

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi global dan meningkatnya ketergantungan terhadap bahan bakar fosil mendorong perlunya inovasi dalam bidang energi alternatif. Salah satu solusi yang dikembangkan adalah teknologi HHO generator, yaitu alat yang menghasilkan gas HHO (campuran gas hidrogen dan oksigen) melalui proses elektrolisis air. Gas HHO dikenal memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dalam mesin atau digunakan dalam berbagai aplikasi energi lainnya.

Dalam pengembangan HHO generator, banyak faktor yang mempengaruhi produksi gas, salah satunya adalah jarak antar elektroda di dalam sel elektrolisis. Variasi jarak ini dapat memengaruhi laju reaksi, efisiensi energi, dan Debit gas yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami pengaruh variasi jarak elektroda terhadap produksi gas HHO.

Menurut data BPPT (2022), konsumsi bahan bakar di sektor transportasi Indonesia terus meningkat setiap tahun, sementara cadangan minyak bumi semakin menipis. Oleh karena itu, perlu dikembangkan sistem energi alternatif seperti HHO generator. Salah satu aspek penting dalam sistem HHO generator adalah elektroda, di mana jarak antar elektroda memengaruhi efisiensi proses elektrolisis. Dalam penelitian ini, dibangunlah mini HHO generator tipe dry cell dengan konfigurasi elektroda tertentu.

Penelitian dilakukan dengan memvariasikan jarak antar elektroda, menggunakan larutan elektrolit berbasis Kalium Hidroksida (KOH), serta memantau debit gas yang dihasilkan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi HHO yang lebih efisien dan aplikatif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi jarak antar elektroda terhadap produksi gas HHO yang dihasilkan pada mini HHO generator dry cell?
2. Berapa jarak antar elektroda yang menghasilkan debit gas HHO tertinggi?
3. Bagaimana nilai efisiensi *Faraday* pada setiap variasi jarak elektroda?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi jarak antar elektroda terhadap produksi gas HHO pada mini HHO generator tipe dry cell.
2. Menentukan jarak antar elektroda yang menghasilkan debit gas HHO tertinggi pada mini HHO generator dry cell.
3. Menganalisis efisiensi sistem berdasarkan nilai arus, tegangan, dan produksi gas hasil elektrolisis.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan sistem HHO generator, khususnya dalam aspek variasi jarak elektroda. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi teknis bagi mahasiswa, peneliti, dan masyarakat umum yang ingin mengembangkan energi alternatif berbasis air secara sederhana dan mandiri.

Manfaat lain-Nya antara lain:

- Memberikan referensi mengenai pengaruh jarak elektroda terhadap produksi gas HHO serta efisiensinya secara umum.
- Menjadi acuan bagi pengembangan desain HHO generator yang lebih optimal untuk aplikasi praktis.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan tidak melebar, maka penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Jenis generator yang digunakan adalah mini HHO generator tipe dry cell.
2. Material elektroda yang digunakan adalah stainless steel 316 yang telah dikonfigurasi yaitu dengan panjang 70 mm, lebar 70 mm dan ketebalan 2 mm.
3. Variasi jarak antar elektroda diatur menggunakan gasket silikon dengan ketebalan 1 mm, 2 mm, dan 3 mm.
4. Larutan elektrolit yang digunakan adalah Kalium Hidroksida (KOH) yang dicampur dengan air Deionisasi.
5. Tegangan listrik disuplai menggunakan power supply DC 12V 20A.
6. Laju aliran gas HHO yang dihasilkan diukur menggunakan flowmeter dengan akurasi 0-3 Liter/menit.
7. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium sederhana (di rumah), bukan dilaboratorium resmi.
8. Penelitian ini berfokus pada pengaruh variasi jarak elektroda terhadap produksi gas HHO. Efisiensi *Faraday* turut dihitung sebagai informasi pendukung dalam menilai performa sistem elektrolisis.

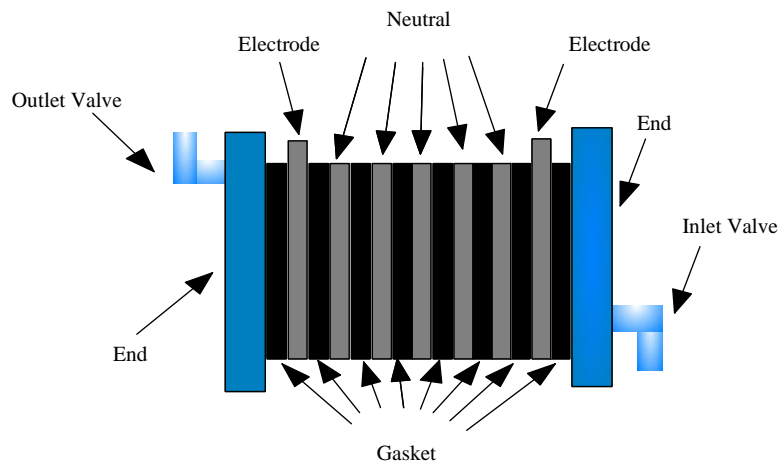
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 HHO Generator

HHO generator merupakan perangkat elektrolisis yang digunakan untuk memisahkan molekul air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) melalui proses elektrolisis menggunakan arus listrik. Gas yang dihasilkan sering disebut sebagai gas HHO atau Brown's Gas, yang terdiri dari hidrogen dan oksigen dalam bentuk campuran stoikiometri. HHO memiliki sifat mudah terbakar dan dapat digunakan sebagai tambahan bahan bakar pada mesin pembakaran internal.

Brown's Gas, dinamai dari Yull Brown, peneliti yang pertama kali mempopulerkan penggunaannya sebagai bahan bakar alternatif pada pertengahan abad ke-20. Ilustrasi generator HHO dapat dilihat dari gambar 2.1 berikut ini:

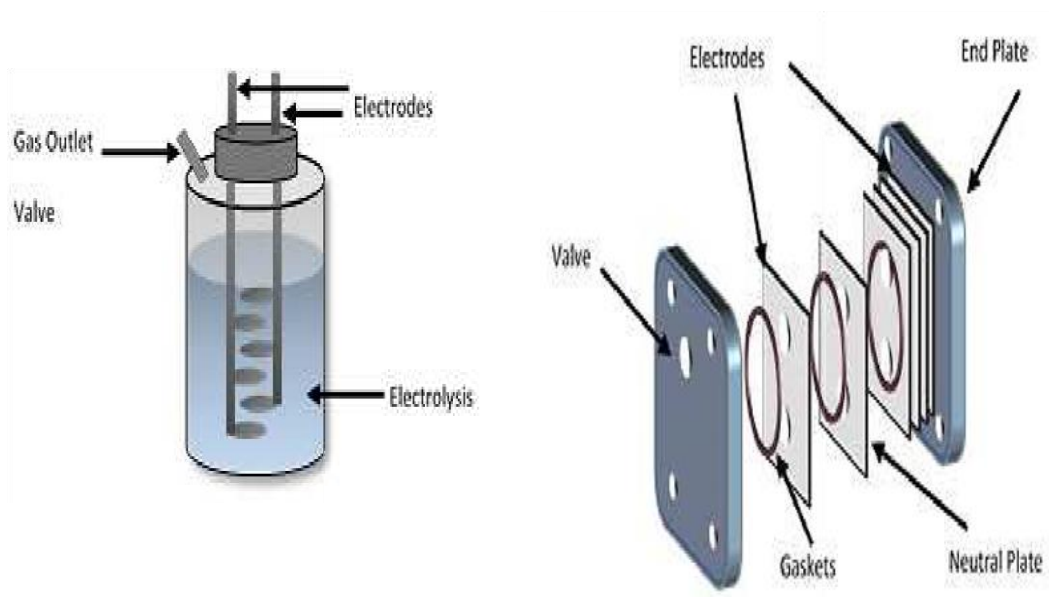


Gambar 2. 1 HHO Generator.

Gas HHO dianggap sebagai energi alternatif yang bersih karena hasil pembakarannya hanya menghasilkan uap air. Teknologi ini mulai berkembang seiring meningkatnya kebutuhan akan solusi energi terbarukan. Selain itu, gas HHO juga mudah diproduksi secara mandiri sehingga cocok untuk eksperimen skala rumah tangga maupun penelitian pendidikan. Penggunaan HHO generator banyak dikembangkan dalam bidang otomotif sebagai sistem hemat bahan bakar.

Selain itu, dalam penelitian energi alternatif, HHO juga menjadi pilihan karena bersifat ramah lingkungan dan menghasilkan emisi berupa uap air. Terdapat beberapa tipe HHO generator, di antaranya wet cell dan dry cell, dengan kelebihan dan kekurangan masing-masing. Tipe dry cell dirancang agar larutan elektrolit hanya mengalir pada permukaan elektroda, sehingga efisiensi meningkat dan risiko korsleting antar pelat lebih kecil.

Rancangan ini juga meminimalisir panas berlebih dan konsumsi air. Kedua tipe tersebut juga dapat dibedakan dari gambar 2.2 dan gambar 2.3 berikut ini:



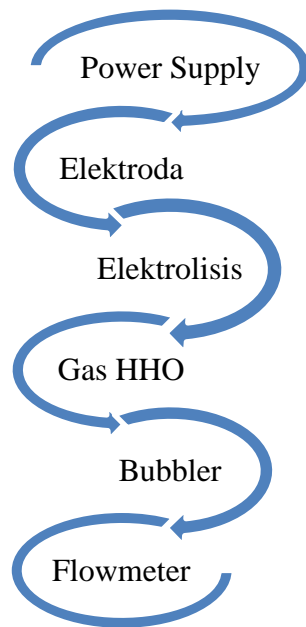
Gambar 2. 2 Generator Wet Cell.

Gambar 2. 3 Generator Dry Cell.

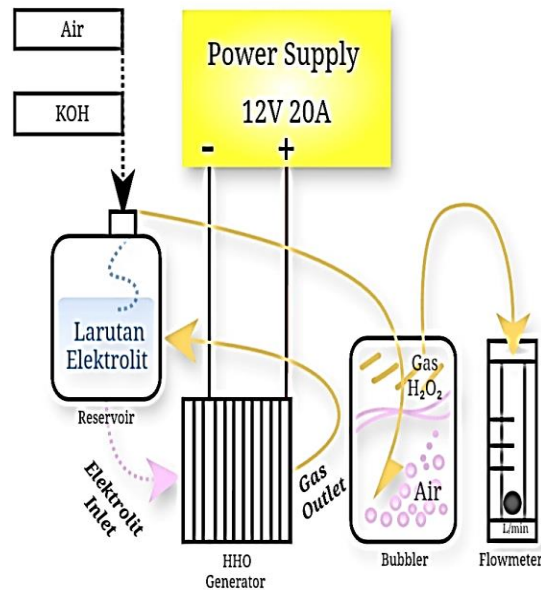
Dalam sistem HHO generator, istilah “*cell*” merujuk pada unit reaksi elektrolisis, yaitu ruang atau tempat kompartemen berlangsungnya proses pemisahan molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen menggunakan arus listrik. Setiap *cell* umumnya terdiri dari sepasang elektroda (positif dan negatif) yang dipisahkan oleh jarak tertentu, dan direndam dalam larutan elektrolit. Jumlah dan konfigurasi *cell* sangat memengaruhi efisiensi produksi gas HHO. Oleh karena itu, pada pembahasan selanjutnya, penggunaan kata “*cell*” mengacu pada satu unit dasar dari sistem elektrolisis yang digunakan dalam generator ini.

2.2 Prinsip Kerja HHO Generator

HHO generator bekerja berdasarkan prinsip elektrolisis air, di mana arus listrik searah (DC) digunakan untuk memisahkan molekul air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2). Dalam sistem ini, air yang telah dicampur dengan larutan elektrolit seperti KOH dialirkan ke dalam cell elektrolisis (HHO generator dry cell) melalui inlet. Diagram dan alur kerja sistem dapat dilihat pada gambar 2.4 dan gambar 2.5 berikut:



Gambar 2. 4



Gambar 2. 5

Diagram Blok Sistem HHO Generator.

Alur Kerja Sistem HHO Generator.

Pada penelitian ini arus listrik dari power supply dialirkan ke elektroda positif dan negatif yang tersusun dalam konfigurasi tertentu. Ketika arus mengalir melalui larutan, terjadi reaksi elektrokimia pada permukaan elektroda yang menghasilkan gas HHO. Gas tersebut kemudian dialirkan menuju bubbler yang berfungsi sebagai sistem keamanan untuk mencegah risiko ledakan balik (*flashback*). Setelah melewati bubbler, gas HHO diarahkan ke flowmeter untuk diukur debitnya dalam satuan liter per menit.

Untuk lebih memahami alur kerja sistem, berikut ditampilkan diagram blok dari sistem HHO generator secara rinci sudah ditunjukkan pada gambar diagram dan alur kerja sistem HHO generator.

Keterangan:

- Power Supply: Menyediakan arus DC.
- Elektroda: Media penghantar reaksi elektrolisis.
- Elektrolisis: Proses pemisahan air menjadi gas HHO.
- Bubbler: Pengaman sistem dari ledakan balik.
- Flowmeter: Mengukur Debit gas yang dihasilkan per menit (60 detik) dalam satuan (L/min).

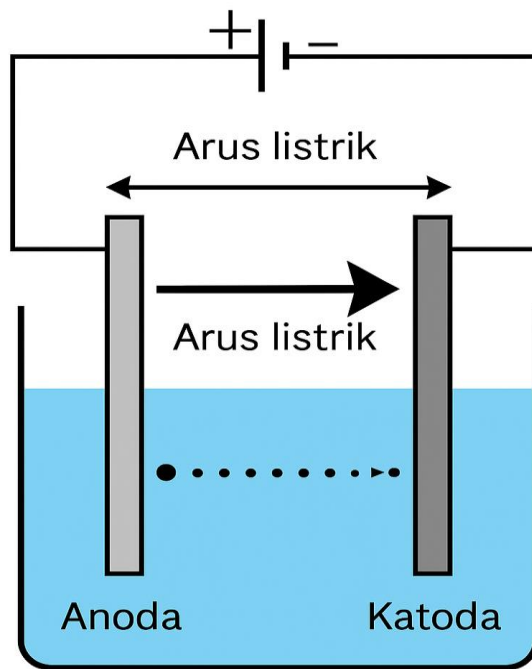
Untuk memahami mekanisme produksi gas HHO, perlu dipahami terlebih dahulu prinsip dasar kerja elektrolisis air sebagai proses inti.

2.3 Prinsip Kerja Elektrolisis Air

Proses elektrolisis air adalah reaksi kimia yang memisahkan air menjadi gas hidrogen dan oksigen dengan bantuan arus listrik searah (DC). Reaksi yang terjadi di anoda dan katoda menghasilkan gas O_2 dan H_2 secara berturut-turut. Elektrolisis air tidak akan berjalan efisien tanpa adanya elektrolit yang meningkatkan konduktivitas larutan.

Selain menentukan arah reaksi, penempatan anoda dan katoda dalam sel elektrolisis juga memengaruhi kestabilan sistem dan efisiensi pembentukan gas. Jarak antar elektroda, luas permukaannya, serta orientasi pemasangan terhadap arah aliran arus listrik menjadi faktor-faktor penting yang memengaruhi performa sistem (Zeng & Zhang, 2010; Santos et al., 2013). Dalam praktiknya, elektroda diposisikan sejajar dan simetris untuk menjaga distribusi medan listrik yang merata didalam larutan.

Ketidakseimbangan dalam penataan ini dapat menyebabkan pembentukan gelembung gas yang tidak optimal, konsumsi daya yang tidak efisien, hingga degradasi material elektroda lebih cepat pada kutub tertentu (Karthikeyan et al., 2012). Oleh karena itu peran anoda dan katoda bukan hanya sebagai lokasi reaksi kimia, tetapi juga sebagai komponen mekanis yang memengaruhi stabilitas sistem secara keseluruhan. Ilustrasi proses elektrolisis air dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut ini:



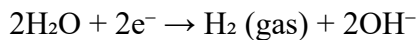
Gambar 2. 6 Proses Elektrolisis Air.

Setelah memahami prinsip kerja elektrolisis air secara umum, pembahasan selanjutnya akan mengulas prinsip dasar yang melandasinya secara lebih mendalam, serta faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi proses tersebut.

2.3.1 Prinsip Dasar Elektrolisis

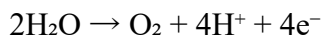
Dalam konteks HHO generator, air yang dicampur dengan larutan elektrolit seperti kalium hidroksida (KOH) dipecah menjadi gas hidrogen dan oksigen ketika arus listrik dialirkan melalui dua elektroda yang direndam dalam larutan tersebut. Secara umum reaksi yang terjadi pada proses elektrolisis air sebagai berikut:

Reaksi pada katoda (reduksi):



- Air menerima elektron.
- Menghasilkan gas hidrogen (H_2) dan ion hidroksida (OH^-).

Reaksi pada anoda (oksidasi):



- Air kehilangan elektron (oksidasi).
- Menghasilkan gas oksigen (O_2) dan ion hidrogen (H^+).

Proses ini hanya terjadi secara efektif jika diberikan tegangan minimum tertentu yang mampu mengatasi energi ikatan molekul air. Efisiensi proses ini sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis elektrolit, suhu, tegangan, dan jarak elektroda. Oleh karena itu, variasi parameter menjadi bagian penting dalam penelitian ini.

Berdasarkan prinsip kerja di atas, proses elektrolisis air menghasilkan gas hidrogen dan oksigen dengan bantuan arus listrik. Namun dalam aplikasinya, reaksi ini tidak berlangsung secara sempurna karena dipengaruhi oleh sejumlah faktor, salah satunya adalah kebutuhan energi yang lebih tinggi dari nilai teoritis, serta adanya rugi-rugi sistem yang mempengaruhi efisiensi.

2.3.2 Tegangan Teoritis dan *Overpotential*

Secara teoritis, proses elektrolisis air membutuhkan tegangan minimum sekitar 1,23 volt pada suhu 25°C untuk memecah molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen. Tegangan ini dikenal sebagai tegangan sel standar (*standard electrode potential*). Namun, dalam praktiknya, tegangan yang dibutuhkan sering kali lebih tinggi karena adanya hambatan sistem seperti resistansi internal, *Overpotential*, dan kerugian energi lainnya.

Overpotential adalah tegangan tambahan yang diperlukan di atas tegangan teoritis untuk mengatasi kinetika reaksi pada permukaan elektroda. Faktor ini bergantung pada jenis material elektroda, kondisi permukaan, serta jenis elektrolit yang digunakan. Semakin tinggi *Overpotential*, maka semakin besar energi yang dibutuhkan untuk memulai reaksi elektrolisis secara efisien. Fenomena *overpotential* menyebabkan tegangan aktual yang dibutuhkan dalam sistem elektrolisis menjadi lebih besar dari nilai teoritis.

Hal ini turut memengaruhi efisiensi proses, yang salah satunya dijelaskan dalam konsep efisiensi *Faraday*.

2.3.3 Efisiensi *Faraday*

Efisiensi dalam elektrolisis air dapat ditinjau dari efisiensi *Faraday*, yaitu rasio antara jumlah gas yang dihasilkan secara aktual dengan jumlah gas yang seharusnya dihasilkan berdasarkan hukum *Faraday*. Nilai efisiensi *Faraday* dipengaruhi oleh arus listrik, waktu proses, kualitas elektrolit, dan desain sel elektrolisis. Umumnya, efisiensi ini tidak mencapai 100% karena adanya pemborosan energi dalam bentuk panas atau reaksi sampingan.

Selain faktor *overpotential* dan efisiensi *Faraday*, masih terdapat beberapa faktor lain yang secara langsung memengaruhi performa dan efisiensi sistem elektrolisis, baik dari sisi desain, bahan, maupun lingkungan operasional.

2.3.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses Elektrolisis

Proses elektrolisis air tidak hanya dipengaruhi oleh besar tegangan dan arus listrik yang diberikan, tetapi juga oleh sejumlah faktor lain yang secara langsung memengaruhi efisiensi dan laju produksi gas. Faktor-faktor ini sangat penting untuk diperhatikan dalam merancang sistem elektrolisis yang optimal, termasuk dalam aplikasi pada generator HHO.

Salah satu faktor utama adalah suhu larutan elektrolit. Suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju reaksi kimia karena partikel bergerak lebih cepat dan meningkatkan energi kinetik sistem. Namun, suhu yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan degradasi material elektroda dan penguapan elektrolit, sehingga perlu dikendalikan.

Selain itu, konsentrasi larutan elektrolit sangat berpengaruh terhadap konduktivitas larutan. Semakin tinggi konsentrasi elektrolit seperti KOH (Kalium Hidroksida), maka hambatan listrik akan semakin rendah, sehingga efisiensi elektrolisis meningkat. Namun, konsentrasi yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan panas berlebih dan mempercepat korosi pada elektroda.

Luas permukaan elektroda juga berperan penting dalam menentukan seberapa banyak reaksi elektrokimia yang dapat berlangsung secara simultan. Semakin luas permukaan elektroda yang terendam larutan, maka semakin besar jumlah ion yang dapat bereaksi, sehingga meningkatkan produksi gas HHO. Terakhir, jarak antar elektroda juga menjadi faktor krusial. Jarak yang terlalu jauh akan meningkatkan hambatan larutan dan membutuhkan tegangan lebih besar untuk mempertahankan arus.

Sebaliknya, jarak yang terlalu dekat berisiko menyebabkan arus pendek (*short circuit*) jika tidak didukung desain insulasi yang tepat. Oleh karena itu, variasi jarak antar elektroda menjadi salah satu variabel penting dalam penelitian ini. Selain prinsip dasar dan faktor umum yang memengaruhi elektrolisis, beberapa penelitian terdahulu juga memberikan pendekatan lanjutan terhadap mekanisme dan optimasi sistem elektrolisis dalam skala praktis.

2.3.5 Teori Elektrolisis Lebih Lanjut

Elektrolisis merupakan proses kimia yang melibatkan penghantaran arus listrik melalui larutan elektrolit untuk memecah senyawa menjadi unsur-unsurnya. Dalam konteks HHO generator, air (H_2O) dipecah menjadi gas hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2) melalui reaksi kimia yang terjadi di elektroda. Terdapat dua jenis utama sel elektrolisis, yaitu sel elektrolisis cair (*liquid-phase Electrolysis*) dan sel elektrolisis gas (PEM *Electrolysis*). HHO generator termasuk ke dalam kategori sel elektrolisis cair.

Jenis elektrolisis juga dapat dibedakan berdasarkan polaritas dan metode penggunaan arus, seperti *direct current (DC) Electrolysis* yang digunakan dalam proyek ini. Penggunaan tegangan DC memastikan pemisahan muatan yang efektif dan terarah, sehingga meningkatkan hasil produksi gas. Salah satu penentu efisiensi elektrolisis adalah jenis elektroda yang digunakan, baik dari segi bahan maupun konfigurasi kutubnya.

2.4 Elektroda: Material, Fungsi, dan Konfigurasi Dalam Sistem Dry Cell

Elektroda merupakan komponen utama dalam proses elektrolisis yang berfungsi sebagai penghantar arus listrik dari sumber daya ke larutan elektrolit. Pada penelitian ini, digunakan bahan stainless steel 316 karena memiliki sifat tahan karat, tahan terhadap larutan basa kuat seperti Kalium Hidroksida (KOH), serta memiliki konduktivitas listrik yang baik. Pemilihan bentuk dan jumlah elektroda turut memengaruhi efisiensi produksi gas HHO, terutama melalui luas permukaan dan konfigurasi polaritasnya.

Dalam HHO tipe dry cell, elektroda biasanya berbentuk pelat datar yang disusun sejajar dan terpisah oleh gasket atau spacer. Jarak antar pelat elektroda menjadi salah satu variabel penting yang memengaruhi efisiensi produksi gas, karena berkaitan langsung dengan resistansi larutan dan distribusi arus listrik di dalam sel elektrolisis.

Elektroda dalam sistem elektrolisis harus memiliki ketahanan korosi, konduktivitas tinggi, dan kekuatan mekanis.

Dua jenis stainless steel yang umum digunakan adalah SS 304 dan SS 316. Stainless steel 316 memiliki tambahan kandungan molibdenum yang membuatnya lebih tahan terhadap korosi, terutama dalam lingkungan asam atau basa seperti larutan KOH. Menurut penelitian oleh Andika dan Nurhalim (2019), elektroda berbahan SS 316 memiliki umur pakai lebih lama dan performa elektrolisis yang lebih stabil dibandingkan SS 304, terutama saat digunakan dalam sistem dry cell dengan suhu tinggi.

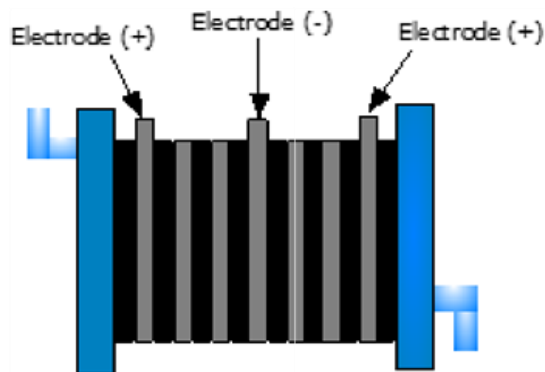
Perbedaan antara stainless steel 304 dan 316 dari segi komposisi dan ketahanan dapat dilihat pada tabel 2.1:

Tabel 2. 1 Perbandingan Material Stainless Steel 304 dan 316.

Kriteria	Stainless Steel 304	Stainless Steel 316
Komposisi Utama	Fe, 18–20% Cr, 8–10.5% Ni	Fe, 16–18% Cr, 10–14% Ni, 2–3% Mo
Kandungan Molibdenum (Mo)	Tidak ada	Ada (2–3%)
Ketahanan terhadap Korosi	Baik	Sangat baik (terutama terhadap klorida & asam)
Ketahanan terhadap Elektrolit	Cukup baik	Sangat baik (lebih stabil dalam elektrolit kuat)
Harga	Lebih murah	Lebih mahal
Ketersediaan di Pasaran	Sangat umum	Umum (sedikit lebih sulit didapat)
Umur Pakai di Elektrolisis	Sedang	Tinggi
Penggunaan Umum	Alat dapur, tangki air	Industri kimia, medis, lingkungan korosif

Selain material dan bentuk, konfigurasi susunan elektroda juga menjadi aspek penting dalam desain sistem HHO. Konfigurasi paling umum yang digunakan adalah satu kutub positif di salah satu ujung rangkaian dan satu kutub negatif di ujung lainnya, dengan pelat-pelat diantaranya berperan sebagai elektroda netral (*Floating Plate*). Konfigurasi ini memberikan distribusi arus yang merata dan mudah dikendalikan.

Namun demikian, beberapa penelitian mengusulkan konfigurasi alternatif yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi sistem. Salah satu pendekatan tersebut dikemukakan dalam jurnal EJAET (2015), yang menyarankan penggunaan dua elektroda positif disisi luar dan satu elektroda negatif ditengah. Dalam konfigurasi ini, arus listrik mengalir dari kedua sisi positif menuju elektroda negatif pusat, sehingga memungkinkan terjadinya reaksi elektrolisis pada kedua sisi elektroda negatif. Pendekatan ini dipercaya dapat meningkatkan luas permukaan reaksi aktif dan mempercepat produksi gas HHO dalam ruang terbatas.



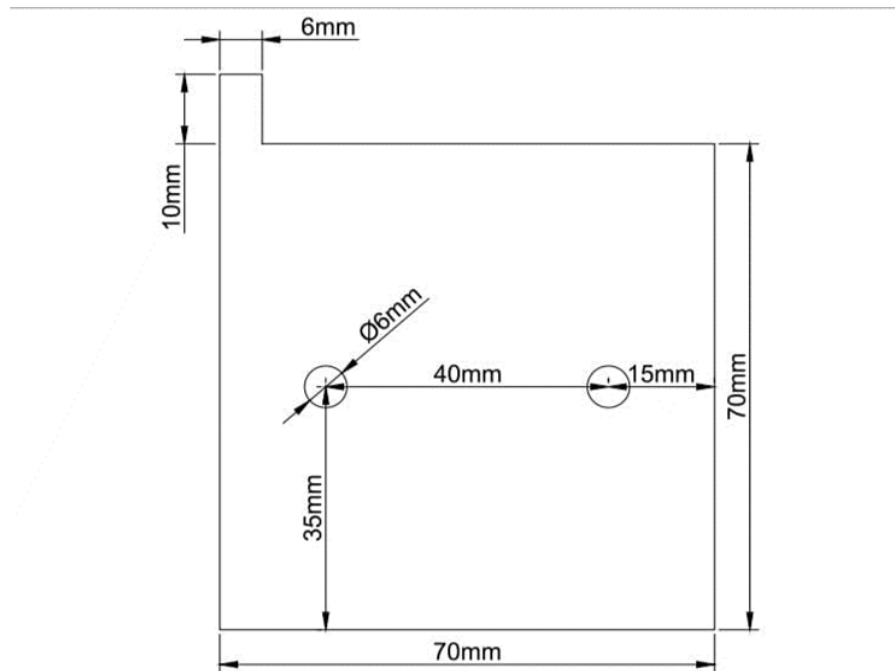
Gambar 2. 7 HHO Generator dengan Konfigurasi Tiga Elektroda.

Konfigurasi tersebut ditampilkan dalam Gambar 2.5, yang menunjukkan generator dengan tiga elektroda utama. Meskipun konfigurasi ini menjanjikan peningkatan output gas, penerapannya memerlukan pengaturan arus dan tegangan yang lebih seimbang, serta perhitungan ulang terhadap jarak elektroda dan karakteristik arus yang masuk.

Meskipun demikian, dalam penelitian ini konfigurasi ini belum secara langsung diterapkan dalam penelitian ini, melainkan dijadikan sebagai bahan kajian awal untuk memahami kemungkinan pengaruh konfigurasi terhadap performa sel elektrolisis.

Konfigurasi elektroda yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 3 elektroda negatif dan 2 elektroda positif, sementara yang lainnya bersifat netral. Konfigurasi ini diadaptasi berdasarkan literatur (EJAET, 2015) yang telah ditunjukkan sebelumnya, bahwa penambahan elektroda aktif dapat meningkatkan produksi gas. Pemilihan konfigurasi 3 elektroda negatif dan 2 elektroda positif ini dilakukan untuk mengevaluasi performa sistem pada variasi jarak elektroda yang telah ditentukan.

Secara keseluruhan, digunakan sebanyak 13 buah pelat elektroda stainless steel 316, yang disusun secara berurutan dengan variasi jarak antar pelat menggunakan gasket silikon. Konfigurasi desain pelat elektroda yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut ini:



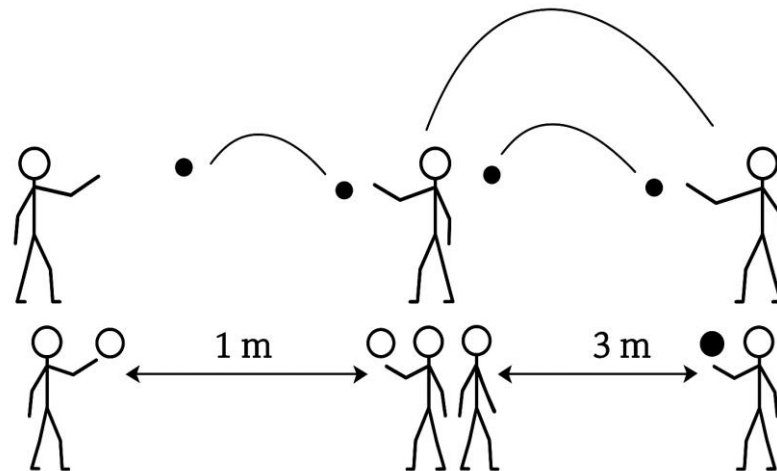
Gambar 2. 8 Desain Pelat Elektroda Stainless Steel 316.

2.4.1 Jarak Elektroda Dalam Proses Elektrolisis

Jarak antar elektroda merupakan salah satu parameter penting dalam elektrolisis. Jarak ini menentukan seberapa jauh electron dan ion-ion dalam larutan elektrolit harus berpindah untuk menyelesaikan reaksi elektrokimia. Semakin dekat jarak antar elektroda, maka lintasan arus listrik menjadi lebih pendek. Hal ini menurunkan hambatan (resistansi) internal dalam larutan, sehingga arus listrik dapat mengalir lebih efisien.

Sebaliknya, jika jarak antar elektroda terlalu jauh, hambatan meningkat, menyebabkan konsumsi energi lebih besar untuk menghasilkan jumlah gas yang sama.

Analogi Sederhana:



Gambar 2. 9 Ilustrasi Melempar Bola dari Jarak yang Berbeda.

Bayangkan dua orang berdiri berhadapan dan saling melempar bola. Jika mereka berdiri dekat, bola akan lebih mudah diterima dan tidak butuh tenaga besar. Tapi jika mereka berdiri terlalu jauh, dibutuhkan tenaga lebih besar dan akurasi tinggi. Begitu juga dalam elektrolisis: ion-ion dan elektron berpindah dari satu elektroda ke elektroda lain dan jaraknya sangat menentukan efisiensi perpindahan itu.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa jarak antar elektroda berpengaruh signifikan terhadap efisiensi proses elektrolisis, khususnya dalam produksi gas seperti HHO. Hambatan larutan meningkat seiring bertambahnya jarak elektroda, yang menyebabkan penurunan arus dan laju reaksi elektrokimia pada tegangan tetap.

Menurut Ghenadii et al. (2016), peningkatan jarak elektroda menyebabkan kenaikan resistansi larutan, yang berdampak langsung pada penurunan efisiensi produksi gas. Dalam eksperimen elektrolisis air, hasil terbaik diperoleh pada jarak antar elektroda yang optimal, dimana terdapat keseimbangan antara efisiensi arus dan keamanan operasi.

Hal serupa juga dijelaskan oleh Karthikeyan et al. (2012) bahwa penurunan jarak antar elektroda dapat meningkatkan densitas arus, namun jika terlalu dekat dapat menyebabkan arus pendek antar elektroda. Oleh karena itu, pemilihan jarak harus memperhatikan karakteristik larutan elektrolit dan desain sel.

Nayak & Mishra (2019) dalam studi mereka menyebutkan bahwa variasi jarak elektroda tidak hanya memengaruhi laju produksi gas, tetapi juga konsumsi daya listrik. Semakin kecil jaraknya, semakin rendah daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan Debit gas yang sama.

2.5 Karakteristik Kalium Hidroksida (KOH) sebagai Larutan Elektrolit

Kalium hidroksida (KOH) merupakan senyawa basa kuat yang sangat baik digunakan sebagai elektrolit dalam elektrolisis air. KOH memiliki konduktivitas listrik yang lebih tinggi dibandingkan Natrium Hidroksida (NaOH) pada konsentrasi yang sama. Selain itu, KOH lebih mudah larut dalam air dan menghasilkan sedikit endapan, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi jangka panjang pada HHO generator.

Menurut studi oleh Syahputra (2018), penggunaan KOH mampu meningkatkan produksi gas hingga 20% dibandingkan dengan NaOH dalam kondisi elektrolisis yang serupa.

2.6 Efisiensi Sistem Elektrolisis dan HHO Generator

Efisiensi HHO generator didefinisikan sebagai perbandingan antara energi yang diinput dalam bentuk listrik dan energi kimia yang tersimpan dalam gas HHO yang dihasilkan. Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi antara lain:

- Tegangan dan arus listrik.
- Jarak antar elektroda.
- Luas permukaan elektroda.
- Suhu larutan.
- Konsentrasi elektrolit.

Menurut penelitian oleh Rahayu (2020), efisiensi HHO meningkat ketika jarak antar elektroda dioptimalkan dalam kisaran 1–3 mm, serta penggunaan arus yang stabil dan tidak berfluktuasi.

Sementara itu, efisiensi sistem elektrolisis merupakan rasio antara output gas yang dihasilkan dengan input energi listrik yang digunakan. Dalam konteks HHO generator, energi listrik yang tidak dikonversi menjadi gas akan hilang dalam bentuk panas dan resistansi. Untuk itu, pengukuran efisiensi sering dilakukan dengan membandingkan debit gas yang dihasilkan (dalam LPM) terhadap konsumsi daya (dalam watt).

Menurut penelitian sebelumnya oleh Widodo (2018), efisiensi maksimal dapat dicapai ketika konfigurasi jarak elektroda diatur pada titik optimum, serta penggunaan larutan KOH dengan konsentrasi tertentu yang stabil secara termal. Dan juga penggunaan elektroda stainless steel dengan permukaan halus dan jarak antar elektroda yang konsisten dapat meningkatkan efisiensi sistem.

2.7 Perkembangan Teknologi Dry Cell dan Wet Cell

Wet cell merupakan tipe generator HHO awal yang sederhana dan mudah dibuat, namun memiliki efisiensi rendah karena seluruh elektroda terendam dalam elektrolit. Sementara itu, Dry cell adalah pengembangan dari teknologi wet cell, di mana hanya bagian tengah elektroda yang terpapar elektrolit. Ini membuat dry cell lebih efisien, aman, dan hemat energi.

2.8 Keunggulan dan kekurangan HHO Generator Dry Cell

HHO Generator tipe dry cell memiliki keunggulan dalam efisiensi dan keamanan. Karena larutan elektrolit tidak memenuhi seluruh ruang sel, potensi kebocoran dan *overheat* dapat diminimalkan. Desainnya yang modular juga mempermudah perawatan dan penggantian komponen. Namun, dry cell juga memiliki kekurangan seperti kompleksitas dalam perakitan serta kebutuhan penyegelan yang tepat agar tidak terjadi kebocoran gas maupun elektrolit.

Setelah memahami keunggulan dan kekurangan dari sistem HHO dry cell, penting untuk meninjau bagaimana teknologi ini telah diterapkan dalam berbagai bidang kehidupan nyata. Berikut akan membahas aplikasi HHO dalam dunia nyata serta tantangan penggunaannya secara praktis.

2.9 Penggunaan dan Tantangan Produksi HHO dalam dunia nyata

Gas HHO banyak digunakan sebagai aditif pembakaran pada kendaraan bermotor untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan menurunkan emisi. Selain itu, HHO juga digunakan dalam proses pemotongan logam (*Oxy-Hydrogen torch*), serta dalam eksperimen laboratorium dan teknologi energi terbarukan. Penelitian dan pengembangan HHO terus dilakukan sebagai salah satu solusi energi ramah lingkungan.

Beberapa tantangan umum dalam produksi HHO antara lain:

- Potensi kebocoran gas dari sambungan.
- Efek panas dari arus tinggi.
- Pengendapan elektrolit.
- Perawatan sistem secara berkala.

Selain itu, karena gas HHO mudah terbakar, sistem keamanan seperti bubbler dan *check valve* menjadi sangat penting. Menurut penelitian oleh Anwar (2021), sistem keamanan yang buruk dapat menyebabkan potensi ledakan dalam tekanan tinggi.

2.10 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas pengaruh parameter desain terhadap efisiensi HHO generator. Misalnya, penelitian oleh peneliti lain menunjukkan bahwa bentuk dan jumlah elektroda, serta komposisi elektrolit, turut mempengaruhi produksi gas. Namun, kajian yang secara spesifik membahas variasi jarak antar elektroda dalam sistem mini dry cell HHO masih terbatas, sehingga penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain sistem elektrolisis yang lebih optimal.

Penelitian mengenai generator HHO dengan sistem dry cell tergolong masih jarang ditemukan, terutama yang secara khusus membahas pengaruh variasi jarak elektroda terhadap produksi gas. Meskipun demikian, terdapat beberapa penelitian yang memiliki kedekatan topik dan dapat dijadikan sebagai landasan awal dalam pengembangan penelitian ini.

Penelitian oleh Ardiansyah (2019) berjudul "Analisis Pengaruh Jumlah Pelat pada HHO Generator terhadap Efisiensi Produksi Gas HHO" menunjukkan bahwa konfigurasi dan jumlah elektroda dapat memengaruhi jumlah gas yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan sistem dry cell dengan larutan Natrium Hidroksida (NaOH) sebagai elektrolit.

Sementara itu, menurut penelitian oleh Utami et al. (2020) dalam jurnal Energi Alternatif Terbarukan meneliti efektivitas penggunaan larutan Kalium Hidroksida (KOH) dan Natrium Hidroksida (NaOH) sebagai elektrolit terhadap efisiensi produksi gas HHO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa KOH memiliki performa lebih baik dalam hal konduktivitas dan kestabilan larutan.

Selain itu, menurut penelitian oleh Rizki dan Prasetyo (2021) melakukan pengujian terhadap tegangan yang digunakan pada sel elektrolisis HHO, dengan fokus pada efisiensi energi dan laju produksi gas. Mereka menyimpulkan bahwa efisiensi dapat dicapai pada rentang tegangan tertentu dengan jarak elektroda yang optimal.

Penelitian ini mengambil pendekatan berbeda dengan memfokuskan pada variasi jarak elektroda menggunakan sistem dry cell berskala mini dan menggunakan larutan KOH sebagai elektrolit. Dengan meninjau beberapa penelitian sebelumnya, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi baru dalam optimasi desain HHO generator.