



The Role of Water Electrolysis in Clean Hydrogen Generation: A Review of Techniques, Materials, and Processes

Heri Suropto^{1,*}, Saiful Anwar¹, Yose Rizal¹

¹Program Studi Teknik Mesin
Universitas Pasir Penaraian
Jl. Tuanku Tambusai, Rambah,
Kec. Rambah Hilir, Kabupaten
Rokan Hulu, Riau 28558
herisuropto@upp.ac.id
saifulanwar@upp.ac.id

ABSTRAK

Pembangkitan hidrogen bersih melalui elektrolisis air telah hadir sebagai strategi penting dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan memajukan solusi energi berkelanjutan. Artikel ini membahas bagaimana elektrolisis air dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen bersih, di tinjau dari teknik, material, dan proses yang digunakan serta membahas bagaimana prinsip dasar elektrolisis air, reaksi elektrokimia yang terlibat dalam prosesnya. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur. Artikel ini mengumpulkan, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai sumber literatur ilmiah yang membahas elektrolisis air untuk menghasilkan hidrogen bersih. Elektrolisis air untuk menghasilkan hidrogen bersih melalui teknik seperti Elektrolisis Alkaline (AE), Elektrolisis Membran Penukar Proton (PEM), dan Elektrolisis Oksida Padat (SOE) memiliki keunggulan dan tantangan unik. Penggunaan katalis seperti Platinum, Iridium, Nikel, dan Kobalt, serta pengembangan membran ekonomis dan tahan lama, krusial untuk kemajuan teknologi ini. Efisiensi proses memerlukan energi berkelanjutan seperti tenaga surya dan angin untuk menurunkan biaya operasional dan emisi karbon. Integrasi dengan sistem energi yang ada penting untuk skala aplikasi praktis. Meskipun ada kemajuan dalam katalis dan membran baru, tantangan biaya awal dan ketahanan material perlu diatasi melalui penelitian lebih lanjut.

Kata kunci: Elektrolisis air; Hidrogen bersih; Teknik elektrolisis; Katalis; Energi berkelanjutan

ABSTRACT

The production of clean hydrogen through water electrolysis has become a critical strategy for decreasing greenhouse gas emissions and promoting sustainable energy solutions. This article explores the application of water electrolysis for generating clean hydrogen, investigating the methods, materials, and processes involved, as well as the fundamental principles of electrolysis, including its electrochemical reactions. The approach utilized is a literature review, which involves gathering, assessing, and integrating diverse scientific literature sources on electrolysis for clean hydrogen production. Electrolysis methods like Alkaline Electrolysis (AE), Proton Exchange Membrane Electrolysis (PEM), and Solid Oxide Electrolysis (SOE) each come with unique advantages and challenges. The utilization of catalysts such as Platinum, Iridium, Nickel, and Cobalt, alongside the development of cost-effective and durable membranes, plays a crucial role in advancing this technology. Achieving process efficiency necessitates sustainable energy sources like solar and wind power to lower operational expenses and carbon emissions. Integration with current energy systems is vital for practical scalability. Despite progress in new catalysts and membranes, addressing initial costs and long-term material durability issues requires further investigation.

Keywords: Electrolysis of water; Clean hydrogen; Electrolysis techniques; Catalysts; Sustainable energy

Corresponding Author:
✉ Heri Suropto
Accepted on: 2024-12-24

1. PENDAHULUAN

Hidrogen merupakan sumber energi terbarukan yang sebagai sumber energi yang bersih dan ramah lingkungan (Christopher & Dimitrios, 2012; M. Younas, et al 2022). Dampak pemanasan global telah membuat dunia fokus pada penghentian penggunaan bensin dan solar sebagai sumber bahan bakar transportasi, dengan menggantikan hidrogen sebagai bahan bakar alternatif. Namun, produksi hidrogen saat ini, menggunakan sebagian besar teknologi yang ada, masih melibatkan penggunaan bahan bakar fosil dan menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan, bahkan mencapai 2,5-5 ton karbon per ton hidrogen yang diproduksi secara konvensional [3]. Energi dari bahan bakar fosil memiliki biaya yang lebih rendah, namun memiliki tantangan yang tinggi jika dibandingkan dengan sumber daya energi terbarukan, Oleh karena itu, salah satu pilihan utama untuk memenuhi kebutuhan energi adalah sumber daya terbarukan, dengan bahan bakar ramah lingkungan seperti hidrogen (H₂) [4]. Produksi hidrogen dari sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan adalah menjadi tugas yang harus dilakukan oleh peneliti agar menjadi bahan bakar yang bersih dan berkesinambungan [5]. Hidrogen merupakan bahan bakar alternatif yang berkelanjutan dan memiliki potensi [6] sebagai cara untuk mengatasi tantangan energi dan isu lingkungan pada masa ini, produksi hidrogen yang ramah lingkungan menjadi peran penting dalam menciptakan lingkungan yang lebih bersih dan mendukung pertumbuhan berkelanjutan [7], [8] serta memiliki potensi efisiensi energi yang tinggi dan menghasilkan polutan rendah saat digunakan untuk keperluan transportasi dan pembangkit listrik stasioner [9], [10].

Penggunaan hidrogen saat ini masih dominan digunakan pada industry kimia, namun pengembangan hidrogen sebagai bahan bakar terus dilakukan [11] terdapat beberapa proses untuk menghasilkan hidrogen diantaranya, bersumber dari sumber daya fosil dan biomassa terbarukan, reformasi (uap, oksidasi parsial, autotermal, plasma, dan fase air) dan pirolisis, serta elektrolisis dan air untuk menghasilkan hidrogen [12]. Dalam banyak hal, hidrogen merupakan bahan bakar yang ideal, Namun saat ini, metode produksinya masih belum mencapai tingkat praktis dan berkelanjutan [13]. Hidrogen, yang dapat diproduksi melalui proses elektrolisis air, memiliki potensi untuk menjadi alternatif yang signifikan bagi bahan bakar konvensional [14]. Hidrogen dapat diproduksi dalam jumlah besar dengan menggunakan bahan mentah yang ekonomis dan menguntungkan. Pemanfaatan air sebagai sumber hidrogen yang tak terbatas juga telah dikembangkan [15].

Dekarbonisasi bumi merupakan salah satu tujuan utama yang telah ditetapkan oleh negara-negara di seluruh dunia pada tahun 2050 untuk mengurangi dampak perubahan iklim. Dalam mencapai tujuan tersebut, produksi hidrogen hijau melalui elektrolisis air dianggap sebagai solusi yang signifikan untuk mengatasi dekarbonisasi secara global [16]. Hidrogen, sebagai sumber energi, telah dianggap sebagai solusi untuk mengurangi dampak perubahan iklim dengan menggabungkan sumber energi listrik melalui sistem elektrolisis air [17]. Menghasilkan hidrogen melalui elektrolisis air merupakan opsi yang baik untuk memanfaatkan kelebihan energi terbarukan [18]. Hidrogen merupakan bahan bakar yang menjanjikan yang dapat diperoleh dari berbagai sumber bahan mentah, termasuk air [19]. Meskipun elektrolisis air telah ada selama sekitar dua abad, teknologinya menunjukkan potensi yang menjanjikan untuk produksi hidrogen [20]. Elektrolisis air merupakan metode yang umum digunakan untuk

menghasilkan gas hidrogen. Teknologi ini memiliki beberapa keunggulan, seperti efisiensi tinggi, kemurnian tinggi, dan kemudahan penggunaan [21].

Berbagai penelitian telah dipublikasikan tentang produksi hidrogen dengan menggunakan metode elektrolisis seperti [22] mengamati produksi solar hidrogen melalui elektrolisis air alkali menyimpulkan bahwa laju produksi hidrogen sebesar 1,138 gram per jam, selama penelitian. Sistem menghasilkan energi sebesar 1.234 MWh, dan energi sebesar 1,31 MWh dapat mentenagai 122 rumah, sistem ini berhasil mengimbangi 906 kg karbon, setara dengan sumbangan sekitar 23 pohon dalam menyerap karbon dari atmosfer. Selanjutnya [23] mengamati tentang produksi hidrogen melalui elektrolisis air yang dikombinasikan dengan sistem fotovoltaik (PV) surya off-grid menyimpulkan hidrogen (H₂) yang dihasilkan oleh sistem ini memperlihatkan keunggulan yang signifikan, terutama dalam aspek keberlanjutan dan otonomi energi di lokasi off-grids. Selanjutnya [24] mengamati tentang pengaruh sinar matahari terhadap produksi hidrogen dari elektrolisis air menyimpulkan bahwa dengan memanfaatkan sinar matahari dapat mengatasi masalah residu efek medan listrik, teknik ini dapat meningkatkan produksi hingga 53 % dibanding dengan konvensional.

[25] mengamati tentang produksi hidrogen melalui elektrolisis air berbiaya rendah yang dikembangkan melalui kombinasi elektrolisis air alkali dan pemanfaatan energi surya menyimpulkan bahwa dengan sel elektrolitik dibentuk silinder dan berbahan dasar akrilik dan 304 elektroda baja tahan karat untuk menghasilkan hidrogen. Elektrolit yang digunakan adalah natrium hidroksida (NaOH 2-5 mol L⁻¹) dan tegangan arus searah yang diterapkan adalah 2,0, 2,7, dan 3,4 V. Produksi hidrogen maksimum dicapai dengan 5,0 mol L⁻¹ NaOH dan listrik 3,4 V tegangan. Sistem dihubungkan ke panel fotovoltaik 20 W dan terkena sinar matahari radiasi dari jam 10 pagi sampai jam 2 siang. Sekitar 2 L hidrogen diproduksi dalam satu periode, dan radiasi rata-rata 800,0 Wm⁻² ± 60 Wm⁻² tercapai dan sistem stabil selama pengujian. [26] juga mengamati dan menganalisis kinerja perbandingan dari sistem PV terhubung ke jaringan untuk produksi hidrogen menggunakan Proton Exchange Membrane (PEM) air, metanol, dan elektrolisis sulfur hibrida dan menyimpulkan bahwa penggunaan elektrolisis membran (ME) dapat menghasilkan hidrogen 65 % lebih banyak dibandingkan dengan elektrolisis air (WE).

[27] mengamati sel elektrolisis oksida padat hibrida sebagai strategi untuk produksi hidrogen yang efisien menyimpulkan bahwa ketika BaZr_{0,1}Ce_{0,7}Y_{0,1}Yb_{0,1}O_{3-δ} digunakan sebagai elektrolit, hybrid SOEC menunjukkan efisiensi tertinggi, menunjukkan rapat arus sebesar 3,16 A cm⁻² pada 1,3 V dan 750 °C dalam 10% hidrogen yang dilembabkan pada hidrogen elektroda dan 10% udara lembab di elektroda udara. Selain itu, SOEC hibrida tidak menunjukkan penurunan kinerja selama lebih dari 60 jam pengoperasian terus-menerus, sehingga menyiratkan sistem yang kuat untuk produksi hidrogen. [28] mengamati tentang sintesis membran komposit titanium (IV) oksida untuk produksi hidrogen melalui elektrolisis air alkali, menyimpulkan bahwa membran komposit TiO₂ disintesis dari polisulfon (PSF), PVP, dengan teknik presipitasi inversi fasa. Membran yang disintesis dikarakterisasi dengan teknik FT-IR, FE-SEM, dan XRD. Selanjutnya, dilakukan eksperimental elektrolisis air alkali skala kecil dengan sel berukuran 10 cm, membran yang disintesis ini secara efektif meningkatkan laju produksi dan kemurnian hidrogen dibandingkan dengan pemisah asbes konvensional. Kerapatan arus sebesar 600 mA/cm² bersama dengan aliran hidrogen sebesar 30 ml/menit dengan kemurnian 99,9% diperoleh

saat sel dioperasikan dalam 30% berat KOH pada suhu 80°C dan tegangan 2 V. Dalam proses elektrolisis, berbagai parameter eksperimental dipertimbangkan, seperti pengaruh suhu (30 hingga 80°C) dan konsentrasi KOH (5 hingga 30 wt %). Membran komposit yang disintesis ini memiliki biaya rendah dan menunjukkan kinerja elektrokimia yang sangat baik serta stabilitas dalam lingkungan basa. [29] mengamati tentang pengembangan perakitan elektroda membran yang efisien untuk produksi hidrogen berbiaya rendah melalui elektrolisis membran penukar anion menyimpulkan bahwa produksi elektrokimia hidrogen dari air menggunakan membran penukar anion (AEM) dapat dicapai dengan katalis non-n mulia, selain membran tradisional pertukaran proton yang menggunakan logam golongan platina. Pengembangan dan perakitan elektroda membran efektif (MEA) untuk elektrolisis AEM. Kinerja elektrolisis terbaik yang tercatat adalah 500 mA/cm² untuk 1,95 V pada 60 °C dengan elektrolit K₂CO₃ 1%. Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa elektrolisis AEM menunjukkan kelayakan komersial.

[30] mengamati tentang *dark fermentation* dan elektrolisis mikroba untuk meningkatkan produksi bio-hidrogen dari air limbah dan produk sampingan agro-industri dalam kerangka bio-refinery, menyimpulkan bahwa enam air limbah dan produk sampingan industri yang berasal dari pabrik keju, jus buah, kertas, gula, pengolahan buah, dan pabrik minuman keras dievaluasi untuk memeriksa kelayakan produksi hidrogen dalam proses dua langkah. Produksi hidrogen keseluruhan ketika menggabungkan *dark fermentation* dan elektrolisis mikroba meningkat hingga 13 kali dibandingkan dengan fermentasi saja, mencapai hasil hidrogen keseluruhan maksimum sebesar 1608.6 ± 266.2 mLH₂/gCOD yang dikonsumsi dan maksimum 78.5 ± 5.7% penghilangan COD. Hasil ini menunjukkan bahwa fermentasi gelap yang dikombinasikan dengan elektrolisis mikroba adalah dapat memaksimalkan konversi air limbah dan produk sampingan agro-industri menjadi bio-hidrogen.

Hidrogen sebagai sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan telah menjadi fokus utama dalam upaya mitigasi dampak perubahan iklim, berbagai penelitian serupa telah menunjukkan bahwa elektrolisis air, terutama hidrogen hijau, memegang peran kunci dalam transformasi energi yang bersih dan efisien seperti yang dilakukan [31] mengamati tentang generasi hidrogen melalui pemecahan air menggunakan nanomaterial 2D: Fotokatalisis versus elektrokatalisis menyimpulkan bahwa Ti₃C₂ dapat dikombinasikan dengan berbagai material untuk menghasilkan elektro atau fotokatalisis dengan morfologi berlapis yang berbeda (0D, 1D, 2D, 3D), kelompok terminasi permukaan yang melimpah, dan aktivitas foto-elektrikal yang ditingkatkan. Komposit nanohibrida MXene-terderivasi TiO₂ dan MXene/TiO₂ adalah sebagai alternatif elektro dan fotokatalitik H₂ yang baik. Laju produksi fotokatalitik H₂ dari Wsp melalui TiO₂ yang berasal dari MXene dapat berkisar antara 20 hingga 50.000 mol.g⁻¹h⁻¹, dengan Co-Chl@Ti₃C₂Tx menghasilkan yang paling tinggi. [32] mengamati tentang produksi biohidrogen dari air limbah industri gula menggunakan katalis nanokomposit oksida logam/grafin dalam sel elektrolisis mikroba menggunakan dua nanokomposit oksida logam berbasis grafen digunakan sebagai katalis untuk menyelidiki produksi hidrogen dalam MEC yang dioperasikan dengan air limbah industri gula sebagai substrat melawan katolit fosfat. Karakterisasi elektrokimia menunjukkan kinerja lebih baik dari katoda yang dilapisi NiO.rGO yang menunjukkan overpotential yang lebih rendah pada 600 mV dan resistansi keseluruhan terendah dalam plot Nyquist dibandingkan dengan katoda Ni-foam

dan Co_3O_4 .rGO. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa pada tegangan terapan 1,0 V, nanokomposit NiO.rGO telah menunjukkan laju produksi hidrogen maksimum sebesar $4,38 \pm 0,11$ mmol/L/D, efisiensi kolombik sebesar 65,6%, dan pemulihan hidrogen katodik sebesar 20,8%. Kinerja MEC dalam hal produksi biohidrogen adalah 1,19 dan 2,68 kali lebih tinggi daripada Co_3O_4 .rGO dan Ni-Foam tanpa lapisan. Oleh karena itu, katalis nanokomposit ekonomis telah berhasil ditunjukkan dalam MEC menggunakan limbah industri untuk keberlanjutan energi dan lingkungan.

(Majumder Sutripto, et al, 2023) mengamati tentang Strategi efektif penggabungan Co_3O_4 sebagai ko-katalis ke dalam heterojunction inti-lapisan shell inovatif $\text{BiVO}_4/\text{Fe}_2\text{TiO}_5$ untuk aplikasi pemisahan air secara fotoelektrokimia yang efektif menyimpulkan bahwa dalam pemecahan air fotoelektrokimia (PEC), heterojunction inti-lapisan yang diikuti oleh pemuatan katalis di atas fotoelektroda diketahui dapat mempercepat baik pemisahan maupun injeksi pembawa muatan yang dihasilkan secara fotogenik. Pembuatan fotoelektroda $\text{BiVO}_4/\text{Fe}_2\text{TiO}_5/\text{Co}_3\text{O}_4$ melalui rute kimia sederhana. Fotoelektroda yang difabrikasi telah dikonfirmasi melalui analisis struktural, morfologis, dan optikal yang berbeda. Fe_2TiO_5 sebagai lapisan yang dimuat dengan katalis Co_3O_4 meningkatkan parameter seperti efisiensi pemisahan dan injeksi fotoanoda berbasis BiVO_4 secara bersamaan. Efek pembentukan heterojunction diikuti oleh imobilisasi katalis yang dimuat menghasilkan kepadatan fotokurent tertinggi yang lipat 5,3 dengan pergeseran katodik yang luar biasa dibandingkan dengan fotoanoda BiVO_4 polos dalam kondisi elektrolit netral. Selain itu, ditemukan bahwa selain pembentukan heterojunction, terjadi pembentukan cacat oksigen yang juga bertanggung jawab untuk menghasilkan efek kumulatif pemisahan dan injeksi muatan fotoanoda. Akhirnya, karakterisasi PEC yang berbeda seperti (a) estimasi flat band, (b) studi resistansi transfer muatan dan kapasitansi bersama dengan analisis struktur pita membuktikan bahwa heterojunction inti-lapisan $\text{BiVO}_4/\text{Fe}_2\text{TiO}_5$ yang dimuat dengan katalis Co_3O_4 memiliki konfigurasi tipe-II bertumpuk n-n-p.

(Farooq Anza, et al 2024) mengamati tentang penelitian elektrokimia pada nanostruktur C-doped $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ untuk pemisahan air elektrokimia yang efisien menyimpulkan bahwa elektrokatalis $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ dan C- $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (terdoping karbon) disintesis dengan menggunakan pendekatan kalsinasi yang mudah, mempercepat kinetika katalisis untuk aplikasi pemisahan air. Difraksi sinar-X (XRD), spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR), dan mikroskopi elektron pemindaian (SEM) digunakan untuk mengkarakterisasi struktur elektrokatalis yang disintesis. Voltametri siklik, voltametri pemindaian linier, Mott-Schottky, dan spektroskopi impedansi elektrokimia dilakukan untuk mengevaluasi kinerja elektrokimia elektrokatalis. Dalam OER, $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ @CNT menunjukkan aktivitas katalisis yang efisien dengan potensial overpotential sebesar 260 mV dan kemiringan Tafel sebesar 183 mV dec^{-1} . Sedangkan untuk HER, elektrokatalis terdoping karbon $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ menunjukkan aktivitas katalisis yang luar biasa dengan potensial overpotential sebesar 236 mV dan kemiringan Tafel sebesar 146 mV dec^{-1} .

(Quang Nguyen Duc, et al, 2021) mengamati tentang struktur tabung bertingkat Fe_2O_3 yang *decorated* dengan nanopartikel fosfat kobalt (CoP) untuk pemisahan air fotoelektrokimia yang efisien menyimpulkan bahwa spertimbangan terhadap rekombinasi muatan dan kinetika oksidasi air yang buruk membatasi kinerja fotoanoda berbasis hematit (Fe_2O_3) jauh dari tingkat teoretis dan

membatasi aplikabilitas untuk perangkat pemisahan air fotoelektrokimia (PEC). Struktur tabung hierarkis (HTS) CoP/SnO₂:Fe₂O₃ dengan luas permukaan besar dan struktur kristal yang terdefinisi dengan baik dibuat melalui metode etsa oksidasi redoks yang mudah. Lapisan nano SnO₂ berfungsi sebagai sumber dopan untuk meningkatkan efisiensi transportasi muatan pembawa muatan sepanjang sumbu pertumbuhan HTS Fe₂O₃; oleh karena itu, arus foton yang dicapai dapat mencapai 2.0 mA cm⁻² pada 1.23 VRHE (V vs. reversible hydrogen electrode). Partikel nano CoP (NPs) sebagai kolektor lubang berkecepatan tinggi dari lapisan penyerap cahaya serta sebagai katalis untuk meningkatkan efisiensi injeksi pembawa muatan pada permukaan fotoelektroda. Sebagai hasilnya, CoP/SnO₂:Fe₂O₃ menunjukkan kepadatan arus foton tertinggi sebesar 3.50 mA cm⁻² (pada 1.23 VRHE) dengan penurunan onset potensial sebesar 180 mV.

Meskipun sejumlah penelitian telah dilakukan terkait penggunaan nanopartikel TiO₂, Co₃O₄, dan Fe₂O₃ dalam elektrolisis air untuk produksi hidrogen, terdapat beberapa aspek yang masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Penelitian sebelumnya cenderung belum menyelidiki secara menyeluruh kinerja dan interaksi ketiga nanopartikel tersebut dalam konteks elektrolisis air. Diperlukan analisis mendalam terkait efisiensi, stabilitas, dan aktivitas katalitik masing-masing nanopartikel, serta potensi sinergi di antara ketiga nanopartikel tersebut. Selain itu, dampak faktor lingkungan, seperti pH larutan elektrolit dan suhu, pada performa nanopartikel masih perlu dipelajari lebih lanjut. Akhirnya, karakteristik nanoskala dari nanopartikel TiO₂, Co₃O₄, dan Fe₂O₃ serta dampaknya terhadap kinerja elektrokatalitik belum sepenuhnya terungkap dan memerlukan eksplorasi lebih lanjut. Melalui penelitian yang menyeluruh pada aspek-aspek ini, diharapkan dapat diperoleh wawasan mendalam untuk meningkatkan efisiensi produksi hidrogen dalam konteks elektrolisis air.

2. MATERIAL DAN METODE

Material dalam artikel ini menjelaskan berbagai sumber literatur yang digunakan untuk mengumpulkan informasi mengenai peran material TiO₂, Co₃O₄, dan Fe₂O₃ dalam meningkatkan aktivitas katalitik pada sel elektrolisis air. Materi penelitian mencakup publikasi ilmiah, jurnal, dan konferensi yang relevan, yang mencakup studi tentang sintesis, karakterisasi, dan aplikasi dari masing-masing nanopartikel. Teknik karakterisasi seperti spektroskopi, mikroskopi elektron, dan teknik elektrokimia digunakan untuk memahami sifat fisikokimia dan kinerja elektrokatalitik dari nanopartikel tersebut. Proses eksperimental yang digunakan meliputi metode hidrotermal, kalsinasi, dan sintesis kimia lainnya untuk menghasilkan material dengan struktur dan sifat yang diinginkan. Melalui pendekatan ini, artikel ini menghadirkan informasi terbaru mengenai sintesis, karakterisasi, dan aplikasi material TiO₂, Co₃O₄, dan Fe₂O₃ dalam konteks elektrokatalisis, dengan tujuan untuk memperluas pemahaman tentang kontribusi mereka terhadap efisiensi dan keberlanjutan proses elektrolisis air.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2.1 Penelitian nanopartikel TiO₂ sebagai katalisator elektrolisis air

Peneliti (Tahun)	Material nanopartikel	Hasil
Bagheri et al., 2014	Co-TiO ₂	Nilai penghematan energi gas oksigen pada kepadatan arus 5 mA cm ⁻² adalah 12.6 kW h kg ⁻¹ . Biaya rendah serta stabilitas yang nyata dari elektroda yang dimodifikasi membuatnya menjadi bahan yang dapat dijadikan untuk proses elektrolisis air
Fazil & Ahmad, 2023	TiO ₂ dan Sr (1%, 2.5%, dan 5%)	Elektroda mengungkapkan bahwa TiO ₂ bercampur Sr 1% dan 5% menunjukkan kepadatan arus maksimum untuk kedua HER (~10 mA/cm ²), dengan potensial onset sebesar 0,96 V untuk HER dan 1,55 V untuk OER, serta kemiringan Tafel sebesar 84,09 dan 91,60 mV/dec, secara berturut-turut dan OER (~2,49 mA/cm ²)
Song et al., 2017	Ni ₂ P, NiCoP, dan FeP	Dengan membandingkan Ni ₂ P, NiCoP, dan FeP dan mengoptimalkan proporsinya, ditemukan bahwa komposit NiCoP(1wt%)/TiO ₂ menunjukkan aktivitas tertinggi terhadap produksi H ₂ fotokatalitik (1,54 μmol·h ⁻¹ ·mg ⁻¹), yang sekitar tiga belas kali lipat dari nanopartikel TiO ₂
Zhang et al., 2017	Pd dan TiO ₂	Nanopartikel Pd dan TiO ₂ memiliki ukuran rata-rata masing-masing 8 nm dan 11 nm, menunjukkan bahwa luas permukaan elektrokimia yang aktif dari katalisator hibrida Pd-TiO ₂ *1/RGO adalah 105,0 m ² /gPd, 5,7 dan 3,6 kali lebih besar daripada katalisator Pd/C dan Pd/RGO secara berturut-turut

Tabel 2.2 Penelitian nanopartikel Co_3O_4 sebagai katalisator elektrolisis air

Peneliti (Tahun)	Material nanopartikel	Hasil
Mu et al., 2013	NPs Co_3O_4	Energi aktivasi NPs Co_3O_4 ditentukan menjadi $-43,3 \text{ KJ mol}^{-1}$ yang sama dengan $42,8 \text{ KJ mol}^{-1}$ dari katalase. Perilaku katalitik NPs Co_3O_4 menunjukkan kinetika Michaelis-Menten yang khas dan afinitas yang baik terhadap H_2O_2 . konstanta spesifik NPs Co_3O_4 sangat dekat dengan katalase. Berdasarkan hasil, NPs Co_3O_4 adalah katalase yang efisien
Jayas eelan et al., 2020	$\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Ppy}/\text{C}$	Nanopartikel Co_3O_4 berbentuk bulat dengan ukuran 8-10 nm ditemukan terdistribusi secara merata pada komposit Ppy/C, yang dianalisis dengan teknik difraksi sinar-X dan mikroskopi transmisi elektron. Di antaranya, $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Ppy}/\text{MWCNT}$ menunjukkan aktivitas elektrokatalitik bifungsional yang ditingkatkan terhadap kedua OER dan HER dengan potensial over yang relatif rendah (340 mV vs. 490 mV pada 10 mA cm^{-2}) dan kemiringan Tafel (87 vs. 110 mV dec^{-1})
QayoomMug heri et al., 2019	Co_3O_4 dan NiO	Co_3O_4 dan NiO, dengan komposit yang dihasilkan menunjukkan sifat yang baik sebagai katalis untuk elektrolisis air alkalin. Aktivitas bahan komposit terhadap HER dan OER meningkat dan potensial dinamis menurun, kemiringan Tafel rendah sebesar 101 dan 61 mVdec ditemukan untuk katalis komposit untuk OER dan HER secara berturut-turut
Wu et al., 2018	Co_3O_4	Co_3O_4 dengan struktur ini tidak hanya mengandung cacat oksigen dan gugus hidroksil pada permukaannya, tetapi juga memiliki luas permukaan elektrokimia yang tinggi. Efek sinergis ini membuatnya menjadi katalisator efisiensi tinggi untuk HER dan OER. Kinerja yang baik termanifestasi dalam HER dalam medium alkalin hanya membutuhkan tegangan sebesar $77,9 \text{ mV}$ untuk kepadatan arus 10 mA cm^{-2} , dan OER membutuhkan tegangan sebesar $301,2 \text{ mV}$ untuk kepadatan arus 10 mA cm^{-2} , sementara selama pemecahan air secara keseluruhan, hanya membutuhkan $1,60 \text{ V}$ untuk kepadatan arus 10 mA cm^{-2} . Uji

daya tahan juga menunjukkan kinerja yang baik dari bahan ini baik untuk proses HER maupun OER dengan waktu toleransi dari uji kurva Chronoamperometry (j-t) selama 20 jam

Tabel 2.3 Penelitian nanopartikel Fe₂O₃ sebagai katalisator elektrolisis air

Peneliti (Tahun)	Material nanopartikel	Hasil
Fu et al., 2019	Fe ₂ O ₃₍₁₎ -Co ₍₁₎ NPs-N-GR	Fe ₂ O ₃₍₁₎ -Co ₍₁₎ NPs-N-GR menunjukkan kinerja HER yang lebih baik, Kinerja elektrokatalitik Fe ₂ O ₃₍₁₎ -Co ₍₁₎ NPs-N-GR terhadap HER lebih baik dalam larutan asam (0,5 M H ₂ SO ₄) daripada dalam larutan alkali (1,0 M NaOH), dengan potensial awal adalah 0,36 V, kemiringan Tafel adalah 66 mV dec ⁻¹ , dan kepadatan arus 10 mA cm ⁻² pada potensial awal adalah 0,39 V
Bandal et al., 2016	Fe ₂ O ₃	Kondisi berongga dan kristalinitas rendah memberikan peningkatan luas permukaan elektrokimia yang aktif dan jumlah saluran transportasi yang lebih besar untuk difusi elektrolit. Sementara itu, nanotube karbon menyebabkan penurunan signifikan dalam resistansi yang terkait dengan proses faradi. Akibatnya, komposit Fe ₂ O ₃ /nanotube karbon menunjukkan aktivitas katalitik yang sangat baik yang lebih unggul daripada Fe ₂ O ₃ , nanotube karbon, dan campuran fisiknya
Liu et al., 2015	Fe ₂ O ₃ /CNTs/FTO	Voltametri pulsa diferensial berhasil digunakan untuk mengkuantifikasi hidrokuinon dalam rentang konsentrasi 1.0~80.0 μM di bawah kondisi optimal. Batas deteksi elektroda Fe ₂ O ₃ /CNTs/FTO untuk hidrokuinon adalah 0,50 μM (S/N = 3). Elektroda ini kemudian diterapkan untuk menguji hidrokuinon dalam air keran dan elektroda Fe ₂ O ₃ /CNTs/FTO juga menunjukkan stabilitas yang baik dan reproduktibilitas yang tinggi, membuktikan potensi elektroda Fe ₂ O ₃ /CNTs sebagai sensor elektrokimia yang baik
Song et al., 2017	Pt-Fe ₂ O ₃ /C-R	Aktivitas massa dan aktivitas spesifik Pt dalam katalis Pt-Fe ₂ O ₃ /C-R adalah 5,32 A/mgPt dan 162,7 A/m ² Pt, berturut-turut, yang kira-kira 1,67 dan 2,04 kali lipat dan 4,19 dan 6,16 kali lipat

Studi terbaru tentang nanopartikel TiO₂ sebagai katalisator elektrolisis air menunjukkan bahwa berbagai komposisi seperti Co-TiO₂ dan TiO₂-Sr memiliki kemampuan untuk meningkatkan efisiensi produksi H₂ dan O₂ dengan kemiringan Tafel rendah. Sementara itu, nanopartikel Ni₂P, NiCoP, dan FeP dalam komposit dengan TiO₂ menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang signifikan, sedangkan katalisator Pd-TiO₂/RGO menunjukkan luas permukaan elektrokimia yang meningkat. Studi pada nanopartikel Co₃O₄ dan Fe₂O₃ juga mengungkapkan kemampuan tinggi dalam HER dan OER, dengan beberapa komposit seperti Co₃O₄/Ppy/C dan Fe₂O₃/CNTs/FTO menunjukkan resistansi rendah dan stabilitas tinggi dalam aplikasi elektrokimia.

4. KESIMPULAN

Studi mengenai nanopartikel TiO₂, Co₃O₄, dan Fe₂O₃ sebagai katalisator dalam elektrolisis air menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi produksi H₂ dan O₂. TiO₂ bercampur dengan Co dan Sr menunjukkan kemampuan untuk menghasilkan arus maksimum dengan potensial onset yang rendah, sementara komposit Ni₂P, NiCoP, dan FeP/TiO₂ menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang signifikan. Katalisator Pd-TiO₂/RGO menampilkan luas permukaan elektrokimia yang lebih besar. Co₃O₄ dan Fe₂O₃ menunjukkan aktivitas tinggi dalam HER dan OER, dengan beberapa komposit seperti Co₃O₄/Ppy/C dan Fe₂O₃/CNTs/FTO menunjukkan resistansi rendah dan stabilitas tinggi dalam aplikasi elektrokimia.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya pada LPPM Universitas Pasir Pengaraian atas dukungan yang telah diberikan dalam penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. R. Muhammad Younas, Sumeer Shafique, Ainy Hafeez, Fahad Javed, "An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges," *Fuel*, vol. 316, no. 123317, p. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>, 2022.
- [2] K. Christopher and R. Dimitrios, "A review on exergy comparison of hydrogen production methods from renewable energy sources," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 5, pp. 6640–6651, 2012, doi: 10.1039/c2ee01098d.
- [3] T. Abbasi and S. A. Abbasi, "'Renewable' hydrogen: Prospects and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 3034–3040, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.02.026.
- [4] A. M. Abdalla, S. Hossain, O. B. Nisfindy, A. T. Azad, M. Dawood, and A. K. Azad, "Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 165, no. March, pp. 602–627, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.03.088.
- [5] N. Akhlaghi and G. Najafpour-Darzi, "A comprehensive review on biological hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 43, pp. 22492–22512, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.182.
- [6] H. Ishaq and I. Dincer, "Comparative assessment of renewable energy-based hydrogen production methods," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, no. August 2020, p. 110192, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110192.
- [7] A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V. Reddy, "Solar hydrogen production: A comparative performance assessment," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 17, pp. 11246–11257, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.122.
- [8] S. Anwar, F. Khan, Y. Zhang, and A. Djire, "ScienceDirect Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water

- electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 63, pp. 32284–32317, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.191.
- [9] M. Luo *et al.*, “Review of hydrogen production using chemical-looping technology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. June, pp. 3186–3214, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.007.
- [10] A. Tanksale, J. N. Beltramini, and G. Q. M. Lu, “A review of catalytic hydrogen production processes from biomass,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 166–182, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.08.010.
- [11] J. Baeyens *et al.*, “Reviewing the potential of bio-hydrogen production by fermentation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 131, no. March, p. 110023, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110023.
- [12] J. D. Holladay, J. Hu, D. L. King, and Y. Wang, “An overview of hydrogen production technologies,” *Catal. Today*, vol. 139, no. 4, pp. 244–260, 2009, doi: 10.1016/j.cattod.2008.08.039.
- [13] T. Keskin, M. Abo-Hashesh, and P. C. Hallenbeck, “Photofermentative hydrogen production from wastes,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 18, pp. 8557–8568, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.04.004.
- [14] G. E. Ahmad and E. T. El Shenawy, “Optimized photovoltaic system for hydrogen production,” *Renew. Energy*, vol. 31, no. 7, pp. 1043–1054, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.05.018.
- [15] M. Momirlan and T. Veziroğlu, “Recent directions of world hydrogen production,” *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 3, no. 2, pp. 219–231, 1999, doi: 10.1016/S1364-0321(98)00017-3.
- [16] S. Shiva Kumar and H. Lim, “An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13793–13813, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.127.
- [17] M. El-Shafie, “Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review,” *Results Eng.*, vol. 20, no. July, p. 101426, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101426.
- [18] J. Chi and H. Yu, “Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production,” *Cuihua Xuebao/Chinese J. Catal.*, vol. 39, no. 3, pp. 390–394, 2018, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8.
- [19] K. G. dos Santos *et al.*, “Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. September 2016, pp. 563–571, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.128.
- [20] M. M. Rashid, M. K. Al Mesfer, H. Naseem, and M. Danish, “Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis,” *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, no. 3, pp. 2249–8958, 2015.
- [21] M. Lin, L. Hourng, and C. Kuo, “The effect of magnetic force on hydrogen production efficiency in water electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1311–1320, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.024.
- [22] A. Kova, D. Marciu, and L. Budin, “ScienceDirect Solar hydrogen production via alkaline water electrolysis,” no. xxxx, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.007.
- [23] L. Amodio, M. Pagano, and F. Guti, “ScienceDirect Hydrogen production by water electrolysis and off- grid solar PV,” no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.098.
- [24] N. Bidin *et al.*, “ScienceDirect The effect of sunlight in hydrogen production from water electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.203.
- [25] L. Gustavo, M. Vieira, and R. Damasceno, “ScienceDirect Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use,” vol. 3, pp. 0–10, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.051.
- [26] H. Tebibel and R. Medjebour, “ScienceDirect Comparative performance analysis of a grid connected PV system for hydrogen production using PEM

- water, methanol and hybrid sulfur electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–17, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.084.
- [27] J. Kim *et al.*, “Hybrid-solid oxide electrolysis cell: A new strategy for efficient hydrogen production,” *Nano Energy*, 2017, doi: 10.1016/j.nanoen.2017.11.074.
- [28] S. S. Kumar, S. U. B. Ramakrishna, S. V. Krishna, K. Srilatha, B. R. Devi, and V. Himabindu, “Synthesis of titanium (IV) oxide composite membrane for hydrogen production through alkaline water electrolysis,” *South African J. Chem. Eng.*, vol. 25, pp. 54–61, 2018, doi: 10.1016/j.sajce.2017.12.004.
- [29] I. Vincent, A. Kruger, and D. Bessarabov, “ScienceDirect Development of efficient membrane electrode assembly for low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.069.
- [30] A. Marone *et al.*, “ScienceDirect Coupling dark fermentation and microbial electrolysis to enhance bio-hydrogen production from agro-industrial wastewaters and by-products in a bio-refinery framework,” 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.166.
- [31] F. Almomani, A. Al-rababah, M. Tawalbeh, and A. Al-othman, “A comprehensive review of hydrogen generation by water splitting using 2D nanomaterials: Photo vs electro-catalysis,” *Fuel*, vol. 332, no. P1, p. 125905, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125905.
- [32] T. Jayabalan, M. Matheswaran, and V. Preethi, “Enhancing biohydrogen production from sugar industry wastewater using metal oxide/graphene nanocomposite catalysts in microbial electrolysis cell,” *Int. J. Hydrogen Energy*, no. xxxx, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.068.
- [33] K. H. K. Majumder Sutripto, Xiaopeng Su, “Effective strategy of incorporating Co₃O₄ as a co-catalyst onto an innovative BiVO₄/Fe₂TiO₅ core-shell heterojunction for effective photoelectrochemical water-splitting application,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 39, no. 102936, 2023.
- [34] M. S. Farooq Anza, Sidra Khalil, Beriham Basha, Amir Habib, Muhammad Farooq Warsi, Sheraz Yousaf, “Electrochemical investigation of C-doped CoFe₂O₄/Fe₂O₃ nanostructures for efficient electrochemical water splitting,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 51, no. B, pp. 1318–1332, 2024.
- [35] C. K. Quang Nguyen Duc, Weiguang Hu, Hyo Sik Chang, Phuoc Cao Van, Duc Duong Viet, Jong-Ryul Jeong, Dong-Bum Seo, Eui-Tae Kim, “Fe₂O₃ hierarchical tubular structure decorated with cobalt phosphide (CoP) nanoparticles for efficient photoelectrochemical water splitting,” *Chem. Eng. J.*, vol. 471, p. 129278, 2021.