

Karakterisasi Arus-Tegangan Sensor Gas Hidrogen Dari Bahan Semikonduktor Heterokontak ZnO/SnO₂ (TiO₂)

Melia Rosa*, Elvaswer

Laboratorium Fisika Material, Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 11 Februari 2022
Direvisi: 24 Februari 2022
Diterima: 23 Maret 2022

Kata kunci:

karakterisasi i-v
konduktivitas
selektivitas
sensitivitas
waktu respon

Keywords:

characterization i-v
conductivity
selectivity
sensitivity
response time

Penulis Korespondensi:

Melia Rosa
Email: meliarosa60@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan doping TiO₂ pada bahan dasar hetero ZnO/SnO₂ sebagai sensor gas hidrogen terhadap karakteristik I-V, nilai sensitivitas, konduktivitas, selektivitas, waktu respon, dan karakterisasi XRD. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *solid state reaction*. Pembuatan sensor gas hidrogen diawali dengan pencampuran bahan, kalsinasi pada suhu 500°C selama 4 jam, penggerusan, kompaksi, dan proses sintering pada suhu 700°C selama 4 jam. Berdasarkan pengukuran karakteristik I-V, diperoleh hasil bahwa bahan ZnO/SnO₂ (6% mol TiO₂) memiliki sensitivitas tertinggi yaitu 6,06 pada tegangan 12 volt. Nilai selektivitas tertinggi diperoleh pada sampel ZnO/SnO₂ (4% mol TiO₂) yaitu 1,89 pada tegangan 30 volt. Nilai konduktivitas tertinggi diperoleh pada sampel ZnO/SnO₂ (6% mol TiO₂) yaitu $9,81 \times 10^{-3} \Omega m$ pada lingkungan hidrogen. Waktu respon bahan dengan komposisi ZnO/SnO₂ (8% mol TiO₂) pada gas hidrogen yaitu 30 s pada tegangan 12 volt. Waktu respon untuk bahan ZnO/SnO₂ (8% mol TiO₂) pada gas oksigen yaitu 36 s pada tegangan 12 volt. Dari hasil XRD menunjukkan bahwa sampel SnO₂ didoping TiO₂ mempunyai ukuran kristal lebih besar daripada sampel SnO₂ tanpa doping. Campuran SnO₂ didoping TiO₂ telah terbentuk senyawa baru yaitu Sn₂ (TiO₄) yang ditandai dengan adanya puncak-puncak baru pada grafik.

This research intent on analyzing influence of TiO₂ adding to ZnO/SnO₂ hetero as hydrogen gas sensor on its voltage-current characteristic, sensitivity, conductivity, selectivity, response time, and XRD characterization values. The method used in this research is solid state reaction with calcination temperature is 500 °C for 4 hours, grinding, compaction, and sintered at 700 °C for 4 hours. Based on voltage-current characteristic measurement, it shows that the sample ZnO/SnO₂ (6% mol TiO₂) has the highest (6,06 at 12 Volts voltage). The highest selectivity value was found in the ZnO/SnO₂ sample (4% mol TiO₂), is (1.89 at 30 volt voltage). The highest conductivity value in the hydrogen environment was in the sample of ZnO/SnO₂ doped with 6% mol TiO₂, which was $9.81 \times 10^{-3} / m$. The response time of the sample ZnO/SnO₂ (8% mol TiO₂) in hydrogen gas is 30 seconds and 36 seconds for oxygen gas at 12 V voltage. The XRD results showed that the TiO₂ doped SnO₂ sample had a larger crystal size than the un-doped SnO₂ sample. The mixture of SnO₂ doped with TiO₂ has formed a new compound that is Sn₂ (TiO₄) which is characterized by new peaks on the graph.

Copyright © 2022 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Hidrogen merupakan unsur paling melimpah dengan persentase 75% dari total massa unsur di alam semesta. Sifat hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, bersifat non-logam, bervalensi tunggal dan termasuk gas diatomik yang mudah terbakar (Yang, dkk., 2014). Salah satu energi alternatif terbarukan dan ramah lingkungan dalam sektor industri otomotif ialah hidrogen, misalnya untuk bahan bakar roket dan bahan bakar kendaraan bermotor, seperti mobil dan sepeda motor (Hübert, dkk., 2014). Energi bahan bakar hidrogen mempunyai keuntungan yaitu lebih ramah lingkungan, tidak berpolusi dibandingkan bahan bakar fosil. Namun hidrogen juga mempunyai kekurangan dalam penyimpanannya (Gupta, 2009). Lesmana dkk. (2016) menyebut bahwa gas hidrogen yang memiliki kadar di atas 4% jika bercampur dengan oksigen (O₂) mudah memicu kebakaran dan ledakan. Untuk dapat meminimalisir kebocoran gas hidrogen, maka diperlukan sensor yang mampu mendeteksi kebocoran gas tersebut.

Sensor gas sudah banyak dikembangkan saat ini dengan menggunakan bahan semikonduktor logam oksida seperti TiO₂, ZnO, CuO dan SnO₂. Sensor dengan bahan semikonduktor memiliki kelebihan dalam mendeteksi gas, salah satunya dapat dilihat dari perubahan konduktivitas pada bahan semikonduktor. Kelebihan lain dari sensor semikonduktor yaitu biaya bahan dan pembuatan yang murah dibandingkan dengan sensor elektrokimia dan optik (Hendri dan Elvaswer., 2012). Penelitian mengenai sensor gas semikonduktor pernah dilakukan sebelumnya oleh Mondal (2014) dengan menggunakan gas hidrogen pada bahan komposit ZnO-SnO₂. Hasil penelitian menunjukkan selektivitas terhadap gas hidrogen adalah 0,35. Waktu respon sensor hidrogen adalah 60s untuk 10000 ppm gas hidrogen pada suhu 150°C.

Selanjutnya, Shaposhnik dkk. (2012) juga melakukan penelitian sensor gas hidrogen menggunakan bahan semikonduktor SnO₂-TiO₂. Penelitian dilakukan pada lima sampel dengan persentase yang berbeda-beda. Hasil penelitian menunjukkan waktu respon yang didapat untuk semua sensor sebesar 12-14 detik pada suhu 450-500°C. Penelitian juga dilakukan oleh Yulita dan Elvaswer (2018) tentang sensor gas hidrogen menggunakan bahan semikonduktor heterokontak SnO₂/TiO₂ (Na₂CO₃). Hasil penelitian menunjukkan sensitivitas pada sampel SnO₂/TiO₂ didoping 2% mol Na₂CO₃ sebesar 5 pada tegangan 6 volt. Waktu respon sensor hidrogen sebesar 39 s pada suhu ruang.

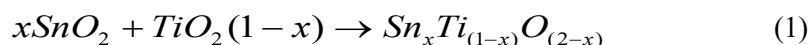
Pada penelitian ini akan dibuat sensor gas hidrogen dari bahan semikonduktor heterokontak ZnO/SnO₂ (TiO₂). Sensitivitas sensor gas dapat ditingkatkan dengan cara mendoping bahan utama dengan logam mulia atau bahan metal oksida. Penelitian dilakukan untuk menghasilkan sensor gas hidrogen yang dapat bekerja pada suhu ruang, memiliki sensitivitas dan selektivitas yang tinggi, dan waktu respon yang cepat.

II. METODE

Sintesis bahan, termasuk proses *sintering* dan kalsinasi dilakukan di Laboratorium Fisika Material Universitas Andalas. Pencetakan pelet dilaksanakan di Laboratorium Sediaan Formulasi Tablet Farmasi Universitas Andalas. Karakterisasi sampel menggunakan XRD dilakukan di Jurusan Fisika Universitas Negeri Padang.

2.1 Persiapan dan pembuatan pelet

Bahan-bahan yang digunakan antara lain Timah Oksida (SnO₂), Titanium dioksida (TiO₂) dan Seng Oksida (ZnO). Komposisi SnO₂ dengan TiO₂ dihitung berdasarkan reaksi kimia yang dinyatakan dengan persamaan (1).

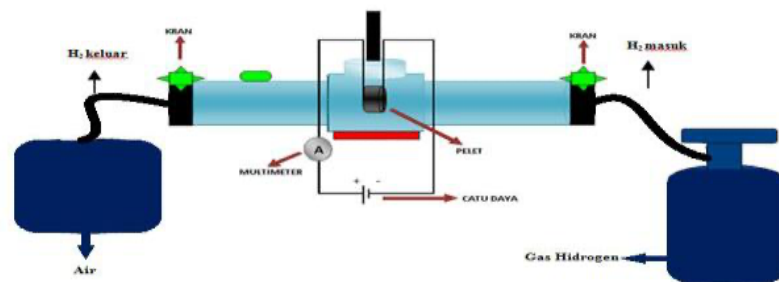


Dengan x adalah persentase doping setelah bahan tercampur, bahan digerus selama 10 menit supaya homogen, kemudian dikalsinasi pada suhu 500°C selama 4 jam. Kemudian bahan dicetak sehingga berbentuk pelet lalu disintering pada suhu 700°C selama 4 jam.

2.2 Karakterisasi Sampel

Setelah proses *sintering* dilakukan, sampel dihubungkan dan dirangkai seperti skema rangkaian pada Gambar 1. Sampel dirangkai bias maju dan kemudian dilanjutkan pada bias mundur. Pengukuran karakteristik arus dan tegangan (I-V) pada bias maju dan bias mundur tegangan

divariasikan dari -30 volt sampai dengan 30 volt dengan interval kenaikan 3 volt. Pengukuran bias maju dan bias mundur dilakukan dengan merangkai salah satu bagian elektroda sampel dihubungkan dengan kutub positif sedangkan lainnya dihubungkan dengan kutub negatif yang disebut rangkaian bias maju dan untuk bias mundur polaritasnya dibalik.



Gambar 1 Skema rangkaian alat pengujian sensor hidrogen

Pengukuran karakteristik I-V akan menentukan nilai sensitivitas, selektivitas, dan konduktivitas sensor. Sensitivitas merupakan kemampuan suatu bahan menerima suatu rangsangan atau peka dalam mendeteksi suatu gas, setelah itu dilakukan perhitungan nilai sensitivitas menggunakan Persamaan (2).

$$S = \frac{I_{hidrogen}}{I_{udara}} \quad (2)$$

dengan S adalah sensitivitas, $I_{hidrogen}$ adalah arus sampel pada lingkungan hidrogen, I_{udara} adalah arus sampel pada lingkungan udara.

Selektivitas merupakan kemampuan sensor menyeleksi suatu gas yang ingin dideteksinya. Nilai selektivitas dapat ditentukan dari Persamaan (3).

$$S_{selec} = \frac{I_{hidrogen}}{I_{oksigen}} \quad (3)$$

dengan S_{selec} adalah selektivitas, $I_{hidrogen}$ adalah arus sampel pada lingkungan hidrogen, $I_{oksigen}$ adalah arus pada lingkungan oksigen. (Mondal, dkk., 2014)

Konduktivitas merupakan kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik. Nilai konduktivitas dapat ditentukan dari Persamaan (4).

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (4)$$

dengan σ adalah konduktivitas, R adalah resistansi (Ω), A adalah luas penampang (m^2), dan L adalah panjang kawat (m).

Waktu respon adalah waktu yang diperlukan sensor untuk mengenali gas yang akan dideteksinya. Karakterisasi sampel menggunakan XRD untuk mengetahui ukuran dan struktur kristal yang terbentuk dari sampel SnO₂ (TiO₂). Ukuran kristal dapat dihitung menggunakan Persamaan Scherrer pada Persamaan (5).

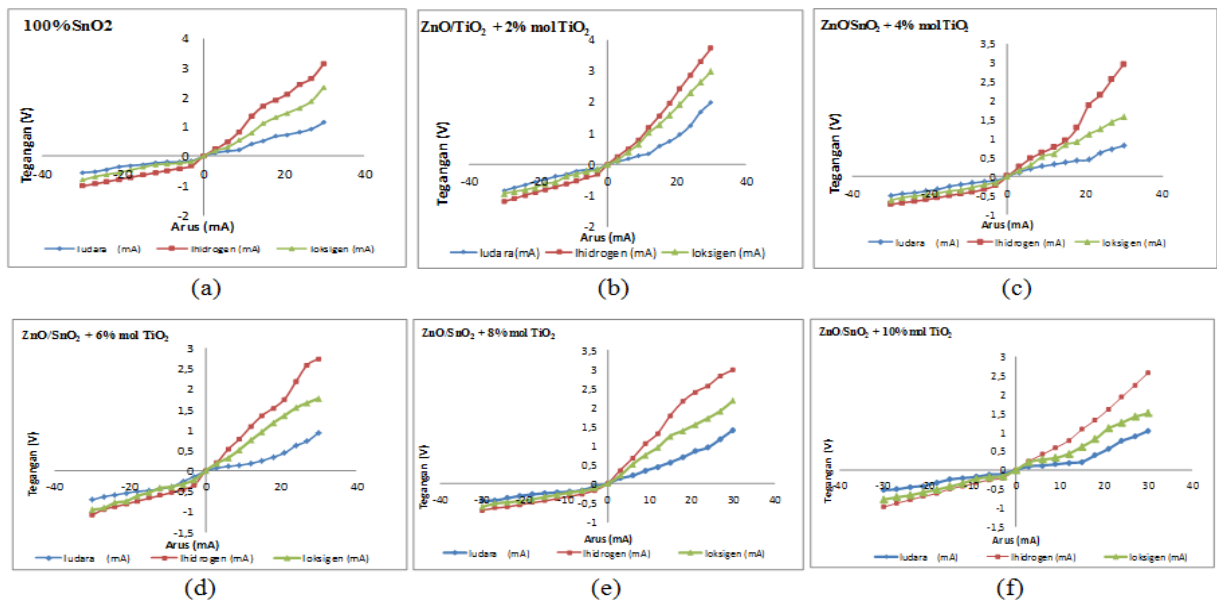
$$D = \frac{0,9}{B \cos \theta} \quad (5)$$

dengan D adalah ukuran kristal, θ adalah sudut Bragg, B adalah FWHM (*Full Width Half Maximum*) atau lebar puncak difraksi pada setengah maksimum, dan nilai 0,9 merupakan nilai konstanta material yang umumnya dipakai.

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Karakteristik I-V

Nilai karakteristik I-V masing-masing sampel pada lingkungan hidrogen, udara, dan oksigen dapat ditampilkan sebagai grafik arus-tegangan. Karakterisasi I-V masing-masing sampel ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Grafik karakteristik I-V pada lingkungan udara, hidrogen dan oksigen (a) ZnO/ SnO₂, (b) ZnO/SnO₂ + 2% mol TiO₂, (c) ZnO/SnO₂ + 4% mol TiO₂, (d) ZnO/SnO₂ + 6% mol TiO₂, (e) ZnO/SnO₂ + 8% mol TiO₂, (f) ZnO/SnO₂ + 10% mol TiO₂

Gambar 2 (a) menunjukkan bahwa material semikonduktor sudah dapat membedakan lingkungan udara, hidrogen dan oksigen. Perubahan arus yang terjadi pada lingkungan udara, hidrogen dengan arus pada lingkungan oksigen masih rendah. Hal ini disebabkan belum adanya pemberian doping pada bahan TiO₂ untuk sampel ZnO/SnO₂ yang memiliki energi gap lebih besar dibandingkan setelah didoping, sehingga elektron sulit untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi.

Gambar 2 (b) menunjukkan perubahan arus lingkungan udara, hidrogen dengan arus pada lingkungan oksigen terjadi peningkatan dibandingkan sampel sebelum diberikan doping. Hal ini karena kehadiran atom TiO₂ terhadap SnO₂ dalam jumlah yang tepat pada permukaan sensor menyebabkan jarak antar muka atau batas butir semakin pendek. Proses ini mempermudah mekanisme pembawa muatan melewati daerah antar butir. Sehingga dengan komposisi doping yang tepat, gas hidrogen akan maksimal bereaksi dengan oksida yang mengakibatkan menurunnya potensial barrier.

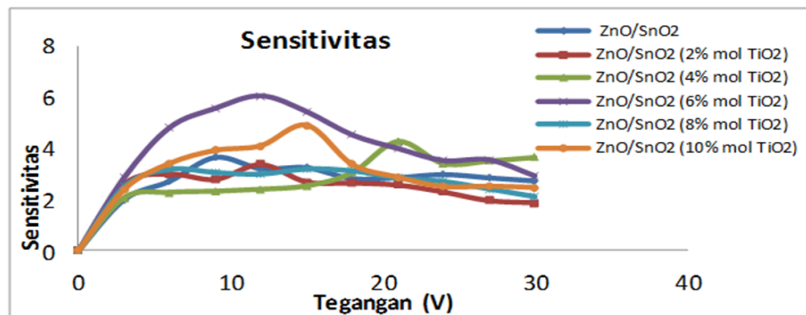
Gambar 2 (c) dan (d) pada lingkungan hidrogen memiliki perbedaan arus yang tinggi dibandingkan arus pada lingkungan udara dan oksigen. Hal ini disebabkan karena hidrogen lebih banyak bereaksi dengan oksida sehingga dapat memperkecil daerah deplesi antar muka partikel yang membuat elektron mudah berpindah dari satu partikel ke partikel lainnya. Pada bias mundur perbandingan arus pada lingkungan udara, oksigen, dan hidrogen sangat kecil. Hal ini disebabkan pada bias mundur, reaksi hidrogen dan oksigen dengan oksida sedikit terjadi sehingga daerah deplesi membesar.

Gambar 2 (e) menunjukkan sampel ZnO/SnO₂ + 8% mol TiO₂ pada lingkungan hidrogen jauh lebih tinggi dibandingkan arus pada lingkungan oksigen dan udara. Molekul-molekul hidrogen ini bereaksi dengan oksida sehingga mengikat elektron bebas yang ada pada permukaan material sensor semikonduktor. Pengikatan elektron bebas menyebabkan lapisan pada daerah deplesi semakin mengecil sehingga mengakibatkan arus mengalir pada lingkungan hidrogen akan semakin meningkat.

Gambar 2 (f) menunjukkan sampel ZnO/SnO₂ + 10% mol TiO₂ arus pada lingkungan hidrogen, oksigen dan udara mengalami penurunan. Hal ini disebabkan akibat pemberian doping yang maksimal sebanyak 10% TiO₂. Pemberian doping yang berlebihan dapat menurunkan daerah deplesi, karena terjadinya hubungan antar muka gas hidrogen dengan TiO₂ sehingga akan mengurangi reaksi kimia antara hidrogen dengan oksida.

3.2 Karakteristik Sensitivitas

Sensitivitas sensor gas hidrogen dapat diketahui berdasarkan grafik karakteristik *I-V* yang telah diperoleh dan dihitung menggunakan Persamaan 2. Perubahan nilai sensitivitas masing-masing sampel dapat dilihat pada Gambar 3.

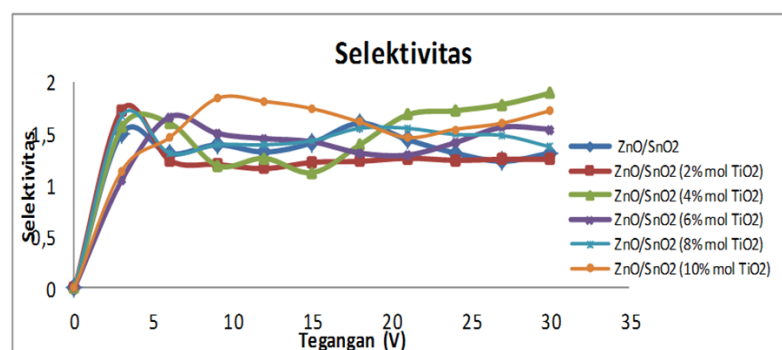


Gambar 3 Grafik perubahan sensitivitas terhadap tegangan (v)

Berdasarkan Gambar 3 nilai sensitivitas tertinggi terdapat pada sampel semikonduktor heterokontak ZnO/SnO₂ (TiO₂) dengan persentase mol 94% mol SnO₂ + 6% mol TiO₂ pada tegangan 12 volt dengan nilai sensitivitas 6,06. Hal ini menyebabkan terjadinya pengecilan daerah deplesi antarmuka partikel sehingga elektron mudah melompat dari pita valensi ke pita konduksi. Penggunaan doping TiO₂ pada bahan SnO₂ dimaksudkan untuk mendapatkan material sensor yang memiliki serapan gas yang tinggi. Sensitivitas terendah terdapat pada sampel ZnO/SnO₂ (8% mol TiO₂), hal ini disebabkan oleh reaksi antar hidrogen dengan oksida sedikit. Sehingga energi gap besar menyebabkan arus yang dihasilkan dilingkungan hidrogen kecil.

3.3 Karakteristik Selektivitas

Selektivitas sensor gas hidrogen dapat diketahui berdasarkan grafik karakteristik *I-V* yang telah diperoleh dan dihitung menggunakan Persamaan 3. Perubahan nilai sensitivitas masing-masing sampel dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik perubahan selektivitas terhadap tegangan

Gambar 4 dapat dilihat bahwa selektivitas bahan heterokontak ZnO/SnO₂ tanpa doping TiO₂ memiliki selektivitas sebesar 1,44 dalam 100% mol ZnO. Setelah sampel hetero ZnO/SnO₂ didoping dengan TiO₂, diperoleh selektivitas tertinggi pada sampel 96% mol SnO₂ + 4% mol TiO₂ pada tegangan 30 volt dengan nilai selektivitas 1,89. Kenaikan ini membuktikan penambahan doping sangat berpengaruh. Hal ini disebabkan karena doping 4% mol terhadap SnO₂ menyebabkan terjadinya pengecilan daerah deplesi antarmuka partikel yang menyebabkan peningkatan arus yang paling tinggi. Peningkatan selektivitas pada sampel ini karena peranan doping TiO₂ yang dapat menghasilkan

elektron bebas yang lebih banyak. Jarak celah yang cukup besar antarsampel ini yang mengakibatkan gas lebih bebas masuk ke permukaan sampel yang menyebabkan daerah deplesi semakin mengecil.

3.4 Karakteristik Konduktivitas

Nilai konduktivitas pada lingkungan udara, oksigen maupun lingkungan hidrogen dapat diketahui berdasarkan perhitungan sesuai dengan Persamaan 4. Perubahan nilai konduktivitas sebelum dan sesudah dialiri gas hidrogen pada masing-masing sampel terdapat pada Tabel 1.

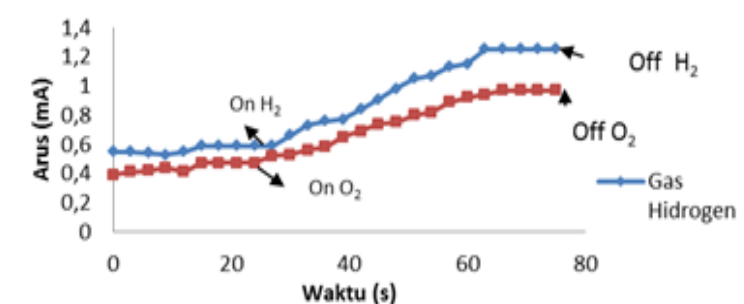
Tabel 1 Konduktivitas sampel di lingkungan udara, oksigen dan hidrogen

Sampel	Konduktivitas ($10^{-3} / \Omega m$)		
	Lingkungan Udara	Lingkungan Oksigen	Lingkungan Hidrogen
ZnO/ SnO ₂	2,25	6,98	9,01
ZnO/ SnO ₂ (2% mol TiO ₂)	3,42	7,45	8,11
ZnO/ SnO ₂ (4% mol TiO ₂)	2,95	6,79	9,17
ZnO/ SnO ₂ (6% mol TiO ₂)	3,00	8,12	9,81
ZnO/ SnO ₂ (8% mol TiO ₂)	3,40	7,43	9,63
ZnO/ SnO ₂ (10% mol TiO ₂)	2,66	7,63	8,05

Nilai konduktivitas tertinggi pada lingkungan udara yaitu sampel SnO₂ didoping 2% mol TiO₂ dengan nilai konduktivitasnya $3,42 \times 10^{-3} / \Omega m$, nilai konduktivitas tertinggi pada lingkungan oksigen yaitu $8,12 \times 10^{-3} / \Omega m$. Hal ini disebabkan karena pada sampel tersebut terjadi reaksi antara gas-gas yang terkandung di udara dan oksigen dengan oksida, sedangkan nilai konduktivitas tertinggi pada lingkungan hidrogen terdapat pada sampel 94% SnO₂ didoping 6% mol TiO₂ yaitu $9,81 \times 10^{-3} / \Omega m$. Hal ini terjadi karena reaksi antara hidrogen dengan oksida dan dipengaruhi oleh penambahan doping yang dapat memperkecil daerah deplesi.

3.5 Karakteristik Waktu Respon Sensor terhadap Gas Hidrogen dan Gas Oksigen

Waktu respon diukur pada sampel yang memiliki nilai sensitivitas tertinggi yaitu sampel SnO₂ didoping 8% mol TiO₂ pada tegangan 12 volt. Grafik hasil pengukuran waktu respon dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Grafik waktu respon sensor gas hidrogen dan oksigen

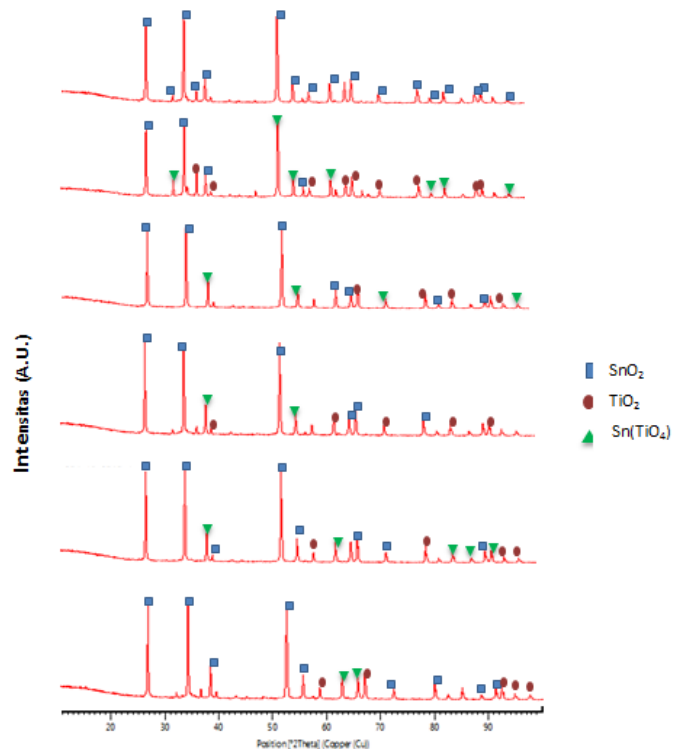
Pada pengukuran waktu respon gas hidrogen, arus stabil pada lingkungan udara dari detik ke-0 s hingga 20 s. Kemudian saat gas hidrogen dialirkan terjadi peningkatan arus secara bertahap sampai detik ke-60 s. Hal ini disebabkan karena gas hidrogen yang bereaksi dengan oksida mengakibatkan daerah deplesi mengecil sehingga arus meningkat. Waktu respon yang diperoleh pada sampel yaitu 30 sekon pada suhu kamar. Pada penelitian ini juga dihitung waktu respon sensor terhadap gas oksigen. Dimana pengukuran dilakukan di lingkungan udara hingga stabil, dilanjutkan dengan mengalirkan gas oksigen sampai nilai arus stabil. Arus stabil pada lingkungan udara dari detik ke-0 sampai detik ke-27. Kemudian saat gas oksigen di alirkan terjadi peningkatan arus secara bertahap sampai detik ke-63. Waktu respon yang diperoleh pada sampel yaitu 36 detik pada suhu kamar.

3.6 Karakteristik Sampel Menggunakan XRD

Pengamatan struktur kristal, ukuran kristal dan senyawa yang terbentuk dalam material SnO₂ didoping TiO₂ dengan persentase 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% mol menggunakan XRD.

Penambahan TiO₂ mempengaruhi ukuran kristal. Ukuran kristal dihitung dengan menggunakan Persamaan 5. Hasil karakteristik dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6 menunjukkan hasil XRD munculnya puncak-puncak baru pada bahan SnO₂ yang didoping dengan TiO₂ yaitu Sn₂ (TiO₄). Penambahan SnO₂ terhadap TiO₂ mempengaruhi ukuran kristal. Ukuran kristal 100% ZnO pada intensitas puncak tertinggi yaitu 113,33 nm, sedangkan ukuran kristal yang didoping dengan TiO₂ menunjukkan perbedaan yang cukup besar. Hal ini akibat pengaruh doping selama *sintering* mengakibatkan kristal terpisah menjadi beberapa sehingga ukuran kristal mengecil dibandingkan sebelum didoping. Sebaliknya jika persentase doping ditingkatkan menjadi 6% sampai 10 % mol TiO₂ ukuran kristal meningkat. Hal ini disebabkan karena dua kristal membentuk antar muka.



Gambar 6 Pola difraksi sinar-X pada sampel 100% mol SnO₂, 2% mol TiO₂ + 98% mol SnO₂, 4% mol TiO₂ + 96% mol SnO₂, 6% mol TiO₂ + 94% mol SnO₂, 8% mol TiO₂ + 92% mol SnO₂, dan 10% mol TiO₂ + 90% mol SnO₂

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa sensor gas hidrogen yang telah dibuat mampu membedakan antara kondisi di lingkungan udara, oksigen dan hidrogen. Nilai sensitivitas tertinggi didapatkan pada sampel ZnO/SnO₂ (6% mol TiO₂) memiliki sensitivitas tertinggi yaitu 6,06 pada tegangan operasional 12 volt. Nilai selektivitas tertinggi diperoleh pada sampel ZnO/SnO₂ (4% mol TiO₂) yaitu 1,89 pada tegangan 30 volt. Nilai konduktivitas tertinggi diperoleh pada sampel ZnO/SnO₂ (6% mol TiO₂) yaitu $9,81 \times 10^{-3} / \Omega\text{m}$ pada lingkungan hidrogen. Waktu respon bahan dengan komposisi ZnO/SnO₂ (8% mol TiO₂) pada gas hidrogen yaitu 30 s pada tegangan 12 volt. Waktu respon untuk bahan ZnO/SnO₂ (8% mol TiO₂) pada gas oksigen yaitu 36 s pada tegangan 12 volt. Dari hasil XRD menunjukkan bahwa sampel SnO₂ didoping TiO₂ mempunyai ukuran kristal lebih besar daripada sampel SnO₂ tanpa doping. Campuran SnO₂ didoping TiO₂ telah terbentuk senyawa baru yaitu Sn₂ (TiO₄) yang ditandai dengan adanya puncak-puncak baru pada grafik.

DAFTAR PUSTAKA

- Gupta, R. B. (2009). Hydrogen Fuel Production, Transport, and Storage. *CRC Press, USA*, 17-29
Hendri dan Elvaswer. (2012). Karakterisasi TiO₂(CuO) yang Dibuat dengan Metoda Keadaan Padat (Solid State Reaction) sebagai Sensor Gas CO₂. *Jurnal Fisika Unand*, 1(1), 25–29

- Hübert, T., Boon-Brett, L., Palmisano, V., dan Bader, M. A. (2014). Developments in gas sensor technology for hydrogen safety. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), 20474–20483.
- Lesmana, I. G. E., Setiyono, dan Arenda, P. (2016). Pengaruh Gas Hidrogen Hasil Proses Elektrolisis Air Terhadap Efisiensi Bahan Bakar Premium Pada Kinerja Genset. 14(2), 63–70.
- Mondal, B., Basumatari, B., Das, J., dan Roychaudhury, C. (2014). ZnO – SnO₂ based composite type gas sensor for selective hydrogen sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 194, 389–396.
- Mulyadi. (2009). Pengaruh Ion Logam Fe(III) terhadap Penurunan Kadar Fenol dengan Katalis Titanium Dioksida (TiO₂) Melalui Reaktor Membran Fotokatalik. *Skripsi*, Semarang: UNIMUS Digital Library.
- Patil, A., Dighavkar, C., dan Borse, R. (2011). Al doped ZnO thick films as CO₂ gas sensors. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 13(10), 1331–1337.
- Shaposhnik, D., Pavelko, R., Llobet, E., Gispert-guirado, F., dan Vilanova, X. (2012). Hydrogen sensors on the basis of SnO₂ – TiO₂ systems. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 174, 527–534.
- Yang, L., Yin, C., Zhang, Z., dan Zhu, B. (2014). A study of hydrogen sensing properties and microstructure for highly dispersed Pd SnO₂ thin films with high response magnitude. *Applied Surface Science, Elsevier*, 311, 74–82.
- Yulita dan Elvaswer. (2018). Karakterisasi Arus-Tegangan Sensor Gas Hidrogen dari Bahan Semikonduktor Heterokontak SnO₂ / TiO₂ (Na₂CO₃). *Jurnal Fisika Unand*, 7(4), 386–392.