

Pengaruh Variasi Elektrolit (NaCl dan Na₂SO₄) Untuk Meningkatkan Kinerja Komposit 5% Cu-TiO₂/BiVO₄ Dalam Fotoelektrokimia *Water Splitting*

Siti Nurhayati, Vera Pangni Vahriani*, Sarah Dampang, Muhammad Fahmi Hakim, Bunga Nurkhalifah

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jawa Barat

*Koresponden email: vera.pangni@ft.unsika.ac.id

Diterima: 12 September 2025

Disetujui: 20 September 2025

Abstract

The demand for environmentally friendly energy sources has encouraged the use of photoelectrochemical (PEC) technology to produce hydrogen from water. This study aims to evaluate the performance of a 5% Cu-TiO₂/BiVO₄ composite material. The main focus is to examine the effect of two types of neutral electrolytes, NaCl and Na₂SO₄, on the performance of a single-compartment PEC system. Based on characterization results using SEM-EDS and UV-Vis DRS, copper (Cu) doping successfully reduced the material's band gap to 2.02 eV and improved charge separation efficiency. System testing showed that the NaCl solution produced the highest initial voltage of 0.73 V and exhibited relatively stable performance, although it posed a potential risk of electrode corrosion. In contrast, Na₂SO₄ produced a lower voltage (0.66 V) but was more chemically stable and safer for long-term use. The results indicate that combining Cu-TiO₂/BiVO₄ material with appropriate electrolyte selection can be an effective strategy to improve the efficiency of PEC systems for hydrogen generation from light.

Keywords: *photoelectrochemistry, cu-tio₂/bivo₄, electrolyte nacl, na₂so₄*

Abstrak

Kebutuhan akan sumber energi ramah lingkungan mendorong pemanfaatan teknologi fotoelektrokimia (PEC) untuk memproduksi hidrogen dari air. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja material komposit 5% Cu-TiO₂/BiVO₄. Fokus utama penelitian adalah melihat pengaruh dua jenis larutan elektrolit netral, yaitu NaCl dan Na₂SO₄, terhadap performa sistem PEC satu kompartemen. Berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan SEM-EDS dan UV-Vis DRS, doping tembaga (Cu) berhasil menurunkan band gap material hingga 2,02 eV dan meningkatkan efisiensi pemisahan muatan. Pengujian sistem menunjukkan bahwa larutan NaCl mampu menghasilkan tegangan awal tertinggi sebesar 0,73 V dan menunjukkan performa cukup stabil, namun memiliki potensi menyebabkan korosi pada elektroda. Sebaliknya, Na₂SO₄ menghasilkan tegangan yang lebih rendah (0,66 V), tetapi lebih stabil secara kimia dan aman digunakan dalam jangka panjang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi material Cu-TiO₂/BiVO₄ dengan pemilihan elektrolit yang tepat dapat menjadi solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi sistem PEC dalam menghasilkan hidrogen dari cahaya.

Kata Kunci: *fotoelektrokimia, cu-tio₂/bivo₄, elektrolit nacl, na₂so₄*

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi di seluruh dunia terus menjadi perhatian, terutama karena jumlah penduduk dan aktivitas industri yang terus bertambah. Ketergantungan yang tinggi terhadap sumber energi tak terbarukan, seperti minyak bumi dan bahan bakar fosil, semakin menekan ketersediaan energi di masa depan [1], [2]. Kondisi ini membuat pencarian energi alternatif yang lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan menjadi semakin mendesak [3]. Dalam konteks ini, hidrogen muncul sebagai salah satu pilihan yang menjanjikan. Gas ini kerap disebut sebagai pembawa energi bersih karena penggunaannya hanya menghasilkan air (H₂O) tanpa menimbulkan emisi karbon dioksida (CO₂) [1], [4].

Salah satu teknologi potensial untuk menghasilkan hidrogen adalah photoelectrochemical (PEC) water splitting, yakni pemecahan air menjadi hidrogen dan oksigen dengan bantuan cahaya matahari dan fotoelektroda semikonduktor, tanpa menghasilkan emisi rumah kaca [5], [6], [7]. Proses ini pada dasarnya mengubah energi matahari langsung menjadi energi kimia dalam bentuk gas hidrogen, namun kinerjanya sangat bergantung pada jenis material semikonduktor yang digunakan. Tantangan utama PEC terletak pada efisiensi konversi yang masih rendah, umumnya di bawah 10%, akibat keterbatasan material fotoaktif,

termasuk degradasi dan fotokorosi pada fotoelektroda [8]. Oleh karena itu, pengembangan material semikonduktor dengan performa lebih baik menjadi fokus penting dalam penelitian PEC.

Titanium dioksida (TiO_2) merupakan semikonduktor yang pertama kali digunakan untuk pemisahan air secara fotoelektrokimia sejak diperkenalkan oleh Fujishima dan Honda pada tahun 1972 [9]. Material ini banyak dipelajari karena memiliki sejumlah keunggulan, antara lain kestabilan kimia yang tinggi, sifatnya yang tidak beracun, serta ketahanannya terhadap korosi [10]. Meski demikian, TiO_2 memiliki celah pita energi yang relatif lebar, sekitar 3,2 eV, sehingga hanya mampu menyerap cahaya ultraviolet yang porsinya sangat kecil dari spektrum matahari, yaitu kurang dari 4% [11].

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai strategi modifikasi dilakukan, salah satunya dengan teknik doping logam. Doping tembaga (Cu) pada TiO_2 dilaporkan mampu menurunkan band gap, memperluas penyerapan cahaya ke wilayah tampak, dan meningkatkan efisiensi pemisahan muatan [12], [13]. Dengan karakteristik ini, TiO_2 yang didoping Cu menjadi kandidat material yang lebih kompetitif dalam aplikasi fotoelektrokimia berbasis energi surya.

Selain TiO_2 , bismut vanadat (BiVO_4) juga dikenal sebagai fotokatalis yang menjanjikan. BiVO_4 memiliki celah pita lebih sempit, sekitar 2,4 eV, sehingga mampu menyerap cahaya tampak lebih luas [14], [15]. Akan tetapi, material ini masih menghadapi kendala berupa transfer muatan yang lambat dan tingkat rekombinasi elektron-hole yang cukup tinggi. Untuk mengatasinya, pembentukan struktur heterojungsi BiVO_4 dengan TiO_2 terbukti dapat meningkatkan performa fotokatalitik melalui pemisahan muatan yang lebih efisien sekaligus memperluas jumlah situs aktif reaksi [16], [17].

Penggabungan TiO_2 yang didoping Cu dengan BiVO_4 menghasilkan komposit heterojungsi Cu- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$, yang dipandang sebagai pendekatan inovatif untuk meningkatkan kinerja sistem fotoelektrokimia. Kombinasi ini tidak hanya memperluas spektrum penyerapan cahaya dan memperbaiki transfer muatan, tetapi juga menekan rekombinasi pasangan elektron-hole. Penelitian [18] telah melaporkan sintesis komposit ini, meskipun fokusnya masih pada desulfurisasi bahan bakar model. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk menyintesis dan mengkarakterisasi Cu- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$ serta menguji kinerjanya dalam fotoelektrokimia water splitting berbasis cahaya tampak, khususnya menggunakan larutan elektrolit NaCl dan Na_2SO_4 . Diharapkan, hasilnya dapat mendukung pengembangan teknologi produksi hidrogen yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

Persiapan Alat dan Bahan

Tahap awal penelitian dimulai dengan menyiapkan alat dan bahan yang berperan penting untuk menjamin hasil percobaan yang akurat dan konsisten. Semua peralatan laboratorium harus dibersihkan secara menyeluruh agar terbebas dari sisa zat atau kontaminan yang dapat memengaruhi ketelitian data. Selain itu, kalibrasi peralatan serta pemeriksaan kondisi dan kebersihan bahan juga dilakukan untuk meminimalkan potensi kesalahan, meningkatkan ketepatan pengukuran, serta memastikan keandalan dan validitas hasil penelitian.

Preparasi Anoda Cu- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$

Tahap awal pembuatan anoda dilakukan dengan sintesis Cu-doped TiO_2 . Sebanyak 2,743 g TiO_2 dilarutkan dalam 50 mL isopropanol di dalam gelas kimia 100 mL dan ditutup aluminium foil untuk mencegah penguapan. Larutan diaduk menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 150 rpm selama 45 menit, kemudian ditambahkan Tembaga (II) Asetat Monohidrat sebagai dopan dengan variasi 0% dan 10% dari massa TiO_2 . Setelah itu ditambahkan 1,4 mL monoethanolamine (MEA) sebagai penstabil, diaduk kembali selama 90 menit, lalu didiamkan semalaman. Keesokan harinya, ditambahkan 4,42 mL polyethylene glycol (PEG) untuk mengatur morfologi partikel, kemudian campuran diproses dengan dua metode, yaitu tanpa sonikasi dan dengan sonikasi menggunakan Ultrasonic Cleaner selama 10 menit. Larutan dipanaskan dalam oven pada 200 °C selama 2 jam hingga terbentuk pasta Cu- TiO_2 yang siap dilapiskan pada kaca ITO [19].

Sintesis BiVO_4 dilakukan dengan metode modifikasi dari penelitian [19] dan [20]. Campuran prekursor terdiri dari 0,1462 g NH_4VO_3 sebagai sumber vanadium, 0,6061 g $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ sebagai donor bismut, 0,4803 g asam sitrat sebagai agen pengompleks, dan 0,825 g HNO_3 sebagai pelarut tambahan. Semua bahan dilarutkan dalam 2,9 mL air deionisasi dan disonikasi selama 10 menit hingga homogen. Larutan BiVO_4 kemudian dilapiskan di atas Cu- TiO_2 melalui spin coating, dengan rotasi 300 rpm selama 5 detik dan 1000 rpm selama 10 detik. Proses ini diakhiri dengan annealing pada 250 °C, diawali dengan ramping suhu selama 1 jam hingga target dan ditahan selama 2,5 jam, sehingga diperoleh lapisan BiVO_4 yang kristalin serta melekat kuat pada substrat Cu- TiO_2 .

Tahap perakitan elektroda dilakukan dengan memasang kawat tembaga berinsulasi pada bagian kaca ITO yang tidak tertutup material aktif, berfungsi sebagai jalur penghantar listrik. Untuk mencegah kontak dengan elektrolit, bagian samping elektroda dilapisi resin epoksi sebagai isolator, sementara hanya area aktif seluas $\pm 1,25 \text{ cm}^2$ yang dibiarkan terbuka agar dapat berinteraksi langsung dengan cahaya dan larutan. Dengan pengaturan ini, anoda $\text{Cu-TiO}_2/\text{BiVO}_4$ mampu meningkatkan penyerapan cahaya tampak, mempercepat pemisahan pasangan elektron-hole, serta mendukung efisiensi proses fotoelektrokimia water splitting dalam menghasilkan hidrogen ramah lingkungan [21].

Preparasi Katoda

Pada tahap persiapan katoda, tidak dilakukan perlakuan khusus terhadap material, melainkan hanya menyiapkan lempengan tembaga (Cu) sebagai komponen utama. Lempengan ini dipotong dengan ukuran sekitar 2 cm dan ketebalan $\pm 1,5 \text{ mm}$ agar memiliki konduktivitas listrik yang baik sekaligus cukup kuat secara mekanik. Lempengan tembaga kemudian dihubungkan dengan kawat tembaga berinsulasi yang berfungsi sebagai konektor ke rangkaian listrik dalam sistem fotoelektrokimia. Meskipun sederhana dan tanpa modifikasi tambahan, katoda ini tetap berperan penting sebagai penghantar elektron yang efisien dalam proses reaksi elektrokimia.

Photoelectrochemical (PEC)

Eksperimen fotoelektrokimia (PEC) dilakukan menggunakan sel elektrolisis sederhana berbentuk persegi ($8 \times 10 \text{ cm}$) dengan kapasitas maksimum 450 mL yang terbuat dari kaca tahan bahan kimia. Penutup sel dimodifikasi dengan tiga lubang, yakni dua lubang kecil (diameter 0,5 cm) untuk kabel elektroda dan satu lubang lebih besar (diameter 1,5 cm) untuk adaptor selang gas. Desain ini memungkinkan sistem tetap stabil serta mencegah kebocoran gas selama proses berlangsung.

Sistem elektroda terdiri atas anoda $\text{Cu-TiO}_2/\text{BiVO}_4$ yang dilapisi pada substrat kaca ITO dan katoda berupa pelat tembaga. Keduanya dihubungkan dengan kawat tembaga berinsulasi melalui lubang penutup sel, lalu disegel rapat menggunakan isolasi agar tidak bocor. Jarak elektroda diposisikan sekitar 5 cm dari penutup untuk menjaga kestabilan sistem. Sel elektrokimia diisi dengan larutan elektrolit netral (pH 7) sebanyak 400 mL, yang dibuat dari air deionisasi dengan penambahan NaCl atau Na_2SO_4 0,5 M. Perhitungan massa garam dilakukan dengan rumus dasar molaritas, sehingga diperoleh kebutuhan NaCl sebesar 11,7 g dan Na_2SO_4 sebesar 21,2 g untuk volume larutan 400 mL.

Proses PEC dijalankan dengan penyinaran menggunakan lampu UV 100 Watt selama dua jam. Saat anoda $\text{Cu-TiO}_2/\text{BiVO}_4$ menyerap cahaya, elektron tereksitasi dari pita valensi menuju pita konduksi sehingga terbentuk pasangan elektron-hole. Elektron yang tereksitasi bergerak melalui rangkaian eksternal menuju katoda, sementara hole pada anoda mengoksidasi molekul air menghasilkan ion H^+ dan gas oksigen (O_2). Di sisi lain, elektron yang mencapai katoda mereduksi ion H^+ menjadi gas hidrogen (H_2). Gas hidrogen inilah yang dikumpulkan sebagai produk utama, menandakan keberhasilan material $\text{Cu-TiO}_2/\text{BiVO}_4$ dalam mengonversi energi cahaya menjadi energi kimia secara efisien melalui proses pemisahan air secara fotokatalitik [21].

Analisis karakterisasi Morfologi

Karakterisasi SEM-EDS digunakan untuk mengamati morfologi, bentuk, distribusi partikel, dan kandungan unsur kimia sampel. Elektron berenergi tinggi ditembakkan ke permukaan sampel, membentuk citra resolusi tinggi. EDS memungkinkan analisis kualitatif dan kuantitatif unsur. Pengukuran dilakukan di Polman Bandung menggunakan Hitachi SU-3500.

Analisis Energi Band Gap

UV-Vis Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS) digunakan untuk mengevaluasi penyerapan cahaya material dan menentukan energi celah pita (band gap) semikonduktor fotokatalitik. Sampel disinari cahaya UV-vis, dan intensitas pantulan difus diukur untuk memperoleh spektrum reflektansi (%R). Data reflektansi diubah menjadi faktor Kubelka-Munk:

$$\frac{F}{R} = \frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R}$$

Dengan K = koefisien absorpsi, S = koefisien scattering, dan R = reflektansi. Nilai F dianalisis terhadap energi foton ($h\nu/h\nu_0$) menggunakan persamaan Tauc:

$$\frac{F}{R} = A (hv - E_g)^{m/2}$$

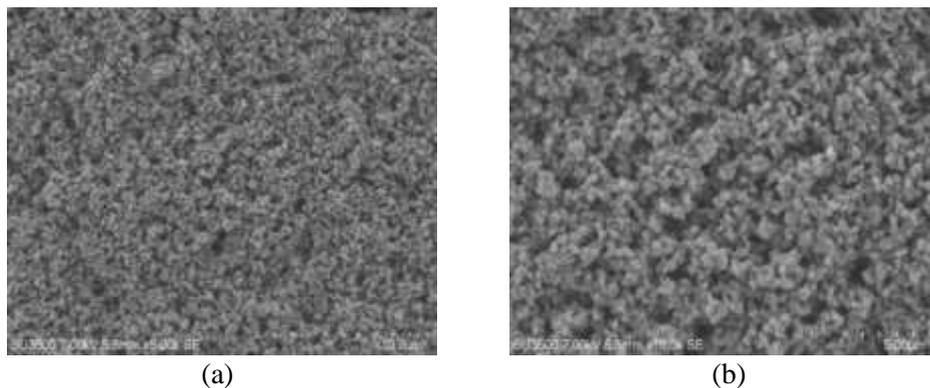
Di mana A = konstanta proporsional, E_g = energi celah pita, dan $m = 1$ untuk transisi langsung yang diperbolehkan. Band gap ditentukan dari ekstrapolasi plot linier $F/(R)$ terhadap hv pada $F(R) = 0$. Teknik ini digunakan untuk material TiO_2 , $Cu-TiO_2$, dan $Cu-TiO_2/BiVO_4$.

3. Hasil & Pembahasan

Penelitian ini berfokus pada pembuatan material Cu -doped $TiO_2/BiVO_4$ sebagai anoda untuk sistem fotoelektrokimia. Karakterisasi awal dilakukan menggunakan SEM-EDS dan UV-Vis DRS untuk menilai morfologi, komposisi unsur, serta sifat optik material. Analisis SEM-EDS menunjukkan bahwa permukaan material memiliki morfologi partikel yang merata dengan distribusi unsur Ti, O, Cu, Bi, dan V sesuai komposisi yang diharapkan. Sementara itu, hasil UV-Vis DRS memperlihatkan bahwa material $Cu-TiO_2/BiVO_4$ mengalami pergeseran serapan cahaya dari daerah UV menuju cahaya tampak, dengan nilai band gap lebih rendah dibanding TiO_2 murni. Temuan ini menegaskan bahwa penambahan Cu dan pembentukan heterojungsi dengan $BiVO_4$ meningkatkan kemampuan material dalam menyerap cahaya serta mendukung potensi aplikasi fotokatalitiknya.

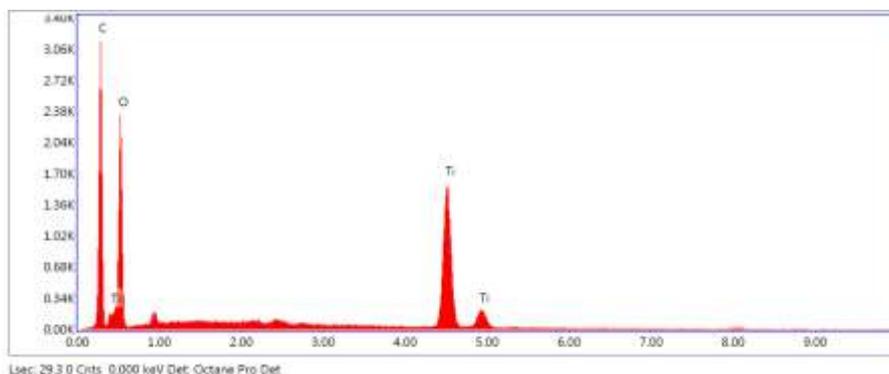
Morfologi dan Variasi Konsentrasi $Cu-TiO_2/BiVO_4$

Hasil karakterisasi SEM pada TiO_2 murni dengan perbesaran $5.000\times$ dan $10.000\times$ pada **Gambar 1** memperlihatkan partikel berbentuk sferis dengan kecenderungan membentuk aglomerat. Hal ini menunjukkan adanya interaksi antarpartikel yang menyebabkan penggumpalan menjadi struktur lebih besar. Ukuran partikel yang diperoleh berada pada kisaran $0,022-0,152 \mu m$, sesuai dengan temuan penelitian sebelumnya yang juga melaporkan bentuk bulat dan permukaan agak kasar.



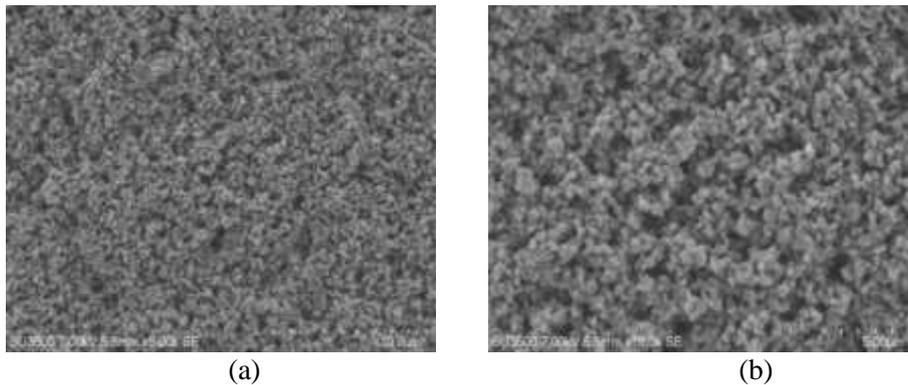
Gambar 1. Hasil SEM EDS TiO_2 Murni: Perbesaran 5000x, dan 10000x

Analisis EDS terhadap TiO_2 murni memperlihatkan puncak intensitas utama pada unsur titanium dan oksigen, yang menegaskan kemurnian material. Hanya terdeteksi puncak kecil karbon, kemungkinan berasal dari lapisan sampel.



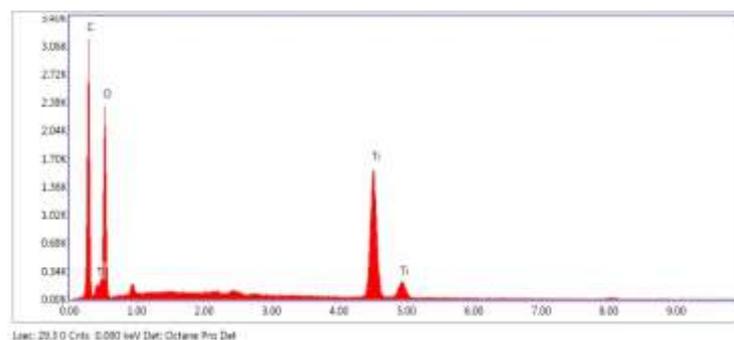
Gambar 2. Spektrum EDS TiO_2 Murni

Spektrum EDS TiO₂ murni pada **Gambar 3** menunjukkan puncak utama pada 4,5 keV (Ti) dan 0,53 keV (O), menegaskan kemurnian material tanpa adanya logam lain. Puncak kecil di 0,28 keV diduga berasal dari kontaminan karbon akibat pelapisan sampel.



Gambar 3. Hasil SEM EDS Komposit 5% Cu–TiO₂/BiVO₄: Perbesaran 5000x, dan 10000x

Sementara itu, hasil SEM pada sampel 5% Cu–TiO₂/BiVO₄ memperlihatkan morfologi yang lebih kasar dan tidak teratur, dengan ukuran partikel dalam rentang 0,015–0,185 μm. Aglomerasi terlihat lebih besar dibandingkan TiO₂ murni, menandakan bahwa doping Cu berpengaruh pada pertumbuhan partikel sekaligus pembentukan struktur heterojungsi.



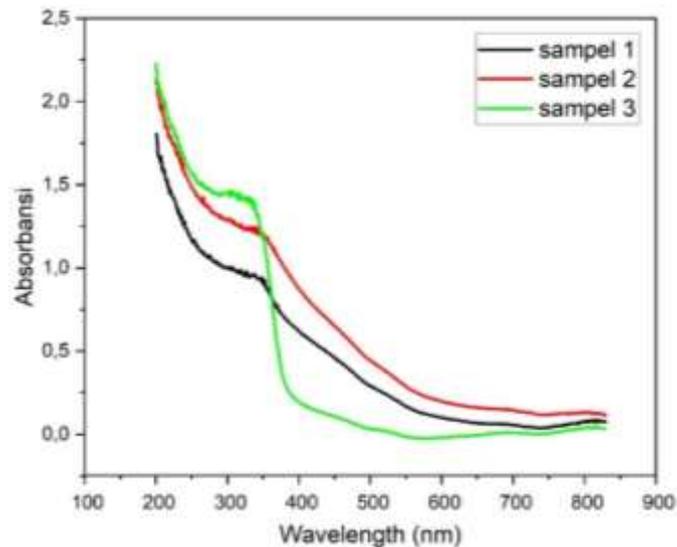
Gambar 4. Spektrum EDS TiO₂ Murni

Spektrum EDS pada sampel 5% Cu–TiO₂/BiVO₄ di **Gambar 4** menunjukkan adanya unsur Ti, O, Cu, Bi, dan V. Titanium dan oksigen masih mendominasi, sedangkan keberadaan Cu, Bi, dan V mengonfirmasi terbentuknya komposit. Intensitas sinyal Cu yang lemah diperkirakan karena konsentrasinya rendah atau tersebar merata dalam matriks TiO₂. Hasil ini menegaskan bahwa proses sintesis berhasil membentuk material heterojungsi yang potensial untuk aplikasi fotoelektrokimia.

Analisis Sifat Optik dan Energi Band Gap

Hasil karakterisasi UV-Vis DRS pada Gambar 5 memperlihatkan perbedaan perilaku optik pada setiap sampel. TiO₂ murni hanya aktif pada wilayah UV dengan serapan di bawah 400 nm karena band gap yang relatif besar (~3,2 eV). Setelah dimodifikasi dengan doping Cu 5% dan dikombinasikan dengan BiVO₄, terutama dengan bantuan sonikasi, batas serapan bergeser hingga mencapai 600 nm. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi doping, pembentukan heterojungsi, dan sonikasi mampu menurunkan band gap sekaligus memperluas penyerapan ke wilayah cahaya tampak. Sebaliknya, sampel tanpa sonikasi menunjukkan serapan paling rendah akibat aglomerasi partikel dan distribusi yang tidak merata, sehingga kontak antar semikonduktor kurang optimal.

Analisis band gap mendukung hasil tersebut. Nilai band gap TiO₂ murni tercatat sebesar 2,97 eV, menurun menjadi 2,81 eV pada komposit tanpa sonikasi, dan semakin rendah pada komposit sonikasi dengan nilai 2,50 eV. Penurunan ini menegaskan peran sonikasi dalam memperbaiki dispersi dopan Cu dan homogenitas partikel, sehingga meningkatkan kualitas struktur heterojungsi.



Gambar 5. Spektrum UV-Vis DRS Tiap sampel

Selain itu, uji efisiensi pemisahan muatan menunjukkan bahwa komposit hasil sonikasi lebih efektif dalam memisahkan elektron dan hole berkat terbentuknya heterojungsi tipe II. Konfigurasi ini memfasilitasi transfer elektron dari BiVO_4 ke TiO_2 sekaligus menjaga hole tetap berada di pita valensi BiVO_4 , sehingga rekombinasi dapat ditekan. Proses sonikasi juga membantu menciptakan jalur migrasi muatan yang lebih merata, membuat material lebih efisien dalam memanfaatkan cahaya tampak dan mendukung reaksi redoks pada sistem fotoelektrokimia.

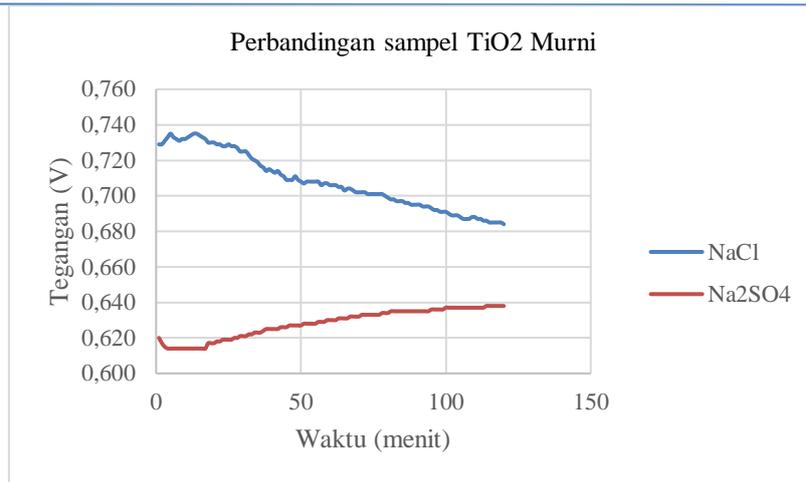
Uji Kinerja Fotokatalisis

Pengujian fotoelektrokimia dilakukan menggunakan fotoanoda berbasis kaca ITO yang dilapisi $\text{Cu-TiO}_2/\text{BiVO}_4$. Struktur heterojungsi tipe II terbentuk dengan Cu-TiO_2 sebagai penyerap utama dan BiVO_4 sebagai lapisan permukaan, yang berfungsi memisahkan elektron dan hole pada material berbeda sehingga mengurangi rekombinasi. Saat terkena cahaya UV-Vis, BiVO_4 menghasilkan pasangan elektron-hole. Elektron bergerak menuju pita konduksi Cu-TiO_2 lalu dialirkan ke elektroda ITO dan katoda, sementara hole bereaksi dengan air di anoda untuk menghasilkan oksigen. Evolusi gas hidrogen di katoda mengonfirmasi berlangsungnya reaksi reduksi.

Tabel 1. Perbandingan pengaruh kedua elektrolit terhadap sistem PEC

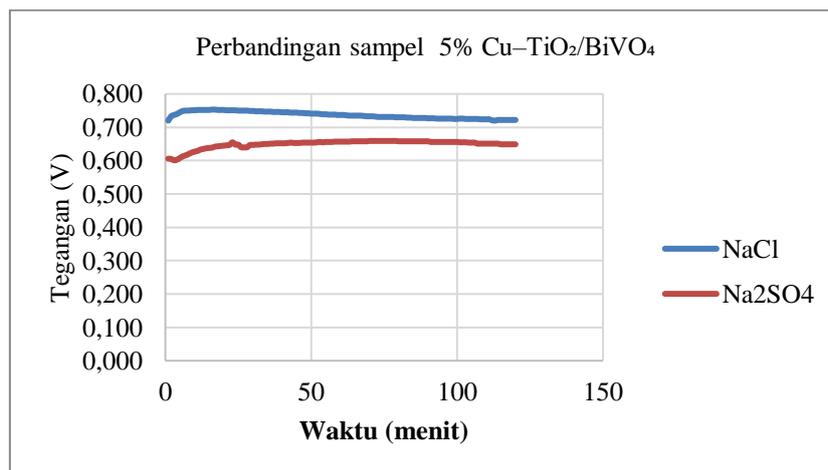
Elektrolit	NaCl	Na ₂ SO ₄
Konsentrasi	0,5 M	0,5 M
Tegangan Relatif	Relatif	Rendah
Stabilitas Arus	Stabil	Fluktuatif
Efisiensi Evolusi Gas	Tinggi	Sedang
Mobilitas Ion	Tinggi (Cl^-)	Rendah (SO_4^{2-})

Sistem diuji dalam larutan NaCl dan Na₂SO₄. Pada NaCl 0,5 M, kinerja sangat baik dengan tegangan tinggi dan stabil karena mobilitas ion Cl^- yang cepat. Meskipun berpotensi teroksidasi, reaksi utama tetap oksidasi air menjadi oksigen. Sebaliknya, Na₂SO₄ 0,5 M menghasilkan tegangan lebih rendah dan fluktuatif akibat mobilitas ion yang lambat, meskipun peningkatan konsentrasi hingga 1 M sedikit memperbaiki konduktivitas. Perbandingan pada **Tabel 1** tersebut menegaskan bahwa NaCl lebih unggul dalam mendukung transfer muatan dan evolusi gas.

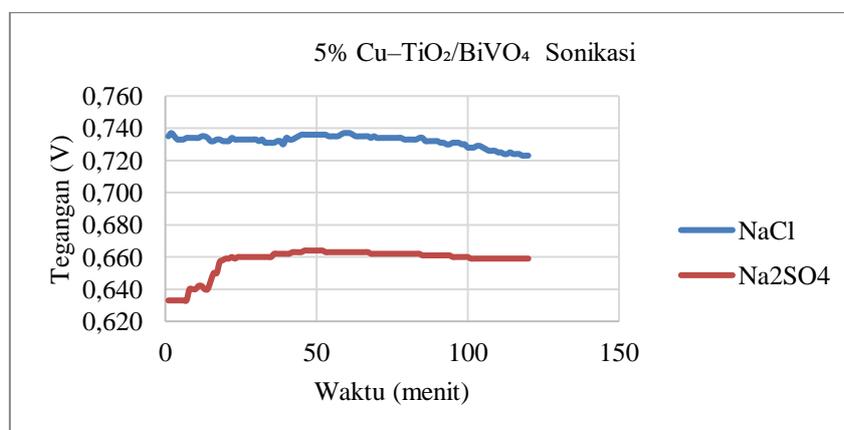


Gambar 6. Grafik tegangan pada sampel TiO₂ murni

Uji produksi listrik memperlihatkan bahwa komposit Cu–TiO₂/BiVO₄ pada Gambar 6 dengan perlakuan sonikasi menghasilkan tegangan paling stabil baik di NaCl maupun Na₂SO₄. Dalam NaCl 0,5 M, sampel sonikasi mampu mempertahankan tegangan sekitar 0,71 V selama 120 menit, jauh lebih stabil dibandingkan sampel tanpa sonikasi yang turun drastis hingga 0,42 V. TiO₂ murni mencatat tegangan cukup stabil di sekitar 0,65–0,68 V. Hasil ini menunjukkan bahwa sonikasi berperan penting dalam mendistribusikan dopan Cu secara merata serta memperkuat integrasi heterojungsi.



Gambar 7. Grafik Tegangan pada Sampel 5% Cu–TiO₂/BiVO₄ Sonikasi



Gambar 8. Grafik Tegangan pada Sampel 5% Cu–TiO₂/BiVO₄ Sonikasi

Pengujian dalam Na₂SO₄ 0,5 M menunjukkan pola serupa, meskipun nilai tegangan keseluruhan lebih rendah dibanding NaCl. Komposit dengan sonikasi tetap unggul dengan tegangan stabil sekitar 0,61 V, sementara tanpa sonikasi kembali menurun signifikan. TiO₂ murni menunjukkan kestabilan lebih baik

dibanding komposit tanpa sonikasi. Rendahnya kinerja Na_2SO_4 disebabkan oleh mobilitas ion yang lebih lambat dan terbentuknya lapisan difusi tebal di permukaan elektroda. Namun, Na_2SO_4 memiliki keunggulan dalam kestabilan kimia sehingga lebih sesuai untuk aplikasi jangka panjang.

Secara keseluruhan, kombinasi $\text{Cu-TiO}_2/\text{BiVO}_4$ yang disonikasi dengan elektrolit NaCl terbukti menjadi konfigurasi paling optimal. Sistem ini mampu menghasilkan tegangan stabil, efisiensi pemisahan muatan tinggi, serta evolusi gas hidrogen yang signifikan, sehingga menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi pemisahan air berbasis cahaya tampak.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini, modifikasi TiO_2 dengan doping Cu 5% dan integrasi dengan BiVO_4 berhasil menurunkan band gap dari 2,97 eV menjadi 2,02 eV, meningkatkan serapan cahaya tampak serta efisiensi pemisahan muatan melalui pembentukan heterojungsi. Perlakuan sonikasi menghasilkan partikel lebih homogen dengan distribusi dopan merata, yang memperkuat sifat optik dan kestabilan sistem. Uji PEC menunjukkan evolusi gas hidrogen yang nyata, dengan elektrolit Na_2SO_4 memberikan kinerja lebih stabil dibanding NaCl karena sifatnya yang lebih inert, sehingga sistem lebih tahan terhadap degradasi dan berpotensi optimal untuk produksi hidrogen berbasis cahaya tampak.

5. Singkatan

$F/(R)$	Faktor Kubelka-Munk
K	Koefisien Absorpsi
S	Koefisien Scattering
R	Nilai Reflektan yang Diukur
A	Konstanta Proporsional
E_g	Energi Gap (Energi Celah)
m	1 (transisi langsung yang diperbolehkan)

6. Referensi

- [1] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review," *Mater Sci Energy Technol*, vol. 2, no. 3, pp. 442–454, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.MSET.2019.03.002.
- [2] B. Anandha Priya, T. Sivakumar, and P. Venkateswari, "Construction of MoS_2 nanoparticles incorporated TiO_2 nanosheets heterojunction photocatalyst for enhanced visible light driven hydrogen production," *Inorg Chem Commun*, vol. 136, p. 109118, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.INOCHE.2021.109118.
- [3] V. Shankar, S. P. Dharani, A. Ravi, and A. SaravanaVadivu, "A concise review: MXene-based photo catalytic and photo electrochemical water splitting reactions for the production of hydrogen," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 57, pp. 21654–21673, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.031.
- [4] S. Yun, J. Lee, H. Cho, and J. Kim, "Oxy-fuel combustion-based blue hydrogen production with the integration of water electrolysis," *Energy Convers Manag*, vol. 291, p. 117275, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2023.117275.
- [5] T. Kawawaki, Y. Kataoka, S. Ozaki, M. Kawachi, M. Hirata, and Y. Negishi, "Creation of active water-splitting photocatalysts by controlling cocatalysts using atomically precise metal nanoclusters," *Chemical Communications*, vol. 57, no. 4, pp. 417–440, Jan. 2021, doi: 10.1039/d0cc06809h.
- [6] S. Guo, X. Li, J. Li, and B. Wei, "Boosting photocatalytic hydrogen production from water by photothermally induced biphasic systems," *Nat Commun*, vol. 12, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-21526-4.
- [7] Y. Wang, W. Wang, J. Fu, Y. Liang, L. Yao, and T. Zhu, "Integrating the plasmonic sensitizer and electron relay into $\text{ZnO}/\text{Au}/\text{CdS}$ sandwich nanotube array photoanode for efficient solar-to-hydrogen conversion with 3.2% efficiency," *Renew Energy*, vol. 168, pp. 647–658, May 2021, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.12.076.
- [8] W. Nabgan *et al.*, "A bibliometric examination and state-of-the-art overview of hydrogen generation from photoelectrochemical water splitting," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 358–380, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.05.162.

- [9] A. Fujishima and K. Honda, "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode," *Nature*, vol. 238, no. 5358, pp. 37–38, 1972, doi: 10.1038/238037a0.
- [10] N. Madkhali *et al.*, "Recent update on photocatalytic degradation of pollutants in waste water using TiO₂-based heterostructured materials," *Results in Engineering*, vol. 17, p. 100920, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.100920.
- [11] R. R. Ikreedeegh and M. Tahir, "Ternary nanocomposite of NH₂-MIL-125(Ti) MOF-modified TiO₂ nanotube arrays (TNTs) with GO electron mediator for enhanced photocatalytic conversion of CO₂ to solar fuels under visible light," *J Alloys Compd*, vol. 969, p. 172465, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2023.172465.
- [12] L. Tian, Z. Li, X. Xu, and C. Zhang, "Advances in noble metal (Ru, Rh, and Ir) doping for boosting water splitting electrocatalysis," *J. Mater. Chem. A*, vol. 9, no. 23, pp. 13459–13470, 2021, doi: 10.1039/D1TA01108A.
- [13] H. Yang *et al.*, "Reducing ROS generation and accelerating the photocatalytic degradation rate of PPCPs at neutral pH by doping Fe-N-C to g-C₃N₄," *Appl Catal B*, vol. 301, p. 120790, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.APCATB.2021.120790.
- [14] S.-H. Chen, Y.-S. Jiang, and H. Lin, "Easy Synthesis of BiVO₄ for Photocatalytic Overall Water Splitting," *ACS Omega*, vol. 5, no. 15, pp. 8927–8933, Apr. 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c00699.
- [15] T. D. Nguyen *et al.*, "BiVO₄ photocatalysis design and applications to oxygen production and degradation of organic compounds: a review," *Environ Chem Lett*, vol. 18, no. 6, pp. 1779–1801, 2020, doi: 10.1007/s10311-020-01039-0.
- [16] Y. R. Lv, C. J. Liu, R. K. He, X. Li, and Y. H. Xu, "BiVO₄/TiO₂ heterojunction with enhanced photocatalytic activities and photoelectrochemistry performances under visible light illumination," *Mater Res Bull*, vol. 117, pp. 35–40, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.MATERRESBULL.2019.04.032.
- [17] K. Hu *et al.*, "Photocatalytic Degradation Mechanism of the Visible-Light Responsive BiVO₄/TiO₂ Core–Shell Heterojunction Photocatalyst," *J Inorg Organomet Polym Mater*, vol. 30, no. 3, pp. 775–788, 2020, doi: 10.1007/s10904-019-01217-w.
- [18] P. Jabbari, A. Najafi Chermahini, R. Luque, A. Pineda, and E. R. Castellón, "Synthesis of Cu-doped TiO₂ modified BiVO₄ for photocatalytic oxidative desulfurization (PODS) of a model fuel," *J Photochem Photobiol A Chem*, vol. 452, p. 115625, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.JPHOTOCHEM.2024.115625.
- [19] K. R. Davies *et al.*, "Solar light-driven simultaneous pharmaceutical pollutant degradation and green hydrogen production using a mesoporous nanoscale WO₃/BiVO₄ heterostructure photoanode," *J Environ Chem Eng*, vol. 11, no. 3, p. 110256, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JECE.2023.110256.
- [20] J. Choi *et al.*, "WO₃/W:BiVO₄/BiVO₄ graded photoabsorber electrode for enhanced photoelectrocatalytic solar light driven water oxidation," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 19, no. 6, pp. 4648–4655, 2017, doi: 10.1039/C6CP08199A.
- [21] E. Moretti, E. Cattaruzza, C. Flora, A. Talon, E. Casini, and A. Vomiero, "Photocatalytic performance of Cu-doped titania thin films under UV light irradiation," *Appl Surf Sci*, vol. 553, p. 149535, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.APSUSC.2021.149535.