

# REVIEW SENSOR GAS BERBASIS METAL OKSIDA SEMIKONDUKTOR UNTUK MENDETEKSI GAS POLUTAN YANG SELEKTIF DAN SENSITIF

**Slamet Widodo**

Peneliti Senior dari PPET-LIPI

slametwido50@gmail.com

## ABSTRAK

*Sebuah tinjauan/review beberapa makalah yang telah diterbitkan (dipublikasikan) dalam lima puluh tahun terakhir dengan fokus pada sensor gas berbasis semikonduktor oksida logam (SMO) untuk mendeteksi gas-gas polutan lingkungan yang selektif dan sensitif.*

**Kata kunci:** sensor; oksida logam; polutan; deteksi selektif; gas

## ABSTRACT

*A review of some papers published in the last fifty years that focus on the semiconducting metal oxide (SMO) based sensors for the selective and sensitive detection of various environmental pollutants is presented.*

**Keywords:** sensors; metal oxides; pollutants; selective detection; gases

## 1. PENDAHULUAN

Sensor semikonduktor oksida logam adalah salah satu kelompok sensor yang paling banyak dipelajari dari sensor gas *chemiresistive*. Sensor ini dirancang untuk bereaksi dengan salah satu gas dimana *semiconducting metal oxide* (SMO) mengalami reduksi dan oksidasi. Proses ini menyebabkan sensor SMO untuk bertukar elektron dengan gas target pada tingkat karakteristik tertentu, sehingga mempengaruhi tahanan sensor dan menghasilkan sinyal tertentu. Reaksi bahan SMO dengan gas menghasilkan suatu perubahan *conductometric* diperkenalkan oleh Brattei, dkk (1953) serta Heiland (1954). Aplikasi langsung dari sensor SMO sebagai katalis dan detektor konduktif listrik terhadap berbagai gas kemudian diperkenalkan oleh Bielanski dkk (1957) serta Seiyama dkk (1957).

Selama beberapa dekade terakhir, sensor gas berbasis SMO telah menjadi teknologi utama dalam beberapa sistem sensor gas domestik, komersial, dan industri. Tiga jenis sensor gas *solid state* yang banyak tersedia saat ini (Korotcenkov, 2007 dan Moseley, 1997). Sensor ini didasarkan pada prinsip

elektrokimia, katalitik pembakaran, atau modulasi ketahanan SMO (Moseley, 1997 dan Moseley dkk, 2000). Di antara metode sensor gas yang tersedia, divais sensor gas SMO memiliki beberapa keunggulan unik seperti biaya rendah, ukuran kecil, kesederhanaan pengukuran, daya tahan, kemudahan fabrikasi, dan batas deteksi rendah (<tingkat ppm rendah). Selain itu, sensor SMO berumur panjang dan agak tahan terhadap keracunan. Untuk alasan ini, sensor ini tumbuh pesat sehingga menjadi sensor gas yang paling banyak digunakan saat ini.

Beberapa bahan yang dibuat untuk meningkatkan karakteristik sensor gas SMO, seperti bahan SMO dicampur dengan dopan, katalis, perekat, pengikat, pengisi stabil, dan elektroda telah dipelajari dan diteliti (Ford dkk, 2002). Selain variasi dalam komposisi bahan SMO, metode deposisi film memberikan variabel lain untuk desain sensor. Deposisi ini dengan metode seperti pirolisis, oksidasi film logam, sputtering reaktif, deposisi uap kimia (CVD), ablasi laser, dan teknik penguapan elektron-beam (Gamburg dkk, 2002). Kajian tulisan ini akan difokuskan pada prinsip dan penggunaan sensor SMO

untuk beberapa aplikasi, untuk mendeteksi gas-gas polutan dalam pemantauan lingkungan. Tulisan ini juga akan membahas beberapa faktor pengaruh lingkungan yang mungkin mempengaruhi kinerja sensor SMO dalam hal sensitivitas, selektivitas, dan waktu respon.

## 2. Prinsip Kerja Gas Sensor SMO

Meskipun sederhana pengukuran SMO untuk digunakan sebagai sensor gas, mekanisme pendeteksiannya kompleks dan belum sepenuhnya dipahami. Kompleksitas ini disebabkan oleh berbagai parameter yang mempengaruhi fungsi sensor gas *solid state*. Ini termasuk kemampuan adsorpsi, elektrofisik dan sifat kimia, aktivitas katalitik, stabilitas termodinamika, serta adsorpsi / desorpsi sifat permukaan (Korotcenkov, 2007 dan Moseley dkk, 1991). Namun, diyakini bahwa sensor gas sebagai divais SMO melibatkan dua fungsi utama sebagai fungsi reseptor dan transduser (Yamazoe dkk, 2003, dan Yamazoe dkk, 2005). Pengakuan dari gas sasaran melalui antarmuka gas-padat yang menginduksi perubahan elektronik dari permukaan oksida, sedangkan yang kedua didasarkan pada fenomena transduksi permukaan menjadi perubahan resistansi listrik sensor (Yamazoe dkk, 2003). Ketika sensor dipanaskan sampai suhu tinggi tanpa adanya oksigen, elektron bebas dengan mudah mengalir melalui batas butir dari film SMO. Dalam atmosfer, oksigen teradsorpsi ke permukaan SMO, membentuk penghalang potensial di *grain boundaries*. Interaksi oksigen atmosfer dengan oksigen bermuatan dari permukaan SMO, dimana elektron perangkap dari sebagian besar materi. Lapisan oksigen bermuatan di permukaan repels elektron lainnya berinteraksi dengan sebagian besar film, menciptakan daerah elektron yang menghasilkan sebuah penghalang potensial meningkat pada batas butir. Ini menghambat aliran elektron dan dengan demikian meningkatkan resistans. Ketika sensor diuji pada ruang atmosfer yang berisi gas reduksi, permukaan SMO mengadsorpsi molekul gas dan menurunkan

penghalang potensial, yang memungkinkan elektron mengalir dengan mudah dan dengan demikian mengurangi hambatan listrik. Dengan cara ini, sensor bertindak sebagai resistor variabel yang nilainya merupakan fungsi dari konsentrasi gas.

Oksida logam menunjukkan berbagai fitur elektro-fisik, mulai dari isolator ke *wide band-gap* semikonduktor (Henrich,1994). Oksida logam non-transisi mengandung unsur dengan keadaan oksidasi karena itu memerlukan sejumlah besar energi untuk membuat oksidasi lain yang akan mengikat ion oksigen ligan (Henrich,1994). Sebaliknya, karena berbagai keadaan oksidasi yang mungkin terbentuk pada oksida logam transisi dibandingkan dengan oksida logam non-transisi, sifat permukaan dan jenis *chemisorptions* yang terjadi di permukaan dan ini penting dan telah banyak diteliti (Henrich,1994 dan Cox, 1992). Variasi ini dalam oksidasi menyebabkan perubahan signifikan dalam respon kimia permukaan menuju oksigen dan molekul gas sasaran lainnya (Korotcenkov, 2007). Terlepas dari kenyataan bahwa logam transisi oksida dn dengan  $n > 0$  dengan potensial tinggi untuk melakukan proses oksidasi dan reduksi, telah mencatat bahwa hanya logam transisi dengan konfigurasi  $d_0$  ditampilkan aplikasi sensor gas nyata. Misalnya,  $TiO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $WO_3$  memiliki konfigurasi  $d_0$  dan merupakan unsur transisi yang paling banyak digunakan dalam teknologi sensor, bersama dengan unsur-unsur non-transisi dengan konfigurasi  $d_{10}$  seperti bahan  $ZnO$  dan  $SnO_2$ . Pilihan oksida logam yang ditemukan memiliki pita valensi terisi dari sebagian besar oksigen karakter  $2p$  dengan band gap berkisar antara 3-4 eV (Krilov dan Kisilev, 1989).

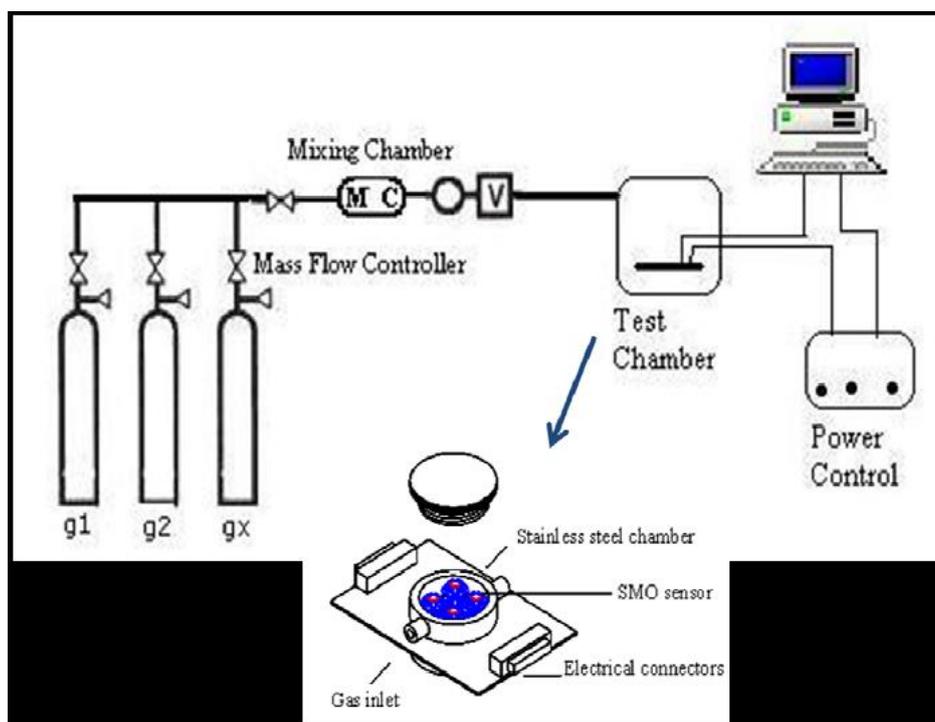
Karena modus adsorpsi dan / atau reaksi terjadi pada permukaan sensor, beberapa peneliti melaporkan bahwa respon konduktivitas sangat dipengaruhi oleh adanya katalis yang efisien untuk meningkatkan reaktivitas permukaan menuju target molekul gas (Boakye dan Nusenu, 1997). Untuk reaksi katalitik yang melibatkan oksigen permukaan

dapat mengubah kedua potensial permukaan bersama dengan cacat tingkat dan mengendalikan sifat elektro-fisik nanokristalin dimodifikasi logam oksida. Oleh karena itu, tuning karakteristik permukaan dengan katalis tertentu telah mengakibatkan kemajuan besar dalam teknologi sensor di mana kedua reaktivitas dan selektivitas dalam tanggapan bahan ini ditingkatkan (Kappler dkk, 2001). Kedua "spill over" dan mekanisme Fermi untuk mengontrol energi yang diterapkan dan untuk menjelaskan bagaimana katalis mempengaruhi strategi penginderaan. Dalam mekanisme "spill over", katalis akan

memisahkan molekul dan kemudian atom akan tumpah di atas permukaan dalam mekanisme energi Fermi untuk menyerap oksigen dan menghilangkan elektron dari katalis dan kemudian katalis efektif akan mengusir dari permukaan film katalis.

### 3. Pengujian Setup, Film Deposisi dan Delivery System

Terlepas dari kenyataan bahwa *setup* pengujian sensor SMO cenderung berbeda, tetapi secara prinsip keseluruhan sama. Gambar 1 menunjukkan skema umum dari perangkat sensor gas SMO.



Gambar 1. Skema umum sensor gas berbasis SMO.

Seperti diilustrasikan dalam Gambar 1, *sensor array* terutama terdiri dari gas sasaran, gas multi-komponen mixer, unit massa aliran *controller*, ruang pengujian, pemasok listrik dan pemanas, dan elektrometer untuk pengukuran resistansi. Perangkat lunak berbasis *LabVIEW* terutama digunakan untuk mengontrol semua pengujian parameter dan pengukuran selama eksperimen. Pengujian

ruang terdiri dari *SMO platform* sensor dengan kemampuan untuk mengontrol dan mengukur suhu dan tahanan masing-masing sensor. Film SMO itu disimpan pada elemen penginderaan pada film tipis atau film tebal. Deposit film tipis yang dilakukan melalui vakum ultra tinggi (UHV) atau teknik penguapan sinar elektron, sementara film tebal disimpan menggunakan metode *spin coating* atau

melalui pengendapan langsung dari suspensi SMO yang sesuai. Platform sensor terikat ke *header* standar dan kemudian ditempatkan dalam ruang tes dan dianil pada 400 °C menggunakan pengontrol suhu sebelum paparan gas di mana eksperimen pengujian SMO untuk target molekul gas dimulai.

#### 4. Aplikasi Pemantauan Lingkungan dan Pendeteksian Gas

##### 4.1. Sensor Gas Nitrogen Oksida (NO<sub>x</sub>)

Film karbon nanotube (CNT) yang dibuat dengan teknik deposisi uap kimia (CVD) diuji sebagai sensor NO<sub>2</sub> resistif untuk aplikasi lingkungan (Sayago dkk, 2008). Ditemukan bahwa CNT jaringan memberikan respon yang baik untuk konsentrasi NO<sub>2</sub> rendah dan selektivitas yang sangat baik di hadapan campuran gas-gas seperti NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, oktan, dan toluena. Periode *pretreatment*, respon sensor, dan waktu pemulihan semua ditemukan tergantung suhu. Selain itu, hasil menunjukkan bahwa sensitivitas CNT jaringan setelah terpapar gas yang berbeda dapat dengan mudah disetel dengan memilih sesuai bahan CNT yang *airbrushed*, dan dengan secara simultan mengendalikan baik tingkat deposisi CNT dan sifat transportasi CNT. Akibatnya, film CNT menawarkan peluang yang menarik untuk digunakan sebagai bahan sensor (Sayago dkk, 2008).

Sensitivitas sensor CNT ditemukan tergantung pada metode deposisi. Sebagai contoh, menggunakan metode ablasi laser berdenyut (PLA), di mana grafit mengandung Ni dan katalis Co, dimana hambatan dari CNT (berdinding CNT tunggal dan multi) sensor gas menurun dengan peningkatan *ambient* konsentrasi gas NO atau NO<sub>2</sub>. Hal itu juga menemukan bahwa tingkat temporal perubahan dalam resistensi adalah sebanding dengan konsentrasi gas target dan dapat berguna untuk estimasi konsentrasi gas sasaran (Sayago dkk, 2008). Film CNT dimodifikasi

dengan bahan SMO baru-baru ini telah digunakan untuk mendeteksi konsentrasi rendah gas NO<sub>x</sub> pada suhu rendah. Sebagai contoh, CNT disimpan dengan platinum atau paladium *nanoclusters* (diendapkan melalui plasma frekuensi radio/CVD) berfungsi nanosensors kimia sangat menjanjikan dengan sensitivitas tinggi, reversibilitas, dan di bawah pendeteksian ppb untuk gas NO<sub>2</sub> (Balázs dkk, 2008). Selain itu, telah dilaporkan bahwa CNT dicampur dengan komposit heksagonal-WO<sub>3</sub> mampu mendeteksi gas NO<sub>2</sub> dengan konsentrasi 100 ppb, tanpa harus memanaskan substrat sensor selama pengoperasian. Tingkat konsentrasi yang terdeteksi sangat dekat dengan udara ambien standar mutu untuk nitrogen dioksida, yang menunjukkan penerapan lingkungan yang baru sensor gas (Pnozoni dkk, 2005).

Bahan berbasis tungsten oksida telah menerima banyak perhatian dalam pembuatan devais SMO sensor gas. Sebagai contoh, beberapa SMOS berdasarkan sensor WO<sub>3</sub> (Boulova dkk, 2001) dan WO<sub>3</sub> dimodifikasi dengan berbagai komposit logam (Jiun-Chan dkk, 2009) telah digunakan untuk sensor NO<sub>x</sub> yang potensial. Reaktivitas sensor gas berbasis WO<sub>3</sub> ditemukan sangat tergantung pada proses pengendapan dan pengujian protokol (Boulova dkk, 2001). Misalnya, film WO<sub>3</sub> berstruktur nano dengan kekasaran permukaan yang tinggi diperoleh dengan menggunakan modifikasi dengan teknik evaporasi termal (Boulova dkk, 2001). Ditemukan juga bahwa sensor itu menunjukkan tanggapan/respon yang tinggi, serta selektif dan waktu respon yang singkat dengan menurunkan suhu kerja sampai suhu minimum yaitu 100 °C. Pada suhu ini, sensitivitas tinggi dicapai untuk gas NO<sub>2</sub> dengan batas deteksi yang lebih rendah dari 100 ppb akan menyebabkan variasi tinggi dalam hambatan listrik film. Selanjutnya, tanggapan yang rendah diperoleh terhadap konsentrasi tinggi NH<sub>3</sub> (10 ppm) dan CO (400 ppm) menyarankan sifat selektif yang menjanjikan (Boulova dkk, 2001).

Baru-baru ini, Yang dkk. melaporkan berbagai metode sintesis untuk mempersiapkan

elemen penginderaan  $WO_3$  yang efisien untuk suhu tinggi pada sensor  $NO_x$  potensiometri (Jiun-Chan dan Prabir, 2009). Metode ini meliputi deposisi pada Ytria-zirkonia stabil (YSZ) untuk melekatkan pada dua kabel Pt dan Pd (sensor A),  $WO_3$  dicampur dengan  $\alpha$ -terpineol (sensor B), larutan hidrogen peroksida/ $WO_3$  (sensor C), dan deposisi  $WO_3$  pada YSZ diikuti oleh radiasi UV dan *treatment* ozon (sensor D). Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektroda Pt (sensor A) memiliki sinyal  $NO_x$  terendah dibandingkan dengan perangkat lain yang mengandung  $WO_3$  sedangkan,  $WO_3/YSZ$  elektroda penginderaan dibuat dengan metode *treatment* UV-ozon (sensor D) memiliki stabilitas mekanik yang lebih baik, sensitivitas yang lebih tinggi, dan respon / waktu pemulihan yang lebih baik dari perangkat yang dibuat dari bubuk  $WO_3$  komersial (Jiun-Chan dan Prabir, 2009).. Selain itu, beberapa studi telah menekankan bahwa pengurangan ukuran atau butiran-butiran logam oksida adalah salah satu faktor kunci yang meningkatkan sensitivitas dan meningkatkan selektivitas film ini terhadap gas yang berbeda (Tamaki dkk, 2005). Sensitivitas film  $WO_3$  penginderaan disimpan dengan interupsi oleh frekuensi radio (rf) sputtering ke silikon substrat mikro-mesin lebih tinggi dari yang diperoleh untuk film tipis  $WO_3$  yang disimpan dengan teknologi dasar karena penurunan ukuran butir dalam film  $WO_3$  (Ferroni dkk, 1999). Sensor ini juga menunjukkan selektivitas yang baik untuk gas-gas reduksi. Jadi, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penurunan ukuran butiran dari lapisan penginderaan berbasis  $WO_3$  akan menghasilkan sensitivitas yang meningkat dan selektif untuk gas-gas oksidasi (Ferroni dkk, 1999)..

Berbasis  $WO_3$  campuran oksida juga telah diteliti untuk karakteristik penginderaan. Modifikasi bahan-bahan termasuk  $WO_3$ -Ti (Ferroni dkk, 1999)..,  $WO_3$ -Pd, Pt, atau Au (Penza dkk, 1998),  $WO_3$ - $In_2O_3$  (Filippini dkk, 2002), dan  $WO_3$ - $Bi_2O_3$  (Yang, J dkk, 2007) yang digunakan untuk membuat sensor gas  $NO_x$  selektif dan sensitif. Contohnya, sensor

disusun sebagai film tipis semikonduktor Ti, W, dan Mo oksida campuran menunjukkan bahwa film tipis itu memiliki kinerja yang baik dan penginderaan sensor yang mampu mendeteksi konsentrasi di bawah batas untuk pemantauan lingkungan ( $CO$ ,  $NO_2$ ) dan nafas analisa (etanol) (Comini dkk, 2002). Untuk sensitivitas dan selektivitas tergantung dari campuran film tipis oksida W-Ti-O yang disusun dengan menggunakan berbagai *target sputtering* Ti/W dan menggunakan metode r.f. *magnetron sputtering* dan tergantung pada jumlah dan ketebalan *multilayers* Ti/W (Ferroni dkk, 1999).

Hal ini menunjukkan bahwa sensitivitas, tingkat minimum deteksi gas  $NO_x$  dan selektivitas dapat secara signifikan ditingkatkan dengan menambahkan lapisan tipis logam mulia seperti palladium (Pd), platinum (Pt), dan emas (Au) pada permukaan film tipis  $WO_3$  yang beroperasi pada suhu sensor rendah (Penza dkk, 1998). Untuk bubuk  $WO_3$  murni dan dengan doping emas (Au) dibuat dengan metode kimia koloid menunjukkan respon nilai untuk  $NO_x$  yang bergantung pada suhu operasi dan dekomposisi sensor. Tanggapan maksimum sensor gas dengan 1,5 % berat Au-didoping pada  $WO_3$  pada suhu 200 °C sementara 0,25, 0,5 dan 1,0 % berat Au didoping pada  $WO_3$  memberi respon gas maksimum pada suhu 150 °C. Akhirnya, uap fisik disimpan Au-gerbang menunjukkan respon terhadap  $NO_2$  dengan pergeseran datar-band-tegangan positif (Filippini dkk, 2002). Waktu respon yang lebih pendek dari waktu pemulihan dan berbanding terbalik dengan konsentrasi gas. Pada konsentrasi  $NO_2$  rendah, sinyal yang besarnya dibatasi oleh waktu respon, sedangkan dalam konsentrasi yang lebih tinggi, sinyal cenderung jenuh dan tanggapan cepat mendekati kondisi stabil (*steady state*) (Filippini dkk, 2002)..

Elektroda platinum ditutupi dengan Pt yang mengandung zeolit Y (Pty) dan  $WO_3$  sebagai dua bahan elektroda diteliti (Yang dkk, 2007). Pengukuran aktivitas katalitik dan suhu diprogram dan desorpsi menunjukkan bahwa  $WO_3$  hampir tidak aktif menuju  $NO_x$

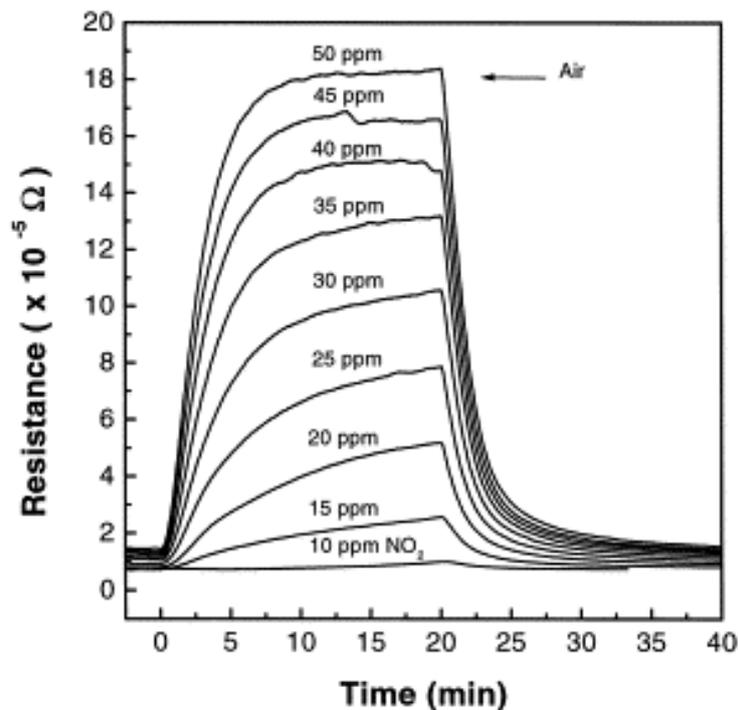
*equilibrium* dan tidak ada *chemisorbed* NO<sub>x</sub> spesies dirilis dari permukaan WO<sub>3</sub>. Namun, Pt memiliki aktivitas lebih tinggi terhadap NO<sub>x</sub> imbang. Karena perbedaan ini, sensor *solid-state* potensiometri kompak yang dibuat menggunakan Pt / Pt sebagai referensi dan WO<sub>3</sub> sebagai elektroda penginderaan. Penggunaan filter Pt memungkinkan untuk mengukur jumlah NO<sub>x</sub> di tingkat sub-ppm dan gangguan dari CO, propana, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub> yang diminimalkan (Yang dkk, 2007).

Peran Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan penambahan indium untuk WO<sub>3</sub> dalam peningkatan sifat NO-sensitif tebal film WO<sub>3</sub>, serta struktur dan gas-sensitif sifat listrik dari campuran WO<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tebal film juga diperiksa (Tomchenko dkk, 2000). Ditemukan bahwa sifat gas-sensitif dari tebal film campuran WO<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sangat tergantung pada konten Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sebagai isi meningkat Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sensitivitas NO pada tebal film WO<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> secara bertahap memburuk dan akhirnya menghilang. Tetapi dengan tebal film campuran WO<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan 3 -5 % berat Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ditampilkan cukup baik dengan kemampuan untuk mendeteksi NO di udara dengan kisaran 5-1000 ppm pada 350 °C (Tomchenko dkk, 2000). Akhirnya, sensor dengan WO<sub>3</sub> doping indium (In) telah ditemukan lebih sensitif terhadap NO<sub>2</sub> ketika diuji pada suhu 200 °C dan lebih sensitif terhadap CO ketika diuji pada suhu 300 °C. Sensor menunjukkan respon tertinggi untuk NO<sub>2</sub> bila konten indium adalah ditetapkan pada 3,0 % berat (Khatko dkk, 2005). Penelitian lain mengungkapkan bahwa sensor gas oksida indium berdasarkan kawat nano dan film tipis In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tumbuh dengan teknik CVD organik logam menunjukkan selektivitas yang baik untuk NO<sub>2</sub> dengan sedikit gangguan dari gas lainnya (Xu dkk, 2008).

Peneliti lain juga telah mempelajari film SMO seperti SnO<sub>2</sub> (Marquis dkk, 2001,

Widodo dan Sudrajad 2014, Widodo, 2014), ZnO (Yongki dkk, 2003 serta Siciliano, dkk, 2008), Te-oksida (Barazzouk dkk, 2006), Mo (Brunet dkk, 2008), emas (Filippini dkk, 2002), Pt (Yang dkk, 2007), tembaga (Brunet dkk, 2008), dan indium oksida (Marquis dkk, 2001, Widodo dan Sudrajad 2014). Film tipis oksida timah diendapkan ke substrat yang berbeda seperti kaca Pyrex, kaca Corning 7059, dan kuarsa menunjukkan perubahan resistensi dengan konsentrasi 500 ppm gas beracun NO<sub>2</sub> pada suhu 350 °C dan ambang sensitivitas sekitar 5 ppm pada suhu yang sama (Sber veglieri dkk, 1990). Sebuah contoh respon listrik film tipis disemprotkan oksida timah terhadap berbagai konsentrasi NO<sub>2</sub> gas diukur pada suhu 350 °C disajikan pada Gambar 2. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 2, devais / perangkat mendeteksi konsentrasi rendah <10 ppm NO<sub>2</sub> dengan peningkatan bertahap terhadap konsentrasi gas sasaran meningkat (Sber veglieri dkk, 1990).

Selain itu, sifat struktural dari polikristalin *indium tin oxide* (ITO) film tipis yang dioptimalkan dalam rangka meningkatkan stabilitas ini detektor nitrogen oksida dengan adanya gas yang tinggi konsentrasi (1000-2000 ppm di udara). Ditemukan bahwa film tipis ITO menunjukkan sensitivitas tinggi menuju NO<sub>2</sub> dan NO. Selain itu, juga ditunjukkan selektivitas yang baik dari gas-gas ini sehubungan dengan gas CO dan CH<sub>4</sub>. Ini juga ditemukan bahwa empat zona untuk adsorpsi ion oksigen dan desorpsi mampu dibedakan dengan plot energi aktivasi konduktivitas vs suhu yang juga ditetapkan bahwa nitrogen oksida desorpsi terjadi pada suhu yang sama (sekitar 570 K) di mana desorpsi-O<sub>2</sub> adalah seharusnya berlangsung (Berger dkk, 1997.



Gambar 2. Respon listrik dari penyemprotan film tipis SnO<sub>2</sub> vs konsentrasi NO<sub>2</sub> pada suhu 350 °C [42].

Film tipis ZnO dengan proses sputtering yang terintegrasi dengan mikro-array dan diendapkan pada substrat Si (Siciliano dkk, 2008) dan Al (Shalaka dkk, 2008) dipelajari. Respon/tanggapan listrik dari film terhadap perubahan konsentrasi NO<sub>2</sub> bersama dengan gas-gas lain seperti H<sub>2</sub>, *Liquid Petroleum Gas* (LPG), H<sub>2</sub>S, CO diuji. Film ZnO menunjukkan respon yang kuat bahkan konsentrasi rendah NO<sub>2</sub> (1 ppm) dengan sensitivitas tinggi pada suhu yang lebih rendah. Hasil penginderaan gas pada film ZnO-Al menunjukkan bahwa respon meningkat dengan peningkatan konsentrasi Al hingga 5 % berat Al. Hal ini juga menunjukkan bahwa respon meningkat secara bertahap dengan meningkatnya konsentrasi NO<sub>2</sub>, dan mencapai kejenuhan pada 100 ppm NO<sub>2</sub> yang berwarna kulit sawo matang, suhu operasi 100 °C, respon terhadap konsentrasi NO<sub>2</sub> yang lebih rendah terlepas rendahnya konsentrasi Al. Sementara pada suhu 200 °C, respon gas lebih tinggi dari suhu 100 °C dan mencapai saturasi di sekitar 150 ppm NO<sub>2</sub>. Pada suhu operasi 300 °C, sensor ini mampu mendeteksi lebih dari 150 ppm NO<sub>2</sub>. (Shalaka dkk, 2008)

Akhirnya, film tipis TeO<sub>2</sub> dibuat dengan metode sputtering rf reaktif dan gas penginderaan NO<sub>2</sub> karakteristik film-film ini diselidiki. (Barazzouk dkk, 2006) Sensor pada berbagai macam konsentrasi gas NO<sub>2</sub> dalam kisaran 1-120 ppm. Hasil penelitian menunjukkan sensitivitas terbaik untuk gas NO<sub>2</sub> pada suhu kamar dan respon menurun dengan peningkatan suhu. Respon ditemukan tertinggi untuk film dengan ketebalan 300 nm, dibandingkan dengan ketebalan dari 100 nm dengan waktu respon ditemukan menurun dengan meningkatnya konsentrasi gas dan itu sekitar 6 menit untuk 1 ppm sampai sekitar 1,2 menit untuk konsentrasi NO<sub>2</sub> : 120 ppm. Waktu pemulihan, namun yang lebih lama dari delapan menit untuk setiap konsentrasi gas. (Barazzouk dkk, 2006)

#### 4.2. Sensor Gas Sulfur Dioksida

Sulfur dioksida adalah salah satu polutan udara khas yang harus dideteksi dan kemudian dikurangi dalam lingkungan dengan metode yang sesuai. Banyak penelitian pada pengembangan sensor SO<sub>2</sub> telah muncul, termasuk cairan dan elektrolit padat (Simizu dkk, 2001), serta film penginderaan polimer

(Penza dkk, 2001). Sebaliknya, hanya beberapa laporan telah ditulis tentang film sensing SMO untuk mendeteksi  $\text{SO}_2$  selektif. Sensor berdasarkan  $\text{SnO}_2$  (Stankova dkk, 2004),  $\text{SnO}_2$  didoping dengan Pd (Liang dkk, 2008),  $\text{WO}_3$  didoping dengan berbagai logam (Lin dkk, 1994) dan vanadium oksida dimodifikasi dengan  $\text{TiO}_2$  (Vuong dkk, 2005) yang disimpan dan sifat pengindraannya diukur dan dimodifikasi untuk mencapai tingkat deteksi selektif dan sensitif gas  $\text{SO}_2$ . Sebagai contoh, Berger dkk. (2008) telah melaporkan mekanisme interaksi pada antarmuka gas / sensor selama pendeteksi awal sulfur dioksida dengan menganalisa menggunakan hasil karakterisasi fisika-kimia dan interaksi  $\text{SO}_2$  /  $\text{SnO}_2$ . Keasaman permukaan dan efek dari  $\text{SnO}_2$  hidrasi dengan menunjukkan efek pengobatan  $\text{SO}_2$ . Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kepadatan asam Lewis setelah melakukan *treatment* sampel dengan  $\text{SO}_2$ . Peningkatan ini ditemukan tergantung pada suhu, dengan nilai tertinggi yang diperoleh untuk suhu *treatment*  $500^\circ\text{C}$ . Peningkatan ini diasumsikan menjadi alasan untuk meningkatkan sensitivitas sensor pada suhu tinggi. Itu juga ditemukan bahwa pembentukan *ireversibel* sulfat pada permukaan sensor adalah penyebab berbaliknya respon devais setelah  $\text{SO}_2$  yang pertama kali terdeteksi. (Stankova dkk, 2004)

Sensor gas berbasis  $\text{SnO}_2$  mengandung 0,05, 0,1, 1, dan 3% mol Pd, sebagai aditif katalitik, yang dibuat menggunakan teknologi film tebal dan tanggapannya untuk gas CO diuji dalam suhu kisaran  $300^\circ\text{C}$  sampai  $600^\circ\text{C}$  dengan baik untuk gas NO atau  $\text{SO}_2$  diperkenalkan sebagai gas campuran. Pengujian hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika  $\text{SO}_2$  diperkenalkan, respon sensor terhadap CO meningkat hingga suhu  $450^\circ\text{C}$  setelah itu mulai menurun ketika suhu dinaikkan sampai  $500^\circ\text{C}$ , dan lebih lanjut untuk  $600^\circ\text{C}$  (Liang dkk, 2008).

Potensi  $\text{WO}_3$  berdasarkan perbedaan oksida logam semikonduktor sebagai sensor  $\text{SO}_2$  telah diselidiki (Lin dkk, 1994 dan Vuong dkk, 2005). Beberapa upaya dilakukan untuk

meningkatkan sifat  $\text{SO}_2$  penginderaan  $\text{WO}_3$  dan  $\text{SnO}_2$  dengan penambahan sejumlah kecil logam mulia. Menambahkan 1,0 % berat logam untuk  $\text{WO}_3$  yang bubuk dilakukan dengan metode berbasis solusi konvensional dengan menggunakan  $\text{HAuCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{PdCl}_2$  dan  $\text{RhCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Setiap materi sensor dicampur dengan sejumlah kecil air dan pasta yang dihasilkan diaplikasikan pada permukaan alumina yang memiliki sepasang kabel Pt sebagai elektroda. Saat itu dipanaskan sampai  $950^\circ\text{C}$  selama 10 jam di udara sebelum pengukuran sensitivitas (Lin dkk, 1994). Setelah membuat sensor, dengan sensitivitas sensor 200-800 ppm  $\text{SO}_2$  diukur dalam alat aliran dalam kisaran suhu  $100 - 800^\circ\text{C}$ . Menurut hasil eksperimen, semua oksida logam semikonduktor ditunjukkan kurva respon yang kompleks pada suhu dan tergantung waktu untuk  $\text{SnO}_2$ . Namun, di antara oksida yang diuji,  $\text{WO}_3$  menunjukkan sensitivitas tertinggi  $\text{SO}_2$  pada suhu  $400^\circ\text{C}$ , disertai dengan peningkatan resistensi, tetapi tahanan untuk  $\text{SO}_2$  menurun pada suhu yang lebih tinggi dari  $500^\circ\text{C}$ . Di antara logam ditambahkan untuk meningkatkan  $\text{SO}_2$  yang sensitivitas  $\text{WO}_3$ , penambahan 1,0 % berat Ag adalah yang paling efektif untuk meningkatkan sensitivitas pada  $450^\circ\text{C}$  tetapi juga mengakibatkan penurunan resistensi sensor setelah terpapar  $\text{SO}_2$ . Ketika datang ke lintas selektivitas, ditemukan bahwa resistensi dari  $\text{WO}_3$  meningkat setelah terpapar baik NO dan  $\text{NO}_2$ , dan sensitivitas  $\text{NO}_2$  lebih unggul NO serta  $\text{SO}_2$ . Dalam kasus 1,0 % berat Ag/ $\text{WO}_3$ , yang hasilnya serupa tetapi gangguan dari NO dan  $\text{NO}_2$  ditemukan lebih signifikan (Lin dkk, 1994).

Lapisan aktif murni dan  $\text{WO}_3$  didoping Pt diendapkan menggunakan rf *magnetron sputtering* pada *microhotplate* substrat dan kemudian sifat pengindraannya untuk senyawa belerang ( $\text{SO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$ ) juga diselidiki. Sensor terpadu yang terdiri dari susunan empat elemen mikrosensor adalah dibuat menggunakan teknologi fabrikasi mikroelektronik. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa sensor memiliki tanggapan yang tinggi dan reversibel dengan kehadiran H<sub>2</sub>S dan SO<sub>2</sub> diencerkan dalam CO<sub>2</sub>, dalam ketiadaan oksigen. Sensor WO<sub>3</sub> murni yang sangat sensitif terhadap H<sub>2</sub>S, tapi tidak begitu untuk SO<sub>2</sub>. Namun sensor diolah menunjukkan perilaku yang berlawanan (Ghimbeu dkk, 2008).

Baru-baru ini, Liang dkk. telah memodifikasi sensor tubular kompak berdasarkan NASICON (natrium super konduktor ionik) dengan elektroda penginderaan TiO<sub>2</sub> dengan doping V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> untuk mendeteksi SO<sub>2</sub> (Wong dkk, 2006). Bahan NASICON disiapkan dari ZrO(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> dan Si (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>O)<sub>4</sub> dengan proses sol-gel. Titanium dioksida nanometer juga dibuat dengan metode sol-gel dengan Ti(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>4</sub> sebagai prekursor, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH sebagai pelarut, dan CH<sub>3</sub>COOH sebagai reagen *chelating*. NASICON digunakan sebagai bahan dasar dalam sensor dan TiO<sub>2</sub> V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-diolah untuk elektroda penginderaan. Proporsi V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> untuk TiO<sub>2</sub> adalah 0, 2, 5, 10 dan 20% berat. Sensor yang terkena sampel gas yang mengandung berbeda konsentrasi SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, NH<sub>3</sub> dan CO<sub>2</sub> dan tanggapannya diukur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat penginderaan terbaik untuk gas SO<sub>2</sub> dengan ditunjukkan oleh sensor yang memiliki tebal film NASICON dengan doping 5% berat V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-pada elektroda TiO<sub>2</sub> disinter pada suhu 600 °C. Tanggapan deteksi waktu untuk 1-50 ppm SO<sub>2</sub> sekitar 25-10 detik sementara waktu pemulihan sekitar 30-40 detik. Sensor ini juga menunjukkan selektivitas yang sangat baik untuk SO<sub>2</sub> terhadap gas pengganggu, dan suhu operasi sensor itu adalah 300 °C (Wong dkk, 2006).

### 4.3. Sensor Gas H<sub>2</sub>S

Sensor SMO ini untuk mendeteksi gas H<sub>2</sub>S berdasarkan yang telah menerima perhatian lebih dari gas SO<sub>2</sub> karena efek racunnya terhadap kesehatan manusia. Ambang batas untuk H<sub>2</sub>S adalah 10 ppm. Dengan konsentrasi di atas 250 ppm, H<sub>2</sub>S memiliki pengaruh besar pada tubuh manusia,

bisa menyebabkan kematian. Sejak gas H<sub>2</sub>S terjadi secara alami dalam minyak mentah atau minyak bumi, gas alam, gas vulkanik, serta sumber air panas; dan dihasilkan oleh beberapa industri kegiatan seperti bakteri pengurai sampah organik, pengolahan makanan, oven memasak, kertas kraft pabrik, dan kilang minyak bumi, di situ pemantauan H<sub>2</sub>S sangat penting, terutama dalam sektor industri.

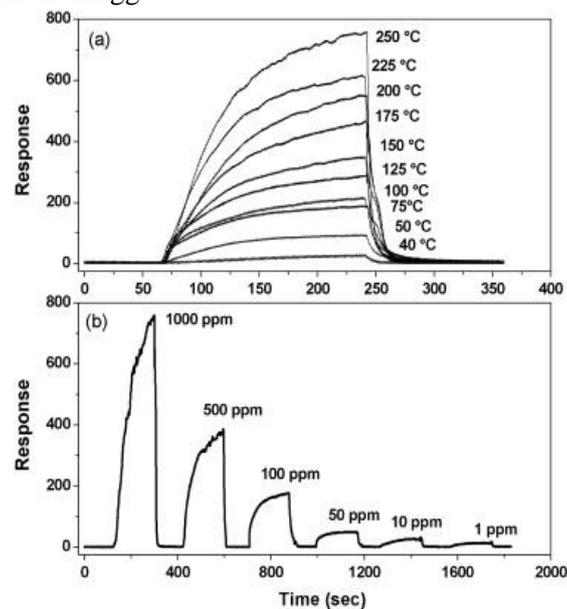
Dalam beberapa tahun terakhir, mempelajari tentang pendeteksian H<sub>2</sub>S dan monitoring dengan menggunakan sensor SMO telah meningkat. Sensor itu dengan berbasis bahan SMO berikut berhasil dimodifikasi dan selektif untuk mendeteksi gas H<sub>2</sub>S: berbasis bahan WO<sub>3</sub> (Lin dkk, 1994), SnO<sub>2</sub> (Vuong dkk, 2005), ZnO (Wong dkk, 2006), oksida tembaga (Ghimbeu dkk, 2008), platinum dan paladium oksida (Wang dkk, 2007), indium oksida (Kapse dkk, 2009), berdasarkan bahan perak (Liang dkk, 2007), titanium oksida (Jain dkk, 2006) dan kadmium oksida (Sarma dkk, 2007).

Sensor SMO berbasis WO<sub>3</sub> telah menjadi perhatian besar untuk mendeteksi gas H<sub>2</sub>S. Misalnya, film WO<sub>3</sub> yang dibuat dengan metode deposisi r.f dalam menunjukkan gas penginderaan dengan deposisi film itu sebagai sub-stoikiometri dengan berbagai rasio O/W. Interaksi dengan H<sub>2</sub>S dipelajari pada suhu 475 K, di mana sensitivitas film untuk gas H<sub>2</sub>S tertinggi. Perubahan konduktivitas sensor gas dengan kemungkinan besar disebabkan oleh pembentukan konsentrasi dari permukaan lowongan oksigen ketika sensor terkena tekanan parsial diberikan gas H<sub>2</sub>S di udara (Fruhberger dkk, 1996). Selain itu, sifat respon H<sub>2</sub>S pada sensor dengan film tipis WO<sub>3</sub> dipelajari dengan baik pada udara kering dan basah dengan berbagai tingkat kelembaban (Ruokamo dkk, 1994). Telah dicatat bahwa sensor dengan film tipis WO<sub>3</sub> memberikan variasi yang besar antara sifat respon H<sub>2</sub>S dalam sensor *array* yang sama dalam beberapa sensor yang ditemukan sensitif terhadap H<sub>2</sub>S berkisar dalam ppb tanpa doping emas, tetapi dengan sedikit peningkatan konduktansi dari

sensor dalam lingkungan lembab yang mengganggu sampai batas tertentu dengan penginderaan H<sub>2</sub>S (Ruokamo dkk, 1994).

Tidak seperti film tipis WO<sub>3</sub>, dengan struktur nano tungsten oksida menunjukkan karakteristik penginderaan yang lebih baik untuk H<sub>2</sub>S dalam kisaran konsentrasi jumlah 1-1.000 ppm selama rentang suhu 40-250 °C. Hasil terbaik diperoleh dengan kawat nano WO<sub>2.72</sub> pada 250 °C di mana respon itu tidak terpengaruh secara signifikan hingga 60 %

kelembaban relatif (RH) (Solis dkk, 2001 dan Sekhar dkk, 2008). Profil gas penginderaan khas dari perangkat di atas ke arah deteksi H<sub>2</sub>S pada berbagai suhu dan konsentrasi ditunjukkan pada Gambar 3. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 3, respon tertinggi diamati pada 250 °C dengan batas pendeteksian yang mungkin di bawah kondisi yang bisa mencapai kisaran ppb (<1 ppm) (Sekhar dkk, 2008).



Gambar 3. (a) Karakteristik penginderaan gas berbasis tungsten oksida nano partikel untuk 1.000 ppm H<sub>2</sub>S, dan (b) Variasi respon dengan konsentrasi H<sub>2</sub>S pada 250 °C.

Studi terbaru menunjukkan bahwa jumlah dopan yang mempengaruhi sensitivitas pada suhu optimal (Lin dkk. 1994). Di antara berbagai dopan emas, platinum, atau palladium, ditemukan efek *spillover* dari dopan Pt lebih besar dari dopan emas. Dalam kondisi spesifik, di bawah 1 ppm H<sub>2</sub>S dan pada suhu operasi 220 °C, kepekaan sensor gas WO<sub>3</sub> didoping dengan Pt dan didoping dengan Au-Pt masing-masing adalah 23 dan 5,5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor gas dengan Pt sebagai dopan pada bahan WO<sub>3</sub> dengan respon dan pemulihan, serta sensitivitas tinggi terhadap H<sub>2</sub>S (Lin dkk. 1994).

Sol dari kristal SnO<sub>2</sub> dengan berbagai ukuran butir kristal berkisar antara 6 dan 16 nm yang disiapkan dengan menundukkan gel asam *stannic* ke hidrotermal perawatan dalam

berbagai kondisi. Film pendek perangkat sensor dengan ketebalan film yang berbeda antara 200 dan 900 nm yang dibuat untuk menyelidiki merasakan sifat kepada gas H<sub>2</sub>S. Ditemukan bahwa respon sensor untuk H<sub>2</sub>S secara signifikan ditingkatkan dengan mengurangi ketebalan film dan dengan meningkatnya ukuran butir hingga 16 nm. Responnya tinggi melebihi 104 pada 150 °C, untuk devais dengan ketebalan 200 nm (Sekhar dkk, 2008).

SnO<sub>2</sub> nanokristalin sebagai bahan gas penginderaan didoping dengan Ag menyajikan sensitivitas yang lebih baik dibandingkan dengan SnO<sub>2</sub> murni, karena distribusi partikel Ag<sub>2</sub>O di batas butir nanokristalin SnO<sub>2</sub> dan pembentukan p-n *heterojunctions* (Gong dkk, 2006). Hasil pengukuran H<sub>2</sub>S menunjukkan bahwa dikembangkan dari suhu kerja sensor

H<sub>2</sub>S adalah sekitar 70 ° C, yang jauh kurang dari yang tersedia secara komersial sensor dan sensor SMO baru-baru dikembangkan (Sekhar dkk, 2008). Selain itu, Cu-SnO<sub>2</sub> komposit menunjukkan sensitivitas yang kuat terhadap pendeteksian H<sub>2</sub>S yang mencapai <10 ppm H<sub>2</sub>S pada suhu 100 ° C (Ghimbeu dkk, 2008). Sensor lain yang mengandung tembaga, besi, kadmium, dan indium oksida yang ditemukan selektif terhadap deteksi H<sub>2</sub>S pada tingkat konsentrasi ppm. Akhirnya, kedua film ZnO dan tellerium oksida ditemukan sangat sensitif terhadap gas H<sub>2</sub>S pada tingkat konsentrasi yang sangat rendah (Wong dkk, 2006). Misalnya, film tipis telurium dibuat dengan metode evaporasi termal pada substrat alumina pada suhu 373 K yang didapatkan menjadi sensitif terhadap 0,1 ppm H<sub>2</sub>S pada suhu kamar di mana hidrogen sulfida mengurangi jumlah oksigen yang terserap pada permukaan film Te mengarah ke peningkatan resistensi (Ghimbeu dkk, 2008). Demikian pula, sensor ZnO dibuat dari ZnO nanorods ditemukan untuk menjadi calon yang cocok untuk bahan praktis mendeteksi konsentrasi rendah H<sub>2</sub>S dan C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH dimana sensor sensitif dengan konsentrasi 0,05 ppm H<sub>2</sub>S pada suhu kamar (Wong dkk, 2006).

#### 4.4. Sensor Gas NH<sub>3</sub> dan Amina

Untuk mendeteksi kadar amonia (NH<sub>3</sub>) pada daerah tertentu itu penting seperti pada pengolahan makanan, pupuk, teknologi kimia, diagnosa medis, dan perlindungan lingkungan. Beberapa bahan terkenal untuk sensor amonia dengan bahan WO<sub>3</sub> (Tong dkk, 2001), tembaga (Bendahan dkk, 2003), SnO<sub>2</sub>, (Wang dkk, 2001), besi oksida (Tong dkk, 2001), ZnO (Suryawanshi dkk, 2008), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Patil dkk, 2007). Film tipis WO<sub>3</sub> disusun menggunakan teknik sol-gel dengan WCl<sub>6</sub> sebagai prekursor dan kemudian diuji sifat penginderaan untuk gas trimetilamina (TMA) pada suhu operasi yang rendah dari 70 ° C. Film WO<sub>3</sub> diendapkan antara interdigital elektroda emas pada dinding luar dari tabung keramik. Kepekaan gas TMA, gas C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, bensin, CH<sub>4</sub>, CO, dan uap air diukur.

Sensitivitas sensor itu dilakukan dalam kisaran suhu dan konsentrasi TMA berbeda. Untuk 100 dan 500 ppm dari TMA, suhu optimum operasi ditemukan menjadi 70 ° C. Bahkan untuk 700 dan 1000 ppm konsentrasi dari TMA, yang sensitivitas tertinggi pada 70 ° C (Sen dkk, 2006).

ZnO murni dan ZnO didoping dengan RuO<sub>2</sub> disusun dengan teknik sablon pada substrat alumina dalam pola yang diinginkan dan ditunjukkan gas penginderaan dipelajari. Sampel film tebal dibuat dengan mencelupkan film tebal ZnO murni ke larutan ruthenium klorida (0,01M) untuk interval waktu yang berbeda: 5, 15, 30, 45 dan 60 menit (Suryawanshi dkk, 2008). Tanggapan (respon) untuk 1.000 ppm NH<sub>3</sub> dengan sensor ZnO murni dengan firing pada suhu 500-700 ° C untuk pengukuran gas NH<sub>3</sub> pada suhu operasi antara 100-350 ° C. Nilai respon meningkat dengan meningkatnya suhu operasi, dan sensor dengan firing pada suhu 650 ° C adalah yang paling sensitif. Variasi dalam menanggapi gas untuk 1.000 ppm NH<sub>3</sub> film ZnO didoping dengan jumlah yang berbeda dari RuO<sub>2</sub> dan suhu operasi yang berbeda juga diukur (186). Sebagai tambahan, film tipis ZnO diaktifkan dengan asam kromat dicelupkan untuk interval waktu yang berbeda dan kemudian di firing pada suhu 500 ° C selama 24 jam di udara ambien di mana CrO<sub>3</sub> tidak stabil secara termal di atas 197 ° C dan dengan demikian oksigen hilang, membentuk Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang merupakan senyawa stabil (Patil dkk, 2007). Sensor Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-diaktifkan akan menunjukkan respon yang baik untuk NH<sub>3</sub> bahkan pada suhu kamar dan sangat selektif terhadap gas NH<sub>3</sub> (300 ppm) bahkan di hadapan gas beracun lainnya dengan konsentrasi lebih tinggi. Sensor ini juga menunjukkan respon dan pemulihan yang sangat cepat untuk gas NH<sub>3</sub> (Patil dkk, 2007).

Sebaliknya, film tebal Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dimodifikasi dengan 0,59 % massa Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terbukti menjadi yang paling sensitif untuk tidak hanya gas NH<sub>3</sub> tetapi juga LPG, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH dan gas Cl<sub>2</sub> (Wang dkk, 2001). Suhu operasi masing-masing untuk NH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, LPG, dan Cl<sub>2</sub> yang ditemukan 250 ° C, 300 ° C, 400

°C, dan 450 °C. Hal ini menunjukkan baik selektivitas untuk gas tertentu pada suhu tertentu terhadap gas pereduksi lainnya. Sensor ini juga menunjukkan tingkat respons dan pemulihan yang sangat cepat untuk gas pereduksi (Suryawanshi dkk, 2008).

Film sensitif gas  $\text{SiO}_2\text{-SnO}_x\text{-AgO}_y$  dengan metode sol-gel yang dibuat dengan perak nitrat ( $\text{AgNO}_3$ ), ditambahkan 0,01 % larutan tetraethoxysilane [ $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ ] dan dicampur dengan Stannic klorida ( $\text{SnCl}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), dengan perbandingan rasio 5:1, dalam rangka mempersiapkan sebuah prekursor alkohol. Film dengan tebal 150-nm yang dilapiskan dengan *spin-coating* pada substrat silikon. Film-film yang diperoleh dikeringkan pada 120 °C selama 2 jam dan kemudian di-anil pada suhu yang lebih tinggi (350 - 600 °C). Sifat gas-sensitif dari film diuji untuk input  $\text{NH}_3$  yang bervariasi dalam kisaran konsentrasi 10-250 ppm di udara. Film itu ditunjukkan terdiri dari  $\text{Ag}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ag}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{Ag}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{SnO}$ ,  $\text{Sn}_3\text{O}_4$  dan  $\text{SnO}_2$ . Itu menegaskan bahwa respon dan pemulihan kali tergantung pada rasio Sn / Ag. Selanjutnya, studi AFM menunjukkan bahwa hanya film yang berpori memiliki rasio Sn / Ag minimum 0,5 dan di-anil pada suhu 600 °C selama delapan jam, sehingga menunjukkan karakteristik penginderaan terbaik. Film-film ini juga menunjukkan sensitivitas yang baik untuk gas amoniak bahkan pada suhu rendah (> 50 °C) (Li dkk, 1998)

Akhirnya, teknik persiapan yang berbeda untuk tembaga (I) bromida dan pengaruhnya terhadap sifat-sifatnya diselidiki (Petrov dkk, 2008). Dua teknik yang berbeda dari persiapan yang digunakan adalah (1) magnetron sputtering (sensor A) dan (2) elektrokimia (sensor B<sub>1</sub>) atau kimia (sensor B<sub>2</sub>) oksidasi tembaga dengan adanya ion bromida. Mendeteksi amonia dengan sensor CuBr dapat digambarkan sebagai mekanisme dua langkah, yang melibatkan pembentukan lapisan *chemisorption* selama *treatment* amonia dan efek dipolar karena molekul *physisorbed* amonia selama mendeteksi amonia. Semua hasil ini mengkonfirmasi

bahwa sensor berdasarkan CuBr sangat menarik untuk mendeteksi amonia (Suryawanshi dkk, 2008).

#### 4.5. Sensor Gas Hidrogen

Hidrogen adalah bahan bakar alternatif potensial yang menjanjikan untuk mobil dan dapat dikonversi menjadi listrik dalam sel bahan bakar. Hal ini juga sudah digunakan dalam obat-obatan dan eksplorasi ruang angkasa serta dalam produksi bahan kimia industri dan produk makanan. Sensor hidrogen diperlukan karena sebuah campuran eksplosif dapat terbentuk jika kebocoran hidrogen ke udara dari tangki penyimpanan atau katup. Film tipis  $\text{SnO}_2$  berstruktur nano dibuat dengan spin coating bersama-sama dengan proses kalsinasi berikutnya. Perak (Ag) dan platinum (Pt) telah ditambahkan sebagai bahan doping pada  $\text{SnO}_2$  untuk mencapai sensitivitas yang lebih baik dan selektivitas untuk deteksi  $\text{H}_2$ . Hasil tes menunjukkan bahwa film  $\text{SnO}_2$  nanokristalin penginderaan menghasilkan waktu respon yang cepat yaitu sekitar dua detik dan waktu pemulihan cepat dari sekitar 10 detik dengan sensitivitas yang baik untuk hidrogen pada 100 °C (Gong dkk, 2004). Partikel  $\text{SnO}_2$  berpori dibuat menggunakan metode Sol-gel memiliki sensitivitas yang lebih tinggi untuk gas  $\text{H}_2$  karena luas permukaan yang tinggi (Li dkk, 1998). Sebuah hubungan linier antara sensitivitas dan konsentrasi  $\text{H}_2$  diamati pada semua sensor pada konsentrasi  $\text{H}_2$  lebih rendah dari 1.500 ppm. Hasil ini menyiratkan bahwa ada potensi aplikasi untuk luas permukaan yang tinggi dengan bahan  $\text{SnO}_2$  berpori sebagai sensor yang sangat sensitif untuk pengukuran gas reduksi yang sangat rendah konsentrasinya (Li dkk, 1998). Selain itu, karbon nanotube dinding tunggal (SWCNT) diperkuat dengan sensor gas timah dioksida nanokristalin dikembangkan untuk mencapai kinerja yang lebih baik gas penginderaan, dalam hal sensitivitas, respon dan pemulihan, serta pengurangan konsumsi daya (suhu kerja yang rendah). Kedua sensor  $\text{SnO}_2$  murni nano kristalin dan sensor SWCNT /  $\text{SnO}_2$  diuji

dalam mendeteksi berbagai konsentrasi hydrogen (Gong dkk, 2008). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensitivitas sensor SWCNT / SnO<sub>2</sub> untuk mendeteksi hidrogen tiga kali lebih besar bila dibandingkan dengan yang ada pada sensor SnO<sub>2</sub> murni untuk gas hidrogen dengan rentang konsentrasi dari 300 ppm sampai 1.500 ppm diuji pada suhu 250 °C (Gong dkk, 2008).

Oksida tungsten dengan katalis paladium atau platinum digunakan sebagai media sensitif hidrogen. Warnanya berubah dari hijau pucat ke biru ketika hidrogen mereduksi oksida tungsten menjadi tungsten perunggu (Sekimoto dkk, 2000). Dua lapisan yang berbeda dari WO<sub>3</sub> yang dikembangkan. Pada metode pertama, bubuk oksida tungsten dengan katalis paladium dengan melarutkan oksida tungsten menjadi larutan PdCl<sub>2</sub> dilanjutkan dengan proses anil pada 300 ° C selama 3 jam di udara. Sensor kedua dikembangkan menggunakan metode Sol-Gel di mana, sol oksida tungsten yang terbentuk dari larutan air natrium tungstat dari berbagai konsentrasi mengandung asam hidrogen tetrachloropalladate (II) (atau asam kloroplatinat). Larutannya adalah diasamkan melewati resin pertukaran proton (Sekimoto dkk, 2000). Waktu respon sangat meningkat ketika film tipis sensitif hidrogen dibuat dengan proses sol-gel di mana sensor dapat mengukur distribusi sepanjang garis serat, seperti sensor hidrogen tradisional yang mengukur pada spasial tertentu.

#### 4.6. Sensor Gas Ozon

Ozon adalah salah satu gas alami yang tersedia di atmosfer. Namun, tingkat tinggi gas ozon di atmosfer berbahaya bagi sistem pernapasan manusia, menyebabkan peradangan dan kemacetan saluran pernapasan (Scientific Facts on Air Pollution Ozone, 2009). Tingkat berbahaya ini dapat hasil dari interaksi antara sinar matahari dan berbagai bahan kimia yang dipancarkan ke lingkungan dengan cara industri. Oleh karena itu, beberapa bahan yang didasarkan pada WO<sub>3</sub> (Aguir dkk, 2002) dan SnO<sub>2</sub> (Sauter dkk,

2000) telah dibuat untuk mendeteksi tingkat ozon di atmosfer.

Sensor novel berdasarkan tungsten trioksida (WO<sub>3</sub>) semikonduktor telah ditemukan untuk menahan banyak yang menjanjikan sebagai alternatif yang lebih murah untuk pemantauan ozon. Misalnya, film tipis WO<sub>3</sub> dideposisi dalam sputtering reaktif magnetron r.f. ke substrat silikon telah diteliti untuk mendeteksi ozon (Aguir dkk, 2002). Sebuah peningkatan yang jelas dari respon sensor ozon terlihat saat ukuran butir dari film WO<sub>3</sub> menurun (Vallejos dkk, 2007). Studi terbaru melaporkan bahwa sensitivitas sensor WO<sub>3</sub> sangat tergantung pada suhu kerja, dimana pada 573 K tanggapan sensor adalah terbesar (Bendahan dkk, 2004). Sifat listrik dari film WO<sub>3</sub> tersputter tergantung pada konsentrasi oksigen selama deposisi dan selama resistivitas terhadap pengukuran suhu. Aktivasi energi yang 0,19, 0,28 dan 0,42 eV pada kisaran 300-723 K yang menunjukkan bahwa konduksi mekanisme tergantung pada konsentrasi oksigen (Bendahan dkk, 2004). Studi lebih lanjut pada bahan yang sama menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi dalam campuran udara / ozon sangat tergantung pada suhu (Guerin dkk, 2005). Dengan demikian, variasi sensitivitas sensor dengan suhu secara langsung terkait dengan suhu ketergantungan efisiensi adsorpsi dan morfologi film yang sangat tergantung pada konsentrasi oksigen selama proses deposisi (Boulmani dkk, 2007).

WO<sub>3</sub> berdasarkan bahan campuran oksida juga telah diteliti untuk pemantauan ozon (Labidi dkk, 2006). Sebagai contoh, kinerja tiga lapisan penginderaan - WO<sub>3</sub>, paladium, dan emas diaktifkan permukaan WO<sub>3</sub> terhadap etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) dan ozon (O<sub>3</sub>) dibandingkan. Au telah ditemukan untuk menjadi penginderaan aktivator baik untuk film tipis WO<sub>3</sub>. Kepekaan sensor Au / WO<sub>3</sub> untuk etanol dan ozon berada dalam rasio 2:1, dan pada suhu 300 °C dapat memberikan kondisi yang stabil, elemen sensitif untuk uap etanol (Labidi dkk, 2006). Sebaliknya, sensor Pd / WO<sub>3</sub> praktis tidak sensitif dalam kisaran suhu ke gas yang diuji dan dapat digunakan

sebagai elemen selektif terhadap ozon (Labidi dkk, 2006). Selain itu, sejumlah kecil dari *nanograins* kobalt diendapkan pada permukaan sensor  $\text{WO}_3$  menghasilkan perubahan yang signifikan dalam konduktansi dari  $n$  ke tipe- $p$  (Belkacem dkk, 2008). Peningkatan konduktansi dari sensor  $\text{WO}_3$  untuk ozon sehingga dapat diamati.

Modifikasi sensor Co / W telah diuji di bawah ozon sebelum dan setelah proses anil dibawah udara kering pada suhu 673 K selama 1,5 jam (Guerin dkk, 2008). Bentuk respon yang diperoleh dan mekanisme deteksi ozon dengan sensor Co /  $\text{WO}_3$  menyoroti fenomena kompleks yang tergantung pada kekuatan logam substrat interaksi dan akibatnya bisa disebabkan oleh pembentukan spesies oksida pada nanopartikel logam. Untuk memahami perubahan yang terjadi setelah terpapar ozon, model dinamis berdasarkan teori adsorpsi Wolkenstein telah dikembangkan (Guerin dkk, 2008). Model ini menyatakan bahwa mekanisme deteksi ozon sensor gas berbasis  $\text{WO}_3$  di udara kering pada dasarnya karena adsorpsi spesies  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}$  dan  $\text{O}$  pada permukaan butir. Kedua hasil simulasi dan eksperimen yang menunjukkan korelasi yang baik (Korotcenkov dkk, 2007).

Sebuah Modular komputerisasi Ozon Sensor System (MOSS) berdasarkan berbagai oksida logam ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ) telah disajikan untuk mengevaluasi sensitivitas dan keandalan sensor yang berbeda / transduser kombinasi. Sensitivitas bahan untuk ozon dan kepekaan terhadap gas-gas lainnya di sekitar kondisi dan kelembaban dievaluasi. Telah ditemukan bahwa bahan berbasis indium memiliki sensitivitas sensor terbesar serta terkecil lintas sensitivitas untuk deteksi ozon (Guerin dkk, 2008). Film  $\text{SnO}_2$  dengan ketebalan 30-200 nm dideposisi dengan semprotan pirolisis menunjukkan respon terhadap ozon yang aplikasi kuantitatif dan cepat memadai untuk digunakan dalam pengendalian ozon dan pemantauan (Sauter dkk, 2000). Kinerja sensor menunjukkan perubahan besar dalam perlawanan setelah terpapar ozon dengan nilai

maksimum untuk sinyal relatif diamati pada suhu operasi berkisar antara 200-350 °C, ( $R_{\text{ozone}} / R_{\text{air}}$ ), di kisaran 102-104 untuk konsentrasi ozon dari ~ 1 ppm di udara pada 35% -45% kelembaban relatifnya (RH) (Korotcenkov dkk, 2007).

#### 4.7. Sensor Gas Senyawa Organik Volatil

Senyawa organik volatil (VOC) yang sangat berbahaya bagi lingkungan dan manusia serta makhluk hidup. Bagi manusia, senyawa ini dapat menyebabkan banyak masalah akut atau kronis seperti iritasi mata, tenggorokan dan masalah paru-paru, serta kanker. Oleh karena itu, selama dekade terakhir, beberapa penelitian dilaporkan pada memodifikasi sensor SMO dengan teknologi film tipis dan tebal untuk gas-gas polutan seperti VOC. Beberapa sensor telah dibuat selama dekade terakhir untuk selektif mendeteksi berbagai komponen VOC seperti etanol, aseton, hidrokarbon, dan LPG. Beberapa sensor SMO ini mengandung logam tunggal atau logam campuran oksida seperti  $\text{SnO}_2$  dan berbasis  $\text{SnO}_2$  (Hellegouarc'h dkk, 2001),  $\text{WO}_3$  dan  $\text{WO}_3$  berbasis bahan oksida (Ionescu dkk, 2005), titanium oksida (Nguyen dkk, 2008), seng oksida (Nguyen dkk, 2008), besioksida (Zhao dkk, 2000), kobalt (Ajamia dkk, 2006), sensor cerium oksida (Xuana dkk, 2009), dan tembaga (Kida dkk, 2009).

Ketika membandingkan sensitivitas film  $\text{SnO}_2$ , sensitivitas gas etanol dapat ditingkatkan sangat dengan penambahan oksida logam dasar seperti  $\text{La}_2\text{O}_3$  untuk  $\text{SnO}_2$ . Gas etanol mengalami dehidrogenasi dan dehidrasi selama  $\text{SnO}_2$  berbasis sebagai oksida basa (misalnya,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ) dan oksida asam (misalnya,  $\text{WO}_3$ ). Akibatnya,  $\text{SnO}_2$  dilapisi dengan lapisan  $\text{La}_2\text{O}_3$  menggunakan larutan 0,5 M  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$  menunjukkan peningkatan dalam menanggapi aseton (~ 3,6 kali) dan etanol (~ 5,5 kali) tanpa variasi dalam tanggapan terhadap propanol, gas CO, dan gas  $\text{H}_2$  (Hieu dkk, 2008). Selain itu, film timah oksida diolah dengan 2,0 % berat  $\text{CeO}_2$  ditemukan secara dramatis meningkatkan sensitivitas dan selektivitas untuk  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,

dengan adanya CO, LPG dan CH<sub>4</sub>. Hasil menunjukkan bahwa selektivitas etanol ditingkatkan oleh faktor dari masing-masing sekitar 5,2, 5,3, dan 48,2 sehubungan dengan CO, metana, dan LPG. Peningkatan selektivitas etanol sangat tergantung pada suhu di mana selektivitas maksimum diamati pada 300 °C. Pada suhu yang lebih tinggi, selektivitas untuk etanol penurunan tajam dan sensor menjadi lebih selektif untuk CO di hadapan etanol dan LPG (Pourfayaz dkk, 2005).

Baru-baru ini, efek CdO doping pada sifat gas-sensing sensor berbasis SnO<sub>2</sub> telah dilaporkan. Doping dengan CdO menyebabkan peningkatan yang luar biasa dalam kepekaan dari SnO<sub>2</sub> untuk C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH dan H<sub>2</sub> dengan sensitivitas terbaik diamati pada 300 °C untuk film SnO<sub>2</sub> didoping dengan 10 % mol Cd. Batas deteksi deposit ini sampai beberapa ppm C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH di udara, sehingga berlaku sebagai *analyzer alcohol* (Hellegouarc'h dkk, 2001).

Telah dicatat bahwa modus deposisi tipis timah berdasarkan film oksida sangat dipengaruhi sifat fisik, listrik, dan bahan kimia (Guerin dkk, 2008). Sebagai contoh, SnO<sub>2</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites dibuat dengan metode kopresipitasi mencapai respon yang luar biasa untuk etanol oleh tuning isi indium. Selain itu, sensor dibuat dengan SnO<sub>2</sub> dengan mendoping dengan Pt, menunjukkan kepekaan terhadap etanol yang lima kali lebih tinggi dari salah satu sensor disiapkan oleh sebuah metode sputtering magnetron RF. Sampel didoping dengan 3% berat Pt memiliki kepekaan yang sangat tinggi terhadap uap etanol dan tanggapan akan linier dalam kisaran ppb dengan batas deteksi dibawah 1 ppb pada suhu operasi 300 °C (Ivanov dkk, 2004).

Akhirnya, film berdasarkan beberapa timah oksida telah dimodifikasi untuk mendeteksi VOC lain seperti uap LPG, asetilena, dan aldehida dengan sensitivitas yang tinggi dan selektivitas. Sebuah SnO<sub>2</sub>-NiO material komposit menyediakan film stabil dan sensitif untuk mendeteksi konsentrasi rendah HCHO (Pin dkk, 2008). Meskipun fakta bahwa respon dan waktu pemulihan dari

sensor film yang menurun dengan cepat dengan peningkatan konsentrasi HCHO; pada konsentrasi yang relatif rendah, mikro sensor gas dapat mendeteksi HCO 0,06 ppm dan menunjukkan selektivitas yang tinggi di hadapan gas gangguan, seperti aseton, alkohol, dan pinene toluene, yang membuatnya menjanjikan untuk mendeteksi HCHO dalam ruangan (Pin dkk, 2008). Qi dkk. telah melaporkan bahwa SnO<sub>2</sub> didoping dengan 6% berat Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menampilkan respon yang bagus untuk C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> yang 16,8 kali lebih besar dari SnO<sub>2</sub> murni pada suhu operasi 180°C. Sensor ini juga menunjukkan sensitivitas tinggi di bawah berbagai kondisi lembab untuk fabrikasi sensor C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (Qi dkk, 2008). Sensor berbasis SnO<sub>2</sub> telah dimodifikasi untuk mendeteksi LPG (Haridasa dkk, 2008). Sebagai contoh, telah dilaporkan bahwa SnO<sub>2</sub> dengan proses RF-sputtering dengan doping antara lain: Pt, Ag, Ni, dan Pb menunjukkan deteksi yang baik terhadap LPG. Di antara semua devais ini, SnO<sub>2</sub>-Pt-ditunjukkan struktur yang meningkatkan respon untuk LPG pada suhu operasi yang relatif rendah dari 260 °C. Dengan doping Pt pada film SnO<sub>2</sub>, hasil karakteristik penginderaan meningkat dengan respon yang cepat (sekitar 100 s) dan pemulihan yang cepat dengan waktu (sekitar 120 s) (haridasa dkk, 2008). Selain itu, sensitivitas gas dari sensor gas LPG adalah SnO<sub>2</sub> menuju ditingkatkan dengan doping Al, yang lebih meningkat dengan doping Ni karena penurunan yang signifikan dalam ukuran butir material komposit (Jain dkk, 2006).

Film tipis TiO<sub>2</sub> dan W / TiO<sub>2</sub> dengan meningkatnya konten W disimpan melalui metode *spin-coating* disajikan etanol tinggi pertunjukan penginderaan (Garzella dkk, 2005). Doping dengan W mengakibatkan respon meningkat sehubungan dengan TiO<sub>2</sub> murni di mana, spin-dilapisi W / TiO<sub>2</sub> film tipis menunjukkan respon etanol sangat tinggi dibandingkan dengan yang sudah disajikan untuk TiO<sub>2</sub> (Sberveglieri dkk, 1999). Selain itu, Nb-Pt *co-doped* TiO<sub>2</sub> dan hibrida tunggal karbon nanotube dinding (SWCNTs) / Nb-Pt

film tipis  $\text{TiO}_2$  *co-doped* disusun oleh sol-gel proses *spin-coating* telah diuji untuk mendeteksi etanol (Nguyen dkk, 2008). Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanggapan terhadap etanol dari Nb-Pt *co-doped* sensor  $\text{TiO}_2$  dengan SWCNTs inklusi meningkat faktor 2-5 tergantung pada suhu operasi dan konsentrasi etanol, dibandingkan dengan yang ada pada sensor tanpa SWCNT inklusi dengan sensitivitas maksimum dan stabilitas pada 335 °C (Sberveglieri dkk, 1999). Film tebal  $\text{WO}_3$  dibuat dengan metode layar-cetak ditunjukkan baik asetona penginderaan uap properti dengan sensitivitas maksimum dicapai pada 300°C bersama dengan respon yang cepat dan waktu pemulihan. Selanjutnya, film layar dicetak tebal  $\text{WO}_3$  yang dapat diandalkan dan digunakan untuk memantau konsentrasi uap asetona selama rentang konsentrasi 25-75 ppm (Khadayate dkk, 2007). Tanggapan dan pemulihan karakteristik dari tebal film  $\text{WO}_3$  yang direproduksi dengan cepat. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan kemungkinan memanfaatkan tebal film  $\text{WO}_3$  sebagai elemen sensor untuk mendeteksi uap asetona (Khadayate dkk, 2007). Menariknya, serbuk  $\text{Cr}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  ( $x = 0-0,5$ , CTO) disiapkan oleh teknik pembakaran (106) menunjukkan peningkatan linear dalam respon sensor untuk asetona sebagai fungsi konsentrasi. Respon cepat dan pemulihan dari bahan-bahan ini menunjukkan potensinya sebagai calon yang sangat baik untuk pemantauan asetona. Peluruhan eksponensial dari respon relatif sensor datang pada nilai konstan setelah 80 jam paparan 1 ppm asetona yang menunjukkan bahwa sensor bisa beroperasi selama beberapa ratus jam dengan kinerja yang luar biasa dan penggunaan terus-menerus (Pokhrel dkk, 2007). Sebuah bubuk ZnO nanopartikel disintesis dengan menggunakan metode presipitasi kimia, dan dimuat dengan dopan yang berbeda (Ru, Mg, Pd, Y, La, V, dan Na) melalui impregnasi. Kemudian disiapkan bubuk ZnO, menunjukkan respon gas yang sangat baik untuk alkohol dan asetaldehida dengan tidak menanggapi etana. Sebagai tambahan, di

antara semua dopan, Ru adalah dopan optimal yang dapat meningkatkan respon sensor untuk  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  (Xu dkk, 2008). Berbagai oksida logam yang dimodifikasi oleh doping dengan lanthanum telah dilaporkan sebagai sensor VOC selektif. Misalnya, jenis-perovskit nanokristal film tipis dari  $\text{LaFeO}_3$  diperoleh dengan menggunakan teknik lapisan sol-gel terbukti menjadi sensor etanol yang baik yang dapat digunakan sebagai detektor untuk berbagai konsentrasi  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  antara 100-1.000 ppm dengan stabilitas yang baik (Zhao dkk, 2000).

Formula dengan rumus  $\text{La}_{1-x}\text{Mg}_x\text{FeO}_3$  ( $x = 0-0,7$ ) merupakan serbuk nano yang dibuat menggunakan metode sol-gel. Sampel ini  $\text{La}_{1-x}\text{Mg}_x\text{FeO}_3$ , dimana: Mg dengan komposisi  $x$  mempengaruhi struktur, resistensi di udara, dan gas penginderaan untuk gas metana. Resistansi  $\text{La}_{1-x}\text{Mg}_x\text{FeO}_3$  adalah lebih kecil dari  $\text{LaFeO}_3$  dengan  $x \leq 0,1$ . Sensor berbasis  $\text{La}_{0,9}\text{Mg}_{0,1}\text{FeO}_3$  menunjukkan respon yang tinggi untuk gas metana, suhu operasi rendah, dan stabilitas yang sangat baik di udara (Liu dkk, 2008). Namun, dengan adanya campuran gas seperti metanol dan CO, sensor kekurangan selektivitas. Baru-baru ini,  $\text{LaCoO}_3$  perovskit telah dimodifikasi sebagai filter aktif untuk menghilangkan sensitivitas sensor untuk CO dan etanol (Ajamia dkk, 2006). Kedua CO dan etanol yang benar-benar dihapus oleh filter pada temperatur 190 °C. Pada 250 °C, sensitivitas sensor untuk etanol menurun secara drastis 158 sampai 44 dan untuk CO menurun dari 2,2 sampai 0,9, ketika filter aktif digunakan. Oleh karena itu, hanya metana dengan sensor Pt/ $\text{SnO}_2$  pada suhu yang lebih tinggi dari 190 °C, dan sensor ini menunjukkan sensitivitas tinggi untuk metana. Hasil dari penyaringan perovskit  $\text{LaCoO}_3$  untuk menghilangkan sensitivitas sensor untuk gas CO dan etanol, membuat sensor itu menjadi sangat selektif untuk gas metana dalam campuran gas CO dan etanol di udara (Ajamia dkk, 2006).

## 5. Kesimpulan

Dalam tulisan ini, menurut penulis ada beberapa hal yang penting dan berpotensi pada

sensor *array* yaitu untuk mendeteksi selektif dan sensitif untuk masing-masing polutan beracun yang diteliti. Karena itu, sistem tersebut dapat memiliki dampak besar pada kesehatan manusia dan keselamatan untuk keperluan rumah tangga serta, berbagai keamanan industri dan tanah serta air. Di bawah ini adalah ringkasan dari sensor berbasis SMO dibedakan untuk spesifik mendeteksi polutan:

- a). Karbon nanotube yang dimodifikasi dengan bahan SMO seperti komposit  $\text{WO}_3$  dapat mendeteksi ppb tingkat konsentrasi gas nitrogen oksida ( $\text{NO}$  atau  $\text{NO}_2$ ) pada suhu kamar (Penza dkk, 1998 dan Balazsi dkk, 2008).
- b). Film tipis timah oksida dan tungsten oksida didoping dengan logam mulia seperti platinum dan emas memberikan deteksi sensitif  $\text{SO}_2$  tetapi divais ini beroperasi pada suhu di atas  $350^\circ\text{C}$  (Sberveglieri dkk, 1990 dan Shimizu dkk, 2001 dan Stankova dkk, 2004)
- c). Film tipis timah oksida dengan ketebalan 200 nm ditemukan menjadi sensor yang sangat sensitif terhadap  $\text{H}_2\text{S}$  pada  $150^\circ\text{C}$  (Vuong dkk, 2005 dan Ruokamo dkk, 1994)
- d). Sebuah sensor berbasis  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  adalah sensor yang sensitif dan selektif untuk gas amonia ( $\text{NH}_3$ ) pada suhu ruang (Patil dkk, 2007).
- e).  $\text{SnO}_2$  didoping dengan perak (Ag) atau platinum (Pt) sebagai sensor yang unik untuk mendeteksi gas  $\text{H}_2$  (Li dkk, 1998).
- f). Film  $\text{WO}_3$  mewakili divais yang baik untuk mendeteksi ozon di mana ketebalan film, ukuran butir, dan suhu operasi harus disesuaikan untuk mencapai respon yang optimal (Guerin dkk, 2005 dan Labidi dkk, 2006)
- g).  $\text{SnO}_2$  didoping dengan oksida logam seperti  $\text{La}_2\text{O}_3$  dan  $\text{CdO}$  memberikan respon yang unik terhadap alkohol dalam udara sehingga sensor ini sebagai detektor alkohol (Vallejos dkk, 2007).

## REFERENSI

- Aguir, K.; Lemire, C.; Lollman, D.B. Electrical properties of reactively sputtered  $\text{WO}_3$  thin films as ozone gas sensor. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2002, 84, 1–5.
- Ajamia, S.; Mortazavia, Y.; Khodadadia, A.; Pourfayaza, F.; Mohajerzadehb, S. Highly selective sensor to  $\text{CH}_4$  in presence of CO and ethanol using  $\text{LaCoO}_3$  perovskite filter with  $\text{Pt/SnO}_2$ . *Sens. Actuat. B: Chem.* 2006, 117, 420–425.
- Ajamia, S.; Mortazavia, Y.; Khodadadia, A.; Pourfayaza, F.; Mohajerzadehb, S. Highly selective sensor to  $\text{CH}_4$  in presence of CO and ethanol using  $\text{LaCoO}_3$  perovskite filter with  $\text{Pt/SnO}_2$ . *Sens. Actuat. B: Chem.* 2006, 117, 420–425.
- Balázsi, C.; Sedláčková, K.; Llobet, E.; Ionescu, R. Novel hexagonal  $\text{WO}_3$  nanopowder with metal decorated carbon nanotubes as  $\text{NO}_2$  gas sensor. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 133, 151–155.
- Belkacem, W.; Labidi, A.; Guerin, J.; Mliki, N.; Aguir, K. Cobalt nanograins effect on the ozone detection by  $\text{WO}_3$  sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 132, 196–201.
- Barazzouk, S.; Tandon, R.P.; Hotchandani, S.  $\text{MoO}_3$ -based sensor for  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  and  $\text{CH}_4$  detection. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2006, 119, 691–694.
- Berger, F.; Fromm, M.; Chambaudet, A.; Planade, R. Tin dioxide-based gas sensors for  $\text{SO}_2$  detection: a chemical interpretation of the increase in sensitivity obtained after a primary detection. *Sens. Actuat. B: Chem.* 1997, 45, 175–181.
- Bendahan, M.; Boulmani, R.; Seguin, J.L.; Aguir, K. Characterisation of ozone sensors based on  $\text{WO}_3$  reactively sputtered films: influence of  $\text{O}_2$  concentration in the sputtering gas and working temperature. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2004, 100, 320–324.
- Bendahan, M.; Lauque, P.; Seguin, J.; Aguir, K.; Knauth, P. Development of an ammonia gas sensor. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2003, 95, 170–176.
- Bielanski, A.; Deren, J.; Haber, J. Electric conductivity and catalytic activity of semiconducting oxide catalysts. *Nature* 1957, 179, 668–669.
- Boakye, F.; Nusenu, D. The energy band gap of cadmium sulphide. *Solis State Commun.* 1997, 102, 323–326.
- Boulmani, R.; Bendahan, M.; Lambert-Mauriate, C.; Gillet, M.; Aguir, K. Correlation between rf-sputtering parameters and  $\text{WO}_3$  sensor response towards ozone. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2007, 125, 622–627.
- Boulova, M.; Gaskov, A.; Lucazeau, G. Tungsten oxide reactivity versus  $\text{CH}_4$ , CO and  $\text{NO}_2$  molecules studied by Raman spectroscopy. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2001, 81, 99–106.

- Brattain, W.H.; Bardeen, J. Surface properties of germanium. *Bell. Syst. Tec. J.* **1953**, *1*, 1–41.
- Brunet, J.; Parra Garcia, V.; Pauly, A.; Varenne, C.; Lauron, B. An optimised gas sensor microsystem for accurate and real-time measurement of nitrogen dioxide at ppb level. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *134*, 632–639.
- Cox, P.A. *Transition Metal Oxides: An Introduction to their Electronic Structure and Properties*; Clarendon Press: Oxford, UK, 1992.
- Comini, E.; Ferroni, M.; Guidi, V.; Faglia, G.; Martinelli, G.; Sberveglieri, G. Nanostructured mixed oxides compounds for gas sensing applications. *Sens. Actuat. B: hem.* **2002**, *84*, 26–32.
- de Lacy Costello, B.P.; Ewen, R.J.; Guernion, N.; Ratcliffe, N.M. Highly sensitive mixed oxide sensors for the detection of ethanol. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2002**, *87*, 207–210.
- Ferroni, M.; Boscarino, D.; Comini, E.; Gnani, D.; Guidi, V.; Martinelli, G.; Nelli, P.; Rigato, V.; Sberveglieri, G. Nanosized thin films of tungsten-titanium mixed oxides as gas sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **1999**, *58*, 289–294.
- Filippini, D.; Fraigi, L.; Aragón, R.; Weimar, U. Thick film Au-gate field-effect devices sensitive to NO<sub>2</sub>. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2002**, *81*, 296–300.
- Ford, P.C.; Lorkovic, I.M. Mechanistic aspects of the reactions of nitric oxide with Transition-Metal complexes. *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 993–1018.
- Frühberger, B.; Grunze, M.; Dwyer, D.J. Surface chemistry of H<sub>2</sub>S-sensitive tungsten oxide films. *Sens. Actuat. B: Chem.* **1996**, *31*, 167–174.
- Gamburg, Y.D.; Grosheva, M.; Biallozor, S.; Hass, M. The electrochemical deposition of nickel from electrolytes containing malonic acid. *Surf. Coat. Technol.* **2002**, *150*, 95–100.
- Garzella, C.; Bontempi, E.; Depero, L.E.; Vomiero, A.; Della Mea, G.; Sberveglieri, G. Novel selective ethanol sensors: W/TiO<sub>2</sub> thin films by sol-gel spin-coating. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2003**, *93*, 495–502.
- Ghimbeu, C.M.; Lumbreras, M.; Siadat, M.; Van Landschoot, R.C.; Schoonman, J. Electrostatic sprayed SnO<sub>2</sub> and Cu-doped SnO<sub>2</sub> films for H<sub>2</sub>S detection. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *133*, 694–698.
- Ghimbeu, C.M.; Lumbreras, M.; Siadat, M.; Van Landschoot, R.C.; Schoonman, J. Electrostatic sprayed SnO<sub>2</sub> and Cu-doped SnO<sub>2</sub> films for H<sub>2</sub>S detection. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *133*, 694–698.
- Gong, J.W.; Chen, Q.F.; Fei, W.F.; Seal, S. Micromachined nanocrystalline SnO<sub>2</sub> chemical gas sensors for electronic nose. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2004**, *102*, 117–125.
- Gong, J.W.; Sun, J.R.; Chen, Q.F. Micromachined sol-gel carbon nanotube/SnO<sub>2</sub> nanocomposite hydrogen sensor. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *130*, 829–835.
- Gong, J.; Chen, Q.; Lian, M.; Liu, N.; Stevenson, R.G.; Adami, F. Micromachined nanocrystalline silver doped SnO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>S sensor. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2006**, *114*, 32–39.
- Guerin, J.; Aguir, K.; Bendahan, M.; Lambert-Mauriat, C. Thermal modelling of a WO<sub>3</sub> ozone sensor response. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2005**, *104*, 289–293.
- Guerin, J.; Bendahan, M.; Aguir, K. A dynamic response model for the WO<sub>3</sub>-based ozone sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *128*, 462–467.
- Haridasa, D.; Sreenivasa, K.; Gupta, V. Improved response characteristics of SnO<sub>2</sub> thin film loaded with nanoscale catalysts for LPG detection. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *133*, 270–275.
- Heiland, G. Zum Einfluss von Wasserstoff auf die elektrische leitfähigkeit von ZnO-kristallen. *Zeit. Phys.* **1954**, *138*, 459–464.
- Hellegouarc'h, F.; Arefi-Khonsari, F.; Planade, R.; Amouroux, J. PECVD prepared SnO<sub>2</sub> thin Films for ethanol sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2001**, *73*, 27–34.
- Hellegouarc'h, F.; Arefi-Khonsari, F.; Planade, R.; Amouroux, J. PECVD prepared SnO<sub>2</sub> thin Films for ethanol sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2001**, *73*, 27–34.
- Henrich, V.E.; Cox, P.A. *The Surface Science of Metal Oxides*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1994.
- Hieu, N.; Kim, H.; Ju, B.; Lee, J. Enhanced performance of SnO<sub>2</sub> nanowires ethanol sensor by functionalizing with La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *133*, 228–234.
- Ionescu, R.; Hoel, A.; Granqvist, C.G.; Llobet, E.; Heszler, P. Ethanol and H<sub>2</sub>S gas detection in air and in reducing and oxidising ambience: application of pattern recognition to analyse the output from temperature-modulated nanoparticulate WO<sub>3</sub> gas sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2005**, *104*, 124–131.
- Ivanov, P.; Llobet, E.; Vilanova, X.; Brezmes, J.; Hubalek, J.; Correig, X. Development of high sensitivity ethanol gas sensors based on Pt-doped SnO<sub>2</sub> surfaces. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2004**, *99*, 201–206.
- Jain, G.H.; Patil, L.A.; Wagh, M.S.; Patil, D.R.; Patil, S.A.; Amalnerkar, D.P. Surface modified BaTiO<sub>3</sub> thick film resistors as H<sub>2</sub>S gas sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2006**, *117*, 159–165.
- Jain, K.; Pant, R.P.; Lakshmikummar, S.T. Effect of Ni doping on thick film SnO<sub>2</sub> gas sensor. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2006**, *113*, 823–829.
- Jiun-Chan, Y.; Prabir, K.D. Solution-based synthesis of efficient WO<sub>3</sub> sensing electrodes

- for high temperature potentiometric NO<sub>x</sub> sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2009**, *136*, 523–529.
- Kappler, J.; Tomescu, A.; Barsan, N.; Weimar, U. CO consumption of Pd doped SnO<sub>2</sub> based sensors. *Thin Solid Films* **2001**, *391*, 186–191.
- Li, J.G.; Kawi, S. Synthesis, characterization and sensing application of novel semiconductor oxides. *Talanta* **1998**, *45*, 759–766.
- Kapse, V.D.; Ghosh, S.A.; Raghuvanshi, F.C.; Kapse, S.D. Enhanced H<sub>2</sub>S sensing characteristics of La-doped In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Effect of Pd sensitization. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2009**, *137*, 681–686.
- Khatko, V.; Llobet, E.; Vilanova, X.; Brezmes, J.; Hubalek, J.; Malysz, K.; Correig, X. Gas sensing properties of nanoparticle indium-doped WO<sub>3</sub> thick films. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2005**, *111–112*, 45–51.
- Khadayate, R.S.; Sali, J.V.; Patil, P.P. Acetone vapor sensing properties of screen printed WO<sub>3</sub> thick films. *Talanta* **2007**, *72*, 1077–1081.
- Kida, T.; Minami, T.; Kishib, S.; Yuasa, M.; Shimano, K.; Yamazoe, N. Planar-type BiCuVO<sub>x</sub> solid electrolyte sensor for the detection of volatile organic compounds. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2009**, *137*, 147–153.
- Korotcenkov, G.; Blinov, I.; Ivanov, M.; Stetter, J.R. Ozone sensors on the base of SnO<sub>2</sub> films deposited by spray pyrolysis. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2007**, *120*, 679–686.
- Krilyov, O.V.; Kisilev, V.F. *Adsorption and Catalysis on the Transition Metals and their Oxides*; Springer-Verlag Berlin: Heidelberg, 1989.
- Labidi, A.; Gillet, E.; Delamare, R.; Maaref, M.; Aguir, K. Ethanol and ozone sensing characteristics of WO<sub>3</sub> based sensors activated by Au and Pd. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2006**, *120*, 338–345.
- Leo, G.; Rella, R.; Siciliano, P.; Capone, S.; Alonso, J.C.; Pankov, V.; Ortiz, A. Sprayed SnO<sub>2</sub> thin films for NO<sub>2</sub> sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **1999**, *58*, 370–374.
- Liang, X.H.; Zhong, T.G.; Quan, B.F.; Wang, B.; Guan, H.S. Solid-state potentiometric SO<sub>2</sub> sensor combining NASICON with V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-doped TiO<sub>2</sub> electrode. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *134*, 25–30.
- Liang, X.; He, Y.; Liu, F.; Wang, B.; Zhong, T.; Quan, B.; Lu, G. Solid-state potentiometric H<sub>2</sub>S sensor combining NASICON with Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-doped SnO<sub>2</sub> electrode. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2007**, *125*, 544–549.
- Lin, H.; Hsu, C.; Yang, H.; Lee, P.; Yang, C. Nanocrystalline WO<sub>3</sub>-based H<sub>2</sub>S sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **1994**, *22*, 63–68.
- Liu, X.; Cheng, B.; Hu, J.; Qin, H.; Jiang, M. Preparation, structure, resistance and methane-gas sensing properties of nominal La<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub>. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *133*, 340–344.
- Marquis, B.T.; Vetelino, J.F. A semiconducting metal oxide sensor array for the detection of NO<sub>x</sub> and NH<sub>3</sub>. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2001**, *65*, 100–110.
- Moseley, P.T. Solid state gas sensors. *Meas. Sci. Technol.* **1997**, *8*, 223–237.
- Moseley, P.T., Norris, J.O., Williams, D.E., Eds.; *Techniques and Mechanisms in Gas Sensing*; Adam Hilger: Bristol, UK, 1991.
- Nguyen, V.H.; Nguyen, V.D.; Pham Thanh, H.; Nguyen, D.C. Inclusion of SWCNTs in Nb/Pt co-doped TiO<sub>2</sub> thin film sensor for ethanol vapor detection. *Phys. E* **2008**, *40*, 2950–2958.
- Nguyen, V.H.; Nguyen, V.D.; Pham Thanh, H.; Nguyen, D.C. Inclusion of SWCNTs in Nb/Pt co-doped TiO<sub>2</sub> thin film sensor for ethanol vapor detection. *Phys. E* **2008**, *40*, 2950–2958.
- Patil, D.R.; Patil, L.A.; Patil, P.P. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-activated ZnO thick film resistors for ammonia gas sensing operable at room temperature. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2007**, *126*, 368–374.
- Penza, M.; Rossi, R.; Alvisi, M.; Cassano, G.; Signore, M.A.; Serra, E.; Giorgi, R. Pt- and Pd-nanoclusters functionalized carbon nanotubes networked films for sub-ppm gas sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *135*, 289–297.
- Penza, M.; Martucci, C.; Cassano, G. NO<sub>x</sub> gas sensing characteristics of WO<sub>3</sub> thin films activated by noble metals (Pd, Pt, Au) layers. *Sens. Actuat. B: Chem.* **1998**, *50*, 52–59.
- Penza, M.; Cassano, G.; Tortorella, F. Gas recognition by activated WO<sub>3</sub> thin-film sensors array. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2001**, *81*, 115–121.
- Petrov, V.V.; Nazarova, T.N.; Korolev, A.N.; Kopilova, N.F. Thin sol-gel SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>x</sub>-AgO<sub>y</sub> films for low temperature ammonia gas sensor. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *133*, 291–295.
- Pin, L.V.; Tang, Z.A.; Yu, J.; Zhang, F.T.; Wei, G.F.; Huang, Z.X.; Hu, Y. Study on a micro-gas sensor with SnO<sub>2</sub>-NiO sensitive film for indoor formaldehyde detection. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2008**, *132*, 74–80.
- Pnozoni, A.; Comini, E.; Ferroni, M.; Sberveglieri, G. Nanostructured WO<sub>3</sub> deposited by modified thermal evaporation for gas-sensing applications. *Thin Solid Films* **2005**, *490*, 81–85.
- Pokhrel, S.; Yang, M.; Huo, L.; Zhao, H.; Gao, S. Cr<sub>2-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>3</sub> (x ≤ 0.5) as CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub> sensitive resistors. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2007**, *125*, 550–555.
- Pourfayaz, F.; Khodadadi, A.; Mortazavi, Y.; Mohajerzadeh, S.S. CeO<sub>2</sub> doped SnO<sub>2</sub> sensor selective to ethanol in presence of CO, LPG and CH<sub>4</sub>. *Sens. Actuat. B: Chem.* **2005**, *108*, 172–176.

- Qi, Q.; Zhang, T.; Zheng, X.; Fan, H.; Liu, L.; Wang, R.; Zeng, Y. Electrical response of  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ -doped  $\text{SnO}_2$  to  $\text{C}_2\text{H}_2$  and effect of humidity interference. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 134, 36–42.
- Ruokamo, I.; Kärkkäinen, T.; Huusko, J.; Ruokanen, T.; Blomberg, M.; Torvela, H.; Lantto, V.  $\text{H}_2\text{S}$  response of  $\text{WO}_3$  thin-film sensors manufactured by silicon processing technology. *Sens. Actuat. B: Chem.* 1994, 18–19, 486–488.
- Sayago, I.; Santos, H.; Horrillo, M.C.; Aleixandere, M.; Fernandez, M.J.; Terrado, E.; Tacchini, I.; Aroz, R.; Maser, W.K.; Benito, A.M.; Martinez, M.T.; Gutierrez, J.; Munoz, E. Carbon nanotube networks as gas sensors for  $\text{NO}_2$  detection. *Talanta* 2008, 77, 758–764
- Sarma, T.; Tao, S. An active core fiber optic sensor for detecting trace  $\text{H}_2\text{S}$  at high temperature using a cadmium oxide doped porous silica optical fiber as a transducer. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2007, 127, 471–479.
- Sauter, D.; Weimar, U.; Noetzel, G.; Mitrovics, J.; Gopel, W. Development of Modular Ozone Sensor System for application in practical use. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2000, 69, 1–9.
- Sberveglieri, G.; Benussi, P.; Coccoli, G.; Groppelli, S.; Nelli, P. Reactivity sputtered indium tin oxide polycrystalline thin films as  $\text{NO}$  and  $\text{NO}_2$  gas sensors. *Thin Solid Films* 1990, 186, 349–360.
- Sberveglieri, G.; Atashbar, M.Z.; Li, Y.; Wlodarski, W.; Comini, E.; Faglia, G.; Ghantasala, M.K. Nanocrystalline  $\text{TiO}_2$  thin films prepared by the sol-gel process for alcohol sensing. In *Proceedings of the 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 1999)*, Sendai, Japan, June 7–10, 1999; pp. 1690–1693.
- Seiyama, T.; Kato, A.; Fujiishi, K.; Nagatani, M. A new detector for gaseous components using semiconductive thin films. *Anal. Chem.* 1962, 34, 1502f.
- Sekimoto, S.; Nakagawa, H.; Okazaki, S.; Fukuda, K.; Asakura, S.; Shigemori, T.; Takahashi, S.A. Fibre-optic evanescent-wave hydrogen gas sensor using palladium-supported tungsten oxide. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2000, 66, 142–
- Shalaka, N.; Ravi, V.; Srinivas, D.; Mulla, I.S.; Gosavi, S.W.; Kulkarni, S.K. EPR and DRS evidence for  $\text{NO}_2$  sensing in Al-doped  $\text{ZnO}$ . *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 130, 668–673.
- Shimizu, Y.; Matsunaga, N.; Hyodo, T.; Egashira, M. Improvement of  $\text{SO}_2$  sensing properties of  $\text{WO}_3$  by noble metal loading. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2001, 77, 35–40.
- Sekhar, C.R.; Manu, H.; Rao, C.N.  $\text{H}_2\text{S}$  sensors based on tungsten oxide nanostructures. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 128, 488–493.
- Sen, S.; Bhandarkar, V.; Muthe, K.P.; Roy, M.; Deshpande, S.K.; Aiyer, R.C.; Gupta, S.K.; Yakhmi, J.V.; Sahni, V.C. Highly sensitive hydrogen sulphide sensors operable at room temperature. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2006, 115, 270–275.
- Siciliano, T.; Di Giulio, M.; Tepore, M.; Filippo, E.; Micocci, G.; Tepore, A. Tellurium sputtered thin films as  $\text{NO}_2$  gas sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 135, 250–254.
- Tamaki, J.; Miyaji, A.; Makinodan, J.; Ogura, S.; Konishi, S. Effect of micro-gap electrode on detection of dilute  $\text{NO}_2$  using  $\text{WO}_3$  thin film microsensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2005, 108, 202–206.
- Solis, J.L.; Saukko, S.; Kish, L.B.; Granqvist, C.G.; Lantto, V. Nanocrystalline tungsten oxide thick-films with high sensitivity to  $\text{H}_2\text{S}$  at room temperature. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2001, 77, 316–321.
- Stankova, M.; Vilanova, X.; Calderer, J.; Llobet, E.; Ivanov, P.; Gràcia, I.; Cané, C.; Correig, X. Detection of  $\text{SO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  in  $\text{CO}_2$  stream by means of  $\text{WO}_3$ -based micro-hotplate sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2004, 102, 219–225.
- Suryawanshi, D.N.; Patil, D.R.; Patil, L.A.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -activated  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  thick films as temperature dependent gas sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 134, 579–584.
- Tomchenko, A.A. Structure and gas-sensitive properties of  $\text{WO}_3$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$  mixed thick films. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2000, 68, 48–52.
- Tong, M.; Dai, G.; Gao, D.  $\text{WO}_3$  thin film sensor prepared by sol-gel technique and its low temperature sensing properties to trimethylamine. *Mater. Chem. Phys.* 2001, 69, 176–179.
- Vallejos, S.; Khatko, V.; Aguir, K.; Ngo, K.A.; Calderer, J.; Gracia, I.; Cane, C.; Llobet, E.; Correig, X. Ozone monitoring by micro-machined sensors with  $\text{WO}_3$  sensing films. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2007, 126, 573–578.
- Vuong, D.; Sakai, G.; Shimano, K.; Yamazoe, N. Hydrogen sulfide gas sensing properties of thin films derived from  $\text{SnO}_2$  sols different in grain size. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2005, 105, 437–442.
- Vuong, D.; Sakai, G.; Shimano, K.; Yamazoe, N. Hydrogen sulfide gas sensing properties of thin films derived from  $\text{SnO}_2$  sols different in grain size. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2005, 105, 437–442.
- Wagh, M.S.; Jain, G.H.; Patil, D.R.; Patil, S.A.; Patil, L.A. Modified zinc oxide thick film resistors as  $\text{NH}_3$  gas sensor. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2006, 115, 128–133.
- Wang, Y.; Wang, S.; Zhao, Y.; Zhu, B.; Kong, F.; Wang, D.; Wu, S.; Huang, W.; Zhang, S.  $\text{H}_2\text{S}$  sensing characteristic of Pt-doped  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  thick film sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2007, 125, 79–84.

- Wang, Y.D.; Wu, X.; Su, Q.; Li, Y.; Zhou, Z. Ammonia-sensing characteristics of Pt and SiO<sub>2</sub> doped SnO<sub>2</sub> materials. *Solid-State Electron.* 2001, 45, 347–350.
- Widodo, Slamet, and Sudrajad, Nanang Synthesis of Indium Oxide (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Nano Particles Using Sol Gel Method as Active Material on Gas Sensor, 7th International Conference on Physics and Its Applications 2014 (ICOPIA 2014), indexing in EI/Compendex and Scholar Google.
- Widodo, Slamet, Teknologi Proses Pembuatan Divais Sensor Gas NO<sub>2</sub> Dengan Lapisan Aktif In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Jurnal "Alchemy" Jurnal Penelitian Kimia*, Indexed at google scholar ISSN : 1412-4092, Volume 10, No. 1, 2014, Universitas Sebelas Maret Surakarta Indonesia, hal: 69-86.
- Wong, C.; Chu, X.; Wu, M. Detection of H<sub>2</sub>S down to ppb levels at room temperature using sensors based on ZnO nanorods. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2006, 113, 320–323.
- Xu, P.C.; Cheng, Z.X.; Pan, Q.Y.; Xu, J.Q.; Xiang, Q.; Yu, W.J.; Chu, Y.L. High aspect ratio In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanowires: Synthesis, mechanism and NO<sub>2</sub> gas-sensing properties. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 130, 802–808.
- Xu, J.; Hanb, J.; Zhang, Y.; Sun, Y.; Xie, B. Studies on alcohol sensing mechanism of ZnO based gas sensors. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2008, 132, 334–339.
- Xuana, Y.; Hua, J.; Xua, K.; Houa, X.; Lva, Y. Development of sensitive carbon disulfide sensor by using its cataluminescence on nanosized-CeO<sub>2</sub>. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2009, 136, 218–223.
- Yamazoe, N.; Sakai, G.; Shimanoe, K. Oxide semiconductor gas sensors. *Catal. Surv. Asia* 2003, 7, 63–75.
- Yamazoe, N. Toward innovations of gas sensor technology. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2005, 108, 2–14.
- Yang, J.; Dutta, P.K. Promoting selectivity and sensitivity for a high temperature YSZ-based electrochemical total NO<sub>x</sub> sensor by using a Pt-loaded zeolite Y filter. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2007, 125, 30–39.
- Yang, J.; Dutta, P.K. Promoting selectivity and sensitivity for a high temperature YSZ-based electrochemical total NO<sub>x</sub> sensor by using a Pt-loaded zeolite Y filter. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2007, 125, 30–39.
- Yongki, M.; Harry, L.,T.; Stefan, P.; Jürgen, W.; Harald, B. Gas response of reactively sputtered ZnO films on Si-based micro-array. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2003, 93, 435–441.
- Zhao, S.; Sin, J.; Xu, B.; Zhao, M.; Peng, Z.; Cai, H. A high performance ethanol sensor based on field-effect transistor using a LaFeO<sub>3</sub> nanocrystalline thin-film as a gate electrode. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2000, 64, 83–87.
- Zhao, S.; Sin, J.; Xu, B.; Zhao, M.; Peng, Z.; Cai, H. A high performance ethanol sensor based on field-effect transistor using a LaFeO<sub>3</sub> nanocrystalline thin-film as a gate electrode. *Sens. Actuat. B: Chem.* 2000, 64, 83–87.