

# PREPARATION OF TiO<sub>2</sub> NANOTUBE USING ANODIZATION METHOD: CHARACTERIZATION AND ITS APPLICATION FOR CO SENSOR

Harry Budiman<sup>\*1,2</sup>, Rahmat Wibowo<sup>1</sup>, Oman Zuas<sup>2</sup>, Jarnuzi Gunlazuardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Depok, 16424

<sup>2</sup> Laboratorium Analisa Gas, Kelompok Penelitian Metrologi Kimia, Pusat Riset dan Pengembangan Sumber daya Manusia, Badan Standardisasi Nasional, Gedung SNSU no. 420, Puspiptek, Tangerang Selatan, 15314

E-mail: \*harry.budiman@ui.ac.id, harry@bsn.go.id

Received: 24 Maret 2021. Accepted: 19 Desember 2021. Published: 31 Desember 2021

DOI: 10.30870/educhemia.v6i1.10793

**Abstract:** Preparation of highly ordered TiO<sub>2</sub> nanotube arrays (HOTNAs) by anodization of Ti foil industrial grade in ethylene glycol electrolyte containing 0.3% of ammonium fluoride and 2% of water at 30 V for 90 minutes was conducted. The morphology structure, chemical composition, functional group, crystal phase, and optical properties of HOTNAs were characterized by field emission scanning electron microscope (FE-SEM), Energy Dispersive X-Ray (EDX), Fourier transform infra-red spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), and ultraviolet visible diffuse reflectance spectroscopy (UV/Vis-DRS). The well-ordered nanotube with vertically oriented structure was formed in the HOTNAs having size in diameter, length, and wall thickness of 48,0 nm, 1,8 μm, and 26,7 nm, respectively. The fabricated HOTNAs were evaluated for their sensing properties for CO detection. The results show that the fabricated HOTNAs were able to detect 2500 ppm of CO gas with response about 93,429 at operation temperature 150 °C. This preliminary study of sensing performance demonstrates that the prepared HOTNAs under this study is potential and promising as a material sensor for CO detection.

**Keywords:** HOTNAs; anodization; carbon monoxide; gas sensor

**Abstrak:** Preparasi *highly ordered* TiO<sub>2</sub> *nanotube arrays* (HOTNAs) dengan anodisasi lembaran Ti grade industri dalam larutan elektrolit etilen glikol yang mengandung 0,3% ammonium fluoride dan 2% air pada tegangan anodisasi 30 V selama 90 menit telah dilakukan. Struktur morfologi, gugus fungsi, fasa kristal, dan sifat optikal dari HOTNAs dikarakterisasi dengan field emission scanning electron microscope (FE-SEM), energy dispersive sinar X (EDX), Fourier transform infra-red spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), dan ultraviolet visible diffuse reflectance spectroscopy (UV/Vis-DRS). Susunan nanotube yang rapih dan tegak lurus telah terbentuk pada HOTNAs dengan ukuran diameter, panjang, dan ketebalan dinding tube yaitu 48,0 nm, 1,8 μm, dan 26,7 nm, berturut-turut. HOTNAs yang telah difabrikasi selanjutnya dievaluasi sifat sensingnya untuk deteksi CO. Hasil menunjukkan bahwa HOTNAs yang telah difabrikasi dapat mendeteksi 2500 ppm gas CO dengan respon sebesar 93,429 pada temperatur operasi 150 °C. Studi awal dari performa

sensing ini mendemonstrasikan bahwa HOTNAs yang telah dipreparasi pada penelitian ini berpotensi dan menjanjikan sebagai material sensor untuk deteksi CO.

**Kata kunci:** HOTNAs; anodisasi; karbon monoksida; sensor gas

---

## PENDAHULUAN

Karbon monoksida (CO) merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa dan bersifat racun. Gas CO dapat menyebabkan masalah kesehatan yang serius bagi manusia karena molekul CO bisa mencegah oksigen untuk berinteraksi dengan hemoglobin di dalam aliran darah (Hosoya, 2013; Pozos, Krishna, Amador, Kudriavtsev, & Alvarez, 2018; Wetchakun et al., 2011). Oleh karena itu, sensor CO dengan sensitifitas tinggi dan mempunyai respon deteksi yang cepat sangat dibutuhkan untuk pengaplikasian di berbagai tempat yang berpotensi terekspos oleh CO seperti rumah, pabrik, ruang dengan ventilasi minim (Hosoya, 2013; Pozos et al., 2018; Wang, Yin, Zhang, Xiang, & Gao, 2010).

Berbagai jenis sensor untuk mendeteksi gas beracun berdasarkan mekanisme transdusinya secara luas dikembangkan seperti katalitik termoelektrik, optikal inframerah, kolorimetrik, dan kimia resistivitas oksida logam semikonduktor (Molavi & Sheikhi, 2018). Sensor gas berbasis

oksida logam semikonduktor menawarkan beberapa kelebihan dibandingkan dengan sensor gas jenis lain yaitu performa stabilitas yang baik, pemeliharaan dan biaya murah, mudah digunakan, sensitifitas tinggi, waktu respon/rekoveri yang cepat, dan mampu untuk mendeteksi sejumlah gas (Hosoya, 2013; Wetchakun et al., 2011). Beberapa macam oksida logam semikonduktor seperti SnO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, dan lain-lain, adalah material yang berpotensi untuk difabrikasi menjadi sensor gas (Liu et al., 2017). Performa sensor berbasis oksida logam semikonduktor sangat dipengaruhi oleh morfologi permukaan dari lapisan sensing (Hazra & Bhattacharyya, 2014). Oleh karena itu, beberapa material nanostruktur seperti nanotube, nanopartikel dan nanoporous telah dikembangkan untuk aplikasi sensor gas (Wetchakun et al., 2011).

Titanium dioksida (TiO<sub>2</sub>) merupakan salah satu oksida logam semikonduktor yang penting untuk dikembangkan sebagai sensor gas karena bersifat tidak beracun, harga yang murah, stabilitas kimia yang baik dan juga memiliki sifat elektrik dan optikal yang unik (Tan,

Wlodarski, Kalantar-zadeh, & Livingston, 2006; Zhang, Zeng, Ye, & Li, 2018). Beberapa peneliti terdahulu melaporkan bahwa TiO<sub>2</sub> dengan struktur nanotube mempunyai keunggulan dalam mensensing gas karena luas permukaan yang besar dari TiO<sub>2</sub> nanotube menyediakan banyak sisi aktif untuk interaksi gas (Hazra & Bhattacharyya, 2014). Terutama TiO<sub>2</sub> nanotube dengan susunan keteraturan tinggi yang dipreparasi dengan metoda elektrokimia anodisasi menjadi fokus perhatian para peneliti saat ini untuk diaplikasikan sebagai sensor gas karena morfologi tube seperti panjang, diameter, ketebalan dinding dapat dioptimasi dan secara mudah dikontrol (Liu et al., 2017).

Dalam artikel ini, preparasi TiO<sub>2</sub> nanotube menggunakan metode anodisasi berbasis elektrolit mengandung fluorida-air dilaporkan. Anodisasi dilakukan pada lembaran Ti grade industri. TiO<sub>2</sub> nanotube yang dipreparasi kemudian dikarakterisasi morfologi, komposisi kimia, gugus fungsi, fasa kristal, sifat optikal dan aplikasinya untuk sensor gas CO.

## METODE

### *Alat*

Rangkaian alat anodisasi terdiri dari sel kaca anodisasi (volume 5 mL),

elektroda, power supply tegangan DC (Kenwood Trio PR653), dan elektrometer (Agilent Model U1241). Instrumen karakterisasi terdiri dari spektrometer Fourier Transform Infrared (FTIR, Shimadzu IR Prestige-21), spektrofotometer UV-Vis diffuse reflectance (Shimadzu, 2450 type), X-ray diffraction (XRD, X'PERT Pro, PANalytical), field emission scanning electron microscope-energy dispersive X-ray (FESEM-EDX, JEOL JIB-4610F). Rangkaian alat pengujian sensing terdiri dari sistem pengenceran gas (CMK, MCZ GmbH, Dieseltrasse, Germany), chamber akrilik (~3L), ceramic heater (1 cm x 2 cm), sistem pengontrol suhu dengan termokopel, elektroda, dan digital multimeter terkontrol komputer (Agilent, model 34461A).

### *Bahan*

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah lembaran Titanium grade industri (tebal 0,3 mm) dari Baoji Jinsheng Metal Material Co, lembaran platina dari Shanghai Chong Xin Electric Alloy Co, asam fluorida (HF), asam nitrat (HNO<sub>3</sub>), ammonium fluorida (NH<sub>4</sub>F), etilen glikol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>), dan etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O). Reagen kimia diperoleh dari Merck dan mempunyai grade *pro analysis*. Air deionisasi (18,2 MΩ cm)

digunakan dalam keseluruhan eksperimen. Gas yang digunakan untuk uji sensing adalah gas udara kering yang diperoleh dari PT Air Liquide Indonesia, dan standar campuran gas CO (2500 ppm dalam N<sub>2</sub>) yang dipreparasi secara gravimetrik.

### ***Perlakuan Awal Lembaran Ti***

Sebelum anodisasi, lembaran titanium dengan ukuran 10 mm × 10 mm × 0.3 mm digosok dengan kertas pasir 1500 cc dan 2000 cc, lalu disonikasi berturut-turut dalam aseton, etanol, dan air deionisasi selama 10 menit. Selanjutnya lembaran Ti dikeringkan dalam udara atmosfer. Lembaran Ti kering dipoles secara kimia menggunakan campuran larutan HF, HNO<sub>3</sub>, dan air deionisasi (perbandingan volume = 1:3:6) selama 2 menit. Kemudian, lembaran Ti dibilas dengan air deionisasi dan dikeringkan dalam udara.

### ***Preparasi HOTNAs***

Sintesis *highly ordered TiO<sub>2</sub> nanotube arrays* (HOTNAs) dilakukan dengan metode anodisasi elektrokimia. Lembaran Ti setelah perlakuan awal dianodisasi menggunakan sistem sel dua elektroda konvensional dengan lembaran Ti sebagai anoda dan lembaran Pt sebagai

katoda. Jarak antara dua elektroda diatur 1,5 cm. Anodisasi lembaran Ti dilakukan pada tegangan 30 V selama 90 menit di dalam larutan elektrolit etilen glikol yang mengandung 0,3% wt NH<sub>4</sub>F, dan 2% H<sub>2</sub>O. *Direct current (DC) power supply* terkontrol digunakan sebagai sumber tegangan dalam anodisasi. Selain itu, digital multimeter terkontrol dikoneksikan secara seri dengan DC *power supply* untuk memonitor arus yang dihasilkan selama anodisasi. Sampel *as-prepared* kemudian dikalsinasi pada 450 °C dengan kecepatan kenaikan temperatur 5°C /minutes selama 2 jam di dalam kondisi atmosfer udara untuk memperoleh fasa kristal dari film nanotube.

### ***Karakterisasi HOTNAs***

Morfologi permukaan dan tampilan potong melintang dari HOTNAs diamati menggunakan *field emission scanning electron microscope* (FE-SEM) pada *accelerating voltage* 15 kV. Komposisi kimia dari permukaan HOTNAs diinvestigasi dengan *energy dispersive X-ray* (EDX). Fasa Kristal dari HOTNAs dikarakterisasi dengan *X-ray diffraction* (XRD) pada scanning 2θ dari 10° ke 90° dengan kecepatan scan 0.25°/min. Sifat optikal dari HOTNAs diteliti menggunakan spektrofotometer diffuse

reflectance UV-Vis (UV-Vis DRS) pada panjang gelombang 200-900 nm dengan bubuk BaSO<sub>4</sub> sebagai referensi. Gugus fungsi pada permukaan HOTNAs dianalisis dengan spectrometer *Fourier Transform Infrared* (FTIR) pada rentang scan 400-4000 cm<sup>-1</sup>.

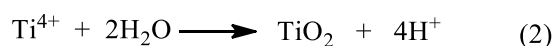
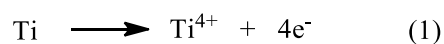
### **Fabrikasi Sensor**

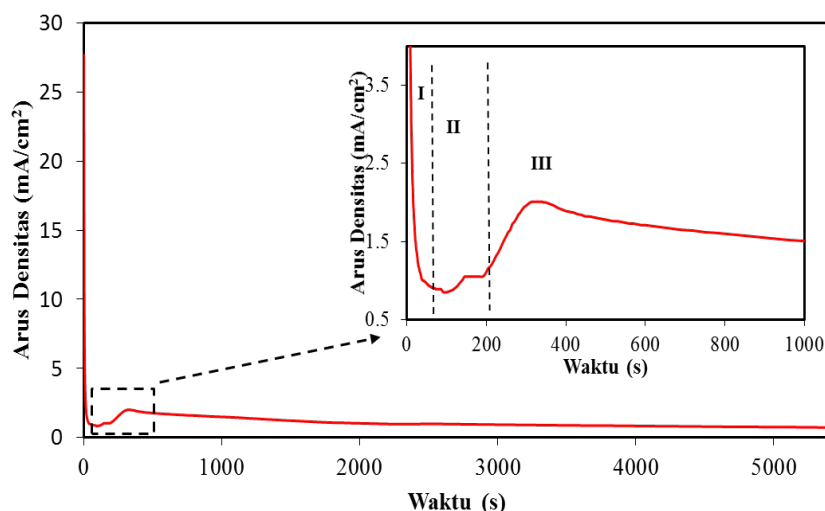
Dalam memfabrikasi sensor gas, kawat Pt dihubungkan dengan permukaan TiO<sub>2</sub> nanotube dan substrat Ti menggunakan pasta perak (Ag). TiO<sub>2</sub> nanotube sebagai sensor diletakkan di atas pemanas keramik di dalam chamber tertutup bervolume ~3 L. Pengukuran sensing gas dilakukan dengan metode aliran kontinu. Digital multimeter terkontrol computer digunakan untuk merekam variasi resistansi dari sensor HOTNAs ketika dieksposkan dengan udara sebagai gas pembawa dan gas CO sebagai gas target. Respon sensor pada penelitian ini dihitung dengan formula  $S = (R - R_0) / R_0 \times 100$ , dimana R dan R<sub>0</sub> merupakan resistansi sensor ketika diesposkan udara dan gas target, secara berturut-turut.

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Kurva arus densitas terhadap waktu digambarkan untuk memahami mekanisme pembentukan susunan TiO<sub>2</sub> nanotube selama proses anodisasi, seperti terlihat pada Gambar 1. Seperti terlihat pada Gambar 1, pembentukan TiO<sub>2</sub> nanotube pada proses anodisasi melibatkan tiga tahapan yang karakteristik yaitu tahap 1) pembentukan lapisan TiO<sub>2</sub> padat dengan sifat resistansi yang tinggi, 2) pembentukan nanopori tidak beraturan yang menembus lapisan TiO<sub>2</sub>, dan 3) pertumbuhan struktur nanotube (Jin et al., 2017; Joseph & Sagayaraj, 2015; Smith, Ray, Carlson, Sarma, & Misra, 2013; Song et al., 2017).

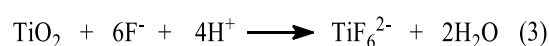
Pada tahap 1 (Gambar 1), pembentukan lapisan TiO<sub>2</sub> padat terjadi karena ion Ti<sup>4+</sup> hasil oksidasi logam Ti di anoda bereaksi dengan atom oksigen yang berasal dari H<sub>2</sub>O dalam larutan elektrolit, seperti terlihat pada persamaan reaksi 1 dan 2.





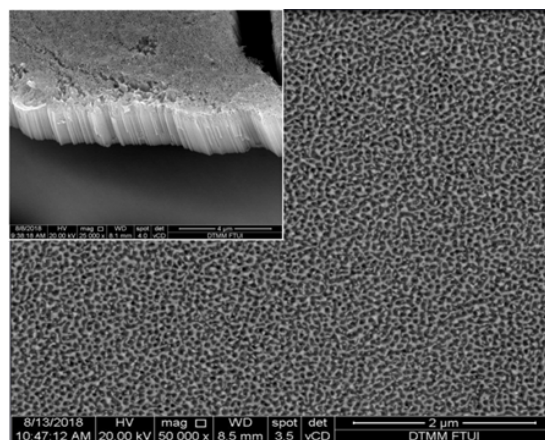
**Gambar 1.** Plot arus densitas terhadap waktu ketika proses anodisasi lembaran Ti pada 30 V selama 90 menit di dalam larutan etilen glikol mengandung 0,3%  $\text{NH}_4\text{F}$  dan 2%  $\text{H}_2\text{O}$ . Gambar sisipan merupakan tampak perbesaran pada rentang waktu 0-1000 detik.

Kemudian pada tahap 2 (Gambar 1), pembentukan nanopori pada lapisan  $\text{TiO}_2$  nanotube terjadi disebabkan proses pelarutan/penggerusan kimia lapisan  $\text{TiO}_2$  oleh keberadaan ion  $\text{F}^-$  dan  $\text{H}^+$  untuk membentuk hexafluorotitanate  $[\text{TiF}_6]^{2-}$  yang larut dalam elektrolit (Song et al., 2017), seperti terlihat pada persamaan reaksi 3.



Struktur morfologi HOTNAs diamati dengan FE-SEM, seperti terlihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2,  $\text{TiO}_2$  nanotube telah terbentuk dengan susunan yang rapih dan berstruktur tegak lurus.  $\text{TiO}_2$  nanotube mempunyai diameter, panjang, dan ketebalan dinding sebesar 48,0 nm, 1,8  $\mu\text{m}$ , dan 26,7 nm, berturut-turut. Hasil analisis FE-SEM dari HOTNAs ini mengkonfirmasi hasil

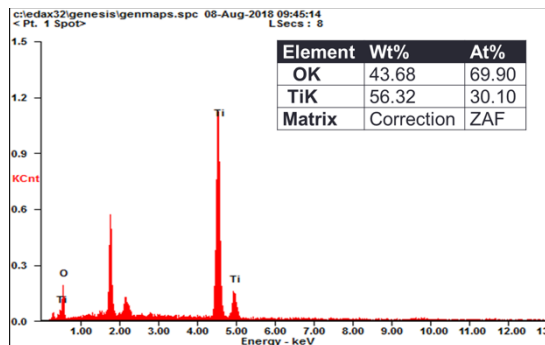
pembentukan  $\text{TiO}_2$  nanotube yang diamati dari kurva arus densitas anodisasi terhadap waktu.



**Gambar 2.** Foto FE-SEM morfologi HOTNAs. Inset merupakan perbesaran tampilan secara potongan melintang.

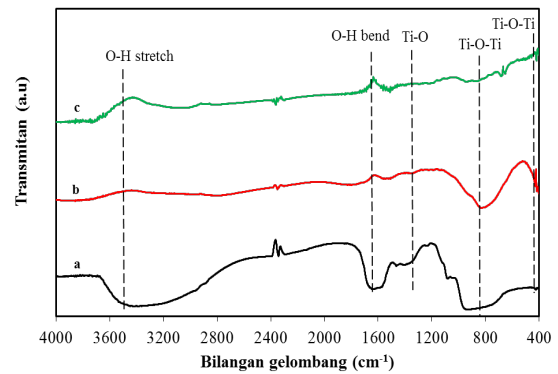
Analisis energi dispersi sinar-X (EDX) dari sampel HOTNAs ditunjukkan oleh Gambar 3. Hasil pengukuran EDX pada HOTNAs menunjukkan komposisi unsur penyusun sampel terdiri dari unsur Ti dan O dengan rasio stokiometrik 1:2

(Ti: 69,90%; O: 30.10%). Hasil ini mengkonfirmasi keberadaan senyawa TiO<sub>2</sub> dalam sampel.



**Gambar 3.** Spektrum EDX dari sampel HOTNAs

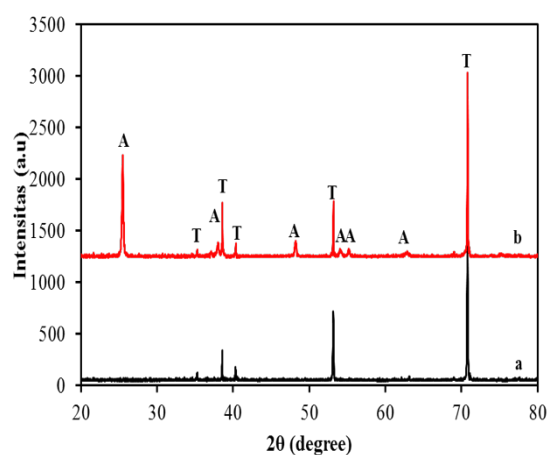
Spektrum FTIR dari lembaran Ti dan HOTNAs dapat dilihat pada Gambar 4. Spektrum FTIR *as-prepared* HOTNAs pada Gambar 4a menunjukkan puncak untuk mode bending dan stretching gugus hidroksil pada 1620-1630 cm<sup>-1</sup> and 3100-3600 cm<sup>-1</sup>, secara berturut-turut. Puncak lebar berkisar pada ~3300 cm dan puncak tajam pada 1650 cm<sup>-1</sup> merupakan puncak stretching dan bending –OH dari molekul air (Felita, Riyanto, & Martono, 2021), berturut-turut. Puncak FTIR pada daerah 3400-3600 cm<sup>-1</sup> berasal dari gugus –OH yang berikatan lemah dengan permukaan Ti tidak terkoordinasi (Ali, Kim, Kim, & Cho, 2014; So et al., 2017). Setelah proses kalsinasi *as-prepared* HOTNAs, puncak lebar gugus Ti-OH pada 3000-3700 cm<sup>-1</sup> menghilang sedangkan puncak vibrasi Ti-O-Ti muncul di daerah 850 dan 425 cm<sup>-1</sup>, seperti terlihat pada Gambar 4a dan 4b.



**Gambar 4.** Spektrum FTIR, a) *as-prepared* HOTNAs (amorphous), b) HOTNAs (setelah kalsinasi), dan c) lembaran Ti.

Pola difraksi XRD dari lembaran Ti dan HOTNAs dapat dilihat pada Gambar 5. Pada Gambar 5 dapat diamati terdapat dua kelompok puncak difraksi yaitu puncak berasal dari substrat logam Ti (Gambar 5a) dan puncak difraksi berasal dari fasa kristal anatase (Gambar 4b). Kelompok pertama puncak difraksi pada daerah 2θ: 35,292°, 40,371°, 53,162°, dan 70,788°, dengan indeks Miller (100), (101), (102), and (103), berturut-turut, merupakan puncak difraksi dari lembaran Ti yang sesuai dengan data kartu interpretasi XRD JCPDS card no.21-1294 (Lee, Kim, Roy, Paramasivam, & Birajdar, 2010). Kelompok puncak difraksi kedua merupakan puncak difraksi untuk anatase TiO<sub>2</sub> yang muncul pada daerah 2θ: 25,503°, 38,020°, 48,224°, 54,118°, 55,249°, and 62,831°. Puncak-puncak difraksi ini mempunyai indeks Miller (101), (004), (200), (105), (211), dan (204), berturut-turut, dan

berkesesuaian dengan pola difraksi kristal anatase TiO<sub>2</sub> pada JCPDS *card* no. 21-1272 (Chang et al., 2015). Hal ini mengindikasikan bahwa temperatur kalsinasi HOTNAs pada 450°C merupakan temperatur yang sesuai untuk mentransformasi struktur as-prepared-HOTNAs dari amorphous menjadi kristal anatase (Chang et al., 2015; Lai & Sreekantan, 2012; Zuas & Hamim, 2013). Ukuran kristalit dari HOTNAs dihitung dari *full-width at half maximum* (FWHM) puncak difraksi (101) pada  $2\theta$ : 25.5° menggunakan persamaan Scherrer (Chang et al., 2015; Zuas & Hamim, 2013). Rata-rata ukuran kristalit dari sampel HOTNAs didapat sekitar 44,37 nm.



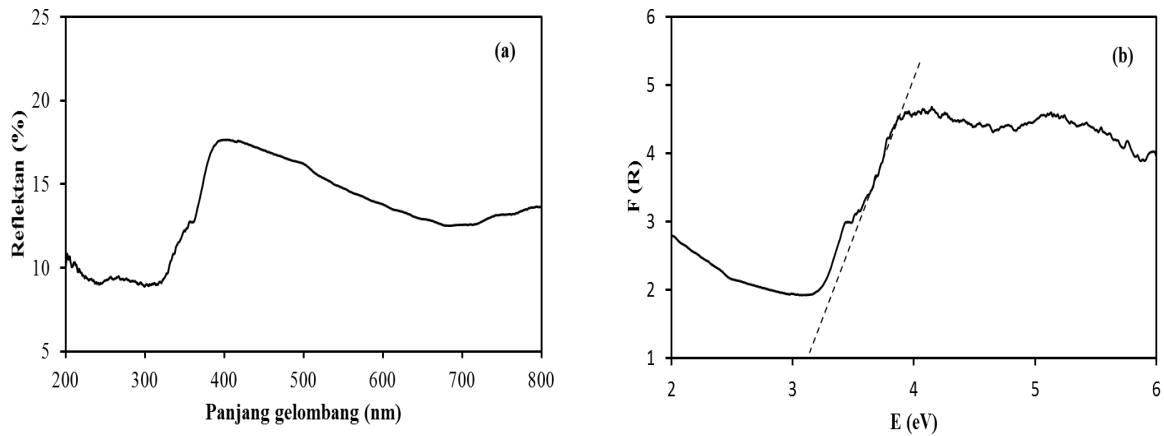
**Gambar 5.** Difraktogram XRD untuk a) *Ti foil*, b) HOTNAs hasil dari anodisasi dan dikalsinasi pada suhu 450°C selama 2 jam (A= anatase, T= titanium).

Gambar 6 menunjukkan spectrum UV-Visible DRS dan kurva Taucs dari sampel HOTNAs. Spektrum UV-Visible

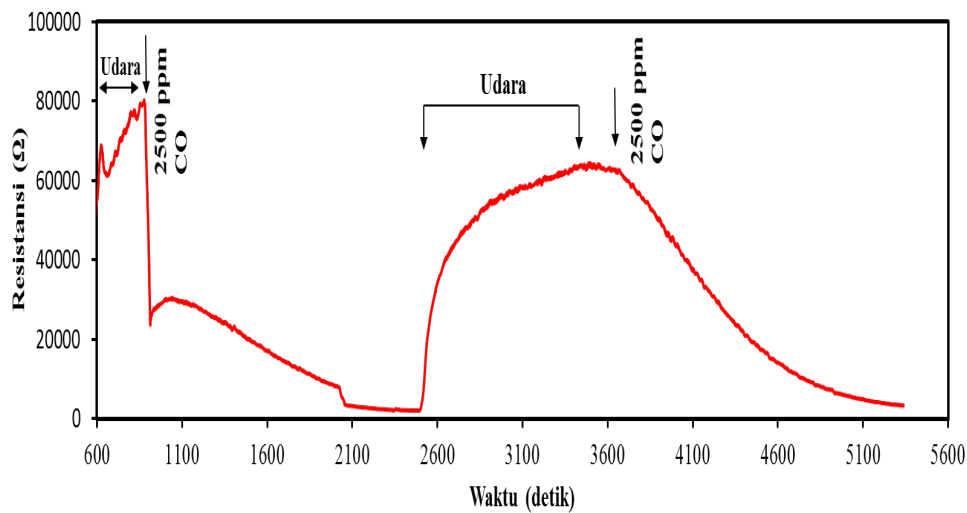
DRS pada Gambar 5a menunjukkan peningkatan intensitas reflektans sinar pada daerah 300-400 nm. Peningkatan intensitas reflektan mengindikasikan penurunan intensitas sinar yang diadsorpsi oleh material TiO<sub>2</sub>. Gambar 6a menunjukkan bahwa sample HOTNAs mempunyai absorbansi maksimum pada daerah UV di  $\lambda = 328$  nm. Dari spektrum UV-Visible DRS, nilai energi bandgap dari HOTNAs ditentukan menggunakan fungsi Kubelka-Munk dan kurva Taucs, seperti terlihat pada Gambar 6b. Energi bandgap untuk sampel HOTNAs didapat 3.22 eV dimana merupakan nilai bandgap yang karakteristik untuk anatase TiO<sub>2</sub> (Roy, Berger, & Schmuki, 2011). Hasil analisis dengan UV-Visible DRS dimana diperoleh energi band gap fasa kristal anatase dari HOTNAs berkesesuaian dengan hasil analisis XRD.

Performa sensing dari HOTNAs terhadap gas CO dapat dilihat pada Gambar 7. Seperti teramati pada Gambar 7, respon sensor HOTNAs menunjukkan penurunan resistan selama dieksposkan gas CO sedangkan kenaikan resistan dapat diamati ketika udara sintetik dialirkan untuk menghilangkan gas CO dari *chamber*. Dari hasil perhitungan, respon sensor dari HOTNAs terhadap 2500 ppm gas CO diperoleh 93,429.





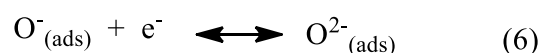
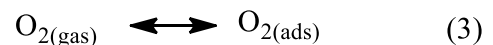
**Gambar 6.** a) Spektrum UV-Visible DRS, b) Kurva Taucs, dari sampel HOTNAs



**Gambar 7.** Karakteristik respon sensor HOTNAs terhadap 2500 ppm gas CO pada kondisi temperatur operasi 150°C

Pada saat udara sintetik dieksposkan pada suhu tertentu, oksigen dalam udara teradsorpsi secara kimia ke permukaan dan elektron dari pita konduksi TiO<sub>2</sub> ditarik oleh molekul oksigen untuk membentuk berbagai macam spesi oksigen ( $O_{2(ads)}^-$ ,  $O_{(ads)}^-$ ,  $O_{(ads)}^{2-}$ ), seperti terlihat pada persamaan reaksi 3-6 (Wetchakun et al., 2011). Hal ini menyebabkan pembentukan lapisan

depleksi elektron yang diikuti dengan peningkatan resistan dari sensor (Chen, Deng, Li, Xing, & Liu, 2016).



Ketika HOTNAs sensor dipaparkan dengan gas CO, gas ini bereaksi dengan

oksigen yang teradsorpsi pada permukaan sensor untuk membentuk karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), seperti terlihat pada persamaan reaksi 7 dan 8. Pada kondisi ini, elektron dilepaskan kembali ke pita konduksi TiO<sub>2</sub> yang menyebabkan penipisan lapisan deplesi elektron dan mengakibatkan penurunan resistansi dari HOTNAs (Su et al., 2013). Respon sensor ini merupakan tipikal respon untuk sensor berbasis logam oksida semikonduktor tipe-n (seperti TiO<sub>2</sub>) dalam mendeteksi reduktan gas seperti CO (Chen et al., 2016; Su et al., 2013; Wetchakun et al., 2011). Hasil ini menunjukkan bahwa HOTNAs yang dipreparasi merupakan material yang berpotensi tinggi dijadikan sebagai sensor gas CO.



## KESIMPULAN

*Highly ordered TiO<sub>2</sub> nanotube arrays* (HOTNAs) telah berhasil dipreparasi dari lembaran Ti grade industri dengan metode anodisasi menggunakan larutan elektrolit etilen glikol yang mengandung 0,3% NH<sub>4</sub>F dan 2% H<sub>2</sub>O pada tegangan 30 V selama 90 menit. HOTNAs mempunyai susunan nanotube yang rapat dan tegak lurus dengan ukuran diameter, panjang, dan ketebalan dinding tube yaitu

48,0 nm, 1,8 μm, dan 26,7 nm, berturut-turut. Penggunaan HOTNAs sebagai sensor gas CO menunjukkan HOTNAs dapat mendeteksi 2500 ppm gas CO dengan respon sebesar 93,429 pada kondisi temperatur operasi 150°C.

Studi awal ini menunjukkan bahwa HOTNAs berpotensi untuk dijadikan material untuk sensor gas CO. Selain itu, penggunaan lembaran Ti grade industri untuk sintesis HOTNAs menjadikan biaya fabrikasi sensor gas CO lebih rendah, dengan performa sensor yang cukup sensitif dan dapat beroperasi di temperatur lebih rendah yaitu 150°C (< 400 °C). Pengembangan selanjutnya untuk material HOTNAs sebagai sensor gas CO yang dipreparasi dari lembaran Ti grade industri ini adalah meningkatkan sensitifitas dari deteksi gas CO dengan menumbuhkan cacat (*defect*) permukaan pada HOTNAs seperti Ti<sup>3+</sup> atau oksigen vakansi.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Beasiswa Sainstek dari Kementerian Riset Teknologi & Pendidikan Tinggi (Kemenristek Dikti) dan Proyek Tugas Akhir Doktor Universitas Indonesia (TADOK-UI) yang telah membiayai penelitian ini.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Andreas, M.Si dan Pusat Penelitian Kimia-Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (PP Kimia-LIPI)

yang telah memberikan izin menggunakan fasilitas laboratorium dan instrumennya pada kegiatan penelitian ini.

## DAFTAR RUJUKAN

- Ali, G., Kim, H. J., Kim, J. J., & Cho, S. O. (2014). Controlled fabrication of porous double-walled TiO<sub>2</sub> nanotubes via ultraviolet-assisted anodization†. *Nanoscale*, *6*, 3632–3637. <https://doi.org/10.1039/c3nr05894h>
- Chang, M., Song, Y., Zhang, H., Sheng, Y., Zheng, K., Zhou, X., & Zou, H. (2015). Hydrothermal assisted sol-gel synthesis and multisite luminescent properties of anatase TiO<sub>2</sub>:Eu<sup>3+</sup> nanorods. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/b000000x>
- Chen, N., Deng, D., Li, Y., Xing, X., & Liu, X. (2016). The xylene sensing performance of WO<sub>3</sub> decorated anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles as a sensing material for a gas sensor at a low operating temperature. *RSC Advances*, *6*, 49692–49701. <https://doi.org/10.1039/C6RA09195D>
- Felita, B., Riyanto, C. A., & Martono, Y. (2021). Activated Carbon From Plantain Stems as NO<sub>2</sub><sup>-</sup> and Mn<sup>2+</sup> Adsorbent on Well Water. *EduChemia*, *6*(1), 38–54. <https://doi.org/10.30870/educhemia.v6i1.8887>
- Hazra, A., & Bhattacharyya, P. (2014). Tailoring of the Gas Sensing Performance of TiO<sub>2</sub> Nanotubes by 1-D Vertical Electron. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, *61*(10), 3483–3489.
- Hosoya, A. (2013). Low-temperature-operative Carbon Monoxide Gas Sensor with Novel CO Oxidizing Catalyst. *Chemical Letters*, *42*, 441–443. <https://doi.org/10.1246/cl.130055>
- Jin, R., Liao, M., Lin, T., Zhang, S., Shen, X., Song, Y., & Zhu, X. (2017). Formation and evolution of anodic TiO<sub>2</sub> nanotube embryos. *Materials Research Express*, *4*(6).
- Joseph, S., & Sagayaraj, P. (2015). A cost effective approach for developing substrate stable TiO<sub>2</sub> nanotube arrays with tuned morphology: a comprehensive study on the role of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and anodization potential. *New Journal of Chemistry*,

- 39(7), 5402–5409.  
<https://doi.org/10.1039/C5NJ00565E>
- Lai, C. W., & Sreekantan, S. (2012). Photoelectrochemical Performance of Smooth TiO<sub>2</sub> Nanotube Arrays: Effect of Anodization Temperature and Cleaning Methods. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 1–11.  
<https://doi.org/10.1155/2012/356943>
- Lee, K., Kim, D., Roy, P., Paramasivam, I., & Birajdar, B. I. (2010). Anodic Formation of Thick Anatase TiO<sub>2</sub> Mesosponge Layers for High-Efficiency Photocatalysis. *Journal American Chemical Society*, 132(5), 1478–1479.
- Liu, J., Li, S., Zhang, B., Xiao, Y., Gao, Y., Yang, Q., ... Lu, G. (2017). Ultrasensitive and low detection limit of nitrogen dioxide gas sensor based on flower-like ZnO hierarchical nanostructure modified by reduced graphene oxide. *Sensors and Actuators B* :, 249, 715–724.
- Molavi, R., & Sheikhi, M. H. (2018). Low temperature carbon monoxide gas sensor based on Ag-Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> thick film nanocomposite. *Materials Letters*, 233(3), 74–77.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.087>
- Pozos, H. G., Krishna, K. T. V., Amador, M. D. L. O., Kudriavtsev, Y., & Alvarez, A. M. (2018). TiO<sub>2</sub> thin film based gas sensors for CO-detection. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(18), 15829–15837.  
<https://doi.org/10.1007/s10854-018-9477-2>
- Roy, P., Berger, S., & Schmuki, P. (2011). TiO<sub>2</sub> Nanotubes: Synthesis and Applications. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 50, 2904–2939.  
<https://doi.org/10.1002/anie.201001374>
- Smith, Y. R., Ray, R. S., Carlson, K., Sarma, B., & Misra, M. (2013). Self-Ordered Titanium Dioxide Nanotube Arrays: Anodic Synthesis and Their Photo/Electro-Catalytic Applications. *Materials*, 6, 2892–2957.  
<https://doi.org/10.3390/ma6072892>
- So, S., Riboni, F., Hwang, I., Paul, D., Hammond, J., Tomanec, O., ... Schmuki, P. (2017). Electrochimica Acta The double-walled nature of TiO<sub>2</sub> nanotubes and formation of tube-in-tube structures – a characterization of different tube morphologies. *Electrochimica Acta*, 231, 721–731.
- Song, J., Zheng, M., Zhang, B., Li, Q., Wang, F., Ma, L., & Li, Y. (2017). Fast Growth of Highly Ordered TiO

- 2 Nanotube Arrays on Si Substrate under High-Field Anodization. *Nano Micro Letters*, 9(13), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s40820-016-0114-4>
- Su, J., Zou, X., Zou, Y., Li, G., Wang, P., & Chen, J. (2013). Porous Titania with Heavily Self-Doped Ti<sup>3+</sup> for Specific Sensing of CO at room temperature. *Inorganic Chemistry*, 52(10), 5924–5930.
- Tan, J., Wlodarski, W., Kalantar-zadeh, K., & Livingston, P. (2006). Carbon Monoxide Gas Sensor Based on Titanium Dioxide Nanocrystalline with a Langasite Substrate. *IEEE Sensors Journal*, 228–231.
- Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R. (2010). Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors*, 10, 2088–2106. <https://doi.org/10.3390/s100302088>
- Wetchakun, K., Samerjai, T., Tamaekong, N., Liewhiran, C., Siriwong, C., Kruefu, V., ... Phanichphant, S. (2011). Chemical Semiconducting metal oxides as sensors for environmentally hazardous gases. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 160(1), 580–591. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.08.032>
- Zhang, Y., Zeng, W., Ye, H., & Li, Y. (2018). Enhanced Carbon Monoxide Sensing Properties of TiO<sub>2</sub> with Exposed (001) facet: A Combined First-principle and Experimental Study. *Applied Surface Science*, (1). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.02.036>
- Zuas, O., & Hamim, N. (2013). Synthesis, Characterization and Properties of CeO<sub>2</sub>-doped TiO<sub>2</sub> Composite Nanocrystals. *Materials Science*, 19(4), 443–447.