

Studi Eksperimental Produksi Hidrogen Melalui Proses *Alkaline Water Electrolysis* Dengan Variasi Daya Listrik

Deal Yacobson Sitepu, Made Sucipta, dan Made Suarda

Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Saat ini, penggunaan energi fosil secara berkelanjutan akan memberikan dampak buruk bagi lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan peralihan menuju penggunaan energi baru terbarukan (EBT) sebagai solusi jangka panjang yang lebih ramah lingkungan. Hidrogen telah muncul sebagai sumber energi baru terbarukan dan merupakan pilihan utama untuk sistem energi yang berkelanjutan. Salah satu proses produksi hidrogen yang umum digunakan adalah elektrolisis air alkali (AWE), karena dapat menghasilkan hidrogen hijau dari energi baru terbarukan. Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan kinerja elektrolisis dengan variasi daya listrik yang digunakan. Dalam penelitian ini, gas hidrogen diproduksi menggunakan aquades sebagai pelarut dan kalium hidroksida (KOH) sebagai elektrolit dengan konsentrasi 5%. Jarak antar elektroda yang digunakan adalah 8 cm. Daya listrik yang digunakan yaitu 0,008 watt, 0,076 watt, 0,113 watt, 0,154 watt, dan 0,333 watt. Material elektroda yang digunakan adalah stainless steel SUS 316 yang dilapisi titanium nitride (TIN). Jenis membran yang dipakai adalah membran komposit dengan model T-TN-M500A. Hasil penelitian menunjukkan massa hidrogen paling tinggi yaitu 2,61 Kg terletak pada daya listrik 0,333 watt, sehingga dapat diketahui bahwa peningkatan daya listrik yang diberikan pada sel elektrolisis secara langsung dapat meningkatkan massa hidrogen yang dihasilkan.

Kata Kunci: Energi baru terbarukan, Elektrolisis air alkali, Daya listrik, Elektrolit, Hidrogen

Abstract

Currently, the continuous use of fossil energy will hurt the environment. Therefore, a transition towards using new renewable energy (EBT) is needed as a more environmentally friendly long-term solution. Hydrogen has emerged as a new renewable energy source and the main source for a sustainable energy system. One commonly used hydrogen production process is alkaline water electrolysis (AWE), which can produce green hydrogen from renewable energy sources. This study aims to improve the performance of electrolysis by varying the electrical power applied. In this study, hydrogen gas was produced from distilled water using potassium hydroxide (KOH) as the electrolyte at a 5% concentration. The distance between the electrodes used was 8 cm. The electrical power used was 0.008 watts, 0.076 watts, 0.113 watts, 0.154 watts, and 0.333 watts. The electrode material used was SUS 316 stainless steel coated with titanium nitride (TIN). The type of membrane used was a composite membrane with the model T-TN-M500A. The research results show that the highest hydrogen mass, namely 2.61 kg, is at an electrical power of 0.333 watts. Increasing the electrical power supplied to the electrolysis cell can directly increase the mass of hydrogen produced.

Keywords: Renewable energy, Alkaline water electrolysis, Electric power, Electrolyte, Hydrogen

1. Pendahuluan

Pengembangan teknologi energi baru terbarukan (EBT) semakin penting untuk menggantikan sumber energi fosil yang selama ini menjadi sumber energi utama. Penggunaan energi fosil seperti minyak bumi, gas alam, dan batubara telah mengakibatkan efek buruk yang signifikan terhadap lingkungan [1]. Dampak tersebut mencakup pemanasan global dan kerusakan ekosistem yang dapat memperburuk kondisi lingkungan bagi makhluk hidup [2]. Energi fosil merupakan sumber daya yang tidak melimpah dan tidak bisa diperbaharui, peningkatan pemakaiannya secara terus-menerus akan mengakibatkan habisnya energi fosil dalam waktu yang akan datang. Kemudian, adanya peralihan menuju energi baru terbarukan yang dapat diperbarui sebagai solusi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan dalam jangka panjang [3]. Energi baru terbarukan adalah sumber energi yang diperoleh dari sumber daya alam,

mencakup energi surya, angin, air, biomassa, dan geothermal yang memiliki kemampuan dengan potensi pemanfaatan secara bebas dan dapat digunakan secara terus menerus [4]. Seiring berlanjutnya transisi menuju penggunaan energi baru terbarukan, hidrogen telah menjadi energi yang signifikan dan merupakan solusi utama untuk sistem energi di masa depan. Hidrogen memiliki kepadatan energi yang tinggi dan penyimpanan energi atau sebagai zat yang membawa energi [5]. Sebagai pembawa energi, hidrogen memberikan solusi yang bersih dan efektif untuk mendekarbonisasi banyak industri seperti transportasi, pembangkit listrik dan manufaktur [6]. Saat ini, hidrogen dapat diproduksi melalui berbagai proses dan masing-masing memiliki kelebihan dan tantangan yang berbeda termasuk pada *steam methane reforming* (SMR), gasifikasi batu bara, gasifikasi biomassa, dan elektrolisis air [7]. Elektrolisis air adalah salah satu pilihan proses yang berbeda, karena dapat

menghasilkan hidrogen hijau dari sumber energi baru terbarukan seperti angin, matahari, dan hidroelektrik untuk menciptakan siklus energi bebas karbon [8]. Proses elektrolisis menggunakan katoda dan anoda yang dialiri arus listrik searah (DC) dalam larutan air murni yaitu *aquadest* dan elektrolit sebagai zat yang mampu mengalirkan arus listrik melalui ion-ion, sehingga terjadi proses pemecahan molekul H_2O menjadi H_2 dan O_2 [9]. Berbagai jenis metode elektrolisis telah dikembangkan. Beberapa metode yang umum digunakan yaitu *alkaline water electrolysis* (AWE), *anion exchange membrane* (AEM), *proton exchange membrane electrolysis* (PEM), dan *solid oxide electrolysis cell* (SOEC) [10]. Setiap metode memiliki spesifikasi yang berbeda dari hal efisiensi energi, biaya operasional, dan kapasitas untuk menggunakan sumber energi baru terbarukan secara efektif [11]. AWE adalah metode yang menggunakan elektrolit alkali cair untuk produksi hidrogen dan menjadi solusi yang efektif untuk produksi hidrogen secara komersial, untuk kebutuhan industri atau bidang lainnya [12]. Terdapat beberapa parameter yang diketahui berpengaruh terhadap kinerja AWE, yaitu konsentrasi elektrolit cair, variasi daya listrik, jenis material elektroda, dan pemilihan membrane [13]. digunakan dua jenis elektrolit yaitu KOH dan NaOH pada proses AWE. Diketahui hasil bahwa, KOH memiliki efisiensi (8,76%) dengan daya listrik lebih kecil (138 watt). Sedangkan, NaOH hanya memiliki efisiensi (8,18%) dengan daya listrik sebesar (174,8%). Sehingga diketahui KOH merupakan katalis yang dapat meningkatkan laju produksi gas hidrogen [14]. Konsentrasi KOH bisa menurunkan resistansi listrik, sehingga proses kimia yang terjadi akan lebih cepat dan jumlah gas hidrogen yang dihasilkan akan bertambah. [15]. Pada penelitian Wahyu et al. (2023) dilakukan proses pemisahan air melalui elektrolisis dengan variasi tegangan listrik yang digunakan, yaitu 10, 11, 12, dan 13 volt. Penelitian ini mengungkapkan bahwa terdapat dampak dari tegangan listrik yang diterapkan dalam proses elektrolisis terkait dengan kecepatan produksi hidrogen. Semakin tinggi tegangan arus listrik, semakin banyak hidrogen yang dihasilkan per satuan waktu selama proses elektrolisis. Penelitian ini berfokus untuk meningkatkan efisiensi AWE pada produksi hidrogen dengan pengaruh variasi daya listrik yang digunakan

2. Dasar Teori

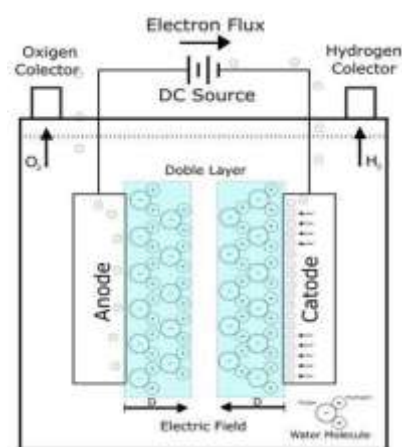
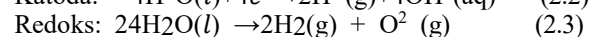
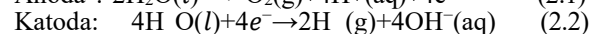
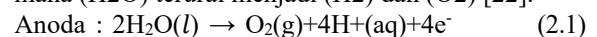
2.1 Hidrogen

Hidrogen saat ini telah muncul sebagai pembawa energi penting dan sebagai solusi utama sistem energi baru terbarukan yang telah banyak dikembangkan. Hidrogen adalah salah satu elemen yang paling dominan, berkontribusi 75% dari total massa elemen lainnya di alam semesta. Hidrogen muncul sebagai bagian dari berbagai senyawa yang

terikat dengan unsur-unsur lain di alam semesta, contohnya seperti oksigen di dalam air dan karbon yang ada di dalam metana [16]. Hidrogen adalah gas paling ringan, mudah terbakar, dan mampu menghasilkan energi dalam jumlah besar. Pusat teknologi industri kimia dan sumber daya energi menyebutkan bahwa hidrogen mengandung energi tertinggi, yaitu 120 MJ/kg. Sementara itu, bensin hanya mengandung energi sebesar 44 MJ/kg [17]. Hidrogen dapat dihasilkan melalui berbagai metode yaitu steam methane reforming (SMR), gasifikasi batu bara, gasifikasi biomassa, dan elektrolisis air. Di antara beberapa proses tersebut, elektrolisis air menjadi pilihan yang tepat untuk produksi hidrogen hijau karena menggunakan sumber energi terbarukan sehingga tidak menghasilkan emisi karbon [18].

2.2 Electrolysis

Elektrolisis adalah metode untuk memecah zat elektrolit dengan bantuan arus listrik. Di dalam sel elektrolisis, terjadi reaksi kimia ketika arus listrik melewati larutan elektrolit dan dikonversi menjadi energi kimia, yang disebut sebagai reaksi redoks. Arus listrik yang mengalir adalah searah ke elektroda positif dan negatif. Elektroda positif adalah pelat penghantar yang diberikan tegangan positif, sedangkan elektroda negatif adalah pelat penghantar yang diberikan tegangan negatif [20]. Terdapat dua reaksi yang terjadi dalam proses elektrolisis air, yaitu hydrogen evolution system (HER) terjadi reaksi reduksi sehingga menghasilkan gas hidrogen pada katoda dan oxygen evolution system (OER) terjadi reaksi oksidasi sehingga menghasilkan gas oksigen pada anoda [21]. Pada persamaan 2.1 dan 2.2 menunjukkan reaksi yang berlangsung di anoda dan katoda, sementara persamaan 2.3 menunjukkan reaksi keseluruhan, di mana (H_2O) terurai menjadi (H_2) dan (O_2) [22].



Gambar 1. Proses *Electrolysis* [23]

2.2 Alkaline Water Electrolysis

Berbagai jenis metode elektrolisis telah dikembangkan. Beberapa metode yang umum digunakan yaitu alkaline water electrolysis (AWE), anion exchange membrane electrolysis (AEM), proton exchange membrane electrolysis (PEM), dan solid oxide electrolysis cell (SOEC) [24]. AWE menjadi salah satu pilihan di antara berbagai proses yang lain karena dapat memproduksi hidrogen dari larutan elektrolit basa seperti KOH atau NaOH [25]. Proses ini melibatkan pemecahan H_2O menjadi H_2 dan O_2 menggunakan arus listrik. Dibandingkan teknologi elektrolisis lainnya, seperti PEM atau SOEC, AWE menawarkan keunggulan dalam hal biaya material yang lebih rendah dan durabilitas tinggi dengan umur operasional yang panjang untuk aplikasi industri jangka panjang [26].

2.3 Larutan Elektrolit

Larutan elektrolit merupakan suatu zat terlarut atau terdisosiasi menjadi ion-ion, yang berfungsi sebagai konduktor listrik. Ion adalah atom yang memiliki muatan listrik dan dapat bergerak bebas, sehingga partikel bermuatan negatif dapat bergerak dengan leluasa dan menghasilkan aliran listrik yang lebih stabil [27]. Elektrolit terdiri dari air, asam, basa, serta sejumlah senyawa kimia lainnya.. Terdapat dua jenis larutan penghantar, yaitu elektrolit kuat dan lemah [28].

2.3.1 Elektrolit Kuat

Larutan elektrolit yang kuat adalah jenis larutan mampu menghantarkan listrik dengan sangat baik. Ion-ion di dalamnya dapat bergerak dengan leluasa, memungkinkan pergerakan elektron yang lebih efisien dan menghasilkan aliran listrik yang lebih lancar [29]. Contoh senyawa yang tergolong elektrolit kuat termasuk asam kuat seperti seperti HCL, HNO_3 , H_2SO_4 , serta basa kuat yaitu NaOH, KOH, $Mg(OH)_2$, dan garam dengan tingkat kelarutan yang tinggi seperti NaCL, KCL, dan KI [30].

2.3.2 Elektrolit Lemah

Larutan elektrolit yang lemah merupakan jenis larutan yang dapat menghantarkan arus listrik, meskipun ion di dalam tidak sepenuhnya bebas untuk bergerak. Hal ini menyulitkan pergerakan elektron, sehingga menyebabkan arus listrik yang dapat dihantarkan menjadi lebih rendah [31]. Senyawa-senyawa yang termasuk dalam kategori elektrolit lemah terdiri dari asam lemah yaitu CH_3 , $COOH$, HCN , H_2CO_3 , serta basa lemah seperti NH_4OH , dan garam yang sulit terlarut yaitu AgCL, $CACrO_4$ [32].

2.3.3 Konsentrasi Elektrolit

Pada proses elektrolisis parameter yang memiliki efek signifikan terhadap laju produksi

hidrogen yaitu konsentrasi elektrolit [33]. Konsentrasi elektrolit berhubungan dengan seberapa banyak jumlah zat terlarut (ion) yang memiliki kemampuan menghantarkan listrik dalam sebuah larutan. Beberapa studi menunjukkan bahwa semakin besar jumlah elektrolit yang larut, maka semakin banyak gas hidrogen yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan selain fungsi elektrolit untuk mempercepat reaksi pembentukan gas hidrogen dan oksigen, konsentrasi elektrolit dalam larutan akan mengurangi hambatan listrik. Sehingga reaksi kimia yang berlangsung lebih cepat dan jumlah gas yang dihasilkan akan meningkat [34].

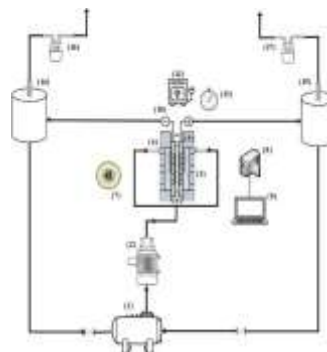
2.4 Elektroda

Elektroda merupakan konduktor yang berfungsi untuk berinteraksi dengan bagian atau media yang tidak terbuat dari logam [35]. Dalam sel elektrolisis, elektroda dikenal sebagai anoda dan katoda. Anoda merupakan elektroda positif yang berfungsi untuk menarik elektron dari sel elektrolisis, yang mengakibatkan proses oksidasi. Sebaliknya, katoda adalah elektroda negatif di mana elektron dari sumber tegangan masuk ke dalam sel elektrolisis, sehingga terjadi proses reduksi [36].

3 Metode Penelitian

3.1 Skema Penelitian

Skema yang diterapkan dalam studi ini dapat dilihat pada Gambar 2. Penelitian menggunakan *electrode* (10) dengan jenis material *stainless steel SUS 316* yang dilapisi *titanium nitride (TIN)* dan memiliki dimensi 5 x 1 cm. Digunakan *high speed camera* dengan bantuan aplikasi *phantom control camera (PCC)* 3.8 untuk mengolah dan menyimpan data hasil pengamatan tersebut. Laju aliran hidrogen diukur dengan menggunakan *hydrogen flowmeter*. Jumlah dan ukuran gelembung hidrogen dianalisis menggunakan metode *image processing*.



Gambar 2. Skema Instalasi Alat



Gambar 3. Aparatus Penelitian

Keterangan:

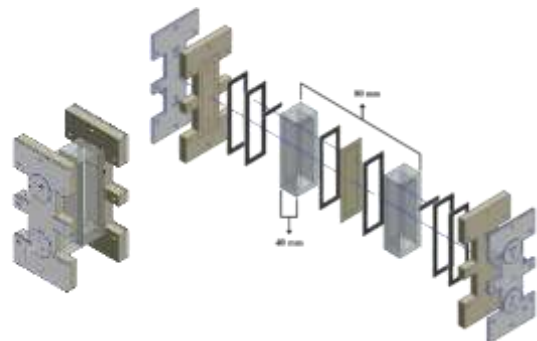
1. Alkaline water tank
2. Pompa
3. Penjepit electrolyzer
4. Selang elektrolisis
5. Akrilik
6. Gasket
7. Lampu LED
8. High speed camera
9. Laptop
10. Elektroda
11. Membrane
12. Power supply
13. Stopwatch
14. Alkaline hidrogen separator
15. Alkaline oksigen separator
16. Flowmeter hidrogen
17. Flowmeter oksigen

Alkaline water tank (1) digunakan untuk tempat penyimpanan larutan elektrolit. Kemudian larutan elektrolit akan dialirkan menggunakan pompa sentrifugal (2), agar mensirkulasikan elektrolit yang tidak bergerak agar mencegah endapan atau konsentrasi yang tidak merata, kemudian menuju penutup *electrolyzer* (3) yang terbuat dari besi aluminium yang direkatkan dengan porselen sehingga mengurangi dampak korosi jikalau konsentrasi elektrolit terlalu tinggi. Selang elektrolisis (4) berfungsi sebagai tempat saluran elektrolit yang digunakan untuk menghubungkan *alkaline water tank* menuju *electrolyzer* dan gas separator. Terdapat akrilik (5) merupakan komponen penting dalam *electrolyzer* yang bersifat sebagai penampang elektrolisis dengan membran (6) merupakan pemisah yang terbuat dari bahan komposit keramik polimer dan berfungsi untuk memisahkan katoda dan anoda sehingga mencegah pencampuran antara gas hidrogen dan oksigen. Dalam membantu pencahayaan, lampu *light emitting diode* (LED) (7) ditempatkan pada

bagian belakang *electrolyzer*, kemudian reaksi kimia yang terjadi diamati dan direkam menggunakan *high speed camera* (8) yang langsung terhubung dengan laptop (9) berfungsi untuk menyimpan data rekaman pada aplikasi *phantom camera control* (PCC) 3.8 dan sebagai tempat penyimpanan aplikasi pengolahan data antara lain *microsoft excel*, *matlab r2023 a*. Elektroda (10) berfungsi sebagai media penghantar arus listrik pada proses *alkaline water electrolysis*, terdapat gasket (11) digunakan untuk mencegah kebocoran pada akrilik dan memastikan elektrolit tetap berada di dalam *electrolyzer*. *Power supply* (12) digunakan untuk menyediakan arus listrik ke elektroda, dengan menghubungkan ke kutub negatif yaitu katoda dan kutub positif yaitu anoda. Selain itu, waktu pengamatan proses elektrolisis diukur menggunakan *stopwatch* (13), sehingga memiliki ketepatan waktu yang tepat. *Alkaline hidrogen separator* (14) dan *alkaline oksigen separator* (15), berperan untuk memisahkan gas H_2 dan O_2 yang dihasilkan melalui proses elektrolisis. Kemudian dari alkaline separator gas akan terhubung ke masing-masing *flowmeter* (16-17) yang berfungsi untuk mengukur laju aliran gas dan mengetahui produksi gas yang dihasilkan.

3.1 Desain Electrolyzer

Pada penelitian ini menggunakan jarak antar elektroda 8 cm pada proses *alkaline water electrolysis*. Reaksi kimia yang terjadi dalam sebuah wadah elektrolisis disebut dengan *electrolyzer*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Komponen penyusun tersebut terdiri dari elektroda, membran, gasket, akrilik, dan penutup *electrolyzer*.



Gambar 4. Desain Jarak 8 cm Electrolyzer

Pada gambar 4 desain jarak 8 cm bekerja dengan mengompresi dua elektroda berpori di antara akrilik sehingga memaksa gelembung gas dilepaskan dari sisi depan elektroda. Panjang kedua akrilik pada komponen *electrolyzer* adalah 15 cm, tebal 1 cm, dan lebar yang di variasikan adalah 8 cm.

3.2 Katalis Uji

Pada penelitian ini menggunakan elektrolit yang digunakan yaitu kalium hidroksida (KOH) dan *aquadest* sebagai pelarut, dengan konsentrasi 5%,

7%, dan 10%. Untuk merekam pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen. Untuk menentukan persentase elektrolit yang diinginkan maka digunakan rumus sebagai berikut.

Keterangan:

X = persen KOH yang diinginkan = 10% = 0,1

v_{air} = 1000 ml (volume aquades)

ρ_{air} = 997 kg/m³ (densitas aquades)

m_{KOH} = massa KOH

Solusi:

$v_{air} = 1000 \text{ ml} = 0,001 \text{ m}^3$

massa air = $\rho_{air} \times v_{air} = 997 \text{ kg/m}^3 \times 0,001 \text{ m}^3 = 0,997 \text{ kg} = 997 \text{ g}$

$$X = \frac{m_{KOH}}{m_{Air} + m_{KOH}} = 0,1$$

$$X = \frac{m_{KOH}}{997 \text{ g} + m_{KOH}} = 0,1$$

$$m_{KOH} = 0,1 \times (997 \text{ g} + m_{KOH})$$

$$m_{KOH} = 99,7 \text{ g} + 0,1 m_{KOH}$$

$$0,9 m_{KOH} = 99,7 \text{ g}$$

$$m_{KOH} = 99,7 \text{ g} / 0,9$$

$$= 110,78 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase KOH} &= \frac{m_{KOH}}{m_{Air}} \times 100\% \\ &= \frac{110,78 \text{ g}}{997 \text{ g}} \times 100\% \\ &= 0,1 \times 100\% \\ &= 10\% \end{aligned}$$

Pada perhitungan rumus diatas, dapat diketahui konsentrasi elektrolit KOH, setelah mengetahui massa pada konsentrasi larutan elektrolit, Pelet KOH ditimbang menggunakan timbangan *digital* sesuai dengan massa yang telah ditentukan dan dicampur dengan aquades menggunakan *magnetic stirrer* di dalam gelas ukur.

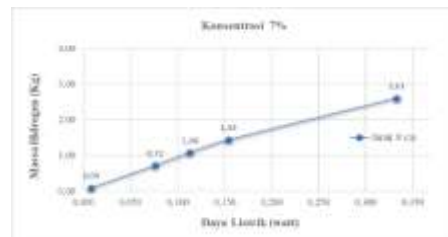
4. Hasil dan Pembahasan

Data penelitian berupa video yang diperoleh dari *high speed camera* selanjutnya diolah menggunakan *software* PCC 3.8 untuk memperjelas tingkat ketajaman dari gambar. Kemudian data akan diolah menggunakan metode *image processing* untuk dikuantifikasi ukuran dan jumlah bubble. Matlab R2023A digunakan sebagai media *image processing* untuk mendapatkan hasil massa hidrogen.

4.1 Massa Hidrogen

Dapat dilihat pada Gambar 4 menunjukkan grafik hubungan antara daya listrik yang

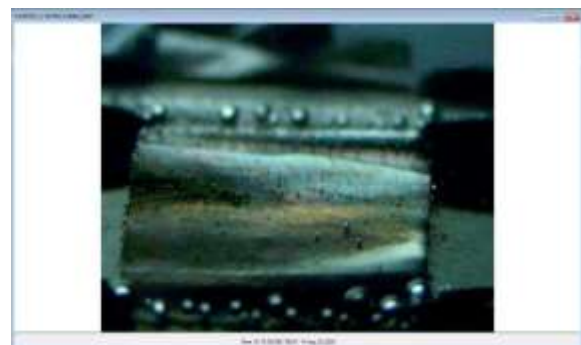
digunakan dengan massa H₂ yang dihasilkan pada berbagai variasi, yaitu 0,008 watt, 0,076 watt, 0,113 watt, 0,154 watt, dan 0,333 watt. massa H₂ paling tinggi yaitu 2,61 Kg terdapat pada daya listrik 0,333 watt. Diketahui bahwa peningkatan jumlah H₂ terjadi secara signifikan seiring dengan bertambahnya daya listrik yang digunakan. Peningkatan daya listrik menyebabkan arus yang mengalir ke dalam sel elektrolisis meningkat. Mengacu pada hukum Faraday, jumlah gas yang dihasilkan berbanding lurus dengan total muatan listrik, sehingga semakin besar arusnya, akan semakin banyak molekul H₂ yang terbentuk.



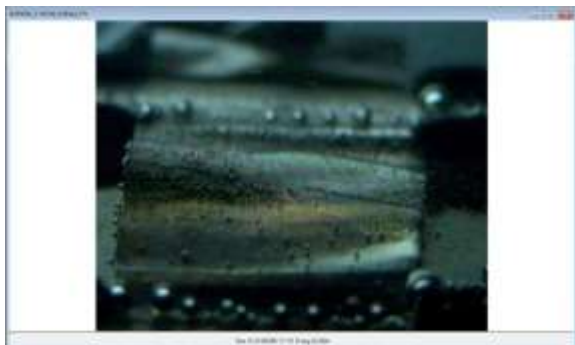
Gambar 5. Massa H₂ Yang Dihasilkan

4.2 Hasil Pembentukan dan Pelepasan Hidrogen

Proses pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen pada katoda merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh parameter daya listrik yang diberikan selama sistem proses *alkaline water electrolysis*. Peningkatan daya listrik akan mempercepat pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen karena kepadatan arus yang lebih tinggi akan memperbanyak jumlah nukleasi gelembung, sehingga aliran elektrolit akan lebih turbulen dan dapat mengurangi resistansi difusi dan mempercepat laju reaksi serta membantu pelepasan gelembung hidrogen. Berikut adalah hasil pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen.



Gambar 6. Gambar Dari Daya Listrik 0,008 watt



Gambar 7. Gambar Dari Daya Listrik 0,076 watt



Gambar 8. Gambar Dari Daya Listrik 0,113 watt



Gambar 9. Gambar Dari Daya Listrik 0,154 watt



Gambar 10. Gambar Dari Daya Listrik 0,333 watt

5 Kesimpulan

Berdasarkan studi yang telah dilaksanakan, bisa

ditarik kesimpulan bahwa:

1. Massa H_2 paling tinggi yaitu 2,61 Kg terletak pada daya listrik 0,333 watt, sehingga dapat diketahui bahwa peningkatan daya listrik yang diberikan pada sel elektrolisis secara langsung dapat meningkatkan massa H_2 yang dihasilkan.
2. Pembentukan dan pelepasan gelembung hidrogen paling dominan terletak pada daya listrik 0,333 watt, peningkatan daya listrik akan mempercepat proses pembentukan dan pelepasan hidrogen karena kepadatan arus yang lebih tinggi akan mempercepat laju reaksi elektrolisis.

Daftar Pustaka

- [1] L. Hakim, N. Sylvia, and R. Sari, "Production Of Hydrogen From Sea Water As Renewable Energy Using The Electrolysis Method," Apr. 2020.
- [2] A. S. Pramudiyanto and S. W. A. Suedy, "Energi Bersih dan Ramah Lingkungan dari Biomassa untuk Mengurangi Efek Gas Rumah Kaca dan Perubahan Iklim yang Ekstrem," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 3, pp. 86–99, Oct. 2020, doi: 10.14710/jebt.2020.9990.
- [3] A. E. Setyono and B. F. T. Kiono, "Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020– 2050," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 3, pp. 154–162, Oct. 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.11157.
- [4] R. Ajie Aprilianto and R. M. Ariefianto, "Peluang Dan Tantangan Menuju Net Zero Emission (NZE) Menggunakan Variable Renewable Energy (VRE) Pada Sistem Ketenagalistrikan Di Indonesia," 2021.
- [5] I. Nurlatifah and D. L. Arlianti, "Artikel Review: Produksi Gas Hidrogen dari Reaksi Elektrolisis Sebagai Bahan Bakar Non-Fosil," 2021.
- [6] E. Rivard, M. Trudeau, and K. Zaghbi, "Hydrogen storage for mobility: A review," Jun. 01, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ma12121973.
- [7] K. S. Im *et al.*, "Development and characterization of engineering plastic diaphragm for alkaline water electrolysis," *Desalination Water Treat.*, vol. 320, p. 100692, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.DWT.2024.100692.
- [8] Y. Chen and G. Z. Chen, "Alternate water electrolysis," *Next Sustainability*, vol. 3, 100029, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.NXSUST.2024.100029.

- [9] Y. Wahyono, H. Sutanto, and E. Hidayanto, "Produksi gas hydrogen menggunakan metode elektrolisis dari elektrolit air dan air laut dengan penambahan katalis NaOH," 2017.
- [10] K. Hu et al., "Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling," *Appl Energy*, vol. 312, p. 118788, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2022.118788.
- [11] A. Abdel Haleem *et al.*, "Innovative membrane with selective gas permeability for alkaline water electrolysis: Dependable cell performance under industrial conditions," *J Power Sources*, vol. 587, p. 233709, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2023.233709.
- [12] M. Daffa Zulfany, A. Manggala, I. Pratiwi, T. Energi, T. Politeknik, and N. Sriwijaya, "Julii- Desember 2024 Muhammad Daffa Zulfany, Erlinawati, Agus Manggala.
- [13] P. Adiga *et al.*, "The influence of transitional metal dopants on reducing chlorine evolution during the electrolysis of raw seawater," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 24, Dec. 2021, doi: 10.3390/app112411911.
- [14] E. Di *et al.*, "Andasih Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat Model Energi Indonesia, Tinjauan Potensi Energy Terbarukan Untuk Ketahanan," 2020.
- [15] J. Chi and H. Yu, "Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production," 2018. doi: 10.1016/S1872 - 2067(17)62949-8.
- [16] Erlinawati, T. Z. Mahesi, R. Saputra, I. Febriana, and S. Effendy A, "Pengaruh Jumlah Sel Elektroda Terhadap Produksi Gas Hidrogen dengan Proses Elektrolisis sebagai Sumber Energi Fuel Cell," *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 14, no. 1, pp. 10– 18, Mar. 2025, doi: 10.32734/jtk.v14i1.18064.
- [17] M. M. Kabir et al., "Integrated membrane distillation-electrolyte-based alkaline water electrolysis for enhancing green hydrogen production," *Desalination*, vol. 601, p. 118580, May 2025, doi: 10.1016/J.DESAL.2025.118580.
- [18] M. L. Ramadhan et al., "Elektrolisis," vol. 2, no. 4, pp. 105–112, 2024, doi: 10.62383/polygon.v2i4.129.
- [19] M. Alborno, M. Rivera, P. Wheeler, and R. Ramirez, "High Pulsed Voltage Alkaline Electrolysis for Water Splitting," *Sensors*, vol. 23, no. 8, Apr. 2023, doi: 10.3390/s23083820.
- [20] A. V. Prits et al., "Electrochemical characterisation of Raney nickel electrodes for alkaline water electrolysis: From laboratory to industrial scale," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 140, pp. 803–814, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2025.05.262.
- [21] V. Sutresno Hadi Sujoto, I. Wayan Christ Widhi Herman Tangkas, S. Sumardi, W. Astuti, and dan Himawan Tri Bayu Murti Petrus, "Effect Of Operating Voltage And Concentration Of Electrolyte Solution On The Synthesis Of Tin (II) Sulfate by Electrolysis Method L INDONESIA," *Jl. Ir. Sutami Km*, vol. 44, no. 2, [Online]. Available: <http://www.jurnalmetal.or.id/index.php/jmi>.
- [22] S. Dahbi, A. Aziz, S. Yahyaoui, J. Blaacha, and K. Saldine, "The effect of the electrodes shape in water electrolysis on the production of hydrogen," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 84, pp. 909–914, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.08.244.
- [23] I. E. Dincer and M. Agelin-Chaab, "Experimental investigation and evaluation of newly designed electrodes for hydrogen production in alkaline water electrolysis," *J Power Sources*, vol. 632, 236326, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2025.236326.
- [24] Y. Zhou, H. Zhang, L. Liu, F. Yuan, Q. Yang, and B. Liu, "Effect of electrolyte circulation on hydrogen-in-oxygen in alkaline water electrolysis," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 82, pp. 143–149, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.
- [25] Y. Wu, G. Xu, J. Zhou, and D. Cao, "Research progress of the porous membranes in alkaline water electrolysis for green hydrogen production," *Chemical Engineering Journal*, vol. 505, 159291, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.CEJ.2025.159291.
- [26] E. J. Park, C. B. Capuano, K. E. Ayers, and C. Bae, "Chemically durable polymer electrolytes for solid-state alkaline water electrolysis," *J Power Sources*, vol. 375, pp. 367–372, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2017.07.090.
- [27] R. Lira Garcia Barros, J. T. Kraakman, C. Sebregts, J. van der Schaaf, and M. T. de Groot, "Impact of an electrode-diaphragm gap on diffusive hydrogen crossover in alkaline water electrolysis," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 886–

- 896, Jan. 2024,
doi:
10.1016/J.IJHYDENE.2023.09.280.
- [28] E. Karimi-Sibaki, A. Vakhrushev, M. Wu, J. Bohacek, and A. Kharicha, “A numerical study on effects of current density distribution, turbulence, and magnetohydrodynamics (MHD) on electrolytic gas flow with application to alkaline water electrolysis (AWE),” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 208, pp. 731–739, Aug. 2024,
doi:10.1016/J.CHERD.2024.07.042.
- [29] D. Iswandari, I. Mahenri, Y. Bow, A. Syakdani, and R. Junaidi, “Effect of Concentration of NaOH and H₂SO₄ Catalysts on Hydrogen Gas Production Efficiency,” *International Journal of Research in Vocational Studies (IJRVOCAS)*, vol. 1, no. 4, pp. 22–25, Jan. 2022, doi: 10.53893/ijrvocas.v1i4.73.
- [30] S. Daniel, J. Prasetyo, and N. Huda, SNITT-Politeknik Negeri Balikpapan 2018 P-29 Pengembangan Ac Power Supply Sebagai Alat Penunjang Kegiatan Praktikum Mahasiswa Ac Power Supply Development As A Supporting Student Practice.
- [31] R. M. Jauhar et al., “Sustained hydrogen production through alkaline water electrolysis using Bridgman–Stockbarger derived indium- impregnated copper chromium selenospinel,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 92, pp. 1298–1305, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.10.352.
- [32] J. Yang et al., “Combining materials development with structural design: Insights into porous transport layer for proton exchange membrane water electrolysis,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 223, p. 116030, Nov. 2025, doi: 10.1016/J.RSER.2025.116030.
- [33] M. T. de Groot, “Alkaline water electrolysis: with or without iron in the electrolyte?,” *Curr Opin Chem Eng*, vol. 42, p. 100981, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.COCHE.2023.100981.
- [34] A. F. Al-Basith and R. C. Devara, “Optimalisasi Pemanfaatan Green Hydrogen dalam Menunjang Pengadaan Fuel Cell Electric Vehicle Melalui Pembaharuan RUU EBT,” *Jurnal Al Azhar Indonesia Seri Ilmu Sosial*, vol 5, no. 2, p. 91, Jul. 2024, doi: 10.36722/jaiss.v5i2.3043.

	Deal Yacobson Sitepu adalah mahasiswa yang sedang pendidikan sarjana strata I Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2021,. Bidang penelitian yang diminati adalah <i>sustainable energy</i>, khususnya hidrogen yang kemudian ditekuni sebagai topik penelitian tugas akhir.
	Prof. Dr.Eng. Ir. Made Sucipta, S.T., M.T., IPM. Adalah seorang Guru Besar di bidang Termofluida sistem energi dan material dari Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Lahir pada tanggal 14 November 1974 di Singaraja. Beliau juga adalah dosen dan peneliti di Universitas Udayana. Menyelesaikan Pendidikan Sarjana dan Magister di Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya, Program Doktor di Shibaura Institute Of Techonology Japan, dan mengikuti Program Profesi Insinyur di Universitas Udayana.