

Terbit online pada laman: <https://ejurnal.umri.ac.id/index.php/JST>

Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Literature Review

Studi Literatur: Perkembangan Material Elektrokatalis Sebagai Elektroda Untuk Produksi Hidrogen Melalui *Water Splitting*

Roida Nabila*, Viona Aulia Rahmi, Dini Aulia Sari Ermal

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Riau, Jl. Tuanku Tambusai, Kota Pekanbaru, 28294, Indonesia.

INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 30 Mei 2026
 Diterima : 25 Juni 2026
 Diterbitkan : 30 Juni 2026

KATA KUNCI

BiVO₄, CuO/ZnO, hidrogen, NiFe₂O₄, Pemecah air, TiO₂

KORESPONDENSI

*E-mail: roidanabila@umri.ac.id

A B S T R A K

Produksi hidrogen melalui water splitting menjadi salah satu teknologi yang menjanjikan dalam mendukung transisi menuju energi bersih karena mampu menghasilkan green hydrogen dengan emisi karbon yang rendah. Kinerja proses tersebut dipengaruhi oleh karakteristik material elektrokatalis yang digunakan sebagai elektroda, sehingga pengembangan material dengan aktivitas elektrokatalitik yang tinggi, stabilitas yang baik, dan efisiensi transfer muatan yang optimal terus menjadi fokus penelitian. Metodologi studi literatur dengan menganalisis dan mengkaji berbagai publikasi ilmiah mengenai perkembangan material elektrokatalis berbasis semikonduktor dan oksida logam, meliputi BiVO₄, TiO₂, CuO/ZnO, dan NiFe₂O₄, untuk aplikasi produksi hidrogen melalui pemecah air (water splitting). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa setiap material memiliki mekanisme peningkatan performa yang berbeda, seperti kemampuan absorpsi cahaya tampak, stabilitas kimia, pembentukan heterojunction tipe-p/n, dan mekanisme redoks pada struktur spinel. Dalam strategi rekayasa morfologi, pembentukan heterostruktur, optimasi struktur elektronik, dan rekayasa antarmuka mampu meningkatkan densitas arus, menurunkan overpotensial, serta mempercepat transfer muatan pada reaksi Hydrogen Evolution Reaction (HER) dan Oxygen Evolution Reaction (OER). Integrasi berbagai strategi rekayasa material menjadi pendekatan yang prospektif dalam pengembangan elektrokatalis yang efisien, stabil, dan berkelanjutan untuk mendukung produksi green hydrogen di masa depan.

A B S T R A C T

Hydrogen production by water splitting is one of the most effective technologies for supporting the transition to clean energy, as it can produce green hydrogen with low carbon emissions. The performance of this process is influenced by the characteristics of the electrocatalytic materials used as electrodes. Therefore, the development of materials with high electrocatalytic activity, good stability, and optimal charge transfer efficiency remains a key focus of research. A literature review methodology involving the analysis and investigate of various scientific publications on the development of semiconductor- and metal oxide-based electrocatalysts, including BiVO₄, TiO₂, CuO/ZnO, and NiFe₂O₄, for hydrogen production via water splitting. A variety of research indicate that each material exhibits distinct mechanisms for performance enhancement, such as visible light absorption capability, chemical stability, the formation of p/n-type heterojunctions, and redox mechanisms within spinel structures. In morphological engineering strategies, the formation of heterostructures, optimization of electronic structures, and interface engineering can increase current density, reduce overpotential, and accelerate charge transfer in the Hydrogen Evolution Reaction (HER) and Oxygen Evolution Reaction (OER). The integration of various material engineering strategies represents a promising approach in the development of efficient, stable, and sustainable electrocatalysts to support future green hydrogen production.

1. PENDAHULUAN

Pada tahun 2023, sekitar 80% kebutuhan energi global masih didominasi oleh bahan bakar fosil, sementara *World Energy Outlook* (WEO) 2024 memproyeksikan bahwa permintaan minyak, gas alam, dan batubara akan mencapai puncaknya pada tahun 2030 [1]. Ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar fosil menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca yang diperkirakan mencapai 714 juta ton CO₂ pada tahun 2030, sehingga mempercepat terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim [2]. Kondisi tersebut mendorong pengembangan sumber energi yang bersih, aman, dan berkelanjutan sebagai bagian dari upaya mencapai target *net-zero emission*. *International Energy Agency* (IEA) mengidentifikasi tujuh teknologi energi bersih utama, yaitu tenaga surya fotovoltaik, energi angin, energi nuklir, kendaraan listrik, pompa panas (*heat pump*), hidrogen, serta teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (*Carbon Capture and Storage/CCS*), yang diproyeksikan mampu berkontribusi terhadap sekitar tiga perempat pengurangan emisi CO₂ hingga tahun 2050 pada skenario *Announced Pledges Scenario* (APS) dan *Net Zero Emissions* (NZE) [1], [3]. Di antara berbagai teknologi tersebut, hidrogen hijau (*green hydrogen*) menjadi salah satu alternatif yang paling menjanjikan karena memiliki densitas energi yang tinggi dan hanya menghasilkan air sebagai produk samping, sehingga berpotensi mendukung transisi menuju sistem energi rendah karbon [4], [5].

Hidrogen merupakan salah satu pembawa energi yang berpotensi mendukung sistem energi berkelanjutan. Hidrogen dapat diproduksi melalui berbagai metode, seperti *steam reforming*, gasifikasi biomassa, termolisis, fotolisis, dan elektrolisis air (*water splitting*) [5], [6]. Diantara berbagai metode tersebut, elektrolisis air berbasis sumber energi terbarukan semakin mendapat perhatian karena mampu menghasilkan *green hydrogen* dengan kemurnian tinggi, jejak karbon yang rendah, serta telah berkembang menjadi teknologi yang matang untuk mendukung dekarbonisasi sektor energi dan industri [7], [8], [9]. Meskipun demikian, penerapan elektrolisis air masih menghadapi tantangan berupa tingginya biaya investasi dan konsumsi energi listrik yang memengaruhi ekonomis proses dibandingkan dengan metode *steam reforming* konvensional. Oleh karena itu, berbagai strategi terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi produksi hidrogen, salah satunya melalui teknologi *photoelectrochemical water splitting* (PEC), yaitu proses yang memanfaatkan material semikonduktor untuk mengonversi energi matahari secara langsung menjadi energi kimia dalam bentuk hidrogen [9], [10], [11].

Dalam proses elektrolisis air untuk produksi hidrogen diperlukan dua elektroda, yaitu anoda dan katoda sebagai tempat berlangsungnya reaksi elektrokimia oksidasi dan reduksi. Pada anoda terjadi proses *Oxygen Evolution Reaction* (OER) dan menghasilkan gas oksigen, sedangkan katoda terjadi proses *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dan menghasilkan gas hidrogen. Oleh karena itu, kinerja proses elektrolisis sangat dipengaruhi oleh sifat karakteristik material elektroda yang digunakan. Material elektroda harus memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, aktivitas elektrokatalitik yang baik, stabilitas kimia yang tinggi, serta ketahanan terhadap korosi pada lingkungan elektrolit yang bersifat asam maupun basa [8]. Pada sistem *photoelectrochemical water splitting* (PEC), elektroda umumnya menggunakan material semikonduktor yang mampu menyerap energi cahaya dan menghasilkan pasangan elektron-hole untuk menghasilkan reaksi redoks. Material semikonduktor yang baik harus memiliki celah pita (*band gap*) yang sesuai untuk mengoptimalkan penyerapan spektrum cahaya. Dalam sistem PEC cell, memanfaatkan semikonduktor tipe-n sebagai anoda untuk mendorong reaksi OER dan semikonduktor tipe-p sebagai katoda untuk mempercepat reaksi HER, sehingga kombinasi keduanya dapat meningkatkan efisiensi konversi energi matahari menjadi hidrogen [12], [13].

Berbagai material semikonduktor dan oksida logam telah banyak dikembangkan sebagai kandidat elektroda untuk meningkatkan efisiensi proses *water splitting*, di antaranya TiO₂, BiVO₄, CuO/ZnO, dan NiFe₂O₄ yang memiliki karakteristik elektronik dan mekanisme transfer muatan yang berbeda dalam mendukung reaksi *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dan *Oxygen Evolution Reaction* (OER) [3], [9], [10], [12]. Meskipun demikian, setiap material masih memiliki keterbatasan, seperti aktivitas katalitik yang belum optimal, rekombinasi pasangan elektron-hole yang tinggi, serta stabilitas yang menurun selama proses elektrolisis, sehingga berbagai strategi modifikasi dan pembentukan heterostruktur terus dikembangkan untuk meningkatkan performanya. Oleh karena itu, artikel tinjauan ini bertujuan untuk mengkaji dan membandingkan perkembangan material elektrokatalis berbasis semikonduktor dan oksida logam sebagai elektroda produksi hidrogen melalui *water splitting* berdasarkan pada karakteristik, keunggulan, keterbatasan, aktivitas HER/OER yang meliputi densitas arus atau overpotensial, serta pengembangan modifikasi elektroda dalam mendukung teknologi produksi hidrogen yang efisien dan berkelanjutan.

2. METODOLOGI

Artikel ini disusun menggunakan metode studi literatur dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai publikasi ilmiah yang membahas perkembangan material elektrokatalis untuk produksi hidrogen melalui *water splitting*. Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ilmiah bereputasi, meliputi ScienceDirect, Scopus, MDPI, Wiley Online Library, dan Google Scholar menggunakan kata kunci “*water splitting*”, “hidrogen”, “elektrokatalis”, “*PEC cell*”, “ BiVO_4 ”, “ TiO_2 ”, “ CuO/ZnO ”, dan “ NiFe_2O_4 ”. Referensi jurnal yang digunakan diprioritaskan publikasi berbahasa Inggris dan Indonesia dengan rentang tahun 2020–2025, serta membahas karakteristik material, morfologi, metode sintesis, aktivitas performa elektrokimia *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dan *Oxygen Evolution Reaction* (OER) yang meliputi densitas arus atau overpotensial sesuai yang dilampirkan pada jurnal. Sebanyak 15 jurnal penelitian utama digunakan sebagai dasar analisis komparatif dan penyusunan tabel performa material, sedangkan referensi lainnya digunakan sebagai pendukung konsep dasar, mekanisme reaksi, serta perkembangan teknologi *water splitting*. Studi literatur dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk mengidentifikasi keunggulan, keterbatasan, serta pengembangan material elektrokatalis berbasis semikonduktor dan oksida logam dalam produksi *green hydrogen* melalui performa elektrokimia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 MATERIAL TITANIUM DIOKSIDA (TiO_2)

Titanium Dioksida (TiO_2) merupakan salah satu material semikonduktor tipe-n yang digunakan sebagai fotoanoda pada sistem *photoelectrochemical* (PEC) *water splitting* karena memiliki stabilitas kimia yang tinggi, toksisitas rendah, ketahanan terhadap fotokorosi, efisiensi tinggi, dan biaya rendah [14]. Titanium dioksida (TiO_2) tersusun atas tiga fase kristal utama, yaitu anatase, rutile, dan brookite. Fase anatase diketahui memiliki aktivitas fotokatalitik yang lebih unggul sehingga menjadi struktur kristal yang paling banyak dimanfaatkan dalam pengembangan material fotoanoda untuk aplikasi *photoelectrochemical water splitting* [15]. TiO_2 memiliki nilai *bandgap* sekitar 3,0–3,2 eV yang memungkinkan terbentuknya pasangan elektron–hole (*electron–hole pairs*) ketika terpapar energi cahaya yang sesuai. Pasangan muatan tersebut berperan sebagai pembawa muatan utama dalam reaksi oksidasi dan reduksi selama proses

photoelectrochemical water splitting untuk menghasilkan hidrogen.

Salah satu keterbatasan utama TiO_2 sebagai material elektroda pada proses *water splitting* adalah nilai *bandgap* yang relatif lebar, sehingga TiO_2 hanya mampu menyerap radiasi ultraviolet yang mencakup sekitar 7% dari spektrum matahari. Kondisi tersebut membatasi pemanfaatan cahaya tampak dan menurunkan efisiensi konversi energi surya menjadi hidrogen [15], [16]. Dalam mengatasi keterbatasan tersebut, upaya peningkatan performa telah dikembangkan, meliputi *metal doping*, *non-metal doping*, *defect engineering*, pembentukan *heterojunction*, serta penambahan ko-katalis. Pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan penyerapan cahaya tampak, meningkatkan pemisahan pasangan elektron–hole, dan mempercepat transfer muatan pada antarmuka elektroda–elektrolit, sehingga TiO_2 menjadi salah satu material fotoanoda yang paling banyak dikembangkan untuk aplikasi *photoelectrochemical water splitting* dalam produksi *green hydrogen* [17], [18].

Morfologi TiO_2 berperan penting dalam menentukan aktivitas fotoelektrokatalitik pada proses *water splitting* karena memengaruhi luas permukaan aktif, transfer muatan, serta efisiensi reaksi *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dan *Oxygen Evolution Reaction* (OER). Di antara berbagai struktur nano yang telah dikembangkan, morfologi nanosheet menunjukkan performa fotoelektrokimia yang lebih baik dibandingkan nanowire karena memiliki luas permukaan aktif yang lebih besar serta jalur transfer muatan yang lebih pendek, sehingga berpotensi meningkatkan kinerja *photoelectrochemical water splitting* [19].

Tabel 1.

Pengembangan performa elektroda dari berbagai material berbasis TiO_2

Material	Performa	Morfologi	Parameter	
			Elektrokimia	Ref
SnO_2 / TiO_2	HER	BST (Brookite)	-0,62 V vs Ag/AgCl	[20]
TiO_2	HER	Nanosheets	-0,131 V vs NHE pada 10 mA/cm ²	[21]

Material	Performa	Morfologi	Parameter Elektrokimia	Ref
BiVO ₄ /TiO ₂ NRs	OER	Nanoflowers	1,7 mA/cm ² pada 1,23 V vs V _{RHE}	[22]
WO ₃ /TiO ₂	OER	Nanotubes	~ 0,15 mA/cm ² pada 1,23 V vs V _{RHE}	[23]

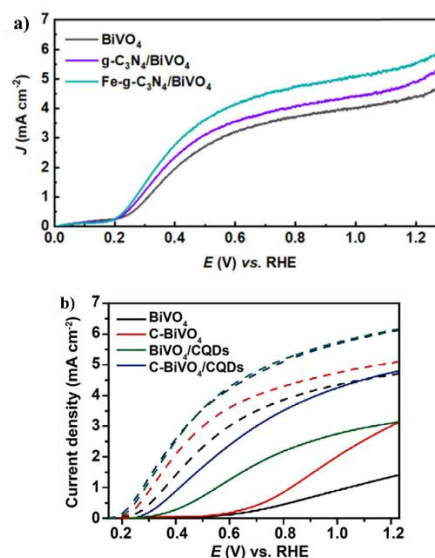
Berdasarkan **Tabel 1** menunjukkan modifikasi morfologi dan pembentukan heterostruktur TiO₂ memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa *water splitting*. Rekayasa morfologi berupa *nanosheets*, *nanoflowers*, dan *nanotubes* mampu meningkatkan luas permukaan aktif serta mempercepat transfer muatan, sedangkan pembentukan heterostruktur, seperti BiVO₄/TiO₂ dan WO₃/TiO₂ dapat berkontribusi dalam meningkatkan aktivitas *Oxygen Evolution Reaction* (OER). Material TiO₂ nanosheet menunjukkan aktivitas *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) yang baik, ditandai dengan potensial sebesar -0,131 V vs NHE pada densitas arus 10 mA/cm² sehingga menunjukkan peningkatan efisiensi transfer elektron dan kinetika reaksi reduksi hidrogen. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rekayasa morfologi *nanosheet* efektif untuk meningkatkan aktivitas fotoelektrokatalitik TiO₂ melalui peningkatan luas permukaan aktif dan efisiensi transfer muatan. Sementara, material heterostruktur BiVO₄/TiO₂ NRs menghasilkan densitas arus sebesar 1,7 mA/cm² pada 1,23 V vs V_{RHE} yang menunjukkan peningkatan aktivitas OER melalui sinergi *heterojunction* dan optimasi struktur nano.

3.2 MATERIAL BISMUTH VANADATE

(BiVO₄)

Bismuth vanadate (BiVO₄) merupakan salah satu material semikonduktor tipe-n yang paling banyak dikembangkan sebagai fotoanoda pada sistem *photoelectrochemical* (PEC) *water splitting* karena memiliki *bandgap* sekitar 2,4 – 2,5 eV sehingga mampu menyerap cahaya tampak secara efektif hingga panjang gelombang sekitar ~ 520 nm [24]. BiVO₄ memiliki keunggulan dalam menghasilkan lebih banyak oksigen dan hidrogen yang efisien dalam pemecahan air teoritis yang relative tinggi sehingga berpotensi untuk aplikasi praktis dan morfologi permukaan yang dapat dikendalikan untuk mencapai

aktivitas PEC yang optimal [25], [26]. Selain itu, BiVO₄ memiliki posisi pita energi (*bandgap*) yang sesuai untuk mendorong reaksi oksidasi air (OER), stabilitas kimia yang baik, serta biaya produksi yang relatif rendah dibandingkan material semikonduktor lainnya. Karakteristik tersebut menjadikan BiVO₄ sebagai salah satu fotoanoda paling menjanjikan untuk produksi hidrogen berbasis energi surya [27], [28]. Morfologi BiVO₄ memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa *photoelectrochemical* (PEC) *water splitting*. Pembentukan struktur berukuran nano dapat meningkatkan luas kontak antara elektroda dan elektrolit sehingga memperbanyak situs aktif dan memfasilitasi transfer muatan selama reaksi berlangsung. Pengendalian morfologi tersebut dapat dilakukan melalui pengaturan pH larutan prekursor pada proses sintesis, yang berkontribusi terhadap pembentukan struktur, ukuran kristal, dan sifat fotoelektrokimia BiVO₄ [29].



Gambar 1. Analisis Peforma *Linear Sweep Voltammetry* (LSV) dari material a) BiVO₄; g-C₃N₄/ BiVO₄; Fe- g-C₃N₄/ BiVO₄ [27] dan b) BiVO₄; C- BiVO₄; BiVO₄/CQDs; C-BiVO₄/CQDs [26]

Meskipun memiliki kemampuan penyerapan cahaya yang baik, performa fotoelektrokimia BiVO₄ menghadapi tantangan karena mobilitas elektron yang rendah, peningkatan rekombinasi muatan, kinetika oksidasi air yang lambat di antarmuka [26], [27], [28]. Keterbatasan tersebut menyebabkan densitas arus fotokimia yang dihasilkan masih berada dibawah nilai teoritisnya dan menghambat efisiensi konversi energi pada proses *water splitting*. Dalam peningkatan kinerja BiVO₄, rekayasa modifikasi telah dikembangkan, seperti doping logam (Mo, W, dan Fe), rekayasa antarmuka, pembentukan *heterojunction*

dengan semikonduktor lain, dan penambahan ko-katalis pada permukaan fotoanoda. Pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan pemisahan muatan, menekan rekombinasi elektron-hole, mempercepat transfer muatan antarmuka, serta meningkatkan aktivitas dan stabilitas fotoelektrokimia selama proses *water splitting* [26], [30]. Hasil pengujian *Linear Sweep Voltammetry* (LSV) yang ditunjukkan pada **Tabel 2** menunjukkan bahwa modifikasi material BiVO₄ memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan aktivitas fotoelektrokatalitik. Di antara material yang dibandingkan, material Fe-g-C₃N₄/BiVO₄ menghasilkan densitas arus tertinggi sebesar 5,68 mA/cm² pada 1,23 V_{RHE}, yang menunjukkan efisiensi transfer muatan dan aktivitas oksidasi air yang lebih baik. Pada **Gambar 1** menunjukkan kurva LSV untuk memvisualisasikan perbedaan karakteristik elektrokimia setiap material, sehingga grafik peningkatan performa dapat diamati secara lebih komprehensif. Peningkatan densitas arus pada Fe-g-C₃N₄/BiVO₄ diduga disebabkan oleh terbentuknya *heterojunction* yang mampu mempercepat pemisahan pasangan elektron-hole dan mengurangi rekombinasi muatan, sehingga meningkatkan aktivitas reaksi *Oxygen Evolution Reaction* (OER).

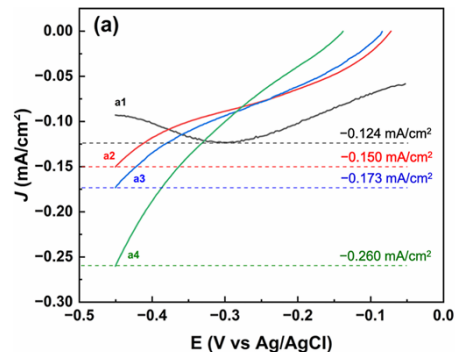
Tabel 2.

Pengembangan performa elektroda dari berbagai material berbasis BiVO₄

Material	Performa	Morfologi	Densitas arus (mA/cm ²)	Ref
F:FeOOH/ BiVO ₄ /WO ₃	OER	Nanoplates	3,10 mA/cm ² pada 1,23 V _{RHE}	[31]
BiVO ₄	OER	-	4,55 mA/cm ² pada 1,23 V _{RHE}	[27]
g-C ₃ N ₄ / BiVO ₄	OER	Nanosheet	5,05 mA/cm ² pada 1,23 V _{RHE}	[27]
Fe-g-C ₃ N ₄ / BiVO ₄	OER	Nanosheet	5,68 mA/cm ² pada 1,23 V _{RHE}	[27]
C-BiVO ₄ / CQDs	OER	-	4,83 mA/cm ² pada 1,23 V _{RHE}	[26]

3.3 MATERIAL CuO/ZnO

Komposit CuO/ZnO merupakan salah satu material heterojunction berbasis oksida logam yang saat ini banyak dikembangkan sebagai fotoelektroda pada sistem PEC water splitting karena mampu meningkatkan efisiensi pemisahan muatan dan meningkatkan aktivitas fotoelektrokatalitik dibandingkan material tunggal [9], [32]. Material CuO termasuk dalam semikonduktor tipe-p dengan nilai bandgap sekitar 1,2 - 1,7 eV yang memiliki kemampuan penyerapan cahaya tampak yang baik, sedangkan ZnO termasuk dalam semikonduktor tipe-n dengan bandgap sekitar 3,2 eV yang memiliki mobilitas elektron tinggi serta stabilitas kimia yang baik. Komposit kedua material tersebut membentuk *heterojunction* p-n yang mampu mempercepat pemisahan pasangan elektron-hole dan menekan rekombinasi muatan [33], [34]. Pembentukan heterojunction CuO/ZnO juga mampu memperluas respons penyerapan cahaya dari zona ultraviolet ke cahaya tampak serta meningkatkan transfer elektron pada antarmuka material, sehingga mampu meningkatkan aktivitas *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) maupun *Oxygen Evolution Reaction* (OER) pada proses PEC *water splitting* [35].



Gambar 2. Analisis *Linear Sweep Voltammetry* (LSV) untuk Performa HER pada fotokatoda CuO/ZnO [9]

Berdasarkan **Gambar 2** menunjukkan peningkatan aktivitas HER ditunjukkan oleh meningkatnya densitas arus katodik dari -0,124 mA/cm² hingga -0,260 mA/cm². Nilai densitas arus negatif mengindikasikan terjadinya proses reduksi proton menjadi gas hidrogen pada permukaan elektroda. *Performa aktivitas HER tertinggi yang ditunjukkan dengan densitas arus paling negative pada -0,260 mA/cm² dibandingkan sampel lainnya.* Peningkatan tersebut menunjukkan modifikasi material mampu mempercepat transfer elektron dan menurunkan hambatan reaksi pada antarmuka elektroda-elektrolit,

sehingga proses evolusi hidrogen berlangsung lebih efisien.

Meskipun heterojunction CuO/ZnO mampu meningkatkan aktivitas fotoelektrokatalitik dibandingkan material tunggal, performanya masih dipengaruhi oleh kualitas antarmuka serta stabilitas masing-masing komponen penyusunnya. Salah satu keterbatasan komposit CuO/ZnO yaitu fotokorosi pada ZnO dan penurunan stabilitas CuO selama proses operasi jangka panjang [35]. Selain itu, pembentukan antarmuka *heterojunction* yang kurang optimal dapat menghasilkan pusat rekombinasi baru yang menurunkan efisiensi fotoelektrokatalitik. Oleh karena itu, dalam mengoptimalkan *heterojunction* melalui pengendalian morfologi, optimasi rasio CuO/ZnO, serta penambahan ko-katalis untuk meningkatkan stabilitas dan performa material [33], [34]. Berbagai struktur morfologi, seperti *nanorods*, *nanowires*, *nanosheets*, *nanoflowers*, dan struktur inti-kulit (*core-shell*) telah dikembangkan untuk meningkatkan jumlah situs aktif dan memperkecilkan jarak difusi elektron maupun hole.

Perkembangan penelitian dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa pembentukan heterostruktur berbasis dua oksida logam, salah satunya pendekatan *heterojunction* inti-kulit (*core shell*) berbasis *nanowire* yang mampu menghasilkan kontak antarmuka yang lebih luas untuk meningkatkan transfer muatan dan efisiensi pemisahan pasangan elektron-hole. Struktur tersebut mampu meminimalkan rekombinasi muatan serta meningkatkan respons terhadap cahaya tampak, sehingga berpotensi meningkatkan aktivitas *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dan *Oxygen Evolution Reaction* (OER) [32]. Perkembangan ini menunjukkan bahwa rekayasa heterostruktur *core-shell* menjadi salah satu arah pengembangan yang prospektif dalam desain fotoelektroda berbasis CuO/ZnO untuk produksi green hydrogen melalui *water splitting*. Berdasarkan **Tabel 3**, modifikasi heterostruktur CuO/ZnO memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan performa *photoelectrochemical water splitting*. Integrasi material lain seperti TiO₂ dan Au, mampu meningkatkan densitas arus HER maupun OER, sehingga memberikan aktivitas *photoelectrochemical water splitting* yang lebih tinggi dibandingkan komposit CuO/ZnO tunggal.

Tabel 3.
Pengembangan performa elektroda dari berbagai material berbasis CuO/ZnO

Material	Performa	Morfologi	Densitas arus (mA/cm ²)	Ref
CuO/ ZnO	HER	bunga atau hampir bulat.	-0,260 mA/cm ² pada -0,45 V vs Ag/AgCl	[9]
CuO/ZnO	HER	Polihedral	-0,55 mA/cm ² pada -0,6V vs SCE	[36]
CuO/ZnO/ TiO ₂	HER	Nanofiber	-4,1 mA/cm ² pada -0,6 V vs Ag/AgCl	[37]
ZnO/CuO	OER	Nanoflower	0,7 mA/cm ² pada 1,6 V vs V _{RHE}	[34]
ZnO/CuO/ Au	OER	Nanoflower	1,08 mA/cm ² pada 1,6 V vs V _{RHE}	[34]

3.4 MATERIAL NIKEL FERIT (NiFe₂O₄)

Nikel ferit (NiFe₂O₄) merupakan material oksida logam dengan struktur spinel yang banyak dikembangkan sebagai elektrokatalis pada proses *water splitting* karena memiliki stabilitas kimia yang baik, biaya sintesis yang relatif rendah, serta aktivitas redoks yang tinggi [38]. Struktur spinel NiFe₂O₄ tersusun atas ion Ni²⁺ dan Fe³⁺ yang terdistribusi pada situs tetrahedral dan oktahedral, sehingga membentuk jalur transfer elektron yang efektif dan meningkatkan aktivitas elektrokatalitik. Sinergi pasangan redoks Ni²⁺/Ni³⁺ dan Fe²⁺/Fe³⁺ mampu mempercepat transfer muatan serta menyediakan lebih banyak situs aktif untuk mendukung reaksi *Oxygen Evolution Reaction* (OER) maupun *Hydrogen Evolution Reaction* (HER), sehingga NiFe₂O₄ menjadi salah satu material untuk aplikasi produksi hidrogen melalui *water splitting* [39], [40], [41].

Nikel ferit termasuk dalam semikonduktor tipe-n yang memiliki nilai bandgap kisaran 1,78 – 2,72 eV, nilai bandgap optimal sebagai fotoanoda untuk PEC cell idealnya sekitar ~2,0 eV yang berpotensi sebagai fotoanoda sekaligus fotoelektrokatalis yang baik serta sifat magnetik yang tergantung pada ukuran partikel [42], [43], [44]. Selain struktur spinel, morfologi

NiFe₂O₄ juga berperan penting dalam menentukan aktivitas elektrokatalitiknya. Berbagai struktur nano seperti nanopartikel, *nanosheet*, *nanoflower*, *hollow sphere*, dan nanofiber telah dikembangkan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik serta memperbanyak jumlah situs aktif pada permukaan katalis. Struktur nano berpori dan hierarkis mampu memperkecil jalur difusi ion dan mempercepat transfer elektron, sehingga meningkatkan kinetika reaksi HER dan OER serta menghasilkan densitas arus yang lebih tinggi dibandingkan morfologi konvensional [45]. Rekayasa struktur spinel dan pengendalian morfologi menjadi strategi untuk meningkatkan performa NiFe₂O₄ sebagai elektrokatalis *water splitting*.

Meskipun memiliki aktivitas elektrokatalitik yang baik, NiFe₂O₄ masih menghadapi beberapa keterbatasan, seperti konduktivitas intrinsik yang relatif rendah dan kecenderungan aglomerasi nanopartikel yang dapat mengurangi jumlah situs aktif selama reaksi berlangsung [45], [46]. Pendekatan pengembangan material melalui rekayasa morfologi, pembentukan struktur hierarkis, doping logam, serta pembentukan komposit dengan material karbon atau semikonduktor lain untuk meningkatkan konduktivitas, mempercepat transfer elektron, dan meningkatkan aktivitas HER maupun OER. Berdasarkan **Tabel 4** menunjukkan pengembangan material NiFe₂O₄ pada peningkatan aktivitas OER, tetapi juga mulai diarahkan untuk mendukung HER melalui rekayasa komposisi dan morfologi. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai overpotensial yang relatif rendah pada densitas arus 10 mA/cm² menunjukkan bahwa material memerlukan energi aktivasi yang lebih kecil untuk menjalankan reaksi elektrokatalitik. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur spinel dan modifikasi morfologi berperan penting dalam meningkatkan kinetika transfer muatan sehingga NiFe₂O₄ berpotensi sebagai elektrokatalis bifungsional (*bifunctional electrocatalyst*) untuk proses *overall water splitting*.

Tabel 4.

Pengembangan performa elektroda dari berbagai material berbasis NiFe₂O₄

Material	Performa	Morfologi	Over potensial	Ref
CNFs@ NiFe ₂ O ₄	OER	Nanorod	277 mV pada 10 mA/cm ²	[41]

NiCo _x Fe _{2-x} O ₄	OER	Nanoflakes	455 mV pada 10 mA/cm ²	[47]
NiCo _x Fe _{2-x} O ₄	HER	Nanoflakes	167 mV pada 10 mA/cm ²	[47]
NiFe ₂ O ₄	OER	kubik	337 mV pada 10 mA/cm ²	[46]
NiFe ₂ O ₄	OER	Nanowire	412 mV pada 10 mA/cm ²	[38]

Berdasarkan penelitian terdahulu, material elektrokatalis untuk *water splitting* telah mengalami pengembangan dari penggunaan material tunggal menuju rekayasa struktur dan antarmuka untuk mengoptimalkan transfer muatan dan meningkatkan aktivitas elektrokatalitik. Material BiVO₄ memiliki kelebihan dalam kemampuan absorpsi cahaya tampak, TiO₂ memberikan stabilitas kimia yang tinggi serta fleksibilitas rekayasa morfologi, CuO/ZnO mengandalkan pembentukan heterojunction tipe-p/n untuk meningkatkan pemisahan pasangan elektron-hole, dan NiFe₂O₄ memanfaatkan mekanisme redoks pada struktur spinel yang berkontribusi terhadap aktivitas bifungsional pada reaksi *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dan *Oxygen Evolution Reaction* (OER). Berdasarkan perbandingan berbagai material elektrokatalis, parameter evaluasi performa yang paling umum digunakan pada BiVO₄, TiO₂, dan CuO/ZnO adalah densitas arus, karena secara langsung merepresentasikan kemampuan transfer muatan dan aktivitas fotoelektrokatalitik pada reaksi *water splitting*. Sedangkan, NiFe₂O₄ parameter elektrokimia berdasarkan nilai overpotensial yang menggambarkan energi tambahan yang dibutuhkan untuk menginisiasi reaksi HER dan OER. Secara umum, strategi pengembangan melalui rekayasa morfologi nano, pembentukan heterostruktur, optimasi struktur elektronik, dan modifikasi antarmuka terbukti mampu meningkatkan densitas arus, menurunkan overpotensial, serta mempercepat kinetika transfer muatan. Sinergi antara karakteristik intrinsik material dan rekayasa struktur menjadi faktor kunci dalam pengembangan elektrokatalis yang efisien, stabil, dan berkelanjutan untuk produksi *green hydrogen* melalui proses *water splitting*.

3.5 PROSPEK PENGEMBANGAN MATERIAL ELEKTROKATALIS

Perkembangan material elektrokatalis untuk *water splitting* saat ini menunjukkan kecenderungan yang semakin berfokus pada pemanfaatan semikonduktor berbasis oksida logam dan material komposit yang memiliki stabilitas kimia tinggi, aktivitas elektrokatalitik yang baik, serta biaya produksi yang relatif rendah. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa komposit material melalui pembentukan heterostruktur dan rekayasa antarmuka mampu menghasilkan sinergi yang meningkatkan pemisahan pembawa muatan, mempercepat transfer elektron, serta mengoptimalkan aktivitas *Hydrogen Evolution Reaction* (HER) dan *Oxygen Evolution Reaction* (OER).

Tabel 5. Komparatif material elektrokatalis untuk produksi hidrogen melalui *water splitting*

Material	Keunggulan	Keterbatasan	Strategi
BiVO ₄	Visible light	Rekombinasi tinggi	Heterostruktur
TiO ₂	Stabil	Bandgap lebar	Rekayasa morfologi
CuO/ZnO	p-n heterojunction	Fotokorosi	Core-shell
NiFe ₂ O ₄	Bifunctional	Konduktivitas	Struktur spinel

Berdasarkan **Tabel 5** menunjukkan perbandingan berbagai material, BiVO₄ menunjukkan keunggulan pada absorpsi cahaya tampak, TiO₂ memiliki stabilitas kimia yang tinggi, CuO/ZnO efektif meningkatkan pemisahan pasangan elektron-hole melalui *heterojunction*, sedangkan NiFe₂O₄ menawarkan aktivitas bifungsional HER dan OER dengan struktur spinel dan overpotensial yang rendah. Secara umum, peningkatan densitas arus dan penurunan overpotensial menunjukkan peningkatan aktivitas elektrokatalitik, sehingga kedua parameter tersebut menjadi indikator utama dalam pengembangan material untuk produksi *green hydrogen*. Pengembangan elektrokatalis saat ini tidak lagi berfokus pada material tunggal, tetapi pada integrasi rekayasa struktur, morfologi, dan antarmuka untuk memperoleh performa yang lebih optimal.

Selain pemilihan material, metode sintesis menjadi aspek yang menentukan dalam pengembangan elektrokatalis untuk *water splitting*.

Penelitian saat ini mengarah pada penggunaan metode sintesis yang sederhana, ekonomis, hemat energi, dan dapat dilakukan pada kondisi suhu rendah atau suhu ruang, seperti metode elektrokimia, elektrodeposisi, dan *solution-based synthesis*. Pendekatan tersebut tidak hanya mampu menekan konsumsi energi selama proses sintesis, tetapi juga mampu mengontrol morfologi, ukuran partikel, porositas, dan struktur antarmuka material, sehingga meningkatkan efisiensi transfer muatan serta performa fotoelektrokatalitik. Meskipun berbagai strategi modifikasi telah berhasil meningkatkan aktivitas elektrokatalis, tantangan dalam menghasilkan material yang memiliki aktivitas tinggi, stabilitas jangka panjang, dan proses sintesis masih menjadi fokus penelitian. Oleh karena itu, pengembangan metode sintesis yang mampu mengontrol karakteristik material secara presisi melalui pendekatan yang sederhana dan berkelanjutan menjadi salah satu arah penelitian yang paling prospektif untuk mendukung produksi *green hydrogen* melalui *water splitting*.

4. SIMPULAN

Artikel tinjauan ini mengkaji perkembangan berbagai material elektrokatalis berbasis semikonduktor dan oksida logam untuk aplikasi produksi hidrogen melalui *water splitting*, meliputi BiVO₄, TiO₂, CuO/ZnO, dan NiFe₂O₄. Setiap material memiliki karakteristik dan mekanisme peningkatan performa yang berbeda, mulai dari absorpsi cahaya tampak, stabilitas kimia, pembentukan *heterojunction*, hingga mekanisme redoks pada struktur spinel. Berbagai strategi modifikasi, seperti rekayasa morfologi, pembentukan heterostruktur, doping, dan *interface engineering*, terbukti mampu meningkatkan aktivitas HER maupun OER melalui peningkatan transfer muatan, penurunan rekombinasi elektron-hole, serta penurunan overpotensial. Oleh karena itu, integrasi berbagai strategi rekayasa material menjadi arah pengembangan yang menjanjikan untuk menghasilkan elektrokatalis yang efisien, stabil, dan ekonomis dalam mendukung produksi *green hydrogen* di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. E. Agency, "World Energy Outlook 2024 (IEA, 2024).," 2024
- [2] R. Indonesia, *Enhanced Nationally Determined Contribution Republic of*

- Indonesia* 2022. 2022. [Daring]. Tersedia pada:
[https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022_Enhanced NDC Indonesia.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf)
- [3] J. Joy, J. Mathew, dan S. C. George, "Nanomaterials for photoelectrochemical water splitting – review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 10, hlm. 4804–4817, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.099.
- [4] A. bin Jumah, "A comprehensive review of production, applications, and the path to a sustainable energy future with hydrogen," *RSC Adv.*, vol. 14, no. 36, hlm. 26400–26423, 2024, doi: 10.1039/D4RA04559A.
- [5] J. Gómez dan R. Castro, "Green Hydrogen Energy Systems: A Review on Their Contribution to a Renewable Energy System," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 13, hlm. 3110, Jun 2024, doi: 10.3390/en17133110.
- [6] F. Dawood, M. Anda, dan G. M. Shafiullah, "Hydrogen production for energy: An overview," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, hlm. 3847–3869, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.
- [7] C. Anand *dkk.*, "Green hydrogen for a sustainable future: A review of production methods, innovations, and applications," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 111, hlm. 319–341, Mar 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.257.
- [8] X. Li *dkk.*, "Water Splitting: From Electrode to Green Energy System," *Nanomicro Lett.*, vol. 12, no. 1, hlm. 1–29, 2020, doi: 10.1007/s40820-020-00469-3.
- [9] R. A. N. Utama, R. Nabila *dkk.*, "Enhancing the Photoelectrochemical Activity of CuO/ZnO Junction Photocathodes for Water Splitting," *Langmuir*, vol. 40, no. 52, hlm. 27635–27644, Des 2024, doi: 10.1021/acs.langmuir.4c04163.
- [10] E. Samuel, B. Joshi, M. W. Kim, M. T. Swihart, dan S. S. Yoon, "Morphology engineering of photoelectrodes for efficient photoelectrochemical water splitting," *Nano Energy*, vol. 72, hlm. 104648, 2020, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.104648.
- [11] I. A. Digdaya, G. W. P. Adhyaksa, B. J. Trześniewski, E. C. Garnett, dan W. A. Smith, "Interfacial engineering of metal-insulator-semiconductor junctions for efficient and stable photoelectrochemical water oxidation," *Nat. Commun.*, vol. 8, no. 1, hlm. 15968, Jun 2017, doi: 10.1038/ncomms15968.
- [12] Y. Yang, S. Niu, D. Han, T. Liu, G. Wang, dan Y. Li, "Progress in Developing Metal Oxide Nanomaterials for Photoelectrochemical Water Splitting," *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, no. 19, hlm. 1–26, 2017, doi: 10.1002/aenm.201700555.
- [13] T. Hisatomi, J. Kubota, dan K. Domen, "Recent advances in semiconductors for photocatalytic and photoelectrochemical water splitting," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 22, hlm. 7520–7535, Jan 2014, doi: 10.1039/C3CS60378D.
- [14] M. Ismael, "Latest progress on the key operating parameters affecting the photocatalytic activity of TiO₂-based photocatalysts for hydrogen fuel production: A comprehensive review," *Fuel*, vol. 303, hlm. 121207, Nov 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121207.
- [15] H. Eidsvåg, S. Bentouba, P. Vajeeston, S. Yohi, dan D. Velauthapillai, "TiO₂ as a Photocatalyst for Water Splitting—An Experimental and Theoretical Review," *Molecules*, vol. 26, no. 6, hlm. 1687, Mar 2021, doi: 10.3390/molecules26061687.
- [16] Z. Dong, M. Chen, D. Qin, dan S. Han, "Recent advances and perspective of modified TiO₂-based photoanodes toward photoelectrochemical water splitting," *Fuel*, vol. 373, hlm. 132366, Okt 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.132366.
- [17] Z. Dong, M. Chen, D. Qin, dan S. Han, "Recent advances and perspective of modified TiO₂-based photoanodes toward photoelectrochemical water splitting," *Fuel*, vol. 373, hlm. 132366, Okt 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.132366.
- [18] X. Liang *dkk.*, "Advanced TiO₂-Based Photoelectrocatalysis: Material Modifications, Charge Dynamics, and Environmental–Energy Applications," *Catalysts*, vol. 15, no. 6, hlm. 542, Mei 2025, doi: 10.3390/catal15060542.
- [19] M. H. Sawal, A. A. Jalil, N. F. Khusnun, N. S. Hassan, dan M. B. Bahari, "A review of recent modification strategies of TiO₂-based

- photoanodes for efficient photoelectrochemical water splitting performance,” *Electrochim. Acta*, vol. 467, hlm. 143142, Nov 2023, doi: 10.1016/j.electacta.2023.143142.
- [20] A. Mantilla, D. Guerrero-Araque, J. H. Sierra-Urbe, D. Ramirez-Ortega, dan Dkk, “Highly efficient mobility, separation and charge transfer in black SnO₂-TiO₂ structures with co-catalysts: the key step for the photocatalytic hydrogen evolution,” *Royal Society of Chemistry*, vol. 14, no. 36, hlm. 26259–26271, 2024, doi: <https://doi.org/10.1039/d4ra03731f>.
- [21] X. Guo, X. Liu, J. Shan, G. Zhao, dan S. (Frank) Liu, “Heterojunction Design between WSe₂ Nanosheets and TiO₂ for Efficient Photocatalytic Hydrogen Generation,” *Catalysts*, vol. 12, no. 12, hlm. 1668, Des 2022, doi: 10.3390/catal12121668.
- [22] M. G. Lee dkk., “Crystal Facet Engineering of TiO₂ Nanostructures for Enhancing Photoelectrochemical Water Splitting with BiVO₄ Nanodots,” *Nanomicro Lett.*, vol. 14, no. 1, hlm. 1–15, 2022, doi: 10.1007/s40820-022-00795-8.
- [23] F. Pinto, A. Wilson, B. Moss, dan A. Kafizas, “Systematic Exploration of WO₃/TiO₂ Heterojunction Phase Space for Applications in Photoelectrochemical Water Splitting,” *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 126, no. 2, hlm. 871–884, Jan 2022, doi: 10.1021/acs.jpcc.1c08403.
- [24] H. Seo, B. S. Kalanoor, dan S. S. Kalanur, “BiVO₄ Photoanodes for Photoelectrochemical Water Splitting,” *Materials Research Foundation*, 2020, hlm. 129–182. doi: 10.21741/9781644900734-6.
- [25] R. T. Gao, X. Liu, X. Zhang, dan L. Wang, “Steering electron transfer using interface engineering on front-illuminated robust BiVO₄ photoanodes,” *Nano Energy*, vol. 89, no. PA, hlm. 106360, 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106360.
- [26] L. Wang, Y. Zhang, W. Li, dan L. Wang, “Recent advances in elaborate interface regulation of BiVO₄ photoanode for photoelectrochemical water splitting,” *Materials Reports: Energy*, vol. 3, no. 4, hlm. 100232, 2023, doi: 10.1016/j.matre.2023.100232.
- [27] Z. Liang dkk., “Systematic engineering of BiVO₄ photoanode for efficient photoelectrochemical water oxidation,” *Carbon Energy*, vol. 6, no. 4, Apr 2024, doi: 10.1002/cey2.413.
- [28] O. A. Krysiak dkk., “Importance of catalyst–photoabsorber interface design configuration on the performance of Mo-doped BiVO₄ water splitting photoanodes,” *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 25, no. 1, hlm. 173–185, 2021, doi: 10.1007/s10008-020-04636-9.
- [29] M. W. Kim dkk., “Tuning the morphology of electrospayed BiVO₄ from nanopillars to nanoferns via pH control for solar water splitting,” *J. Alloys Compd.*, vol. 769, hlm. 193–200, 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.07.167.
- [30] N. M. Izzudin dkk., “Unveiling the cutting-edge progress in boosting the photoelectrochemical water-splitting efficiency of BiVO₄ photoanode with transition metal-based materials for sustainable hydrogen production,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 953, no. August 2023, hlm. 118011, 2024, doi: 10.1016/j.jelechem.2023.118011.
- [31] Y. Li dkk., “Fluorine-doped iron oxyhydroxide cocatalyst: promotion on the WO₃ photoanode conducted photoelectrochemical water splitting,” *Appl. Catal. B*, vol. 304, hlm. 120995, Mei 2022, doi: 10.1016/j.apcatb.2021.120995.
- [32] A. Costas, C. Florica, N. Preda, C. Besleaga, A. Kuncser, dan I. Enculescu, “Self-connected CuO–ZnO radial core–shell heterojunction nanowire arrays grown on interdigitated electrodes for visible-light photodetectors,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, hlm. 1–13, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10879-5.
- [33] R. Siavash Moakhar dkk., “Photoelectrochemical Water-Splitting Using CuO-Based Electrodes for Hydrogen Production: A Review,” *Advanced Materials*, vol. 33, no. 33, Agu 2021, doi: 10.1002/adma.202007285.
- [34] P. Shinde dkk., “Plasmonic Au nanoparticles sensitized ZnO/CuO heterostructure for

- efficient photoelectrochemical water splitting,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 54, hlm. 1073–1084, Feb 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.276.
- [35] M. Kumar, B. Meena, P. Subramanyam, D. Suryakala, dan C. Subrahmanyam, “Emerging Copper-Based Semiconducting Materials for Photocathodic Applications in Solar Driven Water Splitting,” *Catalysts*, vol. 12, no. 10, hlm. 1198, Okt 2022, doi: 10.3390/catal12101198.
- [36] N. Bahnasawy, A. M. Elbanna, M. Ramadan, dan N. K. Allam, “Fabrication of polyhedral Cu–Zn oxide nanoparticles by dealloying and anodic oxidation of German silver alloy for photoelectrochemical water splitting,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, hlm. 1–8, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-21127-1.
- [37] M. Kim *dkk.*, “Nanotextured cupric oxide nanofibers coated with atomic layer deposited ZnO-TiO₂ as highly efficient photocathodes,” *Appl. Catal. B*, vol. 201, hlm. 479–485, Feb 2017, doi: 10.1016/j.apcatb.2016.08.058.
- [38] C. Si *dkk.*, “Mesoporous nanostructured spinel-type MFe₂O₄ (M = Co, Mn, Ni) oxides as efficient bi-functional electrocatalysts towards oxygen reduction and oxygen evolution,” *Electrochim. Acta*, vol. 245, hlm. 829–838, Agu 2017, doi: 10.1016/j.electacta.2017.06.029.
- [39] R. A. N. Utama, T. Nurtono, W. Widiyastuti, I. W. Lenggoro, dan H. Setyawan, “Phase Formation and Elemental Transport in the Electrosynthesis of Nickel Ferrite by Sacrificial Iron Anode in Nickel Salt Solution,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 172, no. 2, hlm. 022504, Feb 2025, doi: 10.1149/1945-7111/adb4a7.
- [40] R. Nabila, R. A. N. Utama, W. Widiyastuti, T. Nurtono, dan H. Setyawan, “Preparation and Characterization of Nickel Ferrite (NiFe₂O₄) Nanoparticles by Surfactant-Free Electrochemical Method,” *Nano Hybrids and Composites*, vol. 44, hlm. 1–8, Jun 2024, doi: 10.4028/p-jew9ry.
- [41] T. N. Luong, T. L. L. Doan, P. M. Bacirhonde, dan C. H. Park, “A study on synthesis of an advanced electrocatalyst based on high-conductive carbon nanofibers shelled NiFe₂O₄ nanorods for oxygen evolution reaction,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 99, hlm. 1108–1118, Jan 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.178.
- [42] M. Khairy dan M. E. Gouda, “Electrical and optical properties of nickel ferrite/polyaniline nanocomposite,” *J. Adv. Res.*, vol. 6, no. 4, hlm. 555–562, 2015, doi: 10.1016/j.jare.2014.01.009.
- [43] H. Wang *dkk.*, “Highly active deficient ternary sulfide photoanode for photoelectrochemical water splitting,” *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, hlm. 3078, Jun 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16800-w.
- [44] S. K. Tong, P. W. Chi, S. H. Kung, dan D. H. Wei, “Tuning bandgap and surface wettability of NiFe₂O₄ driven by phase transition,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, hlm. 1–11, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-19319-9.
- [45] A. Martinez-Lazaro *dkk.*, “NiFe₂O₄ hierarchical nanoparticles as electrocatalyst for anion exchange membrane water electrolysis,” *J. Power Sources*, vol. 556, hlm. 232417, Feb 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.232417.
- [46] N. Khoirina, R. Nabila *dkk.*, “Size-controlled synthesis of spinel nickel ferrite nanoparticles by electrochemical method for metal-air batteries,” *Electrochem. commun.*, vol. 186, Mei 2026, doi: 10.1016/j.elecom.2026.108149.
- [47] S. Benny *dkk.*, “Engineering of cobalt impregnated sponge like spinel nickel ferrite as an efficient electrocatalyst for sustained overall water splitting,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 174, hlm. 114044, Apr 2025, doi: 10.1016/j.inoche.2025.114044.