

Pengaruh Variasi Temperatur *Post Hydrothermal* terhadap Sensitivitas Sensor Gas Co dari Material WO_3 Hasil Proses Sol Gel

Agung Seras Perdana dan Diah Susanti

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

E-mail: santiche@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Gas karbon monoksida (CO) adalah gas yang tidak berbau, tidak berwarna, dan tidak larut dalam air, tetapi beracun bila berikatan secara metabolis dengan darah ketika terhirup kedalam tubuh manusia. Oleh karena itu diperlukan suatu alat berupa sensor untuk mendeteksi keberadaan gas CO secara dini untuk menghindari efek yang berbahaya bagi kesehatan. Penelitian ini bertujuan mempersiapkan material WO_3 sebagai sensor gas CO. Proses sintesa material WO_3 dilakukan dengan metode sol gel menggunakan WCl_6 , ethanol, dan NH_4OH . Chip sensor dibuat dari serbuk hasil proses *post hydrothermal* dengan variasi temperatur 160 °C, 180 °C dan 200 °C selama 12 jam dikompaksi pada tekanan 150 bar dan dianil 300 °C selama 1 jam. Proses karakterisasi material WO_3 dilakukan dengan pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) dan X-Ray Diffraction (XRD). Luas permukaan aktif diukur dengan Brunner Emmet Teller (BET), dan pengujian sensitivitas menggunakan alat Potentiostat sebagai Instrumen pengukur arus. Hasil pengujian menunjukkan struktur kristal adalah monoklinik. Sensitivitas naik seiring dengan kenaikan temperatur operasi, begitu juga dengan peningkatan konsentrasi gas. Nilai sensitivitas tertinggi adalah pada sampel temperatur 160 °C dengan temperatur operasi 100 °C dan konsentrasi gas 500 ppm.

Kata Kunci—material Tungsten trioksida (WO_3), *post hydrothermal*, sensor gas CO, sol – gel.

I. PENDAHULUAN

Salah satu faktor utama terganggunya kelangsungan hidup di bumi adalah adanya pencemaran udara. Menurut PP no. 41 tahun 1999, pencemaran udara adalah masuknya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara *ambient* oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara *ambient* turun sampai ketinggian tertentu yang menyebabkan udara *ambient* tidak dapat memenuhi fungsinya. Sumber pencemarnya ialah setiap usaha dan/atau kegiatan yang mengeluarkan bahan pencemar ke udara sehingga menyebabkan udara tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Pencemar utama berasal dari sumber bergerak kendaraan, dimana 60% dari polutan adalah karbon monoksida dan sekitar 15% terdiri dari hidrokarbon [1]. Gas CO adalah gas beracun yang tidak berbau, tidak berwarna, tidak berasa dan tidak mengiritasi dan mudah terbakar. Gas ini umumnya mudah ditemui di industri. Gas CO ini merupakan hasil dari pembakaran yang tidak

sempurna kendaraan bermotor maupun alat pemanas dan peralatan yang menggunakan api [2].

Karbon Monoksida (CO) jika terhirup masuk ke dalam paru-paru akan ikut ke peredaran darah sehingga menghalangi masuknya oksigen yang dibutuhkan oleh tubuh. Hal ini karena gas CO ikut bereaksi secara metabolis dengan darah. Efek yang ditimbulkan tergantung dari status kesehatan seseorang, antara lain dapat memperparah kelompok penderita gangguan jantung dan paru-paru, kelahiran prematur, berat badan bayi dibawah normal, hingga menyebabkan kematian. CO menghalangi darah dalam mengangkut oksigen sehingga darah kekurangan oksigen dan jantung bekerja lebih berat.

Pemerintah melalui peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 05 tahun 2006 tentang ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor lama menetapkan ambang batas emisi CO kendaraan bermotor adalah 4,5 – 5,5 %. Dengan demikian gas CO merupakan salah satu gas yang harus diperhatikan karena efek yang demikian berbahaya bagi kesehatan dan keselamatan manusia. Oleh karena itu diperlukan suatu alat untuk mendeteksi keberadaan gas karbon monoksida secara dini yakni sebuah sensor yang memiliki sensitivitas tinggi dalam konsentrasi yang rendah dengan menggunakan bahan semikonduktor WO_3 yang memiliki *properties* yang baik sebagai material sensor dan dengan metode sol gel dan *post hydrothermal* yang mudah untuk diterapkan dalam bentuk pelet.

Sensor umumnya digunakan pada lingkungan industri yang juga terdapat gas CO dan masih menggunakan produk luar sehingga harganya dipasaran relatif tinggi. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif yang murah dan mudah untuk dilakukan sehingga dapat menekan biaya produksi yang mengakibatkan harga dari sensor tersebut menjadi lebih terjangkau.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Sintesa tungsten trioksida (WO_3)

Proses sintesa tungsten trioksida (WO_3) untuk material sensor gas CO terbagi menjadi 2 mekanisme utama yaitu proses sol dan gelasi. Proses pembentukan *prekursor* dimulai dengan melarutkan 7 gram Tungsten (VI) Heksaklorida (WCl_6) kedalam 100 ml ethanol (C_2H_5OH) sehingga menghasilkan larutan berwarna kuning yang beberapa saat kemudian berubah menjadi

biru dan terdapat endapan di dalamnya. Selanjutnya larutan yang telah berwarna biru ditambahkan Ammonium Hidroksida (NH_4OH) 0.5 M sebanyak 10 ml kemudian. Penambahan ammonium hidroksida (NH_4OH) membuat larutan berubah menjadi biru tua dalam waktu yang sangat cepat disertai dengan terbentuknya endapan dalam larutan. Larutan kemudian diaduk selama 24 jam menggunakan *stirrer* pada wadah yang telah terisi es, sehingga diharapkan pengadukan terjadi pada temperatur 0°C . Selama proses pengadukan ini, terjadi proses pembentukan *prekursor* yang memiliki ikatan alkil sebagai penyusunnya. Unsur logam yang telah berikatan dengan alkohol dan membentuk ikatan alkil inilah yang akan menjadi prekursor dalam pembentukan material tungsten trioksida (WO_3). Setelah pengadukan selama 24 jam, maka larutan biru pekat yang dihasilkan kemudian ditambahkan dengan H_2O . Penambahan H_2O adalah sebagai proses pencucian untuk menghilangkan volatil dalam hal ini Cl⁻. Pencucian dilakukan berulang hingga tidak terbentuk endapan putih AgCl ketika dititrasasi dengan 3-5 tetes larutan AgNO_3 0.5 M. Kemudian setelah melalui tahap pencucian larutan di-*centrifuge* untuk memisahkan antara larutan dan endapan selama 1 jam dengan kecepatan putar 2000 rpm.

Selanjutnya setelah endapan diperoleh, dilakukan proses peptisasi dengan penambahan 5 tetes NH_4OH 0.5 M yang bertujuan untuk mendispersi kembali endapan dan memperkecil ukuran partikel, dan penambahan surfaktan (Triton X-100) untuk menurunkan tegangan permukaan sehingga ketika sudah menjadi serbuk dan dikompaksi tidak mengalami keretakan.

B. Post Hydrothermal

Proses *post hydrothermal* dilakukan dengan bejana (container) yang didalamnya terdapat sebuah tabung tambahan terbuat dari Teflon dan penutupnya, yang keseluruhannya dilapisi dinding baja dan dikencangkan dengan mekanisme sekrup dan tidak terendam oleh air. Dalam proses hidrotermal ini yang diinginkan adalah uap air bertekanan tinggi sebagai suatu agen promosi reaksi kristalisasi fasa [3]. Gel WO_3 hasil proses sol gel dituangkan kedalam Teflon, Teflon lalu dimasukkan kedalam bejana. Bejana kemudian dimasukkan kedalam *Muffle Furnace* dan diberikan variasi temperatur *post hydrothermal* 160°C , 180°C , dan 200°C selama 12 jam. Proses dilanjutkan dengan pengeringan pada temperatur 100°C selama 1 jam.

C. Proses Kompaksi serbuk WO_3

Metode kompaksi adalah proses memampatkan serbuk sehingga serbuk saling melekat dan rongga udara antar partikel terdorong keluar. Semakin besar tekanan kompaksi jumlah udara (porositas) di antara partikel semakin sedikit, namun porositas tak mungkin mencapai nilai nol [4].

Serbuk WO_3 hasil proses sol-gel dan *post hydrothermal* ditekan hingga 150 bar pada alat kompaksi, alat kompaksi yang digunakan jenis *Carver*. Serbuk yang dibutuhkan sekitar 3 gram untuk menghasilkan pelet dengan ukuran diameter 14 mm dan tebal 3 mm. pelet kemudian dianil hingga temperatur 300°C selama 1 jam agar porositas pada pelet WO_3 bisa berkurang.

Kemudian pelet dipasang plat tembaga yang berfungsi sebagai current collector kemudian disambungkan dengan sebuah kabel untuk dihubungkan dengan potensiostat. Setelah itu, dilakukan pengujian sensitivitas terhadap temperatur

sensor yaitu 30°C , 50°C , dan 100°C serta konsentrasi gas CO sebesar 10 ppm, 100 ppm, 250 ppm, dan 500 ppm.

D. Metode Pengujian Sensitivitas

Pengujian sensitivitas dilakukan didalam sebuah chamber yang telah terpasang selang-selang dan dihubungkan dengan mfc (*mass flow controller*) dan tabung gas CO. Untuk mengetahui tegangan dan arus yang mengalir pada chip sensor dapat dideteksi dengan menggunakan potensiostat dengan tujuan untuk mengetahui sensitivitas sensor terhadap gas CO yang ditandai perubahan resistansi. Pengujian ini diawali dengan pengaruh temperatur sensor terhadap gas CO, serta pengaruh konsentrasi gas CO terhadap temperatur *post-hydrothermal* dan temperatur sensor. Pengujian ini dilakukan menggunakan tegangan sebesar 1,5 Volt.

Sensitivitas sensor dapat diketahui melalui perubahan resistansi sesuai dengan persamaan, Dimana S adalah sensitivitas sensor, R_g adalah resistansi setelah dialiri gas CO dan dinyatakan dalam ohm (Ω), dan R_o adalah resistansi sebelum dialiri gas CO dalam ohm (Ω).

$$S = (R_g - R_o) / R_o \quad (1)$$

Dimana S adalah sensitivitas sensor, R_g adalah resistansi setelah dialiri gas CO dan dinyatakan dalam ohm (Ω), dan R_o adalah resistansi sebelum dialiri gas CO dalam ohm (Ω) [5].

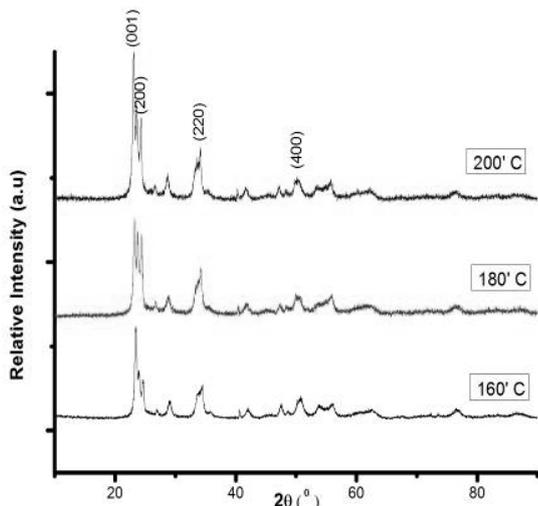
III. HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil Uji XRD

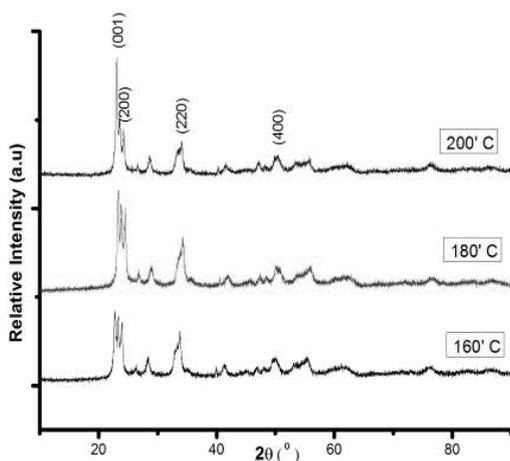
Pengujian XRD menggunakan alat Philips Analytical, terhadap sampel dengan diameter 14 mm dan ketebalan 3-4 mm. Pengujian dilakukan dengan sinar X menggunakan range sudut yang tergolong panjang, yakni 0° - 90° dan panjang gelombang sebesar 1.54056 Å.

Pada pengujian XRD sebelum terpapar gas CO, Gambar 1, didapatkan bahwa hasil dari pengujian sampel bersesuaian dengan JCPDF number 75-2072 untuk sampel dengan temperatur *post Hydrothermal* 160°C , 180°C dan 200°C . Pola XRD pada temperatur 160°C menunjukkan orientasi Kristal (001) pada 2θ 23.40° , (020) pada 23.92° , (200) pada 24.70° . Dari hasil pengujian XRD ditemukan bahwa fasa yang terjadi pada ketiga sampel tersebut adalah sama, yakni monoklinik. Hal tersebut bisa dilihat pada grafik XRD dari ketiga sampel yang mempunyai pola difraksi yang sama.

Tahap berikutnya adalah dialiri dengan gas karbon monoksida (CO). Pengujian XRD dilakukan kembali untuk mengetahui ada tidaknya perubahan. Pengujian ini dilakukan pada sampel yang sama sebelum adanya aliran gas. Dilakukan dengan sudut dan panjang gelombang yang sama sebelum sampel sensor dialiri gas CO. Pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui sifat dari material sensor WO_3 terhadap pengaruh gas karbon monoksida yang telah dialirkan pada material sensor tersebut. Hasil dari pengujian sampel bersesuaian dengan JCPDF number 75-2072 untuk sampel dengan temperatur *post Hydrothermal* sesudah terpapar gas CO. Pola XRD menunjukkan orientasi Kristal (001) pada 2θ 23.40° , (020) pada 23.92° , (200) pada 24.70° .



Gambar. 1. Hasil uji XRD pelet WO₃ sebelum terpapar gas CO.



Gambar. 2. Hasil uji XRD pelet WO₃ sesudah terpapar gas CO.

Dalam percobaan ini sudah dialiri gas karbon monoksida selama beberapa jam dengan temperatur dan konsentrasi gas yang berbeda. Dari hasil pengujian XRD ditemukan bahwa fasa yang terjadi pada sampel tersebut adalah monoklinik pada fasa setelah dialiri gas karbon monoksida terjadi perubahan, yaitu beberapa puncak tertinggi mengalami penurunan intensitas hasilnya dapat dilihat pada gambar 2. Hal ini dipengaruhi oleh faktor pemanasan oleh heater yang menyebabkan intensitasnya turun. Selain itu adanya energi yang berasal dari arus listrik yang menyebabkan elektron berpindah dari energi yang paling rendah melewati *band gap*. Gas karbon monoksida juga mempengaruhi adanya eksitasi elektron, sehingga bisa memberikan efek menyebar pada saat dilakukan pengujian XRD [6].

Ukuran kristal yang terbentuk pada ketiga sample Tungsten Trioksida (WO₃) adalah sesuai dengan rumus Debye Scherrer yaitu.

$$D = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta} \tag{2}$$

D adalah ukuran kristal dalam Å, λ adalah panjang gelombang yang digunakan dalam uji XRD yakni 1.54056 Å, dan B adalah lebar setengah puncak dalam radian. θ adalah posisi sudut terbentuknya puncak.

Perhitungan ukuran kristal menunjukkan bahwa pemanasan dengan menggunakan temperatur 200°C menghasilkan sampel pelet tungsten trioksida dengan ukuran kristal yang paling besar. Hal ini dipengaruhi oleh temperatur pemanasan. Semakin tinggi temperatur pemanasan *post hydrothermal* maka struktur Kristal akan semakin besar. Hal ini dikarenakan temperatur yang semakin tinggi menyebabkan partikel-partikel yang berukuran lebih kecil cenderung untuk bergabung dengan partikel yang lebih besar [7].

Selain itu, perbedaan ukuran kristal yang dihasilkan dapat terjadi karena pemberian tekanan pada sampel yang diberikan melalui penggunaan alat *post hydrothermal* [8]. Pada ukuran kristal diatas dapat dilihat bahwa sampel mengalami penurunan ukuran setelah terpapar oleh gas CO, Perbedaan ukuran kristal yang dihasilkan terjadi karena adanya pengaruh temperatur operasi yang cenderung untuk memecah partikel sehingga ukurannya sedikit berkurang. Pemberian variasi temperatur dan variasi tekanan pada sampel material akan memberikan pengaruh besar terhadap struktur dan morfologi pada sampel yang dihasilkan [9].

B. Hasil Uji SEM

Pengamatan uji *Scanning Elektron Microscope* (SEM) dengan menggunakan alat FEI S-50 yang bertujuan untuk mengamati morfologi dari pelet tungsten trioksida (WO₃). Dari hasil SEM yang telah dilakukan terlihat pada Gambar 3 morfologi permukaan dipengaruhi oleh kenaikan temperatur. Terlihat pada temperatur 160 °C yang ditunjukkan gambar (a) mengalami bentuk gumpalan yang tidak beraturan dan ada beberapa bagian yang mulai terbentuk serpihan mendekati persegi. Pada temperatur 180 °C, gambar (b) terlihat bahwa semakin banyak membentuk serpihan yang mendekati persegi serta peningkatan ukuran serpih, namun masih terlihat

Tabel. 1.

Ukuran kristal Pelet WO₃ pada puncak tertinggi sebelum terpapar gas CO.

Temp. tahan (°C)	B(rad)	θ (°)	Cos θ	D (Å)
160	0,002629	11,70	0,97922	538,6949
180	0,002044	12	0,97954	692,6168
200	0,002043	11,50	0,97975	692,7055

Tabel. 2.

Ukuran kristal Tungsten Trioksida (WO₃) pada puncak tertinggi sesudah pengujian sensor.

Temp. tahan (°C)	B(rad)	θ (°)	Cos θ	D (Å)
160	0,002628	11,36	0,98041	538,0898
180	0,002335	11,65	0,97940	606,2970
200	0,002335	11,653	0,97938	606,3039

gumpalan. Sedangkan gambar (c) temperatur 200 °C hampir menyerupai temperatur 180 °C dimana telah banyak partikel yang telah berbentuk persegi, dan masih ada beberapa bagian yang menggumpal meskipun mengalami penurunan dibandingkan dengan temperatur 160 °C.

Semakin tingginya temperatur perlakuan akan menghasilkan ukuran partikel yang besar. Perubahan bentuk dan ukuran partikel tersebut disebabkan oleh transformasi fasa dan pembentukan kembali dari partikel serta pertumbuhan kristal [10]. Secara umum hasil uji SEM setelah terpapar gas CO terlihat adanya beberapa kristal yang telah menggumpal, dan terlihat adanya serpihan-serpihan yang membentuk persegi yang saling berikatan. Bentuk serpihan ini tidak jauh beda pada hasil uji SEM sebelum terpapar gas CO, ukuran partikel pun mengalami sedikit penurunan yang tidak terlalu jauh. Jadi bisa diasumsikan bahwa morfologi WO₃ tidak terlalu terpengaruh oleh adanya aliran gas karbon monoksida (CO).

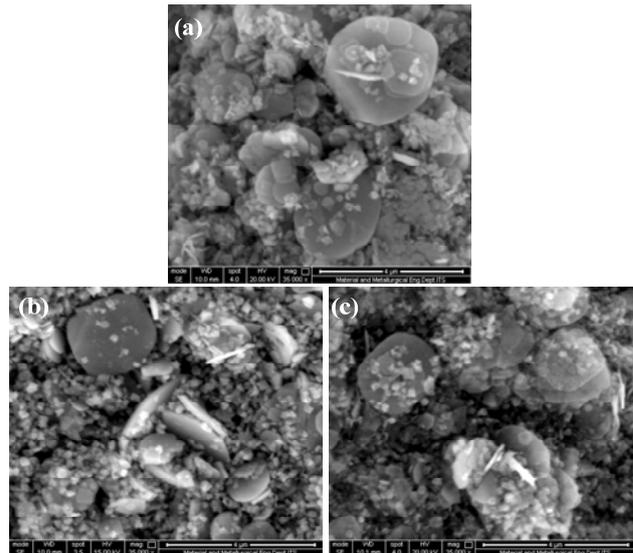
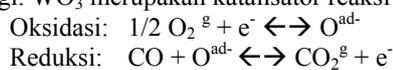
C. Hasil Uji BET

Pengujian BET dilakukan untuk mengetahui luas permukaan aktif dari WO₃ dalam bentuk serbuk menggunakan alat Quantachrome autosorb iQ, prosesnya dengan memberikan pemanasan pada sampel WO₃ hingga temperatur 300 °C yang dilakukan sebagai langkah penguapan sisa-sisa kandungan air dan kandungan *volatil* lainnya yang mungkin masih terdapat pada sampel WO₃. Hasil pengujian dalam satuan m²/gr, dapat dilihat pada tabel 3. Dari hasil uji Brauner Emmet Teller menunjukkan bahwa, perlakuan pemanasan dengan temperatur pemanasan 160 °C, 180 °C, dan 200 °C memiliki ukuran luas permukaan semakin mengecil seiring dengan kenaikan temperatur. sensitivitas dipengaruhi oleh luasan permukaan aktif dari material sensor, semakin besar luasan permukaan, semakin besar kemampuan adsorpsi terhadap gas, dan akan terjadi sebaliknya pada saat semakin luasan permukaan semakin kecil [10]. Penambahan temperatur menyebabkan pembentukan mesopores yang lebih banyak dan meningkatkan volume pori sehingga luas permukaan relatif semakin kecil [11].

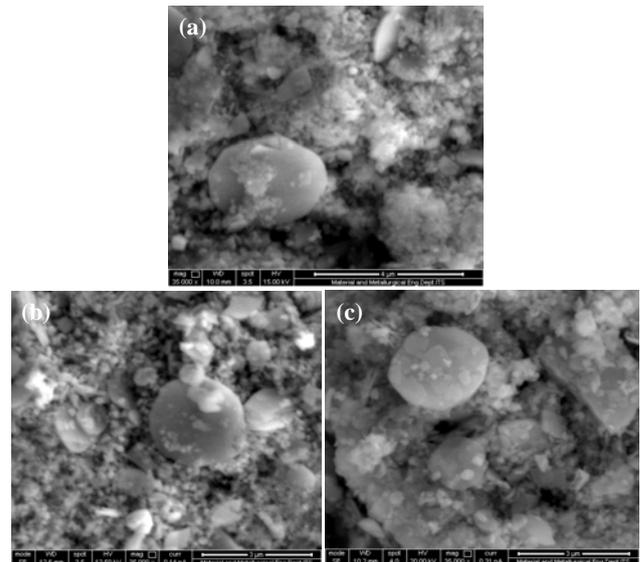
D. Hasil Uji Sensitivitas

Sensitivitas sensor dipengaruhi oleh temperatur operasi dan konsentrasi gas CO. Gambar 5, terjadi peningkatan sensitivitas seiring peningkatan temperatur operasi dari 30 °C hingga 100 °C sensor dengan variasi temperatur post hydrothermal 160 °C, 180 °C, dan 200 °C. Hal ini karena panas yang diberikan menyebabkan elektron-elektron dari semikonduktor memiliki cukup energi untuk berpindah tempat dari pita valensi terluar ke pita konduksi dengan melewati *band gap* [12].

Selain itu dengan bertambahnya jumlah gas CO yang dialirkan ke dalam chamber maka elektron-elektron dari WO₃ akan semakin banyak berikatan dengan O₂ sehingga menjadi O^{ad-} yang kemudian berikatan dengan CO. Semakin banyak konsentrasi gas CO maka semakin banyak O^{ad-} yang terbentuk dan berikatan dengan CO sehingga tahanan terhadap arus semakin besar. Gambar 6 menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi CO maka nilai sensitivitas juga semakin tinggi. WO₃ merupakan katalisator reaksi redoks,



Gambar. 3. Hasil uji SEM Pelet WO₃ sebelum terpapar gas CO perbesaran 35.000×, (a) 160° C, (b) 180° C, (c) 200° C.

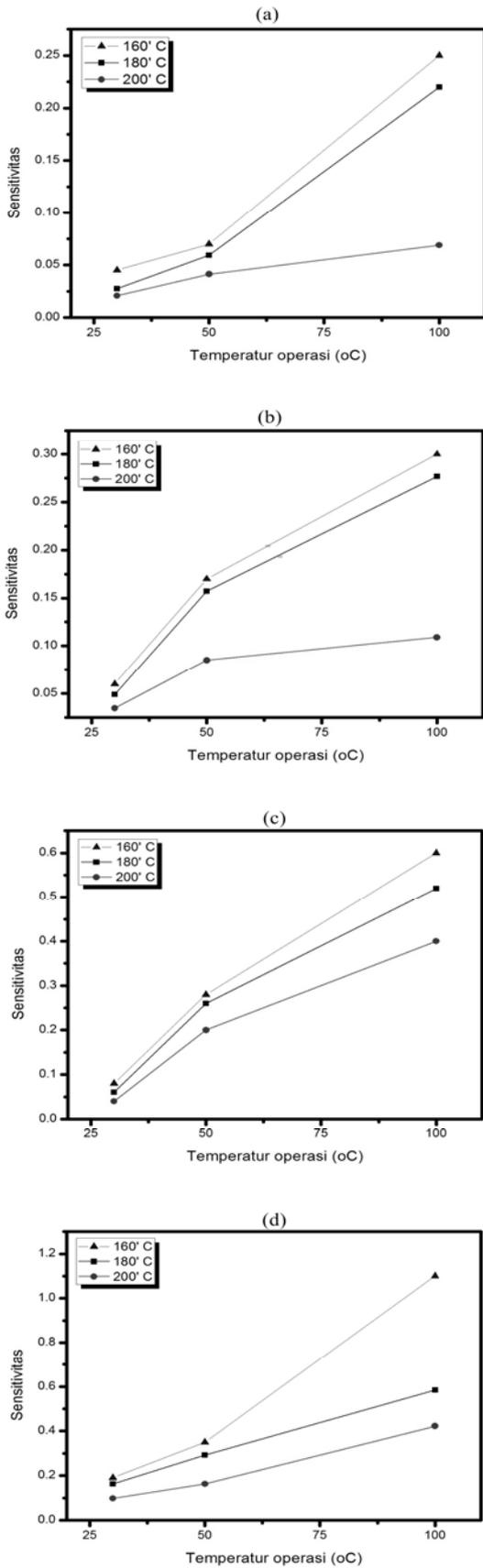


Gambar. 4. Hasil uji SEM Pelet WO₃ sesudah terpapar gas CO perbesaran 35.000×, (a) 160° C, (b) 180° C, (c) 200° C.

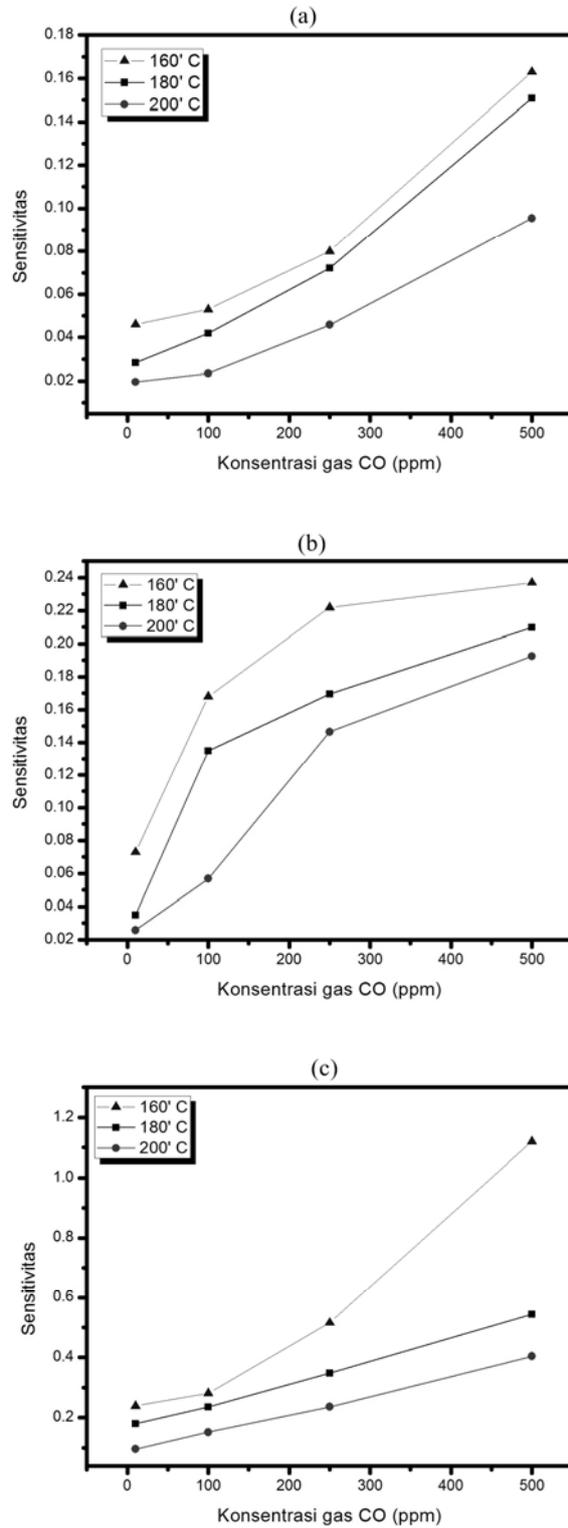
Tabel 3.
 Surface area pada sampel uji WO₃ hasil uji BET.

Feature	Temperatur (°C)		
	160	180	200
BET Surface area (m ² /g)	58.543	44.706	29.339

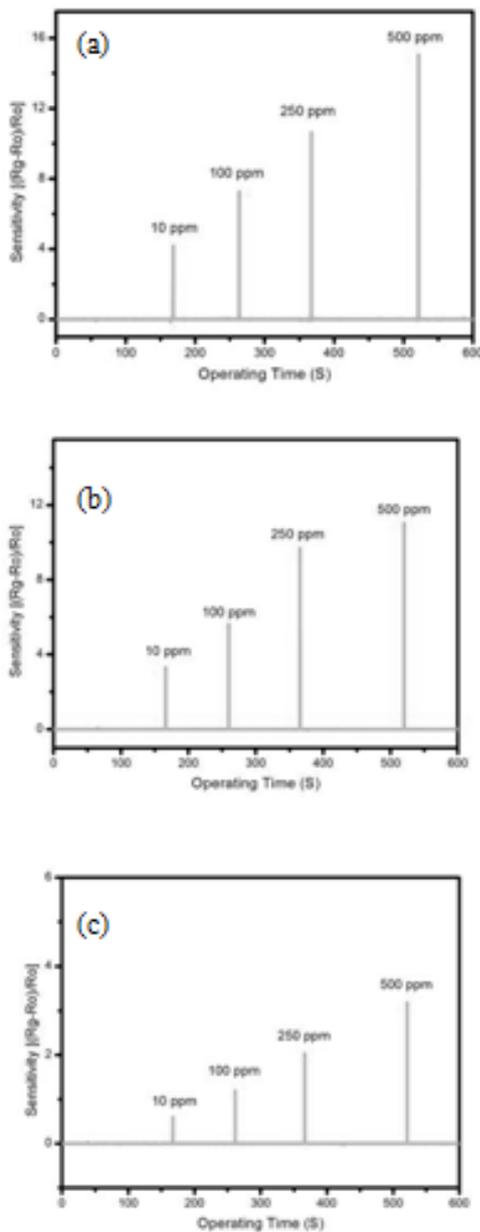
Jumlah elektron yang terus berkurang ini berdampak pada kemampuan sampel WO₃ untuk mengaliri arus dimana arus akan semakin rendah dan resistansi semakin tinggi sehingga sensitivitasnya pun akan meningkat.



Gambar. 5. Pengujian sensitivitas terhadap temperatur operasi pada konsentrasi gas a.) 10 ppm b.) 100 ppm c.) 250 ppm d.) 500 ppm.



Gambar. 6. Pengujian sensitivitas terhadap konsentrasi gas CO pada temperatur operasi a.) 30 °C b.) 50 °C c.) 100 °C



Gambar. 7. Pengujian Respon WO_3 terhadap gas CO pada temperatur post hydrothermal a.) $160^\circ C$ b) $180^\circ C$ c) $200^\circ C$.

E. Respon WO_3 terhadap gas CO

Respon pelet WO_3 terhadap gas CO dapat diketahui melalui proses paparan gas dalam jangka waktu tertentu dengan memvariasikan konsentrasi gas dalam waktu yang berbeda-beda. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan WO_3 dalam merasakan adanya gas CO dilingkungannya. Resistansi berubah seiring dengan adanya perbedaan konsentrasi gas dalam jangka waktu yang ditetapkan, hal ini mengindikasikan adanya respon yang dinamis dari material [13]. Respon WO_3 diukur dalam waktu 10 menit, setiap 1,5 menit terjadi peningkatan konsentrasi gas CO. Pengujian respon dinamis menunjukkan kenaikan seiring peningkatan konsentrasi gas CO. Pada gambar 7 untuk setiap variasi temperatur post hydrothermal terlihat adanya penurunan setelah divakum, ini dikarenakan saat divakum gas

CO yang dikatalis oleh WO_3 berubah menjadi CO_2 menurut reaksi redoks dan melepaskan e^- kembali ke permukaan sehingga sampel pelet WO_3 dapat mengalir arus dan resistansinya menurun sensitivitasnya juga menurun.

IV. KESIMPULAN

Material WO_3 sebagai bahan pembuatan pelet sensor WO_3 dapat diperoleh melalui metode sintesa sol-gel dengan mensintesa precursor WCl_6 , ethanol dan Ammonium Hidroksida (NH_4OH). Hasil pengujian XRD terhadap material WO_3 dengan variasi temperatur post hydrothermal $160^\circ C$, $180^\circ C$, dan $200^\circ C$ menunjukkan bahwa material yang dihasilkan memiliki struktur kristal monoklinik (JCPDF no. 75-2072). Hasil pengujian sensitivitas menunjukkan kenaikan sensitivitas seiring dengan penurunan temperatur post hydrothermal dipengaruhi luas permukaan aktif dimana luas permukaan paling besar terdapat pada temperatur post hydrothermal paling rendah. Nilai sensitivitas terendah terdapat pada temperatur operasi $30^\circ C$ dan pada pelet WO_3 temperatur post hydrothermal $200^\circ C$ yaitu 0,005 dan tertinggi pada temperatur operasi $100^\circ C$ dan pada sampel $160^\circ C$ yaitu 1,11. Semakin tinggi konsentrasi gas CO dan temperatur operasi maka sensitivitas juga semakin meningkat. Konsentrasi gas CO tertinggi pada penelitian ini yaitu 500 ppm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. D. Nevers, *Air Pollution Control Engineering*. New York: Mc-Graw Hill (1995) 1-52.
- [2] A. A. G. Diputra, D. Susanti, dan H. Purwaningsih, *Aplikasi Tungsten Trioksida Thin Film Hasil Proses Sol-Gel dan Kalsinasi Sebagai Material Sensor Gas karbon Monoksida dengan Metode Spin Coating*. Tugas Akhir S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS (2012).
- [3] H. Imai, H. Moromoto, A. Tominaga, and H. Hirashima, *Structural changes in sol-derived SiO_2 and TiO_2 films by exposure to water vapour*. J. Sol-Gel. Sci. Technol. 10, (1997) 45-54.
- [4] Kalpakjian, S, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 4th ed. Chicago: Illinois Institute of Technology. (2003) Ch. 11.
- [5] G. Xie, J. Yu, X. Chen, and Y. Jiang, *Gas sensing characteristics of WO_3 vacuum deposited thin films*. Sensors and Actuators B 123 (2006) 909-914.
- [6] D. K. Arisandi, dan D. Susanti, *Pengukuran Sensitivitas Sensor Gas CO dari Material WO_3 Hasil Proses Sol Gel dan Post Hydrothermal Terhadap Variasi Konsentrasi dan Temperatur Operasi*. Tugas Akhir S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS (2012).
- [7] H. Nisfu, D. Susanti, dan H. Purwaningsih, *Sintesa Tungsten Trioksida Nano Partikel Dengan Metode Sol Gel dan Post-Hydrothermal*. Tugas Akhir S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS (2011).
- [8] R. H. Acuna, F. P. Delgado, M. A. Albitar, J. L. Romerod, and R. M. Sánchez, *Synthesis and characterization of WO_3 nanostructures prepared by an aged-hydrothermal method*. Materials characterization 60 (2008) 932-937.
- [9] J. H. Ha, P. Muralidharan, D. K. Kim, *Hydrothermal synthesis and characterization of self-assembled h- WO_3 nanowires/nanorods using EDTA salts*. Journal of Alloys and Compounds 475 (2009) 446-451
- [10] S. H. Wang, T. C. Chou, and C. C. Liu, *Nano-crystalline tungsten oxide NO2 sensor*. Sensors and Actuators B 94 (2003) 343-351.
- [11] J. Yu, L. Qi, B. Cheng, and X. Zhao, *Effect of calcination temperatures on microstructures and photocatalytic activity of tungsten trioxide hollow microspheres*. China: Wuhan University of Technology. Journal of Hazardous Materials 160 (2008) 623-625.
- [12] W. D. Callister, Jr, and D. G. Rethwisch, *Material Science and Engineering, an Introduction*. New York: John Wiley and Sons Inc. (2007) Ch 18.
- [13] Z. Liu, M. Miyauchi, T. Yamazaki, and Y. Shen, *Facile synthesis and NO_2 gas sensing of tungsten oxide nanorods assembled micropores*. Journal of Sensors and Actuators B 140 (2009) 514-519.