

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pencarian sumber energi yang berkelanjutan dan bersih telah meningkat dalam beberapa tahun terakhir, meningkatkan penelitian tentang teknologi energi terbarukan sebagai alternatif bahan bakar fosil. Di antara teknologi ini, elektrolisis menggunakan air laut menawarkan pendekatan yang menjanjikan untuk produksi hidrogen, pembawa energi bersih serbaguna. Hidrogen memiliki potensi untuk merevolusi berbagai sektor, termasuk transportasi, pembangkit listrik, dan proses industri.

2.1 Produksi Hidrogen

Hidrogen dapat diekstraksi dari bahan bakar fosil, biomassa, air, atau campuran keduanya. Menurut laporan 2019 International Energy Agency (IEA) tentang produksi hidrogen, gas alam merupakan sumber utama produksi hidrogen, menyumbang sekitar tiga perempat dari produksi hidrogen secara global, yang mencapai sekitar 70 juta ton per tahun.

Biaya produksi hidrogen dari gas alam dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis dan ekonomi, dengan harga gas dan belanja modal (*capital expenditures*) menjadi dua yang paling penting. Biaya bahan bakar adalah komponen biaya terbesar, terhitung antara 45-75% dari biaya produksi. Harga gas yang rendah di Timur Tengah, Rusia dan Amerika Utara menimbulkan biaya produksi hidrogen terendah. Importir gas seperti Jepang, Korea, Cina dan India harus bersaing dengan harga impor gas yang lebih tinggi, dan itu membuat biaya produksi hidrogen lebih tinggi. [15].

Kemajuan teknologi untuk memperkenalkan ekonomi hidrogen akan berkembang secara global di tahun-tahun berikutnya, melalui infrastruktur pendukung yang berkaitan dengan produksi dan penyimpanan hidrogen. Laju produksi hidrogen diperkirakan akan meningkat sebesar 10% per tahun. Akibatnya, transisi menuju penggunaan hidrogen sebagai sumber energi akan mengurangi ketergantungan

domestik banyak negara pada impor minyak internasional, dan dengan demikian, meningkatkan produksi energi lokal.

Menurut data yang dipublikasikan, sekitar 96% dari total hidrogen yang dikonsumsi di dunia saat ini diproduksi dari bahan bakar fosil [16]. Di antara bahan bakar fosil ini adalah hidrokarbon seperti batu bara, gas alam, dan minyak yang digunakan sebagai bahan baku utama untuk menghasilkan H₂ melalui pembakaran, gasifikasi, proses reformasi dan pemisahan air bertenaga nuklir [17]. Proses reformasi uap dan oksigen digunakan untuk mengubah gas alam menjadi karbon dioksida, hidrogen dan karbon monoksida. Kelemahan menggunakan batubara dan gas alam untuk mendapatkan hidrogen adalah sejumlah besar karbon dioksida yang dihasilkan. Perlu dicatat bahwa meskipun lebih sedikit karbon dioksida yang dihasilkan dari gas alam daripada dari pembakaran batubara, metode ini tidak diinginkan dari sudut pandang lingkungan. Selain itu, produksi hidrogen dari bahan bakar fosil juga ditemukan tidak layak karena proses konversi yang sangat intensif energi yang diperlukan. Selain itu, produksi hidrogen dari proses reformasi tidak menghasilkan hidrogen murni 100%. Jejak kontaminan seperti karbon monoksida hadir, dan jika digunakan dalam sel bahan bakar, karbon ini akan menimbulkan efek merugikan pada kinerjanya [18].

2.2 Komposisi Kimia Air Laut

Air laut mengandung berbagai larutan garam, zat organik dan anorganik yang terlarut di dalamnya, dan merupakan sumber air alami yang paling banyak ditemukan secara alami di bumi ini. Air laut memainkan peran penting terhadap iklim di seluruh dunia. Ini memiliki komposisi konstan dan mengandung lebih dari 70 unsur berbeda. Namun, hanya 6 unsur utama yang membentuk > 99% dari air laut [19].

Tabel 2. 1 Kandungan Utama Air Laut

Unsur	Komposisi (wt, %)
Ion Chloride (Cl ⁻)	55.04

Ion Sodium (Na^+)	30.61
Ion Sulphate (SO_4^{2-})	7.68
Ion Magnesium (Mg^{2+})	3.69
Ion Calcium (Ca^{2+})	1.16
Ion Potassium (K^+)	1.1
Lainnya	0.72

Untuk menghasilkan hidrogen terbarukan, diperlukan bahan baku air tawar. Namun, ketersediaan air tawar di banyak negara terbatas karena efek pemanasan global. Oleh sebab itu mulai dipertimbangkan untuk menggunakan bahan baku air laut yang berlimpah jumlahnya, dapat diakses di sekitar wilayah pesisir, ramah lingkungan dan terdapat beberapa sumber energi terbarukan di antaranya energi sinar matahari dan angin [20],[21].

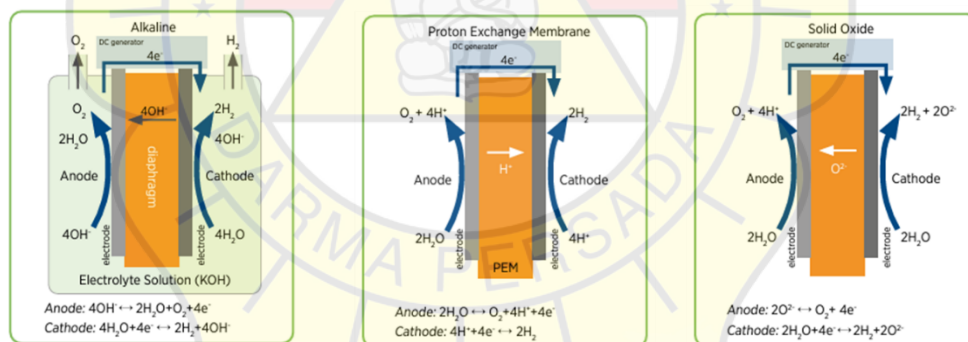
2.3 Berbagai Jenis Elektrolisis

Elektrolisis air ditemukan sebagai metode yang paling praktis dan matang untuk menghasilkan hidrogen terbarukan, mencapai efisiensi lebih dari 70% [22]. Ditemukan bahwa produksi hidrogen melalui elektrolisis air adalah proses yang intensif energi. Untuk mempromosikan energi hijau, bebas dari emisi karbon dioksida, energi terbarukan seperti hidro, angin, fotovoltaik, matahari, panas bumi, dan energi pasang surut dapat digunakan sebagai sumber energi utama untuk menyalakan elektroliser. Beberapa keterbatasan utama yang terkait dengan energi terbarukan termasuk sifat ketersediaannya *intermittent* dan ketergantungan lokasi. Agar penggunaan elektroliser menjadi lebih bermanfaat, elektroliser perlu dibuat lebih murah dengan mengurangi biaya listrik yang digunakan dalam proses, dengan mengurangi energi yang diperlukan dalam proses elektrolisisnya [23].

Rata-rata 40 kWh energi diperlukan untuk menghasilkan 1 kilogram hidrogen dalam sistem yang 100% efisien. Nilai ini berasal dari nilai kalor yang lebih tinggi, dan secara realistis sistem energi beroperasi dengan efisiensi di kisaran 60-70% [24]. Nilai kalor yang lebih tinggi menggambarkan efisiensi sistem dan mencakup total energi termal dan listrik yang diperlukan untuk menghasilkan 1 kg hidrogen pada

suhu dan tekanan standar. Beberapa makalah menggambarkan efisiensi sistem electrolyser dengan nilai kalor yang lebih rendah (LHV) yang hanya memperhitungkan energi input listrik sebesar 33,3 kWh/kg [25].

Ada beberapa jenis elektroliser yang digunakan untuk memisahkan air menjadi H₂ dan O₂, yaitu, Alkaline, Elektroliser Membran Pertukaran Proton (PEME) dan Elektroliser Oksida Padat (SOE). Setiap electrolyzer dioperasikan dalam kondisi operasi yang berbeda dan dipilih berdasarkan skala operasi dan efisiensi yang diperlukan. Elektroliser yang paling banyak digunakan di seluruh dunia adalah elektroliser alkali, menggunakan kalium hidroksida sebagai elektrolit. Secara umum, elektroliser terdiri dari anoda berpori dan katoda berpori yang dipisahkan oleh elektrolit. Di anoda, air diumpungkan ke elektroliser di mana ia dipecah menjadi ion hidrogen dan oksigen. Gas oksigen diproduksi di anoda, sedangkan gas hidrogen diproduksi di katoda. Elektron mengalir melalui sirkuit eksternal dari anoda ke katoda.



Gambar 2.3. 1 Teknologi Elektrolisis

Secara umum tiga teknologi elektrolisis yang dikembangkan adalah elektrolisis alkali (AE), elektrolisis membran pertukaran proton (PEM), dan elektrolisis oksida padat (SOE). AE adalah yang paling mapan untuk produksi hidrogen skala besar, menawarkan keandalan yang terbukti dan menggunakan bahan yang berlimpah dan murah. Namun, AE biasanya memiliki efisiensi dan tingkat produksi yang lebih rendah dibandingkan dengan PEM dan SOE [26]. Suhu pengoperasian bervariasi secara signifikan: AE beroperasi pada 65-220°C, dengan efisiensi meningkat dari 80% menjadi 83,5% di seluruh rentang ini [27]. PEMs: Suhu air masuk sekitar

60 °C, kepadatan arus ~ 2-4 A / cm², tegangan sel 1,8 V, dan masa pakai 6-9 tahun. AEM: Beroperasi sekitar 60°C pada 2 A/cm² dan ~1.9 V. AEs: Kepadatan arus tipikal 1 A/cm² pada 1.8 V, menghasilkan jejak yang lebih besar daripada elektroliser berbasis membran [28] . SOE beroperasi pada suhu yang jauh lebih tinggi, sekitar 800°C, mencapai kepadatan arus lebih dari 6 A/cm² pada tegangan sel di bawah 1.67 V, menghasilkan efisiensi dan tingkat produksi yang lebih tinggi daripada elektroliser komersial [29]. Peningkatan terbaru dalam katalis dan struktur mikro elektroda telah meningkatkan kinerja AE, berpotensi mengurangi kesenjangan dengan teknologi yang lain [30].

Elektrolisis Alkali (AE) beroperasi pada tekanan 45 bar, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian oleh Leuaa dan Chatzichristodoulou [31]. Di sisi lain, Sel Elektrolisis Oksida Padat (SOEC) telah diuji pada tekanan mulai dari 1,4 hingga 8 bar, dengan studi oleh Riedel, Heddrich, dan Friedrich menyoroti manfaat tekanan pada kinerja SOEC [32]. Selain itu, elektrolisis air, yang dapat dipertimbangkan di bawah teknologi elektrolisis Membran Pertukaran Proton (PEM), sebagian besar dioperasikan pada tekanan tinggi, dengan penyelidikan berkisar antara 5 hingga 35 bar, seperti yang dibahas oleh Trinke et al. [33]. Kondisi tekanan operasi yang berbeda ini menunjukkan keserbagunaan dan kemampuan beradaptasi teknologi elektrolisis untuk berbagai rentang tekanan, masing-masing dengan keunggulan dan implikasi spesifik untuk efisiensi dan kinerja.

2.3.1 Alkaline Electrolyser (AE)

Teknologi alkali telah tersedia secara industri untuk operasi skala besar sejak tahun 1920 teknologi alkali menggunakan elektrolit kalium hidroksida (KOH) [34], [35]. Selain itu, katoda dalam sel umumnya terbuat dari baja dan anoda terbuat dari baja berlapis nikel [16]. Proses pemilihan elektrolit melibatkan pemilihan elektrolit, yang memiliki konduktivitas listrik maksimum dan laju korosi minimum pada bahan dari mana sel dibangun. Elektroliser alkali dan sel bahan bakar diharapkan memiliki umur antara 20-30 tahun; Namun, pemeliharaan tetap diperlukan setiap 6 tahun mengusulkan bahwa peningkatan daya tahan, keandalan,

dan keamanan teknologi elektroliser alkali dan sel bahan bakar, akan menjadikan elektroliser dan sel bahan bakar ini sebagai teknologi yang paling efektif [36], [37].

Umumnya, elektroliser alkali menggunakan air tawar dengan salinitas rendah. Menerapkan elektrolisis air laut membutuhkan proses pengolahan tambahan untuk menghilangkan garam air, yang berkontribusi pada biaya produksi hidrogen. Elektroliser alkali dan sel bahan bakar menunjukkan biaya modal yang relatif rendah karena tidak adanya elektroda dan katalis logam mulia, serta komponen stack yang disiapkan [35] [37], [38]. Biaya produksi hidrogen dipengaruhi oleh ukuran elektroliser dan sel bahan bakar, karena kepadatan dan tekanan arus operasi yang rendah. Selain itu, operasi dinamis tidak bekerja dengan baik dalam elektroliser alkali dan sel bahan bakar, oleh karena itu, menunjukkan penurunan efisiensi dan kemurnian produk [35]. Elektroliser alkali memiliki kelemahan sebagai berikut: korosi elektroda, tekanan rendah, efisiensi rendah, kontaminasi elektrolit, skalabilitas yang tidak memadai, dan kepadatan arus kerja yang rendah [39].

2.3.2 Proton Exchange Membrane Electrolyzer (PEME)

Teknologi membran pertukaran proton pertama kali ditemukan pada awal 1960-an di General Electric [40], [34], [35]. Elektroliser dan sel bahan bakar ini menggunakan elektrolit polimer asam perfluorosulfonat, juga dikenal sebagai Nafion [38]. Dalam elektroliser membran pertukaran proton (PEME) dan sel bahan bakar membran pertukaran proton (PEMFC), membran pertukaran proton (PEM) digunakan untuk memisahkan ion hidrogen dari air dan oksigen. Biasanya, PEME dan PEMFC dioperasikan pada 20-100 °C dan tekanan hingga 100 bar [41]. PEME adalah teknologi kebalikan dari PEMFC. Demikian pula, baik PEME dan PEMFC mengandung komponen yang sama, yaitu, elektroda berpori, membran polimer, pengumpul arus, bidang aliran, pelat bus, pelat ujung, pelat pemisah, dan manifold. Satu-satunya perbedaan antara keduanya adalah bahan konstruksi dan jenis katalis yang digunakan dalam setiap proses. Biasanya, bahan karbon digunakan dalam sel bahan bakar untuk mendukung struktur katalis dan elektroda. Namun, karena korosi,

bahan-bahan ini tidak dapat digunakan pada anoda elektroliser, dan katoda sel bahan bakar karena oksigen hadir. Untuk mengatasi kemungkinan korosi pada anoda, komponen logam berpori digunakan, serta katalis platinum atau platinum alloy. Selama beberapa dekade PEME digunakan untuk menghasilkan oksigen di ruang angkasa, serta di bawah air. Namun, dalam beberapa tahun terakhir PEME telah diteliti dan dieksplorasi lebih komprehensif untuk generasi hidrogen terbarukan.

Dibandingkan dengan elektroliser alkali dan sel bahan bakar, PEME dan PEMFC memiliki banyak keunggulan seperti [42], [43], [44], [45], [46]:

- Desain lebih sederhana dan ringkas
- Tidak adanya bahan kimia berbahaya (tidak ada resirkulasi soda kaustik)
- Kemurnian hidrogen tinggi (>99,99%) dalam elektroliser
- Respons yang sangat baik terhadap input listrik variabel
- Kepadatan arus yang lebih tinggi
- Pengisian dan pemakaian cepat

Kekurangan utama PEME adalah sebagai berikut [35]:

- Hanya dapat digunakan saat ini untuk operasi skala kecil
- Bahan platinum dan fluorinated yang digunakan sebagai katalis mahal
- Kompleksitas sistem yang tinggi sebagai akibat dari operasi tekanan tinggi
- Masa pakai lebih pendek dibandingkan dengan elektroliser alkali
- Variasi ukuran karena pasokan energi intermiten

PEME mengandung dua elektroda yang dikenal sebagai anoda dan katoda. Anoda membagi air menjadi oksigen, elektron, dan proton di anoda elektroliser, dengan menerapkan arus searah melalui sel. Studi saat ini tentang produksi hidrogen melalui PEME telah banyak digunakan di pabrik percontohan dan di bawah operasi skala laboratorium (<200kW), dengan beberapa elektroliser yang dikomersialkan [47]. Pengembangan dan kematangan teknologi di masa depan yang digunakan dalam PEME dan PEMFC akan meningkatkan efisiensi, masa pakai, dan biaya. PEME dapat dioperasikan sebagai sel tunggal atau dapat dioperasikan sebagai

tumpukan (stack), yang terdiri dari beberapa sel. Oleh karena itu, berdasarkan 'efek skala', biaya sistem berhubungan langsung dengan ukuran sistem. Peningkatan suhu operasi PEME menghasilkan input energi listrik yang berkurang. Sistem bertekanan memungkinkan PEME mencapai suhu di atas 100°C sementara air tetap dalam keadaan cair [47].

2.3.3 Solid Oxide Electrolyser (SOE)

Elektroliser oksida padat pertama kali dikembangkan pada tahun 1902 oleh Nerst, yang menggunakan Zirconia dioxide atau Zirconia (ZrO_2) dengan elektrolit suhu tinggi 15% Yttrium oxide (Y_2O_3) [48]. Sejak itu, teknologi SOE telah menjalani penelitian dan pengembangan yang luas untuk penggunaan komersial tetapi masih merupakan teknologi yang paling tidak berkembang dibandingkan dengan teknologi alkali dan PEM. SOE umumnya dioperasikan pada suhu tinggi ($800\text{-}1000^{\circ}\text{C}$) dan telah ditemukan menunjukkan konversi yang lebih tinggi dan tingkat konsumsi energi yang lebih rendah. Beroperasi pada suhu tinggi mengurangi permintaan listrik (tegangan sel), dan secara bersamaan meningkatkan permintaan panas. Secara teori, efisiensi listrik di atas 100% dapat dicapai ketika elektroliser ini dioperasikan dalam mode endotermik. Selanjutnya, elektroliser suhu tinggi ditemukan mencapai efisiensi yang lebih tinggi daripada elektroliser suhu rendah karena berkurangnya energi listrik yang dibutuhkan oleh reaksi disosiasi air. Pada SOE, hidrogen dan oksigen diproduksi dengan mengumpankan air dalam bentuk uap ke katoda. Ion oksigen bermigrasi dari katoda melalui elektrolit keramik penghantar ion padat, Yttria-stabilised Zirconia (YSZ), ke anoda untuk menghasilkan oksigen. Katalis yang digunakan pada anoda adalah Mangan Strontium Lantanum tipe Perovskit ($\text{LaO}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{MnO}_3$) yang distabilkan pada YSZ, dan katalis yang digunakan pada katoda adalah katalis Ni/YSZ [35].

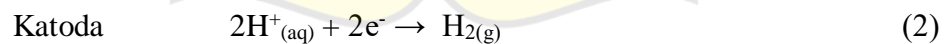
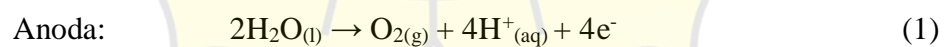
Meskipun SOE mampu mencapai efisiensi tinggi karena energi listrik yang dibutuhkan lebih rendah, dan suhu yang lebih tinggi yang menyebabkan resistansi internal lebih rendah. Mathiesen et al. 2013 [36] telah meneliti beberapa kelemahannya adalah sebagai berikut:

- Aliran produk tidak murni yang terdiri dari hidrogen dan uap - ini menghasilkan pemrosesan lebih lanjut yang meningkatkan biaya investasi dan operasi
- Sistem ini tidak terlalu fleksibel ketika ada variasi beban karena perubahan suhu. Ini mengurangi masa pakai elektroliser dan sel bahan bakar. Masa pakai berkurang sebagai akibat dari microcracks yang ada pada keramik
- Waktu start-up terjadi selama beberapa jam
- Biaya modal yang lebih tinggi daripada alkaline dan PEME
- Masa pakai lebih pendek dibandingkan dengan PEME
- Degradasi membran karena operasi pada suhu tinggi

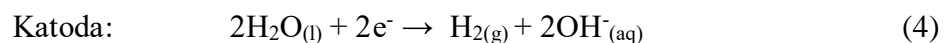
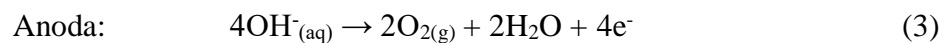
2.4 Reaksi Kimia Elektrolisis

Elektrolisis air terjadi ketika molekul air terurai menjadi hidrogen dan oksigen dengan arus listrik melalui elektrolit. Elektrolit adalah larutan yang digunakan untuk menghantarkan listrik. Pada sel elektrolisis, reaksi kimia akan terjadi jika arus listrik terbawa melalui larutan elektrolit sehingga energi listrik diubah menjadi energi kimia. Elektroda yang menerima elektron dari sumber arus listrik disebut katoda, sedangkan elektroda yang mengalirkan elektron kembali ke sumber arus listrik disebut anoda. Sedangkan elektrolit adalah sesuatu yang memiliki nilai konduktivitas bentuk ion. Elektrolit dapat berupa air, larutan asam/basa atau berupa senyawa kimia lainnya. Secara kimia reaksi yang terjadi adalah:

Dengan elektrolit larutan asam



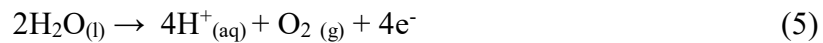
Dengan elektrolit larutan basa



Katoda adalah tempat reaksi reduksi dinyatakan sebagai negatif (-) dan anoda adalah tempat reaksi oksidasi dinyatakan sebagai positif (+). Jika sel elektrolisis diberi arus listrik, akan terjadi reaksi oksidasi dan reduksi. Reaksi yang terjadi di

sisi anoda disebut reaksi oksidasi, di mana anoda menarik anion, atau ion negatif, dan jumlah elektron berkurang, menyebabkan jumlah oksidasi meningkat.

Ion asam sisa oksigen (misalnya Nitrat NO_3^-) tidak teroksidasi, yang teroksidasi air, berikut adalah reaksinya:



Ion asam yang tersisa dioksidasi menjadi molekul, yaitu:



Pada sisi katoda terjadi reaksi reduksi yaitu kation (ion positif) ditarik oleh katoda dan menerima elektron tambahan sehingga bilangan oksidasi berkurang. Reaksi yang terjadi pada katoda adalah sebagai berikut:

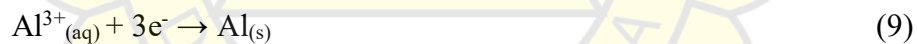
Ion H^+ direduksi menjadi H_2 , reaksinya adalah:



Ion logam alkali (IA) dan alkali tanah (IIA) tidak tereduksi, yang tereduksi adalah air, reaksinya adalah:



Ion logam lainnya (Al^{3+} , Ni^{2+} , Ag^+ dan lainnya) dapat direduksi, reaksinya adalah:



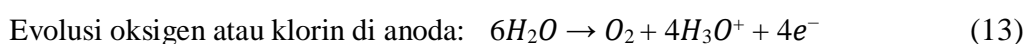
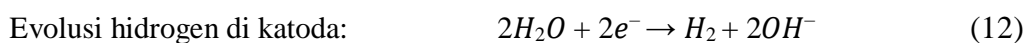
2.5 Elektrolisis Air Laut

Ada dua jenis utama elektrolisis air laut, yaitu metode langsung dan tidak langsung [20]. Dalam metode tidak langsung, proses dua langkah diikuti dengan melakukan menghilangkan lengkap ion yang dilarutkan dalam air laut, diikuti oleh elektrolisis alkali, atau hidrolisis untuk menghasilkan hidrogen dan oksigen sebagai produk utama. Metode ini membutuhkan biaya modal tambahan untuk menghasilkan air suling dan menyebabkan masalah lingkungan karena pembuangan garam. Terlepas dari kelemahan ini, metode tidak langsung mendukung penggunaan teknologi elektrolisis air tawar komersial yang sudah

berkembang sebelumnya. Metode langsung adalah proses satu langkah yang secara langsung mengubah air laut menjadi hidrogen sebagai produk utamanya.

Elektrolisis air tawar dan elektrolisis air laut berbeda terutama dalam konsumsi sumber daya, persyaratan katalis, dan tantangannya. Elektrolisis air tawar bergantung pada air tawar dengan kemurnian tinggi, yang menyebabkan berkurangnya sumber daya air yang signifikan dan peningkatan biaya karena sistem pemurnian [49]. Sebaliknya, elektrolisis air laut lebih berkelanjutan karena memanfaatkan cadangan air laut yang melimpah, mengurangi konsumsi air tawar dan biaya keseluruhan [50]. Namun, elektrolisis air laut menghadapi tantangan seperti persaingan antara reaksi evolusi oksigen dan reaksi oksidasi klorin, yang berdampak pada efisiensi energi dan stabilitas katalis [51]. Untuk mengatasi tantangan ini, para peneliti telah mengembangkan katalis canggih seperti *amorphous transition-metal phospho-borides* dan *N-doped carbon-supported nanosheets*, meningkatkan efisiensi dan stabilitas elektrolisis air laut [52]. Selain itu, *amphiphilic diamines* telah diidentifikasi sangat penting dalam mencegah pembentukan gas klorin selama elektrolisis air laut, menekankan pentingnya selektivitas dan stabilitas dalam proses ini [53].

Jika elektrolisis air laut harus dipertimbangkan untuk produksi hidrogen, evolusi oksigen harus terjadi di anoda melebihi evolusi klorin. [54]. Reaksi kimia yang terjadi pada elektroda selama elektrolisis air laut yang diamati oleh beberapa peneliti G. E. Badea, A. Caraban, P. Cret, and I. Corbu [19] Amikam, G., Nativ, P. and Gendel, Y. [55].



Untuk menentukan kondisi yang tepat untuk memastikan bahwa evolusi oksigen melebihi daripada reaksi evolusi klorin, elektroliser harus dioperasikan di bawah 1 mA/cm² atau di atas 1000 mA/cm². [56]. Namun, praktis mengoperasikan sistem elektrolisis di bawah 1 mA/cm² akan menghasilkan area elektroda yang besar,

membuat elektroliser tidak praktis. Selain itu, menggunakan kepadatan arus di atas 1000 mA/cm² akan menghasilkan konsumsi energi yang lebih besar, yang pada gilirannya akan menyebabkan biaya operasi yang lebih tinggi.

Menerapkan elektrokatalis atau memilih elektroda yang dibangun dari bahan yang menghambat evolusi klorin, dan mendukung evolusi oksigen harus didukung. Selanjutnya, pelapisan anoda dengan bahan membran pertukaran kationik untuk menekan evolusi klorin pada anoda juga dapat digunakan. Peneliti Bennett, J.E melakukan penelitian untuk uji variabel dan kondisi yang mempengaruhi evolusi klorin dan oksigen dalam elektrolisis air laut. Penelitian itu juga mengusulkan teknik untuk meningkatkan selektivitas evolusi oksigen atas klorin. Berdasarkan penelitian itu, reaksi evolusi oksigen ditemukan secara termodinamika di anoda dan memiliki potensi kesetimbangan yang di tegangan lebih rendah dibandingkan dengan klorin. [56]. Beberapa teknologi yang muncul sedang diimplementasikan dalam produksi hidrogen meliputi: elektrolisis air, fotolisis, fotokatalisis, foto-elektrolisis, gasifikasi air superfisial, pirolisis, siklus termo-kimia, pirolisis, reformasi uap biomassa dengan/tanpa penangkapan, pemanfaatan dan penyimpanan karbon, dan pencernaan anaerobik biomassa [57], [21], [58], [59].

Siklus termokimia menghasilkan hidrogen melalui beberapa reaksi kimia yang menguraikan air menjadi gas hidrogen dan gas oksigen. Ini terjadi pada suhu yang lebih rendah (800-1000°C) daripada disosiasi termal langsung, yang mencapai lebih dari 2500°C.

Dibandingkan dengan metode konvensional untuk memproduksi hidrogen, siklus foto-katalisis dan termo-kimia secara ekonomi tidak layak karena efisiensi rendah yang dicapai. Oleh karena itu, perbaikan yang signifikan akan diperlukan untuk membuat proses ini layak di masa depan. Arus listrik digunakan dalam proses elektroliser air untuk memecah molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen.

Menghasilkan hidrogen melalui elektrolisis air tampaknya merupakan metode yang efektif untuk menghasilkan hidrogen murni. Elektrolisis air menjadikannya proses

yang teruji dan terus dikembangkan lebih baik lagi untuk memproduksi gas hidrogen dan oksigen [48].

Produksi hidrogen melalui elektrolisis air, dengan penggunaan listrik dari pembangkit listrik tenaga batu bara, dianggap tidak ekonomis. Karena tingginya biaya yang terkait. Selain itu, hidrogen yang lebih murah dapat dihasilkan dengan menggunakan sumber energi terbarukan [22].

2.6 Energi Terbarukan

Sistem energi hibrida mengintegrasikan beberapa sumber energi ke dalam satu sistem untuk pembangkit energi. Dalam kebanyakan kasus, masalah produksi energi intermiten dari energi terbarukan telah menyebabkan beberapa kombinasi teknologi energi terbarukan diintegrasikan ke dalam sistem energi. Lebih khusus lagi, beberapa kombinasi matahari, angin, hidrogen, baterai, biogas, baterai, electrolyser telah dimasukkan ke dalam sistem hybrid.

Sejalan dengan itu, elektroliser air laut digabungkan dengan sel bahan bakar untuk menghasilkan beberapa produk. Ju-Hyung (2013) mempresentasikan paten pada sistem hibrida terintegrasi untuk secara bersamaan menghasilkan soda kaustik, PCV, urea, dan amonia sambil menghasilkan listrik menggunakan sel bahan bakar berdasarkan elektroliser air laut [60].

Dalam beberapa tahun terakhir, jumlah publikasi yang berfokus pada optimalisasi sistem hibrida dan pemodelan matematika telah meningkat secara signifikan, karena peningkatan daya komputasi dan berkurangnya waktu komputasi. Dokkar et al. (2013) berfokus pada optimalisasi sistem tenaga fotovoltaik-hidrogen untuk aplikasi di stasiun telepon seluler. Sistem yang diusulkan termasuk medan fotovoltaik, elektroliser air dan dua sel bahan bakar. Model diterapkan Genetic Algorithm (GA) ditambah dengan Quasi-Newton Method untuk menentukan kondisi operasi optimal untuk sel bahan bakar [61].

Pada tahun 2015, Lin et al. (2015) mengembangkan model matematika generik untuk menganalisis fleksibilitas operasional sementara dari sel bahan bakar surya / angin / PEM / sistem hibrida baterai. Tingkat input energi ke dalam sel fotovoltaik, sel bahan bakar dan turbin angin dianggap tergantung waktu dan tidak pasti. Oleh karena itu, perbedaan antara kebutuhan dan penyediaan energi didukung dengan pengoperasian baterai [62].

Penggabungan elektroliser dan sel bahan bakar ke dalam sistem hibrida telah meningkat secara signifikan, karena peningkatan kesadaran lingkungan dan eksplorasi sumber alternatif pembangkit energi. Lebih khusus lagi, Sharifian dan Harasek (2015) mengembangkan model matematika dinamis dari sistem PV ditambah dengan elektroliser air alkali, untuk mensimulasikan generasi hidrogen dari energi terbarukan. TRNSYS digunakan sebagai alat pemodelan untuk simulasi dinamis. Model simulasi yang dikembangkan, memodelkan electrolyser dengan beberapa sel yang terhubung secara seri dan dengan dua mode daya: konstan atau variabel [63].

Shedid dan Elshokary (2015) mempresentasikan studi eksperimental pada sistem hibrida elektroliser PV / alkali. Penelitian itu diterapkan pada kondisi cuaca di Mesir, dan elektrolit yang digunakan termasuk air laut, air yang diekstraksi dari Sungai Nil dan larutan kalium hidroksida (KOH). Hasil penelitian menunjukkan bahwa meningkatkan tegangan input elektroliser, meningkatkan laju aliran produksi hidrogen hingga maksimum tercapai. Setelah itu, laju aliran produksi hidrogen menurun dengan meningkatnya tegangan. Ini karena endapan endapan garam sulfat dan magnesium ada di permukaan elektroda. Akibatnya, terjadi peningkatan resistivitas aliran ion ke dan dari elektroda, serta berkurangnya kontak permukaan elektroda [64].

Area tematik dalam penelitian hidrogen hijau meliputi penyimpanan hidrogen, produksi hidrogen, elektrolisis, dan ekonomi hidrogen. Penelitian ini sejalan dengan UN-SDGs 7 (Energi Murah dan Hijau) dan 13 (Aksi Pencegahan Bencana akibat Iklim). Keputusan kebijakan di AS, Eropa, India, dan China akan berdampak signifikan terhadap produksi dan penyimpanan hidrogen hijau selama lima tahun ke depan. [65]. Elektrolisis air dengan energi terbarukan - Solar pembagian air - Photo-electrochemical cell untuk pemisahan air - Tandem cell untuk produksi

hidrogen dari uap air [66]. Penelitian yang menggunakan elektrolisis alkali, elektrolisis dengan elektrokatalis logam non-mulia, elektrolisis tekanan tinggi, desain sistem kompak, respon cepat dan kepadatan arus tinggi, elektrolisis limbah air organik, dan pengaruh tegangan eksternal rendah [67]. Pentingnya transisi ke energi terbarukan, khususnya hidrogen, melalui pemisahan air fotoelektrokimia, menekankan perlunya peningkatan efisiensi dan stabilitas di bidang ini, berdasarkan analisis bibliometrik dari tahun 1970 hingga 2022 [68].

Air laut adalah sumber daya yang menjanjikan untuk produksi hidrogen industri melalui elektrolisis. Beberapa tahun terakhir telah terlihat prestasi dalam mengembangkan elektrokatalis yang efisien untuk pemisahan air laut. Penelitian ini memberikan wawasan tentang mekanisme pemisahan air, fitur utama elektrolisis air laut, dan elektrokatalis bebas logam mulia untuk elektrolisis air laut [69]. Elektrolisis oksida padat dapat digunakan untuk memisahkan air laut yang tidak diolah untuk menghasilkan hidrogen dengan kinerja yang sangat baik dan stabilitas jangka panjang. Sel elektrolisis oksida padat menghasilkan 183 mL/menit hidrogen dengan efisiensi konversi energi 72,47%. Sel tidak menunjukkan degradasi yang jelas atau perubahan struktur dan komposisi setelah 420 jam operasi [70]. Katalis nitrida permukaan nikel tak jenuh dikembangkan yang sangat aktif dan stabil untuk evolusi hidrogen dari air laut, mengungguli platinum dan memungkinkan sistem elektroliser praktis untuk produksi hidrogen [71]. Teknologi hidrogen dapat memainkan peran penting dalam pengembangan sistem energi baru, dengan elektrolisis air menjadi penting untuk menghasilkan hidrogen berkelanjutan untuk mengintegrasikan energi terbarukan dalam berbagai sistem [72].

Teknologi elektrolisis suhu rendah sangat baik untuk produksi hidrogen yang berkelanjutan dan tahan lama dari sumber energi terbarukan laut lepas pantai. Studi ini meninjau semua teknologi elektrolisis yang mampu beroperasi di laut dan potensi kerusakan yang disebabkan oleh berbagai campuran dalam air laut [73]. Produksi hidrogen hemat energi dari elektrolisis air laut yang menghindari kimia klorin, mendegradasi polutan belerang, dan dapat digabungkan dengan tenaga surya untuk pembangkit hidrogen berkelanjutan [74].

Kabir dan Matin Bhuiyan (2017) mempresentasikan studi tentang desain dan simulasi sistem tenaga hijau hibrida yang menghasilkan hidrogen dari air laut. Sistem itu terdiri dari panel PV, generator turbin angin, pengontrol, PEME, tangki penyimpanan hidrogen, generator turbin gas, dan beban AC. Simulasi disimulasikan dalam HOMER. Hasil dari pekerjaan itu menunjukkan bahwa sistem itu ramah lingkungan karena sistem yang benar-benar hijau dan tidak mengeluarkan emisi karbon [75]. Selain itu, ditunjukkan bahwa penelitian yang disebutkan di atas serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Srisiriwat dan Pirom (2017) [76], dimana perbedaannya penelitian yang dilakukan oleh Kabir dan Matin Bhuiyan (2017) disimulasikan dalam HOMER dan bahwa Srisiriwat dan Pirom (2017) melakukan studi eksperimental yang kemudian diusulkan untuk divalidasi dalam HOMER.

Dalam upaya untuk mengurangi ketergantungannya pada bahan bakar fosil dan mencapai tujuan bauran energi 2025 sebesar 23% dari sumber terbarukan, Indonesia sedang menyelidiki pembangkitan hidrogen dengan elektrolisis air laut [77]. Penelitian telah menunjukkan bahwa gas hidrogen dapat diproduksi oleh elektrolisis air laut; asam sulfat sebagai katalis memberikan hasil terbaik [78].

Meskipun teknologi hidrogen hijau mempunyai potensi di Indonesia, biaya produksi yang tinggi tetap masih menjadi tantangan [77]. Analisis multikriteria metode elektrolisis air laut untuk pembangkit hidrogen hijau lepas pantai menemukan bahwa Elektrolisis Membran Pertukaran Proton (PEM) memiliki prospek aplikasi jangka pendek terbesar, dengan mempertimbangkan masalah ekonomi, lingkungan, dan sosial [79].

Hidrogen dapat menjadi sumber energi alternatif untuk sektor transportasi, yang merupakan konsumen energi terbesar. Sel bahan bakar hidrogen dapat digunakan sebagai sumber energi listrik untuk sektor transportasi kendaraan listrik mobil, bus dan sepeda motor yang saat ini sedang bermunculan. Hidrogen yang didapat melalui elektrolisis air laut sebagai bahan baku untuk menghasilkan hidrogen sebagai sumber energi alternatif untuk menggantikan bahan bakar fosil di sektor transportasi [80]. Indonesia memiliki potensi besar untuk energi matahari dan air

laut, dan teknologi untuk memproduksi hidrogen melalui elektrolisis menjadi lebih efisien dan lebih murah, menjadikannya metode yang layak untuk diterapkan. Perlu dikembangkan lebih lagi upaya Indonesia untuk menciptakan sistem pembangkit hidrogen yang berkelanjutan berdasarkan sumber daya air laut yang melimpah dan dengan energi bersih dan berkelanjutan.

