

Karakteristik Pembentukan dan Pelepasan Gelembung Hidrogen melalui Proses Elektrolisis Air

¹ Made Sucipta

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia
m.sucipta@unud.ac.id

²Deal Yacobson Sitepu, ³ I Nyoman Citta Diatmika, ⁴ Armeisia Daun rara, ⁵ Betty Florensia Sinaga,

⁶ Made Suarda, ⁷ Iskandar Ali Mubarak, ⁸ Rafil Arizona, ⁹ Deendarlianto

²Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia
dealsitepu@gmail.com

³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia
nyomancitta12@gmail.com

⁴Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia
daunrara5@gmail.com

⁵Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia
bettysinaga1907@gmail.com

⁶Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana
Denpasar, Indonesia
made.suarda@unud.ac.id

⁷Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada
Denpasar, Indonesia
iskandar.ali.m@mail.ugm.ac.id

⁸Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada
Denpasar, Indonesia
rafilarizona@eng.uir.ac.id

⁹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada
Denpasar, Indonesia
deendarlianto@ugm.ac.id

Abstract— Elektrolisis air alkali (AWE) telah muncul sebagai salah satu teknologi yang paling menjanjikan dan banyak diadopsi untuk produksi hidrogen karena kesederhanaannya, skalabilitasnya, dan keberlanjutannya. Dalam beberapa tahun terakhir, telah ada minat baru dalam mengoptimalkan sistem AWE untuk meningkatkan efisiensi,

Kata Kunci— *electrolysis, hydrogen production, pelepasan bubble, energy*

I. PENDAHULUAN

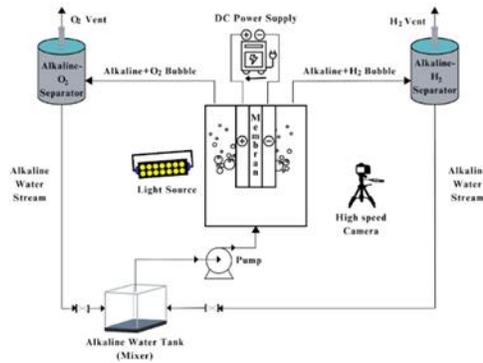
Sebagai salah satu persyaratan inheren terkait dalam mengurangi permasalahan emisi gas rumah kaca global, transisi energi telah menjadi tantangan besar selama 30 tahun ke depan. Di samping itu, meningkatnya permintaan energi global yang didorong oleh faktor-faktor sosial ekonomi, pertumbuhan demografi, meningkatnya urbanisasi, kemajuan industri, teknologi baru, dan meningkatnya pendapatan modal bersih (Minli, Wang, dan Vredenburg, 2021) [1]. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini, dengan cara menggunakan energi terbarukan. Namun, ada beberapa kelemahan dalam menggunakan energi terbarukan salah satunya yaitu pembangkitan yang terputus-putus. Untuk mengatasi tantangan ini, energi hidrogen menjadi solusi dikarenakan sifatnya yang ringan, dapat disimpan, reaktif, serta memiliki kandungan energi tinggi per satuan massa dan dapat dengan mudah diproduksi dalam skala industri [2]. Hidrogen dianggap sebagai solusi utama sistem energi berkelanjutan di masa depan karena kepadatan energinya yang tinggi dan kemampuannya untuk menyimpan energi atau sebagai pembawa energi. Hidrogen memiliki kepadatan energi tertinggi (142 MJ/kg) di antara sumber energi lain seperti bensin (45,8 MJ/kg), metana (47,2 MJ/kg), atau baterai Lithium (0,9-2,49 MJ/kg). Seiring berlanjutnya peralihan global menuju energi terbarukan, hidrogen telah muncul sebagai pembawa energi penting yang menawarkan solusi yang bersih, efisien, dan terukur untuk mendekarbonisasi banyak industri seperti transportasi, pembangkit listrik, dan manufaktur berat [3]. Dalam produksi hidrogen mencakup beberapa metodologi produksi yang masing-masing memiliki kelebihan dan tantangan yang berbeda termasuk pada SMR (*Steam Methane Reforming*), gasifikasi batu bara, gasifikasi biomassa. Untuk dapat memproduksi hidrogen hijau dari sumber energi terbarukan dengan menggunakan reaksi katalitik dengan uap untuk mengekstraksi hidrogen dari gas alam, namun karena produksi karbon dioksida yang intensif memunculkan kekhawatiran terhadap keberlanjutan lingkungan. Gasifikasi menghadirkan keuntungan terhadap ketergantungan pada bahan bakar fosil dengan cara mengubah biomassa atau bahan karbon lain menjadi syngas, namun gasifikasi menyebabkan produksi tar yang berlebih. Proses elektrolisis air menjadi salah satu pilihannya. Di antara berbagai teknologi elektrolisis air, elektrolisis air alkali AWE (*Alkaline Water Electrolysis*) merupakan salah satu metode yang paling matang dan hemat biaya untuk produksi hidrogen skala besar. AWE menggunakan elektrolit alkali cair, seperti kalium hidroksida (KOH) atau natrium hidroksida (NaOH), dan katalis logam nonmulia, menjadikannya solusi yang layak secara komersial dengan penggunaan industri selama puluhan tahun. Sedangkan elektrolisis air hadir dengan memberikan keuntungan baik dari sisi lingkungan dan ekonomis [4-5].

Elektrolisis air adalah peristiwa penguraian senyawa air (H_2O) menjadi gas gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) dengan menggunakan arus listrik yang melalui air tersebut. Studi mengenai elektrolisis air telah dikenal lebih dari 200 tahun dan dicapai dengan menerapkan tegangan pada dua elektroda dalam air, yang memecah molekul air menjadi unsur-unsur penyusunnya, yaitu dua bagian hidrogen dan satu bagian oksigen. Hidrogen dapat disimpan sebagai bahan bakar hijau karena ketika direkombinasi dengan oksigen, ia menghasilkan energi dan air sebagai satu-satunya produk sampingan (Phillips dan Dunnill, 2016) [6]. Gas H_2 sangat potensial digunakan sebagai sumber energi karena sifatnya yang ramah lingkungan. Proses elektrolisis dalam mengurai senyawa air berlangsung lambat sehingga dibutuhkan katalis untuk mempercepat reaksi dan dapat menambah jumlah gas hidrogen yang di produksi [7]. Penggunaan katalisator elektrolit kuat seperti NaOH, KOH dan H_2SO_4 berfungsi mempermudah proses penguraian air menjadi hidrogen dan oksigen karena ion-ion katalisator mampu mempengaruhi kesetabilan molekul air menjadi ion H^+ dan OH^- yang lebih mudah di elektrolisis karena terjadi penurunan energi pengaktifan (Wahyono dan Sutanto, 2017) [8].

Pada penelitian ini telah dilakukan analisis eksperimen *Alkaline Water Electrolysis* dengan larutan yang digunakan yaitu Aquades dan KOH serta menggunakan aluminium dan stainless sebagai material untuk elektroda nya. Penelitian ini dilakukan untuk mengontrol ukuran dan posisi nukleasi gelembung hidrogen pada permukaan elektroda, serta menganalisis pengaruh dari variasi dan jarak elektroda, material, dan konsentrasi larutan terhadap pertumbuhan dan pelepasan gelembung hidrogen.

II. METODE DAN PROSEDUR

Gambar 1 menunjukkan instalasi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini. Komponen *electrolyzer* yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari akrilik dimana terdapat membran yang menjadi pembatas antara anoda dan katoda. *Electrolyzer* berfungsi sebagai tempat terjadinya pembentukan dan pelepasan bubble hidrogen dan oksigen. Komponen elektroda yang digunakan adalah plat aluminium dimana terdapat beberapa lubang dengan diameter 2 mm untuk mengatur ukuran bubble yang ingin diteliti. *Alkaline Water Electrolysis* (AWE) merupakan metode yang digunakan dalam elektrolisis air ini, dimana larutan Aquades dan KOH dicampur sehingga persentase larutan dapat divariasikan.



GAMBAR 1. DIAGRAM SKEMATIK INSTALASI PENELITIAN

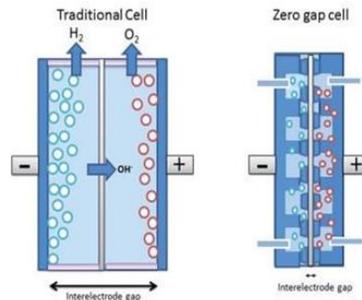
Dalam penelitian ini, *alkaline water tank* berfungsi sebagai tempat penyimpanan larutan yang telah dicampur. Larutan kemudian di pompa menggunakan pompa diafragma dan mengalir melalui selang menuju *electrolyzer*. *Power Supply* diaktifkan untuk mentransfer daya listrik anoda dan katoda pada elektroda yang dipisahkan oleh membran. Pembentukan dan pelepasan *bubble* oksigen dan hidrogen pada plat aluminium dan stainless kemudian diteliti menggunakan *high speed camera* dengan pencahayaan dari *light source* agar gambar hasil pengujian terlihat.

Dengan jelas. *Alkaline + Oxygen bubble* dan *Alkaline + Hydrogen bubble* kemudian mengalir menuju *oxygen separator* dan *hydrogen separator*. Di dalam separator, gas dan larutan akan terpisah dimana gas oksigen dan hidrogen akan keluar masing-masing ventilasi sedangkan larutan kembali mengalir menuju *alkaline water tank*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

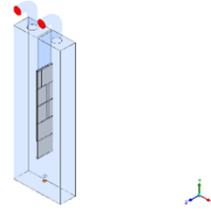
A. Modifikasi Fisik

Modifikasi posisi elektroda pada penelitian ini dapat dilakukan untuk mengurangi resistansi ohmik pada proses elektrolisis. Posisi elektroda pada proses elektrolisis konvensional seperti pada gambar di sebelah kiri, yaitu terdapat celah antara katoda dan anoda. Antara anoda dan katoda terdapat elektrolit dan diafragma, keduanya berperan dalam resistansi ohmik dapat dilihat pada gambar 2.



GAMBAR 2. ELEKTROLISIS DESAIN SEL CELAH NOL

Perlu diketahui bahwa resistansi ohmik akan menentukan seberapa besar tegangan (atau daya) yang dibutuhkan agar proses elektrolisis dapat berlangsung. Semakin besar resistansi ohmik, maka semakin besar pula tegangan listrik yang dibutuhkan dalam proses elektrolisis. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi seperti sel celah nol untuk mengurangi rugi-rugi ohmik akibat elektrolit. Antara katoda dan anoda dipisahkan oleh diafragma untuk memisahkan pelat katoda dan anoda. Dengan demikian, resistansi ohmik yang terjadi hanya berasal dari resistansi diafragma. Pada gambar 2 ada dua perbedaan desain yaitu pengaturan standar dan pengaturan celah nol, ini menunjukkan prinsip perbedaan dalam desain, elektroda berpori ditekan pada kedua sisi pemisah gas untuk mengurangi celah antar elektroda, dan lapisan difusi gas konduktif menyediakan penghubung listrik dari elektroda ke pengumpul arus bipolar. skema yang menunjukkan pengurangan celah antar elektroda dengan menggunakan desain sel celah nol, hal ini secara signifikan mengurangi resistansi sel secara keseluruhan, sehingga meningkatkan kinerja terutama pada kepadatan arus yang tinggi.

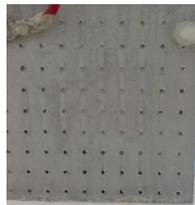


GAMBAR 3. DESAIN ALAT ELECTROLYSIS

Pada Gambar 3 dapat dilihat elektrolisis alkali celah nol menggunakan jala di kedua sisi pemisah gas mikropori. ini menunjukkan peningkatan besar dalam kepada arus terutama berpusat pada pengembangan membran perutukan anion alkali. Dalam elektrolisis alkali desain sel celah nol bekerja dengan mengompresi dua elektroda berpori di kedua sisi membran penghantar ion hidroksida atau pemisah gas, hal ini menghasilkan celah antaradua elektroda yang sama dengan ketebalan membran (<0,5 mm) dari pada (>2 mm) untuk pengaturan tradisional. Sehingga secara signifikan mengurangi kontribusi resistansi ohmik dari elektrolit antara dua elektroda. Lapisan difusi gas menyediakan sambungan listrik dari elektroda berpori ke pelat bipolar, sementara secara bersamaan memungkinkan umpan larutan elektrolit, dan pembuangan produk gas.

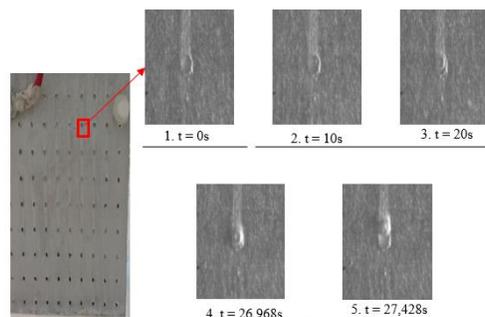
B. Karakteristik Pembentukan dan Pelepasan Gelembung

Gelembung hidrogen dihasilkan dari elektrolisis air di mana air yang berada di dekat katoda menjadi jenuh dengan hidrogen, sehingga pelepasan hidrogen dimulai dengan nukleasi gelembung pada permukaan elektroda di beberapa titik nukleasi. Gelembung kemudian tumbuh dan akhirnya terlepas dari permukaan elektroda karena gaya pelepasan menggantikan tegangan permukaan. Selama cairan di sekitarnya tetap jenuh, gelembung dapat terus bertambah bahkan setelah dikeluarkan dari permukaan katoda. Pembentukan gelembung udara berkontribusi signifikan terhadap potensi berlebih elektroda, dan rapat arus aktual jauh lebih tinggi daripada rapat arus permukaan atau rapat arus nominal.



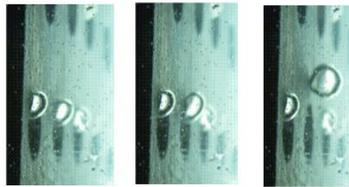
GAMBAR 4. ELEKTRODA PELAT BAJA

Pada penelitian ini kami menggunakan proses *alkaline water electrolysis* (AWE) dengan kerapatan arus 10 A/m^3 dan menggunakan elektroda dengan diameter lubang 2mm. Temuan penelitian ini juga menjelaskan bahwa pola lubang pada sel elektroda celah nol dapat memusatkan area aktif pemisahan air. Sehingga lokasi nukelasi gelembung dapat dikontrol



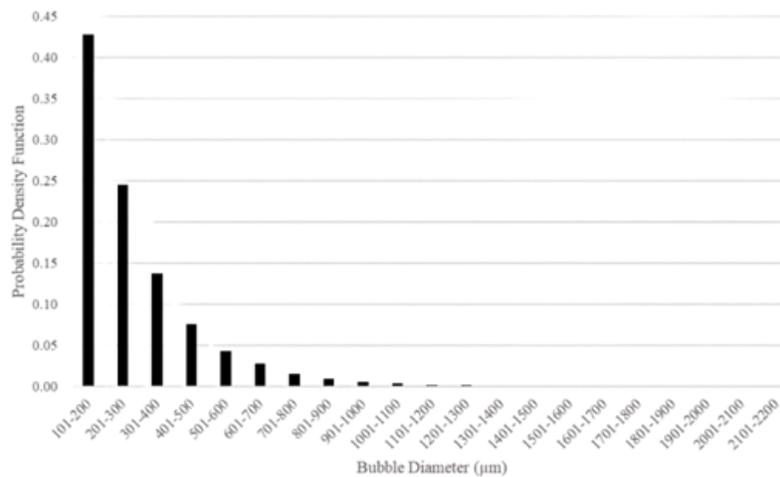
GAMBAR 5. PROSES PEMBENTUKAN DAN PELEPASAN GELEMBUNG HIDROGEN

Pembentukan gelembung dalam elektrolisis air merupakan proses yang banyak diamati pada elektroda penghasil gas dalam berbagai aplikasi praktis seperti pelapisan listrik, elektrowinning, produksi hidrogen. Elektrolisis air menghasilkan gelembung hidrogen dengan distribusi ukuran tergantung pada berbagai faktor. Air di dekat katoda menjadi jenuh dengan hidrogen dan karenanya pelepasan hidrogen pada elektroda memicu gelembung pada permukaan elektroda di beberapa lokasi nukleasi. Gelembung kemudian tumbuh dan akhirnya terlepas dari permukaan elektroda karena gaya pelepasan menggantikan gaya tegangan permukaan. Gelembung dapat terus tumbuh bahkan setelah lepas dari permukaan katoda selama cairan di sekitarnya tetap jenuh. Pembentukan gelembung berkontribusi secara signifikan terhadap kelebihan potensial elektroda dan kerapatan arus aktual jauh lebih tinggi dari kerapatan arus superficial atau nominal. Dapat dilihat pada gambar 5 dimana terjadinya proses dimana gelembung mulai mengalami pembentukan di dalam lubang dengan waktu-waktu tertentu, pada proses yang pertama belum ada terbentuknya gelembung hidrogen dan ketika memasuki waktu 10 detik kemudian kita dapat melihat ada nya bubble yang mulai tumbuh tetapi dengan ukuran yang sangat kecil.



GAMBAR 6. PELEPASAN BUBBLE

Pada gambar 6 dapat kita lihat pertumbuhan gelembung dalam aliran gelembung individual pada permukaan elektroda, kita dapat melihat kembali distribusi ukuran gelembung. Jelas dari hasil yang disajikan di gambar tersebut, bahwa ukuran gelembung ditentukan dari proses seperti nukleasinya dan diikuti oleh pertumbuhan yang dikendalikan oleh difusi. Faktanya, faktor terakhir memainkan peran yang sangat penting dalam penentuan ukuran di dekat permukaan elektroda. Ukuran gelembung berubah tidak hanya di permukaan tetapi juga setelah terlepas. Saat gelembung terlepas dari permukaan elektroda, gelembung bergerak melalui lapisan jenuh di sekitar elektroda. Saat gelembung bergerak naik melalui lapisan air jenuh hidrogen ini, ukurannya perlahan semakin bertambah.



GAMBAR 7. DISTRIBUSI UKURAN BUBBLE

Gelembung yang lebih kecil memiliki kecepatan yang lebih rendah dan gelembung yang lebih besar memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Jadi, pada dasarnya gelembung yang lebih kecil tumbuh lebih banyak di dekat elektroda karena laju pertumbuhannya yang lebih tinggi dan juga menghabiskan lebih banyak waktu di dekat elektroda karena

bergerak lebih lambat sedangkan gelembung yang lebih besar memiliki kecepatan yang lebih tinggi disebabkan oleh peningkatan gaya apung oleh karena itu, kita dapat memperkirakan bahwa gelembung dalam rentang diameter akan mencapai ukuran yang sangat dekat dalam wilayah tertentu dari permukaan elektroda.

Pada gambar 7 dapat kita lihat menyajikan variasi distribusi ukuran gelembung seiring waktu, pada gambar diatas dapat kita lihat semakin besar arus yang diberikan menunjukkan bahwa semakin banyak situs nukleasi yang menghasilkan aliran gelembung untuk memulai dari secara bertahap meningkat seiring berjalannya waktu. dengan kemajuan dalam perubahan populasi gelembung. Gambar diatas menunjukkan variasi urutan peningkatan diameter gelembung pada permukaan elektroda, Bahkan untuk arus tertentu laju pertumbuhan gelembung lebih cepat dari diameter awal yang lebih kecil. Hal ini merupakan ciri khas pertumbuhan gelembung yang menempel akibat difusi yang sudah dikenal luas. Dapat dicatat bahwa terdapat populasi yang berkurang pada ukuran gelembung yang lebih kecil juga dapat disebabkan oleh nukleasi gelembung yang sangat kecil atau penggabungannya dengan gelembung lain yang lebih besar.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berkaitan dengan produksi gas hidrogen menggunakan metode *Alkaline Water Electrolysis* (AWE). Gas hidrogen merupakan sumber energi baru terbarukan (EBT). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen pada material elektroda yang diteliti serta menganalisis karakteristik pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen pada penambahan surfaktan dan pada variasi daya listrik yang diberikan pada elektrolit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produksi gas hidrogen dengan konsentrasi tertinggi diperoleh pada elektrolisis aquades + KOH dengan konsentrasi 10% serta material yang digunakan untuk melihat produksi dan pembentukan gelembung hidrogen lebih efisien diperoleh pada material Stainless steel dicampur dengan *Titanium Nitrida* (TIN).

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Udayana atas pendanaan hibah penelitian/Riset Merdeka Belajar sesuai dengan kontrak Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Penelitian B/266.40/UN14.4.A/PT.01.03/2024. Ucapan terima kasih juga kepada Kelompok Bidang Keahlian Energi, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada karena sudah memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yu, Minli, Ke Wang, and Harrie Vredenburg. 2021. "Insights into Low-Carbon Hydrogen Production Methods: Green, Blue and Aqua Hydrogen." *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (41): 21261–73.
- [2] Sebbahi, Seddiq, Abdelmajid Assila, Amine Alaoui Belghiti, Said Laasri, Savaş Kaya, El Kebir Hlil, Samir Rachidi, and Abdelwahed Hajjaji. 2024. "A Comprehensive Review of Recent Advances in Alkaline Water Electrolysis for Hydrogen Production." *International Journal of Hydrogen Energy* 82:583–99.
- [3] Norman, E A, V M Maestre, A Ortiz, and I Ortiz. 2024. "Steam Electrolysis for Green Hydrogen Generation. State of the Art and Research Perspective." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 202:114725.
- [4] Yufi Fisalma, Yudith Nida Nura Lele, Sri Watini. 2024. "Jejak Pembelajaran : Jurnal Pengembangan Pendidikan." *Pengembangan Pendidikan* 8 (1): 120–30.
- [5] Dash, Snehasish, Arjun Singh K, Jose S, Vincent Herald Wilson D, Elangovan D, Subbarama Kousik Surapraraju, and Sendhil Kumar Natarajan. 2024. "Advances in Green Hydrogen Production through Alkaline Water Electrolysis: A Comprehensive Review." *International Journal of Hydrogen Energy* 83:614–29.
- [6] Dash, Snehasish, Arjun Singh K, Jose S, Vincent Herald Wilson D, Elangovan D, Subbarama Kousik Surapraraju, and Sendhil Kumar Natarajan. 2024. "Advances in Green Hydrogen Production through Alkaline Water Electrolysis: A Comprehensive Review." *International Journal of Hydrogen Energy* 83:614–29.
- [7] Robert Philips and Charles W. Dunnill. 2016 "Zero Gap Alkaline Electrolysis Cell Designs for Renewable Energy Storage as Hydrogen Gas: A Comprehensive Review." *International Journal of Hydrogen Energy* 100643-100651

[8] Yoyon Wahyono, Heri susanto, Eko Hidayanto “Produksi gas hydrogen menggunakan metode elektrolisis dari elektrolit air dan air laut dengan penambahan katalis NaOH” 353-359