6(53):47337–47348. <https://doi.org/10.1039/C6RA06058G>
- Park, M., Roh, J., Lim, J., Lee, H., & Lee, D. (2020). Double metal oxide electron transport layers for colloidal quantum dot light-emitting diodes. *Nanomaterials*, 10(4), 726. <https://doi.org/10.3390/nano10040726>
- Pathi, S. R., Dalai, B., Dash, S. K., & Agarwal, P. (2023). Air Pollution in The Industrial Areas of Temple City, Bhubaneswar, And Various Measures for It. *International Journal of Membrane Science and Technology*, 10(1), 735-742. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i1.2635>
- Phan D.-T. and Chung G.-S. (2013). P–n junction characteristics of graphene oxide and reduced graphene oxide on n-type Si (111), *J. Phys. Chem. Solids* 74, 1509. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2013.02.007>
- Qazi M., Vogt T., and Koley G. (2007). Trace gas detection using nanostructured graphite layers, *Appl. Phys. Lett.* 91, 233101-1. <https://doi.org/10.1063/1.2820387>

- Sakib, S., Bakhshandeh, F., Saha, S., Soleymani, L., & Zhitomirsky, I. (2021). Surface functionalization of metal oxide semiconductors with catechol ligands for enhancing their photoactivity. *Solar RRL*, 5(10). <https://doi.org/10.1002/solr.202100512>
- Shendage SS, Patil VL, Vanalakar SA, S.P. Patil, N.S. Harale, J.L. Bhosale, J.H. Kim, P.S. Patil. (2017). Sensitive and selective NO₂ gas sensor based on WO₃ nanoplates. *Sens Actuators B Chem.* 240: 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.08.177>
- Shoute, G., Afshar, A., Muneshwar, T., Cadien, K., & Barlage, D. (2016). Sustained hole inversion layer in a wide-bandgap metal-oxide semiconductor with enhanced tunnel current. *Nature Communications*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms10632>
- Takata M., Tsubone D., Yanagida H. (1976). Dependence of electrical conductivity of ZnO on degree sintering, *J. Am. Ceram. Soc.* 59, 4-8. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1976.tb09374.x>
- Teoh LG, Hon YM, Shieh J, W.H. Lai, M.H. Hon. (2003). Sensitivity properties of a novel NO₂ gas sensor based on mesoporous WO₃ thin film. *Sens Actuators B Chem.* 96(1–2):219–225. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(03\)00528-8](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00528-8)
- Wang, Z., Nayak, P., Caraveo-Frescas, J., & Alshareef, H. (2016). Recent developments in p-type oxide semiconductor materials and devices. *Advanced Materials*, 28(20), 3831-3892. <https://doi.org/10.1002/adma.201503080>
- Wang, Z., Kong, X., Ding, Y., Gao, P., Hughes, W., Ren, Y., Zhang, Y. (2004). Semiconducting and piezoelectric oxide nanostructures induced by polar surfaces. *Advanced Functional Materials*, 14(10), 943-956. <https://doi.org/10.1002/adfm.200400180>
- Yin Y, Cheng Z, Wang L, Kuijuan Jin & Wenzhong Wang. (2014). Graphene, a material for high temperature devices-intrinsic carrier density, carrier drift velocity, and lattice energy. *Sci Rep.* 4:5758. <https://doi.org/10.1038/srep05758>
- You L, He X, Wang D, P. Sun, Y.F. Sun, X.S. Liang, Y. Du, G.Y. Lu. (2012). Ultrasensitive and low operating temperature NO₂ gas sensor using nanosheets assembled hierarchical WO₃ hollow microspheres. *Sens Actuators B Chem.* 173:426–432. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.07.029>

- Yulianto, B., Nulhakim, L., Ramadhani, M.F., Iqbal., Nugraha, dan Nuruddin, A., (2015). Improved Performances of Ethanol Sensor Fabricated on Al-Doped ZnO Nanosheet Thin Films, *IEEE Sens. J.*, 15(7), 4114–4120. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2410995>
- Zhu, L., Shao, G., & Luo, J. (2011). Numerical study of metal oxide heterojunction solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 26(8), 085026. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/8/085026>

CURRICULUM VITAE



Nama	: Ahmad Nuruddin
Tempat/tgl lahir	: Ponorogo, 3 April 1960
Kel. Keahlian	: Teknologi Nano dan Kuantum
Alamat Kantor	: Labtek VI, Gedung TP Rahmat Jln. Ganesha 10 Bandung 40132
Nama Istri	: Vera Ratnauli
Nama Anak	: 1. Alifa Rasyida Ahmad 2. Irsyad Aulia Ahmad

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Sarjana, Departemen Fisika Teknik, Institut Teknologi Bandung, 1984.
2. Master, Department of Metallurgical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1993.
3. Doktor, Department of Materials Science and Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997.

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Kepala Laboratorium Magnetik, Teknik Fisika, FTI-ITB, 1998- 2003.
2. Adm. Officer QUE Grant, Departemen Fisika Teknik, FTI-ITB, 1998-2003.
3. Koordinator Akademik Program Sarjana Teknik Fisika FTI-ITB, 1998-2008.
4. Ketua Program Studi Magister dan Doktor Teknik Fisika, Program Studi Magister Instrumentasi dan Kontrol, FTI-ITB, 2008-2010.
5. Kepala Lembaga Tahap Persiapan Bersama, ITB, 2010-2020.
6. Ketua Kelompok Keahlian Material Fungsional Maju, FTI-ITB, 2020-2024.
7. Ketua Kelompok Keahlian Teknologi Nano & Kuantum, FTI-ITB, 2024-sekarang.
8. Anggota Senat FTI-ITB, 2023-sekarang.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. Penata Muda – III/a : 01 Maret 1987
2. Penata Muda Tk. I – III/b : 01 Oktober 1999
3. Penata – III/c : 01 April 2001
4. Penata Tk. I – III/d : 01 April 2004
5. Pembina – IV/a : 01 April 2022
6. Pembina Tk. I – IV/b : 01 April 2024

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli Madya : 01 Juni 1987
2. Asisten Ahli : 01 Oktober 1998
3. Lektor : 01 Januari 2001
4. Lektor Kepala : 01 Juli 2021
5. Guru Besar : 01 September 2024

V. KEGIATAN PENELITIAN

1. Synthesis of barium ferrite nanoparticles by a modified sol-gel auto-combustion, Asahi Glass Foundation, 2007, Ketua
2. Microwave-induced combustion synthesis of barium ferrite nanoparticles, Asahi Glass Foundation, 2009, Ketua.
3. Studi pembuatan solar-grade-silicon dari sekam padi, RISET ITB, 2010, Ketua.
4. Preparasi *catalytic converter* berbasis karbon aktif yang diimpregnasi g-alumnina dan nikel sebagai katalis, Riset dan Inovasi KK ITB, 2013, Ketua.
5. Pengembangan sensor gas berbahaya berbasis material maju graphene dan carbon nanotubes, Penelitian Desentralisasi (PTUPT), 2015, Anggota.
6. Pembuatan permukaan superhidrofobik pipa stainless steel, DIPADikti Diknas, 2015, Ketua.
7. The development of dye sensitized solar cell using local unique natural dyes, Penelitian kompetitif Nasional (PKLN), 2016, Ketua.
8. Fabrikasi biosensor sel kanker murah berbasis nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) dari hasil sintesis pasir besi alam Indonesia, Penelitian kompetitif Nasional (PBK/Hikom), 2017, Anggota.

9. Development of advanced metal oxide as toxic gas sensor using surface plasmon resonance technique, Penelitian Kompetitif Nasional (PD), 2019, Anggota.
10. Sintesis dan karakterisasi barium ferit termodifikasi sebagai media penyimpan data dan sensor gas, Program Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (P3MI), Ketua.
11. Fabrikasi fleksibel dan wearable biosensor berbasis MOF struktur nano, Penelitian Kompetitif Nasional (PD), 2020, Anggota.
12. Development of advanced metal oxide as toxic gas sensor using surface plasmon resonance technique, Penelitian Kompetitif Nasional (PD), 2020, Anggota.
13. Studi teoritis mekanisme degradasi material oksida berlapis $\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$ sebagai material katoda baterai Li-Ion berkapasitas energi tinggi, Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT), 2020, Ketua.
14. Pemodelan berbasis komputasi ab-initio pada mekanisme elektrokatalitik Hydrazine (N_2H_4) di permukaan $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x$ untuk aplikasi di Direct Hydrazine Fuel Cell, Penelitian Penugasan (WCR), 2021, Anggota.
15. Pengembangan baterai sekunder Zinc-Air berbasis metal organic framework, Riset ITB, 2021, Ketua.
16. Fabrikasi Fleksibel dan Wearable Biosensor Berbasis MOF Struktur Nano, Penelitian Kompetitif Nasional (PD), 2022, Anggota.
17. Pengembangan Superkapasitor Densitas Energi Tinggi Berbasis Elektroda Ternary NiO/Graphene/PANI, Penelitian Kompetitif Nasional (PPS-PDD), 2022, Ketua.
18. Pengembangan Superkapasitor Densitas Energi Tinggi Berbasis Elektroda Ternary NiO/Graphene/PANI, Riset ITB, 2022, Ketua
19. Pengembangan material struktur nano MOF bimetalik berpori sebagai matrix biosensor elektrokimia penyakit colibasilosis pada hewan, Riset ITB, 2023, Anggota.
20. Optimalisasi building integrated photovoltaic, Penelitian dana-mandiri ITB, 2023, Anggota.
21. Synthesis material transisi metal kompleks struktur nano untuk deteksi antigen kanker payudara dengan metode self-templating, Riset ITB, 2023, Ketua.

22. Pengembangan karbon hirarki berpori yang diturunkan dari metal organic framework sebagai material pendukung biosensor penyakit demam berdarah, Penelitian Kompetitif Nasional (Penelitian Fundamental Reguler-PFR), 2023, Ketua.
23. Pengembangan Material Berbasis Phosphate untuk Aplikasi Superkapasitor, Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (P2MI), 2023, Anggota.
24. Pengaruh metode sintesis lapisan pelindung cerium oksida terhadap performa elektrokimia katoda baterai ion Litium $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC811) terlapis oleh lapisan pelindung cerium oksida, Kerjasama Penelitian - Program GEM Research 2024, ITB, Anggota.
25. Pengembangan Serat Bepersma Tinggi Berbasis Lignin/Selulosa untuk Aplikasi Smart Textile, Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (P2MI) adolit FS, 2024, Anggota.
26. Pengembangan Multi-Logam Fosfat Untuk Superkapasitor Berkinerja Tinggi, Riset Unggulan ITB, 2024, Ketua.
27. Pengembangan karbon hirarki berpori yang diturunkan dari metal organic framework sebagai material pendukung biosensor penyakit demam berdarah, Penelitian Kompetitif Nasional (Penelitian Fundamental Reguler-PFR), 2024, Ketua.
28. Pengembangan Material Piezoelektrik Berbasis Poliviniliden Fluorida (PVDF)/Nanocrystalline Cellulose (CNC) Rami untuk Aplikasi Pemanenan Energi, Riset Unggulan ITB 2025, Anggota.
29. Sintesis Karbon Aktif Berbahan Baku Biomassa dan Aplikasi Fungsionalnya Untuk Sistem Pendeteksian Polutan dan Pemurnian Air Minum (Tahun ke-2), Riset Kolaborasi Indonesia Skema C Tahun 2025, Anggota.

VI. PUBLIKASI

1. Scientika QC, Wella SA, Fathurrahman F, **Nuruddin A**, Anshori I, Sakti AW, Shukri G. On the Variation of Intercalation Voltage in Si-doped $(\text{Na}_{3+y}\text{V}_2(\text{PO}_4)_{3-y}(\text{SiO}_4)_y)$ Cathode Material: A First-Principles Study. In Journal of Physics: Conference Series 2025 Apr 1 (Vol. 2980, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2980/1/012019>

2. Lidiawati NA, Raihan MF, Hermawan A, Floweri O, Manurung RV, Iqbal M, **Nuruddin A**, Yuliarto B, Septiani NL. Effect of Nickel Incorporation on the Physicochemical Properties and Performance of MOF HKUST-1-Based Immunosensor for DENV3 NS1 Detection. *Sensors International*. 2025 Mar 13:100331.
<https://doi.org/10.1016/j.sintl.2025.100331>
3. Helmi F, Hakim ML, **Nuruddin A**, Amalia N, Wella SA, AlMohamadi H, Saputro AG. DFT study of oxygen reduction reaction activity and stability on Mn-Ni dual-atom electrocatalysts anchored at graphene edges. *Applied Surface Science*. 2025 Jan 23:162495.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.162495>.
4. Raihan MF, Septiani NL, Gumilar G, Manurung RV, Jenie SN, **Nuruddin A**, Yuliarto B. Developing point-of-care diagnosis using electrochemical biosensor: Mosquito-borne disease. *Sensors and Actuators Reports*. 2025 Jun 1; 9: 100261.
<https://doi.org/10.1016/j.snr.2024.100261>
5. Idayanti, N., Sugandi, G., Kristiantoro, T., Sudrajat, N., Mulyadi, D., **Nuruddin, A.**, Manaf*, A. Understanding magnetic interactions in SrFe₁₂O₁₉/CoFe₂O₄ nanocomposites: role of particle structure on exchange spring magnet behaviour. *Physica Scripta*. 2024 Aug 12, 99(9), 095933. DOI 10.1088/1402-4896/ad69e3
6. Himmah, S.W., Septiani, N.L., Wustoni, S., Raissa, R., Hardianto, Y.P., Kim, H., Rinawati, M., Yeh, M.H., Yuliarto, B., **Nuruddin*, A.** In-situ growth of 2D to 3D NiO on nickel foam with enhanced capacity retention as battery-type electrode for asymmetric supercapacitor. *ChemNanoMat*. 2024 July 24, e202400210.
<https://doi.org/10.1002/cnma.202400210>
7. Idamayanti, D., Rochliadi, A., Iqbal, M.*, Noer, Z., Febrian, R., Septiani, NLW., Purwasasmita, B.S., Yuliarto*, B., **Nuruddin*, A.**, Free-standing hard carbon anode based on cellulose nanocrystal-reinforced chitosan substrate for eco-friendly sodium-ion batteries, *Journal of Energy Storage*, 2024 Jun 1, 89, 111491.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111491>
8. Himmah, S.W., Septiani, N.L., Wustoni, S., **Nuruddin*, A.**, Yuliarto, B. Rambutan-like morphology of NiO as a potential high-performance supercapacitor electrode. *In AIP Conference*

- Proceedings* 2024 Mar 18 (Vol. 3026, No. 1, 060001). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0205126>.
9. Wardani, W.K., Septiani, N.L., **Nuruddin, A.**, Iqbal, M., Nugraha, N., Yuliarto, B. Fabrication and performance of nickel-cobalt hydrogen phosphate-based supercapacitor. *In AIP Conference Proceedings* 2024 Mar 7 (Vol. 3073, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0199394>.
 10. **Nuruddin, A.**, Saputro A.G., Maulana, A.L., Rusydi, F., Akbar, F.T., Yudistira, H.T., Dipojono, H.K. Selectivity of CO₂ reduction reaction to CO on the graphitic edge active sites of Fe-single-atom and dual-atom catalysts: A combined DFT and microkinetic modeling. *Carbon Resources Conversion*. 2024 Mar 1, 7(1), 100185. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.05.004>.
 11. Prayoga, A., Ihsan, F.A., Al-Farizi, M.H., Sumbowo, J.F., Firdaus, A.N., Wijaya, A.P., Naufal, F.D., Abrori, S.A., **Nuruddin, A.**, Shukri, G., Septiani, N.L. Zinc oxide nanoflowers as an active material for ethanol gas sensor. *In AIP Conference Proceedings* 2024 Feb 28 (Vol. 3003, No. 1, 020057). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0186373>.
 12. Nurlis, A.G., Adhika, D.R., **Nuruddin, A.**, Aska, Y., Pradana, A. Fabrication and Characterization of Nano-Structured ZnS: Cu LED. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*. 2024 February 15, 38, 43-50. <https://doi.org/10.4028/p-0YF0h4>.
 13. Maulana, M.Y., Raissa, R., **Nuruddin, A.**, Andreani, A.S., Angelina, M., Septiani, N.L., Yuliarto, B., Jenie, S.N. An ultra-sensitive SARS-CoV-2 antigen optical biosensor based on angiotensin converting enzyme 2 (ACE-2) functionalized magnetic-fluorescent silica nanoparticles. *Nanotechnology*. 2024 Feb 8. 35 205702. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ad27aa>.
 14. Estananto*, E., Bonardo, D., Suyatman, **Nuruddin*, A.** The Influence of 2-Methoxyethanol as Capping Agent on WO₃-Based Carbon Monoxide Gas Sensor Characteristics. *In Journal of Physics: Conference Series* 2024 Feb 1 (Vol. 2705, No. 1, p. 012017). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2705/1/012017>.
 15. Idamayanti, D., Rochliadi, A., Iqbal, M., Noer, Z., Febrian, R., Septiani, N.L., Purwasasmita, B.S., Yuliarto, B., **Nuruddin*, A.** Free-standing hard carbon anode based on cellulose nanocrystal-

- reinforced chitosan substrate for eco-friendly sodium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*. 2024 Jun 1, 89, 111491. DOI: 10.1016/j.est.2024.111491
16. Lidiawati, N.A., **Nuruddin***, A., Nugraha*. Synthesis and Characterization of Copper-Nickel Based Metal Organic Framework by Co-Precipitation Methode: Properties and Possible Application. In *Journal of Physics: Conference Series* 2024 Feb 1 (Vol. 2705, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2705/1/012006>.
 17. Khoiri, M., Septiani*, N.L., **Nuruddin, A.**, Yuliarto*, B. Facile preparation and characterization of metal phosphate for supercapacitor. In *Journal of Physics: Conference Series* 2024 Feb 1 (Vol. 2705, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2705/1/012016>
 18. Fadli, R.M., **Nuruddin, A.**, Yuliarto, B. Green Synthesis of Silver/Silver Chloride Nanoparticles using Shallot Peel Extract as Reducing Agent. In *Journal of Physics: Conference Series* 2024 Feb 1 (Vol. 2705, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2705/1/012011>
 19. Raihan, M.F., Manurung, R.V., **Nuruddin, A.**, Wungu, T.D. A Theoretical Investigation on Nitrogen Dioxide Adsorption on Self-Assembled Monolayer-Functionalized ZnO Monolayer. In *Journal of Physics: Conference Series* 2024 Feb 1 (Vol. 2705, No. 1, p. 012003). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2705/1/012003>
 20. Idamayanti, D., Taufik, D., Nadi, M.R.G., Septiani, N.L.W., Rochliadi, A., Purwasasmita, B.S., Yuliarto*, B. and **Nuruddin***, A., 2023. The cellulose nanocrystal (CNC)-reinforced chitosan composite as a potential substrate for flexible hard carbon anode in sodium-ion battery. *Cellulose*, pp.1-16. 10 Jul 2023.
<https://doi.org/10.1007/s10570-023-05341-2>
 21. Mulyani, R.W.E., **Nuruddin***, A. and Suprijanto, B.S.P., 2023. Silica-Chitosan Nanocomposite Coatings for Enhancing Hydrophilicity of Polyester Fabric. *International Journal of Technology*, 14(4). 1 Jun 2023.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i4.4786>
 22. Wustoni*, S., Ohayon, D., Hermawan, A., **Nuruddin, A.**, Inal, S., Indartono, Y.S. and Yuliarto*, B., 2023. Material Design and

- Characterization of Conducting Polymer-Based Supercapacitors. *Polymer Reviews*, pp.1-59. 31 May 2023.
<https://doi.org/10.1080/15583724.2023.2220131>
23. Estananto, E., Utari, L., Septiani, N.L.W., Bonardo, D., **Nuruddin, A.**, Suyatman, S. and Yuliarto, B., 2023, May. Anatase TiO₂ on graphene-coated cotton flexible sensor at room temperature. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2580, No. 1). 22 May 2023.
<https://doi.org/10.1063/5.0122447>
 24. **Nuruddin, A.**, Saputro*, A.G., Maulana, A.L., Rusydi, F., Akbar, F.T., Yudistira, H.T. and Dipojono, H.K., 2023. Selectivity of CO₂ Reduction Reaction to CO on the Graphitic Edge Active Sites of Fe-Single-Atom and Dual-Atom Catalysts: A Combined DFT and Microkinetic Modeling. *Carbon Resources Conversion*. 18 May 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.05.004>
 25. Mardiyati, Y., Fauza, A.N., Steven, S., Hansen, H., Shoimah, S.M.A., Rachman, O.A., **Nuruddin, A.** and Hidayat, R., 2023, May. Initial study of curcumin extraction from turmeric as an indicator for basic solution detector. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2538, No. 1). 9 May 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0115465>
 26. Akrom, M., Saputro, A.G., Maulana, A.L., Ramelan, A., **Nuruddin, A.**, Rustad, S. and Dipojono, H.K., 2023. DFT and microkinetic investigation of oxygen reduction reaction on corrosion inhibition mechanism of iron surface by Syzygium Aromaticum extract. *Applied Surface Science*, 615, p.156319. 1 Apr 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.156319>
 27. **Nuruddin, A.**, Saputro, A.G., Maulana, A.L., Fajrial, A.K., Shukri, G., Mahyuddin, M.H., Aprilyanti, F.D., Harimawan, A. and Dipojono, H.K., 2023. Enhancing oxygen reduction reaction activity of pyrolyzed Fe–N–C catalyst by the inclusion of BN dopant at the graphitic edges. *Applied Surface Science*, 608, p.155203. 15 Jan 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155203>
 28. Nenni, N., Saputro, A.G., Shukri, G., Mobarak, N.N., Aprilyanti, F.D., **Nuruddin, A.** and Dipojono, H.K., 2023. Tuning Na adsorption on the edge of a graphitic nanopore by incorporating a functionalized-ligand and single-heteroatom dopant. *New Journal of Chemistry*, 47(8), pp.3773-3782. 10 Jan 2023.
<https://doi.org/10.1039/D2NJ04034D>

29. Shukri, G., Saputro, A.G., Tarabunga, P.S., Panjaitan, F.V., Agusta, M.K., **Nuruddin, A.** and Dipojono, H.K., 2022. Anisotropic Li diffusion in pristine and defective ZnO bulk and (101⁻ 0) surface. *Solid State Ionics*, 385, p.116025. 1 Nov 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2022.116025>
30. Abrori, S.A., Septiani, N.L.W., **Nuruddin, A.**, Anshori, I. and Yulianto, B., 2022. Comparison of a 2D/3D imidazole-based MOF and its application as a non-enzymatic electrochemical sensor for the detection of uric acid. *New Journal of Chemistry*, 46(44), pp.21342-21349. 7 Oct 2022. <https://doi.org/10.1039/D2NJ02664C>
31. Lasiman, E.T., Naufal, F.D., Anshor, M.F., Syafira, A.Z.F., Setianto, D., Ubaidillah, A., Rendy, B., Komalig, R.W.M., **Nuruddin, A.**, Saputro, A.G. and Shukri, G., 2022, June. DFT study of lithium diffusion in pristine La₂O₃. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2243, No. 1, p. 012108). IOP Publishing. 1 Jun 2022.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012108>
32. Naufal, F.D., Lasiman, E.T., Syafira, A.Z.F., Anshor, M.F., Setianto, D., Ubaidillah, A., Rendy, B., Komalig, R.W.M., **Nuruddin, A.**, Saputro, A.G. and Shukri, G., 2022, June. DFT study on gas-phase decomposition of ethylene carbonate in the presence of LiPF₆, LiBF₄, PF₆⁻, and BF₄. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2243, No. 1, p. 012109). IOP Publishing. 1 Jun 2022.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012109>
33. **Nuruddin, A.**, Saputro*, A.G., Abrori, S.A., Maulana, A.L., Rahagung, V.L., Agusta, M.K., Fathurrahman, F., Mustaqim, A. and Dipojono, H.K., 2022. Oxygen Reduction Reaction Mechanism on the Square Paddle-Wheel Cage Site of TM-BTC (TM= Mn, Fe, Cu) Metal-Organic Framework. *Journal of Mathematical & Fundamental Sciences*, 54(2). 1 May 2022.
<https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2022.54.2.2>
34. Komalig, R.W., Shukri*, G., Agusta, M.K., Saputro, A.G., Sumboja, A., **Nuruddin, A.** and K. Dipojono, H., 2022. Enhanced Lithium Diffusivity in Reduced Cerium Oxides: A First-Principles Study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 126(7), pp.3328-3338. 11 Feb 2022.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c09032>
35. Mahyuddin*, M.H., Saputro, A.G., Sukanli, R.P.P., Fathurrahman, F., Rizkiana, J., **Nuruddin, A.** and Dipojono, H.K., 2022. Molecular

- insight into the role of zeolite lattice constraints on methane activation over the Cu–O–Cu active site. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(7), pp.4196-4203. 24 Jan 2022.
<https://doi.org/10.1039/D1CP05371J>
36. **Nuruddin***, A., Habibullah, A., Adipratama, M.J. and Purwasasmita, B.S., 2021. Synthesis of barium hexaferrite templated by nanocrystalline cellulose extracted from luffa acutangula fiber. *Materials Research Express*, 8(6), p.066104. 25 Jun 2021. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abe5fe>
 37. Nugraha, A.B., **Nuruddin, A.** and Sunendar, B., 2021. Isolasi Nanoselulosa Terkarboksilasi dari Limbah Kulit Pisang Ambon Lumut dengan Metode Oksidasi. *Journal of Science and Applicative Technology*, 5(1), pp.236-244. 9 Jun 2021.
<https://doi.org/10.35472/jsat.v5i1.413>
 38. **Nuruddin***, A., Diba, F.F., Saputro, A.G., Yuliarto, B. and Ramelan, A., 2021. Effect of polyethylene glycol 6000 on the microstructure and magnetic properties of BaFe_{10.4}Al_{1.6}O₁₉. *Materials Research Express*, 8(3), p.036102. 8 Mar 2021. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abe9d2>
 39. Hamzens, A., Kurniawan, R., Adhika, D.R. and **Nuruddin, A.**, 2021. Study of particle reduction method and particle size effect on TiO₂ as near-infrared reflector coating in cotton fabric. *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 19, pp.1-8. 27 Feb 2021.
<https://doi.org/10.1380/ejssnt.2021.1>
 40. Estananto, Septiani, N.L.W., Iqbal, M., Suyatman, **Nuruddin, A.** and Yuliarto, B., 2021. Nanocomposite of graphene and WO₃ nanowires for carbon monoxide sensors. *Nanocomposites*, 7(1), pp.225-236. 2 Jan 2021.
<https://doi.org/10.1080/20550324.2021.2008207>
 41. Sijabat, E.K., **Nuruddin, A.**, Aditiawati, P. and Purwasasmita, B.S., 2020. Flat sheet membrane composite for desalinisation applications based on Bacterial Nanocellulose (BNC) from banana peel waste, cellulose, and silica. *Materials Research Express*, 7(10), p.105004. 9 Oct 2020. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abba3f>
 42. Sijabat, E.K., **Nuruddin, A.**, Aditiawati, P. and Purwasasmita, B.S., 2020. Optimization on the synthesis of bacterial nano cellulose (BNC) from banana peel waste for water filter membrane

- applications. *Materials Research Express*, 7(5), p.055010. 11 May 2020. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab8df7>
43. **Nuruddin, A.**, Yulianto, B., Saputro, A.G., Badruzaman, B. and Ramelan, A., 2020. Preparation of polycrystalline silicon from rice husk by thermal decomposition and aluminothermic reduction. *Molekul*, 15(1), pp.26-33. 23 Mar 2020.
<https://doi.org/10.20884/1.jm.2020.15.1.568>
 44. Septawendar, R., **Nuruddin, A.**, ASRI, L.A.T.W., Abdullah, M.R., Adhika, D.R., Maryani, E. and Purwasasmita, B.S., 2019. Nano cellulose-assisted synthesis of zirconia nanorods from local zircon-based $Zr(OH)_4$ precursors. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 127(12), pp.864-868. Q3, 1 Dec 2019.
<https://doi.org/10.2109/jcersj2.19168>
 45. **Nuruddin, A.**, Yulianto, B., Kurniasih, S., Setiyanto, H. and Ramelan, A., 2019, August. Preparation Of Superhydrophobic Zinc Oxide Nanorods Coating on Stainless Steel Via Chemical Bath Deposition. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 547, No. 1, p. 012052). IOP Publishing. 1 Aug 2019.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/547/1/012052>
 46. Sijabat, E.K., **Nuruddin, A.**, Aditiawati, P. and Purwasasmita*, B.S., 2019, July. Synthesis and characterization of bacterial nanocellulose from banana peel for water filtration membrane application. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1230, No. 1, p. 012085). IOP Publishing. 1 Jul 2019.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1230/1/012085>
 47. Septawendar, R., **Nuruddin, A.**, Sutardi, S., Asri, L.A., Maryani, E., Setiawan, A.R. and Purwasasmita*, B.S., 2019. Synthesis of one-dimensional ZrO_2 nanomaterials from $Zr(OH)_4$ precursors assisted by glycols through a facile precursor-templating method. *Materials Research Express*, 6(6), p.065037. 22 Mar 2019.
<https://orcid.org/0000-0003-3754-9120>
 48. Prima, E.C., **Nuruddin, A.**, Yulianto, B., Kawamura, G. and Matsuda, A., 2018. Combined spectroscopic and TDDFT study of single-double anthocyanins for application in dye-sensitized solar cells. *New Journal of Chemistry*, 42(14), pp.11616-11628. Q1, 28 May 2018.
<https://doi.org/10.1039/C8NJ01202D>

49. Septawendar, R., **Nuruddin, A.**, Sutardi, S., Maryani, E., Asri, L.A. and Purwasasmita, B.S., 2018. Low-temperature metastable tetragonal zirconia nanoparticles (NpMTZ) synthesized from local zircon by a modified sodium carbonate sintering method. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 54, pp.643-654. Q3, 25 Apr 2018.
<https://doi.org/10.1007/s41779-018-0193-4>
50. Muchtar, A.R., Septiani, N.L.W., Iqbal, M., **Nuruddin, A.** and Yulianto, B., 2018. Preparation of graphene–zinc oxide nanostructure composite for carbon monoxide gas sensing. *Journal of Electronic Materials*, 47, pp.3647-3656. Q2, 21 Mar 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11664-018-6213-x>
51. Asri, L.A., **Nuruddin, A.**, Hidayatullah, S., Simatupang, M., Wibowo, A., Septawendar, R. and Purwasasmita, B.S., 2017. The influence of chitosan chelating agent on the formation of spinel LiMn_2O_4 . *Journal of the Australian Ceramic Society*, 53, pp.895-902. 9 Jul 2017.
<https://doi.org/10.1007/s41779-017-0103-1>
52. Setiawan, A.R., Ramelan, A., **Nuruddin, A.** and Hasanah, I.U., 2017. Effect of Pulse Frequency on the Deposition of Cu-Fe Alloy via Pulsed Current Electrodeposition Method. *Key Engineering Materials*, 728, pp.111-116. 20 Mar 2017.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.728.111>
53. Yulianto, B., Nulhakim, L., Ramadhani, M.F., Iqbal, M. and **Nuruddin, A.**, 2015. Improved performances of ethanol sensor fabricated on Al-doped ZnO nanosheet thin films. *IEEE Sensors Journal*, 15(7), pp.4114-4120.
54. Maryani, E., Subagio, **Nuruddin, A.**, Septawendar, R. and Sunendar, B., 2015. Effects of aging and temperature parameters, polyethylene glycol (PEG)/Al ratios on the structure directing mechanism of γ -alumina nanofiber-based Indonesian natural kaolin by ultrasonic aging process. *J. Aust. Ceram. Soc.*, 51, pp.116-122.
55. Iqbal, M., Marintan, E., Septiani, N.L.W., Suyatman, S., **Nuruddin, A.**, Nugraha, N. and Yulianto, B., 2014. Synthesis and harmful gas sensing properties of zinc oxide modified multi-walled carbon nanotubes composites. *Advanced Materials Research*, 1044, pp.172-175.

56. Yuliarto, B., Iqbal, M. and **Nuruddin, A.**, 2013. Synthesis of Various Nanostructures ZnO and its Applications for Gas Sensors. *Advanced Materials Research*, 629, pp.302-308.
57. Nulhakim, L., Nugraha, **Nuruddin, A.**, Suyatman and Yuliarto, B., 2011, December. Al-doped ZnO Thin Films for Ethanol Sensors. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1415, No. 1, pp. 227-230). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.3667262>.
58. Rifai, A., Iqbal, M., Nugraha, **Nuruddin, A.**, Suyatman and Yuliarto, B., 2011, December. Synthesis and characterization of SnO₂ thin films by chemical bath deposition. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1415, No. 1, pp. 231-233). American Institute of Physics.
59. Kurniawan, T., Cheong, K.Y., Razak, K.A., Lockman, Z. and **Ahmad, N.**, 2011. Oxidation of sputtered Zr thin film on Si substrate. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 22, pp.143-150.
60. **Nuruddin, A.** and Abelson*, J.R., 2001. Improved transparent conductive oxide/p+/i junction in amorphous silicon solar cells by tailored hydrogen flux during growth. *Thin Solid Films*, 394(1-2), pp.48-62.
61. **Nuruddin, A.** and Abelson*, J.R., 1997. Does a dipole layer at the p-i interface reduce the built-in voltage of amorphous silicon p-i-n solar cells? *Applied physics letters*, 71(19), pp.2797-2799.
62. **Nuruddin, A.**, Doyle, J.R. and Abelson*, J.R., 1994. Surface reaction probability in hydrogenated amorphous silicon growth. *Journal of applied physics*, 76(5), pp.3123-3129.
63. Liang, Y.H., Yang, S.Y., **Nuruddin, A.** and Abelson*, J.R., 1994. Boron Doped A-Si, C: H Grown by Reactive Magnetron Sputtering from Doped Targets. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 336, p.589.
64. Doyle, J.R., **Nuruddin, A.** and Abelson, J.R., 1994. Effect of anode bias on plasma confinement in direct current magnetron discharges. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 12(3), pp.886-888. <https://doi.org/10.1116/1.579273>

VII. HAKI

1. Material Pengindera pada Biosensor Resonansi Plasmon Permukaan untuk Deteksi Protein CFP-10 Mycobacterium Disulfida ($\text{MoS}_2\text{-MoO}_3$) Mikroflower dan Metode Sintesisnya (P00202303834).
Inventor: Brian Yulianto, Chandra Wulandari, **Ahmad Nuruddin**, Ni Luh Wulan Septiani dan Kariana Kusuma Dewi
2. Material Rompi Anti Peluru Berbahan Komposit Karet Alam dan Berpenguat Serat *Sansevieria trifasciata* serta Metode Pembuatannya (P00202107248)
Inventor: Daniel Aditya Putra, S.T., M.T., Dr. Steven, Dr. rer. nat. Mardiyati, Dr. techn. Ir. Arief Hariyanto, **Ir. Ahmad Nuruddin, M.Sc., Ph.D.**, Onny Aulia Rachman, S.T., M.T.
3. Material Panel Anti Peluru dalam Modular Armor System Kapal Hibrida Serat Gelas, Serat Rami dan Kompon Karet Alam serta Metode Pembuatannya (P00202106889)
Inventor: Dr. Steven, Dr. rer. nat. Mardiyati, Dr. techn. Ir. Arief Hariyanto, **Ir. Ahmad Nuruddin, M.Sc., Ph.D.**, Muhammad Hisyam Ramadhan, S.T., Onny Aulia Rachman, S.T., M.T.
4. Material Sensor untuk Mendeteksi Gas Amonia Berbahan Kurkumin dan Metode Pembuatannya (P00202008684)
Inventor: Dr. rer. nat. Mardiyati, **Ir. Ahmad Nuruddin, M.Sc., Ph.D.**, Rachmat Hidayat, Ph.D., Dr. Steven.
5. Material Sensor Pendeteksi Konsentrasi Limbah Deterjen Berbahan Dasar Kurkumin dan Metode Pembuatannya (P00202008406)
Inventor: Anna Niska Fauza, S.Si., M.T., Anna Niska Fauza, S.Si., M.T., Anna Niska Fauza, S.Si., M.T, Dr. rer. nat. Mardiyati, Dr. rer. nat. Mardiyati, Dr. rer. nat. Mardiyati, Hansen, S.T., Hansen, S.T., Hansen, S.T., **Ir. Ahmad Nuruddin, M.Sc., Ph.D.**
6. Metode Pembuatan Silika Gel dari Sekam Padi (00200500042)
Inventor: **Ahmad Nuruddin**, Nugraha, Hanna Christiane Halim, Hugo Ari.

VIII. PENGHARGAAN

1. Satyalancana Karya Satya X Tahun, 10 Agustus 2002.
2. Satyalancana Karya Satya XX Tahun, 24 Juli 2009.
3. Penghargaan, Pengabdian 25 Tahun ITB, 17 Agustus 2011.
4. Penghargaan ITB Bidang Pengembangan Institusi, 2 Maret 2018.
5. Satyalancana Karya Satya XXX Tahun, 10 April 2018.
6. Penghargaan, Pengabdian 35 Tahun ITB, 16 Agustus 2021.

VIII. SERTIFIKASI

1. Sertifikasi pendidik sebagai dosen profesional



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532

🌐 fgb.itb.ac.id [f](#) FgbItb [t](#) FGB_ITB
📱 [@fgbitb_1920](#) [v](#) Forum Guru Besar ITB

