

# PRODUKSI HIDROGEN DARI AIR LAUT MENGUNAKAN METODE ELEKTROLISIS BERBANTUAN ELEKTROKATALIS

Febiana Natasha\*, Ezra Solafide Hutajulu, Hilfi Pardi

<sup>1</sup>Pendidikan Kimia, Universitas Maritim Raja Ali Haji, Indonesia;

Email : febia6616@gmail.com (F.N), ezrahutajulu31@gmail.com (E.S.H), hilfipardi@umrah.ac.id (H.P)

**Abstrak** : Hidrogen berpotensi sebagai sumber energi bersih yang ideal untuk menurunkan emisi karbondioksida di masa depan. Hal ini dikarenakan hidrogen memiliki kepadatan energi yang tinggi sekitar 142.351 MJ/kg dan bebas dari gas beracun. Maka dari itu, diperkirakan permintaan hidrogen akan meningkat sekitar 18% pada tahun 2050 guna memasok energi pengganti bahan bakar fosil. Tujuan penelitian, yakni untuk merangkum reaksi-reaksi redoks pada elektroda dalam metode elektrolisis air laut, menampilkan berbagai elektrokatalis dalam memproduksi hidrogen dari air laut, dan elektrolisis sebagai media pendukung berlangsungnya proses produksi hidrogen air laut. Hasil yang ditunjukkan adalah adanya 3 reaksi redoks dalam elektrolisis air laut yang terdiri atas Oxygen Evolution Reaction (OER), Chlorine Evolution Reaction (CER), dan Hydrogen Evolution Reaction (HER). Adapun elektrokatalis yang efisien dalam mendukung reaksi HER sebanyak 25 buah. Selanjutnya, terdapat 4 elektrolit yang mendukung kinerja dari reaksi elektrolisis air laut dalam memproduksi hidrogen adalah H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl, KOH dan NaOH. Oleh karena itu, pengembangan hidrogen dari air laut secara lebih lanjut patut dikembangkan guna terwujudnya Net Zero Emission.

**Kata Kunci** : Hidrogen, Air Laut, Elektrolisis, Elektrokatalis, Elektrolit

**Abstract** : Hydrogen is potentially an ideal clean energy source to reduce carbon dioxide emissions in the future. This is because hydrogen has a high energy density of about 142,351 MJ/kg and is free of toxic gases. Therefore, it is estimated that the demand for hydrogen will increase by about 18% by 2050 to supply energy to replace fossil fuels. The objectives of the study were to summarize the redox reactions at the electrodes in the seawater electrolysis method, to show various electrocatalysts in producing hydrogen from seawater, and electrolysis as a supporting medium for the seawater hydrogen production process. The results shown are the existence of 3 redox reactions in seawater electrolysis consisting of Oxygen Evolution Reaction (OER), Chlorine Evolution Reaction (CER), and

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2024, Vol. 5, No. 2, pp 115 – 129

Received : 23 Juni 2024

Accepted : 25 Juli 2024

Published : 31 Juli 2024



**Copyright**: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

Hydrogen Evolution Reaction (HER). There are 25 electrocatalysts that are efficient in supporting the HER reaction. Furthermore, there are 4 electrolytes that support the performance of seawater electrolysis reaction in producing hydrogen are H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl, KOH and NaOH. Therefore, further development of hydrogen from seawater should be developed in order to realize Net Zero Emission.

**Keywords** : *Hydrogen, Seawater, Electrolisys, Electrocatalyst, Electrolyte*

---

## 1. Pendahuluan

Hidrogen berpotensi sebagai sumber energi bersih yang ideal untuk menurunkan emisi karbondioksida di masa depan (Jiang et al., 2022). Hal ini dikarenakan hidrogen memiliki kepadatan energi yang tinggi sekitar 142.351 MJ/kg (Q. Wang et al., 2024). Selain itu, satu-satunya produk yang dihasilkan saat pemanfaatan hidrogen adalah uap air, yang bebas dari gas beracun (Sazali, 2020). Maka dari itu, diperkirakan permintaan hidrogen akan meningkat sekitar 18% pada tahun 2050 (Safari & Dincer, 2020), guna memasok energi pengganti bahan bakar fosil.

Hidrogen sendiri dapat diperoleh dari air laut. Pasalnya, air laut memiliki kelimpahan yang lebih luas dibandingkan dengan air tawar sekitar 97% (G. Wang et al., 2024). Melihat dari kelimpahan tersebut, kini, banyak peneliti yang fokus melakukan pengembangan lebih lanjut dalam produksi hidrogen dari air laut.

Salah satu metode yang dapat digunakan dalam melakukan pemisahan air laut guna memperoleh hidrogen adalah metode elektrolisis. Elektrolisis lebih unggul dibandingkan dengan metode lainnya sebab aktivitas keseluruhannya sangat tinggi dibandingkan metode fotokatalitik dan PEC yang bergantung pada cahaya matahari (Dingenen & Verbruggen, 2021). Metode ini terdiri dari dua setengah reaksi, yakni reaksi evolusi oksigen dan reaksi evolusi klorin di anoda dan reaksi evolusi hidrogen di katoda (G. Wang et al., 2024). Dalam produksi hidrogen, reaksi yang difokuskan adalah reaksi evolusi hidrogen (HER).

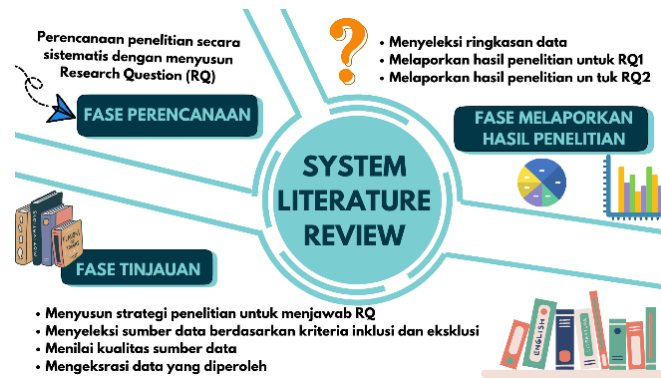
Dalam reaksi tersebut, diperlukan elektrokatalis yang berperan penting dalam menurunkan energi aktivasi reaksi. Hal ini disebabkan kinetika yang dihasilkan sangat lambat sehingga berakibat pada potensi berlebih yang tinggi (Zou et al., 2019). Meskipun demikian, pengembangan elektrokatalis yang sangat aktif dan stabil masih menjadi tantangan bagi dinamika reaksi evolusi hidrogen saat ini (Feng et al., 2023).

Oleh karena itu, penelitian ini ditujukan untuk merangkum reaksi-reaksi redoks pada elektroda dalam metode elektrolisis air laut. Selanjutnya, penelitian ini menampilkan berbagai elektrokatalis yang luar biasa dengan stabilitas dan kinerja yang baik dalam memproduksi hidrogen dari air laut. Selain itu, dirangkum pula mengenai elektrolisis sebagai media pendukung berlangsungnya proses produksi hidrogen air laut. Dengan adanya hal tersebut, diharapkan dapat menjadi usulan solusi yang efisien dalam mewujudkan Net Zero Emission 2050.

## 2. Metode Penelitian

Peneliti dalam studi ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) yang di mana dilaksanakan tanpa menentukan tempat tertentu karena sumber data diperoleh secara *online*. Menurut Larasati et al. (2021), Systematic Literature Review (SLR) merupakan metode analisis untuk melakukan studi kasus dengan cara yang disesuaikan dengan analisis fase demi fase tertentu. Metode SLR

menggunakan tiga fase yakni fase perencanaan, fase tinjauan, dan melaporkan hasil penelitian seperti pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Metode System Literature Review

Adapun fase-fase penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

a) Fase Perencanaan

Pada fase ini, peneliti menyusun Research Question (RQ) untuk memastikan kelancaran secara sistematis. Research Question (RQ) disusun untuk memberikan sebuah rancangan dari metode ini. Fase ini dilaksanakan pada tanggal 01-30 April 2024 yang menghasilkan daftar dari RQ yakni sebagai berikut:

RQ1: Apa saja jenis reaksi-reaksi redoks pada elektroda dalam metode elektrolisis air laut?

RQ2: Apa saja jenis-jenis elektrokatalis yang dapat digunakan dalam reaksi evolusi hidrogen untuk memproduksi hidrogen dari air laut?

RQ3: Apa saja elektrolit yang dapat mendukung keberlangsungan dari reaksi elektrokimia dalam mengelektrolisis air laut guna memproduksi hidrogen?

b) Fase Tinjauan

Pada fase tinjauan, peneliti dilaksanakan dari tanggal 01-31 Mei 2024. Mula-mula, dilakukan penyusunan strategi guna mengidentifikasi topik penelitian yang akan membantu dalam memahami RQ. Ada tiga tahapan dalam fase ini yakni mengidentifikasi kata kunci, menentukan sumber data dan proses mencari sumber data. Pada studi ini, kata kunci yang digunakan adalah *hydrogen*, *seawater*, *electrolisis*, *electrocatalyst*, dan *electrolyte*. Selanjutnya, sumber data ditentukan rentang tahun publikasinya di mana mencakup pada tahun 2019-2024. Data-data ini kemudian dicari dalam laman Google Scholar, Scienccedirect, IEEE, Linkspringer, dan MDPI. Terakhir, data yang didatangi oleh peneliti sebanyak 425 artikel. Selanjutnya, artikel dilakukan penyeleksian berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Penyeleksian ini dilaksanakan dengan membaca judul dan abstrak untuk melihat kesesuaian dengan kriteria-kriteria tersebut. Berikut tabel kriteria inklusi dan eksklusi yang digunakan dalam studi ini.

**Tabel 1.**  
 Kriteria Inklusi dan Eksklusi (Larasati et al., 2021)

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel ini berfokus pada jenis reaksi-reaksi redoks, elektrokatalis, dan elektrolit dalam memproduksi gas hidrogen dari air laut menggunakan metode elektrolisis.	Artikel ini tidak berfokus pada jenis reaksi-reaksi redoks, elektrokatalis, dan elektrolit dalam memproduksi gas hidrogen dari air laut menggunakan metode elektrolisis.
Artikel mampu menjawab setidaknya satu RQ.	Artikel tidak mampu menjawab setidaknya satu RQ.

---

Artikel yang digunakan berbahasa Inggris.

Artikel yang digunakan tidak berbahasa Inggris.

---

Artikel yang sesuai dengan kriteria kemudian dinilai untuk memastikan kualitas. Kualitas studi ini ditentukan berdasarkan kejelasan dari tujuan penelitian. Selain itu, keselarasan antara tujuan dan hasil menjadi bahan pertimbangan dalam penilaian kualitas studi. Artikel yang dipilih akan diekstraksi datanya sesuai kekhasan RQ.

c) Fase Melaporkan Hasil

Pada fase ini, dilakukan penelitian dari tanggal 01-19 Juni 2024. Fase ini dimulai dari menyeleksi kembali artikel yang sudah diseleksi dengan melihat kesesuaian dengan Research Question (RQ). Jumlah artikel yang diperoleh adalah 45 artikel yang dijadikan bahan untuk menjawab RQ. RQ1 dilaporkan dengan menggunakan 12 artikel yang dipilih. RQ2 dilaporkan dengan menggunakan 25 artikel yang dipilih. Sementara itu, RQ3 dilaporkan dengan menggunakan 9 artikel yang dipilih.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Reaksi Redoks pada Elektroda dalam Metode Elektrolisis

Elektrolisis air laut merupakan teknologi transformatif untuk produksi hidrogen berkelanjutan tanpa menyebabkan kelangkaan air tawar (L. Yu et al., 2022). Hal ini dikarenakan kelimpahan dan aksesibilitas sumber daya air laut di bumi, terutama yang terletak di dekat garis pantai laut (Dresp et al., 2019). Selain itu, elektrolisis juga memungkinkan jalur desalinasi air laut dalam cakupan besar (F. Zhang et al., 2021).

Elektrolisis memiliki dua elemen penting yang terdiri dari elektroda anoda dan elektroda katoda (Elahi & Seddighi, 2024). Reaksi yang berlangsung pada katoda, yakni reaksi reduksi dan pada anoda, yakni reaksi oksidasi. Reaksi-reaksi redoks pada elektroda tersebut sebagai berikut:

1. Oxygen Evolution Reaction (OER)

Oxygen Evolution Reaction (OER) merupakan reaksi yang membatasi terbentuknya oksigen molekuler melalui kimia (Ghosh & Rahaman, 2019) dalam pemisahan air dan baterai logam-udara yang dapat diisi ulang (Mohammed-Ibrahim, 2020). Penggunaan OER dalam memproduksi hidrogen melalui elektrolisis air memiliki kelemahan, yakni kinetika transfer multi-elektron sangat lamban dan reaksi yang terhambat secara keseluruhan sangat tinggi (Guo et al., 2023). Oleh karenanya, OER perlu memiliki kerapatan arus sebesar 500-1000 mA cm<sup>-2</sup> pada potensial berlebih jauh di bawah 490 mV agar hipoklorit tidak terbentuk (L. Yu et al., 2019).

2. Chlorine Evolution Reaction (CER)

Chlorine Evolution Reaction (CER) adalah reaksi yang digunakan untuk pemisahan air laut dengan elektrokatalitik dengan efisien dan lebih ramah lingkungan (Tang et al., 2023). CER dapat digunakan dalam larutan basa dengan hipoklorit sebagai oksidasi (C. Ma et al., 2020). Aktivitas katalis CER yang tinggi ini membutuhkan elektrokatalis yang stabil dan efisien guna memperpanjang masa pakai elektroda (Y. Wang et al., 2021). Pasalnya, proses ini memakan 250 TWh per tahun yang mengakibatkan banyak energi yang hilang (Lim et al., 2023). Tidak hanya itu, hasil katoda berupa hidrogen yang melewati membran akan bercampur dengan oksigen yang merupakan produk sampingan sehingga berpotensi mengakibatkan ledakan dan tambahan biaya yang besar (Exner et al., 2022).

3. Hydrogen Evolution Reaction (HER)

Hydrogen Evolution Reaction (HER) merupakan reaksi katodik yang digunakan dalam pemisahan air elektrokimia yang dapat dilakukan dalam larutan asam kuat atau basa (Lasia, 2019). HER digunakan dalam proses pemantauan perubahan struktural elektrokatalitik (Kibler et al., 2018). Dalam prosesnya, elektrokatalis memberikan pengaruh yang besar karena potensi berlebih yang tinggi diperlukan (P. Yu et al., 2019). Maka dari itu, diperlukan elektrokatalis yang efisien dan kuat guna menghasilkan hidrogen murni melalui pemisahan air dalam larutan yang diinginkan.

### 3.2. Jenis-Jenis Elektrokatalis

Elektrolisis air laut memiliki tantangan, yakni air laut bersifat rendah konduktivitas dan korosivitas tinggi (Elahi & Seddighi, 2024). Selain itu, adanya bakteri dan mikroba yang menekan aktivitas HER juga menjadi tantangan dalam penerapan elektrolisis air. Maka dari itu, diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas, salah satunya adalah penemuan elektrokatalis (Zheng, 2017).

Berikut ini elektrokatalis yang mampu digunakan dalam reaksi evolusi hidrogen sebagai bagian dari elektrolisis air laut guna memproduksi hidrogen.

#### 1. Nanoarray CoNC Bifungsional

Katalis Nanoarray CoNC Bifungsional digunakan dalam penelitian (Xin et al., 2023). Xin et al. (2023) menyatakan bahwa susunan Nanoarray CoNC Bifungsional secara efisien dalam mengkatalisis reaksi oksidasi hidrazin dan reaksi evolusi hidrogen sehingga konsumsi energi dapat berkurang dan mengatasi masalah korosi anodik akibat ClOR. Pengoptimalan katalis ini hanya membutuhkan tegangan sel ultra-rendah sebesar 0,557 V dan konsumsi listrik sebesar 1,22 kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Tidak hanya itu, katalis yang dioptimalkan dengan bantuan hidrazin dapat bekerja stabil di atas 40 jam pada ≈10 mA/cm<sup>2</sup>. Maka dari itu, metode dengan katalis ini dapat memberikan peluang besar untuk menghasilkan energi hidrogen dari air laut yang lebih ramah lingkungan.

#### 2. CoO<sub>x</sub>@CN

Menurut Jin et al. (2015), hibrida karbon kobalt-kobalt oksida/N-doped (CoO<sub>x</sub>@CN) memberikan hasil kerja yang menjanjikan dalam meningkatkan produksi hidrogen melalui HER. Katalis ini memberikan hasil baik dengan berbagai sisi mulai dari konduktivitas karbon, efek sinergis dari logam kobalt dan kobalt oksida, stabilitas nanopartikel Co yang terenkapsulasi karbon, dan pengenalan nitrogen yang kaya elektron. Tidak hanya itu, katalis ini juga bisa digunakan dengan baik pada anoda dengan reaksi evolusi oksigen.

#### 3. Aerogel Quantum Dot MoS<sub>2</sub>

Chen et al. (2019) mengungkapkan bahwa MoS<sub>2</sub> QD-aerogel dapat mempercepat kinerja reaksi evolusi hidrogen (HER). Dengan katalis ini, kinerja HER lebih stabil meskipun dilakukan pemindaian berturut-turut selama 150 siklus. Sementara itu, aktivitas HER dapat mengungguli Pt dalam kondisi netral sehingga hidrogen dapat dihasilkan guna aplikasi energi bersih.

#### 4. Mo<sub>2</sub>TiC<sub>2</sub>T<sub>x</sub>

Katalis sintesis lembaran nano MXene logam transisi ganda—Mo<sub>2</sub>TiC<sub>2</sub>T<sub>x</sub> dalam penelitian Zhang et al. (2018) terbukti menawarkan aktivitas katalis terhadap HER dapat meningkat. Pengembangan kemampuan katalis mampu memiliki kinerja yang baik pada potensi berlebih yang rendah sebesar 30 dan 77 mV untuk mencapai 10 dan 100 mA cm<sup>-2</sup> dan aktivitas massa sekitar 40 kali lebih besar. Selain itu, katalis yang diimobilisasi dengan atom Pt tunggal bisa

menunjukkan kestabilan yang tinggi karena katalis atom tunggal bisa mempertahankan aktivitas tinggi pada pemuatan logam mulia serendah mungkin.

#### 5. CoMoP@C

Y. Ma et al. (2017) menyatakan bahwa nanokristal kobalt molibdenum fosfida dapat meningkatkan efisiensi Faradaic sebesar 92,5% dan aktivitas HER sebesar 20% Pt/C menurun drastis setelah 4 jam. Kinerja HER yang baik ini berkaitan dengan energi bebas H yang rendah pada inti kristal CoMoP pusat dan berbagai fungsi kulit C terdoping N bagian luar.

#### 6. Ru<sub>1+NP<sub>s</sub></sub>/N-C

Dalam penelitian S. Wang et al. (2022), Ru<sub>1+NP<sub>s</sub></sub>/N-C digunakan sebagai bahan katalik yang terbuat dari situs atom tunggal Ru-N<sub>4</sub> dan nanopartikel Ru yang terletak pada karbon yang didoping nitrogen dengan metode koordinasi-pirolisis resin melamin formaldehida. Dengan katalis ini, aktivitas HER yang sangat baik dengan potensi berlebih terkecil, rendahnya kemiringan afel, aktivitas massa dan frekuensi pergantian tertinggi, dan stabilitas yang sangat baik dalam media asam dan basa. Selain itu kinerja produksi hidrogen dengan menggunakan katalis ini sebanding dan efisiensi faradik yang lebih tinggi 20% Pt/C dalam air laut alami dan air laut simulasi buatan. Perhitungan teoritis menunjukkan bahwa efek sinergis yang kuat antara situs Ru-N<sub>4</sub> dan nanopartikel Ru memodifikasi struktur elektronik untuk mempercepat kinetika HER. Partikel nano Ru dapat secara efektif mewujudkan disosiasi H<sub>2</sub>O untuk menghasilkan hidrogen teradsorpsi dan juga mempromosikan situs atom tunggal Ru-N<sub>4</sub> untuk menggabungkan hidrogen teradsorpsi menjadi H<sub>2</sub> dan desorpsi.

#### 7. NiN<sub>3</sub>

Zang et al. (2021) mengungkapkan bahwa katalis NiN<sub>3</sub> dapat meningkatkan kinerja HER dalam media basa secara efisien. Elektrokatalis menyebabkan potensi berlebih serendah 120 dan 139 mV pada 10 mA cm<sup>-2</sup>. Selain itu, hasil elektrokatalis berupa kepadatan arus yang besar melebihi 200 mA.cm<sup>-2</sup> dibandingkan Pt/C selama 14 hari.

#### 8. MXene-karbida bimetalik-karbon hibridisasi

Katalik kolaborasi antara MXene, karbida bimetalik, dan karbon hibridisasi digunakan oleh Wu et al. (2019). Kombinasi ini memberikan kinerja yang sangat baik dalam air laut alami di mana dapat beraktivitas selama 225 jam, 64 kali lipat daripada Pt/C dengan efisiensi Faradaic 98%. Dengan hasil ini, dapat menunjukkan bahwa rancangan elektrokatalis dapat mengatur energi kimia pada kondisi operasi luas secara efektif.

#### 9. Ni-SN@C

Katalis nitrida permukaan nikel tak jenuh (Ni-SN@C) dalam penelitian oleh Jin et al. (2021) terbukti efisien dalam melakukan pemisahan air laut untuk menghasilkan hidrogen. Katalis ini mampu mencapai potensi berlebih yang rendah sebesar 23 mV pada kerapatan arus 10 mA cm<sup>-2</sup> dalam elektrolit air laut basa. Selain itu, Ni-SN@C bekerja seperti Pt dengan kemampuan menghasilkan ion hidronium dalam elektrolit pH tinggi.

#### 10. NiFeCrVTi

Liu et al. (2024) menyatakan bahwa paduan entropi tinggi NiFeCrVTi yang diukir dengan laser menunjukkan struktur unik yang disusun secara berkala dengan banyak pusat aktif dan porositas tinggi. Ni-HEA-30 menampilkan kinerja reaksi evolusi hidrogen yang luar biasa dengan potensi berlebih 55,9 mV dan kemiringan Tafel 47,3 mV pada 1 Desember di air laut. Perhitungan teori fungsional kepadatan diterapkan untuk mengidentifikasi situs aktif nyata

untuk HER pada permukaan HEA sebagai faktor kunci untuk transformasi proton dan perantara, yang juga mengungkapkan bahwa atom Cr mendorong energi adsorpsi molekul air, dan modulasi struktur elektronik memainkan peran penting dalam mengoptimalkan kemampuan pengikatan hidrogen atom Ni dalam paduan. Selain itu, elektrokatalis menunjukkan ketahanan korosi yang tinggi pada air laut, sehingga berkontribusi terhadap ketahanan yang baik untuk produksi hidrogen.

#### 11. Mo(NiFeCo)<sub>4</sub>

Shi et al. (2023) menunjukkan bahwa nanopartikel Mo(NiFeCo)<sub>4</sub> intermetalik multikomponen yang terintegrasi secara mulus pada jaringan nikel hierarkis (Mo(NiFeCo)<sub>4</sub>/Ni) sebagai elektrokatalis evolusi hidrogen yang kuat. Elektrokatalis jenis ini dapat beraktivitas dan memiliki daya tahan yang jauh lebih baik dengan memanfaatkan atom besi dan kobalt yang sebagian menggantikan nikel. Hal ini dibuktikan dengan kemiringan Tafel rendah ( $\approx 35$  mV Desember<sup>-1</sup>), kepadatan arus tinggi ( $\approx 2300$  mA cm<sup>-2</sup>) pada potensi berlebih rendah (200 mV) dan daya tahan jangka panjang dalam 1 M KOH.

#### 12. BNR Fe-Co<sub>2</sub>P

Lin et al. (2021) menyediakan bundel nanorods (BNR) Fe-Co<sub>2</sub>P baru untuk mengkatalisis HER dalam elektrolisis air laut dan pada seluruh rentang pH. Kobalt fosfida dengan fase kristal dan morfologi berbeda diperoleh dengan memvariasikan jumlah doping Fe. Rasio molar Co:Fe sebesar 1:0,5 ditemukan optimal. NR Fe-Co<sub>2</sub>P menunjukkan aktivitas katalitik yang lebih tinggi dibandingkan 20% Pt/C dalam air laut dengan potensi tinggi. Perhitungan teori fungsi kepadatan mengungkapkan bahwa doping Fe mengurangi kekuatan pengikatan hidrogen Co<sub>2</sub>P untuk mempercepat kinetika HER secara efisien dan menghasilkan kepadatan muatan yang menguntungkan.

#### 13. Co<sub>3</sub>Mo<sub>3</sub>C/CNT

Zhao et al. (2016) mendesain elektrokatalis Co<sub>3</sub>Mo<sub>3</sub>C/CNT bekerja melalui metode dekomposisi termal sederhana untuk reaksi evolusi hidrogen dengan efisiensi tinggi dari air laut. Elektrokatalis mampu menghasilkan potensi berlebih permulaan serendah 42 mV dan rapat arus pertukaran hingga 0,415 mA cm<sup>-2</sup> di air laut. Khususnya, elektrokatalis Co<sub>3</sub>Mo<sub>3</sub>C/CNT yang dihasilkan menunjukkan stabilitas yang menjanjikan ketika mengalami operasi terus-menerus selama 26 jam di air laut.

#### 14. Ni-Co@Fe-Co PBA

H. Zhang et al. (2023) dalam penelitiannya menyatakan bahwa elektrokatalis PBA Ni-Co@Fe-Co yang dikembangkan menunjukkan kinerja evolusi hidrogen elektrokatalitik yang luar biasa dalam air laut basa. Aktivitas elektrokatalik ini sangat tinggi dengan potensi berlebih kecil sebesar 43 dan 183 mV untuk menggerakkan kerapatan arus 10 mA cm<sup>-2</sup> masing-masing dalam air tawar alkali dan air laut simulasi. Selain itu, elektrokatalis ini juga mencapai hasil yang tinggi kepadatan arus keluaran sebesar 44 dan 30 mA·cm<sup>-2</sup> pada tegangan rendah 1,6 V dalam air tawar alkali dan air laut simulasi. Hal ini membuktikan bahwa daya tahan yang luar biasa selama pengujian 100 jam.

#### 15. NiVN

Badreldin et al. (2021) menggunakan NiVN pada substrat busa nikel mampu melakukan evolusi hidrogen dari air garam. Katalis ini hanya membutuhkan potensi berlebih HER serendah 32 mV pada -10 mA cm<sup>-2</sup> dalam air garam (0,6 M NaCl). Hasilnya menunjukkan kemajuan dalam

kinerja elektrokatalis air garam yang berlimpah di bumi, terutama pada kisaran pH yang mendekati netral (yaitu, pH 6-8).

#### 16. Ru/Co-NC

Rong et al. (2022) menyebutkan bahwa Katalis Ru/Co-N-C memerlukan potensi berlebih hanya 13 dan 23 mV untuk HER agar dapat menghantarkan rapat arus sebesar 10 mA cm<sup>-2</sup> dalam 0,5 m H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan 1 m KOH guna mengungguli katalis patokan Pt/C dan RuO<sub>2</sub>. Adapun pusat aktivitas utama Ru / Co-N-C-800 ° C adalah situs RuN<sub>4</sub>, sedangkan situs CoN<sub>4</sub> berperan sebagai pihak yang memodifikasikan struktur elektronik dan kekuatan ikatan mantara spesies perantara hidrogen dengan situs RuN<sub>4</sub>. Situs CO-N<sub>4</sub> juga mampu meningkatkan kerapatan elektron situs Ru-N<sub>4</sub> sehingga meningkatkan ketahanan Ru/Co-N-C terhadap korosi selama elektrolisis asam dan basa. Stabilitas operasi katalis ini terlihat pada kepadatan arus tinggi 450 mA cm<sup>-2</sup> selama 330 jam. Dengan demikian, katalis ini mampu menjadi katalis yang baik guna mempercepat kinerja HER.

#### 17. Ni<sub>5</sub>P<sub>4</sub>

Dalam penelitian Huang et al. (2019), elektrokatalis Ni<sub>5</sub>P<sub>4</sub> mampu membentuk fosfida-hidrogen dapat melemahkan aktivitas HER. Hibridisasi Ni<sub>5</sub>P<sub>4</sub> dan Ni<sup>2+δOδ</sup>(OH)<sub>2-δ</sub> dapat berfungsi untuk melindungi sifat elektrokatalik dan luar permukaan. Selain itu, elektrokatalik juga berfungsi menciptakan interaksi elektronik yang baik dan sifat sinergis untuk menekan ikatan P-Hads.

#### 18. 1T<sub>0.63</sub>-MoSe<sub>2</sub>@MoP

Li et al. (2022) menggunakan katalis antarmuka multifase, yakni 1T<sub>0.63</sub>-MoSe<sub>2</sub>@MoP (1T = fase oktahedral; MoSe<sub>2</sub> = molibdenum selenida; MoP = molibdenum fosfida) guna memproduksi hidrogen dari air laut. Jenis katalis ini mendorong reaksi HER dengan baik melalui penyesuaian antarmuka intrinsik struktur elektronik dengan sinergi multifase. Pada elektrolit air tawar, katalis ini membutuhkan potensi berlebih sekitar 350 mV guna memperoleh kerapatan arus yang besar, yakni 1000 mA cm<sup>-2</sup>. Sementara itu, kombinasi fase logam dan MoP aktif pada HER intrinsik di MoSe<sub>2</sub> dapat menyesuaikan struktur elektronik dapat memberikan aktivitas dan stabilitas HER yang luar biasa.

#### 19. Ti@Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoS

Yang et al. (2022) merancang katalis yang efisien dalam memproduksi hidrogen dari air laut, yakni katalis heterostruktur Ti@Ni(OH)<sub>2</sub>-NiMoS. Katalis ini terdiri dari kristal Ni(OH)<sub>2</sub> dan NiMoS amorf dirancang dan dibuat secara rasional pada mesh Ti. Ni(OH)<sub>2</sub> berperan dalam mempercepat kinetika disosiasi air, sedangkan NiMoS amorf menyediakan banyak situs aktif dan memungkinkan laju transfer elektron yang cepat. Pada semua rentang pH air laut, elektrokatalis ini membutuhkan potensi berlebih sebesar 138 mV untuk sifat asam, 198 mV untuk sifat netral, 189 mV untuk sifat basa, dan 371 mV untuk sifat alami dalam kerapatan arus sekitar 10 mA/cm<sup>2</sup>. Dengan katalis tersebut, reaksi evolusi hidrogen dapat dipraktikkan secara efisien dengan baik.

#### 20. Ni dan CrO<sub>x</sub>

Dinh et al. (2018) menggunakan katalis HER yang terdiri dari situs Ni dan CrO<sub>x</sub> yang didoping ke permukaan Cu yang beroperasi secara efisien dalam media netral dalam pemisahan air laut. Situs Ni dan CrO<sub>x</sub> masing-masing memiliki energi pengikatan yang kuat untuk gugus hidrogen dan hidroksil, yang mempercepat disosiasi air, sedangkan Cu memiliki energi pengikatan



hidrogen yang lemah, sehingga mendorong penggabungan hidrida. Katalis yang dihasilkan menunjukkan potensi berlebih 48 mV pada rapat arus 10 mA/cm<sup>2</sup> dalam elektrolit penyangga pH 7. Temuan ini menyarankan prinsip-prinsip desain sistem katalitik yang murah, efisien, dan biokompatibel.

#### 21. Nanosheet Mo<sub>5</sub>N<sub>6</sub>

Jin et al. (2018) mengganti elektrokatalis Transition Metal Nitrides (TMNs) dengan lembaran nano Mo<sub>5</sub>N<sub>6</sub> yang kaya akan nitrogen. Dalam bantuan metode pertumbuhan penginduksi Ni, katalis ini memberikan aktivitas HER dengan stabilitas yang unggul ketimbang dengan TMN lain dan bahkan, *benchmark* Pt. Maka dari itu, katalis ini merupakan rancangan elektrokatalis yang efisien dalam memproduksi hidrogen dari air laut.

#### 22. 2D h-W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>

H. Yu et al. (2018) mensintesis 2D h-W<sub>2</sub>N<sub>3</sub> pada tekanan atmosfer melalui metode templat garam. Energi pembentukan katalis ini mampu menurun drastis karena interaksi yang kuat dan epitaksi pencocokan domain antara KCl dan h-W<sub>2</sub>N<sub>3</sub>. Meskipun begitu, aktivitas HER katodik dengan potensi permulaan -30.8 mV dan potensi berlebih -98,2 mV untuk 10 mA/cm<sup>2</sup> menunjukkan kinerja yang dihasilkan baik dengan katalis ini.

#### 23. MXene berongga bertingkat

Xiu et al. (2020) mengungkapkan bahwa katalis MXene berongga bertingkat yang dihasilkan sepenuhnya melebihi 20% Pt/C komersial sebanyak 10–20 kali lipat dalam aktivitas massa untuk evolusi hidrogen melalui rentang pH penuh. Aktivitas massa tertinggi sebesar 12,94 A mg/Pt dicapai pada elektrolit basa dengan penggunaan 1/8 Pt 20% Pt/C. Katalis ini juga menunjukkan kombinasi terbaik antara aktivitas tinggi, masa pakai lama (250 jam, 31 kali Pt/C), dan efisiensi Faradaic hampir 100% di antara 20% Pt/C (8 jam) dan elektrokatalis yang terdokumentasi (10–100 jam) untuk produksi hidrogen dalam air laut alami.

#### 24. Ru-WO<sub>x</sub>

Y. Zhang et al. (2024) mengungkapkan bahwa Ru-WO<sub>x</sub> terdiri dari ikatan Ru-O dan Ru-W yang kuat pada antarmuka. Ikatan Ru-WO<sub>x</sub> dapat mempercepat kinetika disosiasi air, sedangkan ikatan Ru-W akan menyebabkan interaksi pendukung logam yang kuat dan transfer elektron dari W ke Ru. Katalis Ru-WO<sub>x</sub> yang optimal menunjukkan potensi berlebih yang rendah yaitu 29 dan 218 mV pada rapat arus 10 mA/cm<sup>2</sup> masing-masing dalam media basa dan air laut. Stabilitas jangka panjang yang luar biasa mengungkapkan bahwa katalis Ru-WO<sub>x</sub> memiliki ketahanan korosi yang efisien dalam elektrolisis air laut.

#### 25. W-TENG

B. Zhang et al. (2022) menyatakan bahwa nanogenerator triboelektrik (W-TENG) dapat meningkatkan arus keluaran dari 1,42-54,5 mA dengan efisiensi konversi lebih dari 92,0%. Aktivitas elektrokatalitik yang tinggi dengan potensi berlebih = 166 mV dan kemiringan Tafel = 181,2 mV des-1 dari katalis NiCoP-MOF yang didukung kertas karbon. Adopsi air laut alami digunakan sebagai sumber daya untuk produksi hidrogen in situ tanpa asam atau basa. Maka dari itu, sistem elektrolisis air laut bertenaga mandiri mencapai tingkat produksi H<sub>2</sub> setinggi 1273,9 μL min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> dengan efisiensi konversi sebesar 78,9%.

Melihat dari pernyataan di atas, dapat diketahui bahwa banyak temuan yang sudah ditemukan dapat bekerja efektif dalam memproduksi hidrogen dari air laut. Hal ini terlihat pada aktivitas elektrokatalitik yang tinggi dengan kestabilan yang baik. Selain itu, elektrokatalitik yang disebut di atas

mampu menjadi pengganti elektrokatalis Pt yang mahal. Hal ini dikarenakan logam transisi tersebut mampu memaksimalkan transportasi elektron dan mengurangi biaya fabrikasi dalam mewujudkan reaksi evolusi hidrogen (HER) yang efisien (Morales-Guio et al., 2014).

### 3.3. Elektrolit

Berbagai macam elektrolit yang dapat mendukung kinerja dari elektrokatalis dalam metode elektrolisis guna memproduksi hidrogen adalah sebagai berikut:

#### 1. $\text{H}_2\text{SO}_4$

Menurut Hakim et al. (2023), penggunaan katalis dengan elektrolit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pada proses produksi hidrogen air laut dapat meningkatkan sifat penghantar listrik sehingga elektrolisis dapat bekerja dengan lancar. Apabila tegangan semakin diperbesar, maka laju aliran gas hidrogen akan meningkat. Akan tetapi, laju aliran hidrogen dengan menggunakan katalis lebih rendah dibanding tanpa katalis. Pasalnya, larutan menjadi lebih mudah jenuh sehingga elektrolit yang akan ditransfer lebih lambat dan menghasilkan sedikit hidrogen (Burton, 2021). Hal ini diperkuat dengan pernyataan Shiva (2019) di mana persentase katalis yang tinggi dapat menurunkan resistensi pada elektrolit.

#### 2. NaCl

Dalam penelitian yang dilaksanakan oleh Rusdianasari et al. (2019), jumlah ion ditingkatkan dengan NaCl untuk menghasilkan lebih banyak gas hidrogen. Selama percobaan tersebut, garam natrium mengalami kristalisasi di dalam pipa elektroda di mana molekul air diuraikan dan bereaksi. Hal ini menyebabkan gas hidrogen yang dihasilkan lama kelamaan mengalami penurunan.

#### 3. KOH

KOH merupakan elektrolit kuat yang memiliki konduktivitas listrik tinggi, sehingga memungkinkan pergerakan ion yang efisien dalam sel elektrokimia. Tidak hanya itu, pH alkali KOH yang tinggi sangat cocok untuk beberapa reaksi elektrokimia yang berlangsung pada kondisi basa. Menurut Shedid & Elshokary (2015), elektrolit larutan KOH memberikan efisiensi sekitar 8% pada siang hari guna memproduksi hidrogen. Selain itu, L. Yu et al. (2019) juga memperoleh bahwa elektrokatalis NiMoN@NiFeN yang menggunakan elektrolit 1 M KOH dapat bekerja dengan hasil  $-56 \eta$  (mV) pada  $-100 \text{ Ma/cm}^2$ . Hal ini menunjukkan KOH sebagai elektrolit memiliki pengaruh terhadap produksi hidrogen dari air laut.

#### 4. NaOH

Menurut Iswandari et al. (2022), mengungkapkan bahwa semakin tinggi arus dan konsentrasi katalis yang seiring dengan jumlah produksi gas, maka efisiensi yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Maka dari itu, Iswandari et al. (2022) menggunakan katalis NaOH terletak pada arus 35 A dengan konsentrasi 0,75 M sebesar 0,4745 L. Efisien energi yang dihasilkan sebesar 89,354%. Hal ini kemudian dapat diperkuat oleh H. Zhang et al. (2020) yang mengungkapkan bahwa produksi  $\text{H}_2$  dapat ditingkatkan dengan adanya NaOH ketika oksidasi air superkritis fenol dikendalikan pada rasio O/C yang lebih rendah. Efisiensi puncak gasifikasi hidrogen mencapai sebesar 62,35% pada rasio O/C 0,3. Begitu pula yang dilakukan oleh Weijin et al. (2018) yang menambahkan 5% berat NaOH pada  $450^\circ\text{C}$ , 28 MPa, 15 menit, sehingga meningkatkan produksi hidrogen dengan fraksi mol maksimum 74,40% dan hasil 70,05 mol/kg.

Dari pernyataan di atas, dapat diketahui bahwa beberapa elektrolit yang digunakan masih memiliki kekurangan. Hal ini terlihat pada elektrolit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  dan  $\text{NaCl}$  yang masih belum mengatasi laju aliran hidrogen yang rendah. Di sisi lain,  $\text{KOH}$  dan  $\text{NaOH}$  mampu memiliki efisiensi dan stabilitas yang tinggi terhadap produksi hidrogen dari air laut.

#### 4. Kesimpulan

Dari pemaparan di atas, dapat diambil simpulan bahwa adanya 3 reaksi redoks dalam elektrolisis air laut yang terdiri atas Oxygen Evolution Reaction (OER), Chlorine Evolution Reaction (CER), dan Hydrogen Evolution Reaction (HER). Adapun elektrokatalis yang efisien dalam mendukung reaksi HER sebanyak 25 buah. Elektrokatalis yang dimaksud adalah nanoarray  $\text{CoNC}$  bifungsional,  $\text{CoO}_x@CN$ , aerogel quantum dot  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ ,  $\text{CoMoP}@C$ ,  $\text{Ru}_{1+\text{NP}_5}/N-C$ ,  $\text{NiN}_3$ , MXene-karbida bimetalik-karbon hibridisasi,  $\text{Ni-SN}@C$ ,  $\text{NiFeCrVTi}$ ,  $\text{Mo}(\text{NiFeCo})_4$ , BNR  $\text{Fe-Co}_2\text{P}$ ,  $\text{Co}_3\text{Mo}_3\text{C}/\text{CNT}$ ,  $\text{Ni-Co}@Fe-Co$  PBA,  $\text{NiVN}$ ,  $\text{Ru}/Co-N-C$ ,  $\text{Ni}_5\text{P}_4$ ,  $1\text{T}_{0.63}\text{-MoSe}_2@MoP$ ,  $\text{Ti}@Ni(\text{OH})_2\text{-NiMoS}$ ,  $\text{Ni-CrO}_x$ , nanosheet  $\text{Mo}_5\text{N}_6$ ,  $2\text{D h-W}_2\text{N}_3$ , MXene berongga bertingkat,  $\text{Ru-WO}_x$  dan  $\text{W-TENG}$ . Selanjutnya, terdapat 4 elektrolit yang mendukung kinerja dari reaksi elektrolisis air laut dalam memproduksi hidrogen adalah  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KOH}$  dan  $\text{NaOH}$ . Oleh karena itu, pengembangan hidrogen dari air laut secara lebih lanjut patut dikembangkan guna terwujudnya Net Zero Emission.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ini kami utarakan kepada seluruh pihak yang membantu dalam penyelesaian penelitian ini. Kami mengucapkan terima kasih secara khusus kepada Bapak Ardi Widhia Sabekti, S. Pd., M. Pd. selaku Kepala Program Studi Pendidikan Kimia yang memberikan dukungan secara moral kepada para peneliti.

#### Daftar Pustaka

- Badreldin, A., Nabeeh, A., Ghouri, Z. K., Abed, J., Wang, N., Wubulikasimu, Y., Youssef, K., Kumar, D., Stodolny, M. K., Elsaid, K., Sargent, E. H., & Abdel-Wahab, A. (2021). Early Transition-Metal-Based Binary Oxide/Nitride for Efficient Electrocatalytic Hydrogen Evolution from Saline Water in Different pH Environments. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(45), 53702–53716. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c13002>
- Chen, I.-W. P., Hsiao, C.-H., Huang, J.-Y., Peng, Y.-H., & Chang, C.-Y. (2019). Highly Efficient Hydrogen Evolution from Seawater by Biofunctionalized Exfoliated  $\text{MoS}_2$  Quantum Dot Aerogel Electrocatalysts That Is Superior to Pt. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(15), 14159–14165. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b02582>
- Dingenen, F., & Verbruggen, S. W. (2021). Tapping hydrogen fuel from the ocean: A review on photocatalytic, photoelectrochemical and electrolytic splitting of seawater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110866>
- Dinh, C.-T., Jain, A., de Arquer, F. P. G., De Luna, P., Li, J., Wang, N., Zheng, X., Cai, J., Gregory, B. Z., Voznyy, O., Zhang, B., Liu, M., Sinton, D., Crumlin, E. J., & Sargent, E. H. (2018). Multi-site electrocatalysts for hydrogen evolution in neutral media by destabilization of water molecules. *Nature Energy*, 4(2), 107–114. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0296-8>
- Dresp, S., Dionigi, F., Klingenhof, M., & Strasser, P. (2019). Direct Electrolytic Splitting of Seawater: Opportunities and Challenges. *ACS Energy Letters*, 4(4), 933–942. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.9b00220>
- Elahi, S., & Seddighi, S. (2024). Renewable energy storage using hydrogen produced from seawater

- membrane-less electrolysis powered by triboelectric nanogenerators. *Journal of Power Sources*, 609, 234682. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234682>
- Exner, K. S., Lim, T., & Joo, S. H. (2022). Circumventing the OCl versus OOH scaling relation in the chlorine evolution reaction: Beyond dimensionally stable anodes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 34, 100979. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2022.100979>
- Feng, C., Chen, M., Yang, Z., Xie, Z., Li, X., Li, S., Abudula, A., & Guan, G. (2023). Electrocatalytic seawater splitting for hydrogen production: Recent progress and future prospects. *Journal of Materials Science & Technology*, 162, 203–226. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.03.058>
- Ghosh, S. K., & Rahaman, H. (2019). Noble Metal–Manganese Oxide Hybrid Nanocatalysts. In *Noble Metal-Metal Oxide Hybrid Nanoparticles* (pp. 313–340). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814134-2.00009-7>
- Guo, M., Deng, R., Wang, C., & Zhang, Q. (2023). Recent progress of advanced manganese oxide-based materials for acidic oxygen evolution reaction: Fundamentals, performance optimization, and prospects. *Journal of Energy Chemistry*, 78, 537–553. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.11.054>
- Hakim, L., Sari, R., Fadli, Fajar, Safrizal, Selvy, & Emma. (2023). Hydrogen production from seawater using H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> catalyst by photovoltaic-electrolysis method. *Materials Today: Proceedings*, 87, 315–320. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.289>
- Huang, Y., Hu, L., Liu, R., Hu, Y., Xiong, T., Qiu, W., Balogun, M.-S. (Jie T., Pan, A., & Tong, Y. (2019). Nitrogen treatment generates tunable nanohybridization of Ni<sub>5</sub>P<sub>4</sub> nanosheets with nickel hydr(oxy)oxides for efficient hydrogen production in alkaline, seawater and acidic media. *Applied Catalysis B: Environmental*, 251, 181–194. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.03.037>
- Iswandari, D., Mahenri, I., Bow, Y., Syakdani, A., & Junaidi, R. (2022). Effect of Concentration of NaOH and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Catalysts on Hydrogen Gas Production Efficiency. *International Journal of Research in Vocational Studies (IJRVOCAS)*, 1(4), 22–25. <https://doi.org/10.53893/ijrvocas.v1i4.73>
- Jiang, S., Liu, Y., Qiu, H., Su, C., & Shao, Z. (2022). High Selectivity Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction and Anti-Chlorine Corrosion Strategies in Seawater Splitting. *Catalysts*, 12(3), 261. <https://doi.org/10.3390/catal12030261>
- Jin, H., Liu, X., Vasileff, A., Jiao, Y., Zhao, Y., Zheng, Y., & Qiao, S.-Z. (2018). Single-Crystal Nitrogen-Rich Two-Dimensional Mo<sub>5</sub>N<sub>6</sub> Nanosheets for Efficient and Stable Seawater Splitting. *ACS Nano*, 12(12), 12761–12769. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.8b07841>
- Jin, H., Wang, J., Su, D., Wei, Z., Pang, Z., & Wang, Y. (2015). In situ Cobalt–Cobalt Oxide/N-Doped Carbon Hybrids As Superior Bifunctional Electrocatalysts for Hydrogen and Oxygen Evolution. *Journal of the American Chemical Society*, 137(7), 2688–2694. <https://doi.org/10.1021/ja5127165>
- Jin, H., Wang, X., Tang, C., Vasileff, A., Li, L., Slattey, A., & Qiao, S. (2021). Stable and Highly Efficient Hydrogen Evolution from Seawater Enabled by an Unsaturated Nickel Surface Nitride. *Advanced Materials*, 33(13), 2007508. <https://doi.org/10.1002/adma.202007508>
- Kibler, L. A., Hermann, J. M., Abdelrahman, A., El-Aziz, A. A., & Jacob, T. (2018). New insights on hydrogen evolution at Au single crystal electrodes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 9, 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.05.013>
- Larasati, I., Yusril, A. N., & Zukri, P. Al. (2021). Systematic Literature Review Analisis Metode Agile Dalam Pengembangan Aplikasi Mobile. *Sistemasi*, 10(2), 369. <https://doi.org/10.32520/stmsi.v10i2.1237>
- Lasia, A. (2019). Mechanism and kinetics of the hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 19484–19518. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.183>
- Li, C., Hong, W., Cai, Q., & Jian, C. (2022). Directional Construction of a 1T 0.63 -MoSe<sub>2</sub> @MoP Multiphase-Interface Catalyst for Highly Efficient Alkaline Hydrogen Evolution. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(27), 30683–30691. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c04093>
- Lim, T., Kim, J., & Joo, S. H. (2023). Electrocatalysis of Selective Chlorine Evolution Reaction: Fundamental Understanding and Catalyst Design. *Journal of Electrochemical Science and Technology*,

14(2), 105–119. <https://doi.org/10.33961/jecst.2022.01032>

- Lin, Y., Sun, K., Chen, X., Chen, C., Pan, Y., Li, X., & Zhang, J. (2021). High-precision regulation synthesis of Fe-doped Co<sub>2</sub>P nanorod bundles as efficient electrocatalysts for hydrogen evolution in all-pH range and seawater. *Journal of Energy Chemistry*, 55, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.06.073>
- Liu, Z., Li, H., Yang, C., Jiang, M., Zhang, J., & Fu, C. (2024). High-Throughput Designed and Laser-Etched NiFeCrVTi High-Entropy Alloys with High Catalytic Activities and Corrosion Resistance for Hydrogen Evolution in Seawater. *Small*, 20(20), 2309078. <https://doi.org/10.1002/smll.202309078>
- Ma, C., Zhong, G., Zhao, Y., Zhang, P., Fu, Y., & Shen, B. (2020). Recent development of synthetic probes for detection of hypochlorous acid/hypochlorite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 240, 118545. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118545>
- Ma, Y., Wu, C.-X., Feng, X.-J., Tan, H.-Q., Yan, L.-K., Liu, Y., Kang, Z.-H., Wang, E.-B., & Li, Y.-G. (2017). Highly efficient hydrogen evolution from seawater by a low-cost and stable CoMoP@C electrocatalyst superior to Pt/C. *Energy and Environmental Science*, 10(3), 788–798. <https://doi.org/DOI> <https://doi.org/10.1039/C6EE03768B>
- Mohammed-Ibrahim, J. (2020). A review on NiFe-based electrocatalysts for efficient alkaline oxygen evolution reaction. *Journal of Power Sources*, 448, 227375. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227375>
- Morales-Guio, C. G., Stern, L.-A., & Hu, X. (2014). Nanostructured hydrotreating catalysts for electrochemical hydrogen evolution. *Chemical Society Reviews*, 43(18), 6555. <https://doi.org/10.1039/C3CS60468C>
- Rong, C., Shen, X., Wang, Y., Thomsen, L., Zhao, T., Li, Y., Lu, X., Amal, R., & Zhao, C. (2022). Electronic Structure Engineering of Single-Atom Ru Sites via Co–N<sub>4</sub> Sites for Bifunctional pH-Universal Water Splitting. *Advanced Materials*, 34(21), 2110103. <https://doi.org/10.1002/adma.202110103>
- Rusdianasari, R., Bow, Y., Dewi, T., Taqwa, A., & Prasetyani, L. (2019). Effect of Sodium Chloride Solution Concentration on Hydrogen Gas Production in Water Electrolyzer Prototype. *2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF48524.2019.9102508>
- Safari, F., & Dincer, I. (2020). A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 205, 112182. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112182>
- Sazali, N. (2020). Emerging technologies by hydrogen: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 18753–18771. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.021>
- Shedid, M. H., & Elshokary, S. (2015). Hydrogen Production from an Alkali Electrolyzer Operating with Egypt Natural Resources. *Smart Grid and Renewable Energy*, 06(01), 14–25. <https://doi.org/10.4236/sgre.2015.61002>
- Shi, H., Sun, X., Liu, Y., Zeng, S., Zhang, Q., Gu, L., Wang, T., Han, G., Wen, Z., Fang, Q., Lang, X., & Jiang, Q. (2023). Multicomponent Intermetallic Nanoparticles on Hierarchical Metal Network as Versatile Electrocatalysts for Highly Efficient Water Splitting. *Advanced Functional Materials*, 33(19), 2214412. <https://doi.org/10.1002/adfm.202214412>
- Tang, X., Arif, I., & Diao, P. (2023). Monitoring the chlorine evolution reaction during electrochemical alkaline seawater splitting. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 942, 117569. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117569>
- Wang, G., Xiang, T., Ren, X., Zhang, L., & Chen, C. (2024). Transition metal-based electrocatalysts for hydrogen production from seawater: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 73, 775–790. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.471>
- Wang, Q., Liu, X., Zhu, J., & Jiang, H. (2024). Chlorine-oxidation-free dual hydrogen production by seawater electrolysis coupling formaldehyde oxidation. *Electrochimica Acta*, 496, 144490.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144490>

- Wang, S., Wang, M., Liu, Z., Liu, S., Chen, Y., Li, M., Zhang, H., Wu, Q., Guo, J., Feng, X., Chen, Z., & Pan, Y. (2022). Synergetic Function of the Single-Atom Ru–N 4 Site and Ru Nanoparticles for Hydrogen Production in a Wide pH Range and Seawater Electrolysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(13), 15250–15258. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c00652>
- Wang, Y., Liu, Y., Wiley, D., Zhao, S., & Tang, Z. (2021). Recent advances in electrocatalytic chloride oxidation for chlorine gas production. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(35), 18974–18993. <https://doi.org/10.1039/d1ta02745j>
- Weijin, G., Binbin, L., Qingyu, W., Zuohua, H., & Liang, Z. (2018). Supercritical water gasification of landfill leachate for hydrogen production in the presence and absence of alkali catalyst. *Waste Management*, 73, 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.015>
- Wu, X., Zhou, S., Wang, Z., Liu, J., Pei, W., Yang, P., Zhao, J., & Qiu, J. (2019). Engineering Multifunctional Collaborative Catalytic Interface Enabling Efficient Hydrogen Evolution in All pH Range and Seawater. *Advanced Energy Materials*, 9(34), 1901333. <https://doi.org/10.1002/aenm.201901333>
- Xin, Y., Shen, K., Guo, T., Chen, L., & Li, Y. (2023). Coupling Hydrazine Oxidation with Seawater Electrolysis for Energy-Saving Hydrogen Production over Bifunctional CoNC Nanoarray Electrocatalysts. *Small*, 19(21), 2300019. <https://doi.org/10.1002/smll.202300019>
- Xiu, L., Pei, W., Zhou, S., Wang, Z., Yang, P., Zhao, J., & Qiu, J. (2020). Multilevel Hollow MXene Tailored Low-Pt Catalyst for Efficient Hydrogen Evolution in Full-pH Range and Seawater. *Advanced Functional Materials*, 30(47), 1910028. <https://doi.org/10.1002/adfm.201910028>
- Yang, C., Zhou, L., Yan, T., Bian, Y., Hu, Y., Wang, C., Zhang, Y., Shi, Y., Wang, D., Zhen, Y., & Fu, F. (2022). Synergistic mechanism of Ni(OH)<sub>2</sub>/NiMoS heterostructure electrocatalyst with crystalline/amorphous interfaces for efficient hydrogen evolution over all pH ranges. *Journal of Colloid and Interface Science*, 606, 1004–1013. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.090>
- Yu, H., Yang, X., Xiao, X., Chen, M., Zhang, Q., Huang, L., Wu, J., Li, T., Chen, S., Song, L., Gu, L., Xia, B. Y., Feng, G., Li, J., & Zhou, J. (2018). Atmospheric-Pressure Synthesis of 2D Nitrogen-Rich Tungsten Nitride. *Advanced Materials*, 30(51), 1805655. <https://doi.org/10.1002/adma.201805655>
- Yu, L., Xiao, J., Huang, C., Zhou, J., Qiu, M., Yu, Y., Ren, Z., Chu, C.-W., & Yu, J. C. (2022). High-performance seawater oxidation by a homogeneous multimetallic layered double hydroxide electrocatalyst. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(18). <https://doi.org/10.1073/pnas.2202382119>
- Yu, L., Zhu, Q., Song, S., McElhenny, B., Wang, D., Wu, C., Qin, Z., Bao, J., Yu, Y., Chen, S., & Ren, Z. (2019). Non-noble metal-nitride based electrocatalysts for high-performance alkaline seawater electrolysis. *Nature Communications*, 10(1), 5106. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13092-7>
- Yu, P., Wang, F., Shifa, T. A., Zhan, X., Lou, X., Xia, F., & He, J. (2019). Earth abundant materials beyond transition metal dichalcogenides: A focus on electrocatalyzing hydrogen evolution reaction. *Nano Energy*, 58, 244–276. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.017>
- Zang, W., Sun, T., Yang, T., Xi, S., Waqar, M., Kou, Z., Lyu, Z., Feng, Y. P., Wang, J., & Pennycook, S. J. (2021). Efficient Hydrogen Evolution of Oxidized Ni–N 3 Defective Sites for Alkaline Freshwater and Seawater Electrolysis. *Advanced Materials*, 33(8), 2003846. <https://doi.org/10.1002/adma.202003846>
- Zhang, B., Zhang, C., Yang, O., Yuan, W., Liu, Y., He, L., Hu, Y., Zhao, Z., Zhou, L., Wang, J., & Wang, Z. L. (2022). Self-Powered Seawater Electrolysis Based on a Triboelectric Nanogenerator for Hydrogen Production. *ACS Nano*, 16(9), 15286–15296. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c06701>
- Zhang, F., Yu, L., Wu, L., Luo, D., & Ren, Z. (2021). Rational design of oxygen evolution reaction catalysts for seawater electrolysis. *Trends in Chemistry*, 3(6), P485-498. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trechm.2021.03.003>
- Zhang, H., Diao, J., Ouyang, M., Yadegari, H., Mao, M., Wang, M., Henkelman, G., Xie, F., & Riley, D.

- J. (2023). Heterostructured Core–Shell Ni–Co@Fe–Co Nanoboxes of Prussian Blue Analogues for Efficient Electrocatalytic Hydrogen Evolution from Alkaline Seawater. *ACS Catalysis*, 13(2), 1349–1358. <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c05433>
- Zhang, H., Zhang, X., & Ding, L. (2020). Partial oxidation of phenol in supercritical water with NaOH and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Hydrogen production and polymer formation. *Science of The Total Environment*, 722, 137985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137985>
- Zhang, J., Zhao, Y., Guo, X., Chen, C., Dong, C.-L., Liu, R.-S., Han, C.-P., Li, Y., Gogotsi, Y., & Wang, G. (2018). Single platinum atoms immobilized on an MXene as an efficient catalyst for the hydrogen evolution reaction. *Nature Catalysis*, 1(12), 985–992. <https://doi.org/10.1038/s41929-018-0195-1>
- Zhang, Y., Zheng, W., Wu, H., Zhu, R., Wang, Y., Wang, M., Ma, T., Cheng, C., Zeng, Z., & Li, S. (2024). Tungsten oxide-anchored Ru clusters with electron-rich and anti-corrosive microenvironments for efficient and robust seawater splitting. *SusMat*, 4(1), 106–115. <https://doi.org/10.1002/sus2.164>
- Zhao, Y., Tang, Q., He, B., & Yang, P. (2016). Carbide decorated carbon nanotube electrocatalyst for high-efficiency hydrogen evolution from seawater. *RSC Advances*, 6(96), 93267–93274. <https://doi.org/10.1039/C6RA17839A>
- Zheng, J. (2017). Seawater splitting for high-efficiency hydrogen evolution by alloyed PtNi x electrocatalysts. *Applied Surface Science*, 413, 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.285>
- Zou, H., Li, G., Duan, L., Kou, Z., & Wang, J. (2019). In situ coupled amorphous cobalt nitride with nitrogen-doped graphene aerogel as a trifunctional electrocatalyst towards Zn-air battery driven full water splitting. *Applied Catalysis B: Environmental*, 259, 118100. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118100>