

RANCANG BANGUN ALAT UJI SIFAT LISTRIK UNTUK KARAKTERISASI KURVA I-V DAN KURVA RESPON PADA SENSOR GAS UNTUK NANO BAHAN SEMIKONDUKTOR
DESIGN OF ELECTRICAL TESTING DEVICE FOR I-V CURVE AND REAL TIME RESPONSE CURVE CHARACTERIZATION OF GAS SENSOR FOR NANOMATERIAL SEMICONDUCTOR

Reza Pamungkas Putra Sukanli¹, Indra Wahyudin Fathona², Abrar³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹rezapamungkas.p.s@gmail.com, ²indrafathonah@gmail.com, ³abrarselah@gmail.com

Abstrak

Karakteristik listrik yang dapat diamati dari nano bahan adalah sifat resistansinya. Resistansi suatu nano bahan dapat berubah ketika bahan tersebut dipanaskan atau ketika nano bahan terpapar oleh gas tertentu. Nano bahan yang sensitif terhadap paparan gas tertentu maka cocok digunakan sebagai gas sensor. Telah dirancang sebuah alat yang mampu mengkarakterisasi I-V sebuah nano bahan dan mampu mengkarakterisasi respons nano sensor dengan jenis dan ukuran substrat lebih fleksibel, ukuran ruang uji yang lebih kecil, dan pemanas yang membutuhkan daya listrik kecil dan pengontrol yang stabil dan respons cepat. Hasil dari pengujian I-V dapat disimpulkan alat mampu menunjukkan sifat dan perilaku bahan pada variasi suhu tertentu. Hasil pengujian respons gas butana pada bahan ZnO nanorods di atas substrat Alumina menunjukkan perubahan resistansi dalam variasi aliran volume gas yang berbeda dan dapat menunjukkan waktu respons dan waktu *recovery* ketika uji gas-on dan gas-off. Hasil dari pengujian gas dapat menunjukkan potensi bahan sebagai sensor gas.

Kata kunci: Karakterisasi, Kurva I-V, Kurva Respons, Nano Bahan, Nano Sensor, Semikonduktor

Abstract

The advancement of nanotechnology requires a device was able to test the electrical properties of nanomaterial. Electrical characteristics that could be observed from nanomaterial are the change of its resistance value and its I-V curve. A testing device was designed with flexible size and type of substrate, smaller testing chamber, and low-power requirement with more stable and fast response control heater. The heater could be controlled within range from ambient temperature to 300°C with a heating resolution of 10°C. The material used for I-V characterization was silicon wafer and ZnO nanowire on top of quartz substrate. The material used for response gasses characterization was ZnO nanorods on top of alumina substrate. The result from the I-V testing could be concluded that testing device was able to indicate electrical properties and behavior of a material at different temperature. The result from response gasses testing could be concluded that testing device was able to indicate a change of resistor value when nanosensor exposed to a certain gas.

Keywords: hydrothermal, ZnO nanostructures, gas sensor

1. Pendahuluan

Nanosains dan nanoteknologi merupakan bidang kajian berdimensi nanometer yang dapat digunakan di semua bidang keilmuan sains seperti kimia, biologi, fisika, fisika material, dan bidang rekayasa. Konsep dari bidang kajian nanosains dan nanoteknologi merupakan kemampuan untuk pencitraan dan memanipulasi setiap atom dan molekul. Dikarenakan ukuran divais yang sangat kecil, maka diperlukannya sebuah alat yang dapat membantu melakukan pengukuran, pengujian, dan karakterisasi [1]. Pengukuran karakteristik listrik pada nanomaterial sebagian besar menggunakan alat ukur desain sendiri seperti yang dilakukan oleh Hijiri dkk menggunakan rancangan alat uji resistivitas desain sendiri untuk mengetahui sensitivitas ZnO doping Al sebagai gas sensor [2]. Contoh lainnya dilakukan oleh Chang dkk menggunakan sistem deteksi gas untuk mengukur perubahan resistansi ZnO doping Al ketika terpapar gas tertentu [3]. Park dkk mengukur ZnO nanorod sebagai *Field Effect Transistor* (FET) menggunakan *electrometer* dan *voltage source meter* [4]. Wan dkk menggunakan *cylindrical gas flow chamber* yang terhubung ke pembaca resistansi untuk karakterisasi sensing ZnO nanowire [5]. Bie dkk menggunakan HW-30 *Gas-Sensor Test System* untuk menguji ZnO nanopillar pendeteksi hidrogen dan etanol [6]. Mani dkk menggunakan *high resistance electrometer* untuk mengukur resistansi dari ZnO doping Co pada lapisan tipis [7].

Berdasarkan referensi yang telah disebutkan bahwa kekurangan pada alat ukur uji karakteristik listrik nano bahan semikonduktor adalah fleksibilitas jenis dan ukuran substrat yang terbatas sehingga membatasi substrat yang dapat diuji. Kekurangan lainnya seperti tidak adanya pengontrol panas yang dapat diprogram dan ukuran ruang pengujian yang cukup besar. Kekurangan tersebut dapat mengurangi efisiensi dan lama pengujian secara total.

Oleh karena itu, perlu dirancang sebuah alat ukur dengan kontrol pemanas yang cepat dan stabil, ukuran ruang uji bahan yang lebih kecil, dan lebih fleksibel dalam bentuk bahan yang dapat diuji. Dalam penelitian ini, penulis telah berhasil membuat alat uji karakteristik I-V dan karakteristik respons terhadap gas yang mampu bekerja pada suhu tinggi dan dapat divakumkan.

2. Dasar Teori

2.1. Karakteristik Listrik Material

Karakteristik listrik dari sebuah material padatan dapat diuji dengan cara mengalirkan arus pada bahan tersebut. Pengujian karakteristik listrik dapat menentukan kemudahan arus listrik mengalir pada bahan. Hukum Ohm memaparkan hubungan antara arus (I) terhadap tegangan (V) yang dinyatakan dalam persamaan (2.1) [8].

$$V = I \cdot R \quad (2.1)$$

Pada persamaan (2.1), R dan I secara berurutan adalah besar resistansi dan besar arus yang mengalir pada bahan. Pengukuran resistivitas suatu bahan sangat dipengaruhi oleh morfologi bahan, jenis bahan, tingkat resistansi, dan ketebalan bahan. Bahan yang digunakan berbentuk tipis dan datar, umumnya berupa lapisan tipis yang ditumbuhkan pada sebuah alas. Sumber arus DC dialirkan pada probe bagian terluar sementara voltmeter mengukur perbedaan tegangan antara dua probe bagian dalam. Resistivitas bahan dapat diukur berdasarkan faktor geometri, sumber arus, dan pengukuran tegangan.

2.2. Sifat Listrik Dari Bahan Semikonduktor

Sifat listrik dari bahan semikonduktor sangat tergantung dengan keberadaan impuritas dari bahan tersebut. Intrinsik semikonduktor merupakan bahan semikonduktor dalam keadaan murni. Ketika pada bahan semikonduktor ini terdapat impuritas, maka semikonduktor ini dinamakan ekstrinsik semikonduktor.

Terdapat dua jenis pembawa arus, yaitu elektron dan hole. Maka untuk menentukan konduktivitas dari bahan semikonduktor intrinsik dapat dilihat pada persamaan (2.4).

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h \quad (2.4)$$

Impuritas pada bahan ekstrinsik semikonduktor terbagi menjadi tipe-n dan tipe-p. Tipe-n merupakan ekstrinsik semikonduktor yang memiliki impuritas yang membuat seluruh bahan memiliki kelebihan elektron. Contoh dari bahan semikonduktor tipe-n adalah silikon dengan doping fosfor. Maka untuk menghitung konduktivitas bahan tipe-n dapat dilihat di persamaan (2.6).

$$\sigma \approx n|e|\mu_e \quad (2.6)$$

2.3. Pengaruh Temperatur Pada Karakteristik Listrik Semikonduktor

Pengaruh temperatur pada karakteristik listrik bahan konduktor dan semikonduktor memiliki perbedaan dikarenakan energi gap antara pita valensi dan pita konduksi yang berbeda pada bahan semikonduktor. Ketika bahan semikonduktor, contoh germanium dan silikon, dipanaskan. Maka konsentrasi elektron dan hole meningkat seiring bertambahnya temperatur. Peristiwa ini dikarenakan banyaknya energi termal dari pemanasan yang membantu elektron untuk ter eksitasi dari pita valensi ke pita konduksi. Fenomena ini muncul untuk semikonduktor intrinsik yang tidak ada impuritas pada bahan tersebut.

terdapat tiga keadaan konsentrasi elektron pada bahan semikonduktor ekstrinsik. Pada rentang temperatur 150 K hingga 450 K, konsentrasi elektron konstan. Fenomena ini dinamakan daerah temperatur ekstrinsik. Impuritas pada bahan semikonduktor akan mempengaruhi rentang daerah temperatur ekstrinsik dan kebanyakan perangkat bekerja pada rentang temperatur tersebut.

2.4. Sensor Gas Berbasis Nano Bahan Semikonduktor

Sensor nano bahan gas semikonduktor bekerja pada kondisi suhu tinggi (200°C hingga 600°C) untuk meningkatkan reaktivitas kimiawi antar molekul pada bahan sehingga meningkatkan jumlah energi yang terlepas pada bahan [9]. Meningkatkan suhu juga dapat meningkatkan kemungkinan elektron valensi pada atom ter eksitasi.

Dalam perancangan nano bahan sensor gas perlu diperhatikan sensitivitas sensor tersebut, stabilitas jangka panjang, dan siklus respons. Sensitivitas menunjukkan rentang perubahan resistansi dari sensor ketika keadaan udara normal dan keadaan gas tertentu. Persamaan sensitivitas dapat dilihat di persamaan (2.11).

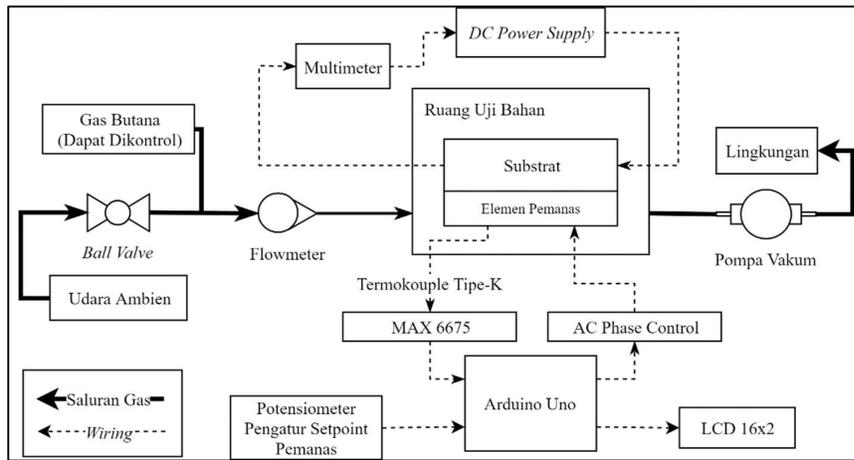
$$S = \frac{R_a}{R_g} \tag{2.11}$$

Dimana Ra dan Rg secara berurutan merupakan resistansi di udara dan resistansi pada gas tertentu. Stabilitas merupakan kemampuan sensor tersebut untuk menghasilkan keluaran yang sama dalam rentang waktu tertentu. Siklus respons dapat menentukan kecepatan sensor dalam mendeteksi gas dan kecepatan sensor kembali dalam keadaan semula.

3. Pembahasan

3.1. Realisasi Alat Uji

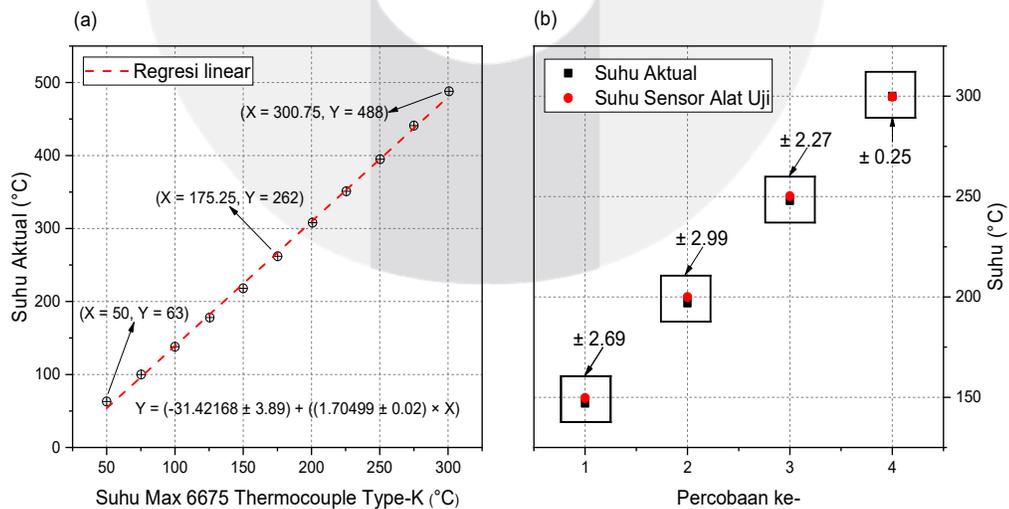
Alat uji yang telah direalisasikan dapat dilihat pada Gambar 1. Secara garis besar alat uji terdiri dari tiga fungsi utama yaitu sistem pemanas, sistem uji sifat listrik, dan sistem gas.



Gambar 1. Diagram realisasi alat.

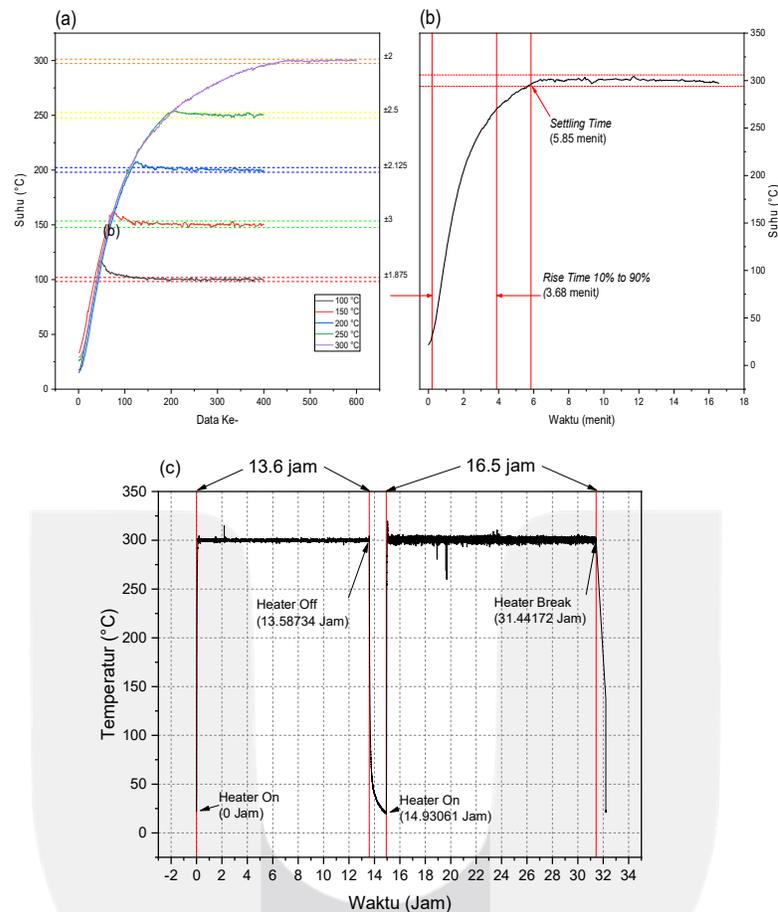
3.2. Kalibrasi Sensor Suhu Alat Uji

Sensor suhu yang digunakan pada penelitian ini adalah sensor suhu termocouple tipe-k yang terhubung dengan modul MAX 6675. Kalibrasi sensor suhu dilakukan dengan cara membandingkan suhu termocouple tipe-k pada alat uji dengan suhu termocouple tipe-k oleh RadioShack DC/AC True RMS Clamp Meter (kalibrator).



Gambar 2. Hasil regresi linear antara sensor suhu alat uji terhadap kalibrator (a) dan perbandingan kedua sensor suhu setelah dikalibrasi (b) menunjukkan hasil sensor suhu alat uji telah mendekati kalibrator.

Berdasarkan grafik pada Gambar 2 di bawah ini, bahwa sensor suhu termocouple tipe-k pada alat uji tidak sama hasilnya dengan termocouple tipe-k pada kalibrator (a). Untuk memperbaiki hasil pembacaan sensor suhu alat uji, dilakukan regresi linear dengan kalibrator. Hasil dari regresi linear kemudian diterapkan ke pemrograman. Setelah regresi linear diterapkan ke pemrograman, terlihat bahwa sensor suhu alat sudah mendekati kalibrator (b). Dalam percobaan ini pun telah ditentukan rentang suhu optimal sensor suhu alat uji adalah dari suhu kamar hingga 300 °C, pengukuran suhu lebih rendah atau lebih tinggi daripada rentang yang telah ditentukan dapat meningkatkan error sensor suhu. Berdasarkan hasil kalibrasi, sensor suhu telah mendekati kalibrator dan sensor suhu dapat digunakan pada kontrol pemanas.



Gambar 3. Hasil pengujian kontrol (a), *step response* (b), dan uji ketahanan pemanas.

3.3. Uji Kontrol dan Keandalan Pemanas

Pengujian kontrol dilakukan untuk melihat kinerja pemanas. Pengujian terbagi menjadi dua yaitu pengujian *step response* kontrol pemanas serta uji ketahanan pengontrol dan pemanas. Uji *step response* kontrol pemanas untuk melihat kelayakan pengontrol dalam kemampuannya untuk mencapai suhu yang diinginkan. Uji ketahanan kontrol dan pemanas bertujuan untuk menentukan rentang penggunaan pemanas yang dianjurkan.

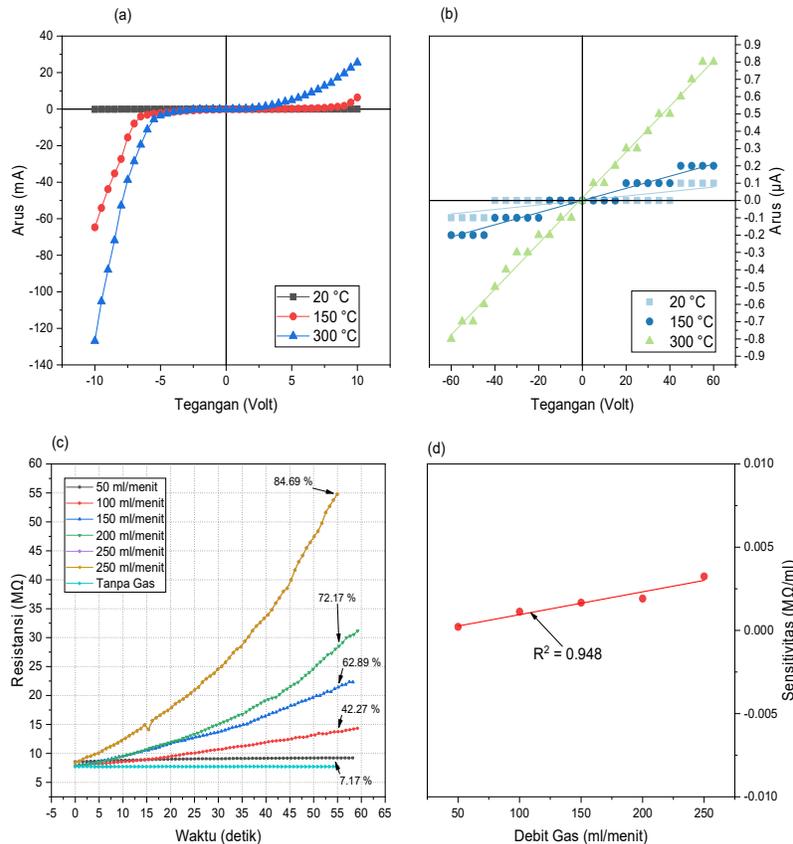
Uji kontrol pemanas dengan cara mengamati *step respons* pemanas pada titik suhu tertentu. Hasil dari uji kontrol kemudian diamati apakah pemanas dapat dikontrol dan dapat mencapai *setpoint*, *rise time*, *overshoot*, dan *settling time*. Uji ini dilakukan dengan cara mengondisikan pemanas pada suhu kamar yang kemudian kontrol pemanas dinyalakan setelah ditentukan suhu yang diinginkan pada pengontrol atau *setpoint* (SP).

Berdasarkan seluruh pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pemanas telah berhasil dirakit. Pada pengujian kontrol menunjukkan hasil yang baik dilihat dari ketidakakuratan pengontrol yang kecil ($\pm 0.023\%$). Uji *step response* menunjukkan kestabilan kontrol dan *settling time* yang cepat. Dalam pengujian keandalan dapat menunjukkan kontrol dan Pemanas mampu bekerja

selama 16.5 jam, oleh karena itu ditentukan kerja maksimum pemanas adalah kurang dari 10 jam. Hasil dari Pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.

3.4. Pembuatan Alat Uji I-V dan Uji Gas Sensor

Pembuatan alat uji I-V dan uji gas sensor dapat dilakukan setelah sistem pemanas, sistem gas, dan sistem uji sifat listrik telah dirancang. Tujuan dari pembuatan alat uji I-V dan uji gas sensor adalah untuk membuat alat uji karakterisasi kurva I-V sebuah bahan nano material dan kurva respons nano sensor terhadap gas tertentu yang mampu bekerja pada suhu tinggi (maksimal 300°C). Suhu tinggi dibutuhkan karena bahan semikonduktor tertentu hanya dapat bekerja pada suhu tersebut.

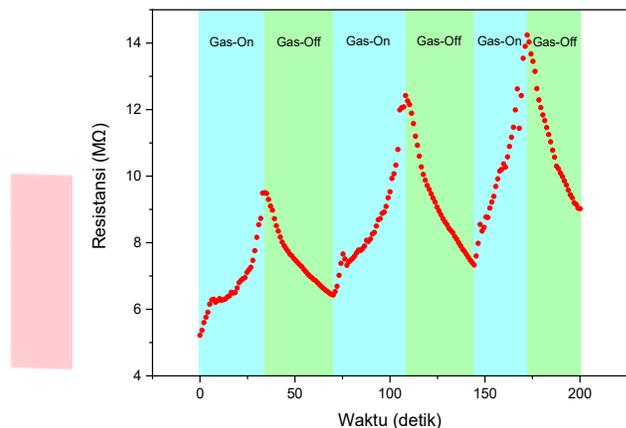


Gambar 4. Hasil uji kurva I-V silikon wafer (a), ZnO nanowire (b) dan hasil uji kurva respons variasi debit (c) dan sensitivitasnya (d).

Uji karakteristik I-V bahan pada Gambar 4 (a) dan (b) dilakukan dengan cara mengukur I-V pada kondisi suhu kamar, 150 °C, dan pada 300 °C. Uji I-V silikon wafer pada grafik (a) menunjukkan peningkatan arus listrik ketika bahan dipanaskan. Peningkatan arus listrik dapat dilihat dari perbedaan perubahan arus yang lebih besar pada suhu 300 °C dibandingkan pada suhu yang lebih rendah. sementara uji I-V ZnO nanowire di atas substrat kuarsa pada grafik (b) menunjukkan peningkatan arus listrik jika substrat dipanaskan seperti pada silikon wafer, yang membedakan antara kedua bahan adalah perilaku yang ditunjukkan. Bahan silikon wafer menunjukkan perilaku *rectifying* yang umum muncul pada dioda, sementara bahan ZnO nanorods menunjukkan perilaku *ohmic* yang umum muncul pada resistor.. Berdasarkan penjelasan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa, pada pengujian ini ZnO nanowire menunjukkan nilai *potential barrier* yang mendekati nol sementara silikon wafer menunjukkan nilai *potential barrier* yang lebih besar. Dari pengujian I-V bahan silikon wafer dan ZnO nanowire dapat disimpulkan bahwa alat mampu menentukan jenis bahan berdasarkan sifat listriknya (konduktor, semikonduktor, atau insulator) dilihat dari perubahan arus listrik terhadap suhu serta perilaku I-V pada bahan yang diuji.

Hasil pengujian respons nano sensor terhadap gas pada aliran volume yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 4. Grafik (c) menunjukkan resistansi sensor meningkat ketika mendeteksi keberadaan gas

butana pada ruang uji. Grafik (d) menunjukkan regresi linier sensitivitas berbagai variasi debit gas. Sensitivitas terendah 0.00021 MΩ/ml dan tertinggi 0.00325 MΩ/ml dan berdasarkan regresi linier menunjukkan *R squared* (R^2) 0.048. Nilai *R squared* memiliki rentang nol hingga satu dan jika nilai *R squared* mendekati satu menunjukkan model regresi linier yang bagus. Pada umumnya kategori sensor gas yang baik jika nilai sensitivitasnya sama pada besar debit gas yang berbeda oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa bahan yang diuji berpotensi menjadi sensor gas tetapi perlu penelitian lebih lanjut.



Gambar 5. Hasil uji respons resistansi terhadap waktu ketika gas-on (butana 200 ml/menit) dan ketika gas-off (udara ambien 200 ml/menit).

Hasil pengujian respons resistansi terhadap waktu pada nano sensor ketika gas-on dan gas-off dapat dilihat pada Gambar 4 grafik (c) dan (d). Percobaan diawali dengan keadaan .Uji respons R-t nano sensor pada bahan ZnO nanorods di atas Alumina menunjukkan perubahan resistansi ketika keadaan gas-on dan mengalami *recovery* resistansi ketika gas-off. Keadaan gas-on adalah ketika gas butana memasuki ruang uji dengan debit gas sebesar 200 ml/menit sementara gas-off adalah ketika udara ambien memasuki ruang uji dengan debit gas sebesar 200 ml/menit. Rentang antara keadaan gas-on ke gas-off atau sebaliknya adalah ± 30 detik. Berdasarkan hasil uji respons resistansi terhadap waktu, terdapat perubahan resistansi selama keadaan gas-on dan gas sensor mengalami *recovery* resistansi selama keadaan gas-off,. *Recovery* resistansi tidak mencapai keadaan awal dikarenakan masih terdapat gas butana di dalam ruang uji pada rentang waktu 30 menit gas-off.

4. Kesimpulan

Alat uji sifat listrik untuk karakterisasi kurva I-V dan kurva respons telah berhasil dirancang. Alat uji memiliki tiga sistem utama yaitu sistem pemanas, sistem uji listrik, dan sistem gas. Hasil kalibrasi dan karakterisasi sistem pemanas menunjukkan rentang kerja dari suhu kamar hingga 300°C dan resolusi pengontrol sebesar 10°C. Ketika dilakukan *Step Respons* dalam nilai *setpoint* 300°C sistem pemanas mencapai suhu *setpoint* dalam waktu kurang lebih 6 menit, disimpulkan bahwa respons pemanas paling lambat 6 menit.

Hasil pembuatan alat uji I-V dan Uji Gas sensor berhasil direalisasikan. Uji I-V menggunakan bahan silikon wafer dan ZnO nanowire di atas substrat kuarsa berhasil menunjukkan karakteristik bahan semikonduktor dan perilaku bahan ketika dipanaskan. Uji gas menggunakan bahan ZnO nanorods di atas alumina berhasil menunjukkan sensitivitas bahan terhadap gas butana, bahan menunjukkan perubahan resistansi dan dapat menunjukkan pemulihan resistansi ketika kehadiran dan ketidakhadiran ZnO. Dapat disimpulkan bahwa alat uji sifat listrik untuk karakterisasi kurva I-V nano bahan semikonduktor dan kurva respons nano sensor gas telah berhasil dirakit.

Daftar Pustaka

- [1] I. G. Gogotsi, *Nanomaterials handbook*, Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- [2] M. Hjiri, L. El Mir, S. Leonardi, A. Pistone, L. Mavilia and G. Neri, "Al-doped ZnO for highly sensitive CO gas sensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 196, pp. 413-420, 2014.
- [3] J. F. Chang, H. H. Kuo, I. C. Leu and M. H. Hon, "The effects of thickness and operation temperature on ZnO:Al thin film CO gas sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 84, no. 2, pp. 258-264, 2002.
- [4] W. I. Park, J. S. Kim, G.-C. Yi, M. H. Bae and H.-J. Lee, "Fabrication and electrical characteristics of high-performance ZnO nanorod field-effect transistors," *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 21, pp. 5052-5054, 2004.
- [5] Q. Wan, Q. H. Li, Y. J. Chen, T. H. Wang, X. L. He, J. P. Li and C. L. Lin, "Fabrication and ethanol sensing characteristics of ZnO nanowire gas sensors," *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 18, pp. 3654-3656, 2004.
- [6] L.-J. Bie, X.-N. Yan, J. Yin, Y.-Q. Duan and Z.-H. Yuan, "Nanopillar ZnO gas sensor for hydrogen and ethanol," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 126, no. 2, pp. 604-608, 2007.
- [7] G. K. Mani and J. B. B. Rayappan, "A highly selective and wide range ammonia sensor—Nanostructured ZnO:Co thin film," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 191, pp. 41-50, 2015.
- [8] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [9] J. Kong, "Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors," *Science*, vol. 287, no. 5453, pp. 622-625, 2000.

