

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Dalam pelaksanaan penyusunan proposal skripsi ini dengan adanya penelitian terlebih dahulu sehingga dapat menjadikan referensi bagi penulis dalam menyusun proposal skripsi tersebut, termasuk masalah rancang bangun prototipe green hydrogen plant yang merupakan salah satu inovasi yang ramah lingkungan.

Oleh karena itu, penelitian yang terlebih dahulu akan menjadi sangat penting sebagai bahan analisis dan pembandingan dalam penelitian ini, beberapa penelitian terkait pembahasan proposal skripsi tersebut baik dalam bentuk artikel dan jurnal dapat dikemukakan sebagai berikut:

1. (Parman et al., 2024), Dalam penelitiannya yang berjudul “Desain Sistem Hidrogen Hijau Dengan Sumber Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Lombok,” mengembangkan sebuah studi kelayakan teknis menggunakan simulasi MATLAB Simulink. Studi ini merancang sistem PLTS 2,33 MWp untuk elektroliser jenis Proton Exchange Membrane (PEM) berdaya 2MW, yang diproyeksikan mampu menghasilkan 121.391 kg hidrogen per tahun. Penelitian ini menjadi acuan penting dalam perancangan spesifikasi dan perhitungan kebutuhan daya PLTS untuk prototipe yang akan dibangun.
2. (Pambudi, 2025), Dalam penelitiannya yang berjudul “Perancangan PLTS untuk Menyuplai Daya pada Proses Elektrolisis dalam Kebutuhan Hidrogen,” memiliki fokus utama pada perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang didedikasikan untuk memasok daya listrik ke generator HHO (Hidrogen-Hidroksida) untuk kebutuhan produksi hidrogen. Hasil eksperimen dari studi ini menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan pada generator HHO, di mana laju produksi gas berhasil ditingkatkan secara substansial, yaitu dari 0,356 m/s menjadi 2,754 m/s dalam periode pengujian 22 menit. Peningkatan ini dicapai sambil mempertahankan parameter tegangan dan arus listrik dalam batas operasional yang aman. Secara kontribusi, penelitian ini menyediakan referensi desain PLTS yang praktis untuk pengembangan sistem prototipe, termasuk detail penting mengenai implementasi teknologi *Maximum Power Tracking* (MPPT).

3. (Abdullah, 2020), Dalam penelitiannya yang berjudul “Analisis Elektrolisis pada Sistem Produksi Gas Hidrogen,” melakukan pengujian eksperimental menggunakan panel surya dan baterai untuk memproduksi gas hidrogen. Hasil penelitian ini menunjukkan laju produksi maksimum sebesar 76,92 mL/menit dan membuktikan bahwa penggunaan elektrolit KOH lebih efisien dibandingkan NaCl. Studi ini memberikan data empiris dan perbandingan elektrolit yang sangat berguna sebagai dasar pengujian.
4. (Hutagulung et al., 2022), Dalam penelitiannya yang berjudul “Studi Eksperimental Energi Bayu Sebagai Energi Hijau Untuk Produksi Gas Hidrogen Melalui Elektrolisis Dengan Elektroda SS 316,” mengkaji produksi hidrogen menggunakan energi angin yang dikonversi oleh turbin. Hasilnya, efisiensi sistem tertinggi yang didapatkan adalah 7,37%. Penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan angin yang tinggi dan fluktuatif justru menghasilkan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan kecepatan angin yang stabil. Hal ini memberikan wawasan tentang tantangan fluktuasi sumber energi terbarukan terhadap efisiensi elektroliser.
5. (Hasan & Widayat, 2022), Dalam penelitiannya yang berjudul “Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia,” membahas potensi besar energi surya dan angin di Indonesia untuk produksi hidrogen melalui elektrolisis. Penelitian ini juga mengemukakan bahwa potensi air laut yang melimpah di Indonesia dapat digunakan sebagai bahan baku substitusi air tawar, dan kandungan natrium klorida (NaCl) di dalamnya dapat berperan sebagai katalis alami.
6. (Safarudin, 2023), Dalam penelitiannya yang berjudul “Eksplorasi Potensi Energi Hidrogen di Sektor Industri,” menganalisis potensi hidrogen sebagai solusi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca di sektor industri. Studi ini mengidentifikasi bahwa penerapan hidrogen dapat mempercepat transisi menuju industri berkelanjutan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Penelitian ini memberikan landasan kontekstual yang kuat untuk relevansi proyek dalam skala industri.
7. (Dewi et al., 2023), Dalam dokumen “Indonesia Hidrogen Roadmap,” memaparkan visi nasional Indonesia untuk pengembangan hidrogen hijau dalam mencapai target *net zero emission* (NZE) 2060. Dokumen ini menargetkan peningkatan kapasitas

pembangkitan hidrogen dari 328 MW pada 2031-2035 hingga 52 GW pada 2051-2060. Studi ini menunjukkan bahwa penelitian sejalan dengan agenda strategis pemerintah untuk transisi energi.

8. (Syafutra et al., 2022), Dalam penelitiannya yang berjudul “Perancangan Generator HHO Untuk Mengubah Air Menjadi Bahan Bakar Menggunakan Elektroda Grafit dan Katalis NaOH dengan Metode Elektrolisis,” menunjukkan efisiensi tertinggi generator HHO sebesar 63,95% dicapai pada konsentrasi katalis NaOH 20%.
9. (Nugroho et al., 2021), Dalam penelitiannya yang berjudul “Desain Alat Elektrolisa Hidrogen Menggunakan Elektroda *Stainless Steel*,” mengembangkan alat elektrolisis dengan elektroda SS 304 dan katalis NaOH 5 mol/L, yang menghasilkan volume hidrogen 432 ml/jam pada tegangan 3 V.
10. (Rimbawati et al., 2021), Dalam penelitiannya yang berjudul “Pengujian Air Bersih Menjadi Hidrogen Untuk Energi Alternatif Dengan Menggunakan Arduino,” menghasilkan gas hidrogen menggunakan sistem kontrol Arduino dengan elektroda *Stainless Steel* dan katalis Na₂CO₃. Hasil pengujian menunjukkan volume tekanan gas sebesar 30.22 Kpa dalam 2 menit percobaan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1. *Green Hydrogen* (Hidrogen Hijau)



Gambar 2. 1 *Green Hydrogen*

(<https://share.google/images/XLFj0a3VGygnUbXm>)

Hidrogen dipandang sebagai sumber energi bersih yang prospektif dan terus dikembangkan karena sifatnya yang ramah lingkungan dan bebas emisi karbon saat dimanfaatkan. Pada suhu dan tekanan standar, hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, bersifat nonlogam, bervalensi tunggal, dan merupakan gas diatomik yang sangat mudah terbakar. Dengan massa atom 1,00794 amu, hidrogen adalah unsur teringan di dunia (Alfani, 2021). Secara spesifik, hidrogen hijau (*green hydrogen*) diproduksi melalui proses elektrolisis air yang dayanya disuplai oleh energi listrik terbarukan, seperti yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) (R, 2025). Energi hidrogen memiliki karakteristik ramah lingkungan dan dapat dihasilkan melalui berbagai metode, termasuk elektrolisis air dan pemrosesan bahan bakar fosil dengan teknologi pemisah karbon. Penerapan energi hidrogen dapat mempercepat transisi menuju industri berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan menciptakan peluang baru untuk pertumbuhan ekonomi yang berbasis pada energi bersih (Safarudin, 2023). Produksi hidrogen hijau yang dihasilkan melalui pemanfaatan sumber energi terbarukan, seperti dari sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menghadirkan peluang signifikan untuk dekarbonisasi lintas sektor dan menjadi solusi krusial dalam menghadapi krisis perubahan iklim (Parman et al., 2024).

Hidrogen diakui sebagai sumber energi bersih vital yang berpotensi signifikan dalam mengurangi emisi karbon dan mencapai target *Net Zero Emission* (NZE) nasional. Pemerintah Indonesia telah menyusun peta jalan strategis untuk pengembangan hidrogen

hijau di sektor energi, yang direncanakan dimulai secara bertahap pada tahun 2031 dan diperkirakan akan mengalami peningkatan pesat pasca 2050. Peningkatan kapasitas pembangkitan hidrogen akan melonjak drastis, dari hanya 328 MW pada periode 2031-2035 dan 332 MW pada 2036-2040, menjadi 9 GW pada 2041-2050, dan puncaknya mencapai 52 GE antara tahun 2051 hingga 2060. Untuk mengurangi jejak karbonnya, Indonesia menetapkan visi memanfaatkan hidrogen hijau bersama dengan amonia dan teknologi penangkapan serta penyimpanan karbon (CCS), dengan target penggunaan hidrogen sebagai energi alternatif utama bagi sektor transportasi, industri, dan rumah tangga. Guna merealisasikan target ambisius pengurangan emisi CO₂ sebesar 43% (dengan bantuan internasional) pada tahun 2030, pengembangan hidrogen hijau dari tahun 2031 hingga 2060 memerlukan mobilisasi investasi sektor swasta yang sangat besar, mencapai \$25,2 miliar (Dewi et al., 2023).

2.2.2. Energi Terbarukan untuk Produksi Hidrogen



Gambar 2. 2 Energi Terbarukan untuk Produksi Hidrogen

(<https://share.google/images/pl1wt3nr3vgd7B9Kc>)

Diagram ini mengilustrasikan rantai nilai (*value chain*) hidrogen hijau, mulai dari sumber energi terbarukan (surya/angin) yang menghasilkan listrik, disalurkan ke Elektroliser untuk memecah air menjadi H₂ dan O₂, lalu gas hidrogen disimpan (*Storage*), dan akhirnya didistribusikan untuk berbagai aplikasi dekarbonisasi seperti transportasi (*Aviation*, *Shipping*), dan industri kimia (*Chemical Manufacturing*).

1. Energi Surya

Energi surya merupakan salah satu sumber energi primer yang digunakan dalam teknologi fotovoltaik (*Photovoltaic*) untuk menghasilkan listrik. Prinsip

operasional utama fotovoltaik (PV) adalah melibatkan efek fotolistrik: ketika foton dari sinar matahari mengenai material semikonduktor (seperti silikon), energi yang dibawa foton tersebut akan diserap dan menyebabkan pelepasan muatan listrik dalam jumlah kecil dari material tersebut (Pambudi, 2025).

Mengingat Indonesia menikmati sinar matahari yang melimpah secara berkelanjutan sepanjang tahun, negara ini memiliki potensi besar untuk memanfaatkan energi surya sebagai sumber daya utama. Energi surya ini dapat digunakan untuk produksi hidrogen melalui dua mekanisme utama: fotoalisis (dekomposisi air oleh cahaya) atau elektrolisis yang didukung oleh sel surya (PLTS). Secara kuantitatif, potensi teknis energi surya di Indonesia diperkirakan sangat besar, mencapai 207,8 GW (Hasan & Widayat, 2022).

2. Energi Angin

Potensi energi angin di Indonesia juga cukup tinggi, terutama di daerah pesisir dan pegunungan. Turbin angin dapat digunakan untuk menghasilkan listrik yang kemudian dapat digunakan dalam proses elektrolisis untuk memproduksi hidrogen (Hasan & Widayat, 2022).

Angin dapat didefinisikan secara sederhana sebagai pergerakan udara yang disebabkan oleh perbedaan tekanan atmosfer, yaitu dari wilayah tekanan tinggi ke tekanan rendah, atau secara ekuivalen, dari wilayah suhu udara rendah ke suhu udara tinggi. Fenomena ini merupakan hasil langsung dari pemanasan yang tidak merata pada atmosfer dan permukaan bumi oleh radiasi matahari. Dalam konteks energi, energi angin diakui sebagai salah satu sumber daya alam yang melimpah, di mana daya gunanya diperoleh melalui proses konversi energi kinetik pergerakan udara tersebut (Hutagulung et al., 2022).

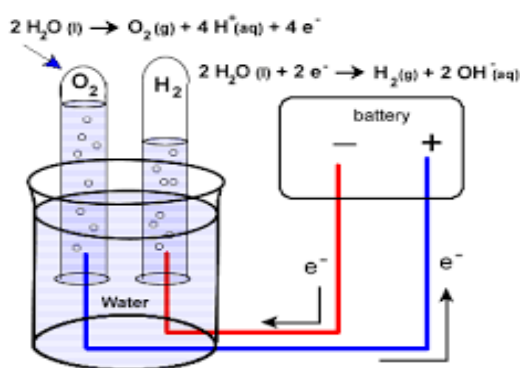
2.2.3. Elektrolisis Air

Proses produksi hidrogen melalui elektrolisis air adalah metode yang menggunakan listrik untuk memecah molekul air menjadi hidrogen dan oksigen. Ini adalah salah satu metode produksi hidrogen yang ramah lingkungan karena dapat menggunakan energi terbarukan seperti tenaga surya atau angin, untuk menghasilkan

hidrogen (Safarudin, 2023). Pada proses ini penguraian senyawa air (H₂O) menjadi gas hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂) dengan menggunakan listrik yang melalui air tersebut (Widyatama, 2017).

Elektrolisis adalah proses kimia fundamental yang diinisiasi oleh pengaliran arus listrik melalui lelehan atau larutan senyawa ionik. Mekanisme ini melibatkan pertukaran elektron, di mana spesi dalam larutan mengambil elektron di katoda, sementara spesi lain melepaskan elektron ke anoda, dan elektron bergerak ke katoda melalui sirkuit eksternal (Suyuty, 2011).

Secara spesifik dalam elektrolisis air, reaksi terjadi serentak di kedua elektroda: anoda berfungsi sebagai lokasi oksidasi di mana molekul air terurai menjadi gas oksigen (O₂) dan ion hidrogen (H⁺), yang juga melepaskan elektron. Sementara itu, katoda adalah tempat terjadinya reduksi; di sana, molekul air bereaksi dengan menangkap elektron, menghasilkan gas hidrogen (H₂) dan ion hidroksida (OH⁻). Ion H⁺ dan OH⁻ yang terbentuk kemudian saling menetralkan di dalam larutan untuk membentuk kembali molekul air, melengkapi siklus reaksi (Acmad, 1992).



Gambar 2. 3 Elektrolisis Air

(<https://i.sstatic.net/ce47c.png>)

1. Jenis-Jenis Elektrolisis

a. *Alkaline Water Electrolysis (AWE)*

Alkaline Water Electrolysis (AWE) menggunakan elektroda berbahan *stainless steel* dengan larutan berair KOH dan/atau NaOH sebagai elektrolit, konsentrasi elektrolitnya sekitar 20%-30% (Hutagulung et al., 2022).

b. *Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolysis*

Teknologi elektrolisis air dengan membran penukar proton (PEM) sangat ideal untuk diintegrasikan dengan sumber energi listrik yang memiliki intermitensi pasokan (misalnya, energi terbarukan). Keunggulannya terletak pada respons dinamis yang luar biasa cepat, dibuktikan dengan kemampuan aktivasi dan deaktivasi sistem hanya dalam hitungan detik, serta laju kenaikan (*rump-up*) dan penurunan (*ramp-down*) daya penuh yang dapat dicapai dalam waktu sesingkat satu detik (Parman et al., 2024).

2.2.4. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

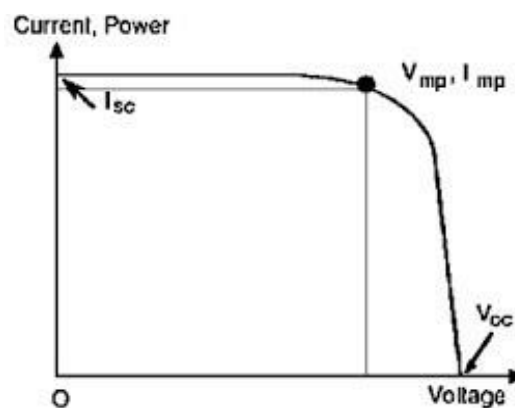


Gambar 2. 4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

(<https://share.google/images/bjvUNwSZiTUaxrDL2>)

Pembangkit Listrik tenaga surya (PLTS) merupakan pembangkit yang mengkonversi energi surya atau energi matahari menjadi energi Listrik. “Pembangkitan energi Listrik pada PLTS ini dilakukan dengan cara fotovoltaik. Yang mana pembangkitan dengan menggunakan cara fotovoltaik ini dengan mengubah secara langsung energi cahaya matahari menjadi energi listrik” (Julianto et al., 2022) PLTS memiliki 3 jenis instalasi. Ada sistem instalasi *on-grid*, sistem instalasi *off-grid*, dan sistem instalasi *hybrid*. Untuk sistem instalasi yang akan digunakan pada alat yang akan dibuat yaitu sistem instalasi *off-grid*. Sistem instalasi *off-grid* ini merupakan instalasi yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN, sehingga pasokan energi hanya berasal dari cahaya matahari.

Kurva karakteristik arus-tegangan (I-V) dan daya-tegangan (P-V) pada panel surya merupakan aspek penting dalam menganalisis kinerja modul fotovoltaik. Sumbu X merepresentasikan tegangan (V), sedangkan sumbu Y menunjukkan arus (I) dan daya (P). Parameter utama pada kurva ini meliputi *short-circuit current* (I_{sc}), *open-circuit voltage* (V_{oc}), dan *maximum power point* (V_{mp} , I_{mp}) yang menunjukkan titik daya maksimum. Pada tegangan rendah, arus relatif konstan hingga mencapai MPP, kemudian turun drastis hingga V_{oc} . Untuk memastikan daya optimal, panel harus beroperasi pada *Maximum Power Point* (MPP). Analisis kurva ini penting dalam optimasi system tenaga surya guna meningkatkan efisiensi dan kinerja keseluruhan.



Gambar 2. 5 Kurva Karakteristik I-V

(<https://www.google.com/search?q=kurva+karakteristik+V+I+pada+PLTS>)

Pada kurva karakteristik I-V di atas dapat dilihat bahwa:

a. Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{oc})

Ini adalah titik di mana arus (I) yang dihasilkan sel surya adalah nol ($I=0$). Secara fisik, ini terjadi ketika rangkaian panel surya tidak terhubung ke beban (rangkain terbuka). Pada kondisi ini, tegangan mencapai nilai maksimumnya (V_{maks}) karena arus foton (I_{ph}) yang dihasilkan oleh paparan cahaya sepenuhnya dilawan oleh arus dioda sel surya (I_d).

b. Arus Hubung Singkat (I_{sc})

Ini adalah titik di mana tegangan (V) pada terminal sel surya adalah nol ($V=0$). Secara fisik, ini terjadi ketika terminal panel surya dihubungkan langsung (hubung singkat). Pada kondisi ini, arus yang dihasilkan mencapai nilai maksimumnya (I_{maks}) yang didominasi oleh arus foton (I_{ph}) yang proporsional terhadap intensitas iradiasi matahari.

2.2.5. Baterai Lithium-Ion (Li-Ion)

Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) merupakan salah satu jenis baterai lithium-ion modern yang banyak digunakan saat ini. Keunggulan utama baterai LiFePO_4 terletak pada kestabilan termalnya yang tinggi, memiliki umur pakai yang panjang dengan siklus pengisian lebih dari 2000 hingga 5000 kali, bobot yang relatif ringan, efisiensi energi mencapai lebih dari 95%, serta tingkat keamanan yang lebih baik karena risiko panas berlebih maupun kebakaran sangat rendah. Hal tersebut membuat baterai ini semakin banyak dimanfaatkan pada sistem energi terbarukan, terutama dalam penyimpanan energi dari panel surya.



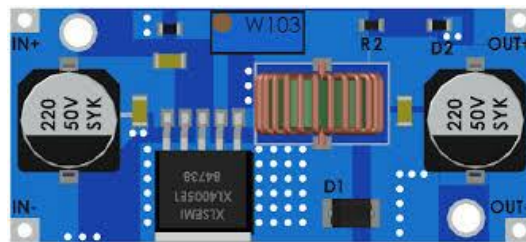
Gambar 2. 6 Baterai LiFePO_4

(<https://acesse.one/kN7kI>)

Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) dengan material LiFePO_4 sebagai katoda dan grafit karbon sebagai anoda. Teknologi ini dikembangkan untuk mengatasi

kekurangan baterai konvensional seperti baterai timbal-asam yang cenderung lebih berat, memiliki umur lebih singkat, dan terbatas dalam jumlah siklus pengisian. Dalam penerapannya pada sistem energi surya untuk produksi hidrogen ramah lingkungan, baterai LiFePO_4 berfungsi sebagai media penyimpanan energi listrik yang lebih stabil dan efisien dibandingkan baterai timbal-asam. Energi yang tersimpan di dalamnya kemudian digunakan untuk mengoperasikan sistem elektroliser, yaitu perangkat yang memecah air menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Keandalan baterai sangat berperan penting, sebab proses elektrolisis membutuhkan suplai energi yang konsisten dan berkesinambungan.

2.2.6. *Buck Converter*



Gambar 2. 7 *Buck Converter*

https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRbaGJGaEp4nBiv_cNb-D87MGkiXa-snpjQzQ&s

Buck converter adalah konverter penurun tegangan khusus yang menerapkan sistem SMPS (Switching Mode Power Supply). Ia adalah konverter dengan efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan power-supply penurun tegangan biasa (sistem linier). Efisiensinya dapat mencapai lebih dari 90%. *Buck converter* memanfaatkan sifat induktor terhadap guncangan listrik berfrekuensi tinggi dan bekerja dengan adanya denyut-denyut tegangan. Karena itu di dalam sebuah rangkaian *buck converter* selalu terdapat generator sinyal, transistor penguat, dioda, kondensator dan induktor.

2.2.7. Sensor Gas Hidrogen ADKS-1



Gambar 2. 8 Sensor ADKS-1

<https://indonesian.alibaba.com/product-detail/Aikesi-Portable-Gas-Detector-Analyzer-ADKS-1601126546084.html>

Sensor ADKS-1 merupakan perangkat elektronik yang berfungsi untuk mendeteksi konsentrasi gas hidrogen (H_2) di udara dalam satuan *Parts Per Million* (PPM). Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan sifat elektris material sensor terjadi kontak dengan molekul gas hidrogen (Rimbawati et al., 2021). Pada penelitian ini, sensor ADKS-1 digunakan untuk memvalidasi keberadaan gas hidrogen hasil proses elektrolisis dan mengukur akumulasi konsentrasinya di dalam wadah penampung (*headspace*).

2.2.8. Parameter Kinerja Sistem

1. Daya Listrik

Daya listrik adalah besaran yang menggambarkan seberapa cepat energi listrik dikonsumsi atau dihasilkan oleh suatu perangkat atau sistem. Menurut (PUTRA et al., 2022) yang merupakan penelitian yang membahas terkait perhitungan daya listrik dapat dirumuskan bahwa :

$$P = V \times I \quad (2.1)$$

Dimana :

P = Daya Listrik (Watt)

V = Tegangan (V)

I = Arus (Ampere)

2. Volume Gas Aktual

Dalam pengukuran gas, satuan PPM secara standar merujuk pada fraksi volume (PPM_v). *Part per million* (PPM) atau bagian per juta adalah satuan konsentrasi yang digunakan untuk menunjukkan kandungan suatu senyawa dalam suatu larutan misalnya kandungan garam dalam air laut, kandungan polutan dalam sungai (Salasa et al., 2021). Jumlah zat gas didalam suatu wadah berbanding lurus dengan volume dari wadahnya (SOUISA, 2011). Maka untuk mengubah dari nilai PPM yang terbaca di sensor menjadi nilai volume gas aktual maka digunakan rumus:

$$V_{aktual} = \frac{PPM}{1.000.000} \times V_{headspace} \quad (2.2)$$

Dimana :

V_{aktual} = Volume gas hidrogen aktual (liter atau m³)

PPM = Gas yang terukur (PPM)

V_{headspace} = Volume ruang kosong akuarium (liter atau m³)

3. Hukum Faraday

Prinsip Hukum Faraday memberikan dasar teoritis untuk perhitungan produksi hidrogen, yang digunakan sebagai basis perbandingan saat menghitung efisiensi aktual sistem. Hukum Faraday I menyatakan bahwa massa/volume zat yang timbul pada elektroda karena elektrolisis berbanding lurus dengan jumlah listrik yang mengalir (Alfani, 2021). Hal ini disebabkan karena kenaikan arus listrik meningkatkan laju muatan listrik dalam larutan dan laju reaksi penguraian senyawa air menjadi hidrogen dan oksigen semakin cepat (Ursua et al., 2012)

$$n = \frac{I \times t}{F} \quad (2.3)$$

Dimana :

- n = Jumlah mol gas hidrogen (mol)
- I = Arus listrik yang mengalir (Ampere)
- t = Waktu elektrolisis (detik)
- F = Konstanta Faraday (96485 C/mol)

Volume molar gas didefinisikan sebagai volume yang ditempati oleh satu mol gas pada keadaan suhu dan tekanan tertentu (SOUISA, 2011). Dalam kondisi standar (STP), satu mol gas ideal menempati volume sebesar 22,4 Liter. Konstanta ini digunakan untuk mengonversi jumlah mol hidrogen yang dihasilkan dari perhitungan Hukum Faraday menjadi satuan volume (liter). Untuk menghitung volume hidrogen secara teoritis, penelitian ini mengintegrasikan Hukum Faraday I dengan konstanta Volume Molar Gas sebagai berikut :

$$V_{Faraday} = \frac{I \times t}{F} \times V_m \quad (2.4)$$

Di mana :

- $V_{Faraday}$ = Volume gas hidrogen teoritis (liter atau m^3)
- I = Arus listrik yang mengalir (Ampere)

t	=	Waktu elektrolisis (detik)
F	=	Konstanta Faraday (96485 C/mol)
V _m	=	Volume Molar Gas (22.4 L/mol pada STP atau kondisi standar)

4. Efisiensi Elektrolisis ($\eta_{\text{elektrolisis}}$)

Efisiensi elektrolisis mengukur perbandingan antara hasil aktual dengan hasil teoritis (Faraday), atau perbandingan energi yang tersimpan dalam hidrogen dengan energi listrik masukan. Efisiensi ini dipengaruhi oleh variabel masukan seperti tegangan dan arus listrik. Pengujian generator HHO sebelumnya berhasil mencapai efisiensi tertinggi sebesar 63,95% (Syafutra et al., 2022). Kajian mengenai produksi hidrogen menggunakan energi angin mencatat bahwa efisiensi sistem tertinggi yang didapatkan adalah 7,37% (Hutagulung et al., 2022). Rumus perhitungan efisiensi berdasarkan perbandingan volume gas (Yield Efisiensi) :

$$\eta_{\text{elektrolisis}} = \frac{V_{H_2, \text{Aktual}}}{V_{H_2, \text{Teoritis}} (\text{Faraday})} \times 100\% \quad (2.5)$$