

## Karakterisasi Arus dan Tegangan Detektor Gas Hidrogen dari Bahan Semikonduktor Heterokontak $\text{TiO}_2/\text{ZnO}(\text{Mg})$

Ilham Afriesta Bahar, Elvaswer\*

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

Info Artikel	ABSTRAK
<p><b>Histori Artikel:</b> Diajukan: Direvisi: Diterima:</p>	<p>Telah dilakukan pembuatan dan karakterisasi detektor gas hidrogen berupa pelet heterokontak. Pelet terdiri dari lapisan pertama yaitu <math>\text{TiO}_2</math> dan lapisan kedua terdiri dari <math>\text{ZnO}</math> yang didoping dengan 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% mol Mg. Pembuatan detektor diawali dengan pencampuran bahan, penggerusan bahan selama 4 jam, kalsinasi pada suhu <math>500\text{ }^\circ\text{C}</math> selama 4 jam, penggerusan ulang selama 1 jam, kompaksi menjadi pelet, dan sintering pada suhu <math>800\text{ }^\circ\text{C}</math> selama 4 jam menggunakan metode reaksi dalam keadaan padat. Detektor gas diuji pada suhu ruang dengan karakterisasi I-V, penentuan nilai sensitivitas, selektivitas, konduktivitas, waktu respon, dan karakterisasi XRD. Pengukuran karakteristik I-V menunjukkan bahwa sampel <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> didoping 4% mol Mg memiliki sensitivitas tertinggi yaitu 6,33 dengan tegangan 21 volt pada suhu ruang. Nilai selektivitas tertinggi terdapat pada sampel <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> didoping 2% mol Mg yaitu 1,54 dengan tegangan 30 volt. Konduktivitas tertinggi terdapat pada sampel <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> didoping 6% mol Mg sebesar <math>18,54/\Omega\text{m}</math> pada lingkungan hidrogen. Waktu respon sampel <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> didoping 4% mol Mg pada tegangan 21 volt adalah 42 s. Hasil XRD menunjukkan bahwa sampel <math>\text{ZnO}</math> yang didoping Mg memiliki ukuran kristal yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel <math>\text{ZnO}</math> tanpa doping.</p>
<p><b>Kata kunci:</b> Detektor Gas Hidrogen Heterokontak Sensitivitas Waktu Respon</p>	<p><i>Current-voltage manufacture and characterization of hydrogen detectors in the form of pellet has been conducted. Pellets consist of <math>\text{TiO}_2</math> in the first layer and Mg doped (2%, 4%, 6%, 8%, and 10% mole) <math>\text{ZnO}</math> in the second one. Pellets have been manufactured using solid state reaction method consisting materials mixing, milling for 4 hours using agate mortar, calcination at <math>500\text{ }^\circ\text{C}</math> for 4 hours, another milling for 1 hour, compaction, and sintering at <math>800\text{ }^\circ\text{C}</math> for 4 hours. Detectors were then characterized in room temperature to determine I-V characteristics, sensitivity, selectivity, response time, and XRD characteristics. Current-voltage measurement showed that <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> doped with 4% mole Mg has the highest sensitivity towards hydrogen gas, which is 6.33 at a given voltage of 21 volt. Among all samples, <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> doped with 2% mole Mg showed the highest selectivity, which is 1.54 at a given voltage of 30 volt. Conductivity of detectors have been calculated, with of which <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> doped with 6% mole Mg showed the highest conductivity <math>18.54/\Omega\text{m}</math> in hydrogen environment. Response time of <math>\text{TiO}_2/\text{ZnO}</math> doped with 4% mole Mg is 42 s. XRD results showed that <math>\text{ZnO}</math> doped with Mg have lower crystal size compared with undoped <math>\text{ZnO}</math>.</i></p>
<p><b>Keywords:</b> Detector Hydrogen Gas Heterocontact Sensitivity Response Time</p>	<p>Copyright © 2023 Author(s). All rights reserved</p>
<p><b>Penulis Korespondensi:</b> Elvaswer Email: <a href="mailto:elvaswer@sci.unand.ac.id">elvaswer@sci.unand.ac.id</a></p>	

## I. PENDAHULUAN

Hidrogen adalah gas yang tidak berbau, tidak berwarna, dan tidak dapat dirasakan oleh indra manusia (Inicka and Lukaszewicz, 2020). Hidrogen merupakan salah satu energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan sehingga berpotensi untuk dijadikan bahan bakar kendaraan seperti mobil dan sepeda motor. Selain sebagai energi alternatif, hidrogen telah digunakan dalam penyulingan minyak maupun produksi besi dan baja. Hidrogen biasanya disimpan dalam tabung khusus. Gas hidrogen mudah terbakar dan dapat meledak sehingga dibutuhkan sensor untuk mendeteksi terjadinya kebocoran (Soundarrajan and Schweighardt, 2008).

Sensor semikonduktor oksida logam merupakan salah satu sensor gas yang sering digunakan untuk mendeteksi gas yang bersifat toksik dan mudah terbakar seperti H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, dan etanol karena berukuran kecil, sangat sensitif, dan stabil (Lai *et al.*, 2019). Sensor semikonduktor banyak dikembangkan, seperti timah (IV) oksida (SnO<sub>2</sub>), titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>), seng oksida (ZnO), niobium pentoksida (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), dan semikonduktor lainnya (Gu *et al.*, 2012).

Titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) adalah semikonduktor oksida logam yang memiliki stabilitas termal tinggi, sifat kimiawi yang sangat stabil, dan konduktivitas listrik yang sangat rendah pada suhu ruang (Tang *et al.*, 2016). Bahan TiO<sub>2</sub> banyak digunakan sebagai sensor karena memiliki sensitivitas yang tinggi dan dapat bekerja pada suhu ruang (Krško *et al.*, 2015). Selain TiO<sub>2</sub>, bahan semikonduktor seng oksida (ZnO) juga banyak digunakan sebagai sensor gas karena ZnO stabil secara termal maupun kimia dan ramah lingkungan. Sensor ZnO murni memiliki keterbatasan pada kemampuan deteksi, waktu respon yang lama, dan suhu operasi yang tinggi. Beberapa cara telah dilakukan untuk memperbaiki keterbatasan sensor ZnO, seperti doping dan penggunaan nano komposit (Ren *et al.*, 2020). Sambungan heterokontak juga dapat mengubah karakteristik sensor.

Penelitian sensor gas hidrogen pernah dilakukan Aygün and Cann (2005) menggunakan bahan CuO/ZnO didoping bahan monovalen (Li, Na) dan isovalen (Ca, Sr, Ni). Hasilnya sensor CuO/ZnO mengalami peningkatan sensitivitas setelah didoping. Sensitivitas tertinggi ditunjukkan sensor CuO/ZnO didoping 2,5% mol Ni yaitu 6,2 pada tegangan 10 volt dan suhu operasional 400 °C. Penelitian lain dilakukan Syafnur and Elvaswer (2017) menggunakan CuO didoping ZnO dengan metode reaksi dalam keadaan padat. Sensor CuO(ZnO) yang dihasilkan memiliki sensitivitas tertinggi 4,59 dan waktu respon 45 s pada tegangan 21 volt.

Penelitian serupa pernah dilakukan oleh Amelia and Elvaswer (2018) menggunakan bahan SnO<sub>2</sub> didoping Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dengan metode reaksi dalam keadaan padat. Sensor SnO<sub>2</sub> yang didoping 8% mol Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> menunjukkan sensitivitas tertinggi yaitu 4,83 dan selektivitas 2,92 pada tegangan 9 volt dengan waktu respon 63 s. Li *et al.*, (2021) juga meneliti sensor hidrogen menggunakan komposit WO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> dengan metode sol-gel. Sensor WO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> dengan komposisi WO<sub>3</sub> sebanyak 4% massa (1,4% mol) menunjukkan sensitivitas tertinggi yaitu 5,26 terhadap 10.000 ppm hidrogen pada suhu ruang.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat detektor gas hidrogen berbentuk pelet dari bahan semikonduktor heterokontak TiO<sub>2</sub>/ZnO(Mg) menggunakan metode reaksi dalam keadaan padat. Bahan tersebut diuji dengan karakterisasi I-V untuk menentukan sensitivitas dan selektivitas, serta waktu respon terhadap gas hidrogen pada suhu ruang. Karakterisasi XRD dilakukan pada ZnO didoping Mg untuk menentukan senyawa yang terbentuk dan ukuran kristal bahan.

## II. METODE

### 2.1 Persiapan Pembuatan Pelet TiO<sub>2</sub>/ZnO(Mg)

Sampel dibuat sebanyak enam variasi komposisi bahan yang terdiri dari TiO<sub>2</sub>, ZnO, dan Mg. Bahan TiO<sub>2</sub> tanpa doping disiapkan dengan massa 0,3 gram untuk setiap sampel. Bahan ZnO dengan massa 0,3 gram didoping Mg dengan persentase doping 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% mol. Untuk setiap variasi sampel dibuat sebanyak 2 sampel. Komposisi ZnO dan Mg dihitung berdasarkan reaksi kimia dengan Persamaan 1.

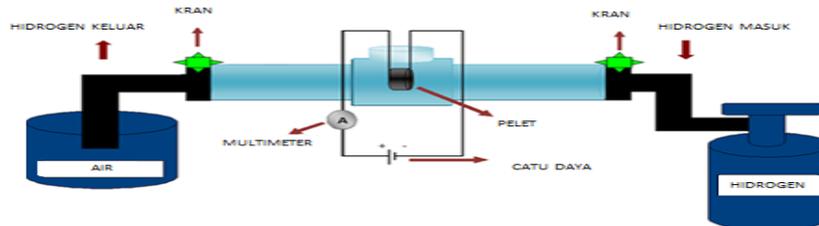


dengan  $x$  adalah jumlah zat yang didoping,  $1-x$  adalah jumlah pendoping yang ditambahkan dalam mol, sedangkan  $\alpha = \frac{(1-x)}{x}$ . Bahan digerus menggunakan mortar dan lumpang selama 4 jam hingga

menjadi halus, dan dikalsinasi pada suhu 500 °C selama 4 jam. Bahan digerus kembali selama 1 jam agar butir-butir yang menggumpal menjadi lebih halus. Bahan dikompaksi menjadi berbentuk pelet yang terdiri dari dua lapis. Lapisan pertama TiO<sub>2</sub> tanpa didoping bahan lain dan lapisan kedua ZnO didoping dengan Mg. Pelet kemudian disinter pada suhu 800 °C selama 4 jam.

## 2.2 Karakterisasi Detektor Gas Hidrogen

Pelet yang telah disinter diuji kemampuannya dengan skema alat pengujian seperti pada Gambar 1. Alat pengujian bertujuan untuk mengalirkan gas hidrogen melewati rangkaian.



**Gambar 1** Skema rangkaian alat pengujian detektor gas hidrogen  
(Sumber: Basthoh *et al.*, 2013)

Pelet dirangkai secara bias maju dengan menghubungkan salah satu elektroda sampel ke kutub positif sumber tegangan sedangkan elektroda lainnya dihubungkan ke kutub negatif sumber tegangan. Pelet kemudian dirangkai secara bias mundur dengan membalik polaritas. Sampel dan sumber tegangan dihubungkan ke multimeter. Pengukuran dilakukan dengan memvariasikan tegangan dari -30 volt sampai dengan 30 volt dengan interval 3 volt.

Pengukuran karakteristik *I-V* dilakukan untuk menentukan sensitivitas, selektivitas, dan konduktivitas detektor. Sensitivitas dihitung dengan Persamaan 2:

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

dengan *S* adalah sensitivitas, *I<sub>hidrogen</sub>* adalah arus pada lingkungan hidrogen (μA), dan *I<sub>udara</sub>* adalah arus pada lingkungan udara (μA).

Selektivitas merupakan kemampuan detektor dalam menyeleksi gas. Selektivitas ditentukan dengan Persamaan 3:

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

yang mana *selektivitas* adalah selektivitas detektor dan *I<sub>oksigen</sub>* adalah arus pada lingkungan oksigen (μA).

Konduktivitas menunjukkan kemampuan suatu bahan dalam menghantarkan arus listrik. Nilai konduktivitas dapat dihitung dengan Persamaan 4:

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

dengan  $\sigma$  adalah konduktivitas (1/Ω.m), *l* adalah ketebalan sampel (m), *R* adalah resistansi (Ω), dan *A* adalah luas penampang (m<sup>2</sup>).

Karakterisasi XRD dilakukan untuk menentukan ukuran kristal bahan. Ukuran kristal dihitung menggunakan Persamaan 5:

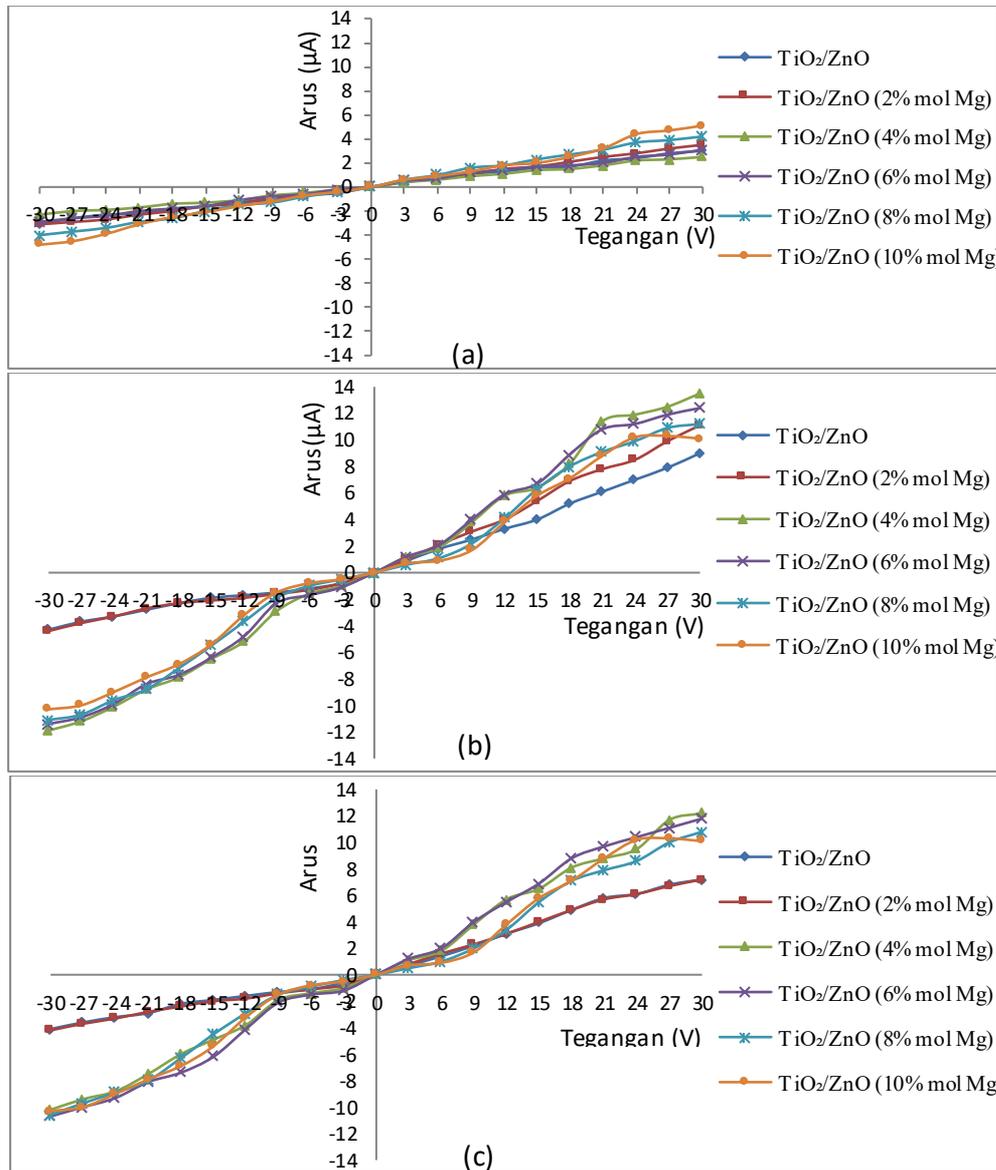
$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (5)$$

dengan *D* adalah ukuran kristal (nm), nilai 0,9 merupakan konstanta material untuk partikel bulat,  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan (nm),  $\beta$  adalah lebar penuh garis difraksi pada saat intensitas setengah maksimum (*full width half maximum*, FWHM), dan  $\theta$  adalah sudut Bragg.

### III. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Karakteristik I-V Detektor pada Lingkungan Udara, Hidrogen, dan Oksigen

Karakteristik I-V masing-masing sampel pada lingkungan udara, hidrogen, dan oksigen ditampilkan sebagai grafik arus-tegangan. Gambar 2 menunjukkan karakteristik I-V masing-masing sampel pada bias maju dan bias mundur. Arus pada bias maju di lingkungan hidrogen lebih besar nilainya dibandingkan dengan arus pada bias mundur. Perbedaan nilai ini disebabkan oleh pengecilan daerah deplesi pada bias maju, sedangkan pada bias mundur terjadi pelebaran daerah deplesi.



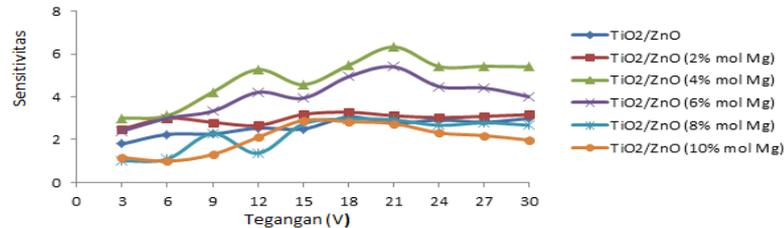
**Gambar 2** Grafik I-V pada lingkungan (a) udara, (b) hidrogen, dan (c) oksigen

Pengecilan daerah deplesi pada bias maju mengakibatkan elektron bebas pada daerah-n dapat dengan mudah berpindah menuju daerah-p dan *hole* pada daerah-p berpindah menuju daerah-n melalui sambungan heterokontak (Aygün and Cann, 2005). Pelebaran daerah deplesi mengakibatkan pembawa muatan sulit untuk berpindah melewati sambungan heterokontak, akibatnya arus pada bias maju lebih besar daripada arus pada bias mundur.

#### 3.2 Karakteristik Sensitivitas

Sensitivitas detektor dapat ditentukan berdasarkan Grafik I-V dan dihitung menggunakan Persamaan 2. Gambar 3 menunjukkan perbandingan nilai sensitivitas masing-masing sampel. Detektor TiO<sub>2</sub>/ZnO tanpa doping memiliki sensitivitas tertinggi 3,06. Sensitivitas detektor mengalami

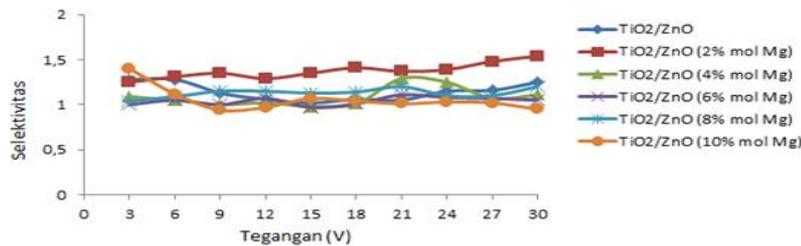
peningkatan setelah didoping 2% mol Mg menjadi 3,28 pada tegangan operasional 18 volt. Sensitivitas tertinggi ditunjukkan oleh sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO dengan ZnO didoping 4% mol Mg yaitu sebesar 6,33 pada tegangan operasional 21 volt. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan 21 volt merupakan tegangan yang paling optimal untuk detektor TiO<sub>2</sub>/ZnO(Mg) agar menghasilkan sensitivitas terbaik. Sensitivitas terendah terdapat pada sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO dengan ZnO didoping 10% mol Mg yaitu sebesar 2,90 pada tegangan 15 volt. Penambahan pendoping yang terlalu banyak dapat meningkatkan ketebalan daerah deplesi sehingga elektron sulit bergerak dan sensitivitas berkurang.



Gambar 3 Grafik pengaruh pendoping terhadap sensitivitas

### 3.3 Karakteristik Selektivitas

Selektivitas diperoleh dari perbandingan arus pada lingkungan hidrogen dan arus pada lingkungan oksigen yang dapat dilihat melalui Grafik I-V. Gambar 4 menunjukkan pengaruh pendoping terhadap selektivitas. Selektivitas tertinggi ditunjukkan oleh sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO dengan ZnO didoping 2% mol Mg yaitu 1,54 pada tegangan 30 volt. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO tanpa doping yaitu 1,28 pada tegangan 3 volt dan 6 volt. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh pendoping terhadap detektor sehingga arus pada lingkungan hidrogen menjadi lebih besar daripada arus pada lingkungan oksigen.



Gambar 4 Grafik pengaruh pendoping terhadap selektivitas

### 3.4 Karakteristik Konduktivitas

Nilai konduktivitas masing-masing sampel pada lingkungan udara dan lingkungan hidrogen dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.1. Konduktivitas masing-masing sampel sebelum dan setelah dialiri hidrogen terlihat pada Tabel 1.

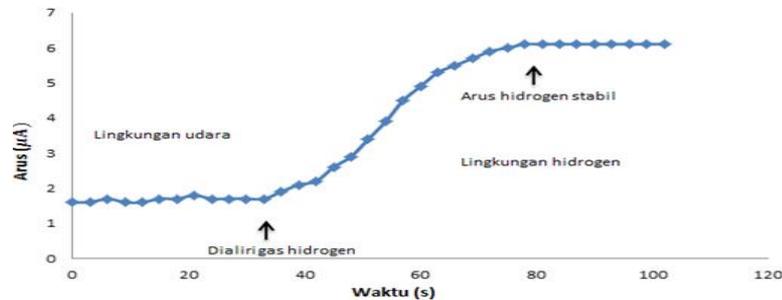
Tabel 1 Konduktivitas pada lingkungan udara dan hidrogen

Sampel	Konduktivitas (10 <sup>-6</sup> /Ωm)	
	Lingkungan udara	Lingkungan hidrogen
TiO <sub>2</sub> /ZnO	3,40	10,42
TiO <sub>2</sub> /ZnO didoping 2% mol Mg	4,21	13,82
TiO <sub>2</sub> /ZnO didoping 4% mol Mg	3,09	16,43
TiO <sub>2</sub> /ZnO didoping 6% mol Mg	3,43	18,54
TiO <sub>2</sub> /ZnO didoping 8% mol Mg	5,41	16,03
TiO <sub>2</sub> /ZnO didoping 10% mol Mg	4,81	13,94

Konduktivitas tertinggi pada lingkungan udara terdapat pada sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO didoping 8% mol Mg yaitu 5,41 x 10<sup>-6</sup>/Ωm. Konduktivitas tertinggi pada lingkungan hidrogen ditunjukkan oleh sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO didoping 6% mol Mg yaitu 18,54 x 10<sup>-6</sup>/Ωm. Konduktivitas pada lingkungan hidrogen lebih besar daripada konduktivitas pada lingkungan udara. Hal ini terjadi karena pada lingkungan hidrogen, molekul hidrogen mengikat oksida pada permukaan yang mengakibatkan daerah deplesi mengecil sehingga elektron lebih mudah melompat ke pita konduksi.

### 3.5 Karakteristik Waktu Respon Detektor terhadap Gas Hidrogen

Waktu respon menunjukkan seberapa lama suatu gas mulai terdeteksi oleh detektor. Waktu respon diukur pada sampel dengan sensitivitas tertinggi, yaitu sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO dengan ZnO didoping 4% mol Mg yaitu sebesar 6,33 pada tegangan operasional 21 volt. Gambar 5 menunjukkan grafik hasil pengukuran waktu respon.

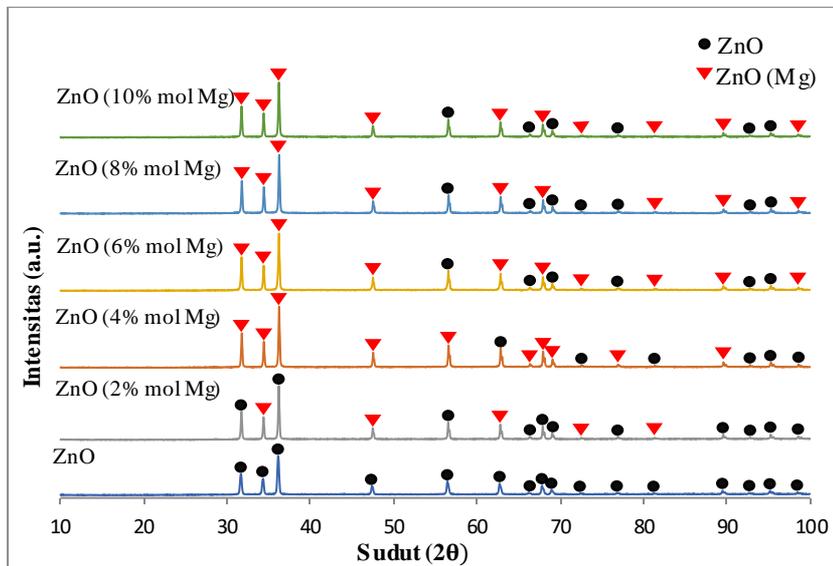


Gambar 5 Grafik waktu respon detektor terhadap gas hidrogen

Pengukuran waktu respon dilakukan setiap 3 s pada lingkungan udara hingga arus menjadi stabil, kemudian hidrogen dialirkan dan arus kembali diukur hingga nilai arus menjadi stabil. Nilai arus pada lingkungan udara bernilai stabil setelah 33 s. Gas hidrogen kemudian dialirkan pada detik 36 s. Nilai arus mengalami peningkatan secara eksponensial hingga detik 78 s, kemudian arus kembali stabil. Peningkatan arus yang signifikan ini terjadi karena perubahan keadaan dari yang awalnya lingkungan udara menjadi lingkungan hidrogen. Nilai waktu respon diperoleh dari rentang waktu saat hidrogen mulai dialirkan hingga arus menjadi stabil. Waktu respon dari hasil pengukuran ini adalah 78 s - 36 s = 42 s.

### 3.6 Karakteristik XRD

Penentuan senyawa yang terbentuk, ukuran kristal, dan struktur kristal dilakukan pada sampel ZnO tanpa doping dan ZnO didoping Mg dengan persentase doping 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% mol menggunakan XRD. Gambar 6 menunjukkan hasil karakteristik XRD.



Gambar 6 Pola difraksi sinar-x dari sampel

Sampel yang didoping Mg menunjukkan munculnya puncak-puncak baru. Hal ini berarti penambahan pendoping Mg pada sampel ZnO berhasil memunculkan senyawa baru, yaitu MgZnO. Senyawa baru MgZnO mengalami perubahan ukuran kristal dari ZnO murni. Ukuran kristal ZnO tanpa doping yaitu 54,42 nm. Setelah didoping 2% mol Mg, ukuran kristal mengalami penurunan. Pada konsentrasi doping di atas 2% mol, ukuran kristal hampir tetap. Secara rata-rata ukuran kristal per satuan volume turun menjadi 51,72 nm. Penurunan ukuran kristal ini disebabkan karena terjadinya

pertumbuhan kristal akibat bahan saling membelah diri ketika kedua bahan digabungkan. Pendoping Mg dan ZnO memiliki struktur kristal heksagonal, begitu juga dengan senyawa MgZnO.

#### IV. KESIMPULAN

Pengujian detektor gas menunjukkan bahwa detektor mampu membedakan lingkungan udara dan lingkungan hidrogen. Sensitivitas tertinggi ditunjukkan oleh sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO dengan ZnO didoping 4 % mol Mg yaitu sebesar 6,33 dengan waktu respon 42 s pada tegangan operasional 21 volt. Selektivitas tertinggi ditunjukkan oleh sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO dengan ZnO didoping 2% mol Mg yaitu 1,54 pada tegangan 30 volt. Konduktivitas pada lingkungan hidrogen lebih besar daripada konduktivitas pada lingkungan udara. Konduktivitas tertinggi pada lingkungan hidrogen ditunjukkan oleh sampel TiO<sub>2</sub>/ZnO didoping 6% mol Mg yaitu  $18,54 \times 10^{-6}/\Omega\text{m}$ . Hasil uji XRD menunjukkan bahwa senyawa baru terbentuk pada ZnO yang didoping Mg. Ukuran kristal ZnO tanpa doping adalah 54,42 nm. Setelah didoping 2% mol Mg, ukuran kristal mengalami penurunan. Ukuran kristal hampir tetap pada konsentrasi doping di atas 2% mol. Secara rata-rata ukuran kristal turun menjadi 51,72 nm.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Amelia, I. and Elvaswer, E. (2018), "Karakterisasi Arus-Tegangan Sensor Gas Hidrogen Dari Bahan Semikonduktor SnO<sub>2</sub> Didoping dengan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>", *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 7 No. 4, pp. 353–358.
- Aygün, S. and Cann, D. (2005), "8. Bedah Jurnal Sensor and Actuators.pdf", *Sensors and Actuators, B: Chemical*.
- Basthoh, E., -, E. and -, H. (2013), "KARAKTERISASI ZnO DIDOPING TiO<sub>2</sub> UNTUK DETEKTOR LPG", *Jurnal Ilmu Fisika / Universitas Andalas*, Vol. 5 No. 1, pp. 11–15.
- Gu, H., Wang, Z. and Hu, Y. (2012), *Hydrogen Gas Sensors Based on Semiconductor Oxide Nanostructures, Sensors (Switzerland)*, Vol. 12, available at:<https://doi.org/10.3390/s120505517>.
- Ilnicka, A. and Lukaszewicz, J.P. (2020), "Graphene-based hydrogen gas sensors: A review", *Processes*, Vol. 8 No. 5, available at:<https://doi.org/10.3390/PR8050633>.
- Krško, O., Plecenik, T., Moško, M., Haidry, A.A., ũurina, P., Truchlý, M., Grančič, B., *et al.* (2015), "Highly sensitive hydrogen semiconductor gas sensor operating at room temperature", *Procedia Engineering*, Vol. 120, pp. 618–622.
- Lai, T.Y., Fang, T.H., Hsiao, Y.J. and Chan, C.A. (2019), "Characteristics of Au-doped SnO<sub>2</sub>-ZnO heteronanostructures for gas sensing applications", *Vacuum*, Elsevier, Vol. 166 No. March, pp. 155–161.
- Li, H., Wu, C.H., Liu, Y.C., Yuan, S.H., Chiang, Z.X., Zhang, S. and Wu, R.J. (2021), "Mesoporous WO<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> heterojunction for a hydrogen gas sensor", *Sensors and Actuators, B: Chemical*, Vol. 341 No. April, available at:<https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130035>.
- Ren, Q., Cao, Y.-Q., Arulraj, D., Liu, C., Wu, D., Li, W.-M. and Li, A.-D. (2020), "Review—Resistive-Type Hydrogen Sensors Based on Zinc Oxide Nanostructures", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 167 No. 6, p. 067528.
- Soundarrajan, P. and Schweighardt, F. (2008), *Hydrogen Sensing and Detection, Hydrogen Fuel*, available at:<https://doi.org/10.1201/9781420045772.ch15>.
- Syafnur, Z. and Elvaswer, E. (2017), "Karakteristik Arus-Tegangan Semikonduktor Copper Oxide Didoping dengan Zinc Oxide Sebagai Sensor Gas Hidrogen", *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 6 No. 2, pp. 176–182.
- Tang, J., Xiaoxing, Z., Song, X. and Fuping, Z. (2016), "We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %", *Intech*, pp. 225–240.