

Pengaruh Konsentrasi Larutan Kalium Hidroksida (KOH) Terhadap Produksi Hidrogen Pada Proses Elektrolisis Air

Armeisia Daun Rara¹, Ali Iskandar Mubarak², Deendarlianto², Andrianto Bambang²,
Syarif Rifqi², Made Suarda¹, Made Sucipta^{1*}

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Jl. Kampus Unud Jimbaran Badung, Bali 80361, Indonesia

² Program Studi Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika no 2. Yogyakarta 55281, Indonesia

*Penulis korespondensi; E-mail: m.sucipta@unud.ac.id

ABSTRAK

Dalam mencegah eksploitasi energi fosil secara berlebihan, maka energi terbarukan menjadi satu-satunya solusi dalam hal ini. Hidrogen merupakan salah satu pembawa energi terbarukan bila proses produksinya berasal dari sumber daya yang tidak dapat habis. Salah satu metode proses produksi hidrogen yang terbarukan adalah *alkaline water electrolysis*. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti proses produksi hidrogen, hubungan antara distribusi ukuran gelembung dan volume hidrogen yang dihasilkan, serta efisiensi waktu pelepasan gelembung hidrogen. Dalam penelitian ini digunakan campuran KOH dan aquades sebagai elektrolit serta arus listrik searah untuk daya listriknya. Konsentrasi KOH dan daya listrik divariasikan untuk mendapat perbandingan yang signifikan. Terdapat 3 variasi konsentrasi yang digunakan yaitu 5%, 7%, dan 10%, lalu untuk daya listrik, digunakan daya 0,01 watt, 0,07 watt, serta 0,14 watt. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi ukuran gelembung hidrogen tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap volume gas hidrogen yang dihasilkan. Dalam proses produksi hidrogen, larutan elektrolit dan daya listrik yang digunakan sangat berpengaruh terhadap volume hidrogen dan efisiensi waktu yang dihasilkan, dimana semakin tinggi persentase elektrolit dan daya listrik yang diberikan, maka semakin efisien pula waktu pelepasan gelembung hidrogen dan volume hidrogen yang dihasilkan semakin tinggi.

Kata Kunci: hidrogen, elektrolisis, konsentrasi elektrolit.

ABSTRACT

In preventing the overexploitation of fossil energy, renewable energy is the only solution in this case. Hydrogen is one of the renewable energy carriers when the production process comes from inexhaustible resources. One method for producing renewable hydrogen is alkaline water electrolysis. This study aims to investigate the hydrogen production process, the relationship between the bubble size distribution and the volume of hydrogen produced, and the efficiency of hydrogen bubble release time. In this study, a mixture of KOH and distilled water was used as the electrolyte, and direct current was applied to generate the power. The concentration of KOH and electric power were varied to obtain a significant comparison. There were 3 variations of concentration used, namely 5%, 7%, and 10%, then for electric power of 0.01 watts, 0.07 watts, and 0.14 watts were used. The results showed that the hydrogen bubble size distribution did not have a significant effect on the volume of hydrogen gas produced. In the hydrogen production process, the electrolyte solution and electrical power used greatly affect the volume of hydrogen and the efficiency of the time produced, where the higher the percentage of electrolyte and electrical power given, the more efficient the hydrogen bubble release time and the higher the volume of hydrogen produced.

Keywords: hydrogen, electrolysis, electrolyte concentration.

PENDAHULUAN

Dunia saat ini dihadapkan dengan tantangan pergeseran eksploitasi energi fosil, dimana energi fosil dapat memicu berbagai macam dampak negatif bagi lingkungan seperti polusi udara, polusi air, erosi tanah, dan juga perubahan iklim yang ekstrim [1] –[3]. Energi terbarukan menjadi solusi untuk mengatasi hal tersebut. Selain penggunaannya yang relatif lama dan dapat diperbaharui, energi terbarukan juga berdampak baik bagi lingkungan dan sosial [4].

Berbagai penelitian dilakukan untuk menemukan solusi dari energi terbarukan, salah satunya adalah energi yang bersumber dari hidrogen [5]. Hidrogen dapat digunakan dalam berbagai sektor, yaitu dalam industri kimia, metalurgi, transportasi, dan sebagainya [6]. Beberapa metode dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen termasuk reformasi termal gas alam, proses tenaga surya, biologi, dan elektrolisis. Namun, untuk benar-benar mencapai *green hydrogen* maka proses produksi hidrogen harus menghindari pelepasan CO₂ dan emisi gas rumah kaca mendekati nol [7].

Elektrolisis air menjadi salah satu proses produksi hidrogen tanpa pelepasan CO₂ [8]. Dalam sistem elektrolisis air terdapat molekul hidrogen dan gas oksigen dimana oksigen terbentuk di anoda melalui reaksi yang disebut *oxygen evolution reaction* (OER) sedangkan hidrogen terbentuk di katoda dengan reaksi *hydrogen evolution reaction* (HER) [9]. Elektrolisis air bekerja dengan mengubah air menjadi molekul hidrogen dan oksigen. Dalam proses ini, energi diperlukan untuk memutus ikatan O-H pada air menggunakan daya listrik. Daya listrik berfungsi untuk memusatkan elektron di atom hidrogen, sehingga gas hidrogen dapat berfungsi sebagai pembawa energi [10].

Elektrolisis terdiri dari beberapa kategori seperti *anion-exchange membrane* (AEM), *solid oxide electrolysis* (SOE), *polymer exchange membrane* (PEM), dan *alkaline water electrolysis* (AWE) [11]. Dibandingkan dengan kategori lainnya, *alkaline water electrolysis* (AWE) memiliki beberapa keunggulan seperti biaya yang rendah, dapat menggunakan katalis non logam serta siklus hidup yang tahan lama [12]. Metode AWE merupakan metode produksi hidrogen dengan pemisahan air menjadi hidrogen dan oksigen, dimana hal ini terjadi bila adanya aliran listrik yang mengalir di elektrolit. Elektrolit yang digunakan dalam AWE ini adalah KOH, walaupun jika dibandingkan dengan NaOH, KOH memiliki harga yang lebih tinggi, namun KOH lebih ramah lingkungan dan cocok untuk penelitian berbasis energi terbarukan [13]. Proses elektrokimia ini terjadi pada permukaan elektroda, dimana terdapat 2 elektroda yaitu anode dan katode yang dibatasi oleh membran [14],[15].

Stainless steel merupakan logam non mulia yang tahan terhadap korosi serta mudah diperoleh, oleh karena itu logam ini dapat digunakan sebagai elektroda alternatif dalam AWE [16]. Sedangkan untuk membran, keramik polimer cocok digunakan dalam AWE karena dapat meningkatkan konduktivitas KOH [17],[18]. Karakteristik dari pembentukan gelembung hidrogen ini, apabila fluida di sekitar katoda tetap jenuh maka gelembung hidrogen akan terus diproduksi bahkan bertambah setelah mengalami pelepasan pada permukaan katoda [19]. Produksi hidrogen dengan metode AWE saat ini sudah mumpuni sehingga beberapa industri telah menerapkannya, namun efisiensi pada AWE ini masih terus dikembangkan [20]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis proses pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen pada permukaan material elektrode. Dimana perlunya engineering pada material elektroda untuk mempercepat proses pelepasan gelembung hidrogen. Selanjutnya, konsentrasi elektrolit dan daya listrik juga divariasikan untuk mendapat perbandingan yang signifikan.

METODE

Dalam penelitian ini, untuk memproduksi gas hidrogen digunakan metode AWE yang memiliki beberapa tahapan proses. Tahapan pertama adalah proses pembuatan larutan elektrolit dengan menggunakan KOH dan aquades. Terdapat 3 variasi konsentrasi yang akan digunakan sebagai elektrolit, yaitu 5%, 7%, dan 10%, berbasis massa. Perbandingan massa tiap konsentrasi larutan ditentukan menggunakan persamaan (1).

$$X = \frac{m_{KOH}}{m_{air} + m_{KOH}} \quad (1)$$

Dengan:

X = persen KOH yang diinginkan [%]

m_{KOH} = massa KOH [kg]

m_{air} = massa air (1000 ml = 0,997 kg)

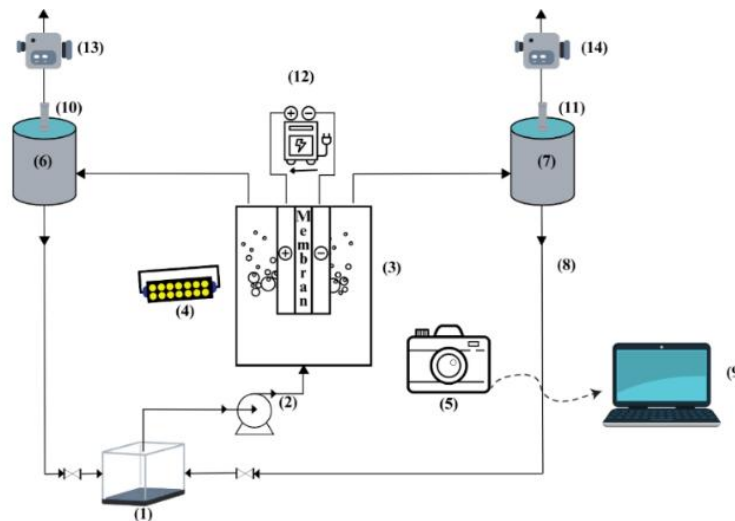
Dari perhitungan rumus, didapatkan perbandingan massa konsentrasi seperti pada Tabel 1. Setelah mengetahui perbandingan massa tiap konsentrasi, KOH ditimbang sesuai massa yang telah ditentukan dan dicampur dengan larutan aquades menggunakan *magnetic stirrer*.

Tabel 1. Komposisi elektrolit yang diuji

Komposisi Elektrolit	Konsentrasi KOH		
	5%	7%	10%
Massa KOH [kg]	0,0524	0,0750	0,1107
Volume aquades [L]	1	1	1
Densitas KOH [kg/m ³]	997	997	997
Densitas Aquades [kg/m ³]	2120	2120	2120

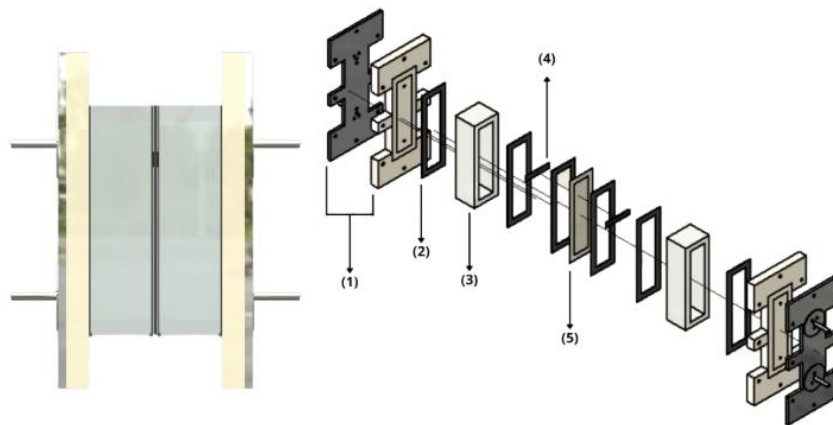
Tahap kedua adalah proses pengambilan data yang dimulai dengan memasukkan larutan elektrolit dalam *alkaline water tank*. Larutan yang akan diuji tersebut dipompa menggunakan pompa sentrifugal melalui selang menuju *electrolyzer*. Laju aliran dihitung menggunakan *flow meter* yang terpasang sebelum *electrolyzer*. Setelah larutan terisi dalam *electrolyzer*, *power supply* kemudian diaktifkan dan mengatur daya yang ingin digunakan dalam pengujian. Daya yang ditransfer terbagi menjadi 2 yaitu anode dan katode dimana masing-masing dialirkan menuju elektroda yang dibatasi oleh membran. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *high speed camera* untuk merekam proses terjadinya pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen.

Larutan yang dipompa menghasilkan tekanan sehingga gelembung hidrogen dan oksigen yang terlepas dapat mengalir bersama air alkali menuju ke masing-masing separator. Di dalam separator, gas dan larutan terpisah, dimana larutan kembali menuju *alkaline water tank* sedangkan gas hidrogen dan oksigen menuju ventilasi yang kemudian laju aliran gasnya dihitung menggunakan *flowmeter* gas. Data yang telah direkam kemudian dianalisis menggunakan MATLAB. *Image processing* pada MATLAB bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen pada permukaan elektroda. Gambar 1 menunjukkan instalasi alat penelitian dengan beberapa komponen, seperti *alkalin water tank* (1), *sentrifugal pump* (2), *electrolyzer* (3), *light source* (4), *high speed camera* (5), *alkaline+O₂ separator* (6), *alkaline+H₂ separator* (7), *alkaline water stream* (8), laptop (9), *oxygen ventilation* (10), *hydrogen ventilation* (11), *power supply* (12), *oxygen flowmeter* (13), dan juga *hydrogen flowmeter* (14). *Electrolyzer* yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari akrilik dengan membran yang menjadi pembatas antara anoda dan katoda. *Electrolyzer* berfungsi sebagai tempat dimana proses pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen dan oksigen terjadi.



Gambar 1. Instalasi alat penelitian

Dalam penelitian ini, AWE terjadi dalam sebuah wadah elektrolisis yang disebut dengan *electrolyzer*. Terdapat beberapa komponen penyusun untuk membentuk suatu *electrolyzer*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Komponen penyusun tersebut terdiri dari penutup *electrolyzer*, gasket, penampang elektrolisis, elektroda, dan membran. Penutup *electrolyzer* terbuat dari besi aluminium yang direkatkan dengan porselen sehingga mengurangi dampak korosi apabila konsentrasi elektrolit terlalu tinggi. Untuk meminimalisir kebocoran maka digunakan gasket yang terbuat dari bahan karet sehingga dapat bersifat fleksibel bila digunakan. Lalu untuk material elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah plat *stainless steel* yang telah di *coating* agar meminimalisir terjadinya korosi. Akrilik merupakan komponen penting dalam *electrolyzer* yang bersifat sebagai penampang elektrolisis dengan membran pemisah yang terbuat dari bahan keramik polimer. Dimensi dari tiap komponen dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 2. Desain *zero-gap electrolyzer*

Keterangan:

1. Penutup *electrolyzer*
2. Gasket
3. Akrilik
4. Elektroda
5. Membran

Tabel 2. Dimensi komponen *electrolyzer* dengan standar pengukuran ISO

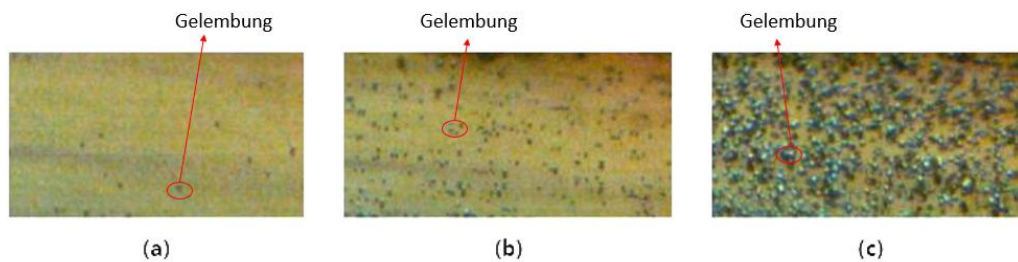
Komponen <i>Electrolyzer</i>	Panjang [mm]	Lebar [mm]	Tinggi [mm]	Tebal [mm]
Membran	50	-	150	0,2
Elektroda	50	-	10	0,5
Gasket	50	-	150	1
Akrilik	50	4	150	10

Tahapan terakhir dalam penelitian ini adalah pengolahan data. Setelah mengambil rekaman data penelitian, data tersebut di konversi menjadi gambar dan selanjutnya diolah menggunakan MATLAB. Pengolahan data bertujuan untuk menganalisis distribusi ukuran gelembung hidrogen. Dari distribusi tersebut, selanjutnya didapatkan volume total hidrogen pada tiap konsentrasi. Waktu pelepasan hidrogen juga diamati untuk menentukan efisiensi waktu yang digunakan dalam produksi hidrogen menggunakan metode AWE ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

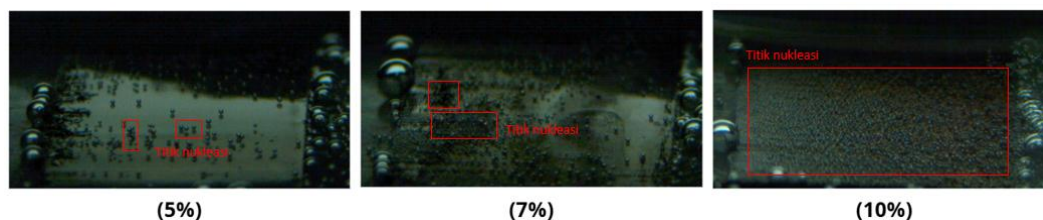
Dalam AWE, gelembung hidrogen dapat terbentuk karena adanya tegangan pada permukaan elektroda sehingga air yang berada di sekitar katoda menjadi jenuh dengan hidrogen. Pelepasan hidrogen dimulai dengan nukleasi gelembung pada permukaan elektroda di beberapa titik

nukleasi. Setelah lepas dari permukaan elektroda, gelembung hidrogen masih akan tetap terbentuk apabila cairan di sekitarnya tetap jenuh. Gambar 3 menunjukkan proses pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen pada konsentrasi KOH 10%. Di dalam gambar 3(a) menunjukkan proses pembentukan gelembung hidrogen dimana terdapat beberapa titik-titik gelembung yang kecil pada awal dilakukan pengujian sedangkan Gambar 3(b), gelembung yang dihasilkan sudah terlihat lebih banyak dan diameternya bertambah besar seiring waktu pengujian dilakukan. Gambar 3(c) menunjukkan proses pelepasan gelembung hidrogen, dimana beberapa gelembung yang memiliki diameter yang cukup besar terlihat terangkat dari permukaan elektroda.



Gambar 3. Proses pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen: a) Pembentukan gelembung hidrogen, b) Diameter gelembung membesar, c) Pelepasan gelembung hidrogen

Dalam penelitian ini, 3 variasi konsentrasi untuk diteliti untuk menentukan efisiensi produksi hidrogen. Gambar 4 merupakan perbandingan produksi hidrogen yang dihasilkan pada 3 detik setelah pengujian dimulai. Dapat dilihat bahwa produksi hidrogen pada masing-masing konsentrasi memiliki perbedaan yang signifikan. Konsentrasi KOH 5% menunjukkan pertumbuhan gelembung yang titik nukleasinya masih sedikit, sedangkan pada konsentrasi 7% mengalami peningkatan produksi hidrogen namun masih terlihat beberapa titik pada permukaan elektroda yang kosong. Pada konsentrasi KOH 10% terlihat produksi hidrogen yang sangat meningkat, titik nukleasinya pun tersebar merata pada permukaan elektroda.



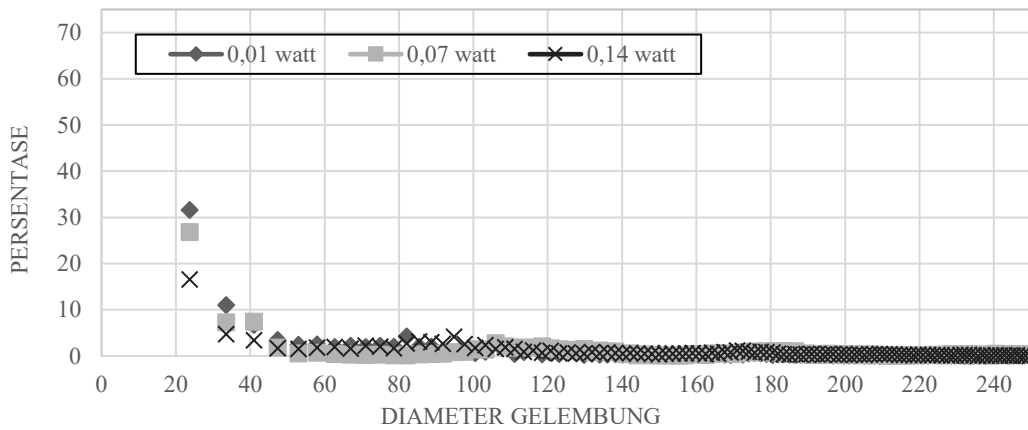
Gambar 4. Produksi hidrogen pada konsentrasi 5%, 7%, dan 10% saat $t = 3$ detik

Setelah melakukan pengolahan data pada *software* MATLAB didapatkan distribusi ukuran gelembung hidrogen pada masing-masing konsentrasi yang termuat dalam Gambar 5, 6, dan 7. ukuran gelembung hidrogen paling banyak, terletak pada rentang 20–40 mikrometer. Pada konsentrasi KOH 5% dan 10%, daya 0,01 watt merupakan daya dengan jumlah ukuran gelembung paling tinggi, sedangkan pada konsentrasi 7% berada di daya 0,14 watt. Hal ini dapat terjadi akibat adanya pengaruh ukuran gelembung hidrogen yang terbentuk selama proses produksi hidrogen sehingga distribusi gelembung hidrogennya tidak signifikan terhadap peningkatan konsentrasi elektrolit.

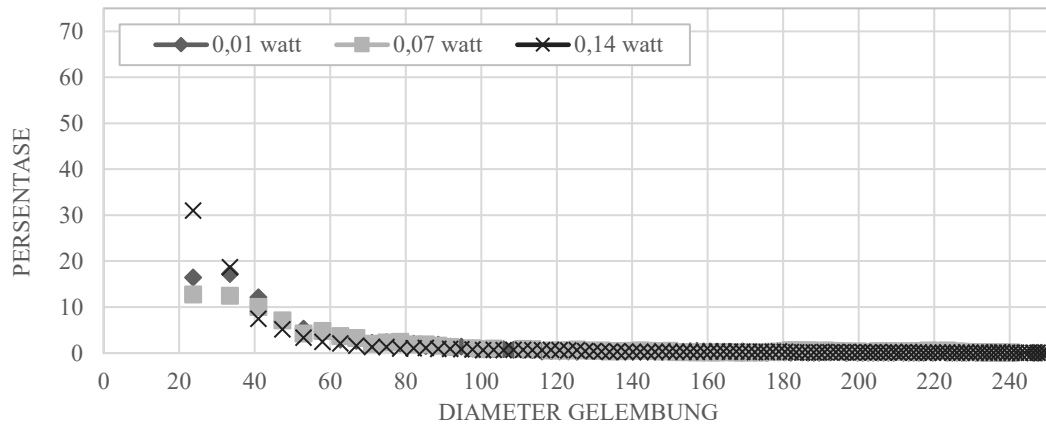
Dari distribusi ukuran gelembung, kemudian didapatkan total volume hidrogen pada tiap variasi konsentrasi larutan yang dapat dilihat pada Gambar 8. Hasilnya, semakin tinggi konsentrasi larutannya, semakin tinggi pula volume hidrogen yang dihasilkan. Pada grafik, dapat dilihat bahwa konsentrasi larutan 5% ,7%, dan 10% memiliki kenaikan volume hidrogen yang signifikan seiring dengan bertambahnya daya listrik yang diberikan. Volume hidrogen terbanyak terletak pada konsentrasi elektrolit 10 % dengan kenaikan volume hidrogen yang drastis seiring dengan bertambahnya daya listrik. Oleh karena itu, hal ini membuktikan bahwa semakin kecil gelembungnya, maka akan semakin cepat waktu pelepasannya, namun volume hidrogen yang dihasilkan juga sedikit, sedangkan gelembung yang besar akan lebih lama waktu pelepasannya,

namun volume hidrogen yang dihasilkan akan lebih banyak.

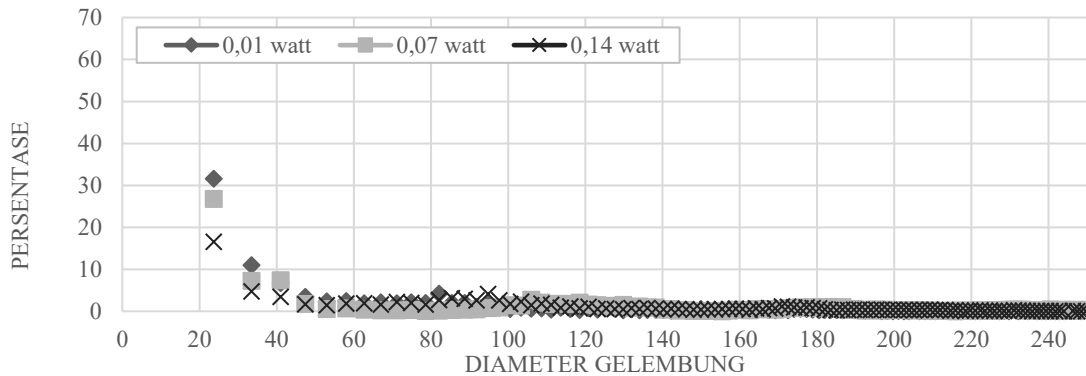
Selama proses produksi hidrogen dengan metode AWE, waktu pelepasan gelembung hidrogen juga diamati pada tiap konsentrasi. Waktu yang dihasilkan pada proses produksi hidrogen ini berada pada rentang > 1 detik dan < 2 detik seperti pada Gambar 9. Konsentrasi elektrolit 5%, 7%, dan 10%, memiliki efisiensi waktu seiring dengan bertambahnya daya listrik yang diberikan. Efisiensi waktu yang paling tinggi terdapat pada konsentrasi 10%. Oleh karena itu, semakin tinggi konsentrasi larutan KOH dan daya listrik yang diberikan maka semakin cepat juga waktu pelepasan gelembung hidrogennya.



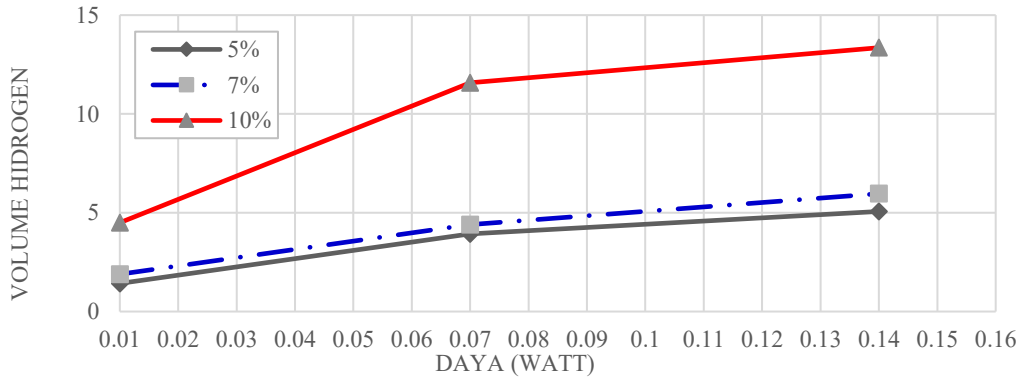
Gambar 5. Distribusi gelembung pada konsentrasi KOH 5%



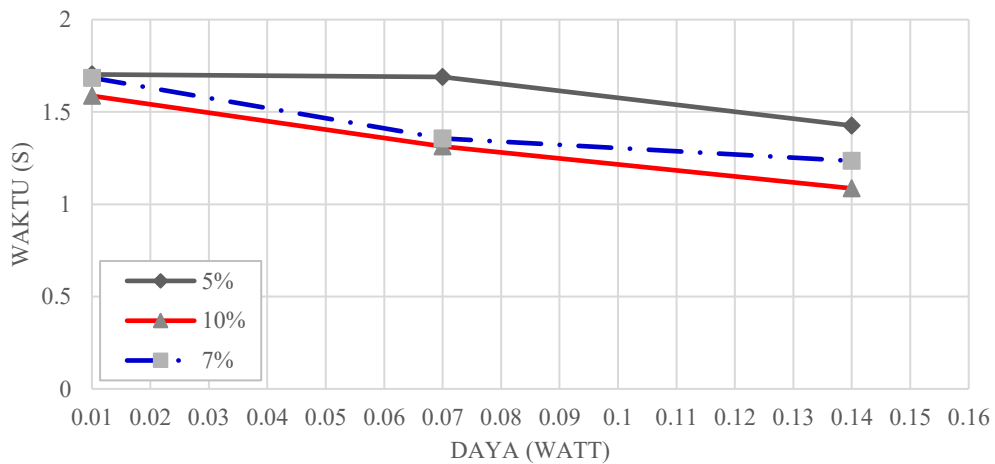
Gambar 6. Distribusi gelembung pada konsentrasi KOH 7%



Gambar 7. Distribusi gelembung pada konsentrasi KOH 10%



Gambar 8. Volume hidrogen terhadap daya untuk konsentrasi elektrolit yang berbeda



Gambar 9. Waktu pelepasan gelembung hidrogen sebagai fungsi daya untuk konsentrasi elektrolit yang berbeda

KESIMPULAN

Setelah melakukan penelitian mengenai proses produksi menggunakan metode AWE, terdapat beberapa kesimpulan yang dapat di tarik, seperti distribusi ukuran gelembung hidrogen yang tidak merata, tidak berpengaruh terhadap volume hidrogen yang dihasilkan. Selanjutnya konsentrasi elektrolit dan daya listrik memiliki pengaruh yang signifikan terhadap volume hidrogen, dimana semakin tinggi konsentrasi elektrolit dan daya listriknya, maka volume hidrogen yang dihasilkan semakin besar. Selain volume hidrogen, waktu pelepasan hidrogen yang diamati juga menghasilkan efisiensi yang signifikan apabila konsentrasi dan daya listrik yang diberikan semakin meningkat. Hasil terbaik yang dihasilkan dalam penelitian ini terdapat pada konsentrasi elektrolit 10% dengan daya listrik sebesar 0,14 watt.

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] J.Z. Wang, G.F. Feng, and C.P. Chang, "How does political instability affect renewable energy innovation?" *Renewable Energy*, vol. 230, p. 120800, 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2024.120800.
- [2] H. Suhada, "Fuel cell sebagai pengganti motor bakar pada kendaraan (hendrata suhada) fuel cell sebagai pengganti motor bakar pada kendaraan", *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 85–91, 2001
- [3] H. Suhada, "Fuel cell sebagai penghasil energi abad 21", *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 92–100, 2001
- [4] Z.T. Mirza, T. Anderson, J. Seadon, and A. Brent, "A thematic analysis of the factors that influence the development of a renewable energy policy," *Renewable Energy Focus*, vol. 49, p. 100562, 2024, doi: 10.1016/J.REF.2024.100562.
- [5] F. Khalighi, N.G. Deen, Y. Tang, and A.W. Vreman, "Hydrogen bubble growth in alkaline water electrolysis: An immersed boundary simulation study," *Chemical Engineering Science*, vol. 267, p. 118280, 2023, doi: 10.1016/J.CES.2022.118280.
- [6] H. Zhou *et al.*, "Optimization of capacity configuration and comprehensive evaluation of a renewable energy electrolysis of water for hydrogen production system," *Chin. J. Chem. Eng.*, 2024, doi: 10.1016/J.CJCHE.2024.09.003.
- [7] J. Brauns and T. Turek, "Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review," *Processes*, vol. 8, no. 2, Art. no. 248, 2020, doi: 10.3390/pr8020248.
- [8] S. Sebbahi *et al.*, "A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 82, pp. 583–599, 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.07.428.
- [9] A.J. Shih *et al.*, "Water electrolysis," *Nature Reviews Methods Primers*, vol. 2, Art. no. 84, 2022, doi: 10.1038/s43586-022-00164-0.
- [10] M.D. Merrill, "Electronic Theses, Treatises and Dissertations The Graduate School," 2007.
- [11] C. Daoudi and T. Bounahmidi, "Overview of alkaline water electrolysis modeling," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 646–667, 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.08.345.
- [12] F. Liu, F. Wang, X. Hao, Z. Fan, and J. Tan, "Effects of foam cathode electrode structure on alkaline water electrolysis for hydrogen production," *Chemical Engineering Science*, vol. 298, p. 120307, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.CES.2024.120307.
- [13] E. López-Fernández, C.G. Sacedón, J. Gil-Rostrera, F. Yubero, A.R. González-Eliphe, and A. de Lucas-Consuegra, "Recent advances in alkaline exchange membrane water electrolysis and electrode manufacturing," *Molecules*, vol. 26, no. 21, Art. no. 6326, 2021 doi: 10.3390/molecules26216326.
- [14] Z. Zhang *et al.*, "Bubbles Management for Enhanced Catalytic Water Splitting Performance," *Catalysts*, vol. 14, no. 4, Art. no. 254, doi: 10.3390/catal14040254.
- [15] M. Paidar, V. Fateev, and K. Bouzek, "Membrane electrolysis—History, current status and perspective," *Electrochimica Acta*, vol. 209, pp. 737–756, 2016, doi: 10.1016/J.ELECTACTA.2016.05.209.
- [16] R. Gani, S.R. Adawiah, and A. Nur, "Elektroplating grafena-polianilina pada stainless steel sebagai elektroda pada elektrolisis air untuk produksi hidrogen," *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, vol. 7, no. 2, pp. 109–120, 2021, doi: 10.22487/kovalen.2021.v7.i2.15538.

- [17] D. Burnat *et al.*, “Composite membranes for alkaline electrolysis based on polysulfone and mineral fillers,” *Journal of Power Sources*, vol. 291, pp. 163–172, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.04.066
- [18] J. Gravelle, J.Y. Hihn, and B.G. Pollet, “Power ultrasound as performance enhancer for alkaline water electrolysis: A review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 100, pp. 428–441, 2025, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.12.243.
- [19] M. Sucipta *et al.*, “Karakteristik Pembentukan dan Pelepasan Gelembung Hidrogen melalui Proses Elektrolisis Air,” in *Senastek*, Bali, Oct. 2024.
- [20] F. Rocha, R. Delmelle, C. Georgiadis, and J. Proost, “Effect of pore size and electrolyte flow rate on the bubble removal efficiency of 3D pure Ni foam electrodes during alkaline water electrolysis,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, no. 3, p. 107648, 2022, doi: 10.1016/J.JECE.2022.107648.