

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian mengenai rekayasa *electrolyser* (generator HHO) sudah banyak dilakukan sebelumnya. Brown (1974) melakukan penelitian pertama pemecahan molekul air murni dengan memberikan arus listrik pada elektroda untuk menghasilkan gas HHO yang dinamakan *Brown's Gas* dan dipatenkan olehnya.

Utomo dan Wijaya (2015) membuktikan bahwa bensin dengan penambahan *Brown's gas* dengan variasi panjang elektroda 60 mm pada putaran mesin 6000 rpm dengan volume bensin 10 ml menghasilkan daya efektif sebesar 4,9 Hp habis dalam waktu 66 s, konsumsi bahan bakar spesifik 0,078 kg/hp dan efisiensi termis sebesar 71,8%. Pada volume dan putaran sama menggunakan panjang elektroda 80 mm menghasilkan SFC = 0,079 kg/hp, daya efektif 5,0 Hp dan efisiensi termis 70,3%. Penelitian tersebut menunjukkan penambahan *Brown's gas* lebih efisien dari pada penggunaan bensin murni dengan kondisi sama yang menghasilkan daya efektif sebesar 4,7 Hp, SFC sebesar 0,116 kg/hp dan efisiensi termis sebesar 48,1%.

Laksono & Widhiyanuriyawan (2013) meneliti tentang pengaruh variasi fraksi katalis NaHCO₃ (Natrium Bikarbonat) terhadap produksi *Brown's gas* pada *elektrolizer*. Variasi fraksi massa katalis NaHCO₃ digunakan 0%, 0,99%, 1,15%, 1,31%, 1,47%, 1,64% yang dilarutkan pada aquades sebanyak 6 liter. Kesimpulan yang didapat adalah produksi *Brown's gas* pada elektroliser dapat dilakukan tanpa menggunakan katalis, namun konsekuensi yang didapatkan yaitu daya yang dibutuhkan untuk melakukan proses elektrolisis sangat besar dengan jumlah produksi *brown's gas* yang tidak banyak. Sedangkan efisiensi elektroliser tertinggi dicapai pada elektrolisis dengan arus 6A dengan fraksi massa katalis sebesar 1,31% mencapai nilai efisiensi 40.0578%.

Penelitian yang dilakukan Marlina (2013) melihat karakteristik produktifitas *Brown's gas* dengan katalis NaHCO₃. Katalis yang ditambahkan mulai dari 2,5% 15%, hasilnya menunjukkan semakin bertambah kadar katalis maka semakin bertambah pula daya yang dibutuhkan untuk proses elektrolisis. Produktivitas paling tinggi pada katalis 12,5% dan efisiensi tertinggi pada kadar 10% katalis NaHCO₃.

Sari (2016) meneliti pengaruh ketebalan pelat elektroda dan fraksi massa katalis terhadap produktivitas *Brown's gas* pada *electrolyzer dry cell*. Pada penelitian itu

digunakan variasi fraksi massa katalis 0,69%, 1,38%, 1,77%, dan 2,15% pada ketebalan pelat elektroda 0,3, 1, 1,2, dan 1,5 mm. Menyimpulkan bahwa produktivitas tertinggi dihasilkan pada ketebalan pelat elektroda 0,3 mm dengan fraksi massa katalis 2,15% dengan produktivitas brown's gas 0,01690 l/s dan paling rendah pada ketebalan elektroda 1,5 mm dengan fraksi massa katalis 0,69%. Sedangkan efisiensi terbesar dimiliki pelat dengan ketebalan 0,3 pada fraksi massa katalis 2,15% sebesar 25,95% dan fraksi massa katalis optimal pada 1,77% dengan laju produksi gas HHO 0,01471 l/s dan efisiensi 22,404%.

Besarnya arus listrik yang digunakan untuk proses elektrolisis diteliti oleh Putra (2010). Dalam penelitiannya, proses elektrolisis menggunakan larutan KOH sebagai katalis sedangkan arus listrik berasal dari *Power Supply* DC sebagai sumber tegangan dengan variasi besaran arus yang digunakan pada *Power Supply* DC diatur 4,4.5, 5, 5.5, dan 6A. Didapatkan dari hasil penelitian bahwa semakin besar arus listrik DC yang digunakan maka produktivitas gas semakin besar yaitu pada besaran arus listrik DC 6A.

Arifin dan kawan-kawan (2015) mengamati pengaruh penggunaan pelat elektroda netral SS 316, elektroda netral aluminium dan tanpa pelat elektroda netral terhadap performansi elektroliser *dry cell*. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan pelat elektroda netral aluminium dapat meningkatkan performa generator HHO dibandingkan tanpa elektroda netral, sedangkan penggunaan SS 316 dapat menurunkan nilai *losses energy*.

Prayitno (2016) meneliti tentang pengaruh penambahan pelat terhadap produksi *Brown's gas* pada generator HHO tipe *dry cell*. Pada penelitian ini menggunakan beberapa tipe *electrolyzer*, tipe A (tanpa pelat sisi), tipe B (1 pelat sisi), dan tipe C (2 pelat sisi) dengan variasi pelat netral 2, 4, 6, dan 8. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa produktivitas gas cenderung konstan setiap pertambahan waktu, dan konfigurasi pelat netral 4 pada tipe C merupakan konfigurasi dengan produktivitas terbesar mencapai 0,015 l/s dan pengurangan jumlah pelat netral akan menghasilkan efisiensi yang semakin besar dimana efisiensi terbesar yaitu 26,31% pada 2 pelat netral tipe C.

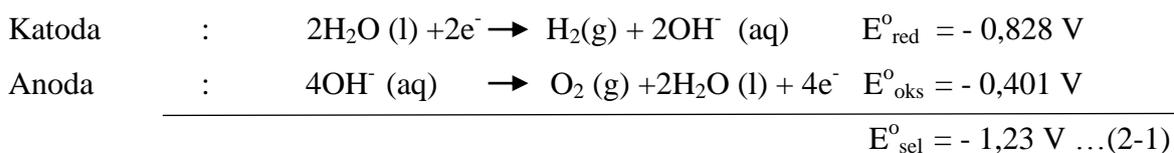
Afif (2017) meneliti tentang pengaruh perbedaan jenis material dan perbedaan tebal celah elektroda terhadap produktivitas *Brown's gas*. Hasil penelitian ini mendapatkan efisiensi terbaik dan produktivitas tertinggi pada material *Stainless Steel 304 L* dan jarak celah 1,5 mm yaitu sebesar 62,5% dan produktivitas sebesar 0,02216 L/s.

2.2 Elektrolisis Air

Menurut Hendayana (2006), metode pemisahan kimia merupakan aspek penting dalam bidang kimia karena kebanyakan materi yang didapatkan berupa campuran. Untuk memperoleh materi murni suatu campuran, kita harus melakukan pemisahan. Berbagai teknik pemisahan dapat diterapkan untuk memisahkan suatu campuran.

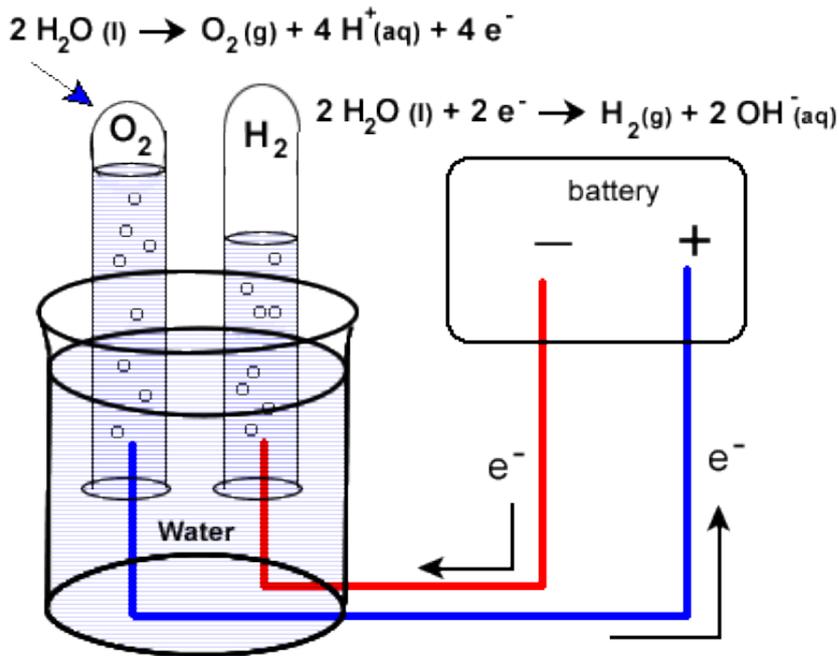
Elektrolisis air merupakan salah satu metode pemisahan dengan menggunakan bantuan energi listrik. Proses elektrolisis memisahkan molekul air menjadi gas hidrogen dan oksigen dengan mengalirkan arus listrik ke elektroda (anoda dan katoda) yang kontak langsung dengan larutan elektrolit, yaitu campuran air yang sudah ditambahkan katalis.

Pada anoda, dua molekul air lain terurai menjadi gas oksigen (O_2) melepaskan 4 ion H^+ serta mengalirkan elektron ke katoda. Sementara itu katoda, dua molekul air bereaksi dengan menangkap dua elektron tereduksi menjadi gas H_2 dan ion hidroksida (OH^-). Ion H^+ dan OH^- mengalami netralisasi sehingga terbentuk kembali beberapa molekul air. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat persamaan reaksi (2-1) oksidasi dan reduksi air pada proses elektrolisis air.



Reaksi elektrolisis merupakan reaksi reduksi-oksidasi yang berlangsung secara tidak spontan. Reaksi elektrolisis tidak dapat berlangsung jika tidak diberikan sumber energi berupa listrik yang mengalir dari luar dengan E°_{sel} bernilai negatif (Riyanto, 2013).

Pada saat proses elektrolisis berlangsung energi listrik yang diberikan akan di konversi menjadi energi kimia. Proses ini ditemukan oleh Faraday tahun 1820. Pada gambar 2.1 digambarkan reaksi pemecahan H_2O menjadi 2 molekul hidrogen dan 1 molekul oksigen yang sering disebut *HHO/Oxyhidrogen*, sehingga pada gambar terlihat perbedaan ketinggian karena reaksi yang terjadi.



Gambar 2.1 Proses elektrolisis air
Sumber: Takeuchi (2006: 204)

2.3 *Electrolyzer* (Generator HHO)

Electrolyzer adalah tempat berlangsungnya proses elektrolisis air yang terdapat elektroda (katode dan anode) sebagai tempat reaksi dan larutan elektrolit sebagai perantara dan sumber reaksi (Syarifuddin, 2017). Pada *electrolyzer* terjadi reaksi pemisahan hidrogen dan oksigen dari senyawa air (H_2O), proses yang terjadi pada katode adalah dua molekul air bereaksi dengan menangkap dua elektron yang mengalir masuk ke dalam katoda lalu tereduksi menjadi gas H_2 serta ion hidroksida (OH^-). Ion OH^- hasil reaksi air pada katoda bergerak menuju anoda. Di anoda tersebut elektron terlepas menuju permukaan anoda dan bergerak kembali menuju *power supply* akibat terlepasnya elektron tersebut. Dua buah ion OH^- terurai membentuk air dan gelembung oksigen. Gelembung yang muncul dari elektroda merupakan gas H_2 yang timbul dalam katoda dan gas O_2 yang timbul pada anoda hasil dari reaksi elektrolisis. *Electrolyzer* terbagi dalam beberapa jenis yaitu ; *dry cell* (tipe kering) dan *wet cell* (tipe basah).

2.3.1 *Dry Cell*

Sel elektrolisis tipe kering (*dry cell*) merupakan sel elektrolisis dimana tidak seluruh bagian pelat elektroda terendam, dan elektrolit hanya mengisi celah – celah antara elektroda. Luasan lingkaran pada plat elektroda yang kontak dengan air adalah area terjadinya elektrolisis untuk menghasilkan gas HHO. Luasan yang terelektrolisis sekitar 60% dan cukup dibatasi dengan *O-ring* pada setiap plat yang digunakan. Selain itu pada setiap plat terdapat lubang yang digunakan sebagai saluran gas HHO yang berada di bagian atas dan di bawah (Syarifuddin, 2017).

Keuntungan reaktor HHO tipe *dry cell* adalah :

1. Reaksi lebih fokus, karena elektrolit yang bereaksi hanya elektrolit yang terjebak diantara pelat elektroda.
2. Arus listrik yang digunakan relatif lebih hemat, karena air yang direaksikan disesuaikan dengan kebutuhan dan daya yang terkonversi menjadi panas semakin sedikit.
3. Panas dari hasil reaksi cenderung kecil, dikarenakan air tersirkulasi terus-menerus antara air panas dan dingin.

2.3.2 *Wet Cell*

Sel elektrolisis tipe basah (*wet cell*) semua elektrodanya terendam elektrolit dalam bejana air. Pada tipe *wet cell* membutuhkan energi listrik yang lebih besar dikarenakan semua area luasan elektroda platnya terendam air untuk proses elektrolisis yang menghasilkan gas HHO.

Kelebihan generator *electrolyzer wet cell* adalah :

1. Produksi gas cenderung lebih banyak.
2. Perawatan generator lebih mudah.
3. Rancang bangun pembuatan generator HHO lebih mudah.

2.4 *Brown's Gas*

Brown's gas (HHO/*Oxyhydrogen*) merupakan sebuah hasil reaksi elektrolisis air yang terdiri dari molekul hidrogen (H_2) dan molekul oksigen (O_2). Kedua molekul ini bercampur dalam satu wadah namun tidak saling berikatan dan dapat dipisahkan dengan sebuah separator melalui proses lanjutan. *Brown's gas* pertama kali diteliti dan dikembangkan oleh seorang warga negara Australia yang bernama Yull Brown pada tahun 1947 dan

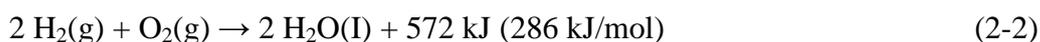
mematenkan hasil penelitiannya tentang elektrolisis yaitu campuran hidrogen dan oksigen dengan nama *Brown's Gas* (Hidayatullah, 2008).

Menurut Suyuty (2011), gas hidrogen dan oksigen yang dihasilkan dari reaksi elektrolisis ini membentuk gelembung pada elektroda dan dapat dikumpulkan. Prinsip ini kemudian dimanfaatkan untuk menghasilkan hidrogen yang dapat digunakan sebagai bahan bakar kendaraan hidrogen. Secara khusus, gas HHO memiliki karakteristik ledakan pada saat dibakar dan menghasilkan afinitas yang baik terhadap lingkungan. Pada proses pembakaran, volume gas HHO mengempis karena volumenya lebih besar dari campuran gas H₂ dan O₂ sebelum dilakukan proses pembakaran (Yong et.al., 2005).

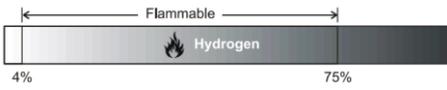
Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, beberapa parameter yang dapat mempengaruhi produktivitas *Brown's gas* pada generator HHO seperti besarnya daya yang digunakan, besarnya arus yang digunakan, material elektroda, jarak celah antar pelat, temperatur, konsentrasi katalis elektroda, jenis katalis yang digunakan, jumlah pelat netral pada generator, dan sebagainya.

2.4.1 Hidrogen

Salah satu produk dari elektrolisis yaitu gas hidrogen (H₂). Hidrogen termasuk gas yang sangat reaktif. Proses pembakaran hidrogen akan menghasilkan ledakan dengan suhu yang tinggi. Hidrogen merupakan unsur kimia dengan nomor atom 1 dan massa atom 1,00797. Unsur paling ringan di permukaan bumi yaitu hidrogen dengan jumlah presentase 75% dibanding unsur kimia yang lain (David, 1997). Hidrogen terbakar menurut persamaan kimia :



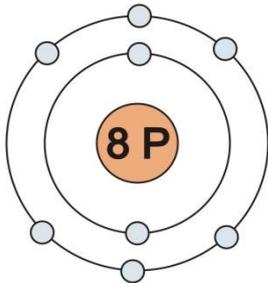
Tabel 2.1 *Properties of Hydrogen*

<i>Characteristic</i>	<i>Value</i>
<i>Vapor Density (at 68 F; 20 °C, 1 atm)</i>	0.005229 lb/ft ³ (0.08376 kg/m ³)
<i>Liquid Density (at normal boiling point, 1 atm)</i>	4.432 lb/ft ³ (70.8 kgm ³)
<i>Higher Heating Value (at 25 °C and 1 atm)</i>	61,000 Btu/lb (141.86 kJ/g)
<i>Lower Heating Value (at 25 °C and 1 atm)</i>	51,500 Btu/lb (119.93 kJ/g)
<i>Energy Density (LHV) (gas at 1 atm & 15 °C)</i>	270 Btu/ft ³ (10,050 kJ/m ³);
<i>Flashpoint</i>	< -423 °F (< -253 °C; 20 K)
<i>Flammability Range</i>	
<i>Autoignition Temperature</i>	1085 °F (585 °C)
<i>Octane Number</i>	130+ (<i>learn burn</i>)

Sumber : College of the Desert (2001: 1-7)

2.4.2 Oksigen

Oksigen adalah unsur kimia dalam tabel periodik yang mempunyai lambang O dengan nomer atom 8. Oksigen sangat mudah bereaksi dengan unsur lain menjadi oksida. Oksigen memiliki sifat fisik beratom dua dan berikatan menjadi gas oksigen dengan sifat tidak berwarna, tidak berasa, dan tidak berbau (Dianty, 2009). Oksigen merupakan unsur melimpah di urutan ketiga (Emsley, 2001).



Gambar 2.2 Struktur Atom Oksigen
Sumber: Brady (1999)

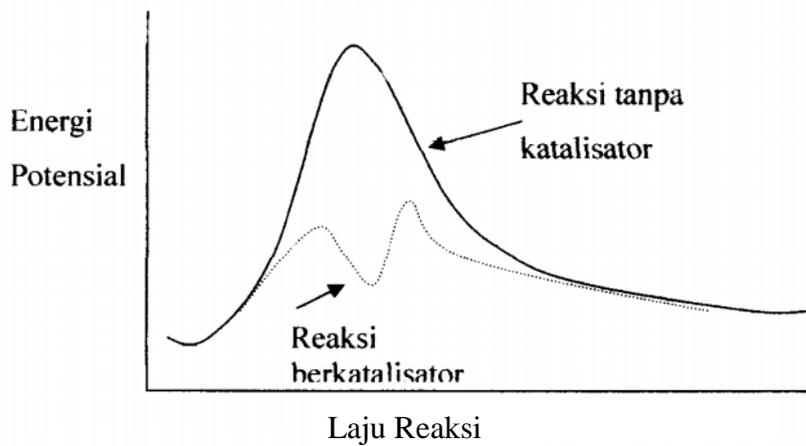
2.5 Pelat Netral

Pelat netral merupakan pelat dengan material tertentu yang tidak diberi arus listrik dan diletakkan di dalam generator HHO di antara pelat anoda dan katoda dengan dipisahkan oleh gasket pada setiap pelatnya. Pada umumnya pelat netral diaplikasikan pada generator HHO tipe *dry cell*. Menurut Prayitno (2016) penambahan pelat netral dapat menambah luasan reaksi elektrolisis di dalam generator HHO dan dapat mengurangi temperatur sistem sehingga dapat meningkatkan laju produksi *Brown's gas*. Namun semakin banyaknya jumlah pelat netral dapat menambah besar hambatan pada generator HHO, yang mengakibatkan semakin besarnya energi yang dibutuhkan untuk dapat terjadinya reaksi elektrolisis.

2.6 Katalisator

Menurut Widjajanti (2005) katalis merupakan sebuah zat yang mengubah laju suatu reaksi kimia tanpa menjadi produk akhir reaksi. Sedangkan katalisator adalah zat yang dapat mempercepat reaksi tetapi zat tersebut tidak ikut bereaksi sehingga tidak ada perubahan pada akhir reaksi. Katalisator tidak memberikan energi ke dalam sistem, namun katalis memberikan mekanisme reaksi alternatif dengan energi aktivasi yang lebih rendah dibandingkan dengan reaksi tanpa katalis, sehingga akan meningkatkan laju reaksi.

Ada beberapa contoh katalisator yang sering digunakan untuk mempercepat reaksi kimia seperti ; NaOH, KOH, NaHCO₃, NaCl dll. Gambar 2.3 memperlihatkan diagram perbandingan energi dari reaksi tanpa dan dengan katalis.



Gambar 2.3 Diagram perbandingan energi dari reaksi tanpa dan dengan katalis
 Sumber: Pengaruh katalisator terhadap laju reaksi, Endang Widjajanti (2005)

2.6.1 Natrium Hidroksida (NaOH)

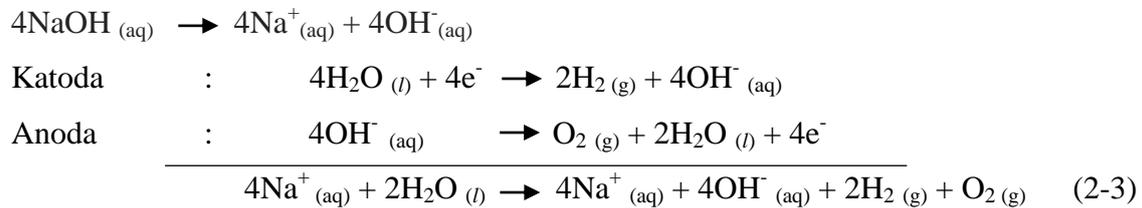
Natrium Hidroksida anhidrat berupa kristal putih. NaOH termasuk basa kuat yang bersifat korosif. Natrium Hidroksida juga sering disebut soda kaustik. Soda kaustik apabila dilarutkan dalam air akan menimbulkan reaksi eksotermis. Gambar 2.4 menjabarkan sifat fisik dari Natrium Hidroksida.

NaOH	Nilai
Berat molekul	39,998 gr/mol
Spesific Gravity	2,130
Titik leleh	318°C
Titik didih	1390°C
Kelarutan pada 20°C, gr/100gr air	299,6

Gambar 2.4 Sifat fisika NaOH
 Sumber: Surest (2010)

NaOH merupakan senyawa basa kuat dan pada penggunaannya sering bereaksi dengan asam lemah. NaOH sering digunakan untuk menghasilkan garam natrium dan mengendapkan logam-logam berat seperti hidroksinya dan mengontrol nilai pH air. NaOH sukar terbakar meskipun reaksi dengan metal amfoter seperti timah, seng dan aluminium menghasilkan gas nitrogen yang mudah meledak (Riama, 2015). Natrium hidroksida ketika dilarutkan dalam air akan membentuk larutan alkalin yang kuat. Dalam berbagai macam bidang industri Natrium Hidroksida sering digunakan, seperti dalam proses industri bubur kayu, kertas, tekstil, air minum, sabun, dan deterjen. Selain itu natrium hidroksida juga

merupakan basa yang paling umum digunakan dalam laboratorium kimia (Williams dan Schmitt, 2011). Persamaan (2-3) menunjukkan reaksi elektrolisis larutan NaOH pada logam inert :



2.7 Fraksi Massa Katalis

Fraksi massa katalis merupakan rasio perbandingan antara massa zat terlarut dengan massa zat total larutan (massa pelarut + massa terlarut). Pada penelitian ini digunakan katalis NaOH sebagai zat terlarut. Sedangkan zat pelarut yang digunakan adalah air. Fraksi massa katalis dapat dihitung pada persamaan (2-4) berikut ini (Sari dkk, 2016).

$$\% = \frac{\text{massa katalis (gr)}}{\text{massa larutan (gr)}} \times 100\% \quad (2-4)$$

$$\% = \frac{\text{massa katalis (gr)}}{(\text{massa air} + \text{massa katalis})\text{gr}} \times 100\%$$

Jika massa zat terlarut sebesar 45gr dan massa zat pelarut sebesar 2500 gr maka dapat dihitung fraksi massa katalisnya sebagai berikut.

$$\% = \frac{45\text{gr}}{(2500+45)\text{gr}} \times 100\%$$

$$\begin{aligned}
 \% &= \frac{45\text{gr}}{(2545)\text{gr}} \times 100\% \\
 &= 1.77 \%
 \end{aligned}$$

2.8 Elektroda

Elektroda adalah salah satu bagian terpenting dari generator HHO. Elektroda merupakan material yang bersentuhan langsung dengan larutan elektrolit dalam suatu sirkuit. Elektroda terbuat dari bahan konduktor berfungsi untuk menghantarkan arus listrik dari sumber listrik ke larutan elektrolit. Elektroda melakukan reaksi redoks (Reduksi – Oksidasi) guna memecah H₂O menjadi gas HHO. Reaksi reduksi terjadi pada katoda dan reaksi oksidasi terjadi pada anoda.

1. Potensial Elektroda

Pada reaksi redoks yang terjadi karena adanya aliran elektron yang menyebabkan adanya arus listrik yang mengalir. Besarnya arus listrik bergantung

dengan besarnya potensial antara kedua elektroda (katoda-anoda). Potensial elektroda didefinisikan potensial listrik yang ada pada sebuah elektroda yang berhubungan dengan oksidasi dan reduksi beberapa zat. Elektroda memiliki sifat yang cenderung teroksidasi atau cenderung tereduksi. Oksidasi dapat diartikan pelepasan elektron oleh sebuah molekul, atom, atau ion sedangkan reduksi dapat didefinisikan penambahan elektron oleh sebuah molekul, atom, atau ion (Suyuty, 2011). Kekuatan dalam mereduksi zat lain disebut potensial reduksi. Potensial reduksi dari elektroda memiliki lambang E . Dalam suatu sel elektrokimia potensial selnya merupakan selisih dari potensial reduksi kedua elektroda. Potensial reduksi yang terbesar akan tereduksi dan berfungsi sebagai katoda sedangkan elektroda lainnya teroksidasi berfungsi sebagai anoda (Pettruci, 1999). Potensial reaksi dapat dihitung dengan persamaan (2-5) berikut.

$$E_{\text{sel}} = E_{\text{katoda}} - E_{\text{anoda}} \quad (2-5)$$

Dalam menentukan potensial elektroda dapat digunakan dengan menggunakan potensial elektroda standar dari suatu unsur. Potensial elektroda standar yang dilambangkan E^0 .

Tabel 2.2 Potensial Elektroda Standart

Reaksi	Reduksi	Logam	E^0 (volt)
K^+	$+ e^-$	K	-2,92
Ba^{2+}	$+ 2 e^-$	Ba	-2,90
Ca^{2+}	$+ 2 e^-$	Ca	-2,87
Na^+	$+ e^-$	Na	-2,71
Mg^{2+}	$+ 2 e^-$	Mg	-2,37
Al^{3+}	$+ 3 e^-$	Al	-1,66
Mn^{2+}	$+ 2 e^-$	Mn	-1,18
$2 H_2O$	$+ 2 e^-$	$H_2 + 2 OH^-$	-0,83
Zn^{2+}	$+ 2 e^-$	Zn	-0,76
Cr^{3+}	$+ 3 e^-$	Cr	-0,71
Fe^{2+}	$+ 2 e^-$	Fe	-0,44
Cd^{2+}	$+ 2 e^-$	Cd	-0,40
Co^{2+}	$+ 2 e^-$	Co	-0,28
Ni^{2+}	$+ 2 e^-$	Ni	-0,25
Sn^{2+}	$+ 2 e^-$	Sn	-0,14
Pb^{2+}	$+ 2 e^-$	Pb	-0,13
$2 H^+$	$+ 2 e^-$	H_2	0,00
Sn^{4+}	$+ 2 e^-$	Sn^{2+}	+0,13
Bi^{3+}	$+ 3 e^-$	Bi	+0,30
Cu^{2+}	$+ 2 e^-$	Cu	+0,34
Ag^+	$+ e^-$	Ag	+0,80
Pt^{2+}	$+ 2 e^-$	Pt	+1,20
Au^{3+}	$+ 3 e^-$	Au	+1,50

Sumber : Braddy (1990)

2. Material Elektroda

Pada elektrolisis air dibutuhkan material elektroda yang memiliki sifat dengan konduktivitas listrik tinggi dan tahan korosi guna mendapatkan produktivitas

yang tinggi (Sari, 2016). Nilai konduktivitas listrik dari suatu material berbanding terbalik dengan nilai tahanan listriknya. Kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik disebut konduktivitas listrik sedangkan tahanan listrik adalah sesuatu yang dapat menghambat jalannya arus listrik yang mengalir.

Korosi juga mempengaruhi produktivitas *Brown's gas* dikarenakan korosi membentuk lapisan dipermukaan elektroda, hal ini dapat menghambat arus listrik yang mengalir (Silaban, 2013). Korosi sendiri adalah kerusakan atau degradasi suatu logam akibat reaksi redoks dengan berbagai zat yang menghasilkan senyawa yang tidak dikehendaki.

Material elektroda yang digunakan untuk elektrolisis dibagi 2 yaitu elektroda inert (pasif) dan elektroda tidak inert (aktif). Elektroda inert adalah elektroda yang tidak ikut bereaksi baik sebagai katoda maupun sebagai anoda, sehingga dalam elektrolisis yang mengalami reaksi redoks adalah elektrolit sebagai zat terlarut atau air sebagai pelarut. Elektroda inert merupakan elektroda terbaik dalam proses elektrolisis contohnya adalah karbon (C), platina (Pt). Sedangkan elektroda tidak inert adalah elektroda yang mempengaruhi reaksi oksidasi pada anoda, biasanya anoda akan mengalami oksidasi yang diikuti oleh reaksi reduksi pada katode. Contoh dari elektroda tidak inert adalah Fe, Al, Cu, Zn, Ag, dan Au (Riyanto, 2013:17-18). Elektroda inert merupakan elektroda terbaik dalam proses elektrolisis air. Elektroda inert memiliki kelemahan dalam segi harga dan ketersediaan dipasaran.

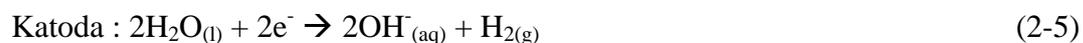
Pada penelitian ini menggunakan elektroda dengan material *Stainless Steel* yang merupakan logam paduan iron (besi) yang memiliki minimal 12 % kromium (Cr). Unsur ini membentuk bagian lapisan protective layer (lapisan pelindung anti korosi) yang menghalangi proses oksidasi besi (Fe). Oksidasi oksigen pada krom akan membentuk lapisan protective layer secara spontan. (Purwanti dan Ferihan, 2013). Dengan pelapisan krom pada besi sehingga membentuk logam stainless steel akan mendapatkan banyak keuntungan antara lain sangat tahan terhadap korosi, kuat dan tidak mudah tergores dan permukaan mengkilat dan halus. Pelat stainless steel juga memiliki harga murah dan sangat mudah didapatkan dipasaran.

Chemical Composition of Austenitic Stainless Steels						
AISI type	Nominal composition (%)					
	C max.	Mn max.	Si max.	Cr	Ni	Others*
201	0.15	7.5*	1.00	16.00–18.00	3.50–5.50	0.25 max. N
202	0.15	10.00*	1.00	17.00–19.00	4.00–6.00	0.25 max. N
205	0.25	15.50*	0.50	16.50–18.00	1.00–1.75	0.32/0.4 max. N
301	0.15	2.00	1.00	16.00–18.00	6.00–8.00	
302	0.15	2.00	1.00	17.00–19.00	8.00–10.00	
302B	0.15	2.00	3.00*	17.00–19.00	8.00–10.00	
303	0.15	2.00	1.00	17.00–19.00	8.00–10.00	0.15 min. S
303(Se)	0.15	2.00	1.00	17.00–19.00	8.00–10.00	0.15 min. Se
304	0.08	2.00	1.00	18.00–20.00	8.00–12.00	
304L	0.03	2.00	1.00	18.00–20.00	8.00–12.00	
304N	0.08	2.00	1.00	18.00–20.00	8.00–10.50	0.1/0.16 N
305	0.12	2.00	1.00	17.00–19.00	10.00–13.00	
308	0.08	2.00	1.00	19.00–21.00	10.00–12.00	
309	0.20	2.00	1.00	22.00–24.00	12.00–15.00	
309S	0.08	2.00	1.00	22.00–24.00	12.00–15.00	
310	0.25	2.00	1.50	24.00–26.00	19.00–22.00	
310S	0.08	2.00	1.50	24.00–26.00	19.00–22.00	
314	0.25	2.00	3.00 [†]	23.00–26.00	19.00–22.00	
316	0.08	2.00	1.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.00–3.00 Mo
316F	0.08	2.00	1.00	16.00–18.00	10.00–14.00	1.75–2.50 Mo
316L	0.03	2.00	1.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.00/3.00 Mo
316N	0.08	2.00	1.00	16.00–18.00	10.00–14.00	2.00–3.00 Mo
317	0.08	2.00	1.00	18.00–20.00	11.00–15.00	3.00–4.00 Mo
317L	0.03	2.00	1.00	18.00–20.00	11.00–15.00	3.00–4.00 Mo
321	0.08	2.00	1.00	17.00–19.00	9.00–12.00	5 × C min. Cb-Ta
330	0.08	2.00	1.5 [†]	17.00–20.00	34.00–37.00	0.10 TA 0.20 Cb
347	0.08	2.00	1.00	17.00–19.00	9.00–13.00	10 × C min. Cb-Ta
348	0.08	2.00	1.00	17.00–19.00	9.00–13.00	10C min. Cb-Ta 2.0 Mo 3.0 Cu
20Cb3	0.07	0.75	1.00	20.0	29.0	8 × C Min. Cb-Ta
904L	0.02	—	—	21.0	25.5	4.7 Mo 1.5 Cu

Gambar 2.5 Komposisi material stainless steel
Sumber: Metallic materials, Schweitzer (2006)

2.9 Reaksi Pada Katoda (Reduksi)

Jenis kation yang terdapat di dalam larutan yang akan dielektrolisis berpengaruh terhadap reaksi yang terjadi di katoda. Jika kation berasal dari logam-logam aktif (logam golongan IA, IIA, Al atau Mn), yaitu logam-logam yang potensial elektrodanya lebih kecil, maka air yang tereduksi. Pada katoda, terjadi reaksi reduksi saat proses elektrolisis berlangsung. Ion-ion bermuatan positif atau kation bergerak dari anoda ke katoda untuk reduksi. Pada elektrolisis air (H₂O), pada katoda dua molekul air bereaksi dengan menangkap dua elektron, tereduksi menjadi gas H₂ dan Hidroksida (OH⁻). Reaksi pada katoda :



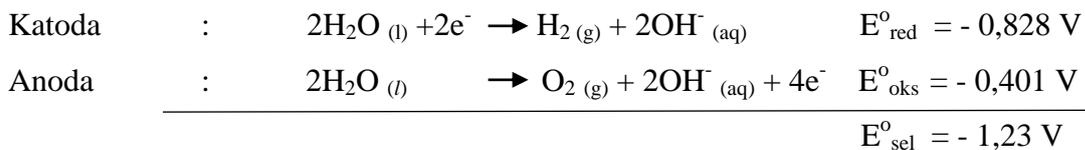
2.10 Reaksi Pada Anoda (Oksidasi)

Terjadi reaksi oksidasi pada anoda saat proses elektroforesis berlangsung. Ion-ion bermuatan negatif atau anion bereaksi dari katoda ke anoda untuk oksidasi. Pada proses elektrolisis air, pada anoda, dua molekul air lain terurai menjadi gas oksigen (O_2), melepaskan 4 ion H^+ .

Reaksi pada anoda



Jadi reaksi total dari proses elektrolisis air pada masing-masing elektroda sebagai berikut:



2.11 Konduktivitas Listrik

Konduktivitas listrik adalah tingkat arus listrik yang mampu dihantarkan suatu bahan. Konduktivitas listrik σ (S/cm) berhubungan dengan resistivitas ρ (Ω cm) sesuai dalam persamaan (2-7):

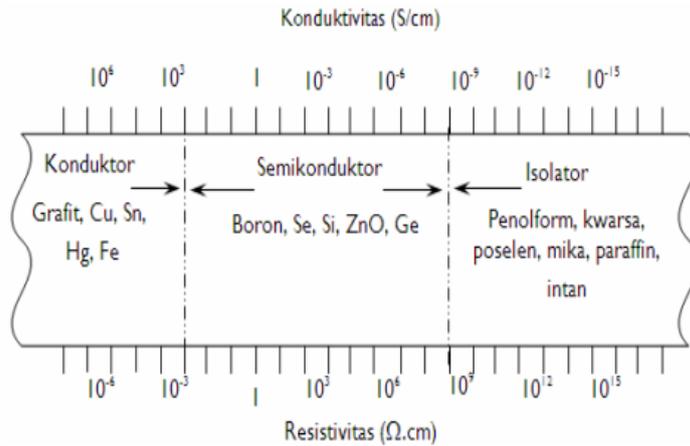
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2-7)$$

Keterangan:

σ = konduktivitas listrik (S/cm)

ρ = resistivitas atau hambatan jenis material (Ω -cm)

Peningkatan konduktivitas listrik disebabkan oleh eksitasi dari penambahan pengisian bebas yang diangkut oleh cahaya energi tinggi pada semikonduktor dan isolator. Material alami maupun buatan yang terdapat di alam dapat diklasifikasikan menjadi tiga yaitu konduktor, isolator dan semikonduktor. Nilai dari konduktivitas listrik ketiga material tersebut berbeda. Material semikonduktor mempunyai nilai konduktivitas antara selang dari (10^{-8} – 10^3) S/cm seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.6 Spektrum konduktivitas listrik dan resistivitas
Sumber: Jurnal Berkala Fisika (vol. 13, 2010)

Resistansi suatu material berhubungan dengan panjang, luas penampang lintang, temperatur dan tipe material. Pada material ohmik resistansinya tidak bergantung pada arus dan hubungan empiris ini disebut dengan hukum Ohm yang dinyatakan sesuai dalam persamaan 2-8 :

$$V = I.R ; R = \text{konstan} \quad (2-8)$$

Untuk material nonohmik, arus tidak setara dengan tegangan. Resistansinya bergantung pada kuat arus, didefinisikan sesuai dalam persamaan 2-9 :

$$R = \frac{V}{I} \quad (2-9)$$

Kurva hubungan tegangan dan kuat arus pada bahan Ohmik adalah linear sedangkan bahan nonohmik hubungannya tidak linear. Resistansi suatu kawat penghantar setara dengan panjang kawat dan berbanding terbalik dengan luas penampang lintang sesuai persamaan 2-10 :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-10)$$

Keterangan:

R = nilai hambatan suatu material (Ω)

ρ = hambatan jenis material ($\Omega\cdot\text{m}$)

L = panjang suatu kawat/material (m)

A = luas penampang material tertentu (m^2)

Dimana ρ merupakan resistivitas bahan penghantar. Satuan resistivitas adalah ohm meter ($\Omega\cdot\text{m}$) dan nilai setiap material berbeda-beda. Kebalikan dari resistivitas disebut konduktivitas σ . Adapun tingkat konduktivitas suatu bahan bergantung dari sifat bahan tersebut.

PROPERTIES OF SELECTED ENGINEERING MATERIALS					
PART 1 — METALS (Taken from numerous sources)					
Material	Specific gravity	Thermal conductivity, $\frac{\text{cal}\cdot\text{cm}}{\text{°C}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{sec}}^*$	Thermal expansion, $\frac{\text{in}}{\text{in}\cdot\text{°F}}$ at 68°F †	Electrical resistivity, $\frac{\text{ohm}\cdot\text{cm}}{\text{at } 68\text{°F}}^\ddagger$	Average modulus of elasticity, psi
Aluminum (99.9+)	2.7	0.53	12.5×10^{-6}	2.9×10^{-6}	10×10^6
Aluminum alloys	2.7(+)	0.4(±)	12×10^{-6}	$3.5 \times 10^{-6}(+)$	10×10^6
Brass (70Cu-30Zn)	8.5	0.3	11×10^{-6}	6.2×10^{-6}	16×10^6
Bronze (95Cu-5Sn)	8.8	0.2	10×10^{-6}	9.6×10^{-6}	16×10^6
Cast iron (gray)	7.15	—	5.8×10^{-6}	—	30×10^6
Cast iron (white)	7.7	—	5×10^{-6}	—	30×10^6
Copper (99.9+)	8.9	0.95	9×10^{-6}	1.7×10^{-6}	16×10^6
Lead (99+)	11.34	0.08	16×10^{-6}	20.65×10^{-6}	2×10^6
Magnesium (99+)	1.74	0.38	14×10^{-6}	4.5×10^{-6}	6.5×10^6
Monel (70Ni-30Cu)	8.8	0.06	8×10^{-6}	48.2×10^{-6}	26×10^6
Silver (sterling)	10.4	1.0	10×10^{-6}	1.8×10^{-6}	11×10^6
Steel (1020)	7.86	0.12	6.5×10^{-6}	16.9×10^{-6}	30×10^6
Steel (1040)	7.85	0.115	6.3×10^{-6}	17.1×10^{-6}	30×10^6
Steel (1080)	7.84	0.11	6.0×10^{-6}	18.0×10^{-6}	30×10^6
Steel (18Cr-8Ni stainless)	7.93	0.035	5×10^{-6}	70×10^{-6}	30×10^6

Gambar 2.7 Nilai resistivitas material

Sumber: Elements of material science, Van Vlack (1960)

Berikut merupakan hubungan konduktivitas listrik dan resistansi sesuai dalam persamaan 2-11 dan 2-12 :

$$R = \frac{L}{\sigma A} \quad (2-11)$$

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (2-12)$$

Keterangan:

R = nilai hambatan suatu material (Ω)

σ = konduktivitas listrik material (S/cm)

L = panjang suatu kawat/material (m)

A = luas penampang material tertentu (m^2)

Persamaan hubungan kenaikan temperature terhadap hambatan suatu material dengan koefisien suhu setiap material dapat dilihat pada persamaan (2-13):

$$\Delta R = R_o (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (2-13)$$

Keterangan:

ΔR = hambatan pada temperature $t^\circ\text{C}$ (Ω)

R_o = hambatan awal material pada 0°C (Ω)

α = koefisien suhu per $^\circ\text{C}$ pada 0°C ($1/^\circ\text{C}$)

ΔT = perubahan temperature ($^\circ\text{C}$)

2.12 Parameter Performansi *Electrolyzer Dry cell*

1. Daya Generator HHO

Elektrolisis air merupakan proses kimia yang mengubah energi listrik menjadi energi kimia. Proses elektrolisis air memerlukan sumber energi listrik searah yang bersumber dari listrik PLN (dengan dirubah dari arus bolak balik menjadi searah dengan inverter), Energi Surya (*Solarcell*) atau baterai (*accumulator*) untuk dialirkan ke pelat elektroda pada generator HHO. Pada penelitian ini digunakan energi listrik dari PLN dengan dirubah dari arus bolak balik menjadi searah dengan menggunakan inverter.

Untuk mendapatkan nilai efisiensi yang tinggi dari generator HHO penggunaan daya listrik haruslah seminimal mungkin dengan laju produksi *Brown's gas* yang tinggi. Daya listrik yang digunakan selama proses elektrolisis berlangsung dapat ditunjukkan pada Persamaan (2-9) berikut (Bueche, 1985).

$$P = V \cdot I \quad (2-9)$$

Keterangan :

P = Daya yang dibutuhkan generator HHO (watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Kuat arus listrik (Ampere)

Pada persamaan (2-9) dapat disimpulkan bahwa semakin besar tegangan atau semakin besar kuat arus listrik yang digunakan pada proses elektrolisis air maka akan memperbesar daya yang dibutuhkan generator HHO dikarenakan tegangan atau kuat arus berbanding lurus dengan daya yang dibutuhkan.

2. Laju produksi *Brown's gas*

Proses elektrolisis air menggunakan generator HHO tipe kering akan menghasilkan *Brown's gas* atau gas HHO. Sehingga diperlukan untuk mengetahui laju produksi *Brown's gas* atau gas HHO yang dihasilkan oleh guna mengetahui seberapa bagus kinerja dari generator tersebut. Semakin tinggi laju produksi gas yang dihasilkan maka kita dapat mengetahui kerja terbaik dari Generator HHO yang kita gunakan. Laju produksi Gas HHO tergantung pada volume yang dihasilkan oleh Generator HHO setiap detikanya. Untuk mengetahui laju produksi *Brown's gas* atau gas HHO dapat ditunjukkan pada Persamaan (2-10) berikut (Sopandi, 2015).

$$Q = \frac{V}{t} \left[\frac{l}{s} \right] \quad (2-10)$$

Keterangan :

Q = Produktivitas Gas HHO (l/s)

V = Volume Gas HHO (l)

t = waktu yang digunakan untuk menghasilkan Gas HHO (s)

3. Efisiensi Generator HHO

Pengertian efisiensi adalah perbandingan antara energi yang dihasilkan (output) dengan jumlah energi yang digunakan (input) untuk melakukan proses tersebut. Untuk dapat menghitung efisiensi pada suatu sistem dapat dituliskan pada Persamaan (2-11) berikut (Williams, 2002).

$$\eta = \frac{\text{Energi yang dihasilkan}}{\text{Energi yang Digunakan}} \quad (2-11)$$

Pada proses elektrolisis air efisiensi didefinisikan sebagai jumlah energi yang dihasilkan (gas HHO) pada proses elektrolisis air (output) dibandingkan dengan jumlah energi yang dibutuhkan pada proses elektrolisis air (input) pada Generator HHO harus mengetahui terlebih dahulu jumlah energi yang digunakan (input) yang digunakan dalam proses elektrolisis air. Untuk mengetahui energi yang digunakan untuk elektrolisis air dapat ditentukan oleh kuat arus, tegangan, dan nilai hambatan yang digunakan selama proses elektrolisis air berlangsung. Untuk mengetahui hubungan kuat arus, tegangan dan nilai hambatan dalam proses elektrolisis air dapat dilihat pada Persamaan (2-12) berikut ini (Bueche, 195).

$$V = I \cdot R \quad (2-12)$$

Keterangan :

V= Beda Potensial Tegangan (Volt)

I = Kuat Arus Listrik (Ampere)

R = Hambatan (Ohm)

Energi berguna yang terkandung dalam bahan bakar merupakan hasil kali dari volume bahan bakar, massa jenis bahan bakar dan *Lower Heating Value* (LHV) bahan bakar. Oleh karena itu sebelumnya kita harus mengetahui masing masing nilai tersebut untuk mengetahui jumlah energi yang terkandung pada gas HHO.

Nilai- nilai yang perlu diketahui terlebih dahulu yaitu diantaranya massa jenis gas HHO dan nilai LHV untuk gas HHO.

- Menentukan massa jenis *Brown's gas*

Pada proses elektrolisis air terjadi proses pemisahan air menjadi hidrogen (H_2) dan oksigen (O_2), jika massa air (H_2O) yang dielektrolisis sebesar 1 Kg maka dapat disimpulkan hasil produk *Brown's* juga terdiri dari massa total hidrogen (H_2) dan Oksigen (O_2) juga sebanyak 1 Kg. Menurut tabel periodik unsur bahwa nilai $Mr H_2O = 18$, $Mr H_2 = 2$, $Mr O_2 = 32$ maka didapat :



Dari persamaan reaksi di atas dapat di ketahui massa jenis *Brown's gas*. Jika pada kondisi STP (*standard temperature pressure*) massa jenis hidrogen (H_2) $\rho_{H_2} = 0,08235$ gr/lit dan oksigen (O_2) $\rho_{O_2} = 1,3088$ gr/liter (*Cole Parmer Instrument, 2005*), maka massa jenis *Brown's gas* (ρ_{HHO}) dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2-14) berikut ini.

$$\begin{aligned}
 \rho_{HHO} &= \frac{m_{HHO}}{V_{HHO}} = \frac{(m_{H_2} + m_{O_2})}{V_{HHO}} = \frac{(\rho_{H_2} \cdot V_{H_2} + \rho_{O_2} \cdot V_{O_2})}{V_{HHO}} & (2-14) \\
 &= \frac{(\rho_{H_2} \cdot \frac{2}{3} V_{HHO} + \rho_{O_2} \cdot \frac{1}{3} V_{HHO})}{V_{HHO}} \\
 &= \frac{2}{3} \rho_{H_2} + \frac{1}{3} \rho_{O_2} \\
 \rho_{HHO} &= \left(\frac{2}{3} \times 0,08235 \frac{\text{gr}}{\text{lt}} \right) + \left(\frac{1}{3} \times 1,3088 \frac{\text{gr}}{\text{lt}} \right) \\
 &= 0,491167 \text{ gram/lit}
 \end{aligned}$$

- *Lower Heating Value (LHV) Brown's gas*

Untuk gas hidrogen (H_2) sendiri memiliki nilai kalor sebesar 119,93 kJ/gram (Wardana, 2008:83). Untuk mengetahui nilai kalor dari *Brown's gas* terlebih dahulu harus mengetahui perbandingan massa antara gas hidrogen (H_2) yang terdapat dalam *Brown's gas*. Jika massa H_2 dalam *Brown's gas* adalah sebesar 1/9, maka nilai LHV (*Lower Heating Value*) *Brown's gas* merupakan 1/9 kali dari nilai LHV (*Lower Heating Value*) gas H_2 , yaitu = $1/9 \times 119,93 \text{ kJ/gr} = 13,25 \text{ kJ/gr}$ atau 13250 J/gr.

Secara teoritis perhitungan efisiensi generator HHO dapat ditunjukkan pada Persamaan (2-15) berikut (Marlina, dkk. 2013).

$$\eta = \frac{\text{Energi yang dimiliki oleh HHO hasil elektrolisis}}{\text{Energi yang dibutuhkan untuk memproduksi gas HHO}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{M_{\text{HHO}} \times LHV_{\text{HHO}}}{P} \times 100 \%$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{HHO}} \times \rho_{\text{HHO}} \times LHV_{\text{HHO}}}{P} \times 100\% \quad (2-15)$$

Keterangan :

Q_{HHO} = Debit Gas HHO yang dihasilkan (l/s)

LHV_{HHO} = Nilai energi terendah yang dibutuhkan agar gas HHO dapat bereaksi (J/gr)

ρ_{HHO} = massa jenis gas HHO (gr/l)

P = Daya yang digunakan untuk proses elektrolisis (Watt)

Dari persamaan (2-15) dapat disimpulkan bahwa efisiensi generator HHO berbanding terbalik dengan konsumsi daya yang digunakan untuk proses elektrolisis air. Semakin besar energi listrik yang digunakan untuk proses elektrolisis maka akan menyebabkan penurunan efisiensi Generator HHO dikarenakan nilainya berbanding terbalik (Wiryawan dll, 2013). Semakin kecilnya volume gas HHO yang dihasilkan maka nilai efisiensi yang dihasilkan juga menurun dikarenakan nilainya berbanding lurus.

2.13 Hipotesa

Penambahan jumlah pelat netral akan meningkatkan produktivitas *Brown's gas*, dikarenakan akan memperbanyak luas reaksi pada setiap pelat, dan terjadi distribusi temperatur yang lebih merata. Namun, penambahan pelat yang terlalu banyak akan menambah hambatan pada generator HHO sehingga membutuhkan daya yang lebih besar.

Sedangkan untuk posisi susunan lubang pelat netral yang paling baik adalah posisi susunan vertikal, horizontal, dan berselang-seling. Hal tersebut dikarenakan semakin baik laju aliran elektrolit dan gas hasil elektrolisis, akan menghantarkan reaksi yang lebih menyeluruh pada permukaan generator HHO sehingga produktivitas *Brown's gas* lebih tinggi.

