

Pengaruh Kapasitas Panel Surya dan Intensitas Cahaya Matahari terhadap Kinerja Generator Hidrogen Kering dalam Produksi Gas Hidrogen

Rezha Apriansyah, Rifky, Tasyrik Al Qaida, Dicky Wyldan Putra Permana, & Saddam Firly Mustarisiam
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 diperoleh dari generator hidrogen yang dibangkitkan dengan panel surya. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kinerja sistem terpadu panel surya dengan generator hidrogen kering (GHK) dalam memproduksi gas hidrogen. GHK memiliki desain dengan susunan pelat baja tipe HSS 316L yang dilapisi dengan gasket karet. Metodologi penelitian yang dilakukan adalah eksperimental dengan diawali perancangan sistem elektrolisis GHK tersebut dengan menggunakan dua panel surya yang berkapasitas 50 Wp dan 100 Wp sebagai pemasok energi listrik. Pengujian dilaksanakan di area terbuka dengan memanfaatkan cahaya matahari. Data masukan yang diukur meliputi intensitas cahaya matahari, kelembapan udara, temperatur udara, kecepatan angin, dan temperature permukaan panel surya. Data keluaran yang diukur meliputi tegangan listrik, arus listrik, debit gas hidrogen, debit gas oksigen, temperature proses elektrolisis, dan keterangan kondisi cuaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dengan panel surya 100 Wp menghasilkan volume hidrogen lebih besar dan efisiensi lebih tinggi konversi energinya dengan panel 50 Wp.

Kata Kunci: panel surya 50 Wp, 100 Wp, GHK

Abstract

Hydrogen gas can be obtained from a hydrogen generator generated by solar panels. This study aims to obtain the performance of an integrated solar panel system with a dry hydrogen generator (GHK) in producing hydrogen gas. GHK has a design with an arrangement of HSS 316L type steel plates coated with rubber gaskets. The research methodology used is experimental, starting with the design of the GHK electrolysis system using two solar panels with a capacity of 50 Wp and 100 Wp as electrical energy suppliers. The test was carried out in an open area using sunlight. The input data measured included sunlight intensity, air humidity, air temperature, wind speed, and solar panel surface temperature. The output data measured included electrical voltage, electrical current, hydrogen gas discharge, oxygen gas discharge, electrolysis process temperature, and weather conditions. The results showed that the system with a 100 Wp solar panel produced a larger volume of hydrogen and had a higher efficiency of energy conversion than the 50 Wp panel.

Keywords: panel surya 50 Wp, 100 Wp, GHK

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan energi terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan industrialisasi. Selama ini, sebagian besar kebutuhan energi masih dipenuhi oleh bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam. Oleh karena itu, banyak negara berupaya melakukan transisi menuju energi terbarukan yang bersih dan berkelanjutan, salah satunya melalui pemanfaatan energi surya dan hidrogen [1]. Salah satu sumber energi alternatif yang kini menjadi perhatian global adalah hidrogen. Hidrogen yang diproduksi dari sumber energi terbarukan tanpa menghasilkan emisi karbon [2]. Produksi hidrogen melalui proses

elektrolisis air menggunakan energi listrik dari panel surya menjadi solusi menjanjikan karena Indonesia memiliki potensi energi surya yang besar [3]. Dalam sistem ini, kapasitas panel surya sangat menentukan jumlah energi listrik yang dihasilkan, sedangkan intensitas cahaya matahari memengaruhi fluktuasi daya keluaran panel. Keduanya secara langsung mempengaruhi kinerja generator hidrogen, terutama tipe generator hidrogen kering (GHK) yang menggunakan desain elektroda dengan ruang elektrolit terbatas sehingga lebih efisien dan minim risiko kebocoran dibandingkan generator hidrogen basah [4]. Penelitian yang dilakukan oleh Singh [5] menekankan bahwa variabilitas intensitas cahaya

menjadi salah satu kendala utama yang menurunkan stabilitas produksi hidrogen, sehingga diperlukan optimasi sistem penyimpanan dan pengaturan beban. Sementara itu, Gursoy [6] mengembangkan integrasi panel surya dengan generator hidrogen yang mampu beroperasi secara *off-grid*, dan hasilnya menunjukkan bahwa kapasitas panel yang lebih tinggi menghasilkan volume hidrogen yang lebih besar dan stabil.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh kapasitas panel surya (50 Wp dan 100 Wp) serta intensitas cahaya matahari terhadap kinerja generator hidrogen kering dalam produksi gas hidrogen. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran empiris mengenai kondisi operasional optimal sistem integrasi panel surya dan generator hidrogen kering sehingga dapat menjadi solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

2 LANDASAN TEORI

2.1 Hidrogen Sebagai Energi Baru

Hidrogen adalah unsur kimia paling ringan dan paling banyak ditemukan di Bumi, tetapi gas hidrogen tidak dapat diperoleh dari atmosfer. Gas hidrogen dapat diproduksi dalam beberapa ekstraksi diantaranya, reformasi sumber energi fosil (minyak bumi, batu bara, dan gas alam), gasifikasi biomassa, dan elektrolisis air. Hidrogen tidak menghasilkan emisi karbon saat digunakan, sehingga energi hidrogen adalah energi bersih dan hijau (ramah lingkungan) yang diprediksi sebagai bahan bakar masa depan [7]. Hidrogen berfungsi sebagai "pembawa energi" penting untuk listrik, karena hidrogen dapat disimpan, dipindahkan, dan diubah menjadi energi bentuk lain. Sebagai energi baru dan tidak terbarukan, hidrogen digunakan sebagai sumber energi dengan menggunakan teknologi, tetapi hidrogen tidak dapat diperbarui.

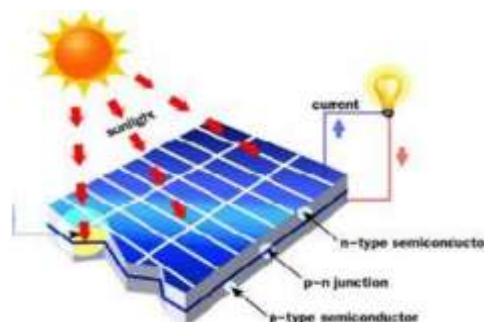
Hidrogen dalam fase gas memiliki massa jenis $0,0814 \text{ kg/m}^3$, titik lebur -13.947 K , titik didih $20,384 \text{ K}$, dan *Low Heating Value* (LHV) 121.019 kJ/kg [8]. Hidrogen (H_2) adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak beracun, dan mudah terbakar dalam kondisi normal [9].

Untuk memperoleh gas hidrogen yang tingkat kemurniannya tinggi dan pembangkit yang digunakan tidak menghasilkan emisi, maka proses elektrolisis air adalah pilihannya. Namun, metode elektrokimia tersebut memiliki kekurangan yaitu membutuhkan energi listrik yang besar untuk menghasilkan gas hidrogen yang banyak. Gas hidrogen yang diproduksi tanpa emisi dikenal

sebagai hidrogen hijau. Hidrogen hijau menggunakan pembangkit yang berasal dari sumber energi baru dan terbarukan (EBT). Salah satu sumber EBT adalah energi surya dengan panel surya sebagai teknologi konservasi dan konversi energi.

2.2 Panel Surya

Panel surya memproduksi listrik melalui efek fotovoltai, yaitu proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi cahaya matahari diserap oleh lapisan panel surya, yang kemudian memicu aliran arus listrik dalam arah berlawanan, sehingga menghasilkan daya listrik keluaran. Proses konversi energi pada panel surya, yaitu dari energi cahaya matahari menjadi energi listrik dijelaskan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 Panel Surya [10].

Pada gambar di atas tampak bahwa cahaya matahari memancar ke permukaan panel surya yang terbuat dari material semi konduktor (mengandung semi konduktor tipe-p dan semi konduktor tipe-n) dan menghasilkan listrik pada rangkaian tertutup.

2.2.1 Material Panel Surya

Panel surya polikristalin memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap suhu tinggi, meskipun tingkat efisiensinya sedikit lebih rendah dibandingkan panel monokristalin dalam kondisi cahaya dan suhu optimal. Stabilitas kinerja panel polikristalin pada suhu dan kelembapan tinggi menjadikannya opsi yang lebih sesuai untuk penggunaan energi surya di Indonesia, yang sering menghadapi kondisi lingkungan seperti itu [11].



Gambar 2 Panel Surya Polikristalin [12].

2.2.2 Konversi Energi pada Panel Surya

Efek fotovoltaiik terjadi saat foton dari cahaya matahari melepaskan elektron dalam material semi konduktor, sehingga menghasilkan arus listrik searah (DC). Rumus utama yang digunakan untuk menghitung daya masukan dan keluaran adalah sebagai berikut:

$$p_{pv,I} = I \cdot V \cdot A \quad (1)$$

Untuk daya listrik keluaran dari panel surya ($P_{pv,out}$) dihitung dari perkalian hasil pengukuran tegangan listrik (V) dengan arus listrik (I), yang ditunjukkan pada persamaan berikut [13].

$$P_{pv,O} = V \cdot I \quad (2)$$

2.3 Kinerja Panel Surya

Kinerja panel surya ditentukan oleh kemampuannya dalam mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaiik. Panel surya bekerja dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, seperti intensitas cahaya, temperatur, kelembaban udara, sudut datang sinar, dan kondisi permukaan panel. Efisiensi panel surya (η_{pv}) didefinisikan sebagai hasil perbandingan antara daya listrik keluaran ($P_{pv,out}$) terhadap daya listrik masukan ($P_{pv,in}$), yang dituliskan dalam persamaan berikut:

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

2.4 Generator Penghasil Gas Hidrogen

Generator penghasil gas hidrogen adalah alat yang digunakan untuk mengubah molekul air menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Terdapat 2 generator yaitu generator HHO dan generator hidrogen murni, sangat berbeda dari masing-masing prinsip kerja, komposisi gas yang dihasilkan, dan fungsinya. Sebagai energi

terbarukan generator hidrogen dapat diintegrasikan dengan panel surya.

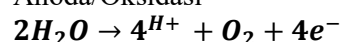
2.5 Generator Hidrogen

Generator hidrogen merupakan perangkat yang digunakan untuk menghasilkan gas hidrogen melalui proses elektrolisis air dengan bantuan energi listrik. Teknologi ini memiliki peran penting dalam mendukung transisi energi bersih karena hidrogen yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar ramah lingkungan tanpa menghasilkan emisi karbon. Berdasarkan prinsip kerjanya, generator hidrogen terbagi menjadi dua jenis, yaitu generator hidrogen basah dan generator hidrogen kering. Pada generator hidrogen basah, elektrolit berupa larutan cair digunakan secara langsung untuk memisahkan molekul air, sedangkan pada generator hidrogen kering, elektrolit ditahan dalam ruang sel dengan desain yang lebih kompak sehingga risiko kebocoran elektrolit dapat diminimalkan serta proses elektrolisis dapat berlangsung lebih stabil [14].

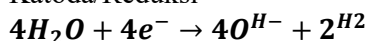
Penelitian terbaru menunjukkan bahwa integrasi generator hidrogen kering dengan sumber energi terbarukan, khususnya panel surya, mampu meningkatkan efisiensi sistem produksi hidrogen karena energi listrik yang dihasilkan berasal dari sumber yang berkelanjutan [5]. Panel surya berfungsi mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik yang selanjutnya digunakan untuk memisahkan molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen melalui proses elektrolisis. Dengan ketersediaan sumber daya surya yang melimpah, integrasi ini berpotensi menghasilkan hidrogen secara berkelanjutan untuk mendukung sistem energi hijau. penelitian oleh [15] menekankan bahwa integrasi energi terbarukan dengan sistem produksi hidrogen memerlukan optimasi dalam pengendalian beban dan penyimpanan energi, sehingga kinerja generator dapat lebih efisien dan stabil.

Hidrogen adalah salah satu senyawa dengan jumlah yang sangat banyak dan memiliki berat paling ringan. Dari segi produksi, sebagian besar hidrogen pada saat ini diproduksi dengan memanfaatkan bahan bakar fosil. Salah satu metode yang mudah untuk penelitian adalah metode elektrolisis air. Pada metode elektrolisis air, ada dua tipe sel yang biasa digunakan yaitu sel basah (*wet cell*) dan sel kering (*dry cell*) [16].

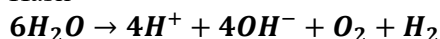
Anoda/Oksidasi



Katoda/Reduksi

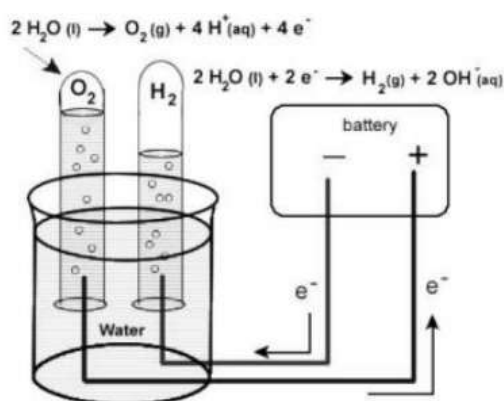


Hasil



2.5.1 Generator Hidrogen Basah (*Wett Cell*)

Sistem ini memanfaatkan kalium hidroksida (KOH) sebagai elektrolit untuk mendukung proses elektrolisis. Plat anoda dan katoda ditempatkan secara terpisah guna mencegah pencampuran gas yang dihasilkan [7]. Proses elektrolisis generator hidrogen basah dijelaskan pada gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3 Generator Hidrogen Basah [17].

Pada gambar di atas proses elektrolisis berasal dari internal yaitu katoda dan anoda sedangkan listrik berasal dari internal yaitu baterai.

2.5.2 Generator Hidrogen Kering (Dry Cell)

Sistem ini menggunakan kalium hidroksida (KOH) sebagai pendukung dalam proses elektrolisis. Untuk mencegah pencampuran antara gas hidrogen dan oksigen yang dihasilkan, sistem ini di rancang dengan pemisah antara oksigen dan hidrogen [16]. Gas yang dihasilkan kemudian disalurkan dan disimpan dalam tangki penyimpanan (*reservoir tank*) [7]. Generator hidrogen kering ditampilkan pada Gambar 4 dibawah ini.

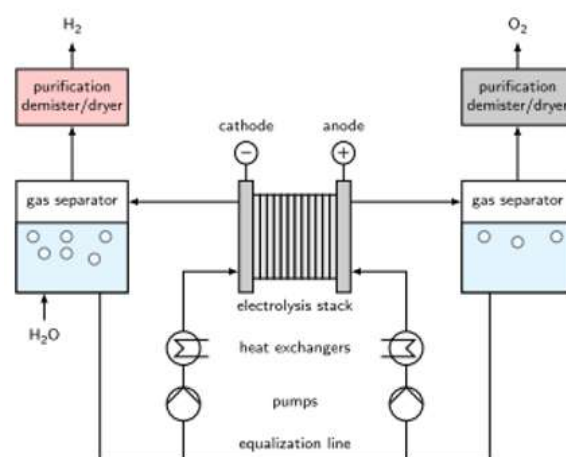
2.6 Generator Hidrogen Kering

Integrasi generator hidrogen kering (dry generator) dengan panel surya merupakan salah satu solusi inovatif untuk menghasilkan energi bersih. Panel surya berfungsi sebagai sumber listrik arus searah (DC) yang kemudian dialirkan ke dalam sel elektrolisis kering, sehingga air dapat terurai menjadi gas hidrogen dan oksigen tanpa memerlukan cairan elektrolit berlebih [4].

2.6.1 Konstruksi GHK

Generator sel hidrogen kering (GHK) terdiri dari pelat-pelat logam yang berfungsi sebagai elektroda dan dipisahkan oleh gasket. Larutan elektrolit hanya mengalir melalui celah sempit di antara pelat-pelat tersebut, bukan merendam seluruh permukaan elektroda. Berkat desain yang memungkinkan area kerja yang lebih stabil dan nyaman dari segi suhu, sistem ini menjadi lebih ringkas dan menawarkan efisiensi yang lebih tinggi [18]. Konstruksi GHK dapat dijelaskan pada gambar 4 sebagai berikut;

1. Elektroda katoda dan anoda)
2. Gasket pembatas
3. Reservoir elektrolit
4. Selang saluran gas



Gambar 4 Konstruksi GHK [19]

Pada Gambar 4 di atas menunjukkan konstruksi sistem generator hidrogen kering (GHK) yang bekerja berdasarkan prinsip elektrolisis air, serupa dengan sistem generator hidrogen basah, namun dengan desain ruang elektrolit yang lebih tertutup. Perbedaan utama sistem kering ini terletak pada posisi cairan elektrolit yang hanya berada di sela-sela pelat elektroda dan elektrolit hanya dialirkan bukan merendam seluruh bagian seperti pada sistem basah.

2.6.2 Konfersi Energi GHK

Hubungan. (η_{PV}) dibandingkan dengan daya listrik yang dihasilkan dengan panel surya ($P_{pv.o}$) dengan cahaya matahari yang diterima ($P_{pv.i}$). Secara sistematis, efisiensi ini diwakili sebagai rasio antara daya keluaran listrik terhadap daya masukan energi surya. Rumus untuk menghitungnya adalah sebagai berikut:

$$\eta_{GHK} = \frac{P_{GHK}}{P_{L,K}} \times 100\% \quad (4)$$

2.6.3 Kinerja GHK

GHK memiliki keunggulan dalam kemudahan penggunaan, efisiensi, dan stabilitas operasional. Desain modularnya memungkinkan penyesuaian kapasitas secara fleksibel serta menghasilkan panas yang lebih rendah. Meskipun demikian, biaya awal pembuatannya lebih tinggi dibandingkan GHB, dan elektroda yang digunakan perlu dilapisi secara khusus untuk melindungi dari kerusakan akibat elektrolit [20]. Kinerja GHK dapat dihitung dengan rumus :

$$P_{GHK} = \dot{m} \times LHV = \rho \times Q \times LHV \quad (5)$$

2.7 Integrasi Panel Surya dan GHK

2.7.1 Konversi Energi pada Integrasi Panel Surya dengan GHK

Panel surya mengubah radiasi cahaya matahari menjadi energi listrik, yang kemudian energi listriknya digunakan oleh GHK untuk menghasilkan gas oksigen dan hidrogen melalui proses elektrolisis, oleh karena itu, persamaan (2) menjadi:

$$P_{pv} \cdot O = PL, K \quad (6)$$

Untuk menghitung efisiensi dari dua sistem terpadu adalah mengalikan masing-masing efisiensi tersebut. Dalam hal ini persamaan (3) dikalikan dengan persamaan (6) dan menggunakan persamaan (5) yang hasilnya adalah persamaan berikut.

$$\eta_{PV+GHK} = \frac{P_{GHK}}{P_{pv,in}} \times 100\% \quad (7)$$

2.7.2 Kinerja Integrasi Panel Surya dan GHK

Elektroda berperan sebagai media penghantar arus listrik dari sumber tegangan menuju air yang akan melalui proses elektrolisis. Dalam elektrolisis dengan arus searah (DC), elektroda terdiri dari dua kutub, yaitu kutub positif yang disebut anoda dan kutub negatif yang disebut katoda [21]. Hal ini terutama berlaku pada penggunaan dengan daya input terbatas, seperti panel surya berkapasitas 50 WP dan 100 WP [22].

2.7 Generator Hidrogen Bertenaga Panel Surya

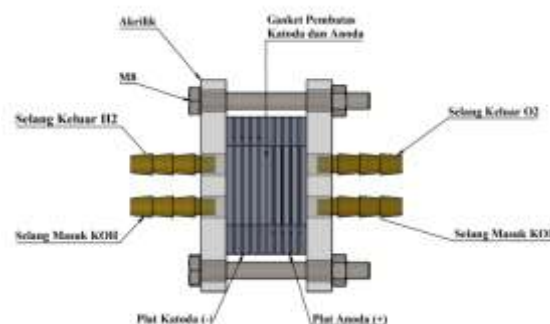
Pemanfaatan panel surya pada sistem generator hidrogen memiliki berbagai keunggulan, terutama karena tidak menghasilkan emisi karbon dan dapat beroperasi secara mandiri (*off-grid*). Efisiensi konversi energi pada sistem ini

dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, suhu lingkungan, serta kinerja panel surya dan sel elektrolisis [23]. Generator hidrogen berfungsi mengubah air menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) melalui proses elektrolisis yang menggunakan energi listrik. Dalam sistem energi terbarukan, proses tersebut dapat dijalankan dengan bantuan panel surya fotovoltaik (PV) yang mengonversi sinar matahari menjadi listrik arus searah (DC) [9]. Nilai efisiensi ini menjadi indikator utama dalam analisis kelayakan pemanfaatan energi surya untuk produksi hidrogen, karena mencerminkan performa sistem secara keseluruhan [24].

3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Desain penelitian integrasi panel surya berdaya 50Wp dan 100Wp dengan GHK adalah penelitian kuantitatif. Penelitian ini membutuhkan dua alat sebagai sistem, dimana ada variable masukan, proses konversi energi di dalam sistem, dan variabel keluaran. Oleh karena itu, untuk memahami desain penelitian digambarkan kedua sistem (PV 50Wp dan GHK, PV 100Wp dan GHK). Desain dari GHK diperlihatkan pada gambar

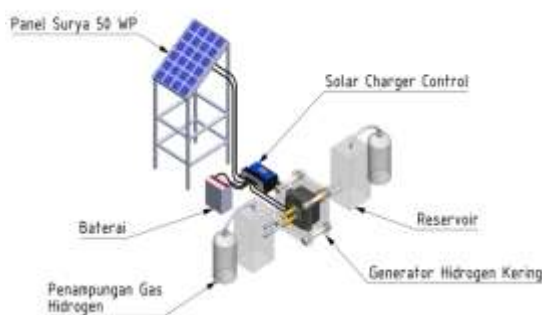


Gambar 5 Generator Hidrogen Kering

Gambar di atas tidak proposional dengan dimensi alat yang sebenarnya hal ini untuk memperjelas bagian yang berukuran kecil, tetapi penting untuk diberikan keterangan agar mudah dipahami. Konstruksi panel surya dengan GHK digambarkan pada gambar 6 sebagai berikut. Pada gambar diatas GHK larutan elektrolit dialirkan ke dalam elektroda yang hanya Sebagian permukaanya dialiri elektrolit yang masuk dedalam sela-sela elektroda.



Gambar 6 Skema alat penelitian GHK+PV 100 WP



Gambar 7 Skema alat penelitian GHK+PV 50 WP

3.2 Variabel Penelitian

Variabel Bebas:

1. Intensitas caya matahari (W/m^2)
2. Kapasitas penel surya (50 Wp dan 100 Wp)

Variabel Tergantung:

1. Volume gas hidrogen yang dihasilkan (Liter/menit)
2. Efisiensi sistem terpadu panel surya-GHK (%)

Variabel Kontrol:

1. Konsentrasi dan volume elektrolit (jika digunakan)
2. Waktu operasi sistem
3. Luas elektroda
4. Suhu lingkungan

3.3 Metode Pengambilan dan Pengumpulan Data

Pengambilan dan pengumpulan data dilakukan di Fakultas Teknologi Industri dan Informatika (FTII) UHAMKA dengan mengukur beberapa parameter seperti;

1. Intensitas cahaya matahari
2. Kelembapan udara
3. Temperature
4. Kecepatan angin
5. Tegangan (*Voltage*)
6. Arus Listrik yang dihasilkan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini Adalah metode eksperimental

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Hasil penelitan mendapatkan data masukan dan keluaran. Data yang dikumpulkan meliputi intensitas cahaya matahari (I_v), kelembaban udara relatif (RH), kecepatan angin (vm/s), suhu lingkungan sekitar (T_{∞}), suhu pada generator hidrogen kering ($^{\circ}C$), suhu panel surya ($^{\circ}C$), volume gas hidrogen yang dihasilkan ($QH_2[L/menit]$), serta nilai tegangan dari masing-

Gambar 8 Panel Surya 50 Wp dan 100 Wp

masing panel surya (V) dan arus listrik (I). Semua data kuantitatif diatas diperoleh dari pengukuran variabel pada alat penelitian ditunjukan pada gambar 8 di bawah ini.



Gambar 9 Generator Hidrogen Kering (GHK)

Gambar 8 dan gambar 9 menunjukan alat penelitian secara terpisah. Mengingat perbedaan dimensi yang besar antara panel surya dengan generator hidrogen, maka susunan alat integrasi panel surya dengan generator hidrogen tidak ditunjukan secara utuh. Oleh sebab itu, gambar asli dari alat dibuat masing-masing seperti yang ada pada Gambar 6 dan Gambar 7

4.1.1 Integrasi Panel Surya 50 Wp dengan Generator Kering

Data diperoleh berupa variabel masukan dan keluaran pada generator hidrogen kering. Data rata-rata daya yang masuk selama periode pengujian disajikan pada table

Tabel 1 Integrasi Panel Surya dan GHK

No.	Waktu	P		T		P _{eff}		T _{in}		T _{out}		P _{in} (W)	P _{out} (W)	
		P _{in} (W)	P _{out} (W)	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	P _{eff} (%)	P _{eff} (%)	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)					
1	09.00	869,1	0,325	27,3	35,3	0,8	77%	12,37	1,36	34,25	0,3	0,3	0,0004	121,019
2	09.30	869,0	0,325	27,3	36,4	0,9	77%	12,40	2,02	33,95	0,3	0,3	0,0004	121,019
3	10.00	941,7	0,325	27,3	36,8	2,0	77%	12,48	2,08	33,96	1,0	0,3	0,0004	121,019
4	10.30	961,8	0,325	27,3	36,8	2,1	77%	12,49	2,04	33,48	1,0	0,3	0,0004	121,019
5	11.00	966,6	0,325	28,3	36,3	2,4	76%	12,50	2,20	33,59	1,0	0,3	0,0004	121,019
6	11.30	1031,4	0,325	28,3	36,2	2,5	76%	12,65	2,43	30,74	1,0	0,3	0,0004	121,019
7	12.00	1044,7	0,325	28,7	33,7	2,9	69%	12,75	2,57	31,77	1,0	0,3	0,0004	121,019
8	12.30	934,1	0,325	29,0	33,4	2,0	67%	12,57	2,34	35,47	1,0	0,3	0,0004	121,019
9	13.00	1034,1	0,325	29,3	32,4	3,2	67%	12,76	2,44	31,18	1,0	0,3	0,0004	121,019
10	13.30	1032,3	0,325	29,4	49,9	2,9	67%	12,81	2,36	29,46	1,5	1,0	0,0004	121,019
11	14.00	1030,8	0,325	29,6	33,6	2,1	67%	12,76	2,34	39,93	2,0	1,5	0,0004	121,019
12	14.30	1003,4	0,325	29,8	41,9	3,3	66%	12,88	2,30	37,90	1,5	1,0	0,0004	121,019
13	15.00	977,8	0,325	29,9	40,9	1,8	65%	12,85	2,03	36,96	1,0	0,3	0,0004	121,019

Tabel hasil pengujian kinerja Generator Hidrogen Kering (GHK) yang diintegrasikan dengan panel surya 50 Wp menunjukkan bahwa pengamatan dilakukan dari pukul 09.00 WIB sampai 15.00 WIB Hasil pengamatan menunjukkan bahwa intensitas cahaya matahari berkisar antara 869,1 W/m² dan 1044,7 W/m², dengan titik tertinggi pada pukul 12.00 WIB, saat cahaya matahari mencapai puncaknya. Peningkatan tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya diikuti oleh peningkatan intensitas cahaya ini. Pada jam 12.00 WIB, tegangan tertinggi mencapai 12,75 volt dan arus tertinggi mencapai 2,57 ampere.

4.1.2 Integrasi panel surya 100 Wp dengan generator hidrogen kering

Pengujian integrasi dilakukan antara panel surya berkapasitas 100 Wp dan generator hidrogen kering untuk menilai kinerja sistem secara keseluruhan. Daya masukan yang diterima sistem dicatat secara cermat. Hasil pengukuran ini kemudian dirangkum dan disajikan pada tabel.

Tabel 2 Integrasi panel surya 100 Wp dan GHK

No.	Waktu	P (W)		T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	P _{eff} (%)	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	P _{eff} (%)	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	
		P _{in} (W)	P _{out} (W)											
1	09.00	869,1	0,6	27,3	35,3	0,8	77%	14,05	1,50	30,23	1,0	0,3	0,0004	121,019
2	09.30	869,0	0,6	27,3	36,7	0,9	77%	14,08	1,60	30,89	1,0	0,3	0,0004	121,019
3	10.00	941,7	0,6	27,3	36,8	2,0	77%	14,15	1,60	31,07	1,5	1,0	0,0004	121,019
4	10.30	961,8	0,6	27,9	34,4	2,1	77%	14,12	1,68	31,80	1,5	1,0	0,0004	121,019
5	11.00	966,6	0,6	28,3	36,1	2,4	76%	14,40	1,80	33,40	1,0	1,5	0,0004	121,019
6	11.30	1031,4	0,6	28,5	35,5	2,5	76%	14,70	1,89	37,10	1,5	2,0	0,0004	121,019
7	12.00	1044,7	0,6	28,7	33,5	2,9	69%	14,76	1,94	39,15	1,0	1,5	0,0004	121,019
8	12.30	934,1	0,6	29,0	33,7	2,0	67%	14,62	1,83	32,70	1,5	1,0	0,0004	121,019
9	13.00	1034,1	0,6	29,3	32,1	3,2	67%	14,69	1,94	37,80	1,0	1,5	0,0004	121,019
10	13.30	1032,3	0,6	29,4	50,1	2,9	67%	14,63	1,97	38,00	1,5	1,0	0,0004	121,019
11	14.00	1030,8	0,6	29,6	34,0	2,1	67%	14,70	1,95	38,37	1,5	1,0	0,0004	121,019
12	14.30	1003,4	0,6	29,8	34,4	3,3	66%	14,66	1,87	36,80	1,0	1,5	0,0004	121,019
13	15.00	977,8	0,6	29,9	30,4	1,8	65%	14,56	1,70	33,94	1,5	1,0	0,0004	121,019

Tabel hasil pengujian kinerja Generator Hidrogen Kering (GHK) yang diintegrasikan

dengan panel surya 100 Wp menunjukkan bahwa pengamatan dilakukan dari pukul 09.00 WIB sampai 15.00 WIB Hasil pengamatan menunjukkan bahwa intensitas cahaya matahari berkisar antara 869,1 W/m² dan 1044,7 W/m², dengan titik tertinggi pada pukul 12.00 WIB, saat cahaya matahari mencapai puncaknya. Peningkatan tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya diikuti oleh peningkatan intensitas cahaya ini. Pada jam 12.00 WIB, tegangan tertinggi mencapai 14,76 volt dan arus tertinggi mencapai 3,94 ampere.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap efisiensi PV 50 Wp dan 100 Wp+GHK

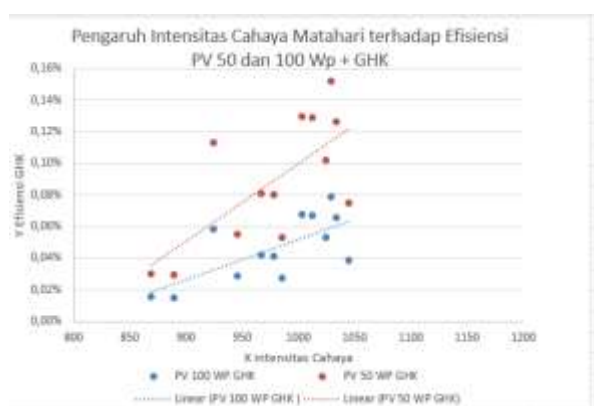
Intensitas cahaya matahari adalah hal penting yang memengaruhi bagaimana sistem fotovoltaik (PV) bekerja dan berapa efisien sistem tersebut. Dalam sistem yang menggabungkan panel surya 50 Wp dan 100 Wp dengan generator hidrogen kering, perubahan intensitas sinar matahari langsung memengaruhi banyak hal. Pertama, jumlah listrik yang dihasilkan oleh panel surya bergantung pada berapa besar cahaya yang diterimanya. Kedua, volume gas hidrogen yang dihasilkan dari proses elektrolisis air juga tergantung pada intensitas cahaya ini.

Jika cahaya matahari semakin terang, panel surya menerima lebih banyak energi, sehingga arus listrik yang dihasilkan meningkat dan daya yang dihasilkan oleh panel juga naik. Dengan daya yang lebih besar, energi yang dialirkan ke generator hidrogen juga semakin banyak, sehingga laju produksi gas hidrogen meningkat. Namun, jika cahaya matahari berkurang, energi yang dihasilkan oleh panel surya menurun, sehingga seluruh sistem menjadi kurang efisien.

Tabel 3 Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap efisiensi PV 50 Wp+GHK dan PV 100 Wp+GHK

No.	Pukul	I [W/m ²]	η	
			PV 100 Wp + GHK	PV 50 Wp + GHK
1	09.00	869,1	0,02%	0,03%
2	09.30	889	0,02%	0,03%
3	10.00	945,7	0,03%	0,06%
4	10.30	985,8	0,03%	0,05%
5	11.00	966,6	0,04%	0,08%
6	11.30	1033,4	0,07%	0,13%
7	12.00	1044,7	0,04%	0,07%
8	12.30	924,1	0,06%	0,11%
9	13.00	1024,10	0,05%	0,10%
10	13.30	1012,3	0,07%	0,13%
11	14.00	1028,8	0,08%	0,15%
12	14.30	1003,40	0,07%	0,13%
13	15.00	977,8	0,04%	0,08%
Maksimum		1044,7	0,08%	0,15%
Minimum		869,1	0,02%	0,03%
Rata-rata		977,3	0,05%	0,09%

Dari tabel terlihat bahwa intensitas cahaya matahari bervariasi dari sekitar 869,1 W/m² hingga 1044,7 W/m². Efisiensi kedua sistem sangat kecil dalam persentase, dengan PV 50 Wp + GHK berkisar antara 0,03% hingga 0,15%, dan PV 100 Wp + GHK berkisar antara 0,02% hingga 0,08%. Hubungan yang dapat ditarik adalah bahwa peningkatan intensitas cahaya matahari cenderung meningkatkan efisiensi kedua sistem panel surya tersebut, meskipun peningkatannya relatif terbatas secara presentase. Sistem PV 50 Wp + GHK umumnya menunjukkan efisiensi yang sedikit lebih tinggi dibanding PV 100 Wp + GHK.



Gambar 8 Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap efisiensi PV 50 dan 100 Wp + GHK

Hubungan antara tingkat cahaya matahari dan kinerja sistem terlihat jelas pada grafik di Gambar 8. Grafik tersebut menunjukkan adanya peningkatan efisiensi yang seiring dengan naiknya intensitas radiasi yang diterima oleh permukaan panel surya. Daya listrik yang dihasilkan oleh panel juga meningkat. Peningkatan daya listrik ini berdampak langsung terhadap proses elektrolisis di

generator hidrogen, sehingga volume hidrogen yang dihasilkan semakin besar.

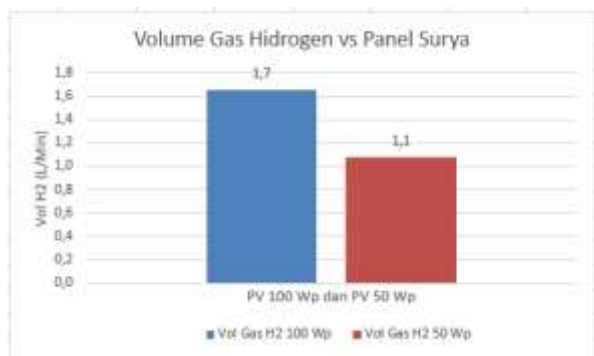
Jika dibandingkan, perbedaan terlihat dari kemiringan garis tren antara dua jenis generator, yaitu antara panel surya 50 Wp dan 100 Wp dengan generator hidrogen kering. Dikarenakan intensitas cahaya matahari tidak terlalu maksimal hasil dari grafik menunjukkan efisiensi panel surya 50 Wp lebih tinggi dibanding panel surya 100 Wp, dalam hal ini menunjukkan bahwa sistem bekerja efektif meskipun terdapat sedikit variasi karena perubahan radiasi dan suhu panel [20].

4.2.2 Volume gas hidrogen yang dihasilkan pada GHK

Tabel 4 Volume gas hidrogen yang dihasilkan

No	Waktu	QH2 (L/min)	QH2 (L/min)
1	09.00	0,5	1
2	09.30	0,5	1
3	10.00	1	1,5
4	10.30	1	1,5
5	11.00	1	2
6	11.30	1	2,5
7	12.00	1	2
8	12.30	1	1,5
9	13.00	1	2
10	13.30	1,5	1,5
11	14.00	2	1,5
12	14.30	1,5	2
13	15.00	1	1,5
Maksimum		2,0	2,5
Minimum		0,5	1,0
Rata-rata		1,1	1,7

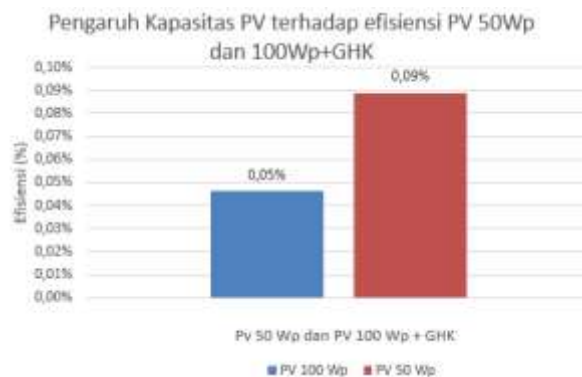
Berdasarkan data di Tabel 4, jumlah gas hidrogen yang dihasilkan meningkat seiring berjalannya waktu dan semakin terangnya sinar matahari. Nilai tertinggi dicapai sebesar 2,5 liter per menit pada jam 11.30–12.30, sedangkan nilai terendah adalah 0,5 liter per menit pada jam 09.00. Rata-rata produksi hidrogen dari panel surya 50Wp adalah 1,1 liter per menit dan dari panel surya 100Wp adalah 1,7 liter per menit dengan efisiensi rata-rata sebesar 1,4. Hal ini menunjukkan bahwa proses elektrolisis menggunakan energi surya bekerja paling baik saat intensitas cahaya matahari terbesar pada siang hari, dan efisiensinya menurun di pagi hari serta sore hari.



Gambar 9 Volume panel surya vs gas hidrogen

Pada Gambar 8, panel surya 50Wp menghasilkan gas hidrogen sebanyak 1,1 liter per menit, sedangkan panel surya 100 Wp menghasilkan 1,7 liter per menit. Hasil ini menunjukkan bahwa panel surya 100 wp sedikit lebih baik dalam memproduksi gas hidrogen dibandingkan panel surya 50Wp. Jadi, semakin besar daya yang dihasilkan panel surya dan semakin efisien sistem elektrolisis yang digunakan, maka jumlah gas hidrogen yang dihasilkan juga akan semakin banyak.

4.2.3 Pengaruh kapasitas PV terhadap efisiensi PV 50Wp dan 100Wp+GHK Pembahasan ini bertujuan untuk menguraikan pengaruh kapasitas panel surya 50 Wp dan 100 Wp terhadap efisiensi sistem yang dipadukan generator hidrogen kering. Analisis dilakukan untuk menilai sejauh mana kemampuan panel surya dengan kapasitas tertentu dalam menyediakan energi listrik yang stabil bagi proses elektrolisis. Kapasitas panel surya memiliki peranan penting karena menentukan besar daya input yang dapat dikonversi menjadi energi kimia melalui proses pemisahan molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen. Selain itu, bagian ini juga membahas perbedaan efisiensi yang dihasilkan oleh masing-masing sistem pada kondisi kapasitas panel yang sama. Berdasarkan hasil pengamatan dan data pengukuran, dapat dianalisis bagaimana karakteristik berbeda antara panel surya 50 wp dan panel surya 100 Wp memengaruhi efisiensi konversi energi. Gambar 10 menampilkan hubungan antara kapasitas panel surya terhadap efisiensi sistem PV 50 Wp+GHK dan PV 100 Wp+GHK.



Gambar 10 Pengaruh kapasitas PV terhadap efisiensi PV 50Wp dan 100Wp+GHK

Gambar 10 menampilkan perbandingan pengaruh kapasitas panel surya 50 Wp dan 100 Wp terhadap efisiensi sistem PV+GHK. Berdasarkan hasil pengujian, sistem PV 50 Wp + GHK memiliki efisiensi rata-rata sebesar 0,09%, sedangkan sistem PV 100 Wp + GHK hanya mencapai 0,05%. Meskipun keduanya menggunakan kapasitas panel surya yang sama, efisiensi konversi energi pada sistem PV+GHK terbukti lebih tinggi dibandingkan PV+GHK. Sistem PV+GHK tidak dilengkapi media pendingin, sehingga peningkatan suhu akibat paparan radiasi matahari menyebabkan efisiensi menurun akibat bertambahnya hambatan internal pada sel elektrolit [20]. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa panel surya berkapasitas 50 Wp mampu memberikan kinerja efisien. Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan generator hidrogen kering menggunakan panel surya 50 Wp lebih efisien karena arus output dari panel surya lebih stabil dan yang sangat mempengaruhi efisiensi adalah intensitas cahaya, kelembapan udara, dan kecepatan angin [23].

5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari perhitungan, pengukuran dan pengujian serta analisis data, dapat disimpulkan bahwa intensitas cahaya matahari berpengaruh langsung terhadap daya keluaran panel surya. Pada sistem GHK dengan panel surya 50Wp intensitas maksimum sebesar 1044,7 W/m² menghasilkan tegangan 12,75 volt, arus 2,57 Ampere, dan volume gas 2,0 L/min dengan rata-rata efisiensi 0,09%. Sedangkan pada sistem GHK dengan panel surya 100Wp intensitas yang sama, diperoleh tegangan 14,76 Volt, arus 3,94 Ampere, dan volume gas 2,5 L/min dengan rata-rata efisiensi 0,05%. Pada intensitas minimum 869,1 L/min, semakin tinggi intensitas radiasi matahari yang diterima panel surya, semakin besar daya

listrik yang dihasilkan, sehingga laju produksi gas hidrogen meningkat. Namun, saat suhu lingkungan dan suhu panel meningkat secara berlebihan, efisiensi sistem mengalami penurunan akibat meningkatnya resistansi internal pada sel elektrolit.

REFERENSI

- [1] S. M. Bashir, M. A. Nadeem, M. Al-Oufi, M. Al-Hakami, T. T. Isimjan, and H. Idriss, "Sixteen Percent Solar-to-Hydrogen Efficiency Using a Power-Matched Alkaline Electrolyzer and a High Concentrated Solar Cell: Effect of Operating Parameters," *ACS Omega*, vol. 5, no. 18, pp. 10510–10518, 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c00749.
- [2] K. Zeng and D. Zhang, "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 307–326, 2020, doi: 10.1016/j.pecs.2009.11.002.
- [3] L. Cozzi, *World Energy Outlook*. Paris: International Energy Agency, 2022.
- [4] A. M. Mousa, H. A. A. Sayed, K. A. M. Ali, N. S. Elkaoud, and W. A. E. Mahmoud, "Energy-conversion efficiency for producing oxy-hydrogen gas using a simple generator based on water electrolysis," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–13, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-73534-1.
- [5] M. Gül and E. Akyüz, "Hydrogen generation from a small-scale solar photovoltaic thermal (PV/T) electrolyzer system: numerical model and experimental verification," *Energies*, vol. 13, no. 11, 2020, doi: 10.3390/en13112997.
- [6] M. Gursoy and I. Dincer, "A novel solar energy-based hydrogen generator integrated with battery storage," *Energy*, vol. 330, no. May, p. 136824, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.136824.
- [7] R. Rauf, *Energi indonesia Masalah dan Potensi Pembangkit Listrik Dalam Menghujudkan Kemandirian Energi*. 2023.
- [8] A. A. Levikhin and Boryaev, "Physical properties and thermodynamic characteristics of hydrogen," *Heliyon*, vol. 10, no. 17, p. e36414, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36414.
- [9] N. Hidayah, "Produksi Gas Oxyhydrogen (Hho) Untuk Generator Set Dengan Sumber Energi Surya," *SENTRINOV*, vol. 9, no. 1, pp. 557–566, 2023.
- [10] M. G. Fathurrachman, N. Busaeri, and N. Hiron, "Analisis Integrasi Pembangkit Listrik Hybrid Di Wilayah Daerah Pantai Tasikmalaya Selatan Menggunakan Aplikasi HOMER," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 03, no. 02, pp. 62–70, 2022.
- [11] Aldo, "Jurnal Teknik Indonesia," vol. x, pp. 1–11, 2025.
- [12] Arbain, "Desain Sistem Panel Surya Fleksibel Dengan Peningkatan Output Konversi," 2023.
- [13] Efendi, "Rancang Bangun Monitoring Elektrolisis Air Berbasis Arduino Uno Dan Kontrol Tegangan Buck Converter," *Braz Dent J.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–12, 2022.
- [14] M. E. Şahin, "An Overview of Different Water Electrolyzer Types for Hydrogen Production," *Energies*, vol. 17, no. 19, 2024, doi: 10.3390/en17194944.
- [15] W. Liu *et al.*, "Optimization and Control Technologies forRenewable-Dominated Hydrogen-BlendedIntegrated Gas-Electricity System: A Review," pp. 1–27, 2025.
- [16] R. Al Hidayat, Farras, V. Firmansyah, S. A. Ersanto, and A. F. Lakasana, "Capstone Design Solar Powered Water Electrolysis," no. 17524063, pp. 1–45, 2022.
- [17] M. S. Hasan and W. Widayat, "Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 1, pp. 38–48, Mar. 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13374.
- [18] Y. Budiman, A., Yerizam, M., & Bow, "Design of Dry Cell HHO Generator

- using NaCl Solution for Hydrogen Production.” vol. Vol 8, pp. 8–15, 2022.
- [19] J. Brauns and T. Turek, “Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review,” *Processes*, vol. 8, no. 2, 2020, doi: 10.3390/pr8020248.
- [20] D. Węcel, M. Jurczyk, W. Uchman, and A. Skorek-Osikowska, “Investigation on system for renewable electricity storage in small scale integrating photovoltaics, batteries, and hydrogen generator,” *Energies*, vol. 13, no. 22, 2020, doi: 10.3390/en13226039.
- [21] N. Hidayah, “Kaji Eksperimen Pemanfaatan Energi Solar Cell Pada Proses Produksi Gas Oxyhydrogen (Hho),” *Dr. Diss. Politek. Negeri ujung Pandang*, pp. 1–120, 2023.
- [22] M. Benganem *et al.*, “Hydrogen Production Methods Based on Solar and Wind Energy: A Review,” *Energies*, vol. 16, no. 2, 2023, doi: 10.3390/en16020757.
- [23] Y. Klistafani, A. Rahmadania, and W. I. Pratiwi, “Kaji Eksperimen Pengaruh Kuat Medan Magnet Terhadap Efisiensi Produksi Gas Oxyhydrogen (HHO) Pada Generator HHO Tipe Kering,” vol. 22, no. 2, pp. 344–350, 2024.