MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i2.9066

PREPARASI TiO2 *NANOTUBE ARRAYS* (TNAs) MENGGUNAKAN METODE ANODISASI DUA TAHAP

Preparation of TiO2 Nanotube Arrays (TNAs) Using the Two-Step Anodization Method

Zahara Ramadani & Sherly Kasuma Warda Ningsih
Universitas Negeri Padang
sherly14@fmipa.unp.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Dec 27, 2025	Jan 20, 2026	Feb 1, 2026	Feb 6, 2026

Abstract

Titanium dioxide (TiO_2) is a semiconductor material widely used in various ultraviolet-responsive applications; however, the controlled growth of well-ordered and homogeneous TiO_2 nanotube arrays (TNAs) via two-step anodization still requires further investigation. This study aimed to analyze TNA growth, current density behavior, and optical characteristics using a two-step anodization method. The experimental approach was conducted on Ti foil substrates at a constant potential of 50 V for 60 minutes in the first step and 30 minutes in the second step. Current density was recorded throughout the anodization process, while the optical properties of the TNAs were analyzed using UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS) with Tauc plot analysis. The results revealed three main current density phases in the first step, namely an initial decrease from 14 mA/cm² to 10 mA/cm² within 30 seconds, an increase to 11.5 mA/cm² at 120 seconds, and a relatively constant condition thereafter, whereas the second step exhibited a faster and more stable current decrease. The band gap energy of the TNAs was determined to be 3.37 eV, with dominant absorption in the ultraviolet region at around 367.95 nm. These findings confirm the effectiveness of

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

two-step anodization in producing stable and well-ordered TNAs, which can potentially be optimized for various photon-based applications that exploit ultraviolet response.

Keywords: TiO_2 Nanotube Arrays; Two-Step Anodization; Current Density; Band Gap; UV-Vis DRS

Abstrak: Titanium dioksida (TiO_2) merupakan material semikonduktor yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi berbasis respons sinar ultraviolet, namun pengendalian pertumbuhan *TiO_2 nanotube arrays (TNAs)* yang teratur dan homogen melalui anodisasi dua tahap masih perlu dikaji lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan menganalisis pertumbuhan TNAs serta perilaku densitas arus dan karakteristik optiknya menggunakan metode anodisasi dua tahap. Pendekatan eksperimental dilakukan pada substrat *Ti foil* dengan potensial konstan 50 V selama 60 menit pada tahap pertama dan 30 menit pada tahap kedua. Densitas arus direkam sepanjang proses anodisasi, sedangkan sifat optik TNAs dianalisis menggunakan *UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)* melalui metode *Tauc plot*. Hasil penelitian menunjukkan adanya tiga fase utama densitas arus pada tahap pertama, yaitu penurunan awal dari 14 mA/cm² menjadi 10 mA/cm² dalam 30 detik, peningkatan hingga 11,5 mA/cm² pada detik ke-120, dan kondisi relatif konstan pada durasi berikutnya, sedangkan tahap kedua menunjukkan penurunan arus yang lebih cepat dan stabil. Energi *band gap* TNAs yang diperoleh sebesar 3,37 eV dengan serapan dominan pada wilayah ultraviolet sekitar 367,95 nm. Temuan ini menegaskan efektivitas anodisasi dua tahap dalam menghasilkan TNAs yang stabil dan teratur, sehingga berpotensi dioptimalkan untuk berbagai aplikasi berbasis foton yang memanfaatkan respons ultraviolet.

Kata Kunci: *TiO_2 Nanotube Arrays*; Anodisasi Dua Tahap; Densitas Arus; *Band Gap*; *UV-Vis DRS*

PENDAHULUAN

Material semikonduktor telah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang dalam tingkatan yang lebih luas seperti pada bidang superkapasitor,, sensor gas, katalis, sel surya tersensitasi zat warna (DSSC), fotokatalitik, dan sel bahan bakar serta juga terdapat beberapa dalam bidang biologi (Slimani *et al.*, 2020; Priyadharshini & Pushpanathan, 2023). Salah satunya adalah titanium dioksida (TiO_2). Hal ini terjadi karena TiO_2 memiliki ciri khas yaitu tahan terhadap korosi dengan melindungi permukaannya melalui lapisan oksida alami yang terbentuk untuk mencegah kerusakan. Tidak hanya itu, TiO_2 juga memiliki energi band gap yang besar serta kemampuan menyerap cahaya yang baik menjadi faktor utama untuk meningkatkan performa dalam berbagai bidang aplikasi (Nasution & Fitri, 2018).

Nanostruktur TiO_2 memiliki beberapa bentuk kristal yaitu rutil (Reghunath et al., 2021) dengan bentuk paling stabil dan band gap 3,0-3,2 eV (Pesci *et al.*, 2013), anatase (Reghunath et al., 2021) dengan performa yang baik dalam aktivitas fotokatalitik dan band gap 3,0-3,2 eV (Pawar *et al.*, 2018) dan brookite (Reghunath et al., 2021) dengan bentuk yang

tidak stabil dan band gap 2,3-2,5 eV (Prayudha & Suryani, 2024). Tidak hanya itu, TiO_2 juga memiliki variasi dimensi, mulai dari 0D dengan bentuk struktur quantum dot, 1D dengan bentuk struktur nanofiber, nanowire, nanotube, dan nanorod, 2D dengan bentuk struktur nanosheet dan nanoflakes, 3D dengan bentuk struktur nanoflower dan nanosphere (Reghunath et al., 2021).

Pembentukan kristal TiO_2 ditentukan oleh struktur permukaan yang akan terbentuk sehingga selama proses pembentukan struktur permukaan dilakukan sangat penting diperhatikan agar performa TiO_2 dalam berbagai bidang dapat maksimal. Terdapat beberapa jenis metode yang bisa digunakan pada saat proses pembentukan TiO_2 seperti metode anodisasi (Inggarwati et al., 2024) metode sol-gel, dan metode solvothrmal (Pasini et al., 2021). Untuk pembentukan struktur nanotube digunakan metode anodisasi dengan menyetarakan parameter anodisasi yang terdiri dari waktu anodisasi, potensial yang digunakan, komposisi larutan elektrolit, pH larutan, dan suhu larutan elektrolit (Ningsih et al., 2023). Dengan demikian terbentuk TiO_2 *nanotube arrays* (TNAs).

Pertumbuhan morfologi TNAs telah mengalami berbagai usaha agar mendapatkan struktur yang lebih teratur, stabil, dan homogen, maka dilakukan adaptasi metode anodisasi menjadi metode anodisasi dua tahap. Tahap pertama dihasilkan pertumbuhan TNAs yang kemudian dihilangkan untuk mendapatkan *template* pola teratur pada pertumbuhan TNAs ditahap kedua. Tahap kedua menghasilkan keseragaman morfologi TNAs, menghasilkan struktur teratur dan terarah secara vertikal (Surahman, 2017).

Selama proses anodisasi perlu diperhatikan densitas arus yang terjadi terhadap reaksi dari potensial yang diberikan terhadap waktu untuk mengetahui susunan proses anodisasi sehingga mendapatkan informasi tentang kecepatan pembentukan lapisan oksida, proses pembentukan pori, sampai kesetimbangan pertumbuhan *nanotube.*

Berdasarkan penjelasan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh densitas arus terhadap pertumbuhan TNAs melalui proses sintesis anodisasi dua tahap. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan informasi kinerja pertumbuhan TNAs dan parameter anodisasi yang paling optimal untuk digunakan dalam aplikasi yang lebih luas.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk mensintesis titanium dioksida nanotube arrays (TNAs) menggunakan metode anodisasi dua tahap serta menganalisis perilaku densitas arus dan karakteristik optiknya. Substrat yang digunakan berupa plat titanium sebagai elektroda kerja dan plat stainless steel sebagai elektroda bantu dalam sel elektrokimia. Elektrolit anodisasi terdiri atas larutan etilen glikol yang ditambahkan 0,3% ammonium fluoride (NH_4F) dan 2% air. Sebelum anodisasi, permukaan plat titanium diamplas menggunakan amplas berukuran 1000 dan 1500 grit, kemudian dibersihkan secara bertahap melalui ultrasonikasi dalam etanol, aseton, dan akuades masing-masing selama 10 menit untuk menghilangkan kontaminan permukaan.

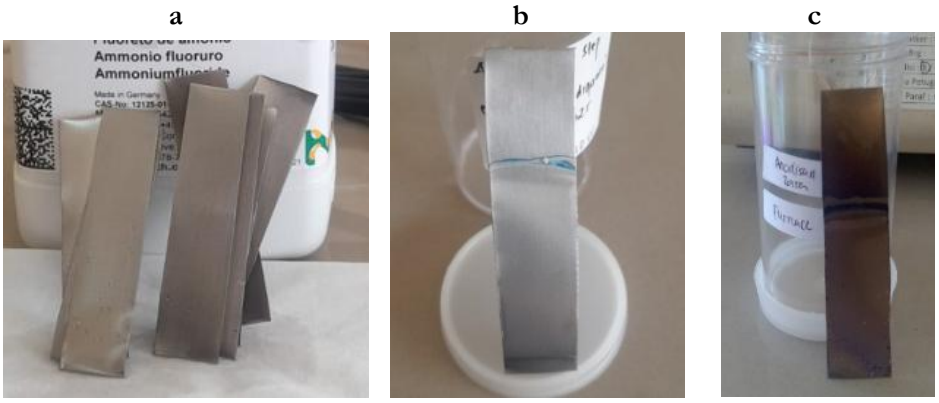
Proses anodisasi dilakukan pada potensial konstan sebesar 50 V dalam dua tahap. Tahap pertama dilakukan selama 60 menit untuk membentuk lapisan awal TNAs yang kemudian dihilangkan melalui sonikasi dalam air distilasi selama 10 menit guna menghasilkan template permukaan yang teratur. Selanjutnya, anodisasi tahap kedua dilakukan pada kondisi potensial yang sama selama 30 menit untuk menumbuhkan TNAs dengan morfologi yang lebih homogen dan terarah secara vertikal. Setelah proses anodisasi selesai, sampel dibilas menggunakan air distilasi, dikeringkan di udara terbuka, dan dikalsinasi pada suhu 450°C selama 2 jam untuk meningkatkan kristalinitas TiO_2.

Selama proses anodisasi, perubahan densitas arus terhadap waktu direkam untuk menganalisis tahapan pembentukan lapisan oksida, inisiasi pori, serta pertumbuhan nanotube. Karakterisasi optik TNAs dilakukan menggunakan UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS) untuk memperoleh spektrum serapan cahaya dan menentukan energi band gap melalui pendekatan Tauc plot. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif untuk menghubungkan perilaku elektrokimia selama anodisasi dengan sifat optik material yang dihasilkan.

HASIL

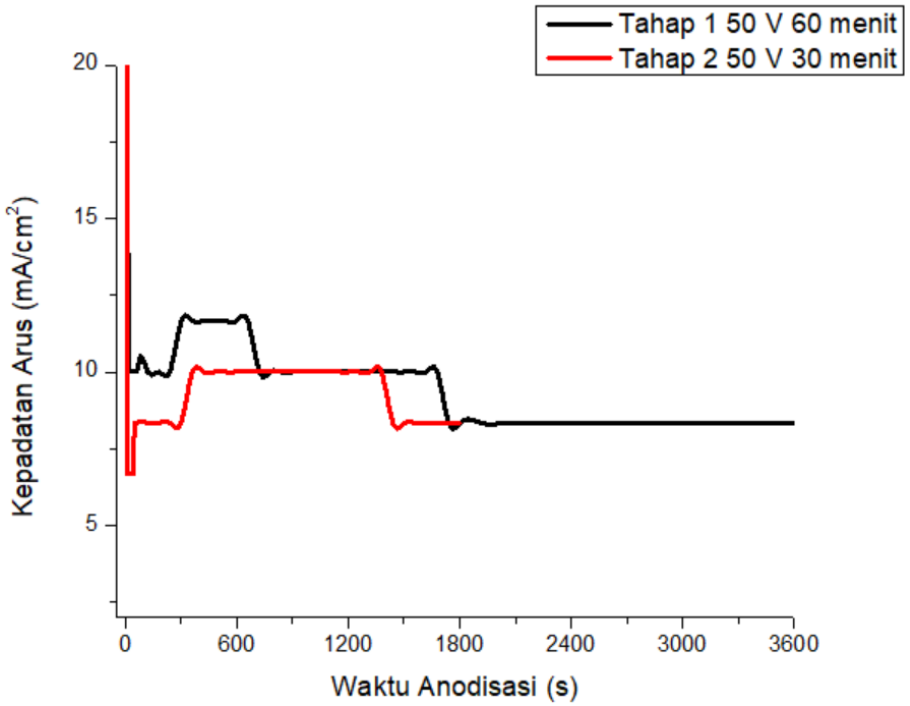
Bagian ini menyajikan hasil sintesis TiO_2 nanotube arrays (TNAs) melalui anodisasi dua tahap pada potensial 50 V, yang meliputi perubahan visual permukaan material, perilaku densitas arus selama proses anodisasi, serta karakteristik optik TNAs berdasarkan pengujian UV-Vis DRS.

Pada Gambar 1 dapat dilihat foto hasil TNAs sebelum dianodisasi, sesudah anodisasi, dan sesudah dikalsinasi pada suhu 450°C selama 2 jam.



Gambar 1. a) Foto Ti foil sebelum anodisasi b) Ti foil TNAs sesudah anodisasi c) TNAs sesudah kalsinasi

Proses pertumbuhan TNAs dengan metode anodisasi dua tahap pada potensial tetap 50 V dianalisis melalui kurva densitas arus terhadap waktu, dapat dilihat pada Gambar 2 Kurva tersebut menjelaskan perubahan densitas arus sebagai reaksi terhadap waktu selama proses anodisasi berjalan.



Gambar 2. Kurva anodisasi TNAs Pada Potensial 50 V selama 60 menit pada tahap satu dan 50 V selama 30 menit pada tahap dua

Pada Gambar 2 dapat dilihat kurva anodisasi TNAs yang disintesis pada potensial 50 V 60 menit dan 50 V 30 menit. Tahap awal anodisasi (50 V 60 menit) menunjukkan bahwa densitas arus mengalami penurunan secara drastis dari 14 mA/cm^2 menjadi 10 mA/cm^2 dalam waktu 30 detik pertama. Hal ini terjadi karena terbentuknya lapisan TiO_2 yang memiliki sifat sebagai lapisan penghalang menyebabkan arus menurus secara drastis. Persamaan reaksi yang terjadi sebagai berikut:

$$Ti + 2H_2O \rightarrow TiO_2 + 4H^+ + 4e^- \quad (1)$$

Kemudian mengalami kenaikan arus dari 10 mA/cm^2 menjadi 11,5 mA/cm^2 dalam waktu 120 detik yang menandakan terjadinya pembentukan lubang-lubang dan pori-pori sebagai penanda permulaan proses pelarutan (disolusi) kimia, dimana ion fluorida (F^-) bereaksi dengan lapisan oksida sehingga membentuk kompleks $[TiF_6]^{2-}$.

Reaksi pembentukan kompleks $[TiF_6]^{2-}$ sebagai berikut:

$$TiO_2 + 6F^- + 4H^+ \rightarrow [TiF_6]^{2-} + 2H_2O \quad (2)$$

Proses ini menyebabkan kenaikan arus karena lapisan penghalang yang sebelumnya terbentuk tipis, sehingga dapat meningkatkan konduktivitas anoda yang disebabkan karena pori yang terbentuk memperbesar luas permukaan reaktif.

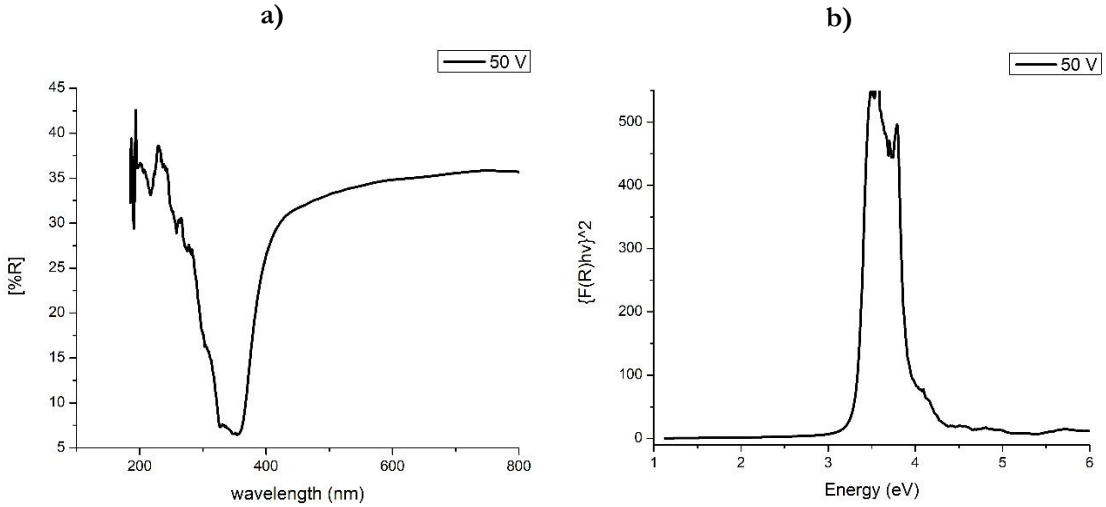
Setelahnya (t_3) densitas arus mengalami penurunan dan relatif konstan yang menandakan bahwa telah terjadi kesetimbangan, hal ini di karenakan pertumbuhan *nanotube* menjadi sangat cepat dan pergeseran ion-ion yang mengalir melalui situs pori dan berperan dalam peningkatan kedalaman atau panjang *nanotube* yang ditumbuhkan.

Kemudian, tahap dua dengan potensial 50 V selama 30 menir, kurva arus menunjukkan penurunan arus secara drastis kemudian relatif konstan. Hal ini menunjukkan bahwa proses pembentukan TNAs terjadi lebih cepat karena adanya *template* yang dihasilkan dari anodisasi tahap pertama. Morfologi permukaan TNAs telah memiliki pola lubang dan pori dari tahap pertama yang menyebabkan distribusi medan listrik menjadi lebih teratur dan mempercepat inisiasi pembentukan pori dan lubang pada tahap kedua.

Secara menyeluruh, hasil ini menandakan bahwa menggunakan metode anodisasi dua tahap dengan potensial 50 V mampu meningkatkan keseragaman dan keteraturan morfologi TNAs.

Kemudian, plat TNAs yang diperoleh diuji dengan UV-Vis DRS dengan tujuan untuk mengetahui serapan cahaya TNAs pada wilayah ultraviolet (UV) dan wilayah (visible) serta

besaran energi band gap yang diperoleh (Pishkar *et al.*, 2018). Untuk mengetahui serapan cahaya digunakan metode analisis persentase reflektansi (%R).



Gambar 3 a) Spektrum UV-Vis DRS TNAs b) Tauc Plot TNAs

Spektrum UV-Vis DRS pada Gambar 3 a) memperlihatkan bahwa terjadinya penyerapan inti yang signifikan yang pada rentang 200-380 nm, puncak tajam reflektan terjadi pada 195 nm dan 225 nm. Hal ini membuktikan bahwa terdapat perubahan elektronik yang signifikan. Kemudian terjadi penurunan yang tajam pada panjang gelombang 380 nm kemudian turun ke 365 nm. Hal ini terjadi karena energi foton meningkat lebih tinggi dibandingkan energi band gap. Hasil yang diperoleh sejalan dengan sifat semikonduktor TiO_2 fase *anatase* dengan penyerapan terjadi pada panjang gelombang < 400 nm serta tidak respon terhadap cahaya *visible* . Pada Gambar 3 b) memperlihatkan bahwa besaran nilai band gap yang diperoleh adalah 3,37 eV. Besarnya nilai band gap yang diperoleh menyebabkan tingkat serap cahaya matahari pada daerah UV terbatas, dimana daerah UV pada spektrum matahari hanya berkisar sekitar 3,7% sehingga menghasilkan tingkat elektron-hole yang tinggi dan kurang efisien untuk aplikasi fotokatalitik.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode anodisasi dua tahap pada potensial konstan 50 V mampu menghasilkan pertumbuhan TiO_2 nanotube arrays (TNAs) yang lebih teratur dan stabil, yang ditunjukkan melalui perilaku densitas arus terhadap waktu serta karakteristik optik material. Penurunan densitas arus secara drastis pada tahap awal anodisasi mengindikasikan terbentuknya lapisan oksida kompak yang berperan sebagai lapisan

penghalang, yang kemudian diikuti oleh peningkatan arus akibat inisiasi pori dan proses disolusi kimia oleh ion fluorida. Tahap kesetimbangan yang ditandai dengan arus relatif konstan mencerminkan kondisi pertumbuhan nanotube yang stabil, di mana laju pembentukan oksida dan pelarutan berlangsung secara seimbang. Fenomena ini menunjukkan bahwa dinamika densitas arus berperan penting dalam mengontrol morfologi TNAs, sejalan dengan tujuan penelitian untuk memahami hubungan antara parameter elektrokimia dan pertumbuhan nanostruktur.

Temuan ini konsisten dengan mekanisme anodisasi yang dilaporkan oleh Le & Leu (2018) yang menyatakan bahwa pembentukan lapisan oksida awal diikuti oleh pelarutan selektif menghasilkan struktur nanotube berpori yang teratur. Selain itu, peningkatan keteraturan morfologi pada tahap kedua anodisasi mendukung hasil penelitian Pishkar et al. (2018) yang menunjukkan bahwa penggunaan template hasil anodisasi awal mampu mendistribusikan medan listrik secara lebih seragam sehingga mempercepat inisiasi pori dan menghasilkan nanotube yang lebih homogen. Proses pembentukan kompleks $[TiF_6]^{2-}$ yang diamati dalam penelitian ini juga sejalan dengan analisis Kim & Mohanty (2025), yang menekankan peran penting ion fluorida dalam mengontrol disolusi lapisan TiO_2 selama anodisasi. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat pemahaman bahwa pendekatan anodisasi dua tahap merupakan strategi efektif untuk meningkatkan kualitas morfologi TNAs.

Karakterisasi optik menggunakan UV-Vis DRS menunjukkan bahwa TNAs yang dihasilkan memiliki penyerapan dominan pada wilayah ultraviolet dengan nilai band gap sebesar 3,37 eV, yang sesuai dengan karakteristik TiO_2 fase anatase. Hasil ini sejalan dengan laporan Mollavali et al. (2021), yang menyatakan bahwa TiO_2 nanotube arrays umumnya menunjukkan respons optik terbatas pada panjang gelombang di bawah 400 nm. Nilai band gap yang relatif besar ini menunjukkan bahwa material memiliki stabilitas elektronik yang baik, namun membatasi pemanfaatan cahaya tampak untuk aplikasi fotokatalitik. Sebagaimana dilaporkan oleh Eidsvåg et al. (2021), dominasi penyerapan di wilayah UV menyebabkan efisiensi konversi energi surya menjadi terbatas karena fraksi UV dalam spektrum matahari relatif kecil. Dengan demikian, meskipun TNAs yang dihasilkan memiliki struktur yang teratur dan stabil, modifikasi lebih lanjut seperti doping atau penggabungan material semikonduktor lain diperlukan untuk meningkatkan respons optik pada wilayah visible.

Secara implikatif, penelitian ini memberikan kontribusi metodologis dalam optimasi sintesis TNAs melalui anodisasi dua tahap yang terbukti meningkatkan keteraturan morfologi dan kestabilan pertumbuhan nanotube. Pemahaman hubungan antara densitas arus dan mekanisme pertumbuhan nanotube dapat menjadi dasar dalam perancangan elektroda nanostruktur untuk aplikasi sel surya tersensitasi zat warna, fotoelektrokimia, dan fotokatalisis. Selain itu, hasil karakterisasi optik memberikan acuan penting dalam pengembangan TNAs berbasis modifikasi band gap untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi cahaya.

Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Analisis morfologi TNAs masih bersifat visual makroskopik dan belum didukung oleh karakterisasi mikroskop elektron seperti SEM atau TEM untuk mengonfirmasi ukuran diameter, panjang nanotube, dan tingkat keteraturan secara kuantitatif. Selain itu, penelitian hanya menggunakan satu variasi potensial anodisasi, sehingga pengaruh variasi tegangan terhadap sifat struktural dan optik belum dapat dievaluasi secara komprehensif. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengombinasikan karakterisasi morfologi skala nano serta mengeksplorasi variasi parameter anodisasi dan modifikasi material guna meningkatkan kinerja TNAs dalam aplikasi energi dan lingkungan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa metode anodisasi dua tahap pada potensial konstan 50 V efektif dalam mensintesis titanium dioksida nanotube arrays (TNAs) dengan pertumbuhan yang stabil dan teratur. Dinamika densitas arus selama proses anodisasi mengungkap tiga fase utama, yaitu pembentukan lapisan oksida awal, inisiasi pori akibat disolusi oleh ion fluorida, serta kondisi kesetimbangan pertumbuhan nanotube. Keberadaan template dari anodisasi tahap pertama mempercepat pembentukan pori pada tahap kedua dan meningkatkan homogenitas morfologi TNAs. Karakterisasi optik melalui UV-Vis DRS menunjukkan bahwa TNAs memiliki energi band gap sebesar 3,37 eV dengan serapan dominan pada wilayah ultraviolet, yang mengindikasikan karakteristik khas TiO_2 fase anatase.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pemahaman hubungan antara perilaku densitas arus dan mekanisme pertumbuhan TNAs pada anodisasi dua tahap, serta menegaskan efektivitas pendekatan template dalam meningkatkan keteraturan nanostruktur. Temuan ini berpotensi mendukung pengembangan elektroda berbasis TNAs

untuk aplikasi fotoelektrokimia dan fotokatalitik. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan karakterisasi morfologi skala nano menggunakan SEM atau TEM, eksplorasi variasi potensial anodisasi, serta modifikasi material melalui doping atau heterostruktur guna memperluas respons optik TNAs ke wilayah cahaya tampak dan meningkatkan kinerja aplikatifnya.

DAFTAR PUSTAKA

Eidsvåg, H., Bentouba, S., Vajeeston, P., Yohi, S., & Velauthapillai, D. (2021). TiO2 as a photocatalyst for water splitting—An experimental and theoretical review. *Molecules, 26*(6), 1687. https://doi.org/10.3390/molecules26061687

Inggarwati, E. D., Ningsih, S. K. W., Yuningrat, N. W., & Gunlazuardi, J. (2024). Synthesis and characterization of Bi2S3 deposited on TiO2 nanotubes (TiO2 NTAs) as photoanode in the tandem DSSC-PEC system for hydrogen evolution. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences, 56*(1), 30–47. https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2024.56.1.3

Kim, Y., & Mohanty, S. K. (2025). Electrochemical synthesis and morphological analysis of titanium dioxide nanostructures: Nanotubes, nanograss, and nanolace. *Advanced Engineering Materials, 27*(7). https://doi.org/10.1002/adem.202402227

Le, P. H., & Leu, J. (2018). Recent advances in TiO2 nanotube-based materials for photocatalytic applications designed by anodic oxidation. In *Titanium Dioxide - Material for a Sustainable Environment*. https://doi.org/10.5772/intechopen.77063

Mollavali, M., Rohani, S., Elahifard, M., Behjatmanesh-Ardakani, R., & Nourany, M. (2021). Band gap reduction of (Mo+N) co-doped TiO2 nanotube arrays with a significant enhancement in visible light photo-conversion: A combination of experimental and theoretical study. *International Journal of Hydrogen Energy, 46*(41), 21475–21498. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.249

Nasution, N., & Fitri, A. (2018). Sintesis Nanopartikel TiO2 Fasa Rutile dengan Metode Kopresipitasi. *Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi, 2*(2), 8.

Ningsih, S. K. W., Wibowo, R., & Gunlazuardi, J. (2023). Kinerja Fotoelektrokimia Susunan Nanotube BiOI/TiO2. *Riset, 2*.

Pasini, S. M., Valério, A., Yin, G., Wang, J., de Souza, S. M. A. G. U., Hotza, D., & de Souza, A. A. U. (2021). An overview on nanostructured TiO2–containing fibers for photocatalytic degradation of organic pollutants in wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering, 40*, 101827. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101827

Pawar, M., Sendoğdular, S. T., & Gouma, P. (2018). A brief overview of TiO2 photocatalyst for organic dye remediation: Case study of reaction mechanisms involved in Ce-TiO2 photocatalysts system. *Journal of Nanomaterials, 2018*, 5953609. https://doi.org/10.1155/2018/5953609

Pesci, F. M., Wang, G., Klug, D. R., Li, Y., & Cowan, A. J. (2013). Efficient suppression of electron–hole recombination in oxygen-deficient hydrogen-treated TiO2 nanowires for photoelectrochemical water splitting. *The Journal of Physical Chemistry C, 117*(48), 25837–25844. https://doi.org/10.1021/jp4099914

Pishkar, N., Ghoranneviss, M., Ghorannevis, Z., & Akbari, H. (2018). Study of the highly ordered TiO2 nanotubes physical properties prepared with two-step anodization. *Results in Physics, 9*, 1246–1249. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.02.009

Prayudha, H., & Suryani, O. (2024). Modified titanium oxide with metal doping as photocatalyst in photochemical water splitting. *Sains Natural: Journal of Biology and Chemistry, 14*(1), 1–12. https://doi.org/10.31938/jsn.v14i1.652

Priyadharshini, P., & Pushpanathan, K. (2023). Synthesis of Ce-doped NiFe2O4 nanoparticles and their structural, optical, and magnetic properties. *Chemical Physics Impact, 6*, 100201. https://doi.org/10.1016/j.chphi.2023.100201

Reghunath, S., Pinheiro, D., & Devi, K. S. (2021). A review of hierarchical nanostructures of TiO2: Advances and applications. *Applied Surface Science Advances, 3*, 100063. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100063

Reghunath, S., Pinheiro, D., & KR, S. D. (2021). A review of hierarchical nanostructures of TiO2: Advances and applications. *Applied Surface Science Advances, 3*, 100063. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100063

Slimani, Y., Unal, B., Almessiere, M. A., Hannachi, E., Yasin, G., Baykal, A., & Ercan, I. (2020). Role of WO3 nanoparticles in electrical and dielectric properties of BaTiO3–SrTiO3 ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 31*(10), 7786–7797. https://doi.org/10.1007/s10854-020-03317-7

Surahman, H. (2017). *Pengembangan Sel Fotoelektrokimia Menggunakan Elektroda TiO2 Nanotube Arrays Tersensitasi CdS Nanopartikel untuk Produksi Hidrogen* [Disertasi].

Zhang, Z., Hossain, M. F., & Takahashi, T. (2010). Photoelectrochemical water splitting on highly smooth and ordered TiO2 nanotube arrays for hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy, 35*(16), 8528–8535. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.032