



Proses Teknologi Pembuatan Divais Sensor Gas CO Berbasis Timah Oksida (SnO_2)

Slamet Widodo*

Pusat Riset Telekomunikasi (PR-Tel). Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

*Penulis korespondensi, Surel: slametwidodo50@gmail.com, slam001@brin.go.id

Abstrak

Dalam tulisan ini dibahas perancangan dan fabrikasi sensor gas berbasis timah oksida (SnO_2) dengan teknologi film tebal (*thick film technology*). Sensor yang dirancang terdiri dari komponen-komponen penyusun, yaitu: pemanas (*heater*), elektroda (*interdigital fingers*), dan lapisan sensitif dari bahan timah oksida (SnO_2). Sensor ini dibuat multilayer. Komponen heater dan dua buah elektroda telah dirancang dalam satu permukaan dengan mempertimbangkan aspek miniaturisasi, distribusi panas, dan konsumsi daya dari divais sensor. Proses pembuatan pemanas (*heater*) dan elektroda dilakukan di atas substrat alumina (Al_2O_3) dengan pasta silver/perak (Ag).

Kata kunci: Sensor gas; heater; elektroda; lapisan sensitif SnO_2 ; thick film; substrat Al_2O_3

Abstract

This paper described the design and fabrication of tin oxide (SnO_2) based gas sensors by thick-film technology. Sensors are designed consisting of constituent components as such as: heater, electrodes (interdigital fingers), and the sensitive layer of the tin oxide (SnO_2) material. These sensors are made multilayers. Heater and two components have been designed in a single electrode surface by considering the aspects of miniaturization, heat distribution, and power consumption of sensor devices. The process of heater and the electrode on a substrate made of alumina (Al_2O_3) with silver paste (Ag).

1. Pendahuluan

Pencemaran udara merupakan masalah global yang dihadapi hampir di seluruh kota besar di dunia. Udara di sekitar kita terdiri dari campuran berbagai macam gas, yang dapat diakibatkan oleh proses alamiah ataupun pencemaran udara dari ulah manusia antara lain di bidang transportasi, kegiatan industri atau kebakaran hutan dan lain-lain. Gas yang berbahaya terhadap kesehatan manusia antara lain SO_x , NO_x , NH_3 , H_2S , CO, dan masih banyak yang lainnya (Barsan, 2008).

Dampak dari pencemaran udara bersifat akumulatif dari hari ke hari. Walaupun dampak tersebut berbeda-beda untuk tiap individu, namun pemaparan dalam jangka waktu lama akan berakibat pada gangguan kesehatan seperti bronkitis, emfisema, dan kanker paru-paru. Dampak tersebut akan terasa lebih rentan bagi balita dan individu berusia lanjut. Yang sangat mengerikan adalah dampak timbal bagi anak-anak karena dapat mempengaruhi fungsi otak dan inteligensi, serta merusak berbagai organ tubuh seperti ginjal, sistem syaraf, dan reproduksi. Dalam Tabel 1 dapat dilihat jenis zat-zat pencemar udara, sumber utama emisinya, serta standar bagi kesehatan menurut aturan WHO (Cirera, 2000).

Melihat dari kondisi lingkungan dan pencemaran udara seperti di atas, maka perlu kiranya suatu pengontrolan terhadap intensitas pembuangan atau setidaknya pengurangan terhadap konsentrasi gas-gas buangan tersebut. Untuk itu, diperlukan suatu detektor berupa sensor elektrokimia untuk mengetahui konsentrasi gas-gas buangan tersebut. Namun, instrumentasi sensor yang akurat yang sudah ada cenderung relatif mahal. Di sisi lain,

teknologi di bidang mikroelektronika mengalami perkembangan pesat yang menawarkan pengembangan dan produksi dengan biaya yang relatif murah, termasuk untuk teknologi sensor gas. Sensor gas mikroelektronika yang sukses dibuat adalah berbasis bahan metal oksida (MO_x), di antaranya ZnO , Fe_2O_3 , dan SnO_2 .

Tabel 1. Zat-zat pencemar udara, sumber emisi, dan standar kesehatan menurut WHO (Cirera, 2000)

Pencemar	Sumber	Standar Kesehatan
Karbon Monoksida (CO)	Buangan kendaraan bermotor	10 mg/m ³ (9 ppm)
Sulfur Dioksida (SO ₂)	Fasilitas pembangkit listrik	80 µg/m ³ (0,03 ppm)
Partikulat Matter (SPM)	Buangan kendaraan bermotor	50 µg/m ³ selama 1 tahun
Nitrogen Dioksida (NO ₂)	Buangan kendaraan bermotor	100 pg/m ³ (0,05 ppm) selama 1 jam
Ozon (O ₃)	Terbentuk di atmosfer	235 µg/m ³ (0,12 ppm) selama 1 jam

Yang paling populer dan banyak dikembangkan adalah sensor gas berbasis SnO_2 karena berbagai kelebihanannya dibanding bahan lain. Pengembangan sensor gas berbasis SnO_2 yang dinilai paling berhasil adalah oleh seorang ilmuwan Jepang yaitu Prof. Naayoshi Taguchi. Taguchi berhasil mengembangkan sensor gas keramik yang diberi nama *Taguchi Gas Sensor* (TGS) yang hingga saat ini sudah diproduksi secara masal oleh perusahaannya.

Kelebihan dari sensor gas SnO_2 yang tidak dimiliki oleh sensor yang dibuat secara konvensional antara lain adalah masa pemakaian yang lama dan relatif stabil, mempunyai resistansi yang baik terhadap *corrosive gases*, mempunyai konstruksi yang kuat dan ketahanan mekanik yang baik, biaya produksi yang relatif murah, dimensi kecil, dan mudah dalam penggunaan dan perawatan (Hann, 2002).

Namun, meskipun sensor berbasis SnO_2 merupakan yang paling banyak dipahami dan dikembangkan, hingga saat ini sensor berbasis SnO_2 belum bisa menghasilkan sensitivitas dan selektivitas yang tinggi (Licznarski, 2004: 37). Dari uraian dan alasan di atas maka dalam kegiatan ini akan dilakukan perancangan dan fabrikasi suatu sensor gas dengan teknologi film tebal, yang berbasis metal oksida SnO_2 .

Dalam merancang bangun dan mengarakterisasi sistem sensor gas berbasis metal oksida sebagaimana yang akan dilakukan dalam penelitian ini, permasalahan yang dihadapi dapat dirumuskan sebagai berikut:

- Sensitivitas

Sensor yang dikembangkan harus mampu mendeteksi gas dengan konsentrasi rendah, dalam orde ppm. Sensitivitas dinyatakan:

Untuk material sensor tipe- n dan gas berupa gas pereduksi:

$$S = \frac{R_o}{R_g} \quad \text{atau} \quad S = \frac{R_o}{R_o - R_g} \quad (1)$$

Untuk material sensor tipe- n dan gas berupa oksidator:

$$S = \frac{R_g}{R_o} \quad \text{atau} \quad S = \frac{R_g - R_o}{R_o} \quad (2)$$

dengan:

S : sensitivitas

R_o : resistans sensor pada udara normal (tidak ada gas)

R_g : resistans sensor pada saat ada gas.

Akan tetapi, untuk material sensor tipe- p , definisi sensitivitas di atas menjadi berubah (Cirera, 2000). Untuk sensor CO, nilainya berkisar 9 ppm.

- Selektivitas

Keberadaan dua atau lebih campuran gas harus bisa didiskriminasi oleh sistem sensor yang dikembangkan tanpa adanya interferensi satu dari yang lainnya.

- Konsumsi Daya

Pilihan teknologi fabrikasi yang digunakan harus mempertimbangkan konsumsi daya dari divais sensor yang dihasilkan. Untuk konsumsi daya yang digunakan pada sensor gas dengan *Thick Film Technology* ini adalah antara 200 mW – 1 W.

- Originalitas

Pilihan jenis material, modifikasi, dan metode proses yang digunakan harus memperhatikan kebaruan sehingga dapat dihasilkan divais yang memiliki potensi komersial tinggi.

Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan teknologi film tebal dalam pembuatan sensor gas CO dari bahan tin dioksida SnO_2 . Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan, fabrikasi, dan karakterisasi sistem sensor gas berbasis metal oksida yang mencakup divais sensor gas tunggal menggunakan teknologi *thick film* dengan bahan sensitif seperti SnO_2 . Berbagai bahan aditif seperti Pt, Pd, dan Ag akan digunakan sebagai *dopant* maupun katalis untuk meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor. Selain itu, akan dibuat juga suatu sistem perangkat keras *display* digital untuk menampilkan hasil pengukuran gas pada lingkungan.

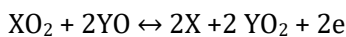
1.1. Sensitive layer

Sensitive layer atau lapisan material sensor merupakan bagian yang berhubungan langsung dengan gas, di mana reaksi elektrokimia terjadi di permukaan lapisan ini. Lapisan ini terbuat dari bahan SnO_2 , yaitu bahan *metal oxide* tipe- n yang mempunyai celah energi yang relatif lebar (3.6 eV) (Hann, 2002).

Dimensi dari lapisan ini (yang mewakili konsentrasi SnO_2) akan menentukan jangkauan pengukuran sensor. Adapun teori penentuan dimensi lapisan sensor dijelaskan sebagai berikut. Hal pertama adalah menentukan jangkauan pengukuran maksimal dari sensor dalam satuan *ppm*. Karena pada proses ini yang terjadi adalah reaksi gas, maka satuan *ppm* dirubah menjadi *mol/L*. Dengan menganggap gas adalah gas pada kondisi ideal, persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\frac{\text{mol}}{\text{L}} = \text{ppm} \times \frac{1 \text{ mol}}{24,15 \text{ L}} \quad (3)$$

Dengan mengacu pada persamaan reaksi kesetimbangan antara gas CO dan SnO_2 , yaitu



maka dapat diketahui perbandingan molaritas antara gas pereduksi dan SnO_2 . Dengan mengacu pada persamaan (3), maka mol SnO_2 akan didapatkan. Selanjutnya, massa dari SnO_2 didapat dengan persamaan:

$$n = \frac{m}{M} \quad (4)$$

dengan:

n : molalitas (mol)

m : massa (gram)

M : molaritas (gram/mol)

Dengan melihat densitas (ρ) dari data material, didapat dimensi (volume) dari lapisan sensor menggunakan persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

di mana:

ρ : densitas/massa jenis (gram/volume)

m : massa material (gram)

V : dimensi/volume (satuan volume)

Dengan menentukan tebal lapisan, maka luas dari lapisan sensor akan diperoleh.

1.2. Bentuk Respon Sensor

Pada dasarnya, respon sensor gas teknologi *thick film* ini adalah perubahan nilai konduktans sensor terhadap perubahan konsentrasi gas. Secara umum dinyatakan sebagai:

$$S = \frac{G}{G_0} \quad (6)$$

dengan:

S : sensitivitas

G : konduktans sensor ketika ada gas pereduksi

G_0 : konduktans sensor ketika tidak ada gas pereduksi.

Persamaan (6) identik dengan persamaan sensitivitas yang dikemukakan oleh Cirera (2000) (Cirera, 2000).

Sesuai statistik Maxwell-Boltzmann, konduktivitas (G) dirumuskan:

$$G = \left[\frac{1}{R} \right] = env \cdot e^{\frac{eV_s}{kT}} \quad (7)$$

dengan v adalah *bulk mobility* dan n adalah konsentrasi elektron. V_s adalah tegangan *Schottky barrier* yang didefinisikan sebagai:

$$V_s = \frac{V_0}{\left(1 + \rho \frac{\rho}{\Pi} \right)^2} \quad (8)$$

V_0 adalah *barrier height* pada saat tidak ada gas pereduksi, didefinisikan sebagai:

$$V_0 = \frac{2 \cdot e \cdot N_s^2}{\varepsilon \cdot N_D} \quad (9)$$

Sementara itu, $\left(1 + \rho \frac{\rho}{\Pi} \right)^2$ merupakan parameter kondisi gas pada konsentrasi, tekanan, dan suhu tertentu. N_s adalah kerapatan di permukaan *sensing* (m^{-2}), N_D adalah konsentrasi donor (*oxygen vacancies*) (m^{-3}), e adalah muatan elektron (eV), ε adalah konstanta dielektrik bahan semikonduktor, ρ adalah masa jenis gas (kgm^{-3}), p adalah tekanan parsial gas (Nm^{-2}), sedangkan Π didefinisikan sebagai:

$$\Pi = \left(\frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} kT \quad (10)$$

dengan:

m : masa gas pereduksi (dalam hal ini CO)

h : tetapan Planck ($4,134 \times 10^{-5}$ eV)

T : suhu absolut ($^{\circ}\text{K}$)

Dengan menggunakan persamaan di atas dan dengan mendefinisikan G_0 sebagai konduktivitas sensor pada udara bebas, maka:

$$G_0 = e \cdot n e^{\frac{eV_0}{kT}} \quad (11)$$

Dari persamaan-persamaan di atas, didapatkan hubungan persamaan untuk sensitivitas sensor (G/G_0) sebagai berikut:

$$\frac{G}{G_0} = \exp \left(\frac{eV_0}{kT} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \rho \frac{p}{\Pi} \right)} \right) \right) \quad (12)$$

Pada saat tidak ada gas ($p = 0$), persamaan sensitivitas menjadi bernilai 1 ($G/G_0 = 1$). Pada konsentrasi gas tinggi (tekanan tinggi), yaitu ketika $\rho(p/\Pi) \gg 1$, maka sensitivitas mencapai titik saturasi:

$$\left. \frac{G}{G_0} \right|_{sat} = e^{\frac{eV_0}{kT}} \quad (13)$$

Dari persamaan (9) dan (10), didapatkan persamaan:

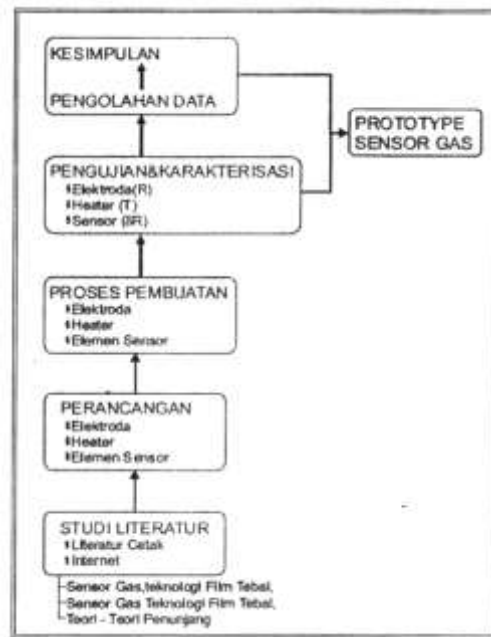
$$\frac{G}{G_0} = \left(\left. \frac{G}{G_0} \right|_{sat} \right)^{\left(\frac{1}{1 - \beta c} \right)} \quad (14)$$

Dengan c adalah konsentrasi gas (dalam *ppm*), $(G/G_0)_{sat}$ dan β adalah parameter yang didapatkan dengan memadukan persamaan dengan data percobaan (Barsan: 5).

Secara garis besar, sensor gas teknologi *thick film* ini tersusun atas sepasang elektroda, pemanas, dan *sensitive layer* yang peka terhadap rangsangan gas, yang semuanya dicetak pada kepingan substrat dari bahan alumina (Al_2O_3) 96%. Adapun hal - hal yang diharapkan adalah modifikasi material metal oksida untuk meningkatkan sensitivitas sensor, penggunaan *sensor array* untuk meningkatkan selektivitas sensor, penggunaan teknologi *thick film* dan teknik *sputtering* untuk menghasilkan divais dengan konsumsi daya yang rendah, pemilihan jenis material dan metoda proses yang belum banyak dieksplorasi penggunaannya dalam rancang bangun sensor gas akan memberikan aspek orisinalitas.

2. Metode

Dalam melaksanakan penelitian ini, dilakukan beberapa metode penelitian dalam penyusunan laporan, yaitu: studi literatur, serangkaian proses pengujian, pengambilan data, pengolahan data percobaan, hingga pengambilan kesimpulan. Secara sistematis, alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

Perancangan yang dilakukan meliputi perancangan dimensi *sensitive layer* yaitu lapisan SnO_2 , *heater*, dan elektroda. Perancangan dilakukan dengan mengacu pada spesifikasi sensor yang akan dibuat dan berdasarkan pada aturan-aturan pada teori dasar.

Proses fabrikasi yang dilakukan meliputi proses-proses pembuatan tiap-tiap komponen dengan menggunakan teknologi film tebal, meliputi juga tahapan-tahapan prosesnya. Untuk pelapisan bahan sensitif digunakan teknik *sputtering*.

Pada tahap pengujian ini dilakukan 3 tahap pengujian, yaitu pengujian terhadap *heater*, pengujian sensor, dan pengujian rangkaian. Pengujian terhadap lapisan sensitif dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik perubahan suhu yang dihasilkan terhadap masukan berupa arus searah (DC).

Pengujian dilakukan pada suhu kamar dengan memberikan sumber arus searah pada *pad-pad heater* mulai dari 0,1 A sampai dengan 1,8 A dengan interval 0,1 dan 0,2 A. Perubahan suhu dari *heater* dicatat menggunakan termometer digital. Selain itu, diukur juga nilai resistansi *heater* pada suhu awal (R_c) dan pada suhu puncak (R_h). Pengujian terhadap sensor (tanpa rangkaian) dilakukan untuk mengetahui apakah sensor bisa bekerja atau tidak terhadap rangsangan gas CO, untuk mengetahui nilai resistansi dari sensor pada saat tidak ada gas CO, dan untuk menentukan nilai tegangan beban.

Data yang digunakan sebagai parameter sensor ini adalah data perubahan temperatur *heater* terhadap masukan arus searah dan data perubahan nilai resistansi sensor terhadap perubahan konsentrasi gas. Data perubahan resistansi diambil dengan mengukur secara langsung perubahan nilai resistansi sensor dengan menggunakan *ohmmeter*. Data-data yang diperoleh dianalisa dan diambil kesimpulan tentang karakteristik dari sensor dan apakah hasil yang dicapai sesuai dengan yang direncanakan.

3. Hasil dan Pembahasan

Di antara berbagai jenis sensor kimia, sensor gas karbon monoksida (CO) sangat dibutuhkan untuk memantau gas CO dan pencemaran amoniak yang dihasilkan dari pembuangan mobil/motor dan gas alami akibat pembakaran yang tidak sempurna. Sensor gas CO ini terdiri dari sebuah pemanas (*heater*), sepasang elektroda (*interdigital electrodes*) dan lapisan sensor (*sensitive layer*) dari bahan SnO₂ (timah dioksida). Untuk menghindari *short contact*, pemanas dilapisi dengan lapisan isolasi (*coating*). Pada dasarnya, sensor gas teknologi *thick film* adalah sensor gas yang bekerja memakai prinsip *chemoresistor*: konduktivitas sensor akan berubah dengan adanya unsur-unsur kimia (dari gas) yang bekerja pada permukaan lapisan sensor (dalam hal ini SnO₂). Perubahan konduktivitas tersebut dikarenakan perubahan atau perpindahan electron-elektron valensi pada atom-atom lapisan sensor akibat adanya reaksi dengan gas-gas reaktan (gas pereduksi). Reaksi oksidasi terjadi pada permukaan SnO₂, pada suhu kerja antara 300 °C – 450 °C pada SnO₂ murni dan 200 °C – 250 °C pada SnO₂ + *dopant* tanpa adanya gas pereduksi. Untuk mengatasi permasalahan di atas dan mencapai sasaran yang tepat, maka tahapan pencapaian sasaran yang telah dilaksanakan dalam penelitian ini adalah:

3.1. Tahap Perancangan

Untuk mencapai hasil sesuai dengan yang diharapkan, proses pabrikasi sensor ini dilakukan dalam beberapa tahap. Tahapan-tahapan ini bisa dilihat dalam Gambar 2.

3.1.1. Spesifikasi Sensor

Dalam proses perancangan suatu devais, sebagai langkah awal adalah menentukan spesifikasi dari devais yang akan dibuat. Adapun spesifikasi umum yang diharapkan peneliti dari sensor ini adalah sebagai berikut:

Dimensi: ≤10 mm x 10 mm

Suhu operasi : 25 °C – 300 °C

Daya Kerja heater : 3W

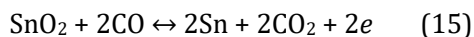
Jangkauan Pengukuran : 0 ~ 1000 ppm



Gambar 2. Tahapan Proses Perancangan dan Fabrikasi Sensor Gas

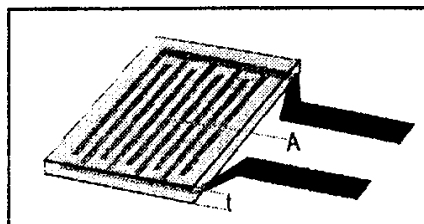
3.1.2. Perancangan dan Pembuatan Lay Out Sensor

Pada umumnya, perubahan resistivitas material sensor ketika bereaksi dengan gas dipengaruhi oleh reaksi atom-atom oksigen di udara dengan atom-atom oksigen di permukaan lapisan sensor. Reaksi ini merubah *potential barrier* antarikatan atom. Sinyal respon sensor berubah ditentukan oleh jenis material sensor dan gas yang disensor. Dimensi lapisan sensor (SnO_2) akan menentukan jangkauan pengukuran sensor. Tahap awal perancangan lapisan sensor adalah menentukan jangkauan pengukuran maksimal dari sensor dalam satuan ppm, dalam rancangan ini diharapkan adalah 1000 ppm. Dengan mengacu pada persamaan reaksi kesetimbangan antara gas CO dan SnO_2 , yaitu:



$$\text{dan} \quad \rho = \frac{m}{V} \quad (16)$$

maka dapat diketahui perbandingan molaritas antara gas-gas pereduksi dan SnO_2 , yaitu molaritas SnO_2 adalah 2 kali molaritas CO. Selanjutnya menentukan massa dan volume dari SnO_2 . Dari perhitungan dengan persamaan di atas, maka diperoleh $V = 0,001726 \text{ cm}^3$ sehingga dengan menentukan tebal lapisan maka luas dari lapisan sensor diperoleh seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Kontruksi Lapisan Sensor

3.1.3. Perancangan Elektroda

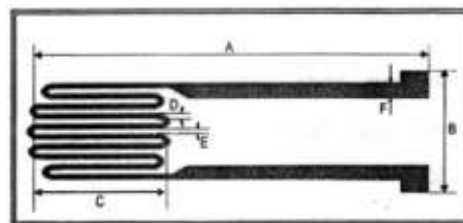
Elektroda yang digunakan pada perancangan sensor gas ini adalah sepasang elektroda berbentuk *interdigital fingers* dari bahan *nobel metal*, yaitu Ag atau Au. Penentuan nilai resistansi elektroda ini sama dengan penentuan nilai resistansi resistor film tebal. Untuk melakukan perhitungan nilai resistansi elektroda dalam rancangan ini, dimensinya dapat dibagi menjadi bagian-bagian kecil. Untuk hasil rancangan yang diproses di atas substrat alumina adalah seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Interdigital fingers

3.1.4. Perancangan Heater

Temperatur merupakan hal penting yang perlu diperhatikan dalam perancangan sebuah sensor gas. Kecepatan distribusi temperatur akan memengaruhi tingkat selektivitas dan sensitivitas sensor. Untuk meminimalisasi ruang dan agar distribusi panas cepat tercapai, maka *heater* dirancang dengan dimensi yang sama dan diletakkan di atas lapisan isolator yang telah dilapiskan dahulu di atas lapisan *fingers* dari elektroda. Perhitungan untuk lapisan *heaters* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perhitungan Perancangan Heater

Untuk menentukan karakterisasi dari *heater*, parameter yang harus diperhatikan adalah suhu yang diinginkan, daya yang dibutuhkan dan luasan daerah yang ingin dipanasi, serta karakter dari bahan *heater* itu sendiri (TCR, disipasi arus maksimum yang mampu melewati dan lain-lain).

Karakteristik *heater*:

T_h : temperatur kerja (300°C)

T_c : temperatur awal (25°C)

P : daya pada temperatur kerja (3W)

TCR : Temperature Coefficient Resistance (3900)

Dengan menentukan nilai resistansi *heater* pada temperatur kerja (R_H) menggunakan sumber tegangan 3 V dan daya yang diinginkan 3 W, maka arus kerja *heater* adalah:

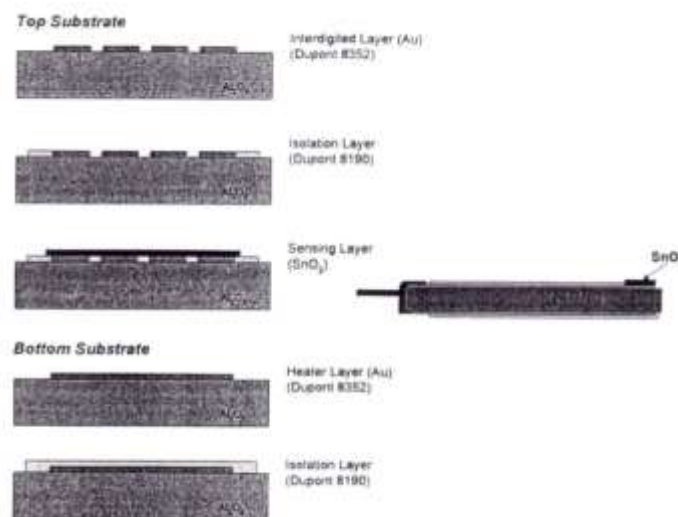
$$I = P/V = 3W/3V = 1A \quad (17)$$

sehingga didapat resistansi heater pada suhu operasi (R_H). Setelah hasil rancangan diperoleh, maka dilakukan proses fabrikasi sensor dengan menggunakan teknologi film tebal.

3.1.5. Proses Fabrikasi Sensor dengan Teknologi Film Tebal

Teknologi *Thick Film* (TFT) merupakan salah satu bagian dari teknologi proses mikroelektronika untuk fabrikasi komponen-komponen elektronika secara *screen-printing*. Sejak pertengahan tahun 1960, teknologi proses thick film telah digunakan untuk meminiaturisasi suatu rangkaian elektronika ke dalam sebuah keping substrat, karena kemampuannya menghasilkan jalur konduktor yang sangat kecil (*fine line*). Teknologi Thick Film telah banyak digunakan secara luas dalam industri komponen hybrid mikroelektronika dan diaplikasikan dalam berbagai bidang, seperti otomotif, telekomunikasi, medikal dan pengembangan sensor dan aktuator. Material utama yang digunakan dalam teknologi film tebal adalah substrat dan pasta. Substrat merupakan media tempat komponen film tebal diimplementasikan, sedangkan pasta adalah bahan pembentuk komponen film tebal, yang diformulasikan sedemikian rupa sehingga dapat dibentuk melalui proses pencetakan. Proses film tebal (*thick film process*) terdiri dari beberapa tahap yang meliputi pembuatan screen, pencetakan, pengeringan (*drying*), pembakaran (*firing*), trimming dan sejumlah proses tambahan lain seperti proses pemasangan kaki (*lead frame*) dan pengemasan (enkapsulasi).

Sampai pada saat ini kegiatan yang dilakukan sampai pada tahap fabrikasi sensor dengan pembuatan lapisan elektroda, lapisan isolator, dan lapisan *heaters*. Ketiga proses di atas berjalan dengan baik dan hasil fabrikasi sensor sesuai dengan rancangan yang telah dibuat.



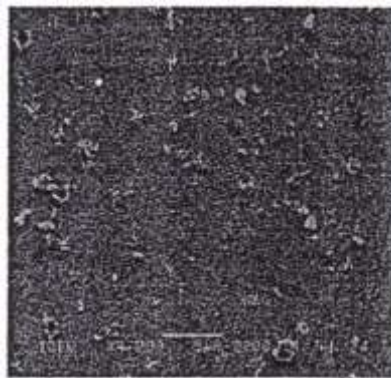
Gambar 6. Fabrikasi Sensor dengan Teknologi Film Tebal.

3.1.6. Proses Pelapisan Bahan Sensitif

Proses pelapisan bahan sensitif dilakukan setelah tahap fabrikasi sensor yang dibuat dengan teknologi film tebal. Teknologi yang digunakan untuk pelapisan bahan sensitif adalah teknologi *sputtering*.

Bahan yang digunakan berupa target yaitu bahan SnO_2 . Sampel sensor yang berupa lapisan elektroda dan heater tersebut bagian permukaan atasnya dilapisi bahan sensitif, pelapisan dilakukan terhadap beberapa sampel dengan membedakan lamanya waktu pelapisan. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai resistansi yang terbaik, karena akan berpengaruh terhadap temperatur kerja suatu sensor.

Pelapisan SnO_2 Dengan metode RF-sputtering dengan waktu 60 menit, daya 200 watt, aliran gas argo (Ar) sebesar 15 mTorr didapatkan seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Morfologi permukaan lapisan tipis SnO_2 hasil RF-sputtering dengan waktu 1 Jam

3.1.7. Pengujian Karakteristik Sensor

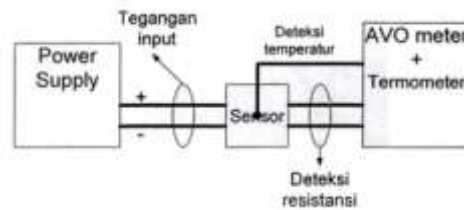
Sensor yang telah dilapisi bahan sensitif SnO_2 dengan teknik *sputtering* diukur karakteristiknya sehingga dapat diketahui unjuk kerja dari lapisan sensitif tersebut terhadap perubahan temperatur. Pengujian terhadap permukaan lapisan dilakukan untuk mengetahui morfologi ketebalannya dan kerataan lapisannya.

3.1.8. Pengujian Resistansi Sensor

Tujuan pengujian resistensi sensor adalah:

- Mengetahui nilai resistansi sensor dan perubahannya terhadap perubahan temperatur
- Mengetahui tanggapan perubahan resistans sensor terhadap perubahan temperature peralatan dan bahan
- Sumber arus searah (*Kenwood Regulated Power Supply* tipe PD18-30AD).
- Multimeter digital (*Sanwa Digital Multimeter* PC 100)
- Thermometer digital (*Lutren TM-914C*).

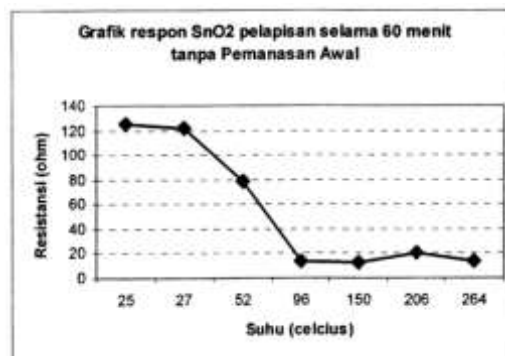
Prosedur Pengujian



Gambar 8. Skema Pendeteksian Temperatur dan Resistansi pada Divais Sensor

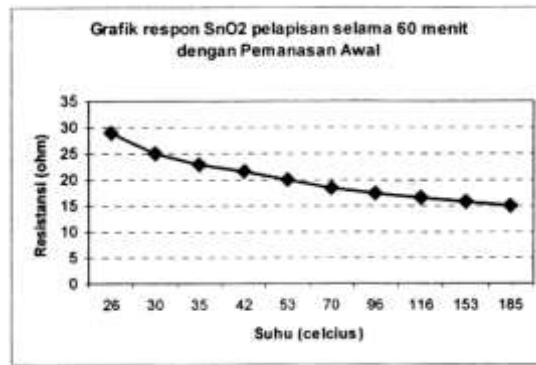
- Rangkaian pengujian disusun seperti dalam Gambar 13. Sumber arus searah diberikan untuk menghasilkan panas pada heater yang selanjutnya merubah resistans sensor.
- Nilai temperatur awal (T_c) diukur pada temperatur ruangan saat pengujian, dan pada udara bersih.
- Pengujian dilakukan terhadap 4 sensor yang berbeda.

Pengujian Perubahan Resistansi Sensor terhadap Perubahan Temperatur untuk Bahan Sensitif SnO_2 Selama 1 Jam (a)



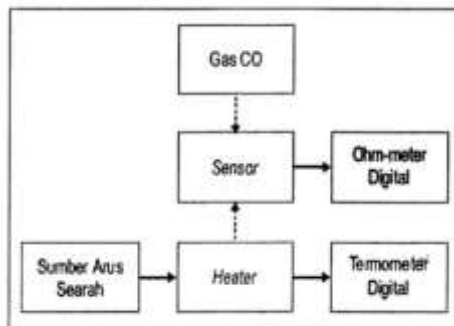
Gambar 9. Grafik Tanggapan Perubahan Resistansi Sensor terhadap Perubahan Temperatur untuk SnO_2 Pelapisan 1 jam

Pengukuran ke 2 dengan pemanasan Awal

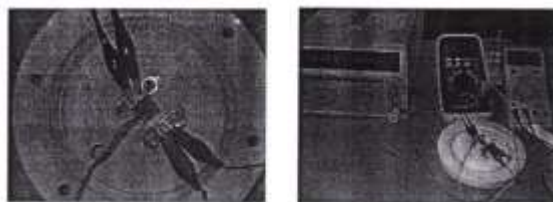


Gambar 10. Grafik Tanggapan Perubahan Resistansi Sensor terhadap Perubahan Temperatur untuk SnO₂ Pelapisan 1 jam

Pada *chip* ini terjadi perbedaan hasil pengukuran pada pengukuran ke-1 dan pengukuran ke-2. Ini terjadi karena pada pengukuran pertama *chip* langsung dipanaskan dan diukur pada kaki elektrodanya sedangkan pada pengukuran ke-2, *chip* dipanaskan terlebih dahulu pada suhu 200°C baru kemudian diukur setelah didinginkan. Perbedaan ini terjadi karena kelembaban lapisan sensitif pada pengukuran ke-1 kurang terjaga sehingga perubahan resistansi yang ada kurang stabil. Namun *chip* ini mengalami kerusakan fisik yang terjadi karena kurang kehati-hatian dalam penyimpanannya.



Gambar 11. Diagram Kotak Pengujian Tanggapan Sensor

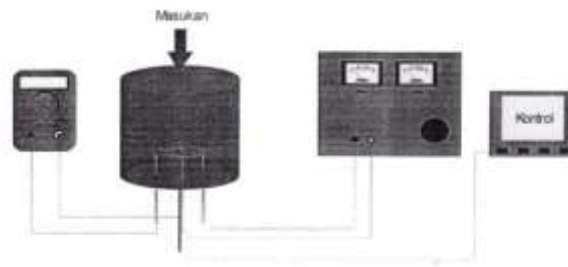


Gambar 12. Rangkaian Pengujian Sensor terhadap aliran Gas CO

- Rangkaian pengujian disusun seperti dalam Gambar 13. Sumber arus searah diberikan untuk menghasilkan panas pada *heater* yang selanjutnya mengubah resistans sensor.
- Memasukkan *heater* berupa arus searah sebesar 1,3 mA yang merupakan arus kerja menurut pengujian sebelumnya.
- Gas yang digunakan adalah gas CO 35%.

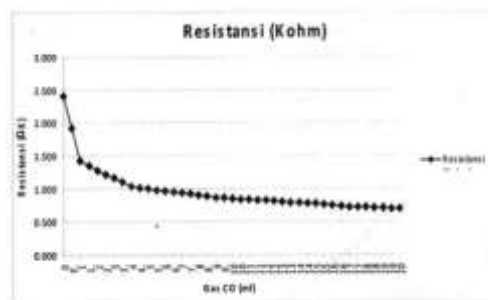
- Konsentrasi gas CO yang diberikan adalah 10 mL.
- Nilai resistansi awal (R_0) diukur pada temperatur ruangan saat pengujian dan pada udara bersih (tanpa gas CO).
- Pengujian dilakukan terhadap dua sensor yang berbeda.

3.2. Pengujian Sensor Terhadap Aliran Gas



Gambar 13. Skema alat Karakterisasi Sensor Gas

Hasil pengujian perubahan temperatur sensor terhadap perubahan resistansi dan perubahan konsentrasi gas CO ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 14. Nilai $R = 91,7 \text{ K Ohm}$ dengan Lapisan Sensitif SnO_2 .



Gambar 14. Grafik Perubahan Resistansi terhadap perubahan Volume Aliran Gas CO pada suhu ruang

3.3. Perancangan dan Pengujian Lapisan Sensitif

Bentuk rancangan sensor gas dibuat dengan dimensi $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ untuk meminimalisasi dimensi sehingga bentuknya menjadi lebih kecil. Selain itu, pemanasan menjadi lebih cepat merata karena dimensinya lebih kecil dan juga sifat substrat yaitu tahan terhadap panas yang tinggi, agar waktu yang dibutuhkan lebih singkat untuk mencapai suhu yang merata dan stabil, sehingga sensor yang dihasilkan lebih sensitif dan reaksinya terhadap gas akan lebih cepat.

Dari perhitungan yang telah dilakukan untuk mendapatkan bentuk dan dimensi sensor yang sesuai. Perhitungan dimensi daerah sensitive sensor dilakukan dengan maksud untuk mendapatkan ukuran yang optimal, karena disesuaikan dengan bahan sensitive yang digunakan dan jenis gas yang akan dideteksi, sehingga reaksi sensor terhadap gas akan cepat mendeteksi.

Desain *lay out* dan perhitungan dimensi yang dilakukan pada perancangan elektroda akan berpengaruh pada nilai resistansi yang diharapkan, dengan menyesuaikan dengan bahan

pasta yang akan digunakan. Lebar *fingers* dan jarak antar *fingers* besarnya harus mengikuti aturan perancangan pada teknologi film tebal. Diharapkan nilai resistansi hasil proses tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan pada rancangan.

Perancangan dan perhitungan yang dilakukan pada heater, dimana letaknya berada di atas isolator dan elektroda, hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan hasil pemanasan yang cepat dan stabil. Selain itu bahan pasta yang digunakan harus memiliki karakteristik yang sesuai dengan kondisi sensor yang dirancang.

Seperti halnya pada perancangan elektroda, perancangan heater pun harus mengikuti aturan untuk perancangan resistor pada teknologi film tebal. Proses fabrikasi sensor menggunakan teknologi film tebal telah dilakukan dengan bahan-bahan yang masih ada, dan hasil pengukuran resistansinya sesuai dengan hasil perancangan dan sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan yaitu $1,5\Omega$. Sedangkan lapisan elektroda dan lapisan heaters tidak terjadi kontak, sehingga tidak ada tegangan hal ini menunjukkan lapisan isolatornya baik.

Dari data keseluruhan menunjukkan hasil dimana seiring dengan kenaikan suhu maka resistansi yang dihasilkan akan semakin menurun. Jika Pengujian terhadap perubahan suhu terus dilanjutkan, maka akan diperoleh nilai resistansi yang sesuai yang diinginkan seperti pada nilai hasil perancangan. Dengan hasil resistansi tersebut maka suhu kerja sensor akan diperoleh.

3.4. Pengujian Lapisan Sensitif Sensor dan Penentuan Suhu Operasi Sensor

Untuk mengetahui karakteristik lapisan sensitif yang telah di-*sputtering*, dilakukan pengukuran perubahan resistansi terhadap suhu yang diberikan pada sensor. Data menunjukkan hasil bahwa seiring dengan kenaikan suhu, maka resistansi yang dihasilkan semakin menurun. Jika pengujian terhadap perubahan suhu terus dilanjutkan, maka diperoleh nilai resistansi yang sesuai yang diinginkan seperti pada nilai hasil perancangan. Dari hasil resistansi tersebut maka suhu operasi sensor diperoleh resistansi lapisan sensitif sensor yang mulai mendekati konstan. Perubahan resistansi hanya disebabkan oleh kehadiran gas-gas sekitarnya karena lapisan sensitif merupakan bahan semikonduktor. Oleh karena itu, dengan pemberian energi termal (pemanasan) dapat mengubah sifat listrik lapisan sensitif sehingga fungsi penentuan suhu operasi sensor adalah agar lapisan sensitif dapat berfungsi sebagai sensor gas. Lapisan sensitif SnO_2 pada suhu 165°C mulai mengalami penurunan resistansi dan mulai mencair kondisi stabil pada rentang 165°C sampai 200°C .

3.5. Pengujian Sensor terhadap Aliran Gas

Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi gas memengaruhi perubahan nilai resistansi sensor. Sementara itu, sensitivitas menunjukkan seberapa jauh kepekaan sensor terhadap kuantitas yang diukur dan dinyatakan dengan bilangan yang menunjukkan perubahan keluaran dibandingkan perubahan masukan atau kemampuan dari sensor untuk merespon kehadiran gas yang berhubungan dengan konsentrasi gas. Konsentrasi gas yang semakin pekat mengandung lebih banyak molekul CO yang dapat mengikat oksigen pada permukaan lapisan sensitif SnO_2 sehingga mengakibatkan kekosongan oksigen. Banyaknya atom oksigen yang diikat gas CO menjadi CO_2 setara dengan pembentukan elektron bebas, yang mengakibatkan resistansi bahan berkurang, sehingga selisih resistansi lapisan sensitif sebelum dan sesudah diberi gas semakin besar. Sensitivitas sebanding dengan selisih resistansi bahan sebelum dan sesudah diberi gas.

$$S = [| R_n - R_g | / R_n] \times 100\% \quad (18)$$

Dari rumus (1), dapat diperoleh nilai sensitivitas sensor dengan lapisan sensitif SnO₂ sebesar 4%. Dengan data ini, maka dapat dengan mudah dibuat sistem deteksi gas sebagai akuisisi data. Sistem ini mendeteksi secara *real time* dengan dibuat penguat dan pengkondisi sinyal.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan perancangan dan fabrikasi sensor gas dengan teknologi film tebal tersusun atas tiga komponen dasar, yaitu: pemanas (*heater*), elektroda, dan lapisan sensitif sensor. Pada perancangan sensor gas dengan teknologi film tebal, bentuk dan dimensinya harus mengikuti aturan perancangan resistor film tebal. Bahan lapisan sensitif sensor yang akan digunakan harus sesuai dengan rencana gas yang akan dideteksi. Dari perancangan, dihasilkan dimensi sensor yang sesuai dengan nilai perhitungan resistansinya dengan menggunakan teknologi resistor film tebal. Perbedaan ketebalan pada lapisan sensitif memengaruhi ikatan atom bahan sehingga berpengaruh juga pada perubahan resistansi. Hasil pelapisan bahan sensitif menunjukkan adanya perubahan nilai resistansi yang linier terhadap perubahan suhu yang diberikan. Hasil maksimum yang diharapkan adalah resistansi terendah untuk kerja sensor yang dapat dicapai berada pada suhu yang tidak terlalu tinggi sehingga sensor akan lebih cepat bekerja dan lebih sensitif. Hasil pengujian sensor dengan diberikan aliran gas CO menunjukkan hasil yang baik, yaitu sensor gas CO dapat bekerja pada temperatur 165 °C. Lapisan sensitif yang digunakan sensor untuk mendeteksi gas CO adalah SnO₂ dengan sensitivitas 4%.

Daftar Rujukan

- Barsan. N, 2008, "Gas Sensing Mechanisms in Thick and Porous SnO₂ Layers", Institute for Interface Analysis and Sensor, Tuebingen.
- Cirera. A, 2000, "SnO₂ Based Semiconductor Gas".
- D. Zhang, Z. Liu, C. Li, T. Tang, X. Liu, S. Han, B. Lei, C. Zhou, 2004, Detection of NO₂ down to ppb Levels Using Individual and Multiple In₂O₃ Nanowire Devices, Nano Letters 4 1919-1924 ; doi: 10.1021/nl0489283.
- Hann S, 2002, "SnO₂ Thick Film sensors at Ultimate limits : Performance at Low O₂ and H₂O Concentration Size Reduction by CMOS Technology", Der Fakultat far Chemie and Pharmazie der Eberhard-Karls-Universiteit Tübingen, Germany.
- Haskard, Malcolm. R, 1988, "Thick Film Hybrid Manufacture and Design", Pretice Hall, Inc, New Jersey.
- Hunter G.W, 2004, "Chemical Microsensor", The Electrochemical Society Interface.
- J.F.Q. Rey, T.S. Plivelic, R.A. Rocha, S.K. Tadokoro, I. Torriani and E.N.S. Muccillo, 2005, Synthesis of In₂O₃ nanoparticles by thermal decomposition of a citrate gel precursor, Journal of Nanoparticle Research , 7: 203-208, Springer.
- K. Soulantica, L. Erades, M. Sauvan, F.Senocq, A. Maisonnat, B. Chaudret, 2003, Synthesis of indium and indium oxide nanoparticles from indium cyclopentadienyl precursor and their application for gas sensing, Advanced Functional Materials 13, 553-557 ; doi: 10.1002/adfm.200304291
- Kil Dong Lee, 2001, Influence of Film Thickness on the Chemical Stability of Electrochromic Tungsten Oxide Film, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 38, No. 1, pp. 33-37.
- M.W.K. Nomani, D. Kersey, J. James, D. Diwan, T. Vogt, R.A. Webb, G. Koley, 2011, Highly sensitive and multidimensional detection of NO₂ using In₂O₃ thin films, Sensors and Actuators B: Chemical 160, 251-259 ; doi: 10.1016/j.snb.2011.07.044
- Mahtab Gholami *et al.*, 2012, The preparation of TiO₂ nanoparticles and investigation of its electrical properties as CO₂ gas sensor at room temperature, Elixir Chem. Phys. Letter 48, 9626-9628.
- Mulder, M., 1996, Basic Principles of Membrane Technology, Springer, New York.
- Hench, L.L. & J.K. West, 1990, The Sol-Gel Process Chem. Vol. 90, pp. 33-72.
- Iler, R.K., 1979, The Chemistry of Silica, John Wiley, New York.

- S. Shishiyana, L. Chowb, O. Lupana, and T. Shishiyana, 2006, Synthesis and Characterization of Functional Nanostructured Zinc Oxide Thin Films, ECS Transactions, 3 (9) 65-71.
- Weimar. U, 2003, "Understanding the Fundamental Principle of Metal Oxide Based Gas Sensor", The Exampel of CO Sensing with SnO₂ Sensor in the Presence of Humidity, Institute of Physical and Theoretical Chemistry, University of Tuebingen, Germany.
- Widodo, Slamet, 2010, Teknologi Sol Gel Pada Pembuatan Nano Kristalin Metal Oksida Untuk Aplikasi Sensor Gas, Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro (UNDIP) Semarang.
- Widodo, Slamet, 2012, Proses Sintesis Indium Tin Oksida (ITO) Nano Partikel Dengan Metode Sol Gel Sebagai Lapisan Aktif Pada Sensor Gas CO, Prosiding Seminar Nasional Fisika Terapan III 2012 (SNAFT'2012), Dep. Fisika-Fak. Sains dan Teknologi UNAIR, Surabaya.
- Widodo, Slamet, 2019, "Review Sensor Gas Berbasis Metal Oksida Semikonduktor Untuk Mendeteksi Gas Polutan Yang Selektif Dan Sensitif", Jurnal Techno-Socio Ekonomika, Volume 12-Nomor 2-Oktober 2019, ISSN 1979-4835, Hal. 92-112.
- Widodo, Slamet, 2021, "Study Design and Development Gas Sensor Technology for Motor Vehicle Exhaust Emissions", Key Engineering Materials Journal, Volume 900, pp.85-93, ISSN: 1662-9795,doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.900.85, 2021, Trans Tech Publications Ltd. Switzerland.