

Karakterisasi Sensor Gas CO Berbasis Bahan SnO₂ dengan Metoda Solgel Menggunakan Teknologi Film Tebal

Characterization of CO Gas Sensor Based on SnO₂ Materials with Solgel Method Using Thick Film Technology

I Dewa Putu Hermida^{a,*}, Parlindungan Sinaga^b, dan Gesi Soleha^b

^aPusat Penelitian Elektronika dan Telekomunikasi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

Komp LIPI Gd 20, Jl Sangkuriang 21/54D, Bandung 40135, Indonesia

^bJurusan Pendidikan Fisika FPMIPA - UPI

Jl. Dr. Setiabudhi No. 229 Bandung 40154 Jawa Barat-Indonesia

Abstrak

Sensor gas SnO₂ termasuk sensor yang paling banyak digunakan dan dikembangkan di pasaran, tapi sampai saat ini belum bisa menghasilkan sensitivitas yang tinggi. Dalam penelitian ini dibahas mengenai karakterisasi sensor gas CO dengan teknologi film tebal yang berbahan SnO₂ dan diharapkan dapat menghasilkan sensor dengan sensitivitas yang tinggi. Hasil XRD menunjukkan bahwa struktur dari SnO₂ adalah rutile tetragonal. Dari pola difraksi terlihat puncak-puncak 110 dan 101 yang menunjukkan pola difraksi yang dibentuk oleh kristal SnO₂. Hasil SEM menunjukkan bahwa ukuran sensor dapat mencapai 264 nanometer. Hasil EDS (Energy Dispersive X Ray Spectroscopy) menunjukkan bahwa lapisan sensor yang terbentuk memiliki komposisi O₂ (Oksigen) dengan persen massa 21,23% dan Sn (Stanum) dengan persen massa 78,77%. Pengujian sensor dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan temperatur operasional dan konsentrasi gas terhadap resistansi sensor. Perubahan yang terjadi dalam sensor gas ini, berupa resistansi yang menurun dengan bertambahnya temperatur dan konsentrasi gas CO. Dari hasil pengujian tersebut diketahui bahwa komponen-komponen penyusun sensor dapat merespon adanya gas CO. Nilai sensitivitas yang baik didapat dari hasil pengujian untuk rentang konsentrasi gas 0-500 ppm adalah $9,10^{-3}$ /ppm.

Kata kunci: sensor gas CO, SnO₂, teknologi film tebal, solgel.

Abstract

SnO₂ gas sensor includes a sensor of the most widely used and developed in the market, but until now it has not been able to produce high sensitivity. This study discusses characterization of CO gas sensor by thick film technology based on SnO₂. The study is expected to be able to produce high sensitivity sensor. X-Ray Diffraction result shows that the structures of tetragonal SnO₂ obtained are rutile. From the diffraction pattern, it looks 110 and 101 peaks indicating that the diffraction pattern is formed by crystal SnO₂. Scanning Electron Microscopy results indicate that the size of sensor has reached 264 nanometer. From the results of EDS (Energy X-Ray Dispersive Spectroscopy) indicate that the sensor layer has a composition of 21.23% mass of O₂ (Oxygen) and 78.77% mass of Sn (Stanum). Sensor testing is conducted to determine the effect of changes in operating temperature and gas concentration to sensor resistance. Changes that occur in this gas sensor are decreasing in resistance as a function of increasing temperature and gas concentration. From the test results, it was found that the constituent components of the sensor can respond to the presence of CO gas. Good value of sensitivity obtained from the test results for the gas concentration range of 0-500 ppm is 9.10^{-3} /ppm.

Keywords: CO gas sensor, SnO₂, thick film technology, solgel.

I. PENDAHULUAN

Di Indonesia mayoritas pencemaran udara disebabkan oleh emisi kendaraan bermotor, dimana zat-zat berbahaya seperti timbal (Pb), oksida nitrogen (NO_x), karbonmonoksida (CO), hidrokarbon, dan *suspended particulate matter* (SPM) yang dikeluarkan dapat mencapai kurang lebih 70% dari keseluruhan pencemaran udara [1].

Pada penelitian ini digunakan teknologi *screen-printing*. Keunggulan dari teknik *screen-printing* atau

teknologi *thick-film* ini adalah memungkinkan elemen *heater*, elektroda dan bahan sensitif dapat dilapiskan di atas substrat alumina yang berukuran kecil sehingga konsumsi dayanya dapat diturunkan dan dapat mengurangi biaya fabrikasi tiap sensor. Adapun kelebihan dari sensor gas berbasis SnO₂ adalah masa pemakaian yang lama dan relatif stabil, mempunyai resistansi yang baik terhadap *corrosive gases*, biaya produksi yang relatif murah, dimensi kecil, mudah perawatannya dan memiliki daya serap yang baik terhadap gas CO. Bahan SnO₂ termasuk bahan material oksida, ketersediaan bahan SnO₂ di alam ini sangat berlimpah [2].

Sensor yang dikembangkan harus mampu mendeteksi gas dengan konsentrasi rendah dalam orde ppm. Penelitian ini diharapkan mendapatkan nilai sensitivitas yang tinggi.

* Corresponding Author.

Email: putu@ppet.lipi.go.id, idewaputu@gmail.com

Received: November 22, 2013; Revised: Desember 13, 2013

Accepted: Desember 23, 2013

Published: Desember 30, 2013

© 2013 PPET - LIPI

doi : 10.14203/jet.v13.60-65

II. LANGKAH PENELITIAN

Langkah penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 1.

A. Tahapan Perancangan dan Fabrikasi

Tahapan perancangan ini bisa dilihat dalam Gambar 2.

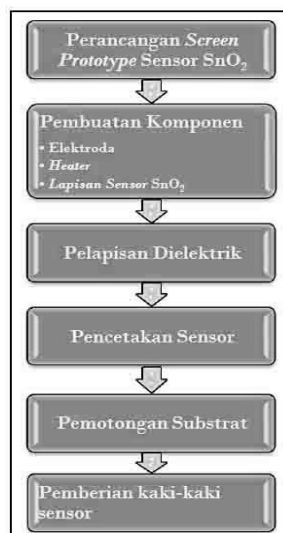
1) Spesifikasi Sensor

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 25 mm
- Suhu operasi: 25 °C – 300 °C
- Daya kerja heater: 3W
- Jangkauan pengukuran: 0 ~ 1250 ppm



Gambar 1. Diagram Alir Langkah-langkah penelitian.



Gambar 2. Tahapan Proses Perancangan dan Fabrikasi Sensor Gas [3].

2) Perancangan Lapisan Sensor (Sensitive Layer)

Terjadinya 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 antar ikatan atom. Reaksi diawali ketika lapisan material sensor mengikat oksigen dari udara, oksigen tersebut menjadi bermuatan negatif sehingga terbentuk *potential barrier* yang disebut *Schottky barrier*. Ketika ada gas (misal: gas CO), maka gas ini akan bereaksi dengan oksigen yang telah terikat pada permukaan lapisan sensor ($\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$) yang mengakibatkan perubahan *Schottky barrier* [4].

Pada umumnya, sinyal respon sensor ditentukan menurut jenis material sensor dan gas yang disensor. Untuk gas, digolongkan menjadi gas pengoksidasi dan gas pereduksi, sedangkan untuk material sensor dapat diklasifikasikan menjadi material tipe-p atau tipe-n sesuai dengan respon sinyalnya. Pada material tipe-p, nilai resistansinya akan bertambah ketika bereaksi dengan gas pereduksi dan resistansi akan berkurang terhadap gas pengoksidasi, hal ini berlaku sebaliknya terhadap material tipe-n.

Sensitive layer sensor merupakan bagian yang berinteraksi langsung dengan gas, yang reaksi elektrokimia terjadi di permukaannya. Lapisan ini terbuat dari bahan SnO₂, yaitu bahan *metal oxide* tipe-n yang sensitif terhadap molekul-molekul gas pereduksi [5]. Langkah pertama yang dilakukan dalam merancang lapisan sensor adalah menentukan jangkauan pengukuran maksimal dari sensor dalam satuan ppm, dalam perancangan ini jangkauan maksimal yang diharapkan adalah 1000 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 :

$$\frac{\text{mol}}{\text{L}} = \text{ppm} \times \frac{1 \text{ mol}}{24,15 \text{ L}} = 4,145 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \quad (1)$$

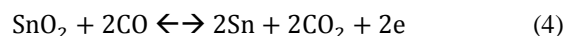
Jika M (berat molekul) CO dalam 1 liter udara adalah 28 g/mol, maka massa CO adalah

$$4,14 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times M_{\text{CO}} = 115,92 \times 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad (2)$$

Jadi dalam 1 Liter udara terdapat 115,92 x 10⁻⁵ g gas CO. Langkah selanjutnya adalah menentukan mol CO dalam 1 L udara, yaitu

$$\text{mol CO} = \frac{\text{mass CO}}{M_{\text{CO}}} = \frac{115,92 \times 10^{-5} \text{ g}}{28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,00004 \text{ mol} \quad (3)$$

Dengan mengacu pada persamaan reaksi kesetimbangan antara gas CO dan SnO₂, yang merupakan reaksi antara atom-atom O₂ di permukaan dengan molekul – molekul CO dari udara, yaitu:



Maka dapat diketahui perbandingan molaritas antara gas-gas pereduksi dan SnO₂, yaitu molaritas SnO₂ 2 kali molaritas CO, sehingga:

$$\text{mol SnO}_2 = 2 \times \text{mol CO} = 0,00008 \text{ mol} \quad (5)$$

3) Perancangan Elektroda

Elektroda yang digunakan pada *thick film gas sensor* pada umumnya adalah sepasang elektroda berbentuk *interdigital fingers* dari bahan *nobel metal* misalnya Ag. Struktur tersebut dimaksudkan untuk meminimalisasi ruang namun dapat mengoptimalkan

daerah *sensing*, serta memudahkan dalam penentuan nilai resistans. Adapun stuktur yang direncanakan adalah seperti dalam Gambar 3.

Dari luasan lapisan sensor yang diperoleh dari persamaan di atas diperoleh yaitu $(6 \times 6) \text{ mm}^2$, maka pasangan elektroda yang direncanakan haruslah memiliki luasan efektif yang sama, luasan yang dimaksud ditunjukkan dalam Gambar 3.

Selanjutnya diasumsikan bahwa masing masing jari memiliki lebar 0,4 mm, panjang 5 mm, dengan jarak antar jari 0,4 mm. Dari asumsi tersebut, dihasilkan elektroda yang memiliki 4 pasang *interdigitated fingers* dalam area $(6 \times 6) \text{ mm}^2$.

Adapun persamaan untuk mencari luasan area sensor yang diharapkan, adalah :

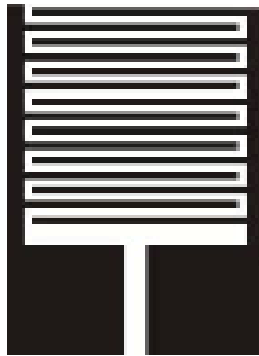
$$V = A \times t \quad (6)$$

dengan:

V adalah volume lapisan sensor (cm^3)

A adalah luas permukaan lapisan sensor (cm^2)

t adalah tebal permukaan lapisan sensor ($5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$).



Gambar 3. Rencana Struktur Elektroda.

Dari Persamaan 6 dan Gambar 3 di atas dapat dihitung nilai resistansi efektif masing-masing elektroda sebagai berikut :

$$R_{el} = \left(\frac{l_1}{w} + \frac{l_2}{w} + 0,56 \right) R_s \quad (7)$$

dengan:

R_{el} adalah nilai resistansi elektroda efektif (Ω),

l_1 adalah panjang jalur konduktor horisontal (mm),

l_2 adalah panjang jalur konduktor vertikal (mm),

w adalah lebar jalur konduktor (mm),

R_s adalah nilai lembar resistansi ($\text{m}\Omega/\text{square}$),

Dalam penelitian ini pasta yang digunakan adalah pasta Ag dengan $R_s = 20 \text{ m}\Omega/\text{square}$. Dari perancangan diketahui bahwa $l_1 = 4,8 \text{ mm}$, $l_2 = 1,2 \text{ mm}$, dan $w = 0,4 \text{ mm}$, maka dari persamaan di atas didapatkan nilai resistansi efektif R_{el} elektroda, nilai resistansi masing-masing elektroda sebesar $1,2448 \Omega$. Dari hasil perhitungan di atas diperoleh data-data dimensi elektroda sensor yang dirancang seperti pada Tabel 1.

Hal ini dapat dihubungkan dengan waktu transit elektron. $Wt = L/\mu E$. Di mana L adalah jarak antar *finger*, μ adalah mobilitas pembawa muatan yang berhubungan dengan karakteristik bahan semikonduktor (SnO_2), dan E adalah medan listrik/tegangan yang diberikan.

Pada elektroda ini terjadi persambungan logam (Ag) dengan bahan semikonduktor (SnO_2) yang menimbulkan kapasitansi. Kapasitansi dipasang seri sehingga mengakibatkan kapasitansinya berkurang, maka desain jarak antar *finger* dipasang saling berdekatan untuk meminimalisasi ruang [6].

TABEL I
KETERANGAN DIMENSI LAYOUT ELEKTRODA

Keterangan	Ukuran (mm)
Panjang Elektroda	14,5
Lebar Elektroda	9
Lebar Jari-jari Elektroda	0,4
Jarak antar Jari-jari Elektroda	0,4
Panjang x Lebar pad Elektroda	4x4

4) Perancangan Heater (Pemanas)

Temperatur adalah salah satu faktor terpenting yang menentukan keberhasilan sensor gas teknologi film tebal. Distribusi temperatur yang sesuai akan mempengaruhi tingkat selektifitas dan sensitifitas dari elemen sensor ini. Pemanas dirancang terletak tepat di sisi belakang substrat.

Untuk menentukan karakteristik dari *heater*, parameter yang harus diperhatikan di antaranya adalah: suhu, daya, dan luasan daerah yang ingin dipanasi, serta karakter dari bahan *heater* itu sendiri. Untuk itu, langkah awal yang dilakukan adalah menentukan karakteristik *heater* yang diinginkan, yaitu :

- T_h : Temperatur kerja (300°C)
- T_c : Temperatur awal (25°C)
- P : Daya pada temperatur kerja (3W)
- TCR : *Temperature Coefficient Resistance* (3600°C).

Langkah selanjutnya adalah menentukan nilai resistans *heater* pada temperatur kerja (R_H). Perhitungan nilai R_H diawali dengan menentukan tegangan sumber sebesar 3V. Tegangan sumber sebesar 3 V dipilih dengan pertimbangan agar bisa dihasilkan arus kerja sesuai dengan karakteristik bahan yang digunakan. Selain itu juga mempertimbangkan segi kepraktisan karena sumber tegangan 3V sudah banyak tersedia di pasaran dengan berbagai macam tipe.

Dengan sumber 3 V dan daya yang diinginkan 3 W, maka arus kerja *heater* adalah:

$$I = \frac{P}{V} = 1 \text{ A}$$

Nilai resistansi *heater* pada suhu operasi (R_H) adalah:

$$R_H = \frac{V}{I} = 3 \Omega$$

Selanjutnya dengan menentukan nilai TCR dari *data sheet* ($TCR = 3600 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$), temperatur awal ($T_c = 25^\circ\text{C}$), dan temperatur operasi ($T_h = 300^\circ\text{C}$), serta memasukkan nilai R_H , maka didapat nilai resistansi *heater*.

$$T_{CR} = \frac{[(R_H - R_C) \times 10^6]}{[R_C(T_H - T_C)]}$$

Sehingga diperoleh harga $R_C = 1,50 \Omega$.

Setelah nilai R_C didapat, maka dapat ditentukan dimensi dari *heater*, yaitu:

$$R_C = R_S \frac{l}{w} \quad (8)$$

dengan:

R_S : resistansi lembar = $20 \text{ m}\Omega/\text{sq}$,

l : panjang konduktor *heater* (mm),

w : lebar konduktor *heater* $\approx 0.4 \text{ mm}$.

Sehingga diperoleh harga $l=3 \text{ cm}$, dan dibentuk menyerupai spiral dalam luas area maksimum 1 cm^2 . Ditentukan 1 cm^2 dimaksudkan supaya *heater* dapat mencakup seluruh bagian elektroda di sisi baliknya.

Dari Persamaan 8 di atas dihasilkan nilai $R_C=1,5 \Omega$, nilai ini hanya nilai resistansi dari elemen *heater*, belum ditambah dengan nilai R kaki-kaki. Perhitungan nilai R *heater* menjadi

$$R = R_C + R_{kaki} = 1,58 \Omega$$

Sehingga dihasilkan desain *layout* seperti pada Gambar 4.

Untuk menentukan karakteristik dari *heater*, parameter-parameter yang harus diperhatikan diantaranya, suhu, daya luasan daerah yang ingin dipanasi dan karakter dari bahan *heater* itu sendiri (T_{CR} , disipasi arus maksimum yang mampu melewati, dll).



Gambar 4. Desain Lay Out Heater.

5) Pembentukan Pasta SnO_2

Untuk membuat lapisan sensitif sensor dilakukan dengan metoda solgel, seperti yang terlihat pada Gambar 5:

1. Komposisi bahan campuran antara SnCl_2 : Air : Propanol ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) : Isopropanol ($2\text{-C}_3\text{H}_7\text{OH}$) dengan perbandingan massa 5 : 7 : 7 : 6.
2. SnCl_2 dihaluskan dengan cara ditumbuk selama 1 jam.
3. Masukkan serbuk SnCl_2 ke dalam 2/3 bagian propanol, kemudian ditambahkan 1/3 air sambil diaduk selama 1 jam sambil dipanaskan dengan suhu 80°C untuk proses prehidrolisis larutan Sn. Kemudian di firing dengan suhu 300°C .
4. Selanjutnya sol yang dihasilkan dicampur dengan sisa air, Propanol, dan Isopropanol lalu diaduk kembali selama 1 jam sehingga dihasilkan pasta yang jernih dan homogen.



Gambar 5. Urutan Proses Pembentukan Pasta SnO_2 [7].

B. Pengujian Sensor

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam pengujian sensor adalah:

- Sumber arus searah,
- Multimeter digital,
- Termometer digital,
- Chamber,
- Gas CO murni.

1) Pengujian Perubahan Resistansi Sensor Terhadap Temperatur

Untuk melakukan pengujian terhadap sensor yang telah dibuat seperti pada Gambar 6, maka diperlukan peralatan dan langkah-langkah sebagai berikut:

- Rangkaian pengujian disusun, dimana sumber arus searah diberikan sebesar 1,3 A.
- Nilai temperatur awal (T_c) diukur pada temperatur ruangan saat pengujian, dan pada udara bersih.
- Resistansi awal (R_o) diukur ketika dalam udara bersih.
- Interval gas CO adalah 250-1250 ppm.
- Dengan memvariasikan konsentrasi gas antara 250-1250 ppm didapatkan perubahan resistansi sensor.



Gambar 6. Pengujian Perubahan Resistansi Sensor Terhadap Temperatur.

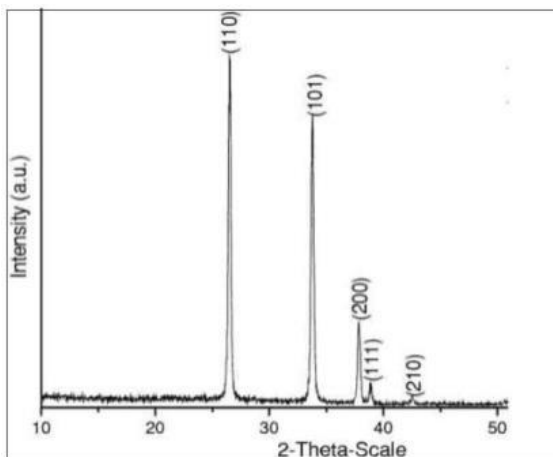
2) Pengujian perubahan Resistansi Sensor vs Konsentrasi Gas CO

Dari hasil pengujian perubahan resistansi sensor terhadap konsentrasi gas CO, diperoleh data seperti dalam Tabel 4, di mana resistansi sensor menurun untuk konsentrasi gas CO yang semakin tinggi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakterisasi Menggunakan XRD (X-ray Diffraction)

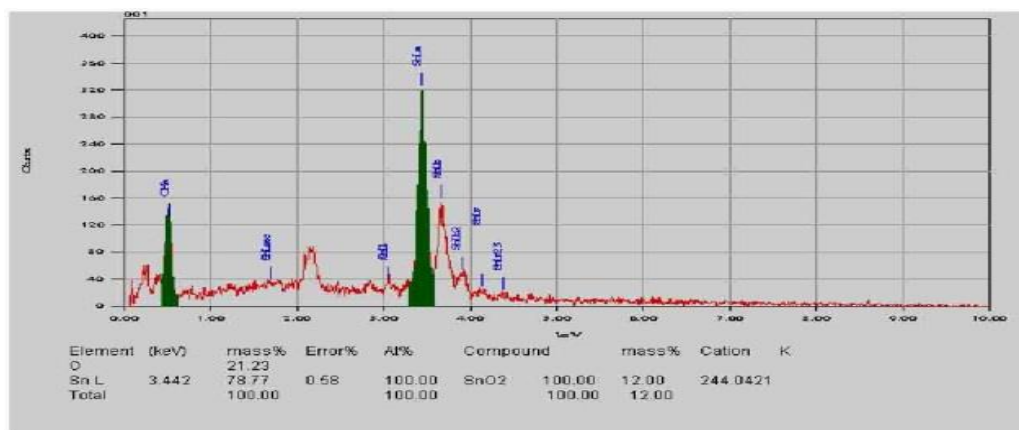
Pada Gambar 7 diperlihatkan pola difraksi sinar-X dari sensor dengan suhu *firing* 650 °C. Dari hasil XRD dapat diketahui bahwa lapisan sensitif yang digunakan adalah SnO₂. Parameter kisi dari hasil data XRD adalah $a=4,737\text{ \AA}$ dan $c=3,185\text{ \AA}$. Dari pola difraksi terlihat puncak-puncak dengan pola orientasi kristal SnO₂ adalah 110 dan 101 yang menunjukkan pola difraksi yang terbentuk adalah dibentuk oleh kristal SnO₂. Dari semua puncak yang muncul dapat disimpulkan struktur dari SnO₂ adalah *rutile tetragonal*.



Gambar 7. Pola XRD Bahan SnO₂.

B. Karakterisasi Menggunakan EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)

Gambar 8 adalah hasil analisis menggunakan EDS. Dari hasil EDS dapat diketahui bahwa material yang digunakan mengandung senyawa SnO₂. Ini berarti

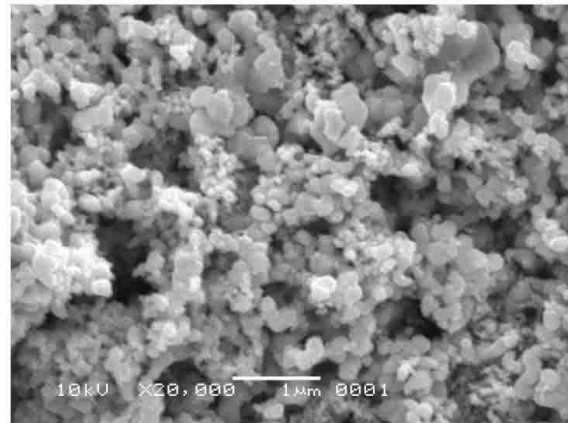


Gambar 8. EDS Sensor Berbasis SnO₂.

dengan metode sol-gel didapatkan kristal SnO₂. Di mana elemen-elemen penyusunnya adalah O dengan persen massa 21,23% dan Sn dengan persen massa 78,77%. Puncak Sn dapat diketahui pada energi 3,442 keV.

C. Karakterisasi menggunakan SEM (Scanning Electron Microscope)

Untuk mengetahui ukuran partikel-partikel SnO₂ hasil sintesis maka dilakukan pengambilan gambar dengan SEM yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Struktur mikro permukaan lapisan SnO₂.

D. Pengujian Sensor

Data hasil pengujian perubahan resistansi sensor terhadap temperatur operasional pada Tabel 2. Sedangkan hasil pengujian perubahan resistansi sensor terhadap konsentrasi gas CO, diperoleh data seperti dalam Table 3.

TABEL II
DATA PENGUJIAN PERUBAHAN RESISTANSI SENSOR TERHADAP PERUBAHAN TEMPERATUR OPERASIONAL

V (Volt)	T (C)	R (K Ohm)
1,88	100	17,47
2,12	110	13,66
2,37	120	10,89
2,49	130	9,99
2,69	140	5,86
2,8	150	4,66
2,91	160	1,53
3,05	170	0,878
3,25	180	0,586

TABEL III
DATA PENGUJIAN PERUBAHAN RESISTANSI SENSOR TERHADAP
PERUBAHAN KONSENTRASI GAS CO

R (Ohm)	Konsentrasi Gas CO
586	0
422	250
130	500
114	750
100	1000
97	1250

Data nilai sensitivitas sensor terhadap perubahan konsentrasi gas CO diperoleh data seperti pada Tabel 4.

TABEL IV
DATA PENGUJIAN NILAI SENSITIVITAS TERHADAP PERUBAHAN
KONSENTRASI GAS CO

Konsentrasi Gas CO (ppm)	R (Ohm)	S
0	586	
250	422	1,38862
500	130	4,50769
750	114	5,14035
1000	100	5,86
1250	97	6,04123

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian pada pendahuluan, dasar teori, hasil penelitian dan pembahasan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Harga resistansi sensor SnO₂ cenderung menurun untuk setiap kenaikan temperatur operasional
2. Resistansi sensor menurun untuk konsentrasi gas CO yang semakin tinggi.

3. Sensitivitas sensor meningkat untuk konsentrasi gas CO yang semakin tinggi. Dan sensitivitas terbesar didapatkan untuk konsentrasi gas CO pada konsentrasi 0-500 ppm yaitu 9.10^{-3} tiap 1 ppm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PPET-LIPI melalui Program Kegiatan Tematik T.A 2009-2010 yang telah memberikan kesempatan melaksanakan kegiatan ini hingga terwujudkannya sebuah *prototype* sensor gas CO.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. V. Patil, C. G. Dighavkar, S. K. Sonawane, S. J. Patila, R. Y. Borse, "Effect of firing temperature on electrical and structural characteristic of screen printed ZnO thick film", *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials*, vol. 1, issue 2, pp. 226 – 233, June 2009.
- [2] Retnaningsih L dan Hermida I. D. P (2006), "Karakterisasi Sensor Gas Karbon Monoksida (CO) Berbasis Bahan SnO₂", Prosiding Seminar Nasional VIII – Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia, 26-27 April 2005, Yogyakarta, ISSN 0854-4778.
- [3] M. R. Haskard, *Thick Film Hybrid: Manufacture and Design*, Sydney, Australia: Prentice Hall, 1988.
- [4] N. Barsan and U. Weimar, "Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO₂ sensors in the presence of humidity", *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 15, pp. R813-R839, 2003.
- [5] B. Licznarski, "Thick-film gas microsensors based on tin dioxide", *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, vol. 52, no. 1, pp. 37-42, 2004.
- [6] A. Flueraşu, N. Barsan, and K. K. Chin "Reducing gas sensing mechanisms in thick porous SnO₂ layers", *Bulletin of the American Physical Society*, March 20-24, 2000.
- [7] C. J. Brinker and G. W. Scherer, *Sol-Gel Science - The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, New York, USA: Academic Press, 1990.