

Analisis Pengaruh Intensitas Cahaya Matahari dan Jenis Generator terhadap Kinerja Sistem Panel Surya-Generator Hidrogen 50 Wp

Saddam Firly Mustarisiam, Rifky, Tasyrik Al Qaida, Dicky Wyldan Putra Permana, Rezha Apriansyah

Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Informatika
Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA
Jl. Tanah Merdeka no. 6 Rambutan Ciracas Jakarta Timur DKI Jakarta 13830
E-mail: rifky@uhamka.ac.id

Abstrak

Gas hidrogen dapat dihasilkan dari generator hidrogen basah (GHB) dan generator hidrogen kering (GHK). Kedua generator hidrogen tersebut diberi daya yang berasal dari panel surya (PV) 50 Wp. Tujuan penelitian ini adalah mengkaji perbandingan kinerja GHB dan GHK dalam menghasilkan debit gas hidrogen dan efisiensi sistem guna menentukan sistem yang lebih optimal. Penelitian diawali dengan studi kepustakaan dan mendesain kedua generator yang melalui uji coba untuk mendapatkan sistem peralatan penelitian yang sesuai teori dan konsep GHB dan GHK. Metode eksperimen dilakukan dengan pengukuran langsung variabel masukan dan keluaran dari panel surya serta variabel keluaran dari sistem elektrolisis GHB dan GHK. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem terpadu PV-GHB menghasilkan debit gas hidrogen lebih besar dan efisiensi kinerja sistem lebih tinggi dibandingkan PV-GHK.

Kata Kunci: panel surya 50 Wp, GHB, GHK

Abstract

Hydrogen gas can be produced from wet hydrogen generators (GHB) and dry hydrogen generators (GHK). Both hydrogen generators are powered by a 50 Wp solar panel (PV). The aim of this research is to study the performance comparison of GHB and GHK in producing hydrogen gas flow rate and system efficiency to determine the more optimal system. The research began with a literature study and designing both generators, which underwent trials to obtain a research equipment system that adheres to the theory and concepts of GHB and GHK. Experimental methods were carried out by direct measurements of input and output variables from the solar panel as well as output variables from the GHB and GHK electrolysis systems. The research results show that the integrated PV-GHB system produces a larger hydrogen gas flow rate and higher system performance efficiency compared to PV-GHK.

Keywords: solar panel 50 Wp, generator hydrogen wet cell, generator hydrogen dry cell

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan ekonomi yang pesat menyebabkan ketergantungan masyarakat pada bahan bakar fosil masih sangat tinggi. Penggunaan bahan bakar fosil ini menimbulkan berbagai bentuk polusi di darat, air, dan udara yang berdampak negatif terhadap lingkungan [1]. Oleh karena itu, kita perlu mengembangkan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan serta mengurangi dampak polusi [2]. Energi alternatif yang bersumber dari sumber daya terbarukan dan tidak menghasilkan polusi menjadi perhatian utama dalam penelitian dan pengembangan teknologi energi bersih

saat ini [3]. Energi alternatif yang menjanjikan adalah energi baru dan terbarukan, yang terdiri dari energi terbarukan dan energi baru. Energi terbarukan yang memiliki potensi melimpah dan menjanjikan untuk dikembangkan adalah energi matahari, panas bumi, angin, air, biomassa, dan energi laut (gelombang, pasang, dan arus laut). Energi baru adalah energi nuklir dan energi hidrogen.

Energi terbarukan yang melimpah untuk wilayah tropis seperti halnya Indonesia adalah energi matahari. Matahari menyinari bumi Indonesia sepanjang tahun. Energi matahari terdiri atas energi panas dan energi cahaya. Kedua jenis energi tersebut dapat dikonversi secara tidak langsung dan secara

langsung menjadi energi yang bermanfaat. Konversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung melalui teknologi panel surya. Panel surya dapat digunakan sebagai pembangkit listrik untuk memproduksi gas hidrogen dengan metode elektrolisis [4] pada air yang dilarutkan elektrolit.

Proses memproduksi gas hidrogen digunakan generator hidrogen, yang dikenal terdiri dari generator hidrogen basah dan generator hidrogen kering. Oleh karena itu penggunaan panel surya (PV) sebagai pembangkit listrik dan generator hidrogen (GH) sebagai konverter energi listrik menjadi energi kimia, yang dipadukan menjadi sistem integrasi panel surya dan generator hidrogen. Sistem integrasi ini terbagi menjadi dua pasang sistem, yaitu panel surya dengan generator hidrogen basah (PV+GHB) dan panel surya dengan generator hidrogen kering (PV+GHK).

Perpaduan antara PV dengan GHB dan GHK menghasilkan energi hidrogen hijau, yakni memproduksi hidrogen dari proses yang ramah lingkungan dari EBT (energi matahari). Kinerja PV ditentukan oleh intensitas cahaya matahari yang diterima, sehingga jumlah energi foton yang dapat diserap oleh sel-sel pada permukaan panel surya berdampak langsung pada daya listrik keluaran yang dihasilkan. Daya listrik keluaran dari panel surya digunakan generator hidrogen untuk melakukan proses elektrokimia yang menghasilkan gas hidrogen. Hidrogen dibuat dengan memisahkan air menjadi gas hidrogen dan gas oksigen dengan menggunakan arus listrik searah melalui proses elektrolisis [5].

Dengan demikian perpaduan panel surya dengan jenis generator hidrogen, baik yang menggunakan prinsip elektrolisis basah maupun kering yang memiliki karakteristik berbeda satu sama lain akan menghasilkan kinerja yang berbeda, walaupun dibangkitkan daya yang sama. Besar kinerja masing-masing yang mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan [6] menjadi topik dan pembahasan penelitian ini.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Hidrogen sebagai Sumber Energi Baru

Hidrogen merupakan bahan bakar ramah lingkungan yang memiliki berbagai keunggulan penting, salah satunya adalah kemampuannya untuk disimpan dan digunakan secara aman (dengan sistem proteksi yang sesuai) tanpa menimbulkan emisi [1]. Hidrogen (H_2) adalah unsur paling ringan dan paling

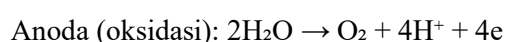
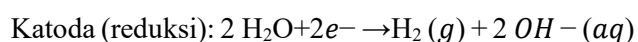
melimpah di Bumi, namun gas hidrogen tidak ditemukan dalam atmosfer secara langsung. Produksi gas hidrogen dapat dilakukan melalui beberapa metode ekstraksi, seperti reformasi bahan bakar fosil (minyak bumi, batu bara, dan gas alam), gasifikasi biomassa, serta elektrolisis air.

Hidrogen tidak menghasilkan emisi karbon, sehingga energi hidrogen tergolong energi bersih dan ramah lingkungan yang diperkirakan akan menjadi bahan bakar masa depan. Hidrogen berperan penting sebagai "pembawa energi" untuk pembangkitan listrik, karena dapat disimpan, diangkut, dan diubah menjadi berbagai bentuk energi lain. Sebagai sumber energi baru yang tidak terbarukan, hidrogen dimanfaatkan melalui teknologi khusus, meskipun tidak termasuk energi yang dapat diperbarui [7]. Hidrogen pada fase gas mempunyai massa jenis $0,0814 \text{ kg/m}^3$, titik lebur -13.947 K , titik didih $20,384 \text{ K}$, dan LHV 121.019 kJ/kg [8]. Hidrogen (H_2) adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun, dan mudah terbakar [9]. Untuk mendapatkan gas hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi dan prosesnya yang tidak menghasilkan emisi, proses elektrolisis air merupakan pilihan. Akan tetapi, metode elektrokimia ini memiliki kekurangan karena membutuhkan energi listrik yang besar untuk memproduksi gas hidrogen dalam jumlah besar. Gas hidrogen yang diproduksi tanpa emisi ini dikenal sebagai hidrogen hijau, yang menggunakan sumber energi baru dan terbarukan (EBT). Salah satu sumber (EBT) yang digunakan adalah energi matahari, dengan panel surya sebagai teknologi untuk konservasi dan konversi energi [10].

2.2 Produksi Hidrogen melalui Elektrolisis

Proses elektrolisis air merupakan proses pemisahan air dalam bentuk molekul air menjadi gas hidrogen dan gas oksigen dengan menggunakan arus listrik. Faktor-faktor proses seperti jenis elektroliser, bahan elektroda, serta tegangan (V) dan arus listrik (I) yang diberikan mempengaruhi jalannya proses ini. Dalam proses ini, aliran listrik yang digunakan akan memecah molekul air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan gas oksigen (O_2) [11].

Berikut adalah reaksi yang berlangsung dalam proses tersebut [12]:

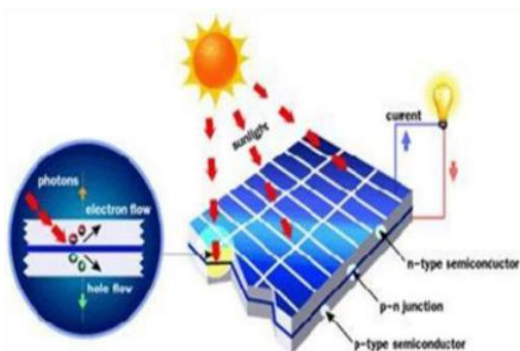


Reaksi Keseluruhan: $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow 2 \text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g})$

$$P_{pv,in} = I_v \times A \quad (1)$$

2.3 Panel Surya

Panel surya merupakan alat yang mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik melalui proses efek fotovoltaiik [13]. Fenomena fotovoltaiik adalah proses dimana energi cahaya diubah menjadi energi listrik. Pada proses ini, energi dari cahaya matahari diserap oleh lapisan panel surya, yang menyebabkan terjadinya aliran arus listrik dengan arah berlawanan sehingga menghasilkan daya listrik. Proses ini merupakan konversi energi yang terjadi pada panel surya sehingga dapat berperan sebagai pembawa muatan listrik [14]. Proses konversi energi dari cahaya menjadi listrik dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 1 Konversi energi cahaya menjadi listrik pada panel surya [15]

Pada gambar 1 terlihat cahaya matahari memancarkan ke permukaan panel surya. Modul sel surya terbuat dari bahan semikonduktor yang mampu mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Lapisan silikon pada sel surya menghasilkan listrik yang tidak dipengaruhi oleh ukuran luas permukaannya [6].

2.3.1 Konversi energi pada panel surya

Efek fotovoltaiik pada panel surya terjadi saat foton dari sinar matahari melepaskan elektron dalam bahan semikonduktor, sehingga menghasilkan aliran listrik searah (DC). Oleh karena itu, panel surya berfungsi sebagai alat konversi energi yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi cahaya yang diterima oleh panel surya dinyatakan dalam bentuk intensitas cahaya (I_v). Daya listrik yang masuk ke panel surya ($P_{pv,in}$) merupakan hasil perkalian antara intensitas cahaya tersebut dengan luas permukaan sel surya (A), yang dapat dihitung dengan rumus [16]:

Daya listrik yang keluar dari panel surya dihitung dengan mengalikan nilai tegangan listrik (V) dan arus listrik (I) yang diukur, seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$P_{pv,out} = V \times I \quad (2)$$

2.3.2 Kinerja Panel Surya

Kinerja menunjukkan prestasi, unjuk kerja, atau performa dari suatu sistem terutama sistem energi. Sebagai indikator utama dalam mengukur kinerja suatu sistem adalah efisiensi. Namun, ada beberapa parameter lain yang digunakan untuk menilai kinerja suatu sistem energi secara menyeluruh. Aspek-aspek penting yang biasanya digunakan untuk mengukur kinerja sistem energi, adalah [17]:

1. Efisiensi energi (*energy efficiency*), mengukur seberapa besar energi input yang berhasil dikonversi menjadi energi output yang berguna
2. Reliabilitas (*reliability*), kemampuan sistem untuk beroperasi secara konsisten dan tanpa gangguan dalam jangka waktu tertentu.
3. Daya tahan atau keandalan (*durability/robustness*), kemampuan sistem untuk beroperasi di berbagai kondisi lingkungan tanpa degradasi kinerja secara signifikan.
4. Fleksibilitas operasional (*operational flexibility*), kemampuan sistem menyesuaikan energi keluaran dengan kebutuhan beban yang berubah-ubah.
5. Biaya siklus hidup (*life cycle cost/LCC*), menilai total biaya sistem mulai dari pembangunan, operasi, pemeliharaan, hingga akhir masa pakai.
6. Dampak lingkungan (*environmental impact*), besarnya emisi atau limbah yang dihasilkan selama operasi sistem.
7. Ketersediaan energi (*availability*), proporsi waktu sistem berfungsi penuh dibandingkan total waktu operasional.
8. Keselamatan (*safety*), risiko bahaya terhadap manusia dan lingkungan selama sistem beroperasi.

Kinerja panel surya dinilai berdasarkan efisiensinya. Efisiensi ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti intensitas cahaya matahari, sudut kemiringan pemasangan, temperatur sekitar, serta kebersihan permukaan panel. Agar penyinaran optimal, panel surya perlu dipasang dengan sudut yang sesuai dengan garis lintang lokasi, sehingga cahaya matahari dapat mengenai permukaan panel secara tegak lurus [6]. Efisiensi panel surya (n_{pv}) diartikan sebagai hasil perbandingan antara daya listrik keluaran ($P_{pv,out}$) yang dihasilkan dengan daya listrik yang masuk ($P_{pv,in}$), dan dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut:

$$n_{pv} = \frac{P_{pv,out}}{P_{pv,in}} \times 100\% \quad (3)$$

2.4 Generator Penghasil Gas Hidrogen

Generator hidrogen terdiri dari dua tipe utama yaitu, generator hidrogen murni (H_2) dan generator HHO. Generator H_2 menghasilkan gas hidrogen murni yang dipisahkan dari oksigen secara fisik, sedangkan generator HHO menghasilkan campuran gas hidrogen dan oksigen yang dikenal sebagai gas *hydroxy*, gas HHO atau gas Brown [18].

2.4.1 Generator hidrogen

Generator Hidrogen beroperasi berdasarkan prinsip elektrolisis air, yaitu memecah molekul air menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) yang terpisah. Proses ini menggunakan dua elektroda, anoda dan katoda, yang ditempatkan dalam elektrolit berupa air murni atau larutan elektrolit [19].

2.4.2 Generator HHO

Generator HHO merupakan alat yang menghasilkan gas HHO. Gas HHO adalah campuran dengan perbandingan stoikiometrik antara hidrogen dan oksigen sebanyak 2:1, sesuai dengan rumus kimia air (H_2O). Campuran ini juga dikenal dengan sebutan gas brown gas tersebut memiliki sifat yang sangat reaktif dan mudah terbakar [20].

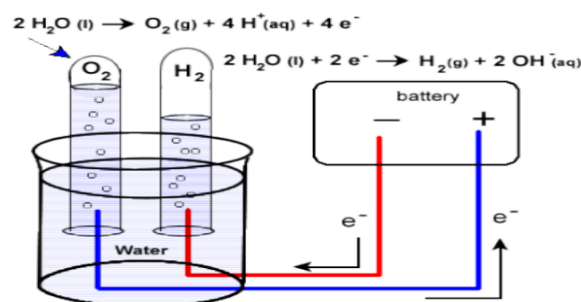
2.5 Jenis Generator Hidrogen

Generator hidrogen adalah alat yang berfungsi untuk memproduksi gas hidrogen dengan berbagai cara. Berbagai tipe generator hidrogen dikembangkan berdasarkan prinsip operasional,

rancangan, serta penerapannya dalam bidang teknik kimia dan energi terbarukan. Dalam proses elektrolisis, terdapat dua tipe generator hidrogen yang umum digunakan, yaitu generator hidrogen basah (GHB) dan generator hidrogen kering (GHK) [21].

2.5.1 Generator hidrogen basah

Generator hidrogen basah (GHB) menggunakan sistem seluruh pelat elektroda terendam dalam larutan elektrolit di dalam mikoreaktor tertutup. Beberapa hal yang mempengaruhi proses elektrolisis air antara lain konsentrasi elektrolit, jenis pelat, tegangan (V), dan arus listrik (I) [22]. Sistem elektrolisis yang dapat dimanfaatkan untuk gas hidrogen dan oksigen pada gambar berikut:



Gambar 2 Generator hidrogen basah [2]

Pada Gambar 2 menampilkan rangkaian sistem generator hidrogen basah (GHB) yang beroperasi berdasarkan prinsip elektrolisis air. Disebut “basah” karena seluruh elektroda berada dalam rendaman cairan elektrolit, biasanya berupa air murni atau air deionisasi. Keunggulan utama dari sistem ini adalah proses elektrolisis yang stabil serta tingkat kemurnian gas yang dihasilkan cukup tinggi. Namun, sistem ini memerlukan perawatan berkala untuk menjaga kestabilan larutan elektrolit dan mencegah terbentuknya endapan ion logam pada permukaan elektroda.

2.5.2 Kinerja generator hidrogen basah

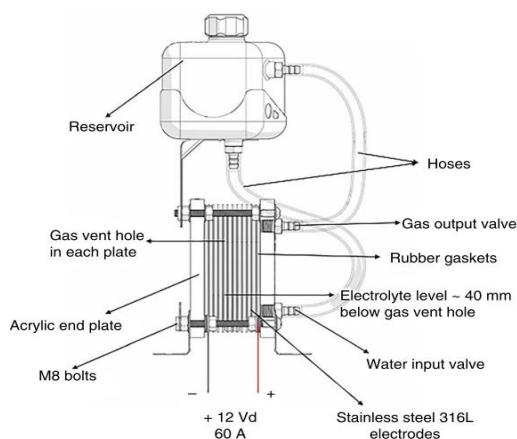
Beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja generator hidrogen basah (GHB) meliputi besar arus listrik yang digunakan, luas permukaan elektroda, serta kualitas larutan elektrolit. Efisiensi generator hidrogen menggambarkan tingkat kemampuan sistem dalam mengubah energi listrik menjadi energi kimia yang tersimpan dalam bentuk gas hidrogen (H_2) [23]. Tingkat efisiensi tersebut dapat ditentukan melalui perhitungan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$n_{GHB} = \frac{P_{GHB}}{P_{EL,B}} \times 100\%$$

(4) 2.6 Konversi Energi pada Generator Hidrogen

2.5.3 Generator hidrogen kering

Pada generator hidrogen hidrogen kering (GHK) menggunakan sistem dimana seluruh pelat elektroda tidak terendam dalam larutan elektrolit. Sistem ini dilengkapi dengan lapisan gasket sebagai pemisah elektroda yang berfungsi mengurangi terjadinya kebocoran serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan daya [23]. Tampilan pada generator tipe kering dapat dilihat pada gambar berikut [24]:



Gambar 3 Generator hidrogen kering

Pada gambar 3 generator hidrogen kering terdiri dari beberapa komponen utama seperti reservoir, akrilik, plat elektroda, gasket, dan selang untuk aliran gas dan larutan elektrolit. Generator ini menggunakan elektroda stainless steel yang dipisahkan oleh lapisan gasket karet yang berfungsi untuk mencegah kebocoran serta menjaga kestabilan elektrolit di dalam sistem.

2.5.4 Kinerja generator hidrogen kering

Pada GHK elektroda pada generator ini tidak sepenuhnya terendam larutan elektrolit, sehingga panas yang dihasilkan lebih kecil, tetapi terkonsentrasi di permukaan elektroda, meningkatkan hambatan listrik dan menurunkan efisiensi reaksi elektrokimia [9]. Efisiensi konversi energi dan energi yang dihasilkan dari hidrogen pada sistem ini dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$n_{GHK} = \frac{P_{GHK}}{P_{el,K}}$$

(5)

Pada proses elektrolisis air generator hidrogen mengkonversi energi listrik menjadi energi kimia yang tersimpan dalam bentuk gas hidrogen dan oksigen melalui pemecahan molekul air menggunakan arus searah (DC). Efisiensi proses ini dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti suhu, konsentrasi elektrolit, dan jarak antara elektroda, yang semuanya berperan dalam optimalisasi konversi energi di dalam generator hidrogen kering [10].

2.7 Integrasi Panel Surya dengan GHB

Penggabungan panel surya dengan GHB memungkinkan produksi hidrogen yang berkelanjutan menggunakan energi matahari sebagai sumber listrik utama. Integrasi panel surya dengan generator hidrogen merupakan teknologi pembangkit listrik yang menggabungkan sumber energi terbarukan berupa listrik dari panel surya (*Photovoltaic/PV*) [25].

2.7.1 Konversi energi pada PV+GHB

Panel surya mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik yang kemudian digunakan oleh GHB untuk memproduksi gas hidrogen dan oksigen melalui proses elektrolisis [22].

2.7.2 Kinerja integrasi panel surya dengan GHB

Produksi gas hidrogen, efisiensi konversi energi, dan kestabilan operasi merupakan tolak ukur dari kinerja sistem integrasi ini. Faktor-faktor seperti intensitas radiasi matahari, efisiensi panel surya, tipe elektrolit, serta desain GHB turut mempengaruhi performa sistem. Studi terkini menunjukkan bahwa pemakaian panel surya dengan kapasitas 50 WP mampu memproduksi hidrogen secara stabil dalam kondisi cuaca cerah [26].

Untuk menentukan efisiensi dari dua sistem yang terintegrasi, kedua efisiensi tersebut dikalikan satu sama lain. Dalam kasus ini, persamaan (2) dikalikan dengan persamaan (3) dan menggunakan persamaan (4), sehingga menghasilkan persamaan berikut [27]:

$$\eta_{PV+GHB} = \frac{E_{listrik}}{E_{cahaya}} \cdot \frac{E_{kimia}}{E_{listrik}} = \frac{E_{kimia}}{E_{cahaya}}$$

(6)

Kinerja kedua konverter energi secara terpadu menjadi:

$$\eta_{PV+GHB} = \eta_{PV} \cdot \eta_{GHB} \quad (7)$$

Energi listrik yang dihasilkan panel surya (PV) dimanfaatkan generator hidrogen basah (GHB), sehingga

$$P_{pv,out} = P_{EL,B} \quad (8)$$

maka:

$$\eta_{PV+GHB} = \frac{P_{pv,out}}{P_{pv,in}} \cdot \frac{P_{GHB}}{P_{EL,B}} = \frac{P_{EL,B}}{P_{pv,in}} \cdot \frac{P_{GHB}}{P_{EL,B}} \quad (9)$$

Sehingga diperoleh koefisien kinerja sistem PV+GHB:

$$\eta_{PV+GHB} = \frac{P_{GHB}}{P_{pv,in}} \quad (10)$$

Untuk mendapatkan persentase, persamaan (10) dikalikan dengan 100%, sehingga menjadi:

$$n_{PV+GHB} = \frac{P_{GHB}}{P_{PV.in}} \times 100\% \quad (11)$$

2.8 Integrasi Panel Surya dengan GHK

Panel surya yang dipadukan dengan generator hidrogen kering (GHK) memiliki efisiensi lebih rendah daripada sistem basah, karena pelat elektroda tidak sepenuhnya terendam [28].

2.8.1 Konversi Energi pada PV+GHK

Sistem ini bekerja dengan prinsip konversi energi yang mirip dengan GHB, namun GHK memiliki hambatan listrik lebih rendah sehingga arus listrik yang digunakan untuk elektrolisis menjadi lebih efisien. Prinsip konversi energi pada GHK serupa dengan GHB. Penelitian menunjukkan bahwa desain sel yang baik dapat mengurangi kehilangan energi selama proses elektrolisis dan meningkatkan efisiensi konversi energi pada GHK [29].

2.8.2 Kinerja integrasi panel surya dengan GHK

Berdasarkan kapasitas produksi hidrogen dalam volume yang dihasilkan, efisiensi penggunaan energi, serta kestabilan dalam operasi, sistem integrasi panel surya dengan GHK umumnya mampu

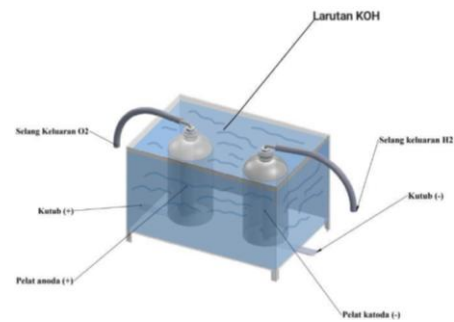
menghasilkan jumlah hidrogen yang lebih besar dengan tingkat konsumsi energi yang lebih efisien jika dibandingkan dengan sistem GHB. Selain itu, kestabilan operasi yang lebih baik pada sistem ini juga meningkatkan keandalan dan kontinuitas produksi, menjadikannya pilihan yang lebih unggul untuk aplikasi skala komersial maupun penelitian dalam pengembangan energi terbarukan [30]. Berdasarkan persamaan (5) sampai persamaan (8), maka dengan penalaran yang sama, diperoleh efisiensi sistem integrasi panel surya (PV) dengan generator hidrogen kering (GHK), adalah:

$$n_{PV+GHK} = \frac{P_{GHK}}{P_{PV.in}} \times 100\% \quad (10)$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

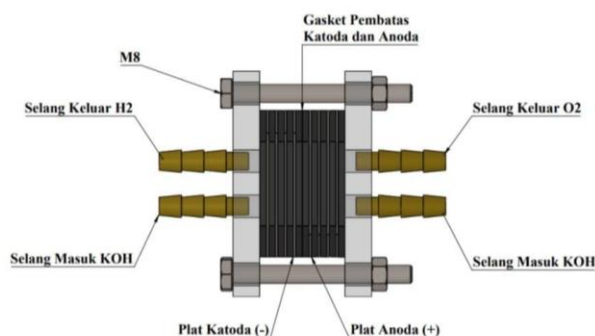
3.1 Desain Penelitian

Desain penelitian integrasi panel surya berkapasitas 50 Wp dengan GHB dan GHK merupakan tipe penelitian kuantitatif yang melibatkan dua perangkat utama sebagai sebuah sistem terpadu. Dalam penelitian ini, terdapat variabel input, proses konversi energi yang berlangsung di dalam sistem, serta variabel output yang dievaluasi untuk menilai efektivitas integrasi kedua perangkat tersebut.



Gambar 4 Desain generator hidrogen basah

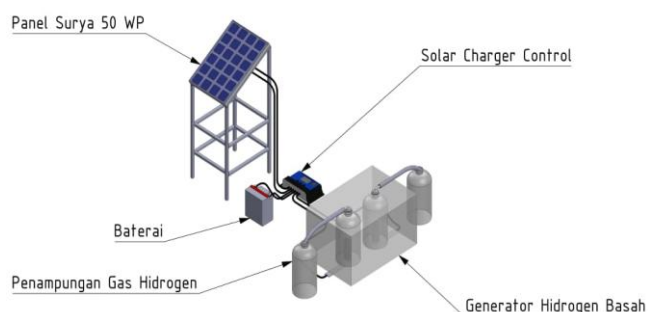
Pada Gambar 4 tidak dibuat dengan skala yang sesuai dengan ukuran alat aslinya. Pengaturan dimensi pada gambar tersebut sengaja diperbesar untuk bagian-bagian yang berukuran kecil agar detail yang penting tetap terlihat jelas, sehingga penjelasan pada gambar menjadi lebih mudah dipahami.



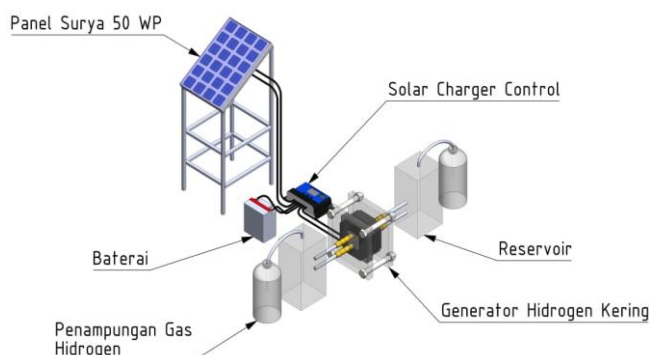
Gambar 5 Desain generator hidrogen kering

Pada Gambar 5 juga tidak menggunakan skala yang sesuai dengan dimensi alat sebenarnya. Penyesuaian ukuran pada gambar dilakukan dengan memperbesar bagian-bagian kecil agar detail penting tetap dapat terlihat dan mudah dipahami keterangannya.

Penelitian ini dilakukan di rooftop Fakultas Teknologi Industri dan Informatika (FTII) UHAMKA, dengan lokasi terbuka yang mendapat intensitas cahaya matahari tinggi tanpa halangan, berlangsung selama empat bulan untuk mengoptimalkan efisiensi panel surya.



Gambar 6 Skema alat penelitian generator hidrogen basah



Gambar 7 Skema alat penelitian generator hidrogen kering

Pada Gambar 6 dan 7, skema alat penelitian memperlihatkan susunan dan konfigurasi peralatan yang digunakan untuk menguji produksi hidrogen. Terdapat dua sistem yaitu generator hidrogen basah dan generator hidrogen kering, yang mendapatkan sumber energi dari panel surya 50 Wp. skema tersebut

menggambarkan tata letak serta hubungan antar komponen yang digunakan dalam penelitian.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel Bebas:
 - a. Intensitas cahaya matahari (W/m^2).
 - b. Tipe generator hidrogen (GHB dan GHK).
2. Variabel Terikat:
 - a. Efisiensi sistem terintegrasi antara panel surya (PV) dengan generator hidrogen basah (GHB) dan generator hidrogen kering (GHK).
 - b. Laju produksi gas hidrogen yang dihasilkan (L/menit)
3. Variabel Kontrol:
 - a. Konsentrasi dan volume larutan elektrolit.
 - b. Waktu operasi.
 - c. Luas permukaan elektroda.
 - d. Suhu lingkungan (diupayakan tetap).

3.3 Metode Pengambilan dan Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahap yang harus dijalankan agar penelitian berjalan sesuai dengan prosedur yang telah dijelaskan. Adapun langkah pengambilan dan pengumpulan data dalam penelitian ini adalah:

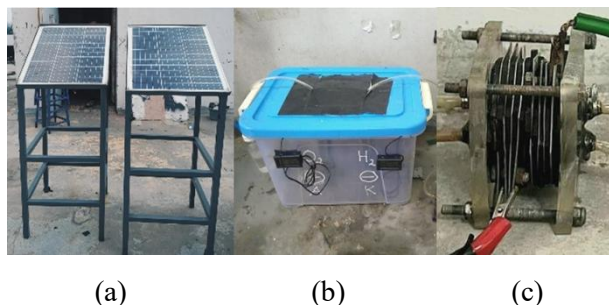
1. Pengukuran intensitas cahaya, menggunakan luxmeter di permukaan panel surya.
2. Pengukuran output listrik: atat tegangan dan arus dari panel surya ke GHB menggunakan multimeter.
3. Pengukuran volume gas hidrogen: menggunakan flowmeter pada tabung ukur atau metode tekanan jika tersedia.
4. Pengukuran Suhu: monitor suhu larutan selama proses.
5. Pengukuran volume gas hidrogen secara langsung dengan alat ukur skala (liter/min).
6. Pencatatan arus (ampere) dan tegangan (volt) dengan multimeter digital.
7. Ulangi setiap pengujian 3 kali.

4. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Hasil Penelitian

Hasil penelitian menghasilkan data masukan dan keluaran dari pengukuran yang dilakukan. Data yang dikumpulkan meliputi antara lain intensitas

cahaya matahari, kelembaban udara relatif, kecepatan angin, suhu lingkungan sekitar, suhu panel surya, tegangan dan arus listrik, suhu generator hidrogen basah, suhu generator hidrogen kering, serta volume gas hidrogen dan volume gas oksigen.



Gambar 6 Alat yang digunakan dalam penelitian:

(a) panel surya 50 Wp, (b) generator hidrogen basah, dan (c) generator hidrogen kering.

Pada Gambar 6 alat yang digunakan dalam penelitian generator hidrogen basah dan kering bertenaga surya 50 Wp.

Setelah data mentah diperoleh, maka data diolah dengan perhitungan menggunakan persamaan yang tersedia, sehingga didapatkan daya masukan, daya keluaran sistem, dan efisiensi sistem terpadu tersebut.

4.1.1 Integrasi panel surya 50 Wp dengan generator hidrogen basah

Pada penelitian ini, integrasi panel surya 50 Wp dengan generator hidrogen basah menghasilkan data yang meliputi variabel masukan dan keluaran dari kedua konverter energi tersebut. Semua data disajikan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1 Integrasi panel surya dengan GHB

No.	Pukul	I_s [W/m ²]	A [m ²]	T_a [°C]	T_{s1} [°C]	V [m/s]	RH [%]	V [volt]	I [ampere]	T_{H_2} [°C]	Q_{H_2} [L/min]	Q_{O_2} [L/min]	ρ_{H_2} [kg/m ³]	LHV H_2 [kJ/kg]
1	09.00	1059,8	0,313	26,5	48,8	0,7	77%	13,98	2,03	25,9	0,5	0,5	0,0814	121.01
2	09.30	1085,1	0,313	26,6	51,7	2,4	69%	13,71	1,98	26,1	1,0	0,5	0,0814	121.01
3	10.00	1043,4	0,313	27,0	49,9	1,6	69%	13,14	1,96	26,7	1,0	0,5	0,0814	121.01
4	10.30	937,2	0,313	27,4	46,9	3,2	68%	12,41	1,83	27,3	0,5	0,5	0,0814	121.01
5	11.00	998,1	0,313	27,7	46,9	1,8	66%	13,81	2,01	27,2	1,0	0,5	0,0814	121.01
6	11.30	1015,3	0,313	27,9	48,4	2,2	66%	13,82	1,98	28,1	1,0	1,0	0,0814	121.01
7	12.00	1223,2	0,313	28,1	50,3	1,6	65%	13,28	2,22	28,1	1,5	1,0	0,0814	121.01
8	12.30	1247,6	0,313	28,3	47,8	2,2	65%	13,31	2,31	29,0	2,0	1,5	0,0814	121.01
9	13.00	1135,7	0,313	28,7	51,3	3,1	64%	13,28	2,25	29,2	1,5	1,5	0,0814	121.01
10	13.30	997,7	0,313	28,9	49,8	4,1	65%	13,28	2,05	26,6	1,0	1,0	0,0814	121.01
11	14.00	1157,0	0,313	29,1	49,8	4,9	64%	13,81	2,01	29,9	1,5	1,0	0,0814	121.01
12	14.30	1052,2	0,313	29,5	47,8	3,5	62%	13,51	2,03	29,9	1,5	1,0	0,0814	121.01
13	15.00	949,3	0,313	29,7	46,8	3,1	62%	13,25	1,85	30,6	1,0	0,5	0,0814	121.01
Maksimum		1247,6						13,98	2,31		2,0			
Minimum		937,2						12,41	1,83		0,5			
Rata-rata		1069,4						13,43	2,04		1,2			

Berdasarkan data pada Tabel 1, sistem integrasi panel surya 50 Wp dengan generator hidrogen basah menunjukkan adanya hubungan yang jelas antara

intensitas cahaya matahari (I_s) dengan tegangan (V), arus listrik (I), serta volume gas hidrogen (Q_{H_2}) yang dihasilkan pada berbagai waktu pengamatan. Secara umum, intensitas cahaya matahari mengalami fluktuasi sepanjang waktu pengukuran, dengan nilai maksimum mencapai 1247,6 W/m² dan minimum sebesar 937,2 W/m², serta rata-rata 1069,4 W/m². Peningkatan intensitas cahaya pada pukul 10.00 WIB sampai 12.00 wib tampak berbanding lurus dengan kenaikan nilai tegangan dan arus yang dihasilkan panel surya. Tegangan (V) tertinggi tercatat sebesar 14,53 volt dan arus listrik (I) maksimum sebesar 2,5 ampere, yang terjadi pada periode dengan intensitas cahaya mendekati puncak. Akibatnya, volume gas hidrogen yang dihasilkan meningkat, dengan laju produksi maksimum mencapai 1,8 L/menit, sedangkan nilai terendah hanya 0,5 L/menit ketika intensitas cahaya relatif rendah. Pada pagi hari (sekitar pukul 10.00 WIB sampai 12.00 WIB), intensitas cahaya mulai meningkat dari sekitar 1043,4 W/m² hingga 1223,2 W/m², menghasilkan tegangan sekitar 13,78 volt hingga 13,93 volt dan arus 1,96 hingga 2,01 A, dengan volume gas hidrogen yang dihasilkan berkisar antara 1,0–1,2 L/menit. Menjelang tengah hari (pukul 11.00 WIB hingga 12.00 WIB), intensitas cahaya mencapai nilai tertinggi berkisar 1200 W/m² dengan peningkatan tegangan hingga 14,53 volt dan arus 2,5 ampere, diikuti oleh produksi gas hidrogen tertinggi yaitu 1,8 L/menit. Namun, setelah pukul 13.00 WIB, intensitas cahaya mulai menurun menjadi sekitar 997,7 W/m² hingga 1052,2 W/m², yang menyebabkan sedikit penurunan pada tegangan 13,28 volt hingga 13,25 volt dan volume gas hidrogen 1,1 L/menit hingga 1,4 L/menit.

4.1.2 Integrasi panel surya 50 Wp dengan generator hidrogen kering

Penelitian integrasi panel surya 50 Wp dengan generator hidrogen kering menghasilkan data berupa variabel masukan dan keluaran pada panel surya serta generator hidrogen, yang ditampilkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2 Integrasi panel surya dengan GHK

No.	Pukul	Is [W/m ²]	A [m ²]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	V [m/s]	RH [%]	V [volt]	I [ampere]	T _g [°C]	Q _g [L/min]	Q _{g2} [L/min]	p H ₂ [kg/m ³]	LHV H ₂ [kJ/kg]
1	09.00	1059,8	0,315	26,5	47,9	0,7	77%	13,45	2,04	43,6	0,5	0,5	0,0814	121.019
2	09.30	1085,1	0,315	26,6	51,2	2,4	69%	13,11	2,01	46,8	1,0	1,0	0,0814	121.019
3	10.00	1043,4	0,315	27,0	50,1	1,6	69%	13,63	2,04	50,2	1,0	1,0	0,0814	121.019
4	10.30	937,2	0,315	27,4	47,1	3,2	68%	12,49	1,75	50,1	1,0	0,5	0,0814	121.019
5	11.00	998,1	0,315	27,7	47,3	1,8	66%	12,07	2,01	50,5	0,5	0,5	0,0814	121.019
6	11.30	1015,3	0,315	27,9	48,1	2,2	66%	12,32	2,08	50,7	1,0	0,5	0,0814	121.019
7	12.00	1223,2	0,315	28,1	50,7	1,6	65%	12,68	2,05	51,1	1,5	1,0	0,0814	121.019
8	12.30	1247,6	0,315	28,3	47,5	2,2	65%	12,56	2,07	52,8	1,5	1,0	0,0814	121.019
9	13.00	1135,7	0,315	28,7	51,1	3,1	64%	12,52	2,23	53,5	1,5	1,0	0,0814	121.019
10	13.30	997,7	0,315	28,9	50,3	4,1	65%	12,19	2,02	53,9	1,0	0,5	0,0814	121.019
11	14.00	1157,0	0,315	29,1	50,1	4,9	64%	12,61	2,14	54,4	1,0	1,0	0,0814	121.019
12	14.30	1052,2	0,315	29,5	48,2	3,5	62%	12,39	2,09	55,2	1,0	0,5	0,0814	121.019
13	15.00	949,3	0,315	29,7	46,9	3,1	62%	12,08	2,01	55,8	0,5	0,5	0,0814	121.019
Maksimum		1247,6						13,63	2,23		1,5			
Minimum		937,2						12,07	1,75		0,5			
Rata-rata		1069,4						12,62	2,04		1,0			

Berdasarkan data pada Tabel 2, sistem integrasi panel surya 50 Wp dengan generator hidrogen kering. Secara umum, intensitas cahaya matahari (Is) selama penelitian mengalami fluktuasi dari 937,2 W/m² hingga 1247,6 W/m², dengan nilai rata-rata sebesar 1069,4 W/m². Variasi intensitas ini berpengaruh langsung terhadap besarnya tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Pada pukul 11.00 WIB sampai 12.30 wib, intensitas cahaya meningkat dari 998,1 W/m² menjadi 1247,6 W/m², sehingga tegangan juga mengalami peningkatan dari 12,07 volt menjadi 12,56 volt, dan arus naik dari 2,01 ampere menjadi 2,07 A. Kenaikan ini menyebabkan peningkatan volume gas hidrogen yang dihasilkan, dengan laju produksi gas mencapai 1,5 L/menit pada puncak intensitas cahaya. Menjelang sore hari pada pukul 13.30 WIB sampai 14.00 WIB, intensitas cahaya semakin menurun ke nilai minimum 997,2 W/m², dengan tegangan hanya 12,07 volt dan arus 1,75 ampere. Akibatnya, volume gas hidrogen yang dihasilkan menurun secara signifikan hingga 0,5 L/menit. Nilai rata-rata selama pengujian menunjukkan bahwa sistem bekerja dengan baik pada intensitas cahaya rata-rata 1069,4 W/m², menghasilkan tegangan 12,62 volt, arus 2,04 ampere, dan volume gas hidrogen rata-rata 1,0 L/menit.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap efisiensi PV+GHB dan PV+GHK

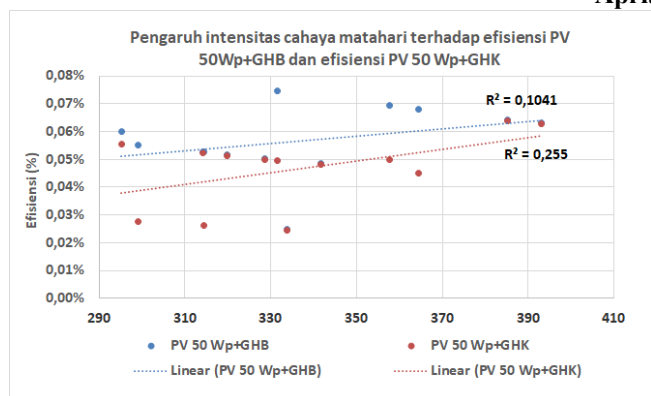
Intensitas cahaya matahari merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi kinerja dan efisiensi sistem fotovoltaik (PV). Pada sistem integrasi panel surya berkapasitas 50 Wp dengan generator hidrogen basah, variasi intensitas radiasi matahari berpengaruh secara langsung terhadap jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya serta volume gas hidrogen yang terbentuk melalui

proses elektrolisis air. Ketika intensitas cahaya meningkat, permukaan panel surya menerima energi yang lebih besar sehingga arus listrik yang dihasilkan meningkat dan daya keluaran panel surya pun bertambah. Dengan meningkatnya daya keluaran, energi listrik yang dialirkan ke generator hidrogen juga bertambah, sehingga laju produksi gas hidrogen meningkat. Sebaliknya, ketika intensitas cahaya menurun, produksi daya listrik oleh panel surya mengalami penurunan yang berdampak pada menurunnya efisiensi sistem secara keseluruhan. Data hasil pengamatan tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Intensitas cahaya matahari dengan efisiensi PV+GHB dan efisiensi PV+GHK

No	Waktu	I [W/m ²]	η	
			PV 50 Wp +GHB [%]	PV 50 Wp + GHK [%]
1	09.00	333,837	0,02%	0,02%
2	09.30	341,807	0,05%	0,05%
3	10.00	328,671	0,05%	0,05%
4	10.30	295,218	0,06%	0,06%
5	11.00	314,402	0,05%	0,03%
6	11.30	319,820	0,05%	0,05%
7	12.00	385,308	0,06%	0,06%
8	12.30	392,994	0,06%	0,06%
9	13.00	357,746	0,07%	0,05%
10	13.30	314,276	0,05%	0,05%
11	14.00	364,455	0,07%	0,05%
12	14.30	331,443	0,07%	0,05%
13	15.00	299,030	0,06%	0,03%
Maksimum		392,994	0,07%	0,06%
Minimum		295,218	0,02%	0,02%
Rata-rata		336,846	0,06%	0,05%

Pada Tabel 3 menunjukkan perbandingan efisiensi antara dua sistem panel surya yang diintegrasikan dengan generator hidrogen basah (GHB) dan generator hidrogen kering (GHK). Intensitas radiasi matahari selama pengujian berkisar antara 295,218 W/m² hingga 392,994 W/m², dengan nilai rata-rata sebesar 336,846 W/m², yang menunjukkan kondisi penyinaran relatif stabil selama proses pengujian. Nilai efisiensi (η) pada sistem PV+GHB berkisar antara 0,02% hingga 0,07% dengan rata-rata 0,06%, sedangkan pada sistem PV+GHK berkisar antara 0,02% hingga 0,06% dengan rata-rata 0,05%. Peningkatan efisiensi tertinggi terjadi pada pukul 13.00 WIB sampai 14.00 WIB, yaitu saat intensitas cahaya matahari mencapai nilai maksimum.

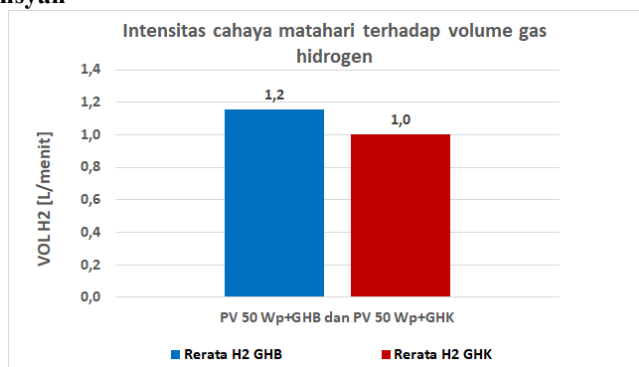


Gambar 7 Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap efisiensi PV+GHB dan PV+GHK

Pada Gambar 7 menunjukkan hubungan antara intensitas cahaya matahari (W/m^2) dan efisiensi sistem panel surya 50 Wp yang diintegrasikan dengan generator hidrogen basah (GHB) serta generator hidrogen kering (GHK). Terlihat bahwa kedua sistem mengalami peningkatan efisiensi seiring dengan meningkatnya intensitas cahaya matahari. Sistem PV+GHB (ditandai dengan titik berwarna biru) secara konsisten menunjukkan nilai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem PV+GHK (titik berwarna merah). Efisiensi sistem PV+GHB berada pada kisaran 0,05% hingga 0,07%, sedangkan sistem PV+GHK berkisar antara 0,03% hingga 0,06%. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem GHB lebih optimal dalam memanfaatkan daya listrik yang dihasilkan oleh panel surya untuk menjalankan proses elektrolisis air. Efisiensi sistem GHB ialah dalam rentang 0,06% hingga 0,08%, yang menandakan bahwa sistem bekerja dengan baik dan stabil meskipun terjadi sedikit fluktuasi akibat perubahan intensitas radiasi matahari dan suhu panel [29].

4.2.2 Perbandingan rata-rata volume gas hidrogen yang dihasilkan pada PV+GHB dan PV+GHK

Data pada Tabel 4.9 berikut ini menunjukkan perbandingan laju produksi gas hidrogen (QH_2) antara sistem generator hidrogen basah (GHB) dan generator hidrogen kering (GHK) yang diintegrasikan dengan panel surya 50 Wp. Pengujian dilakukan mulai pukul 09.00 WIB sampai 15.00 WIB untuk mengetahui pengaruh variasi waktu terhadap volume gas hidrogen yang dihasilkan. Tabel ini memuat data volume gas hidrogen yang dihasilkan (L/menit) pada kedua sistem, serta nilai efisiensi rata-rata yang dihitung berdasarkan daya keluaran dari panel surya selama periode pengamatan.



Gambar 8 Perbandingan rata-rata volume gas hidrogen pada PV+GHB dan PV+GHK

Pada Gambar 8 dapat dilihat perbandingan rata-rata volume gas hidrogen (H_2) yang dihasilkan oleh dua sistem, yaitu PV 50 Wp+GHB dan PV50 Wp +GHK. Berdasarkan hasil pengamatan, sistem PV50 Wp +GHB menghasilkan volume gas hidrogen rata-rata sebesar 1,2 L/menit, sedangkan sistem PV50 Wp + GHK hanya menghasilkan sekitar 1,0 L/menit. Pada sistem GHB, proses elektrolisis berlangsung dengan menggunakan media elektrolit cair (elektrolit basah) yang berfungsi mempercepat perpindahan ion antar elektroda serta menjaga kestabilan suhu selama proses elektrolisis berlangsung. Kondisi tersebut meningkatkan efektivitas pemisahan molekul air (H_2O) menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) [12]. Pada sistem GHK, pelat elektroda tidak seluruhnya terendam, melainkan hanya bagian tengah atau area aktif yang kontak langsung dengan elektrolit, sementara bagian tepinya tetap kering karena tertutup gasket untuk meningkatkan efisiensi dan mencegah kebocoran arus menyebabkan hambatan listrik sehingga proses perpindahan ion menjadi kurang optimal dan laju produksi gas hidrogen, listrik dan penumpukan panas di permukaan elektroda, sehingga berpotensi mengurangi efisiensi reaksi elektrokimia [2].

5. SIMPULAN

Berdasarkan hasil dari pengukuran, perhitungan, serta analisis data, dapat disimpulkan bahwa intensitas cahaya matahari berpengaruh langsung terhadap daya keluaran panel surya. Pada sistem GHB, intensitas maksimum sebesar $1247,6 \text{ W/m}^2$ menghasilkan tegangan 13,98 volt, arus 2,31 ampere, dan volume gas hidrogen 2,0 L/menit dengan efisiensi 0,06%. Sedangkan pada sistem GHK dengan intensitas yang sama, diperoleh tegangan 13,63 volt, arus 2,23 ampere, volume gas hidrogen 1,5 L/menit, dan efisiensi 0,05%. Pada intensitas minimum sebesar $937,2 \text{ W/m}^2$, nilai tegangan dan arus listrik

pada kedua sistem menurun. Dengan demikian, semakin tinggi intensitas cahaya matahari, semakin besar pula daya keluaran panel surya dan volume gas hidrogen yang dihasilkan.

KEPUSTAKAAN

- [1] S. T. Rahmi, E. U. Rahmad, D. Purnamasari, and R. Zainul, "Electrolyte Optimization Study on Dry Cell Generator Electrolysis System for Producing Hydrogen Gas Using RSM Method (Response Surface Method) Electrolyte Optimization Study on Electrolysis System Dry Cell Gene," in *Ekstata: Berkala Ilmiah MIPA*, Padang: Ekstata, 2023, pp. 226–236. doi: 10.24036/eksakta/vol24-iss02/273.
- [2] Y. S. Handayani, I. Priyadi, and Y. V. Hutabara, "Analisis Pengaruh Variasi Tegangan Terhadap Oxyhydrogen (Hho) Generator," *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2021.
- [3] Rusdianasari, Y. Bow, and T. Dewi, "HHO Gas Generation in Hydrogen Generator using Electrolysis," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 258, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/258/1/012007.
- [4] A. Asmawi, M. R. Bin Mansor, N. Tamaldin, V. V. R. Repi, and A. Sudrajat, "Pengaruh Penggunaan Pelat Elektroda Tekstur terhadap laju Produksi gas pada Generator HHO," *J. Ilm. Giga*, vol. 25, no. 2, p. 96, 2022, doi: 10.47313/jig.v25i2.1974.
- [5] M. R. T. W. S., "Analisis Penggunaan Katalis Natrium Bikarbonat Pada Generator Gas HHO Tipe Dry Cell Menggunakan Plat Stainless Steel 201 Sebagai Elektroda," Universitas PGRI Semarang, 2021.
- [6] R. Rifky, A. Fikri, M. Mujirudin, and A. Avorizano, "Hibridasi Panel Surya Dengan Modul Termoelektrik Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya," in *Prosiding Sains Nasional dan Teknologi*, Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim, Nov. 2023, p. 108. doi: 10.36499/psnst.v13i1.8604.
- [7] D. Savira and R. Zainul, "Efektifitas Variasi Plat 4//4 dan 5//5 Elektroda Al/Cu Terhadap Kinerja Generator Penghasil Gas Hidrogen," *R2J*, vol. 3, no. 2, 2021, doi: 10.38035/rj.v3i2.
- [8] D. R. Harsi, "Analisis Penggunaan Biogas Sebagai Bahan Bakar Alternatif Boiler di Pabrik Kelapa Sawit PTPN II Pagar Merbau," Universitas Medan Area, 2022.
- [9] Y. Dewantoro Herlambang *et al.*, "Unjuk kerja Electrolyzer tipe Dry Cell Terhadap Variasi Konsentrasi Elektrolit dan Arus Listrik pada Mesin PEM Fuel Cell Skala Kecil untuk Pembangkit Listrik," 2021. [Online]. Available: <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/rekayasa>
- [10] S. Anwar, F. Khan, Y. Zhang, and A. Djire, "Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 63, pp. 32284–32317, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.191.
- [11] Y. S. Handayani and I. Priyadi, "Analisis Pengaruh Variasi Tegangan Terhadap Oxyhydrogen (Hho) Generator," *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 2–7, 2021, doi: 10.22146/juliet.v2i2.69013.
- [12] N. Hidayah, Suryanto, M. Aslam, and I. Islamiyah, "Produksi Gas Oxyhydrogen (HHO) Untuk Generator Set Dengan Sumber Energi Surya," in *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-9*, Makassar: ISAS Publishing, 2023, pp. 557–566. [Online]. Available: <https://proceeding.isas.or.id/index.php/sentri nov/article/view/1331/692>
- [13] M. Hasan S. Hossain, M. Mofijur, Z. Kabir, Irfan A.B, Yunus. K, Esam. J., "Harnessing Solar Power: A Review of Photovoltaic Innovations, Solar Thermal Systems, and the Dawn of Energy Storage Solutions," *Energies*, vol. 16, no. 18, pp. 1–30, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186456.
- [14] Fadliandi, Budiyanto, and P. G. Chamdareno, "Peningkatan Kinerja Panel Surya Dengan Metode Pendinginan," Jakarta, 2017.
- [15] R. Rifky, M. N. Fadurrahman, T. Muhammad, N. Zain, and H. Raihan, "Hibridisasi Sistem Photovoltaic dan Thermoelectric Generator sebagai Konverter Energi Cahaya dan Termal Surya Menjadi Energi Listrik," in *Seminar Nasional Teknoka*, Jakarta: Fakultas Teknologi Industri dan Informatika Universitas Muhammadiyah Prof. DR. Hamka (FTII UHAMKA), 2024, pp. 15–30. [Online]. Available: <https://journal.uhamka.ac.id/index.php/tekno ka/article/view/17452>
- [16] R. Rifky, R. F. Akbar, O. Heriyani, R. Ariyansah, and A. R. Dzikrillah, "Pembangkit Listrik Menggunakan

- Generator Termoelektrik pada Dinding Model Bangunan,” in *Seminar Nasional Teknoka*, Jakarta: Fakultas Teknologi Industri dan Informatika Universitas Muhammadiyah Prof. DR. Hamka (FTII UHAMKA), 2024, p. 2024. [Online]. Available: <https://journal.uhamka.ac.id/index.php/teknoka/article/view/17445>
- [17] M. Üç and C. Elitaş, “Life Cycle Costing for Sustainability,” in *Handbook of Research on Waste Management Techniques for Sustainability*, no. Life Cycle Cost, 2016, pp. 96–107. doi: 10.4018/978-1-4666-9723-2.ch005.
- [18] M. Maulana Yusuf, “Rancang Bangun Hydrogen Generator Menggunakan Pembangkit Solar Cell Untuk Optimasi Output Fuel Cell Berbasis PID-Labview,” Pascasarjana Politeknik Negeri Jakarta, 2023.
- [19] L. Hakim *et al.*, “Hydrogen production from seawater using H₂SO₄ catalyst by photovoltaic-electrolysis method,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2023, pp. 315–320. doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.289.
- [20] N. D. C. Setiawan, D. H. T. Prasetyo, and D. Wahyudi, “Pengaruh Generator HHO dan Etanol terhadap Performa dan Emisi Gas Buang Mesin Bensin,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 144–154, Oct. 2022, doi: 10.29303/dtm.v12i2.518.
- [21] S. Higgs, Y. Da Wang, C. Sun, Jackson, R. T. Armstrong, and P. Mostaghimi, “Karakterisasi keterbasahan hidrogen in-situ untuk Penyimpanan Hidrogen Bawah Tanah,” 2022.
- [22] F. M. Sarira, A. Z. Syaiful, and M. Tang, “Pemanfaatan Energi Surya Dalam Pembuatan Gas Hidrogen Melalui Proses Elektrolisis Air Dengan Variasi Katalis KOH, NaCl dan NaHCO₃,” *SAINTIS*, vol. 2, no. 2, pp. 52–56, 2021.
- [23] R. Saputra, E. Marlina, and N. Robbi, “Pengaruh Katalis KOH Terhadap Produksi HHO Hasil Elektrolisis Menggunakan Generator Wet Cell,” Malang, 2022, pp. 91–96.
- [24] A. K. El Soly, M. S. Gad, and M. A. El Kady, “Maximization and efficient production rates of different zero carbon electrofuels using dry alkaline electrolyzers,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 150, no. 17, pp. 13347–13372, 2025, doi: 10.1007/s10973-025-14505-0.
- [25] Parman, M. Resha, J. Hendrarsakti, and F. B. Juangsa, “Desain Sistem Hidrogen Hijau Dengan Sumber Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Lombok,” *ROTASI*, vol. 26, no. 4, pp. 80–90, 2024.
- [26] Lucky Andika Novario, “Desain Optimal Untuk Pembangkit Hibrida PLTS, Baterai, Hydrogen Fuel Cells dan PLTD Pada Pulau Baranglombo dan Laelae,” Institut Teknologi Bandung, 2024.
- [27] Collins, “Overall Efficiency,” *Energy Conserv. Environ. Prot.*, pp. 100–102, 2021, [Online]. Available: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/overall-efficiency>
- [28] W. Xi, M. Boyd, P. Kurup, and M. Ruth, “Concentrated Solar Power as a Pathway for Electrolytic Hydrogen Production,” *H2IQ Meet.*, pp. 1–34, 2022.
- [29] S. Suryanto, Y. Klistafani, A. Rahmadania, and W. I. Pratiwi, “Kaji Eksperimen Pengaruh Kuat Medan Magnet Terhadap Efisiensi Produksi Gas Oxyhidrogen (HHO) Pada Generator HHO Tipe Kering,” *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 22, no. 2, pp. 344–350, Apr. 2025, doi: 10.31963/sinergi.v22i2.5065.
- [30] Y. Özçelep, G. Bekdaş, S. Apak, and Z. W. Geem, “An Investigation into the Ability of a Solar Photovoltaic–Hydrogen System to Meet the Electrical Energy Demand of Houses in Different Cities in Türkiye,” *Sustain.*, vol. 17, no. 7, Apr. 2025, doi: 10.3390/su17072886.