



TUGAS AKHIR - TM 141585

# KARAKTERISASI UNJUK KERJA GENERATOR GAS HHO TIPE *DRY CELL* DENGAN ELEKTRODA TITANIUM DAN PENAMBAHAN PWM

ABDUL HAKIM  
NRP 2113 106 005

Dosen Pembimbing  
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



TUGAS AKHIR - TM 141585

# KARAKTERISASI UNJUK KERJA GENERATOR GAS HHO TIPE *DRY CELL* DENGAN ELEKTRODA TITANIUM DAN PENAMBAHAN PWM

ABDUL HAKIM  
NRP 2113 106 005

Dosen Pembimbing:  
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM 141585

***PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF DRY  
CELL HHO GAS GENERATOR WITH TITANIUM  
ELECTRODES AND ADDITIONAL PWM***

ABDUL HAKIM  
NRP 2113 106 005

Advisor Lecturer:  
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

**LEMBAR PENGESAHAN**

**KARAKTERISASI UNJUK KERJA GENERATOR GAS  
HHO TIPE DRY CELL DENGAN ELEKTRODA  
TITANIUM DAN PENAMBAHAN PWM**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Abdul Hakim**

Nrp. 2113 106 005

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT. (Pembimbing)  
NIP. 197301161997021001
2. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc (Penguji I)  
NIP. 196604021989031002
3. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh W. M (Penguji II)  
NIP. 195312191981031001
4. Ary Bachtiar K. P., ST., MT., Ph.D. (Penguji III)  
NIP. 197105241997021001



**SURABAYA  
Juli, 2016**

# KARAKTERISASI UNJUK KERJA GENERATOR GAS HHO TIPE *DRY CELL* DENGAN ELEKTRODA TITANIUM DAN PENAMBAHAN PWM

Nama Mahasiswa : Abdul Hakim  
NRP : 2113 106 005  
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT

## ABSTRAK

Ketersediaan bahan bakar minyak semakin terbatas dan hasil pembakarannya berdampak pada pencemaran lingkungan, maka segala usaha untuk menghemat konsumsi bahan bakar dan pemanfaatan energi ramah lingkungan harus terus dilakukan. seiring dengan meningkatnya pemakaian minyak bumi khususnya di sektor transportasi, menyebabkan tingginya emisi polutan yang dihasilkan dari proses pembakaran, seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), sulfur oksida (SO<sub>x</sub>), dan zat debu timbal (Pb). Pada penelitian yang sudah dilakukan dengan sistem *direct connection*, temperatur mencapai lebih dari 90°C menyebabkan bejana generator HHO menjadi rusak dan meleleh. Apabila temperaturnya terus naik maka gas HHO yang dihasilkan akan bercampur dengan uap air. Penelitian ini dikembangkan lagi dengan penambahan alat untuk mengontrol besarnya arus, frekuensi, dan *duty cycle* berupa rangkaian PWM (*Pulse Width Modulation*). Oleh karena itu diperlukan penelitian mengenai karakteristik dan unjuk kerja dari beberapa tipe generator untuk mendapatkan optimasi terbaik.

Pada penelitian ini, pengembangan generator HHO menggunakan tipe kering (*dry cell*). Pengujian tipe generator dengan penambahan PWM divariasikan berupa *duty cycle*: 20%, 40%, 60%, 80% dan 100% (*direct connection*). Konfigurasi generator menggunakan elektroda titanium *grade 1* sebanyak 12 plat dan dimensi luasannya 80 x 80 mm. Pengujian dilakukan di

laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar Jurusan Teknik Mesin ITS. Parameter yang diukur dalam pengujian adalah voltase, arus, temperatur elektrolit generator HHO dan *mass flowrate* produksi gas HHO. Sedangkan yang dihitung adalah kebutuhan energi spesifik, produksi gas HHO spesifik, dan efisiensi generator HHO.

Dari hasil penelitian ini didapatkan karakterisasi unjuk kerja generator HHO terbaik dari generator gas HHO. Efisiensi terbaik pada generator *dry cell* dengan variasi *duty cycle* 60% yaitu 65,01%. Laju produksi gas HHO terbesar pada variasi *duty cycle* 80% sebesar  $3,2188 \times 10^{-6}$  kg/s. Konsumsi daya terbesar pada *duty cycle* 80% yaitu 99,0 Watt. Untuk nilai arus dan temperatur cenderung naik untuk semua variasi pengujian, khususnya pada variasi *duty cycle* 100% yakni arus dan temperaturnya mencapai 12,5 A dan 71,1°C pada saat waktu pengujian selama 40 menit. Sehingga karakteristik generator dengan penambahan PWM (20%, 40%, 60% dan 80%) ini mampu menambah waktu kerja generator dibandingkan dengan PWM 100% (*direct connection*).

***Kata kunci : generator gas HHO, dry cell, titanium, PWM 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%***

# PERFORMANCE CHARACTERIZATION OF DRY CELL HHO GAS GENERATOR WITH TITANIUM ELECTRODES AND ADDITIONAL PWM

**Student Name** : Abdul Hakim  
**NRP** : 2113106005  
**Department** : Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Adviser Lecturer** : Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

## ABSTRACT

*The availability of fuel oil burning increasingly limited and the results have an impact on environmental pollution, then all the effort to save fuel consumption and utilization of environmentally friendly energy should be done. One of them by using HHO gas to the Motor Combustion. In studies that have been conducted with a direct connection, the electrolyte temperature is over 90 ° C causes the HHO generator vessels become damaged and melt. If the temperature continues to rise, the HHO gas produced will be mixed with water vapor. This research was developed with additional means to control the amount of current, frequency, and duty cycle a series PWM (Pulse Width Modulation). Therefore, research is needed on the specific characteristics and performance of several types of generators to get the best optimization.*

*In this study, the development of HHO generator uses dry type (dry cell). The second type of generator testing with the addition of such varied PWM duty cycle: 20%, 40%, 60%, 80% and 100% (direct connection). Generator configuration using grade 1 titanium electrode plates and as much as 12 areas of dimensions 80 x 80 mm. Tests conducted in the laboratory and Fuel*

*Combustion Engineering Department of Mechanical Engineering at ITS. The parameters measured in the test is voltage, current, temperature electrolyte HHO generator and the mass flowrate HHO gas production. Meanwhile, what counts is the specific energy needs, specific HHO gas production, and efficiency HHO generator.*

*From the results of this study, the characterization of the performance of the best of the HHO generator HHO gas generator. The best efficiency on dry cell generator with 60% duty cycle variation is 65.01%. The HHO gas production rate at 80% duty cycle variation of  $3.2188 \times 10^{-6}$  kg / s. The power consumption at 80% duty cycle is 99.0 Watt. For the current rating and the temperature tends to rise for all variations of the test, especially at 100% duty cycle variation of the flow and the temperature reaches 12.5 A and 71.1 °C at the time of testing for 40 minutes. So that the characteristics of the generator with the addition of PWM (20%, 40%, 60% and 80%) are able to add work time compared to PWM generator 100% (direct connection).*

***Keywords: HHO gas generator, dry cell, titanium, PWM 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%***

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>TITLE PAGE .....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	5
1.3 Batasan Masalah .....	5
1.4 Tujuan Penelitian .....	6
1.5 Manfaat Penelitian .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>	<b>7</b>
2.1 Proses Elektrolisis Air untuk Memproduksi Gas HHO.....	7
2.1.1 Karakteristik <i>Browns Gas</i> (HHO).....	9
2.1.2 Entalpi Penguraian Gas H <sub>2</sub> O .....	10
2.2 Larutan Elektrolit Sebagai Katalis .....	10
2.3 Generator HHO.....	12
2.3.1 Prinsip kerja Generator HHO .....	12
2.3.2 Generator HHO Berbentuk Susunan Pelat .....	13

2.3.3 Klasifikasi Generator HHO .....	13
2.4 Elektroda .....	15
2.5 Parameter Unjuk Kerja Generator HHO .....	22
2.5.1 Kebutuhan Energi Spesifik .....	23
2.5.2 Produksi Gas HHO Spesifik .....	24
2.5.3 Efisiensi Generator HHO ( $\eta_{HHO}$ ) .....	25
2.5.4 Kenaikan Temperatur Elektrolit pada Generator HHO .....	28
2.5.4.1 Gambar Ilustrasi Aliran Arus Listrik dalam <i>HHO Cell</i> .....	29
2.5.4.2 Properties Material .....	30
2.5.4.3 Persamaan Total <i>Heat Transfer</i> pada Generator HHO .....	31
2.5.4.4 Kenaikan Temperatur Elektrolit pada Generator HHO .....	32
2.6 PWM ( <i>Pulse Width Modulation</i> ).....	32
2.7 <i>Duty cycle</i> pada PWM.....	33
2.8 Penelitian Terdahulu .....	35
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>39</b>
3.1 Diagram Alir .....	39
3.2 Prosedur Pengujian pada Generator Gas HHO .....	40
3.2.1 Tahap Persiapan.....	41
3.2.1.1 Persiapan Generator .....	41
3.2.1.2 Persiapan Alat Ukur <i>Flowrate</i> Gas HHO.....	42

3.2.1.3 Langkah Persiapan Pengoperasian PWM .....	42
3.2.1.4 Langkah Persiapan Pengukuran <i>Flowrate</i>	
Gas HHO.....	43
3.2.2 Tahap Pengujian .....	45
3.3 Peralatan yang Digunakan.....	46
3.4 Tahap Pelaksanaan.....	53
<b>BAB IV PERHITUNGAN DAN ANALISA DATA .....</b>	<b>55</b>
4.1 Perhitungan .....	55
4.1.1 Daya yang dibutuhkan Generator Gas HHO .....	55
4.1.2 Laju Produksi Gas HHO.....	56
4.1.3 Effisiensi Generator Gas HHO .....	56
4.2 Analisa Data Generator Gas HHO Tipe <i>Dry Cell</i>	
dengan Kombinasi Elektroda Titanium dan SS 316 ....	57
4.2.1 Arus yang Digunakan Generator Gas HHO .....	57
4.2.2 Temperatur Fluida Generator Gas HHO.....	60
4.2.3 Daya yang dibutuhkan Generator Gas HHO .....	62
4.2.4 Laju Produksi Gas HHO yang Dihasilkan.....	63
4.2.5 Effisiensi Generator Gas HHO .....	65
4.3 Analisa Data Generator Gas HHO Tipe <i>Dry Cell</i>	
dengan Elektroda <i>Full SS 316</i> .....	67
4.3.1 Arus yang Digunakan Generator Gas HHO .....	67
4.3.2 Temperatur Fluida Generator Gas HHO.....	69
4.3.3 Daya yang dibutuhkan Generator Gas HHO .....	70
4.3.4 Laju Produksi Gas HHO yang Dihasilkan.....	71

4.3.5 Efisiensi Generator Gas HHO .....	73
4.4 Visualisasi Duty Cycle .....	70
4.5 Visualisasi Larutan Elektrolit dan Elektroda.....	75
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>81</b>
5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran.....	82
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>83</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>85</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian Dasar Sistem Elektrolisa.....	8
Gambar 2.2 Hubungan Reaksi Kimia terhadap Energi yang Dibutuhkan .....	11
Gambar 2.3 Hubungan Konsentrasi KOH terhadap Konduktivitas.....	12
Gambar 2.4 Generator HHO dengan Elektroda Berbentuk Susunan Pelat.....	13
Gambar 2.5 Bentuk Generator HHO Tipe <i>Wet Cell</i> .....	14
Gambar 2.6 Bentuk Generator HHO Tipe <i>Dry Cell</i> .....	15
Gambar 2.7 Titanium ukuran 80 x 80 mm .....	16
Gambar 2.8 Diagram Pourbaix Titanium (Ti-H <sub>2</sub> O) pada Temperatur 25°C .....	17
Gambar 2.9 Ilustrasi Proses Korosi pada Logam Zn.....	20
Gambar 2.10 Desain Generator HHO .....	22
Gambar 2.11 Luasan Elektroda pada Proses Terjadinya Elektrolisis Tipe <i>Dry Cell</i> .....	22
Gambar 2.12 Ilustrasi Aliran Listrik dan Heat Generation HHO Cell.....	29
Gambar 2.13 Rangkaian PWM-V2 menggunakan LM-324N....	33
Gambar 2.14 Skema Perhitungan Nilai <i>Duty Cycle</i> pada PWM.	34
Gambar 2.15 Skema Menghitung Tegangan Rata-rata Output PWM .....	34
Gambar 2.16 Lebar Pulse On dan Off dari <i>Duty Cycle</i> PWM...	35
Gambar 2.17 Grafik Hasil Penelitian Barkah Fitriyana .....	37
Gambar 2.18 Grafik Hasil Penelitian Iqbal Wahyudzin.....	37
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian .....	40
Gambar 3.2 Skema Pengujian yang Dilakukan Menggunakan PWM.....	44
Gambar 3.3 Generator HHO Tipe Kering .....	46
Gambar 3.4 Reserve Tank .....	47
Gambar 3.5 HHO Gas Flowmeter .....	48
Gambar 3.6 Gelas Ukur.....	48
Gambar 3.7 Baterai (Accu) .....	49

Gambar 3.8 Charger Accu.....	49
Gambar 3.9 Stopwatch.....	50
Gambar 3.10 Timbangan Digital.....	50
Gambar 3.11 Clamp Meter.....	51
Gambar 3.12 Thermometer.....	51
Gambar 3.13 Multitester Digital.....	52
Gambar 3.14 Osiloskop.....	52
Gambar 3.15 Rangkaian Elektronika PWM.....	53
Gambar 4.1 Grafik Arus Generator Terhadap Waktu.....	58
Gambar 4.2 Grafik Arus Generator Terhadap Temperatur.....	59
Gambar 4.3 Grafik Temperatur Elektrolit Terhadap Waktu.....	61
Gambar 4.4 Grafik Daya yang dibutuhkan Terhadap Waktu.....	62
Gambar 4.5 Grafik Laju Produksi Gas HHO Terhadap Waktu.....	63
Gambar 4.6 Grafik Laju Produksi Gas HHO Terhadap Temperatur.....	65
Gambar 4.7 Grafik Effisiensi Generator Terhadap Waktu.....	66
Gambar 4.8 Grafik Arus Generator Terhadap Waktu.....	68
Gambar 4.9 Grafik Arus Generator Terhadap Temperatur.....	69
Gambar 4.10 Grafik Temperatur Elektrolit Generator Terhadap Waktu.....	69
Gambar 4.11 Grafik Daya Terhadap Waktu.....	70
Gambar 4.12 Grafik Laju Produksi Gas HHO yang Dihasilkan Terhadap Waktu.....	71
Gambar 4.13 Grafik Laju Produksi Gas HHO yang Dihasilkan Terhadap Temperatur.....	72
Gambar 4.14 Grafik Efisiensi generator Gas HHO Terhadap Temperatur.....	73
Gambar 4.15 Grafik <i>Duty cycle</i> 20 % dan Frekuensi 1 kHz pada Osiloskop.....	74
Gambar 4.16 Grafik <i>Duty cycle</i> 40 % dan Frekuensi 1 kHz pada Osiloskop.....	74
Gambar 4.17 Grafik <i>Duty cycle</i> 60 % dan Frekuensi 1 kHz pada Osiloskop.....	75

Gambar 4.18 Grafik <i>Duty cycle</i> 80 % dan Frekuensi 1 kHz pada Osiloskop.....	75
Gambar 4.19 Generator HHO <i>Dry Cell</i> Sebelum Pengujian.....	76
Gambar 4.20 Elektroda SS 316 Tipe <i>Dry Cell</i> dengan Penambahan PWM Setelah Pengujian Mencapai Temperatur = 70°C.....	76
Gambar 4.21 Elektroda Titanium Tipe <i>Dry Cell</i> dengan Penambahan PWM Setelah Pengujian Mencapai Temperatur = 70°C.....	77
Gambar 4.22 Fluida Generator HHO <i>Dry Cell</i> Setelah Pengujian.....	78

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properties Gas Hidrogen Pada Kondisi Temperatur dan Tekanan Standar .....	9
Tabel 2.2 Entalpi Pembakaran dari berbagai zat pada 298°K, 1 atm .....	10
Tabel 2.3 Properties Fisik dari Titanium .....	16
Tabel 2.4 Spesifikasi <i>Stainless Steel</i> .....	18
Tabel 3.1 Lembar Data Pengujian Unjuk Kerja Generato HHO <i>Dry Cell</i> dengan penambahan PWM .....	46
Tabel 3.2 Jadwal Rencana Kegiatan Penelitian.....	54
Tabel 3.3 Rancangan Eksperimen .....	54

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR SIMBOL

$A_{tot}$	: Luasan total elektroda, $m^2$
$A_e$	: Luasan elektrolisis, $m^2$
$A_c$	: Luasan pendinginan, $m^2$
$c$	: Kalor jenis, $J/kg.K$
$C$	: Capacitor, <i>Farad</i>
$^{\circ}C$	: Derajat celcius
$\dot{E}_g$	: Energy generation, <i>Watt</i>
$\dot{E}_{out}$	: Energy out, <i>Watt</i>
$\dot{E}_{st}$	: Energy storage, <i>Watt</i>
$\epsilon$	: Emissivity, <i>0.8</i>
$F$	: Farad, satuan kapasitansi
$F$	: Bilangan Faraday, <i>Coloumb</i>
$h$	: Koefisien konveksi, $W/m^2.K$
$I$	: Arus listrik, <i>Ampere</i>
$k$	: Konduktifitas panas, $W/m.K$
$L$	: Panjang laluan, <i>m</i>
$\dot{m}_{HHO}$	: Laju aliran massa gas HHO, $kg/s$
$m_{H_2}$	: Massa hidrogen
$Mr$	: Berat molekul
$n$	: Molariras senyawa, <i>mol</i>
$n$	: rata-rata penurunan temperatur ( $\Delta T_{ON} : \Delta T_{OFF}$ ), %
$n_{H_2}$	: Mol hidrogen
$n_{H_2O}$	: Mol water
$\dot{n}$	: Molaritas senyawa waktu, $mol/s$
$P$	: Daya, <i>Watt</i>
$P$	: Tekanan gas ideal, <i>atm, Pa</i>
$Q$	: Debit produksi gas HHO, $m^3/s$
$Q_{conv}$	: Convection heat transfer rate, <i>Watt</i>
$Q_{cond}$	: Conduction heat transfer rate, <i>Watt</i>
$Q_{rqd}$	: Radiation heat transfer rate, <i>Watt</i>
$R$	: Resistor, <i>Ohm</i>
$R_{tot}$	: Resistansi total material, <i>Ohm/meter</i>

$R_s$	: Resistansi <i>stainless steel</i> , <i>Ohm</i>
$R_e$	: Resistansi elektrolit, <i>Ohm</i>
$\bar{R}$	: Konstanta gas ideal, <i>L.atm/mol.K</i>
$t$	: Time, <i>sekon</i>
$T$	: Temperatur, <i>K</i>
$T_{eq}$	: Temperatur rata-rata sistem, <i>K</i>
$T_c$	: Temperatur surface, <i>K</i>
$T_{inv}$	: Temperatur <i>ambient</i> , <i>K</i>
$V$	: Voltase, <i>Volt</i>
$V$	: Volume, <i>m<sup>3</sup></i>
$\dot{V}$	: Volume gas per detik, <i>L/s</i>
$W$	: Watt, satuan daya listrik
$Z$	: Konstanta ( $z=2$ untuk <i>H2</i> , $z=4$ untuk <i>O2</i> )
$\rho$	: Massa jenis, <i>kg/m<sup>3</sup></i>
$\rho_{HHO}$	: Massa jenis gas <i>HHO</i> , <i>kg/m<sup>3</sup></i>
$\eta$	: Effisiensi, %
$\sigma$	: Konstanta Boltzmann, <i>W/m<sup>2</sup>. K<sup>4</sup></i>
$\Delta h_f$	: Perubahan entalpi, <i>kJ/mol</i>
$\frac{dT}{dt}$	: Temperatur fungsi wakt, <i>°C/s</i>
$\Delta T_s(t)$	: Temperatur elektrolit <i>single HHO</i> fungsi waktu, <i>°C</i>
$\Delta T_d(t)$	: Temperatur elektrolit <i>double HHO</i> fungsi waktu, <i>°C</i>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan energi bahan bakar fosil saat ini semakin meningkat, namun disisi lain cadangan bahan bakar fosil jumlahnya semakin hari semakin menurun karena merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui. Kebutuhan bahan bakar, khususnya bahan bakar minyak (BBM) saat ini mencapai 1,5 juta *barrel* perhari, sementara produksi hanya mencapai 800 ribu *barrel* perhari. Diprediksikan cadangan bahan bakar minyak dunia akan habis dalam kurun waktu tidak lebih dari 53 tahun lagi [1]. Oleh karena itu menurut Kawano [2], seiring dengan meningkatnya pemakaian minyak bumi khususnya di sektor transportasi, menyebabkan tingginya emisi polutan yang dihasilkan dari proses pembakaran, seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), sulfur oksida (SO<sub>x</sub>), dan zat debu timbal (Pb). Kondisi ini akan memicu meningkatnya angka pencemaran udara dan juga mendorong manusia berusaha mencari bahan bakar alternatif terbarukan dengan emisi polutan rendah sehingga dapat mengurangi ketergantungan manusia terhadap minyak bumi dan mengurangi tingkat pencemaran udara yang disebabkan oleh kendaraan bermotor.

Salah satu upaya dalam pencarian sumber energi alternatif itu adalah dengan melakukan elektrolisis air murni dengan menggunakan generator gas HHO, yakni dengan mengalirkan arus listrik melewati media air tersebut dengan perantara elektroda (katoda dan anoda). Adanya peristiwa elektrolisis air menyebabkan atom-atom oksigen mendapat tambahan elektron, atom oksigen menjadi sebuah ion bermuatan negatif (O<sup>-</sup>), sedangkan atom-atom hidrogen dari air akan kehilangan elektronnya, atom hidrogen menjadi sebuah ion yang bermuatan positif (H<sup>+</sup>). Karena bermuatan positif, ion-ion H<sup>+</sup> akan tertarik dan berkumpul di katoda, pada saat menyentuh katoda ion H<sup>+</sup> akan menerima sebuah

elektron dan kembali menjadi sebuah atom H biasa tanpa bermuatan. Atom-atom hidrogen bergabung menjadi gas H<sub>2</sub> dalam bentuk gelembung gelembung, melalui katoda akan naik keatas keluar dari tabung.

Berikut adalah reaksi yang terjadi pada elektrolisis air [3].

- ✓ Reaksi oksidasi di anoda :  $2 \text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{O}_{2(g)} + 4 \text{H}^+_{(aq)} + 4 \text{e}^-$
- ✓ Reaksi reduksi di katoda :  $2 \text{H}^+_{(aq)} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(g)}$
- ✓ Reaksi keseluruhan :  $2 \text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2 \text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)}$

Generator HHO merupakan salah satu alat yang menggunakan prinsip kerja elektrolisis air, proses elektrolisis air pada generator gas HHO menghasilkan gas hidrogen dan oksigen. Seiring berjalannya waktu, proses elektrolisis terus berlangsung hingga volume dan gelembung gas hidrogen dan oksigen yang melekat pada elektroda akan bertambah, kemudian terlepas mengapung, dan akhirnya bergerak naik. Hasil dari penelitian, sebagian ahli menyebutkan bahwa gas yang tercipta akan berikatan satu sama lain menjadi gas HHO. Gas HHO terdiri dari dua ion H<sup>+</sup> yang berikatan magnetik (ikatan magnetik) dan mengikat satu ion O<sub>2</sub><sup>-</sup> [4]. Perkembangan penelitian mengenai generator HHO sudah banyak dikembangkan, terutama di Teknik Mesin ITS sendiri, salah satunya yang dilakukan oleh sdr. Yanur Arzaqa Ghifari. Penelitian sdr. Yanur Arzaqa Ghifari tersebut menghasilkan 2 tipe generator HHO yakni: tipe *wet cell* dan *dry cell* dengan menggunakan elektroda SS 316 dan penambahan PWM. Sedangkan pada tipe *dry cell* terbagi menjadi *dry cell* PWM dan non PWM, pada umumnya dengan jenis elektroda SS 316, SS 316L dan SS 304. Parameter yang mempengaruhi unjuk kerja HHO adalah jenis dan luasan elektroda dari jenis dan komposisi katalis yang digunakan.

Keuntungan generator HHO tipe *wet cell* adalah : gas yang dihasilkan umumnya lebih banyak dan stabil, perawatan generator lebih mudah, rancang bangun pembuatan generator HHO lebih mudah. Sedangkan keuntungan generator HHO tipe *dry cell* adalah: air yang ter-elektrolisa relatif lebih sedikit, yaitu hanya air

yang terjebak diantara elektroda. Panas yang ditimbulkan relatif kecil, karena selalu terjadi sirkulasi antara air panas dan dingin di reservoir (temperatur relatif tetap), panas dari elektroda juga dapat berkurang karena dibantu oleh pendinginan udara bebas. Arus listrik (Ampere) yang digunakan relatif lebih kecil, karena daya yang terkonversi menjadi panas semakin sedikit. Selain itu juga karena luas permukaan untuk proses elektrolisa yang relatif lebih kecil. Arus listrik dari elektroda terbatas pergerakannya karena air yang terelektrolisa juga terbatas, yakni diantara pelat elektroda sehingga arus listrik yang digunakan lebih maksimal.

Namun karena suhu generator HHO cenderung terus naik dalam waktu 1 sampai 2 jam maka pada penelitian kali ini akan dilakukan pembuatan generator HHO dengan jenis elektroda titanium. Pemakaian titanium sebagai elektroda pada percobaan ini, karena pada dasarnya titanium merupakan sebuah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol TI dan nomor atom 22. Titanium merupakan logam transisi yang ringan, kuat, berkilau serta tahan terhadap korosi (termasuk tahan terhadap air laut). Dipilihnya titanium disini sebagai bahan rancang bangun pada generator HHO tipe *dry cell* juga karena tingkat korosivitas lebih baik dari pada SS 316, dengan jenis bahan pengkorosi berupa KOH.

Dari banyak penelitian yang ada, material plat yang umum digunakan berbahan *stainless steel* dengan dimensi plat yang bervariasi diantaranya: 70mm x 70mm, 80mm x 80mm, 110mm x 110mm dan 120mm x 120mm. Namun material jenis ini mempunyai kekurangan diantaranya: temperatur yang terjadi selama proses elektrolisis terus naik, sehingga menyebabkan seal (O-ring) yang digunakan rusak, berakibat kebocoran pada dinding elektroda. Hanya bisa digunakan pada katalis jenis KOH, karena tingkat korositivitas yang kurang baik dibanding material seperti titanium, tembaga, dan aluminium. Laju produksi gas nya kecil karena *electrical resistivity* nya kurang baik dibanding dengan material diatas.

Sedangkan syarat material yang dibutuhkan untuk pembuatan elektroda HHO yaitu tahan terhadap korosi, mempunyai *electrical resistivity* yang baik, dan stabil temperaturnya selama proses elektrolisis air.

PWM (*Pulse Width Modulation*) merupakan suatu rangkaian kelistrikan untuk mengontrol kerja suatu peralatan yang memerlukan arus *pull in* yang besar dan untuk menghindari disipasi daya yang berlebihan dari peralatan yang akan dikontrol. PWM merupakan salah satu metode untuk mengatur kecepatan putaran motor dengan cara mengatur prosentase lebar pulsa terhadap periode dari suatu sinyal persegi dalam bentuk tegangan periodik yang diberikan ke motor sebagai sumber daya. Semakin besar perbandingan lama sinyal *high* dengan periode sinyal maka semakin cepat motor berputar. *Duty cycle* adalah perbandingan lama waktu suatu signal berada dalam kondisi high dengan lama waktu suatu signal tersebut dalam kondisi (*high + low*), *duty cycle* sangat berguna dalam merancang alat-alat yang menggunakan konsep PWM [5].

Berdasarkan uraian tersebut ingin dilakukan penelitian mengenai HHO tipe *dry cell* dengan material elektroda titanium, dengan harapan agar temperaturnya terkendali dan jumlah produksi gas nya relatif meningkat dari pada menggunakan material *stainless steel*. Meskipun begitu untuk lebih mengendalikan suhu pada penelitian ini juga ditambahkan PWM. Dengan variasi *duty cycle* : 20%, 40%, 60%, 80% dan 100%.

## 1.2 Perumusan Masalah

Sehubungan dengan penelitian mengenai generator gas HHO tipe *dry cell* dengan pemakaian material titanium *grade 1*, maka permasalahan yang akan dicari pemecahannya adalah :

1. Bagaimana karakterisasi unjuk kerja generator HHO pada tipe *dry cell* dengan elektroda titanium yang dinyatakan dalam : Kebutuhan energi spesifik, produksi gas HHO spesifik, efisiensi generator HHO, dan temperatur

elektrolit generator HHO, dengan variasi *duty cycle* : 20%, 40%, 60%, 80% dan 100%?

2. Bagaimana perubahan temperatur elektrolit generator HHO terhadap waktu pengujian?

### 1.3 Batasan Masalah

Agar pengujian yang dilakukan tidak terlalu melebar dari permasalahan yang ingin dicari pemecahannya, maka ditentukan batasan permasalahan. Adapun batasan masalah untuk penelitian ini adalah :

1. Percobaan ini dilakukan di laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar Teknik Mesin ITS, untuk mengetahui performa generator gas HHO.
2. Kondisi temperatur dan kelembaban udara setempat dianggap konstan.
3. Mengabaikan *fitting losses* pada saluran perpipaan pada generator gas HHO.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Untuk mengetahui karakterisasi dari unjuk kerja generator HHO pada tipe *dry cell* dengan elektroda titanium yang dinyatakan dalam : Kebutuhan energi spesifik, produksi gas HHO spesifik, efisiensi generator HHO, dan temperatur elektrolit generator HHO, dengan variasi *duty cycle* : 20%, 40%, 60%, 80% dan 100%.
2. Untuk mendapatkan perubahan temperatur elektrolit generator HHO terhadap waktu pengujian.

### 1.5 Manfaat Hasil Penelitian

Dari hasil penelitian, manfaat yang didapatkan antara lain :

1. Mendayagunakan energi alternatif yang efektif, efisien dan berdaya guna, yaitu pemanfaatan air dengan cara eletrolisis untuk menghasilkan bahan bakar hidrogen.

2. Sebagai pengembangan penelitian di Indonesia.
3. Memberikan sumbangan pemikiran bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan memberikan informasi seluas-luasnya kepada masyarakat tentang gas HHO.
4. Sebagai upaya mendukung program pemerintah tentang pemanfaatan energi alternatif.
5. Sebagai solusi alternatif mengurangi angka pencemaran udara yang disebabkan emisi gas buang kendaraan bermotor baik yang berbahan bakar bensin dan solar.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Proses Elektrolisis Air untuk Memproduksi Gas H<sub>2</sub>O

Proses pemisahan senyawa kimia menjadi unsur-unsur dasar penyusun dari senyawa tersebut atau memproduksi suatu molekul baru dengan memberi arus listrik disebut elektrolisis. Sedangkan elektrolisis air adalah proses elektrolisa yang dimanfaatkan untuk memecah molekul air (H<sub>2</sub>O) menjadi unsur dasar penyusunnya, yaitu hidrogen (H<sub>2</sub>) dan oksigen (O<sub>2</sub>). Elektrolisis air pada dasarnya dilakukan dengan mengalirkan arus listrik ke air melalui dua buah elektroda yaitu katoda (elektroda negatif) dan Anoda (elektroda positif) [4]. Agar proses elektrolisa dapat terjadi dengan cepat maka air tersebut dicampur dengan elektrolit sebagai katalis.

Adanya peristiwa elektrolisis air menyebabkan atom-atom oksigen mendapat tambahan elektron, atom oksigen menjadi sebuah ion bermuatan negatif (O<sup>-</sup>). sedangkan atom-atom hidrogen dari air akan kehilangan elektronnya, atom hidrogen menjadi sebuah ion yang bermuatan positif (H<sup>+</sup>). Karena bermuatan positif, ion-ion H<sup>+</sup> akan tertarik dan berkumpul di katoda, pada saat menyentuh katoda ion H<sup>+</sup> akan menerima sebuah elektron dan kembali menjadi sebuah atom H biasa tanpa bermuatan. Atom-atom hidrogen bergabung menjadi gas H<sub>2</sub> dalam bentuk gelembung-gelembung, melalui katoda akan naik keatas keluar dari tabung. Berikut adalah reaksi yang terjadi pada elektrolisis air.

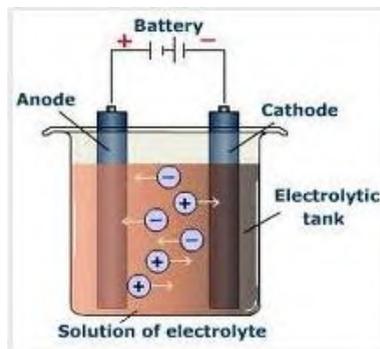
- ✓ Reaksi oksidasi di anoda :  $2 \text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{O}_{2(g)} + 4 \text{H}^+_{(aq)} + 4 \text{e}^-$
- ✓ Reaksi reduksi di katoda :  $2 \text{H}^+_{(aq)} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(g)}$
- ✓ Reaksi keseluruhan :  $2 \text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2 \text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)}$

Jika elektrolit yang digunakan adalah larutan basa seperti KOH atau NaOH (basa dari golongan periode IA, alkali tanah) maka akan terjadi reaksi basa. Pada reaksi basa, reaksi reduksi

terjadi di katoda dimana molekul air mengikat elektron ( $e^-$ ) sehingga terpecah menjadi gas Hidrogen ( $H_{2(g)}$ ) dan anion  $OH^-$ . Anion  $OH^-$  tersebut kemudian tertarik kesisi anoda dan terpecah menjadi gas oksigen dan molekul  $H_2O_{(l)}$ , Reaksi kimia pada proses elektrolisis air dengan menggunakan kalium hidroksida (KOH) ditunjukkan sebagai berikut :

- ✓ Reaksi reduksi di katoda (-) :  $2 H_2O (l) + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^-_{(aq)}$
- ✓ Reaksi oksidasi di anoda (+) :  $4OH^-_{(aq)} \rightarrow O_{2(g)} + 2H_2O (l) + 4e^-$
- ✓ Reaksi keseluruhan :  $2H_2O (l) \rightarrow 2H_{2(g)} + O_{2(g)}$

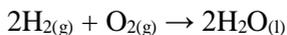
Akan tetapi jika elektrolit yang digunakan dari jenis garam seperti NaCl, KCl, dan  $Na_2CO_3$ , maka akan terjadi reaksi asam dan basa. Dari kedua reaksi asam ataupun basa dapat dilihat bahwa pada kedua reaksi tersebut produk yang dihasilkan dari elektrolisa 2 mol  $H_2O$  memiliki komposisi yang sama yaitu 2 mol gas hidrogen dan 1 mol gas oksigen. Pada kedua jenis reaksi diatas gas hidrogen juga dihasilkan pada elektroda negatif (katoda) dan gas oksigen dihasilkan pada elektroda positif (anoda). Berikut adalah rangkaian dasar sistem elektrolisis air.



*Gambar 2.1 Rangkaian Dasar Sistem Elektrolisa*

### 2.1.1 Karakteristik *Browns Gas* (HHO)

*Browns gas* (HHO) yang dihasilkan dari proses elektrolisis air terdiri dari gas hidrogen dan Oksigen, dengan perbandingan komposisi mol 2:1. Perbandingan ini adalah perbandingan yang stoikiometri untuk terjadinya reaksi pembakaran (Oksidasi) gas hidrogen oleh gas oksigen. Reaksi pembakaran pada gas HHO pada dasarnya adalah reaksi terikatnya kembali hidrogen pada oksigen untuk membentuk molekul air. Sebagaimana dapat dilihat pada persamaan reaksi kimia berikut ini:



Persamaan reaksi kimia tersebut merupakan kebalikan dari persamaan kimia pada elektrolisis air. Jika pada proses elektrolisa untuk memecah molekul air membutuhkan energi, maka sebaliknya pada reaksi oksidasi hidrogen dihasilkan sejumlah energi. Gas hidrogen mempunyai beberapa karakteristik yaitu tidak berwarna, mudah terbakar (*flameable*), sangat ringan, dan sangat mudah bereaksi dengan zat kimia lainnya.

Adapun nilai *properties* gas hidrogen pada kondisi temperatur dan tekanan standar dapat dilihat pada tabel 2.1 *properties* gas hidrogen pada kondisi temperatur dan tekanan standar. Namun gas HHO pada kondisi normal tidak akan terbakar dengan sendirinya tanpa ada sulutan api.

Tabel 2.1 *Properties* Gas Hidrogen Pada Kondisi Temperatur dan Tekanan Standar [6]

Reference temperature	68 °F/528 °R	293 K
Standard pressure (1 atm) psia	14.69 psia	101.325 kPa (abs)
Density (at 528 °R and 1 atm)	0.00523 lb/ft <sup>3</sup>	83.7 g/m <sup>3</sup>
Specific volume (at 528 °R and 1 atm)	191.4 ft <sup>3</sup> /lb	0.0119 m <sup>3</sup> /g
Specific heat	Cp = 3.425 Btu/lb-R Cv = 2.419 Btu/lb-R	Cp = 14.33 J/g-k Cv = 10.12 J/g-k
Velocity of sound	4246 ft/sec Low = 51596 Btu/lb High = 61031 Btu/lb	1294 m/sec Low = 119.93 kJ/g High = 141.86 kJ/g
Heat of combustion		
Flammability limits		
Hydrogen-air mixture	Lower = 4.0 vol%	Upper = 75 vol%
Hydrogen-oxygen mixture	Lower = 4.0 vol%	Upper = 95 vol%
Explosive limits		
Hydrogen-air mixture	Lower = 18.3 vol%	Upper = 59 vol%
Hydrogen-oxygen mixture	Lower = 15.0 vol%	Upper = 90 vol%
Minimum spark ignition energy at 1 atm		
In air	1.9×10 <sup>-8</sup> Btu	0.02 mJ
In Oxygen	6.6×10 <sup>-9</sup> Btu	0.007 mJ

### 2.1.2 Entalpi Penguraian Gas H<sub>2</sub>O

Reaksi suatu zat dengan oksigen disebut reaksi pembakaran. Zat yang mudah terbakar adalah unsur karbon, hidrogen, belerang, dan berbagai senyawa dari unsur tersebut. Contoh pembakaran dikatakan sempurna apabila karbon (C) terbakar menjadi CO<sub>2</sub>, hidrogen (H) terbakar menjadi H<sub>2</sub>O, belerang (S) terbakar menjadi SO<sub>2</sub>. Perubahan entalpi pada pembakaran sempurna 1 mol suatu zat yang diukur pada 298° K, 1 atm disebut entalpi pembakaran standar (*standard enthalpy of combustion*), yang dinyatakan dengan ΔHc0.

Entalpi pembakaran juga dinyatakan dalam kJ mol<sup>-1</sup>. Pada reaksi penguraian H<sub>2</sub>O adalah kebalikan dari reaksi pembentukan. Oleh karena itu, sesuai dengan azas kekekalan energi, nilai entalpi penguraian sama dengan entalpi pembentukannya, tetapi tandanya berlawanan. Harga entalpi pembakaran dari berbagai zat pada 298° K dan tekanan 1 atm diberikan pada tabel 2.2 berikut ini :

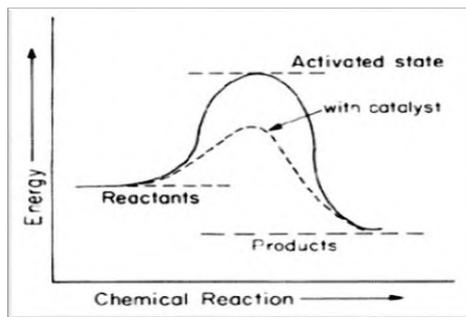
Tabel 2.2 Entalpi Pembakaran dari berbagai zat pada 298°K, 1 atm [7]

Nama Zat	Hc (kJ mol <sup>-1</sup> )	Persamaan Reaksi pembakaran
Karbon	-393,5	$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$
Hidrogen	-285,85	$H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$
	-241,8	$H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)}$
Belerang	-297	$S_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow SO_{2(g)}$
Karbon monoksida	-283	$CO_{(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$
Metana	-802	$CH_{4(g)} + 2O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2H_2O_{(g)}$

### 2.2 Larutan Elektrolit Sebagai Katalis

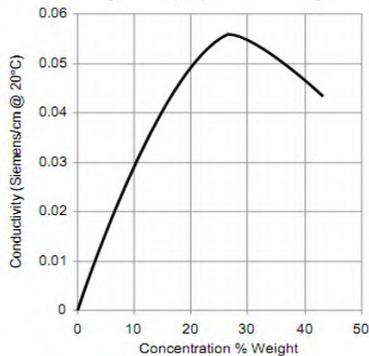
Pada proses elektrolisis air, katalis yang digunakan adalah larutan elektrolit. Elektrolit dapat didefinisikan sebagai konduktor listrik, dimana arus listrik dibawa oleh pergerakan ion. Dengan melarutkan elektrolit didalam air akan meningkatkan konduktifitas listrik dari air. Oleh karena itu dengan penambahan elektrolit sebagai katalis pada proses elektrolisis akan menurunkan energi

yang dibutuhkan, sehingga laju reaksi pemecahan molekul air menjadi lebih cepat [4] dan apabila jumlah elektrolit yang dilarutkan ke air semakin banyak maka konduktifitas listrik dari air akan semakin tinggi, maka laju produksi gas HHO yang dihasilkan dari proses elektrolisis air juga akan semakin meningkat, akan tetapi jika elektrolit yang dilarutkan ke air terlalu banyak maka energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan gas HHO akan semakin besar karena larutan elektrolit akan semakin jenuh sehingga pergerakan ion-ion didalamnya menjadi terhambat.



Gambar 2.2 Hubungan Reaksi Kimia terhadap Energi yang Dibutuhkan [8]

Banyak jenis katalis yang digunakan pada proses elektrolisis. Diantaranya yang sering digunakan yaitu sodium bikarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ), natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ), dan kalium hidroksida ( $\text{KOH}$ ). Selain itu, katalis tersebut berfungsi untuk mempermudah proses penguraian air menjadi hidrogen dan oksigen karena ion-ion katalisator mampu mempengaruhi kestabilan molekul air menjadi ion H dan HO yang lebih mudah dielektrolisis. Dengan kata lain energi untuk menguraikan air menjadi lebih rendah. Tampak pada grafik gambar 2.3 hubungan konsentrasi  $\text{KOH}$  terhadap konduktifitas dibawah ini bahwa konduktivitas listrik tertinggi berada disekitar 20%-30% dan dapat diuji dengan hidrometer baterai yang harus mempunyai *specific gravity* 1,1.



Gambar 2.3 Hubungan Konsentrasi KOH terhadap Konduktivitas [9]

## 2.3 Generator HHO

### 2.3.1 Prinsip kerja Generator HHO

Secara umum generator gas HHO tersusun atas 2 komponen dasar, yaitu tabung generator gas HHO dan sumber tenaganya. Tabung generator gas HHO terdiri atas tabung, sepasang elektroda dan elektrolit. Sedangkan sumber energi dapat berupa baterai ataupun *accu*.

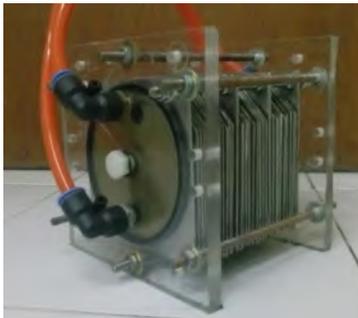
Prinsip kerja generator gas HHO berdasarkan elektrolisa air. Proses elektrolisis air pada generator gas HHO menghasilkan gas hidrogen dan oksigen. Seiring berjalannya waktu, proses elektrolisis terus berlangsung hingga volume dan gelembung gas hidrogen dan oksigen yang melekat pada elektroda akan bertambah, kemudian terlepas mengapung, dan akhirnya bergerak naik. Hasil dari penelitian, sebagian ahli menyebutkan bahwa gas yang tercipta akan berikatan satu sama lain menjadi gas HHO.

Gas HHO terdiri dari dua ion  $H^+$  yang berikatan magnetik (ikatan magnetik) dan mengikat satu ion  $O_2^-$ , berbeda dengan molekul  $H_2O$  yang tersusun atas dua ion  $H^+$  diikat oleh satu ion  $O_2^-$  dengan ikatan kovalen [10]. Pendapat ini masih terus diperdebatkan karena belum ada alat untuk membuktikan bahwasanya kedua gas tersebut berikatan sebagaimana pengertian

gas HHO. Sehingga, dalam penulisan penelitian ini, gas Hidrogen dan Oksigen yang terbentuk diasumsikan tidak berikatan satu sama lain, dan selanjutnya campuran kedua gas tersebut tetap disebut sebagai Gas HHO.

### 2.3.2 Generator HHO Berbentuk Susunan Pelat

Pada penelitian-penelitian terdahulu generator HHO yang banyak digunakan berupa elektroda bentuk spiral. Namun baru-baru ini mulai dikembangkan elektroda bentuk pelat seperti pada gambar 2.4 generator HHO dengan elektroda berbentuk susunan pelat sekaligus menjadi terobosan baru untuk generator HHO selanjutnya, karena memiliki luas permukaan yang lebih besar dibanding elektroda bentuk spiral.



*Gambar 2.4 Generator HHO Dengan Elektroda Berbentuk Susunan Pelat*

### 2.3.3 Klasifikasi Generator HHO

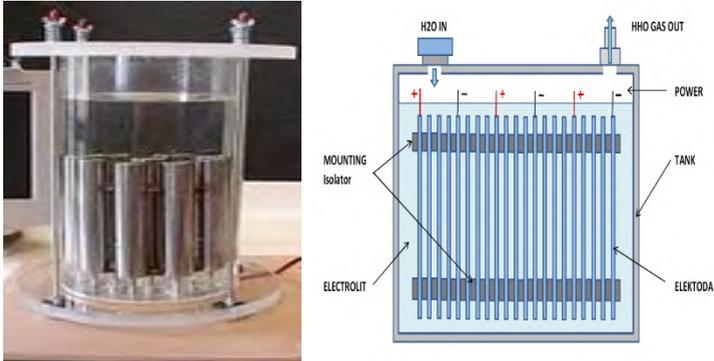
Generator HHO diklasifikasikan menjadi 2 tipe yaitu tipe basah (*wet cell*) dan tipe kering (*dry cell*).

#### a. Generator HHO Tipe *Wet Cell*

Tipe basah (*wet type*) adalah generator HHO dimana semua elektrodanya terendam cairan elektrolit di dalam sebuah bejana air seperti terlihat pada gambar 2.5 bentuk generator HHO tipe *wet cell*.

Keuntungan generator HHO tipe *wet cell* adalah :

- ✓ Gas yang dihasilkan umumnya lebih banyak dan stabil.
- ✓ Perawatan generator lebih mudah.
- ✓ Rancang bangun pembuatan generator HHO lebih mudah.



Gambar 2.5 Bentuk Generator HHO Tipe Wet Cell

### b. Generator HHO Tipe Dry Cell

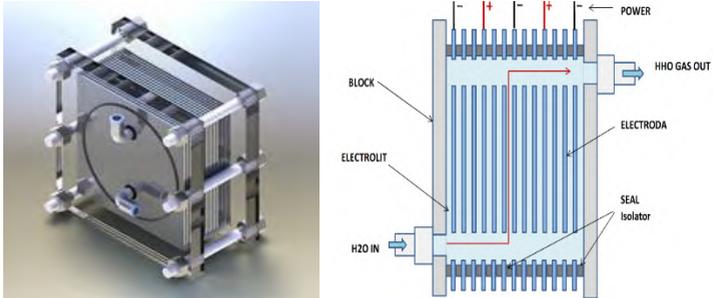
Tipe kering (*dry cell*) adalah generator HHO dimana elektrodanya tidak seluruhnya terendam elektrolit melainkan hanya mengisi celah-celah antara elektroda yang dibatasi oleh gasket yang terbuat dari karet. Bentuk generator tipe *dry cell* ini dapat dilihat pada gambar 2.6 bentuk generator HHO tipe *dry cell*.

Keuntungan generator HHO tipe *dry cell* adalah :

- ✓ Air yang terelektrolisa relatif lebih sedikit, yaitu hanya air yang terjebak diantara elektroda.
- ✓ Panas yang ditimbulkan relatif kecil, karena selalu terjadi sirkulasi antara air panas dan dingin di reservoir (temperatur relatif tetap). Serta panas dari elektroda juga dapat berkurang karena dibantu oleh pendinginan udara bebas.
- ✓ Arus listrik (Ampere) yang digunakan relatif lebih kecil, karena daya yang terkonversi menjadi panas semakin

sedikit. Selain itu juga karena luas permukaan untuk proses elektrolisa yang relatif lebih kecil.

- ✓ Arus listrik dari elektroda terbatas pergerakannya karena air yang di elektrolisa juga terbatas, yakni diantara pelat elektroda sehingga arus listrik yang digunakan lebih maksimal.



Gambar 2.6 Bentuk Generator HHO Tipe Dry Cell

## 2.4 Elektroda

Elektroda adalah komponen penting terjadinya proses elektrolisis air. Oleh karena itu bahan yang digunakan sebagai elektroda harus memiliki keunggulan tersendiri. Kriteria elektroda yang digunakan pada generator HHO adalah : mempunyai ketahanan korosi yang baik, mempunyai *electrical resistivity* yang baik sehingga mudah terjadinya proses elektrolisa air diharapkan jumlah produksi gasnya relatif banyak.

### A. Pemilihan titanium dan *stainless steel 316* sebagai elektroda

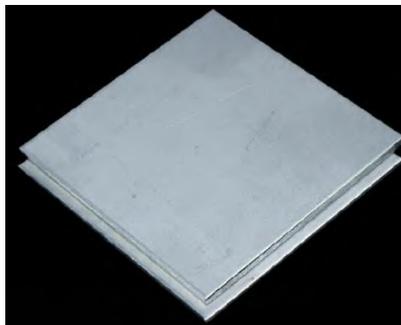
Elektroda berfungsi sebagai penghantar arus listrik dari sumber tegangan ke air yang akan dielektrolisis. Pada elektrolisis yang menggunakan arus DC, elektroda terbagi menjadi dua kutub yaitu positif sebagai anoda dan kutub negatif sebagai katoda. Material serta luasan elektroda yang digunakan sangat berpengaruh terhadap gas HHO yang dihasilkan dari proses elektrolisis air.

Sehingga material elektroda harus dipilih dari material yang memiliki konduktifitas listrik dan ketahanan terhadap korosi yang baik.

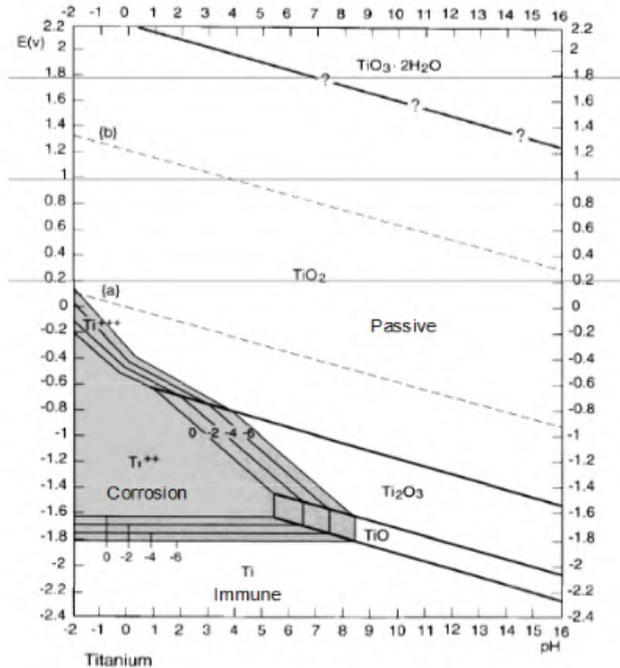
Pemakaian titanium sebagai elektroda pada percobaan ini, karena pada dasarnya titanium merupakan sebuah unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol TI dan nomor atom 22. Titanium merupakan logam transisi yang ringan, kuat, berkilau serta tahan terhadap korosi (termasuk tahan terhadap air laut). Dipilihnya titanium disini sebagai bahan rancang bangun pada generator HHO tipe *dry cell* juga karena tingkat korosivitas lebih baik dari pada SS 316, dengan jenis bahan pengkorosi berupa KOH. Terlihat pada tabel 2.3 beberapa perbandingan antara material SS 316 dengan titanium *grade 1*

Tabel 2.3 *Properties* Fisik dari Titanium [11]

Material	Stainless Steel SS316	Titanium grade 1
Densitas $gr/cm^3$	8,0	4,51
Komposisi (%)	61,9 Fe (min), 0,08 C, 17,0 Cr, 12,0 Ni, 2,4 Mo, 2,0 Mn	99,5 Ti (min)
Konduktivitas termal (W/m.K)	15,9	16,0
Hambatan Listrik ( $\Omega m$ )	$7,4 \times 10^7$	$4,2 \times 10^7$
Tingkat Korosivitas terhadap KOH (ipy)	< 0,02	<0,0002



Gambar 2.7 Titanium ukuran 80 x 80mm



Gambar 2.8 Diagram Pourbaix Titanium ( $Ti-H_2O$ ) pada temperatur  $25^\circ C$  [12]

Diagram Pourbaix pada gambar 2.8 (diagram elektroda potensial-pH) untuk Ti-Br- sistem H<sub>2</sub>O pada temperatur  $25^\circ C$  dalam ketiadaan dan kehadiran hidrida titanium dikembangkan di 400, 700, 850, dan LiBr 992 g / L. Diagram dibandingkan dengan sistem Ti-H<sub>2</sub>O sederhana pada temperatur  $25^\circ C$ . Perbandingan sistem Ti-H<sub>2</sub>O sederhana dengan diagram dari Ti-Br - sistem H<sub>2</sub>O pada  $25^\circ C$  menunjukkan bahwa rentang titanium kelarutan dalam asam, netral, dan lemah daerah basa dari diagram diperpanjang sedikit untuk kedua nilai pH yang lebih tinggi dan potensi dengan meningkatkan aktivitas ion bromida dan mengurangi aktivitas air. Diagram pourbaix digunakan untuk mengetahui reaksi yang terjadi

secara termodinamika (korosi atau ekstraksi) dan untuk mengetahui bentuk stabil dari logam pada kondisi tertentu.

*Stainless Steel* pada dasarnya adalah baja paduan logam besi (Fe) dengan unsur paduan utama *Carbon (C)*, *Nikel (Ni)* dan *Cromium (Cr)*. *Stainless Steel* merupakan logam paduan yang mempunyai konduktifitas dan ketahanan korosi yang relatif lebih baik dibanding logam-logam paduan maupun logam murni lainnya dan harganya juga relatif lebih terjangkau. Secara garis besar *Stainless Steel* dapat dibagi menjadi lima kelompok (*Harrold M. Cobb, 1999*), yaitu:

1. *Austenitic Stainless Steel*
2. *Ferritic Stainless Steel*
3. *Martensitic Stainless Steel*
4. *Duplex Stainless Steel*
5. *Precipitation Stainless Steel*

Tabel 2.4 Spesifikasi *Stainless Steel* [11]

Designation	Type	Composition weight-%						
		Cr	Ni	Mo	C	Mn	Si	Others
<b>AISI 300 Series:</b>								
AISI 304	Austenitic	18-20	8-10.5	—	<0.08	2	1	—
AISI 304L	Austenitic	18-20	8-12	—	<0.03	2	1	—
AISI 321	Austenitic	18-20	8-10.5	—	<0.08	2	1	Ti = 5 × wt-% C
AISI 347	Austenitic	18-20	8-10.5	—	<0.08	2	1	Nb = 10 × wt-% C
AISI 316	Austenitic	16-18	10-14	2.0-3.0	<0.08	2	1	—
AISI 316L	Austenitic	16-18	10-14	2.0-3.0	<0.02	2	1	—
AISI 317	Austenitic	18-20	11-15	3.0-4.0	<0.08	2	1	—
AISI 317L	Austenitic	18-20	11-15	3.0-4.0	<0.03	2	1	—
AISI 310	Austenitic	24-26	19-22	—	<0.25	2	1.5	—
AISI 330	Austenitic	17-20	34-37	—	<0.08	2	1.5	—
<b>AISI 200 Series:</b>								
AISI 201	Austenitic	16-18	3.5-5.5	—	0.15	5.5-7.5	1	+ 0.25 N
AISI 202	Austenitic	17-19	4-6	—	0.15	7.5-10	1	+ 0.25 N
<b>AISI 400 Series:</b>								
AISI 409	Ferritic	10.5-11.7	<1	—	<0.08	1	1	—
AISI 430	Ferritic	16-18	<1	—	<0.08	1	1	—
AISI 434	Ferritic	16-18	<1	0.8-1.2	<0.08	1	1	—
AISI 410	Martensitic	11.5-13.5	<1	—	0.15	1	1	—
AISI 431	Martensitic	15-17	1.2-2.5	—	0.20	1	1	—
<b>Duplex Steels:</b>								
Steel 1	Duplex	25	6.0	3.0	<0.08	—	—	1.5 Cu + 0.25 N
Steel 2	Duplex	25	5.5	3.0	<0.08	—	—	—
<b>Precipitation-Hardening Steels:</b>								
Steel 1	Precipitation	16	4.2	—	0.04	0.5	0.5	3.5 Cu
Steel 2	Precipitation	15	4.5	—	0.04	0.3	0.4	3.5 Cu + Nb

Setiap kelompok *stainless steel* terbagi lagi menjadi beberapa tipe dengan prosentase dan kandungan unsur paduan yang berbeda-beda, begitu pula dengan konduktifitas listrik serta ketahanannya terhadap korosi. Salah satunya adalah *stainless steel*

tipe SS 316 L merupakan *stainless steel* yang relatif banyak tersedia di pasaran dan mempunyai konduktifitas serta ketahanan korosi yang baik, sehingga akan digunakan pada penelitian ini.

## B. Korosi pada Generator HHO

### ✓ Pengertian korosi

Korosi merupakan kerusakan pada material karena proses kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. Dimana terjadi reaksi redoks antara logam dengan lingkungannya dan menghasilkan karat berupa senyawa oksida atau karbonat yang berupa hidrat.

Faktor-faktor yang mempercepat terjadinya korosi antara lain:

- ❖ Kontak dengan O<sub>2</sub> dan air (H<sub>2</sub>O) secara bersamaan
- ❖ Kontak dengan larutan elektrolit garam
- ❖ pH rendah
- ❖ Suhu tinggi

Sedangkan faktor-faktor yang memperlambat terjadinya korosi antara lain:

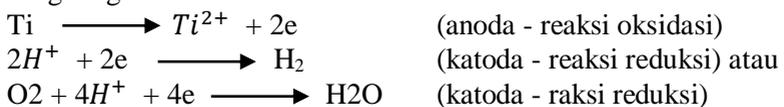
- ❖ Tidak adanya O<sub>2</sub> dan air (H<sub>2</sub>O) secara bersamaan, misalnya pada kapur dan minyak
- ❖ Adanya zat yang menyerap air, misalnya kalsium oksida (CaCl<sub>2</sub>) anhidrat, namun hanya sampai batas kejenuhan tertentu.

### ✓ Mekanisme Korosi

Pada umumnya proses korosi pada logam merupakan reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia merupakan suatu reaksi yang melibatkan perpindahan electron yang melibatkan reaksi oksidasi dan reduksi.

Contoh reaksi oksidasi dan reduksi sebagai berikut:

Lingkungan asam:



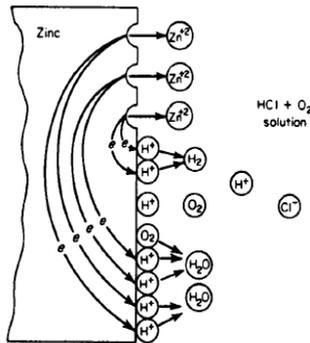
Lingkungan basa:



Reaksi total:



Oksida hidrat adalah karat logam yang berwarna coklat kemerah-merahan.



Gambar 2.9 Ilustrasi Proses Korosi Pada Logam Zn [11]

Korosi yang terjadi pada suatu reaksi oksidasi disebut reaksi anodic (penambahan muatan positif) sedangkan pada korosi yang terjadi pada reaksi reduksi disebut reaksi katodik (terjadi pengurangan muatan positif), jadi proses korosi memerlukan sepasang reaksi elektrokimia anodic katodik.

### ✓ Metode Menghitung Laju Korosi

Salah satu metode pengukuran laju korosi (*corission rate*) yang sering digunakan (secara eksperimen) dapat dilakukan dengan metode pengukuran kehilangan berat. Pada metode pengukuran kehilangan berat, besarnya korosi dinyatakan sebagai besarnya kehilangan berat logam yang diuji persatuan luas permukaan persatuan waktu.

Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut [11]

$$CR = \frac{87.6 W}{D \cdot A \cdot T} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

CR	: Laju korosi	(mm/year)
W	: kehilangan berat	(gram)
D	: Densitas	(gram/cm <sup>3</sup> )
A	: Luas permukaan	(cm <sup>2</sup> )
T	: Waktu	(jam)

Bila dinyatakan dalam *mills per year (mpy)* maka persamaan menjadi:

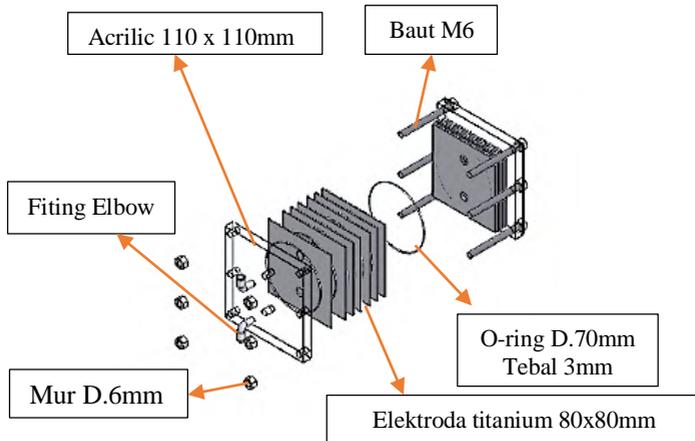
$$CR = \frac{534 \cdot W}{D \cdot A \cdot T} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

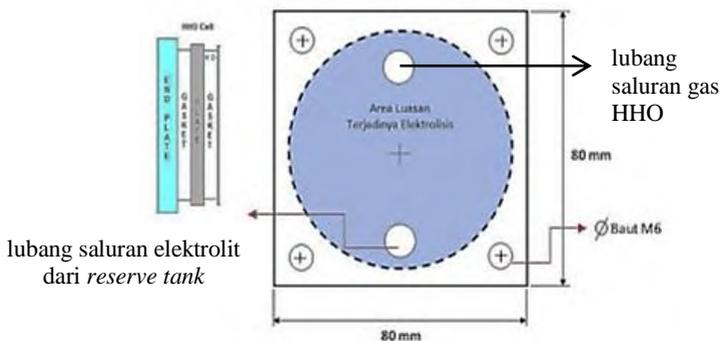
CR	: Laju korosi	(mpy)
W	: <i>weight loss</i>	(mg)
D	: Densitas	(gr/cm <sup>3</sup> )
A	: Luas permukaan	(sq.in)
T	: <i>explosure time</i>	(hr)

### C. Desain Generator HHO dan Luasan Elektroda Terjadinya Elektrolisis

Pada tipe *dry cell*, area luasan lingkaran pada plat elektroda yang terendam air untuk proses terjadinya elektrolisis menghasilkan gas HHO, sedangkan bagian luasan yang lainnya tidak terendam air dan plat dalam kondisi kering. Luasan yang terjadi elektrolisis air sekitar 60% cukup dibatasi dengan O-ring atau seal yang berdiameter 70 mm pada setiap plat yang digunakan. Selain itu pada setiap plat terdapat dua lubang berdiameter 12 mm untuk saluran gas HHO yang berada di bagian atas dan saluran elektrolit pada bagian bawah.



Gambar 2.10 Desain Generator HHO



Gambar 2.11 Luasan Elektroda pada Proses Terjadinya Elektrolisis Tipe Dry Cell

## 2.5 Parameter Unjuk Kerja Generator HHO

Penggunaan generator HHO baik tipe kering (*dry*) maupun basah (*wet*) pada kendaraan bermotor ataupun generator-set harus memperhatikan beberapa hal, seperti seberapa besar daya yang dibutuhkan oleh generator HHO. Sehingga dengan pemasangan generator HHO pada kendaraan tidak menyebabkan sistem kelistrikan dan sumber energi pada kendaraan terganggu. Untuk memperoleh karakteristik terbaik dari setiap generator HHO maka

diperlukan parameter unjuk kerja generator HHO, sehingga terlebih dahulu harus digambarkan sistem yang akan digunakan. Adapun parameter unjuk kerja dari generator HHO tersebut adalah:

1. Kebutuhan Energi Spesifik
2. Produksi gas HHO spesifik
3. Efisiensi generator HHO
4. Temperatur elektrolit pada generator HHO

### 2.5.1 Kebutuhan Energi Spesifik

Kebutuhan energi spesifik adalah besarnya energi yang dibutuhkan untuk memproduksi atau menghasilkan satu kilogram gas HHO, selama satu jam (kWh/kg). Disebut juga dengan *specific energy requirement* (SER). Untuk menghasilkan gas HHO dengan menggunakan proses elektrolisis air dibutuhkan energi listrik. Generator HHO nantinya dipasang pada kendaraan bermotor, dengan sumber energi listrik diambil dari alternator sepeda motor yang bisa memberikan arus bolak-balik. Arus bolak-balik ini yang diatur dengan PWM yang dibutuhkan untuk mengatur besarnya arus sesuai yang diinginkan. Semakin besar ukuran mesin kendaraan, energi listrik yang dihasilkan dari engine akan semakin besar, sehingga arus yang dialirkan ke generator juga semakin besar. Energi listrik dari alternator dipergunakan untuk sistem kelistrikan dan pengapian di kendaraan (seperti lampu, pengisian baterai, dan api pada busi).

Namun sebagian energi listrik tersebut dapat dipergunakan sebagai sumber tegangan dan arus untuk generator HHO. Energi listrik tersebut jumlahnya terbatas, sehingga generator HHO yang dipasang pada kendaraan dayanya harus dibatasi. Begitu pula ketika generator HHO digunakan pada engine penggerak generator, listrik yang dihasilkan oleh generator semaksimal mungkin agar dapat digunakan untuk menyalakan beban. Kebutuhan energi dihitung berdasarkan besarnya voltase dan arus dalam proses elektrolisis HHO. Sehingga secara keseluruhan,

$$\text{SER} = \frac{V \times I}{m} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

- SER = *Specific energy requirement* ( $\frac{kWatt}{kg}$ )
- V = Beda potensial / voltase (Volt)
- I = Arus listrik (Ampere)
- m = Massa gas HHO (kg)

**2.5.2 Produksi Gas HHO Spesifik**

Produksi gas HHO spesifik adalah besarnya produksi gas HHO pada kondisi operasional dengan daya 1KW selama 1 jam (kg/kWh). Disebut juga dengan spesifik gas production (SGP). Nilai dari pada SGP generator gas HHO ini dapat dirumuskan :

$$SGP = \frac{\text{Laju produksi gas HHO}}{\text{Daya yang dibutuhkan}} \left( \frac{kg}{kJ} \right)$$

$$SGP = \frac{\dot{m}_{HHO}}{P} \dots\dots\dots(2.4)$$

Untuk menghitung *mass flowrate* gas HHO dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$\dot{m}_{HHO} = Q \times \rho \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

- $\dot{m}_{HHO}$  = laju produksi gas HHO (kg/s)
- Q = debit produksi gas HHO (m<sup>3</sup>/s)
- $\rho$  = massa jenis gas HHO (kg/m<sup>3</sup>)

Dari persamaan reaksi kimia elektrolisis air (H<sub>2</sub>O) dapat diketahui besar kandungan massa H<sub>2</sub> dalam gas HHO. Jika massa H<sub>2</sub>O yang dielektrolisis sebanyak 1 kg, maka massa produk total H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> juga 1 kg, sehingga dengan mengetahui nilai Mr H<sub>2</sub>O=18 kg/kmol, Mr H<sub>2</sub>=2 kg/kmol, Mr O<sub>2</sub>=32 kg/kmol, maka didapatkan mole H<sub>2</sub> :



$$\text{Mol} = \frac{\text{Massa}}{\text{Mr}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dari perbandingan mol pada persamaan reaksi kimia elektrolisis air dapat dihitung besarnya massa H<sub>2</sub> dalam 1 kg gas HHO, yaitu:

$$m_{\text{H}_2} = \text{Mr}_{\text{H}_2} \times \text{mol}_{\text{H}_2\text{O}} = 2\text{kg} / \text{kmol} \times \frac{1\text{kg}}{18\text{kg} / \text{kmol}} = \frac{1}{9}\text{kg}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{Mr}_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1\text{kg}}{18\text{kg} / \text{kmol}} = 0,056 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{H}_2} = \frac{\text{Koeff. H}_2}{\text{Koeff. H}_2\text{O}} \times n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{2} \times 0,056 = 0,056 \text{ kmol}$$

Jika pada STP massa jenis H<sub>2</sub> diketahui sebesar ρ<sub>H<sub>2</sub></sub> = 0,08235 gr/liter dan O<sub>2</sub> sebesar ρ<sub>O<sub>2</sub></sub> = 1,3088 gr/liter [13], maka ρ<sub>HHO</sub> dapat dicari melalui penurunan persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{HHO}} &= \frac{m_{\text{HHO}}}{V_{\text{HHO}}} = \frac{(m_{\text{H}_2} + m_{\text{O}_2})}{V_{\text{HHO}}} \\ &= \frac{(\rho_{\text{H}_2} \cdot V_{\text{H}_2} + \rho_{\text{O}_2} \cdot V_{\text{O}_2})}{V_{\text{HHO}}} \\ &= \frac{(\rho_{\text{H}_2} \cdot \frac{2}{3} V_{\text{HHO}} + \rho_{\text{O}_2} \cdot \frac{1}{3} V_{\text{HHO}})}{V_{\text{HHO}}} = \frac{2}{3} \rho_{\text{H}_2} + \frac{1}{3} \rho_{\text{O}_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{\text{HHO}} &= (2/3 \times 0,08235\text{gr/liter}) + (1/3 \times 1,3088\text{gr/liter}) \\ &= 0,491167 \text{ gr/liter} \end{aligned}$$

### 2.5.3 Efisiensi Generator HHO (η<sub>HHO</sub>)

Efisiensi merupakan perbandingan antara energi yang berguna dengan energi yang diberikan pada suatu sistem. Besarnya

nilai efisiensi suatu alat konversi energi menunjukkan seberapa optimal alat tersebut dapat bekerja. Besarnya efisiensi dapat dihitung dari persamaan berikut :

$$\eta = \frac{\text{Energi yang berguna (output)}}{\text{Energi yang diberikan (input)}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.7)$$

Pada generator HHO hasil yang berguna adalah produk elektrolisis air berupa gas HHO. Gas HHO yang terdiri dari gas H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> mempunyai nilai kalor, sehingga dapat dimanfaatkan energi yang terkandung didalamnya untuk meningkatkan pembakaran pada motor bakar. Karakteristik gas HHO yang cenderung memiliki karakteristik yang hampir sama dengan gas penyusunnya (gas H<sub>2</sub>), karena kandungan H<sub>2</sub> sebesar 2/3 volume gas HHO. Namun, nilai kalor pada umumnya mempunyai satuan energi persatuan massa. Gas H<sub>2</sub> mempunyai nilai kalor sebesar 119,93 kJ/gram [6]. Sehingga untuk menghitung nilai kalor gas HHO harus diketahui terlebih dahulu perbandingan massa gas H<sub>2</sub> dalam gas HHO. Perubahan entalpi pembakaran standar adalah perubahan entalpi total pada suatu sistem reaksi (dimana reaktan dan produk reaksi dinyatakan sebagai sistem termodinamik) yang terjadi ketika satu molekul bereaksi sempurna dengan oksigen yang terjadi pada 298°K dan tekanan atmosfer 1 atm.

Umumnya, nilai entalpi pembakaran dinyatakan dalam Joule atau Kilo Joule per satu mol reaktan yang bereaksi sempurna dengan oksigen. Setiap sistem atau zat mempunyai energi yang tersimpan didalamnya. Energi potensial berkaitan dengan wujud zat, volume, dan tekanan. Energi kinetik ditimbulkan karena atom-atom dan molekul-molekul dalam zat bergerak secara acak. Jumlah total dari semua bentuk energi itu disebut entalpi (H). Entalpi akan tetap konstan selama tidak ada energi yang masuk atau keluar dari zat. Misalnya entalpi untuk air dapat ditulis H H<sub>2</sub>O (l) dan untuk es ditulis H H<sub>2</sub>O (s). Entalpi (H) suatu zat ditentukan oleh jumlah energi dan semua bentuk energi yang dimiliki zat yang jumlahnya tidak dapat diukur. Perubahan kalor atau entalpi yang terjadi

selama proses penerimaan atau pelepasan kalor dinyatakan dengan perubahan entalpi ( $\Delta h$ ). Ada 2 reaksi dalam larutan, yaitu:

a) Eksoterm, yaitu proses melepaskan panas dari sistem ke lingkungan, temperatur dari campuran reaksi akan naik dan energi potensial dari zat-zat kimia yang bersangkutan akan turun.

b) Endoterm, yaitu menyerap panas dari lingkungan ke sistem, temperatur dari campuran reaksi akan turun dan energi potensial dari zat-zat kimia yang bersangkutan akan naik.

Untuk menghitung *mass flowrate* gas HHO dapat dicari dengan persamaan berikut :

Pada reaksi penguraian air :  $\text{H}_2\text{O}_{(l)} \longrightarrow \text{H}_{2(g)} + 0,5\text{O}_{2(g)}$  = +285,84 kJ/mol adalah reaksi endoterm yang menghasilkan energi entalpi yang bernilai positif (+). Energi entalpi yang dihasilkan adalah:  $\Delta h = + 285,84 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$

Sedangkan energi ikatan yang dibutuhkan adalah melalui penurunan persamaan gas ideal pada kondisi STP :

$$PV = n \bar{R} T \dots\dots\dots(2.8)$$

dengan :

- P = Tekanan gas ideal (atm)
- V = Volume gas terukur (liter)
- n = molaritas senyawa (mol)
- $\bar{R}$  = konstanta Gas ideal (liter.atm/mol.K)
- T = temperatur (298°K).

Energi ikatan didefinisikan sebagai energi yang diperlukan untuk memutuskan 1 mol ikatan dari suatu molekul dalam wujud gas. Energi ikatan dinyatakan dalam kilo joule per mol ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ). Untuk menghilangkan nilai per mol dari entalpi dan menyamakan nilai input dari daya dengan satuan watt (J/s), maka volume gas dan mol diberi satuan per waktu. Perumusannya sebagai berikut :

$$P \times \dot{V} = \dot{n} \times \bar{R} \times T \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\dot{n} = \frac{P \times \dot{V}}{\bar{R} \times T} \dots\dots\dots(2.10)$$

dengan :

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \text{volume per detik (liter/s)} \\ \dot{n} &= \text{molaritas senyawa per waktu (mol/s)}\end{aligned}$$

Massa H<sub>2</sub> dalam gas HHO hanya sebesar 1/9 massa total gas HHO, maka NKB gas HHO adalah 1/9 kali NKB gas H<sub>2</sub> yaitu  $= \frac{1}{9} \times 119,93 \text{ kJ/g} = 13,325 \text{ kJ/g}$  atau 3812,754 kcal/kg. Jika pada STP massa jenis H<sub>2</sub> diketahui sebesar  $\rho_{\text{H}_2} = 0,08235 \text{ gr/ltr}$  dan O<sub>2</sub> sebesar  $\rho_{\text{O}_2} = 1,3088 \text{ gr/liter}$  [13], maka efisiensi generator HHO dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\text{energi yang dihasilkan elektrolisis air (Output)}}{\text{daya yang dibutuhkan generator HHO (Input)}} \times 100\% \\ &= \frac{\Delta h \times \dot{n}}{(V \times I)} \times 100\% \dots\dots\dots(2.11)\end{aligned}$$

dengan :

$$\begin{aligned}\eta &= \text{efisiensi generator HHO} \quad (\%) \\ \Delta h &= \text{besarnya energi yang dihasilkan untuk penguraian 1} \\ &\quad \text{mol ikatan molekul air} \quad (+285,84 \text{ kJ/mol}) \\ \dot{n} &= \text{mol per satuan waktu} \quad (\text{mol/s}) \\ V &= \text{tegangan listrik} \quad (\text{volt}) \\ I &= \text{arus listrik} \quad (\text{amper})\end{aligned}$$

#### 2.5.4 Kenaikan Temperatur Elektrolit pada Generator HHO

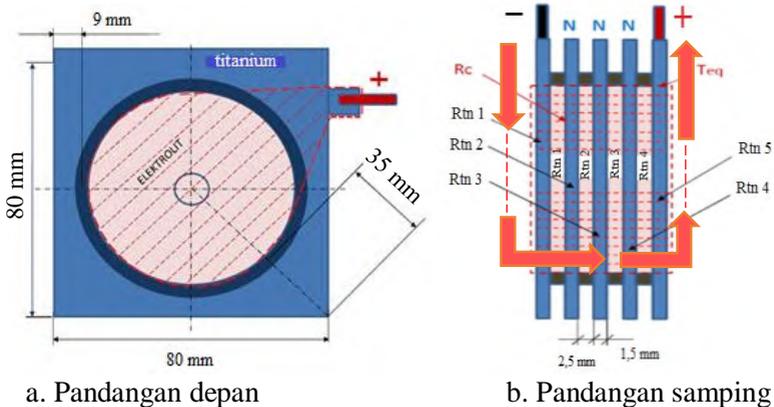
Kenaikan temperatur elektrolit generator HHO berbeda antara tipe basah dan tipe kering. Pada tipe basah (*wet type*) umumnya laju kenaikan temperatur mempunyai harga yang lebih tinggi, karena elektrodanya terendam dalam larutan elektrolit dan larutan elektrolit dimasukkan ke dalam bejana tertutup. Bejana terbuat dari bahan isolator yang umumnya memiliki konduktifitas panas yang rendah, sehingga panas yang disebabkan adanya aliran listrik didalam sistem, hanya sedikit yang ditransfer ke lingkungan. Sedangkan pada tipe kering kenaikan temperatur elektrolit

generator HHO terjadi karena adanya *energy generation* ( $\dot{E}_g$ ) yang disebabkan adanya aliran listrik melalui suatu media penghantar (elektroda dan elektrolit).

Panas yang terjadi akibat adanya energi bangkitan tersebut juga akan dikeluarkan atau di transfer ke lingkungan ( $\dot{E}_{out}$ ) melewati plat-plat titanium melalui proses konduksi ( $Q_{cond}$ ), konveksi ( $Q_{conv}$ ) dan radiasi ( $Q_{rad}$ ). Apabila harga energi keluar ( $\dot{E}_{out}$ ) sama dengan energi bangkitan ( $\dot{E}_g$ ) maka energi yang tersimpan ( $\dot{E}_{st}$ ) mempunyai harga “ **nol** ” maka temperatur sistem akan konstan, namun apabila harga harga energi keluar ( $\dot{E}_{out}$ ) lebih rendah energi bangkitan ( $\dot{E}_g$ ) maka akan ada energi yang tersimpan ( $\dot{E}_{st}$ ) yang menimbulkan panas dalam sistem.

#### 2.5.4.1 Gambar Ilustrasi Aliran Arus Listrik dalam HHO Cell

Aliran listrik dan aliran elektron pada suatu media penghantar akan menyebabkan tumbukan dan gesekan dengan molekul-molekul penyusun dan ion-ion bebas yang terkandung di dalamnya. Gesekan dan tumbukan yang terjadi terus menerus maka akan menimbulkan terjadinya panas pada media penghantar dan elektrolit.



Gambar 2.12 Ilustrasi Aliran Listrik dan Heat Generation HHO Cell

Luas total elektroda ( <b>A<sub>tot</sub></b> )	$= P \times L$ $= 0.08 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}$ $= 0.0064 \text{ m}^2$
Luas area elektrolisis ( <b>A<sub>e</sub></b> )	$= \pi \cdot r^2$ $= 3.14 \times 0.035^2$ $= 3,8465 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Luas area pendingin ( <b>A<sub>c</sub></b> )	$= A_{\text{tot}} - A_e$ $= 0.0064 - 3.8465 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ $= 2,5535 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Panjang laluan ( <b>L</b> )	Elektroda ( $1.5 \times 15 = 22,5 \text{ mm}$ ) dan H <sub>2</sub> O ( $2.5 \times 14 = 35 \text{ mm}$ ) Total = 57,5 mm (0.0575 m)
Resistansi ( <b>R<sub>tot</sub></b> )	$= \Sigma (R_s + R_e) = 0.45 \Omega$ $= 0.45 \Omega / 0.0575 \text{ m} = 7,82 \Omega/\text{m}$

#### 2.5.4.2 Properties Material

Harga properties material dan konstanta yang digunakan dalam perhitungan laju temperatur meliputi [13]:

- ❖ Properties titanium *grade 1*:
 

Koefisien konduksi (k)	= 16.0 W/m.K
Density ( $\rho$ )	= 4510 kg/m <sup>3</sup>
Panas jenis (c)	= 377 J/kg.K
- ❖ Properties Elektrolit H<sub>2</sub>O:
 

Density ( $\rho$ )	= 1000 kg/m <sup>3</sup>
Panas jenis (c)	= 4179 J/kg.K
- ❖ Konveksi:
 

Koefisien konveksi (h)	= 2-25 W/m <sup>2</sup> .K ( <i>free convection</i> )
------------------------	---
- ❖ Radiasi:
 

Emissivity ( $\epsilon$ )	= 0.8
Tetapan Boltzmann ( $\sigma$ )	= $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

### 2.5.4.3 Persamaan Total *Heat Transfer* pada Generator HHO

Hubungan antara *energy generation* ( $\dot{E}_g$ ) dan energi atau panas yang keluar ( $\dot{E}_{out}$ ) serta *energy storage* ( $\dot{E}_{st}$ ) dapat dirumuskan seperti persamaan *total heat transfer* sebagai berikut:

$$\dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dari persamaan 2.12 dapat dijabarkan menjadi [13]:

$$I^2 \cdot R_{tot} \cdot L - Q_{cond} - Q_{conv} - Q_{rad} = \dot{E}_{st}$$

$$I^2 \cdot R_{tot} \cdot L - \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k (T_{eq} - T_c)}{\ln(r_2/r_1)} - h \cdot A (T_c - T_{inv}) - \epsilon \cdot \sigma \cdot A (T_c^4 - T_{sur}^4) = \frac{d}{dt} \rho \cdot c \cdot V \cdot T$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I^2 \cdot R_{tot} \cdot L - \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k (T_{eq} - T_c)}{\ln(r_2/r_1)} - h \cdot A (T_c - T_{inv}) - \epsilon \cdot \sigma \cdot A (T_c^4 - T_{inv}^4)}{\rho \cdot c \cdot V} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

$\dot{E}_g$  : *Energy generation*, merupakan energi bangkitan karena adanya aliran listrik melalui suatu media, yang dikonversi menjadi energi panas (**Watt**)

$\dot{E}_{out}$  : Energi panas yang ditransfer ke lingkungan, secara konduksi (***Qcond***), konveksi (***Qconv***) dan radiasi (***Qrad***) (**Watt**)

$\dot{E}_{st}$  : *Energy storage*, merupakan energi yang masih tersimpan yang menyebabkan kenaikan temperatur dalam sistem (**Watt**)

$\frac{dT}{dt}$  : Laju temperatur persatuan waktu ( $^{\circ}\text{C/s}$ )

#### 2.5.4.4 Kenaikan Temperatur Elektrolit pada Generator HHO

Laju kenaikan temperatur elektrolit generator HHO dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.13 sehingga didapatkan harga laju temperatur per satuan waktu ( $dT/dt$ ). Dari harga laju temperatur tersebut kemudian digunakan untuk menghitung kenaikan temperatur pada generator HHO sebagai berikut:

$$\Delta T_s(t) = T_o + (dT/dt) \cdot t \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

$\Delta T_s(t)$	: Temperatur elektrolit HHO fungsi waktu	( °C )
$T_o$	: Temperatur elektrolit awal	( °C )
$dT/dt$	: Laju kenaikan temperatur elektrolit	(°C/s)
$t$	: Waktu operasi generator HHO	( s )

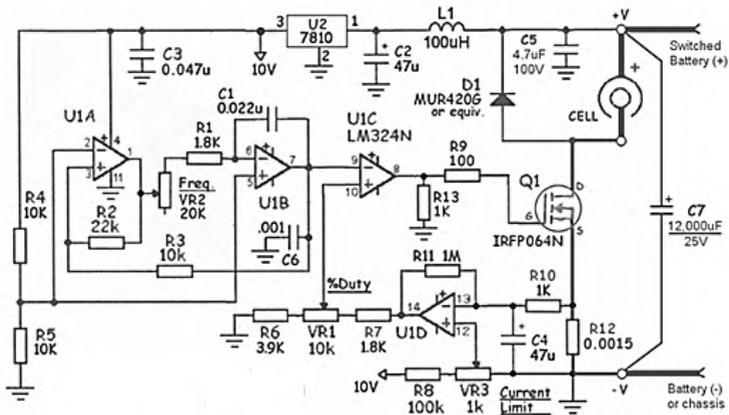
#### 2.6 PWM (*Pulse Width Modulation*)

PWM (*Pulse Width Modulation*) merupakan suatu rangkaian listrik dalam mengatur atau mengontrol kerja suatu peralatan yang memerlukan arus pull in yang besar dan untuk menghindari disipasi daya yang berlebihan dari peralatan yang akan dikontrol. PWM merupakan salah satu metode untuk mengatur kecepatan putaran motor dengan cara mengatur prosentase lebar pulsa terhadap periode dari suatu sinyal persegi dalam bentuk tegangan periodik yang diberikan ke motor sebagai sumber daya. Semakin besar perbandingan lama sinyal *high* dengan periode sinyal maka semakin cepat motor berputar. Sinyal PWM dapat dibangun dengan banyak cara, yaitu dapat menggunakan metode analog menggunakan rangkaian opamp atau dengan menggunakan metode digital yang bisa dipengaruhi oleh resolusi dari PWM itu sendiri.

Penggunaan PWM dapat dibuat dengan menggunakan IC Timer 555 atau IC LM 324N. IC Timer merupakan salah satu IC yang memiliki dasar pengendali PWM dengan fitur pengendalian lebar pulsa 0 sampai 100%. Pembangkit PWM yang dirancang

menggunakan IC pewaktu 555 atau LM324N dapat dirangkai sebagai multivibrator stabil yang mampu menghasilkan tegangan pulsa dengan besarnya bergantung dari sumber listrik DC yang digunakan. Tegangan pulsa dari sumber listrik DC yang digunakan tersebut dapat diatur *duty cycle*-nya. *Duty cycle* inilah yang kemudian dijadikan sebagai sinyal PWM. Pada penggunaan PWM dibutuhkan driver mosfet, berfungsi sebagai komponen daya yang dikendalikan oleh tegangan dan memerlukan arus masukan kecil.

Kecepatan switching sangat tinggi dan waktu switching memiliki orde nanodetik. Mosfet mempunyai satu rangkaian driver untuk mengatur pensaklaran mosfet melalui kaki gate. Untuk penyalan mosfet agar menghantar, diperlukan tegangan VGS yang lebih besar atau sama dengan tegangan threshold (tegangan minimum yang dibutuhkan mosfet untuk menghantar) dari mosfet. Rangkaian alat elektronika PWM yang digunakan sebagai berikut:

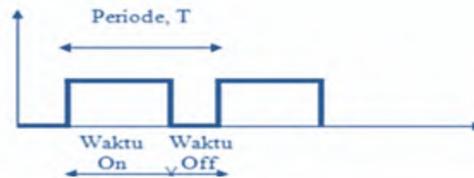


Gambar 2.13 Rangkaian PWM-V2 menggunakan LM-324N [14]

## 2.7 *Duty cycle* pada PWM

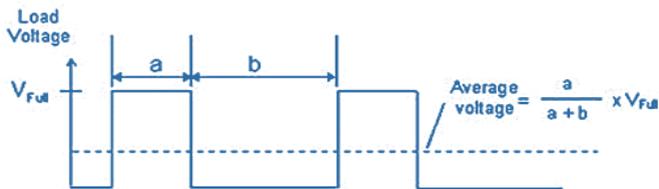
*Duty cycle* adalah perbandingan lama waktu suatu signal berada dalam kondisi high dengan lama waktu suatu signal tersebut dalam kondisi (*high + low*), *duty cycle* sangat berguna dalam

merancang alat-alat yang menggunakan konsep PWM (*Pulse Width Modulation*).



Gambar 2.14 Skema Perhitungan Nilai Duty Cycle pada PWM

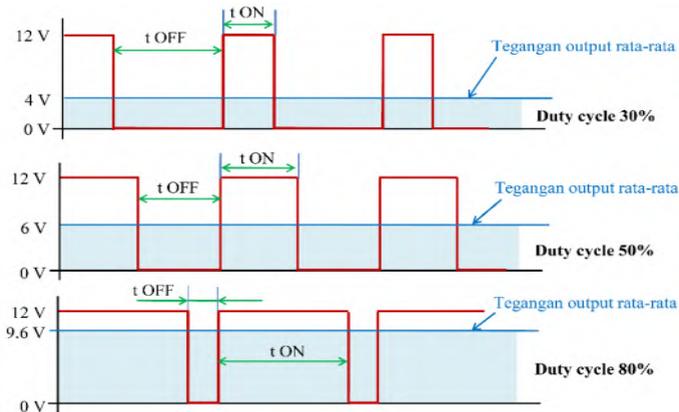
Dengan menghitung *duty cycle* yang diberikan, akan didapat tegangan output yang dihasilkan. Sesuai dengan rumus yang telah dijelaskan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.15 Skema Menghitung Tegangan Rata-rata Output PWM

*Average voltage* merupakan tegangan output pada motor yang dikontrol oleh signal PWM. A adalah nilai *duty cycle* saat kondisi signal “on” dan b adalah nilai *duty cycle* saat kondisi signal “off”.  $V_{full}$  adalah tegangan maximum pada motor. Dengan menggunakan rumus diatas maka akan didapatkan tegangan output sesuai dengan signal kontrol PWM yang dibangkitkan. Dengan cara mengatur lebar pulsa “ON” dan “OFF” dalam satu periode gelombang melalui pemberian signal referensi output dari suatu PWM akan didapat *duty cycle* yang diinginkan. *Duty cycle* dari PWM dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Duty cycle} = \frac{t_{\text{On}}}{t_{\text{On}} + t_{\text{Off}}} \times 100 \%$$



Gambar 2.16 Lebar Pulse On dan Off dari Duty Cycle PWM

*Duty cycle* 100% berarti sinyal tegangan pengatur motor dilewatkan seluruhnya. Jika tegangan 100V, maka motor akan mendapat tegangan 100V. Pada *duty cycle* 50%, tegangan pada motor hanya akan diberikan 50% dari total tegangan yang ada dan seterusnya.

## 2.8 Penelitian Terdahulu

Pada sub bab ini akan dijelaskan beberapa hasil penelitian-penelitian terdahulu yang dijadikan dasar pertimbangan dalam melakukan penelitian tugas akhir ini, antara lain :

### 1. Bambang Sudarmanta [14]

Optimasi kinerja generator gas sel HHO kering dilakukan dengan memvariasikan *duty cycle* (modulasi lebar pulsa, PWM). Gas HHO yang dihasilkan kemudian diterapkan pada Sinjai *spark ignition port* mesin injeksi, 2-silinder 650 cc dengan mekanisme inlet gas menggunakan venturi. Variasi dilakukan pada generator gas HHO adalah *duty cycle* dari PWM, yaitu 20%, 40%, 60%, 80%

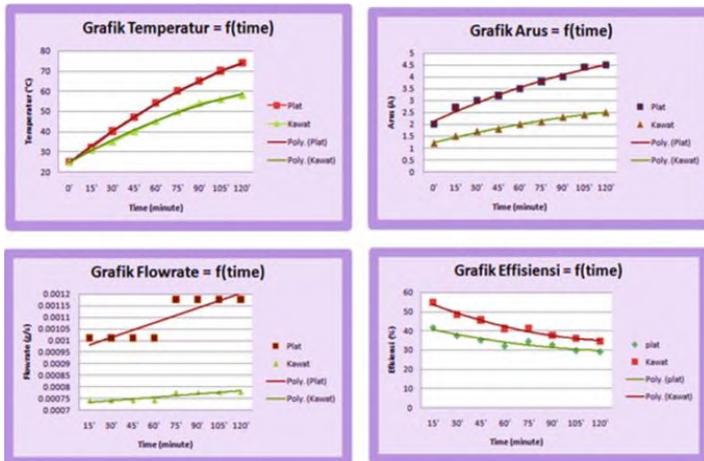
dan 100%. Unjuk kerja dinyatakan dalam parameter masukan daya, produksi gas HHO, masukan energi spesifik, efisiensi generator HHO dan suhu generator HHO. Gas HHO yang diperoleh kemudian digunakan sebagai campuran bahan bakar di mesin Sinjai dan dimasukkan melalui mekanisme venturi yang dipasang pada saluran inlet udara pembakaran.

Selanjutnya, efek dari penambahan gas HHO pada kinerja mesin Sinjai diukur meliputi parameter torsi, daya, BMEP, konsumsi bahan bakar spesifik dan efisiensi termal. Sinjai optimasi performa mesin dilakukan pada pengaturan waktu pengapian untuk muka minimum untuk torsi terbaik, mekanisme MBT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja optimal generator gas HHO yang dihasilkan oleh sistem PWM dengan *duty cycle* 40% dengan parameter seperti input tertentu energi 33.121 MJ / kg, efisiensi generator 20.064% dan suhu generator dapat dipertahankan di bawah 60 °C.

Aplikasi generator gas HHO di titik atas pada standart waktu pengapian Sinjai mesin menghasilkan peningkatan kinerja seperti torsi, daya, BMEP dan efisiensi termal masing-masing 2,27%, 2,76% dan 3,05% dan penurunan bsfc 7.76%. Terbelakang waktu pengapian disesuaikan dengan MBT mampu meningkatkan kinerja seperti torsi, daya, efisiensi termal, masing-masing 6,55%, 7,65%, 15,50% dan penurunan bsfc 22,06%.

## **2. Barkah Fitriyana [15]**

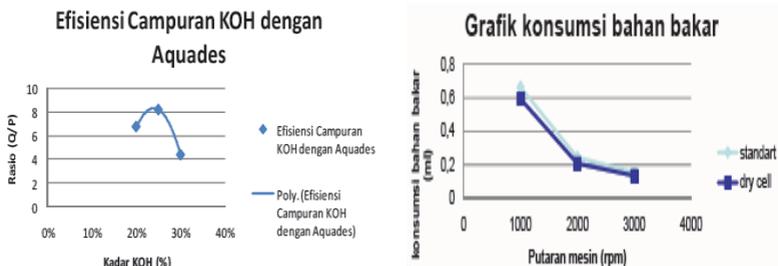
Penelitian ini komparasi performa generator HHO dengan elektroda plat SS 304 dan spiral. Didapatkan laju produksi gas HHO terbesar oleh generator HHO yang menggunakan elektroda berbentuk plat dengan nilai tertinggi 0,001175 g/s. Namun efisiensi generator tertinggi dihasilkan oleh generator HHO menggunakan elektroda berbentuk spiral sebesar 54,72% pada temperatur 25° celcius dan arus 1,2 ampere. Temperatur dan arus tertinggi pada generator menggunakan elektroda berbentuk plat dengan nilai 74° celcius dan 4,5 Ampere.



Gambar 2.17 Grafik Hasil Penelitian Barkah Fitriyana

### 3. Iqbal Wahyudzin [16]

Pada penelitian ini, dikembangkan prototipe generator gas HHO (*Brown Gas*) dengan sistem kering. Sebagai elektroda digunakan baja SS 304 dan sebagai katalis KOH 2,5%. Kemudian melakukan studi karakteristik generator gas HHO *dry cell* dan aplikasinya pada kendaraan bermesin injeksi 1300 cc. Dari hasil penelitian ini generator Brown gas *dry cell* enam ruang didapatkan campuran elektrolit berupa 2,5% KOH dan 97,5% aquades dengan konsumsi daya listrik sebesar 67,2 Wat yang menghasilkan *flowrate* sebesar 4,6 ml/s.



Gambar 2.18 Grafik Hasil Penelitian Iqbal Wahyudzin

#### 4. Yanur Arzaqa Ghiffari [17]

Pada penelitian ini, pengembangan generator HHO menggunakan tipe kering (*dry cell*) dan tipe basah (*wet cell*). Pengujian kedua tipe generator dengan penambahan PWM E-3 *Fixed Frequency* 1 kHz divariasikan berupa *duty cycle* : 20%, 40%, 60%, 80% dan *direct connection*. Konfigurasi generator menggunakan elektroda SS 316L sebanyak 15 plat dan dimensi luasannya 80 x 80 mm. Pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar Jurusan Teknik Mesin ITS. Karakteristik dari unjuk kerja meliputi: arus, konsumsi daya listrik, temperatur fluida, laju produksi gas HHO, dan efisiensi energi dari kedua tipe generator gas HHO.

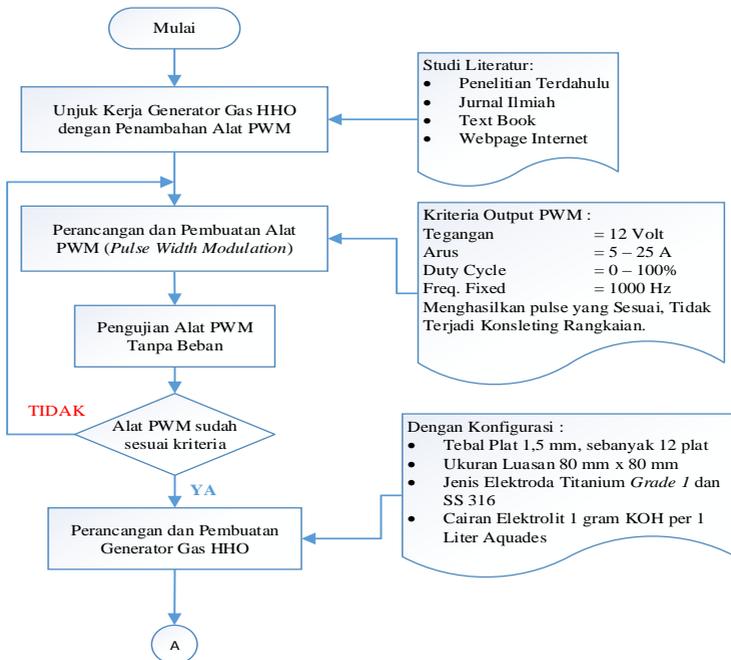
Dari hasil penelitian ini didapatkan karakteristik unjuk kerja terbaik pada kedua tipe generator HHO dengan penambahan PWM. Nilai arus dan tegangan lebih stabil dibandingkan dengan tanpa penambahan PWM (*direct connection*), namun arus cenderung meningkat seiring dengan kenaikan temperatur mencapai 70°C. Arus terkecil yang dibutuhkan pada tipe *dry cell* dengan *duty cycle* 20% yaitu 5,4 Ampere. Konsumsi daya terbesar pada tipe *wet cell* dengan *duty cycle* 80% yaitu 301,8 Watt. Laju produksi gas HHO terbesar pada tipe *wet cell* dengan *duty cycle* 80% sebesar  $3,51 \times 10^{-6}$  kg/s. Efisiensi terbaik pada generator tipe *wet cell* dengan *duty cycle* 80%, yaitu 27,7 %.

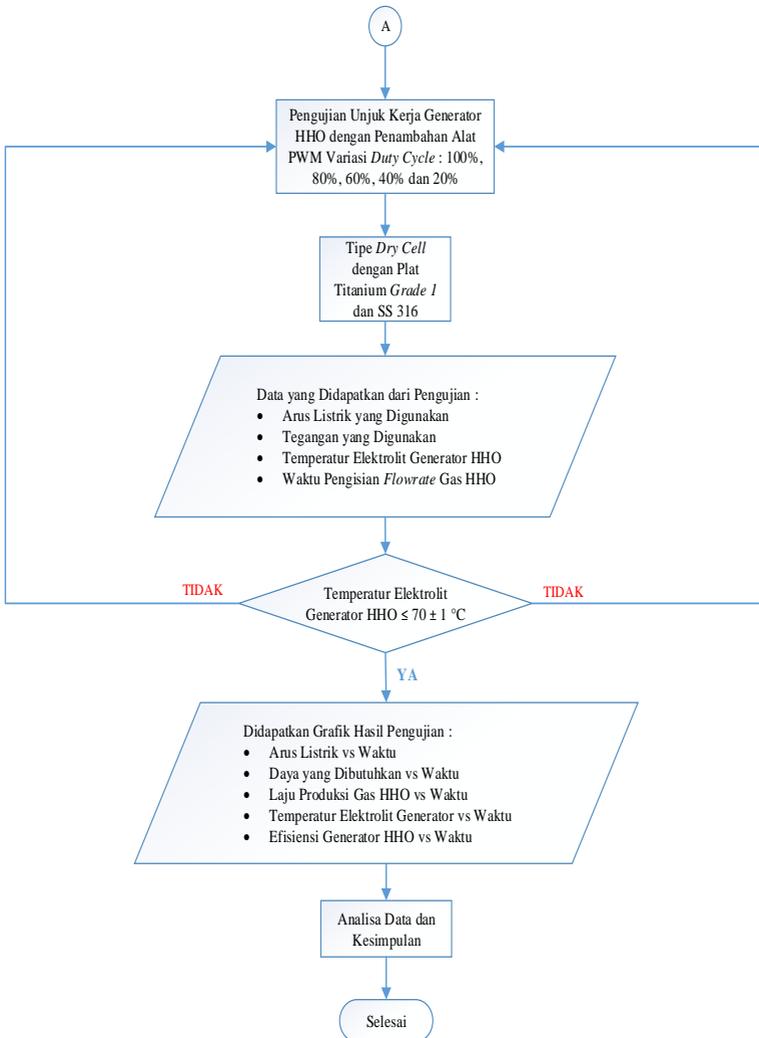
## BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental untuk mengetahui karakteristik pengaruh penambahan PWM (*Pulse Width Modulation*) dengan frekuensi tetap (1KHz) terhadap unjuk kerja generator HHO menggunakan tipe *dry cell*. Generator gas HHO yang dirancang berdimensi 80 mm x 80 mm sebanyak 12 plat. Dengan perbandingan KOH dengan aquades 1 gram untuk 1 liter aquades. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar Jurusan Teknik Mesin ITS.

### 3.1. Diagram Alir (*Flowchart*) Penelitian

Urutan proses yang perlu dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja dari generator HHO, yakni sebagai berikut :





*Gambar 3.1 Flowchart Penelitian*

### 3.2 **Prosedur Pengujian pada Generator Gas HHO**

Langkah –langkah pelaksanaan pengujian laju produksi (*flowrate*) gas HHO ini adalah sebagai berikut:

### 3.2.1 Tahap Persiapan

#### 3.2.1.1 Persiapan Generator

Pada tahap ini, disiapkan dan dirakit berbagai peralatan generator gas HHO. Adapun yang harus disiapkan yaitu :

1. Generator.  
Generator yang digunakan terbuat dari titanium *grade 1* dengan tebal 1,5 mm. Generator dengan jumlah 12 plat elektroda dimana dimensi luasan plat dari masing-masing berukuran 80 x 80 mm.
2. Kabel listrik, terminal (skun), dan isolasi.  
Kabel listrik, terminal dan isolasi merupakan perangkat yang mengalirkan listrik dari *power supply* ke generator gas HHO.
3. Saluran keluar gas dan saluran masuk elektrolit.  
Pada generator gas HHO dibuatkan 2 buah saluran yaitu saluran keluar untuk gas dan saluran masuk untuk pengisian cairan elektrolit secara manual ke dalam reservoir. Saluran keluar akan terhubung terus dengan selang dan *flowmeter*, sedangkan saluran masuk hanya dibuka atau digunakan saat mengisi elektrolit.
4. Mur, baut, dan ring.  
Mur, baut, dan ring berfungsi sebagai pengikat antara sel dengan reservoir.
5. Selang Plastik.  
Selang plastik digunakan untuk mengalirkan gas HHO dari generator ke *flowmeter* dan dilanjutkan ke dalam *air intake*.
6. Karet Packing.  
Karet packing ini berupa seal atau o-ring, digunakan sebagai pemisah antar plat yang mana nantinya didalam generator akan membentuk ruangan elektrolit dengan ukuran yang telah ditentukan.
7. Pembersihan permukaan elektroda.  
Permukaan elektroda dibersihkan dari kotoran yang menempel dengan menggunakan kain lap secara hati-

hati. Hal ini bertujuan untuk menghindari menempelnya zat-zat yang tidak diinginkan.

### 3.2.1.2 Persiapan Alat Ukur *Flowrate* Gas HHO

Untuk pengujian laju produksi gas HHO menggunakan alat ukur berupa *flow meter* digital. Hasil dari produksi gas HHO diukur dan dibaca dalam satuan Liter per menit. Pengukuran laju produksi gas HHO ini menjadi sangat penting karena menentukan kualitas gas HHO agar gas yang dihasilkan tidak bercampur dengan udara.

### 3.2.1.3 Langkah Persiapan Pengoperasian PWM

Dalam tahapan persiapan ini perlu diperhatikan langkah-langkah untuk SOP PWM sebagai berikut :

1. Dipastikan kapasitas *accu* tidak melebihi 15V DC dan tidak kurang dari 10V DC.
2. Potensio pengatur PWM diposisikan pada *duty cycle* minimal (diputar kekiri penuh).
3. Beban dihubungkan
  - (+) beban ke (+) V.Out (pin. 1)
  - (-) beban ke (-) V.Out (pin 2)
  - ✓ Jika akan memasang amperemeter tambahan, dipasang seri dengan (+) V.Out (Pin 1) dan disambungkan dengan (+) beban.
  - ✓ Jika menggunakan tang ampere, cukup di *clamp* pada (+) V.Out ke (+) beban.
4. 10V DC *supply out* dihubungkan ke V.In *supply* arduino.
5. Kabel serial USB laptop dihubungkan ke arduino (arduino secara otomatis On).
6. *Window* arduino IDE pada laptop dibuka.
7. *supply accu* dihubungkan
  - ✓ (+) *accu* ke (+) V.In (Pin 6)
  - ✓ (-) *accu* ke (-) V.In (Pin 5)
8. Serial monitor (  ) ditekan pada program arduino IDE

- ✓ Proses *start* serial monitor akan mereset arduino secara otomatis, jadi jangan *close* kemudian baru *open*, agar tidak terjadi *restarting* program (auto reset arduino).
- 9. Potensiometer pada PWM diputar sesuai dengan *duty cycle* yang diinginkan.
- 10. Apabila sudah selesai, potensiometer diputar pada posisi minimal, dan kabel (+) V.In (pin 6) dilepas.

**PENTING :**

V.Out (-)  $\neq$  (tidak sama dengan) *Ground*  
 Dilarang untuk dihubungkan secara langsung

**CATATAN:**

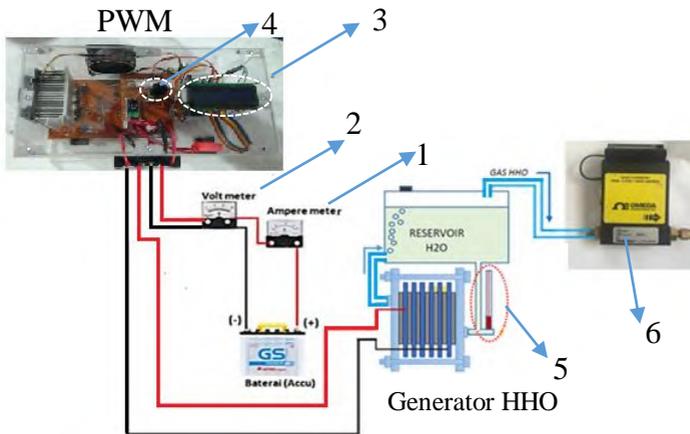
- ✓ Heatshink (pendingin mosfet) bermuatan (-) *out* beban, jangan sampai terhubung dengan *ground* dari sistem.
- ✓ Sekring pengaman pada (+) *accu* dipasang, jika terjadi *short* sebelum masuk sistem, maka sistem tidak rusak.
- ✓ Pasang *switch on/off* (arus tinggi) pada (+) *accu* untuk memudahkan pengoperasian.
- ✓ Jangan lupa *screen server* pada laptop dimatikan agar tidak reset sendiri, dan gunakan kabel USB yang kualitasnya baik, agar pembacaan data di serial monitor akurat.

### 3.2.1.4 Langkah Persiapan Pengukuran *Flowrate* Gas HHO

Dalam tahapan persiapan ini perlu diperhatikan langkah - langkah pengujian laju produksi gas HHO sebagai berikut :

1. Peralatan yang dibutuhkan disiapkan.
2. Rangkaian peralatan disiapkan seperti skema berikut :

### Pengujian Menggunakan Alat PWM



Keterangan Gambar:

1. Pengukur arus
2. Pengukur tegangan
3. Display *duty cycle* PWM
4. Potensio pengatur besarnya *duty cycle*
5. Termometer pengukur temperatur
6. Pengukur *flowrate* gas HHO

*Gambar 3.2 Skema Pengujian yang Dilakukan Menggunakan PWM.*

3. Campuran KOH dengan aquades atau larutan elektrolit disiapkan. Dalam bentuk 1 liter aquades untuk 1 gram KOH. Kemudian diisikan ke dalam generator gas HHO.
4. Pada pengujian dengan menggunakan PWM, *power supply* dari baterai disambungkan ke PWM terlebih dahulu, kemudian dari PWM digunakan sebagai kontrol pada generator HHO dengan mengatur potensiometer untuk variasi *duty cycle*: 20%, 40%, 60%, 80% dan 100%, pada titik pengukuran No.4 dan nilai *duty cycle* akan terlihat pada display (No.3). Dipastikan kembali

sambungan terminal positif dan terminal negatifnya sudah tepat.

5. Larutan elektrolit diisikan kedalam *reserve tank*.
6. Generator gas HHO dan *reserve tank* disambungkan menggunakan selang gas HHO. Kemudian dipastikan tidak ada sambungan yang bocor.
7. Alat pengukur arus dan tegangan pada titik pengukuran No.1&2 serta termometer sebagai pengukur temperatur pada titik pengukuran No.5 dipastikan bekerja dengan baik.
8. Alat ukur *flowrate* gas HHO disiapkan.  
*Hose* keluaran dari *reserve tank* dimasukkan ke dalam alat ukur *flowmeter* pada titik pengukuran No.6, kemudian dipastikan tidak ada sambungan yang bocor.

### 3.2.2 Tahap Pengujian

Pada tahap ini dilakukan pengujian untuk mengetahui unjuk kerja sistem generator gas HHO, langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut :

Pada pengujian dengan penambahan PWM

1. Temperatur awal larutan elektrolit diukur dan dicatat.
2. Saklar *ON* ditekan untuk menyalakan sistem dan alat PWM. Sebelum pengambilan data dilakukan pengaturan pada alat PWM dengan variasi *duty cycle* : 20%, 40%, 60%, 80% dan 100% dengan frekuensi tetap (1 kHz).
3. Kemudian tombol *ON* ditekan pada *stopwatch* untuk menentukan waktu produksi gas HHO setiap 500 cc yang dihasilkan pada setiap variabel yang ditentukan.
4. Arus (Ampere), tegangan (Volt) dan perubahan temperatur (°C) dicatat terhadap waktu (detik) yang ditunjukkan oleh alat ukur pada saat produksi gas HHO.
5. Setelah produksi gas HHO mencapai 500 cc saklar *OFF* ditekan dan dicatat waktu produksi gas HHO setiap 500 cc yang didapatkan.

6. Ulangi langkah 1 – 5 diatas, untuk 5 kali variasi pengambilan data dan variasi pengaturan PWM yang telah ditentukan. Proses pengujian dilakukan setiap 5 menit selama 4 jam, kemudian dilakukan pengambilan data selanjutnya. Tabel 3.1 lembar data pengujian unjuk kerja generato HHO *dry cell* dengan penambahan PWM.

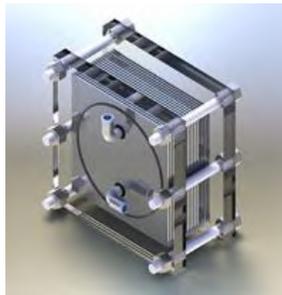
Tabel 3.1 Lembar Data Pengujian Unjuk Kerja Generator HHO *Dry Cell* dengan penambahan PWM

No.	Waktu Pengujian (menit)	Duty Cycle (%)	Frekuensi (Hz)	Tegangan Rata-rata Masuk generator (Volt)	Arus Masuk Generator (Ampere)			Temperatur Fluida Generator (°C)			Waktu Produksi (500 cc/s)
					Arus	Arus	Arus	T	T	T	
					Awal	Akhir	Rata2	Awal	Akhir	Rata-rata	
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

### 3.3 Peralatan yang Digunakan

Adapun peralatan yang digunakan dalam Eksperimen ini untuk mengetahui unjuk kerja gas HHO dan pengaruh penambahan PWM antara lain:

#### 1. Generator HHO



Gambar 3.3 Generator HHO Tipe Kering

Generator HHO yang digunakan yakni berbahan titanium *grade 1* yang memiliki *properties* yakni, elektroda yang digunakan terbuat dari material yang tahan terhadap korosi dan memiliki konduktifitas listrik yang baik, yang berbentuk elektroda plat dan kemudian diuji dengan memvariasikan *duty cycle*. Jenis generator gas HHO yang digunakan dalam pengujian ini adalah tipe kering (*dry cell*). Tipe kering (*dry cell*) adalah generator HHO dimana sebagian elektrodanya tidak terendam cairan elektrolit dan elektrolit hanya mengisi celah-celah antara elektroda itu sendiri.

## 2. *Reserve Tank*

Penampung air (*reserve tank*) merupakan wadah elektrolit dan dihubungkan dengan generator HHO menggunakan selang, fungsinya untuk menjaga jumlah larutan elektrolit di dalam generator HHO. Jadi, jika jumlah cairan dalam generator HHO mulai berkurang maka dengan sendirinya larutan elektrolit dari *reserve tank* akan mengisi ke dalam generator HHO.



Gambar 3.4 *Reserve Tank*

## 3. *HHO Gas Flowmeter*

HHO gas *flowmeter* seperti pada gambar 3.5 digunakan untuk mengukur debit aliran gas (HHO) yang pembacaannya ditampilkan dalam bentuk digit / angka.

- ✓ Merk : Omega
- ✓ Type : FMA 1820

- ✓ Range : 0 – 10 L/min.
- ✓ Akurasi : 0,1 L/min



*Gambar 3.5 HHO Gas Flowmeter*

#### 4. Gelas Ukur

Gelas ukur yang seperti pada gambar 3.6 digunakan untuk mengukur volume air aquades.

- ✓ Merk : Herma
- ✓ Type : SBW-borosdlicate-glass 6.5
- ✓ Capacity : 1000 ml
- ✓ Accuracy : 10 ml



*Gambar 3.6 Gelas Ukur*

#### 5. Baterai Accu

Accu yang seperti pada gambar 3.7 dibawah ini digunakan sebagai catu daya listrik cadangan untuk mensuplai generator gas HHO dengan arus sebesar 45 Ah.

- ✓ Merk : GS Astra
- ✓ Buatan : Indonesia
- ✓ Voltase : 12 volt
- ✓ Type : Hybrid High CCA



Gambar 3.7 Baterai (Accu)

## 6. *Charger Accu*

*Charger accu* seperti pada gambar 3.8 charger *accu* dibawah ini digunakan untuk menjaga agar kondisi *accu* selalu terisi penuh pada saat pengujian laju aliran produksi gas HHO.

- ✓ Voltase input : 220 V
- ✓ Voltase output : 12 V/24 V
- ✓ Arus output : 100 A



Gambar 3.8 Charger Accu

## 7. *Stopwatch*

*Stopwatch* seperti pada gambar 3.9 *stopwatch* dibawah ini digunakan untuk menghitung waktu pengujian laju produksi gas HHO.

- ✓ Merk : Casio
- ✓ Tipe : HS – 3
- ✓ Akurasi : 0,01 detik



*Gambar 3.9 Stopwatch*

## 8. Timbangan Digital

Timbangan digital seperti pada gambar 3.10 timbangan digital dibawah ini digunakan untuk menimbang massa KOH.

- ✓ Buatan : China
- ✓ Type : CHQ Pocket Scale
- ✓ Capacity : 100 gram
- ✓ Akurasi : 0.01 gram



*Gambar 3.10 Timbangan Digital*

## 9. Clamp Meter

Clamp Meter seperti pada gambar 3.11 dibawah ini digunakan untuk mengukur tegangan dan amper yang dibutuhkan oleh generator HHO.

✓	Buatan	: China
✓	Type	: DCM400AD
✓	Resistance	: 400 $\Omega$
✓	ACA	: 40/400 A
✓	DCA	: 40/400 A



*Gambar 3.11 Clamp Meter*

## 10. Termometer

Termometer seperti pada gambar 3.12 dibawah ini digunakan untuk mengukur besar temperatur elektrolit didalam Generator HHO. 1 buah termometer dengan skala 0°C - 115°C. Ketelitian 1°C digunakan untuk mengukur temperatur larutan elektrolit selama pengujian.



*Gambar 3.12 Thermometer*

## 11. Multitester Digital

Multitester seperti pada gambar 3.13, digunakan untuk mengukur tegangan dan arus yang dibutuhkan oleh generator HHO dan pembuatan rangkaian alat elektronika PWM.



Gambar 3.13 Multitester Digital

## 12. Osiloskop

Alat ini digunakan untuk melihat *duty cycle*, frekuensi dan volt dari keluaran arus setelah masuk PWM. Spesifikasinya sebagai berikut :

- ✓ Merk : Atten
- ✓ Type : Atten 1202cl+ Digital Color 200MHz



Gambar 3.14 Osiloskop

## 13. Alat PWM

Rangkaian PWM ini digunakan untuk mengatur arus DC yang masuk pada generator gas HHO, sehingga frekuensi dan *duty cycle* pada arus yang masuk sesuai kebutuhan yang sudah ditentukan.

Kriteria Output PWM:

- ✓ Tegangan = 12 Volt
- ✓ Arus = 5 – 25 A
- ✓ Duty Cycle = 0 – 100 %

- ✓ Frekuensi *Fixed* = 1000 Hz atau 1 kHz
- ✓ Menghasilkan *Pulse* yang Sesuai.
- ✓ Tidak terjadi konsleting rangkaian elektronika.



*Gambar 3.15 Rangkaian Elektronika PWM*

### **3.4 Tahap Pelaksanaan**

Rencana kegiatan dalam penelitian ini terbagi menjadi beberapa tahap sebagai berikut:

1. Tahap *design* komponen dan sistem PWM
2. Tahap pembuatan komponen dan sistem PWM
3. Tahap pengujian dan pengambilan data
4. Tahap analisis data dan pengambilan keputusan

Secara lengkap dapat dijelaskan dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 3.2 Jadwal rencana kegiatan penelitian

NO	DESCRIPTION	JADWAL KEGIATAN									
		APRIL		MEI				JUNI			
		Minggu 3	Minggu 4	Minggu 1	Minggu 2	Minggu 3	Minggu 4	Minggu 1	Minggu 2	Minggu 3	Minggu 4
1	<i>Design</i> komponen (alat)										
2	<i>Design</i> sistem PWM										
3	Pembuatan sistem PWM										
4	Pengujian sistem PWM										
5	<i>Assembly</i> komponen HHO										
6	Pengujian performa alat										
7	Pengambilan data										
8	Analisis data										
9	Kesimpulan										

Tabel 3.3 Rancangan eksperimen

Parameter Input		Parameter Output	
Konstan	Berubah	Diukur	Dihitung
1. Generator HHO	1. Duty cycle PWM 20%, 40%,	1. Produksi gas HHO	1. Kebutuhan energi spesifik
a. Elektroda titanium dan SS 316	60%, 80% dan 100%	a. <i>Flow rate</i>	2. Produksi gas HHO spesifik
b. Elektrolit KOH		b. Waktu	3. Efisiensi gas HHO
c. Konsentrasi 1 gr KOH / 1l.aquades		c. Temperatur elektrolit generator	
d. Dimensi 80 x 80 mm		d. Tegangan DC	
e. Tipe <i>dry cell</i>		e. Arus DC	
f. Tegangan		f. Waktu pengujian tiap	
g. Frekuensi		5 menit, selama 4 jam atau	
		sampai temperatur elektrolit	
		mencapai 70°C ± 1°C	

## **BAB IV**

### **PERHITUNGAN DAN ANALISA DATA**

#### **4.1 Perhitungan**

Tujuan dari perhitungan yang dilakukan ini adalah untuk mengetahui besarnya nilai dari karakteristik setiap komponen unjuk kerja generator gas HHO. Data yang digunakan diambil dari data pengujian Generator Gas HHO tipe *dry cell* dengan *duty cycle* 60% dengan elektrolit sebesar 1 gr/1 liter aquades.

##### Data Pengujian :

- Arus listrik (I) selama 55 menit pengujian = 4,8 A
- Tegangan listrik (V) = 12 V
- Waktu Produksi Gas (t) = 257 detik
- Volume gas terukur (V) = 0,5 liter

##### Properties Gas HHO :

- Massa jenis gas HHO = 0,491167 kg/m<sup>3</sup>
- NKB HHO = 133.255.555,6 J/kg
- Temperatur Gas HHO = 30°C = 303° K
- Tekanan Gas HHO (P) = 1 Atm
- Konstanta Gas Ideal ( $\bar{R}$ ) = 0,08206  $\frac{\text{L.atm}}{\text{mol.K}}$
- Nilai energi entalpi (h) untuk penguraian gas H<sub>2</sub>O pada kondisi gas ideal, STP :

$$\Delta hf = + 285,84 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Reaksi endoterm yang menghasilkan energi entalpi yang bernilai positif (+)

#### **4.1.1. Daya yang dibutuhkan Generator Gas HHO**

Rumus untuk menghitung daya listrik yang digunakan adalah :

$$\begin{aligned} P &= V \times I \\ &= 12 \text{ V} \times 4,8 \text{ A} \\ &= 57,6 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Jadi, Daya yang dibutuhkan untuk memproduksi gas HHO sebanyak 500 cc adalah 47,4 Watt.

#### 4.1.2. Laju Produksi Gas HHO

Laju produksi gas HHO dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\dot{m} = Q \times \rho_{HHO}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} Q &= \frac{V}{t \times 1000} \\ &= \frac{0.5 \text{ liter}}{257 \text{ detik} \times 1000} \\ &= 1,94553 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik} \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= Q \times \rho_{HHO} \\ &= 1,94553 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik} \times 0.491167 \text{ kg/m}^3 \\ &= 9,5557 \times 10^{-7} \text{ kg/detik} \end{aligned}$$

#### 4.1.3. Efisiensi Generator Gas HHO

Efisiensi Generator HHO dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{Energi yang digunakan untuk elektrolisa}}{\text{Energi yang dibutuhkan generator}} \times 100\% \\ &= \frac{\Delta h \times \dot{n}}{(V \times I)} \times 100\% \end{aligned}$$

Dimana :

$\Delta h$	= Energi entalpi yang dihasilkan	(J/mol)
$\dot{V}$	= Volume per detik	(Liter/s)
$\dot{n}$	= Molaritas senyawa per waktu	(mol/s)
$V$	= Tegangan	(Volt)
$I$	= Arus	(Ampere)

- Energi yang digunakan untuk elektrolisa (output)  
 Daya (P) =  $V \times I$   
 =  $12 \text{ V} \times 4,8 \text{ A} = 57,6 \text{ Watt} = 57,6 \text{ J/s}$
- Energi yang dibutuhkan generator untuk menghasilkan gas HHO (input)  
 Untuk mencari nilai  $\dot{n}$  , menggunakan rumus gas ideal :

$P \times \dot{V} = \dot{n} \times R \times T$  (Nilai volume dan mol adalah per satuan waktu untuk menyamakan energi yang digunakan per satuan waktu).

Dimana :

- $P$  = Tekanan gas ideal (atm)  
 $V$  = Volume gas terukur (L)  
 $n$  = Molaritas senyawa (mol)  
 $\bar{R}$  = Konstanta Gas ideal (L.atm/mol.K)  
 $T$  = Temperatur, 298°K.

$$\dot{n} = \frac{P \times \dot{V}}{R \times T} = \frac{1 \text{ atm} \times \left(\frac{0,5 \text{ L}}{257 \text{ s}}\right)}{0,08206 \frac{\text{L.atm}}{\text{mol.K}} \times 298^\circ \text{ K}}$$

$$= 7,9559 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Sehingga energi yang dibutuhkan generator untuk menghasilkan gas HHO adalah :

$$\Delta hf \times \dot{n} = 285,84 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \times 7,9559 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$= 22,74113 \text{ J/s}$$

Maka, Efisiensi yang didapatkan :

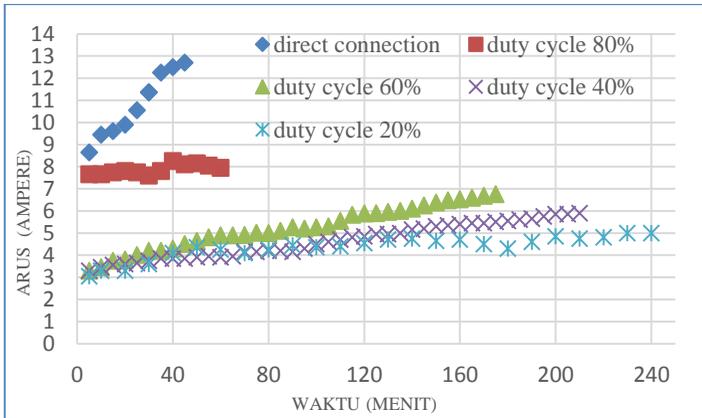
$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{\Delta hf \times \dot{n}}{(V \times I)} \times 100 \%$$

$$\eta_{\text{Gen}} = \frac{22,7411374 \text{ J/s}}{57,6 \text{ Watt}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{Gen}} = 39,48 \%$$

## 4.2. Analisa Data Generator Gas HHO Tipe *Dry Cell* dengan Kombinasi Elektroda Titanium dan SS 316

### 4.2.1. Arus yang Digunakan Generator Gas HHO



Gambar 4.1 Grafik Arus Generator Terhadap Waktu

Proses elektrolisa yang terjadi pada Generator Gas HHO tipe *dry cell* merupakan proses yang paling berpengaruh dalam pengujian ini. Elektrolisa tidak lepas dari energi listrik. Di dalam energi listrik terdapat Arus dan tegangan, Arus listrik sendiri merupakan aliran partikel yang memiliki muatan listrik positif. Adanya perbedaan potensial listrik menyebabkan adanya aliran pada suatu penghantar arus dari potensial tinggi ke potensial rendah yang biasa disebut dengan perbedaan tegangan listrik. Semakin besar beda potensial, maka arus listrik yang mengalir melalui suatu penghantar juga semakin besar. Arus listrik juga mempunyai hambatan elektroda, semakin kecil hambatan elektroda, maka semakin besar arus yang mengalir pada elektroda tersebut. Elektroda dipengaruhi oleh dimensi elektroda dan hambatan jenis elektroda itu sendiri. Secara rumusan dapat dilihat bahwa :

$$I = V/R$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

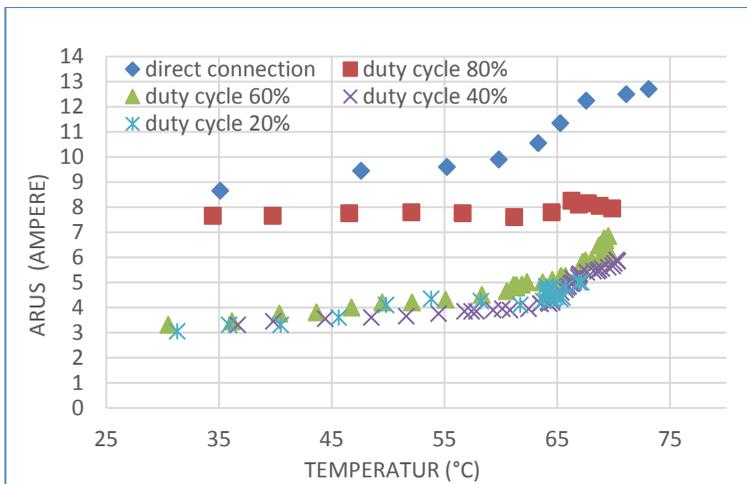
Dimana :

$\rho$  = hambatan jenis logam ( $\Omega\text{m}$ )

$l$  = panjang elektroda (m)

$A$  = luas penampang ( $\text{m}^2$ )

Pada grafik arus terhadap fungsi waktu, perbedaan arus yang terlihat sangat signifikan adalah pengujian pada generator gas HHO yang tidak menggunakan PWM (*direct*). Karena tidak adanya rangkaian pengontrol aliran arus dan tegangan, menyebabkan melonjaknya range arus pada pengujian ini yaitu dari 8,65 A sampai 12,7 A dalam waktu 45 menit dan mencapai suhu 70° C. Sehingga karakteristik dari unjuk kerja generator *direct connection* adalah membutuhkan arus yang lebih besar dan waktu kerjanya tidak tahan lama jika dibandingkan dengan menggunakan PWM.



Gambar 4.2 Grafik Arus Generator Terhadap Temperatur

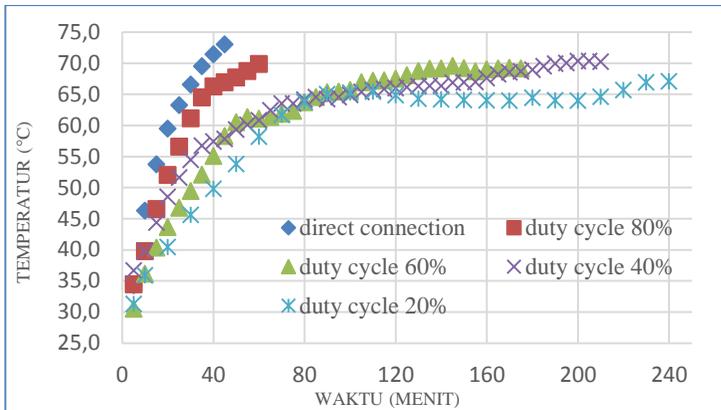
Karakteristik pada pengujian unjuk kerja generator *dry cell* menggunakan rangkaian PWM, nilai arus yang didapatkan cukup stabil, hal ini dikarenakan pengaruh dari pemakaian rangkaian PWM dengan *duty cycle*. *Duty cycle* mempengaruhi aliran arus dan tegangan yang mengalir pada elektroda, sehingga arus dan tegangan tidak di alirkan penuh secara terus menerus tetapi putus-putus (on-off) namun tetap kontinyu. Karakteristik unjuk kerja

pada *duty cycle* 20% range arus berkisar antara 3,05 – 5,0 A yang merupakan range arus terendah pada pengujian ini dan memiliki waktu kerja terlama yang mencapai 240 menit, hal ini disebabkan perbandingan lama waktu suatu signal on berada dalam kondisi terendah untuk bisa menghasilkan gas HHO pada Generator.

Pada *duty cycle* 40% range arus berkisar 3,3 – 5,9 A dan pada *duty cycle* 60% arus berkisar 3,3 – 6,85 A, yang merupakan range arus paling mendekati stabil. Sedangkan karakteristik *duty cycle* 80% memiliki range arus berkisar antara 7,65 – 8,25 A yang merupakan range arus tertinggi pada pengujian menggunakan PWM ini dan memiliki waktu kerja mencapai 60 menit dalam mencapai temperatur 70°C, sedangkan pada *duty cycle* 100% range arus hampir sama halnya dengan pengujian pada generator gas HHO yang tidak menggunakan PWM (*direct*) hal ini disebabkan perbandingan lama waktu suatu signal on berada dalam kondisi tertinggi sehingga arus mengalir 100% ke dalam generator HHO dan relatif lebih stabil dalam menghasilkan gas HHO pada Generator.

#### **4.2.2 Temperatur Fluida Generator Gas HHO**

Proses elektrolisa yang terjadi pada Generator Gas HHO dipengaruhi oleh masukan arus listrik menuju plat elektroda dan fluida di dalam generator. Seiring waktu kerja generator memproduksi gas HHO, arus listrik yang mengalir melalui penghantar tersebut semakin besar, sehingga menimbulkan kenaikan temperatur fluida didalam generator HHO. Hal tersebut diakibatkan arus yang masuk dari sumber listrik (baterai) tidak terkontrol, sehingga sebagian arus dan tegangan yang tidak digunakan untuk proses elektrolisa menghasilkan panas yang terus meningkat. Jadi, yang perlu diperhatikan adalah menjaga kualitas gas HHO dan menjaga temperatur fluida dibawah 70°C agar tidak menghasilkan uap air.



Gambar 4.3 Grafik Temperatur Elektrolit Terhadap Waktu

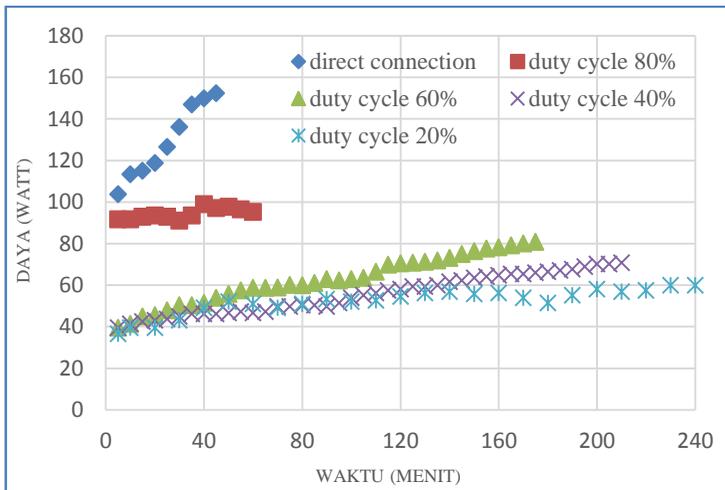
Grafik temperatur terhadap fungsi waktu memperlihatkan nilai temperatur yang meningkat seiring bertambahnya waktu. Akan tetapi, peningkatan temperatur yang sangat signifikan ditunjukkan oleh grafik pengujian generator tanpa rangkaian PWM yaitu 35,1 °C sampai 71,1 °C dalam waktu 40 menit. Hal ini disebabkan oleh tingginya arus yang mengalir pada elektroda generator berlangsung secara kontinyu dan terus menerus.

Karakteristik dari pengujian unjuk kerja generator menggunakan rangkaian PWM dengan *duty cycle* peningkatan temperatur tidak begitu signifikan dan bisa terkontrol untuk menjaga kualitas gas HHO agar tidak berubah menjadi uap air. Pada *duty cycle* 20% kenaikan temperatur cenderung lebih lama dan stabil. Namun seiring dengan variasi peningkatan *duty cycle* 40%, 60%, dan 80% peningkatan temperatur menjadi lebih cepat. Tetapi jika dibandingkan dengan dengan *direct connection*, penggunaan PWM variasi *duty cycle* menjadi sangat baik. Hal ini disebabkan karena pola *duty cycle* yang tidak mengalirkan arus dan tegangan penuh secara terus menerus, namun putus-putus (on-off) dan tetap kontinyu.

### 4.2.3 Daya yang dibutuhkan Generator Gas HHO

Grafik daya generator terhadap fungsi waktu memperlihatkan tren grafik yang terus naik untuk semua variasi pengujian generator HHO. Hal ini menunjukkan bahwa konsumsi daya generator HHO pada pengujian tanpa PWM semakin meningkat signifikan seiring bertambahnya waktu. Daya generator dengan peningkatan terbesar terdapat pada generator tanpa PWM, sedangkan pada Generator dengan PWM yang diatur oleh *duty cycle* tertentu memiliki grafik peningkatan yang lebih landai dan relatif lebih kecil nilainya. Kenaikan kebutuhan daya pada generator HHO seiring dengan meningkatkan arus yang digunakan untuk proses elektrolisis. Perbedaan potensial listrik menyebabkan adanya aliran pada suatu penghantar arus dan tegangan listrik. Secara rumusan dapat ditentukan bahwa:

$$P = V \times I$$

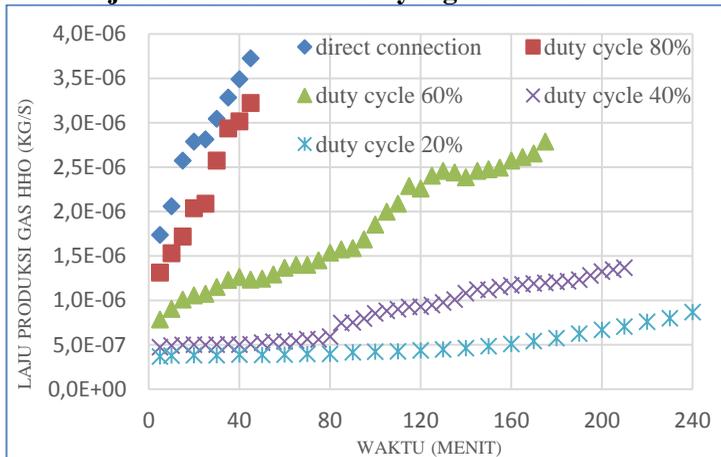


Gambar 4.4 Grafik Daya yang dibutuhkan Terhadap Waktu

Karakteristik dari pengujian unjuk kerja generator menggunakan PWM variasi *duty cycle* memiliki nilai yang berbeda-beda, terlihat pada *duty cycle* 20% dengan nilai sebesar

36,6 – 60,0 Watt memiliki karakteristik kenaikan nilai temperatur paling kecil, sedangkan *duty cycle* 40% dengan nilai sebesar 39,6 – 70,8 watt dan *duty cycle* 60% dengan nilai sebesar 39,6 – 82,2 memiliki grafik dengan peningkatan yang landai. Kebutuhan daya terbesar pada variasi *duty cycle* 80% dibandingkan dengan variasi *duty cycle* yang lain yaitu sekitar 91,8 – 97,8 Watt. Semakin besar beda potensial, maka energi yang mengalir melalui suatu penghantar juga semakin besar. Daya ini dipengaruhi arus listrik yang juga mempunyai hambatan elektroda, semakin kecil hambatan elektroda, maka semakin besar daya yang mengalir pada elektroda tersebut. Elektroda tersebut juga dipengaruhi oleh dimensi elektroda dan hambatan jenis elektroda itu sendiri.

#### 4.2.4 Laju Produksi Gas HHO yang Dihasilkan



Gambar 4.5 Grafik Laju Produksi Gas HHO Terhadap Waktu

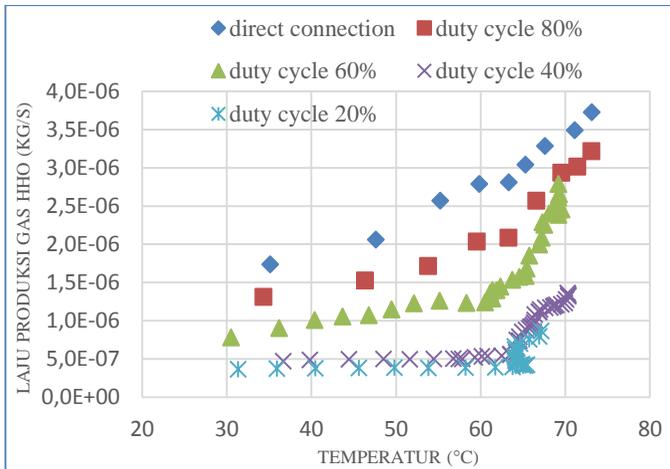
Produk utama proses elektrolisa air pada generator HHO adalah gas HHO. Sehingga untuk mengetahui seberapa baik unjuk kerja dari generator HHO adalah berapa banyak gas HHO yang dihasilkan oleh generator itu sendiri. Grafik laju produksi gas HHO terhadap fungsi waktu menunjukkan peningkatan laju produksi gas

HHO seiring dengan waktu kerja generator. Tren grafik yang mengalami peningkatan paling signifikan adalah pengujian generator gas HHO tanpa PWM. Berbeda dengan pengujian dengan menggunakan PWM variasi *duty cycle*, tren grafik yang terlihat peningkatannya tidak begitu signifikan. Penurunan laju produksi gas HHO inilah yang menjadi kelemahan dari sistem yang menggunakan rangkaian PWM.

Karakteristik unjuk kerja generator ini dengan variasi *duty cycle* memiliki nilai yang berbeda-beda. Saat mencapai temperatur 70°C, variasi *duty cycle* 20% didapatkan laju produksi terendah  $1,033 \times 10^{-6}$  kg/s yang merupakan laju produksi gas HHO terendah pada pengujian ini namun memiliki waktu kerja terlalu lama yang mencapai 240 menit. Pada *duty cycle* 40% didapatkan  $1,38719 \times 10^{-6}$  dan pada *duty cycle* 60% didapatkan  $1,4927 \times 10^{-6}$ . Sedangkan pada variasi *duty cycle* tertinggi 80% didapatkan laju produksi sebesar  $2,0851 \times 10^{-6}$  kg/s. Hal ini disebabkan perbandingan lama waktu suatu signal on berada dalam kondisi terendah untuk bisa menghasilkan gas HHO pada Generator. Selain itu, sesuai dengan rumus sebagai berikut :

$$\dot{m} = Q \times \rho_{HHO}, \text{ dimana } Q = \frac{V}{t \times 1000}$$

Dimana laju produksi gas HHO yang semakin besar karena debit pada generator gas HHO meningkat, debit meningkat dikarenakan waktu produksi dari gas HHO per volume semakin cepat. Seiring dengan bertambahnya waktu, temperatur panas dari generator gas HHO yang bekerja juga semakin besar. Berikut ini grafik laju produksi gas HHO jika difungsikan terhadap temperatur yang dibatasi hingga mencapai maksimal 70°C.



*Gambar 4.6 Grafik Laju Produksi Gas HHO Terhadap Temperatur*

Karakteristik unjuk kerja generator dry cell dengan variasi duty cycle terlihat lebih landai dibandingkan dengan tanpa penggunaan PWM. Akibat daya yang masuk ke elektroda dan fluida generator secara kontinyu, maka temperatur fluida generator menjadi semakin tinggi dan akan mempengaruhi kepekatan dari elektrolit generator. Semakin besar produk yang dihasilkan, maka elektrolit yang digunakan pada generator semakin berkurang sehingga kepekatan elektrolit meningkat. Hal ini akan memperbesar laju produksi gas HHO.

#### **4.2.5 Efisiensi Generator Gas HHO**

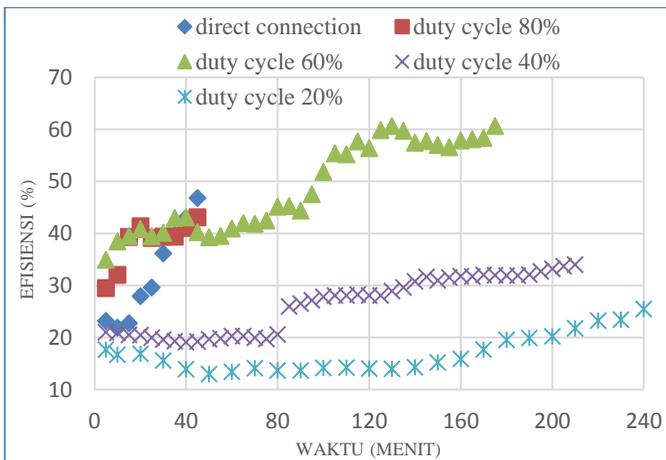
Efisiensi generator HHO merupakan perbandingan antara nilai entalpi gas HHO dikali nilai mol-nya dengan daya listrik yang digunakan untuk proses elektrolisis tersebut. Daya listrik merupakan perkalian antara tegangan listrik dengan arus listrik yang mengalir.

Efisiensi Generator HHO dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\eta = \frac{\text{Energi yang digunakan untuk elektrolisa}}{\text{Energi yang dibutuhkan generator}} \times 100\%$$

$$\text{dengan penjabarannya adalah} = \frac{\Delta h \times \dot{n}}{(V \times I)} \times 100\%$$

yang mempengaruhi nilai efisiensi adalah perubahan entalpi total pada suatu sistem reaksi (dimana reaktan dan produk reaksi dinyatakan sebagai sistem termodinamik) yang terjadi ketika satu molekul bereaksi sempurna dengan oksigen yang terjadi pada 298°K dan tekanan atmosfer 1 atm. Nilai entalpi akan tetap konstan selama tidak ada energi yang masuk atau keluar dari zat. Perubahan kalor atau entalpi yang terjadi selama proses penerimaan atau pelepasan kalor dinyatakan dengan *perubahan entalpi* ( $\Delta h$ ). Reaksi yang terjadi dalam fluida generator adalah reaksi endoterm, yaitu menyerap panas dari lingkungan ke sistem, temperatur dari campuran reaksi akan turun dan energi potensial dari zat- zat kimia yang bersangkutan akan naik.



Gambar 4.7 Grafik Efisiensi Generator Terhadap Waktu.

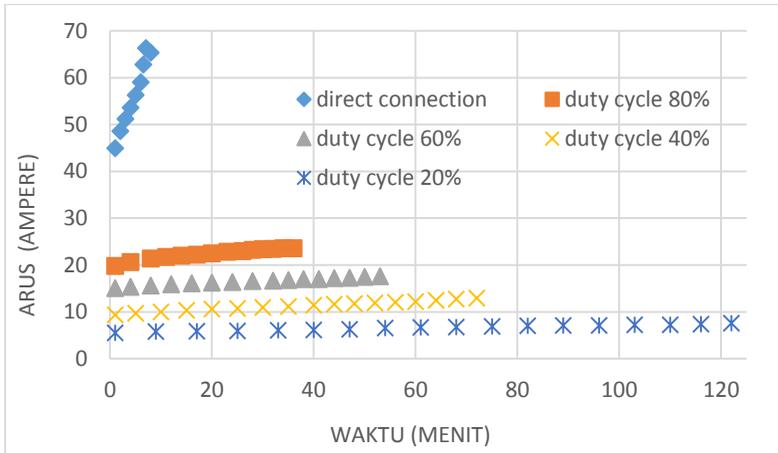
Energi yang berguna (output) diwakili oleh perkalian nilai energi entalpi HHO ( $\Delta H$ ) dengan molaritas senyawa per

satuan waktu, sedangkan energi yang dibutuhkan generator (input) diwakili oleh daya generator HHO. Tren grafik secara umum mengalami kenaikan seiring dengan semakin lamanya waktu produksi gas HHO, dikarenakan molaritas (mol/s) nilainya relatif besar pada pengujian menit ke-20 seiring dengan daya generator HHO yang nilainya relatif kecil.

Grafik efisiensi generator terhadap fungsi waktu memperlihatkan trend grafik dengan efisiensi yang meningkat pada seluruh generator gas HHO. Pada generator gas HHO menggunakan PWM dengan *duty cycle* efisiensi paling tinggi adalah *duty cycle* 60% yaitu sekitar 35% - 65%, sedangkan *duty cycle* 40% efisiensinya 21% - 34%, *duty cycle* 80% yaitu 29 - 43% dan efisiensi terendah pada generator HHO tipe *dry cell* adalah variasi *duty cycle* 20% efisiensinya 13% - 27%. Sedangkan pada pengujian generator tanpa PWM memiliki efisiensi yang cukup tinggi yaitu 21% - 47%. Sehingga karakteristik pada unjuk kerja dengan variasi terbaik adalah generator dengan *duty cycle* 80% dikarenakan laju produksi gas HHO yang relatif cukup tinggi dibandingkan *duty cycle* yang lain dengan kebutuhan daya generator yang memiliki nilai selisih sedikit.

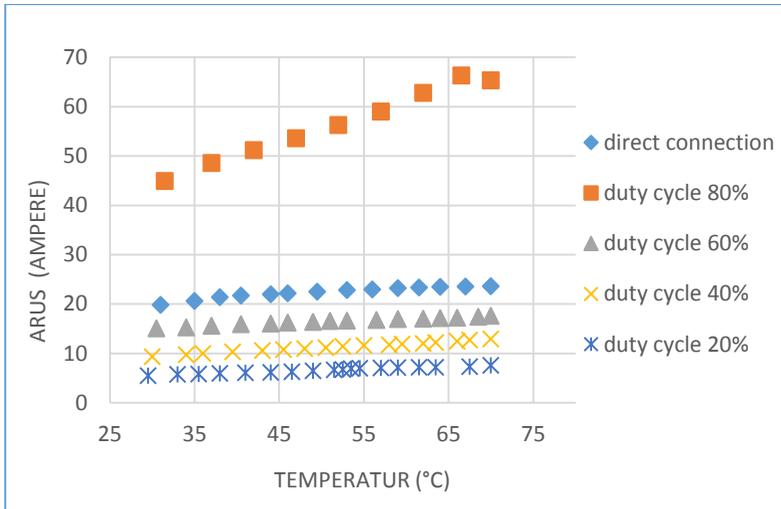
### **4.3 Analisa Data Generator Gas HHO Tipe *Dry Cell* dengan Elektroda *Full SS 316***

#### **4.3.1 Arus yang Digunakan Generator Gas HHO**



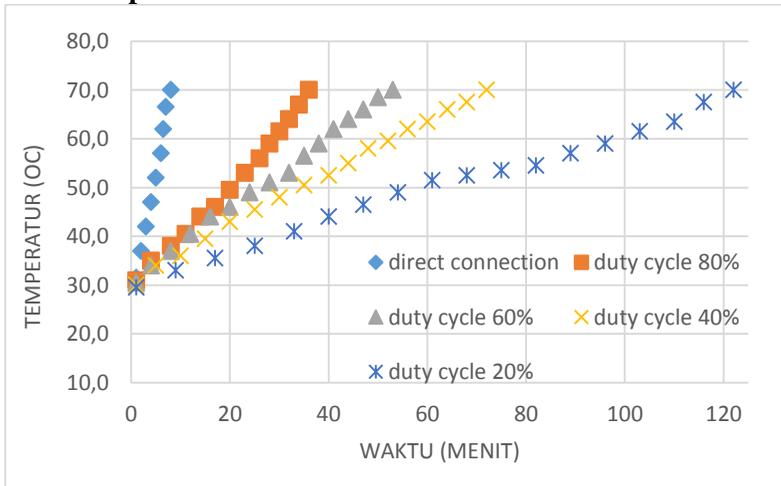
Gambar 4.8 Grafik Arus Generator Terhadap Waktu

Karakteristik unjuk kerja pada *duty cycle* 20% range arus berkisar antara 5,5 - 7,5 A yang merupakan range arus terendah pada pengujian ini dan memiliki waktu kerja terlama yang mencapai 112 menit, hal ini disebabkan perbandingan lama waktu suatu signal on berada dalam kondisi terendah untuk bisa menghasilkan gas HHO pada Generator. Pada *duty cycle* 40% range arus berkisar 9,2-12,9 A dan pada *duty cycle* 60% arus berkisar 15-17,6 A, yang merupakan range arus paling mendekati stabil. Sedangkan karakteristik *duty cycle* 80% memiliki range arus berkisar antara 19,8 – 23,6 A yang merupakan range arus tertinggi pada pengujian menggunakan PWM ini dan memiliki waktu kerja mencapai 36 menit dalam mencapai temperatur 70°C, hal ini disebabkan perbandingan lama waktu suatu signal on berada dalam kondisi tertinggi sehingga bisa lebih stabil dalam menghasilkan gas HHO pada Generator.



Gambar 4.9 Grafik Arus Generator Terhadap Temperatur

#### 4.3.2 Temperatur Fluida Generator Gas HHO

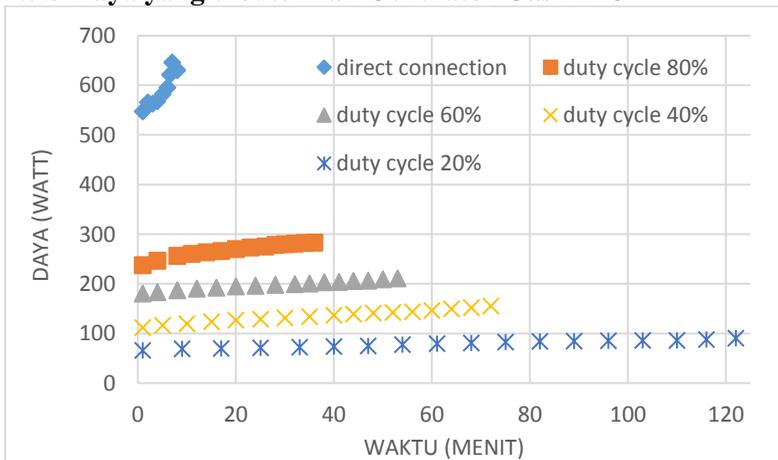


Gambar 4.10 Grafik Temperatur Elektrolit Generator Terhadap Waktu

Grafik temperatur terhadap fungsi waktu memperlihatkan nilai temperatur yang meningkat seiring bertambahnya waktu. Akan tetapi, peningkatan temperatur yang sangat signifikan ditunjukkan oleh grafik pengujian generator tanpa rangkaian PWM yaitu 31,5 °C sampai 70 °C dalam waktu 8 menit. Hal ini disebabkan oleh tingginya arus yang mengalir pada elektroda generator tidak terkontrol.

Karakteristik dari pengujian unjuk kerja generator menggunakan rangkaian PWM dengan duty cycle peningkatan temperatur tidak begitu signifikan dan bisa terkontrol untuk menjaga kualitas gas HHO agar tidak berubah menjadi uap air. Pada *duty cycle* 20% kenaikan temperatur cenderung lebih lama dan stabil. Namun seiring dengan variasi peningkatan *duty cycle* 40%, 60%, dan 80% peningkatan temperatur menjadi lebih cepat. Tetapi jika dibandingkan dengan dengan *direct connection*, penggunaan PWM variasi *duty cycle* menjadi lebih baik. Hal ini disebabkan karena pola *duty cycle* yang tidak mengalirkan arus dan tegangan penuh secara terus menerus, namun putus-putus (on-off) dan tetap kontinyu.

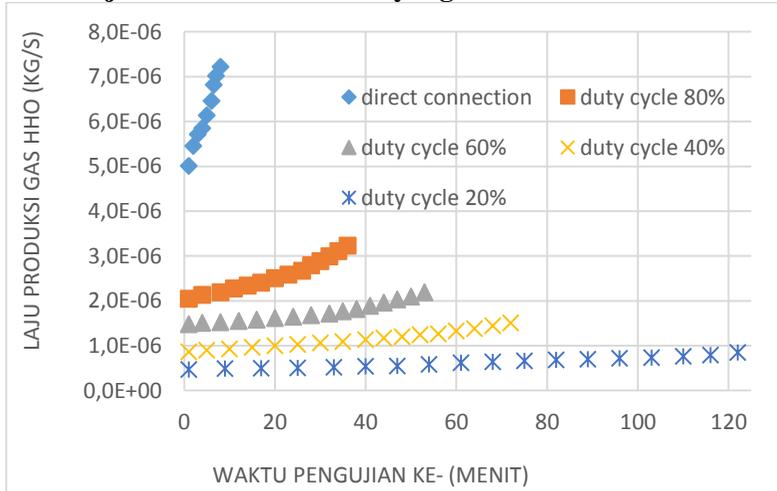
#### 4.3.3 Daya yang dibutuhkan Generator Gas HHO



Gambar 4.11 Grafik Daya Terhadap Waktu

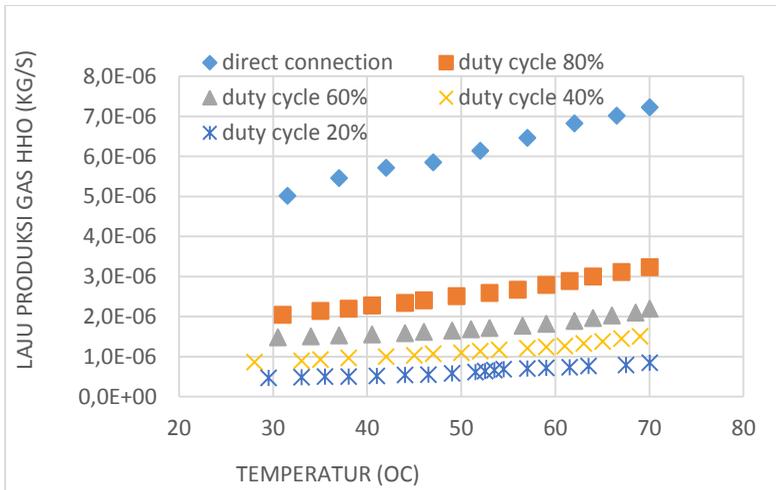
Karakteristik dari pengujian unjuk kerja generator menggunakan PWM variasi *duty cycle* memiliki nilai yang berbeda-beda, terlihat pada *duty cycle* 20% dengan nilai sebesar 66 – 90,6 Watt memiliki karakteristik kenaikan nilai temperatur paling kecil, sedangkan *duty cycle* 40% dengan nilai sebesar 112,2 – 155,4 watt dan *duty cycle* 60% dengan nilai sebesar 180,6 -211,2 memiliki grafik dengan peningkatan yang landai. Kebutuhan daya terbesar pada variasi *duty cycle* 80% dibandingkan dengan variasi *duty cycle* yang lain yaitu sekitar 237,6 - 283,2 Watt. Semakin besar beda potensial, maka energi yang mengalir melalui suatu penghantar juga semakin besar. Daya ini dipengaruhi arus listrik yang juga mempunyai hambatan elektroda, semakin kecil hambatan elektroda, maka semakin besar daya yang mengalir pada elektroda tersebut. Elektroda tersebut juga dipengaruhi oleh dimensi elektroda dan hambatan jenis elektroda itu sendiri.

#### 4.3.4 Laju Produksi Gas HHO yang Dihasilkan



Gambar 4.12 Grafik Laju Produksi Gas HHO yang Dihasilkan Terhadap Waktu

Karakteristik unjuk kerja generator ini dengan variasi *duty cycle* memiliki nilai yang berbeda-beda. Saat mencapai temperatur  $70^{\circ}\text{C}$ , variasi *duty cycle* 20% didapatkan laju produksi terendah  $8,4684 \times 10^{-7}$  kg/s yang merupakan laju produksi gas HHO terendah pada pengujian ini namun memiliki waktu kerja terlama yang mencapai 112 menit. Pada *duty cycle* 40% didapatkan  $1,5006 \times 10^{-6}$  dan pada *duty cycle* 60% didapatkan  $2,1927 \times 10^{-6}$ . Sedangkan pada variasi *duty cycle* tertinggi 80% didapatkan laju produksi sebesar  $6,5 \times 10^{-6}$  kg/s. Hal ini disebabkan perbandingan lama waktu suatu signal on berada dalam kondisi terendah untuk bisa menghasilkan gas HHO pada Generator.

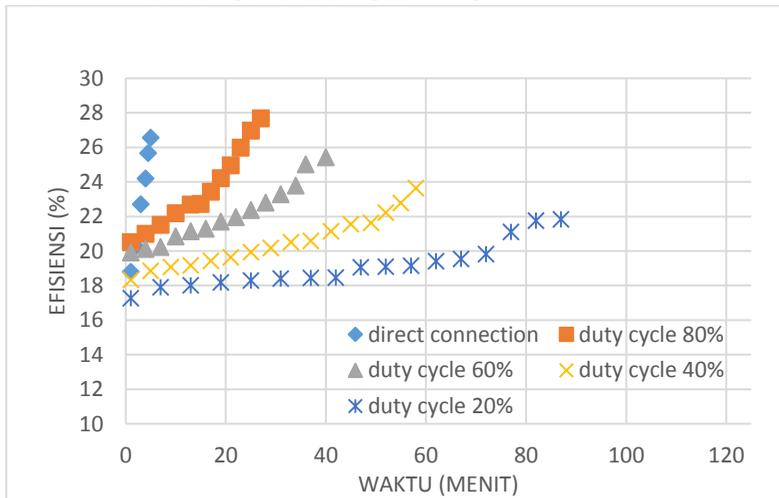


Gambar 4.13 Grafik Laju Produksi Gas HHO yang Dihasilkan Terhadap Temperatur

Begitu juga ketika grafik laju produksi gas HHO terhadap fungsi temperatur yang dibatasi hingga mencapai suhu  $70^{\circ}\text{C}$  menunjukkan bahwa karakteristik unjuk kerja generator dry cell dengan variasi *duty cycle* terlihat lebih landai dibandingkan dengan tanpa penggunaan PWM. Akibat daya yang masuk ke elektroda dan fluida generator secara kontinyu, maka temperatur fluida

generator menjadi semakin tinggi dan akan mempengaruhi kepekatan dari elektrolit generator. Semakin besar produk yang dihasilkan, maka elektrolit yang digunakan pada generator semakin berkurang sehingga kepekatan elektrolit meningkat. Hal ini akan memperbesar laju produksi gas HHO.

#### 4.3.5 Efisiensi Generator Gas HHO



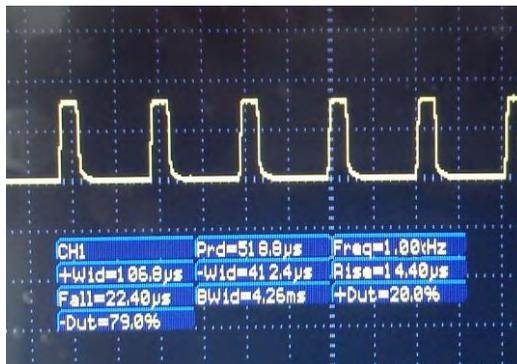
*Gambar 4.14 Grafik Efisiensi generator Gas HHO Terhadap Temperatur*

Grafik efisiensi generator terhadap fungsi waktu memperlihatkan trend grafik dengan efisiensi yang meningkat pada seluruh Generator gas HHO. Pada generator gas HHO menggunakan PWM dengan duty cycle efisiensi paling tinggi adalah duty cycle 80% yaitu sekitar 20% - 27%, sedangkan duty cycle 60% efisiensinya 19%-24%, duty cycle 40% efisiensinya 18% - 23%, dan efisiensi terendah pada generator HHO tipe dry cell adalah variasi duty cycle 20% yaitu 17 - 22%. Sedangkan pada pengujian generator tanpa PWM memiliki efisiensi yang cukup tinggi yaitu 20% - 27%. Sehingga karakteristik pada unjuk kerja dengan variasi terbaik adalah generator dengan duty cycle 80%

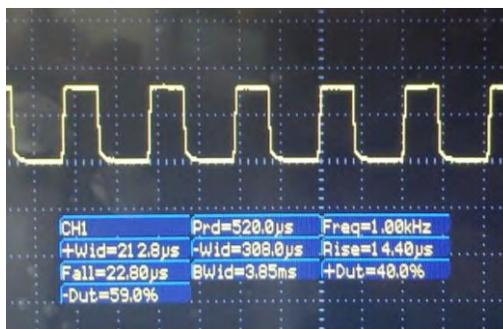
dikarenakan laju produksi gas HHO yang relatif cukup tinggi dibandingkan duty cycle yang lain dengan kebutuhan daya generator yang memiliki nilai selisih sedikit .

#### 4.4 Visualisasi Duty Cycle

Analisa visualisasi *Duty Cycle* pada pengujian Generator Gas HHO ini bertujuan untuk mengetahui performa grafik *duty cycle* dan frekuensi dengan menggunakan PWM Frequency (1 kHz) pada saat pengujian berlangsung.



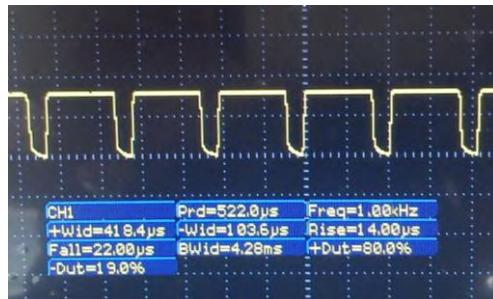
Gambar 4.15 Grafik Duty cycle 20 % dan Frekuensi 1 kHz pada Osiloskop



Gambar 4.16 Grafik Duty cycle 40 % dan Frekuensi 1 kHz pada Osiloskop



*Gambar 4.17 Grafik Duty cycle 60 % dan Frekuensi 1 kHz pada Osiloskop*



*Gambar 4.18 Grafik Duty cycle 80 % dan Frekuensi 1 kHz pada Osiloskop*

#### **4.5 Visualisasi Larutan Elektrolit dan Elektroda**

Analisa visualisasi pengujian Generator Gas HHO pada tipe dry cell hingga mencapai temperatur 70°C bertujuan untuk mengetahui bagaimana perubahan warna yang terjadi pada larutan elektrolit KOH. Pengambilan gambar dilakukan pada saat temperatur fluida generator mencapai 70°C, dimulai dari kondisi awal sebelum pengujian, saat terjadinya proses elektrolisa menit ke 35 sampai akhir pengujian.

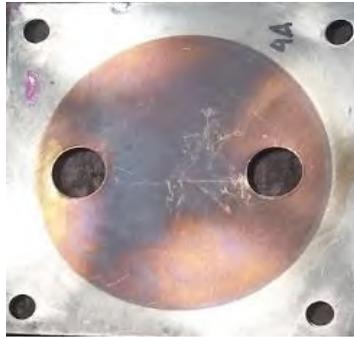


*Gambar 4.19 Generator HHO Dry Cell Sebelum Pengujian*

Setelah dilakukan pengujian mencapai temperatur  $70^{\circ}\text{C}$ , maka kondisi elektroda pada setiap generator menjadi sebagai berikut :



*Gambar 4.20 Elektroda SS 316 Tipe Dry Cell dengan Penambahan PWM Setelah Pengujian Mencapai Temperatur =  $70^{\circ}\text{C}$*



*Gambar 4.21 Elektroda Titanium Tipe Dry Cell dengan Penambahan PWM Setelah Pengujian Mencapai Temperatur = 70°C*

Setelah akhir pengujian, maka kondisi larutan pada setiap Generator menjadi sebagai berikut :



( A )



( B )



(C)



(D)



(E)

**Gambar 4.22 Fluida Generator HHO Dry Cell Setelah Pengujian**  
 (A. Duty Cycle 20%, B. Duty Cycle 40%, C. Duty Cycle 60%,  
 D. Duty Cycle 80%, dan E. Tanpa Duty Cycle)

Dari gambar-gambar pengujian generator HHO diatas dapat dilihat bahwa elektrolit pada generator dengan *duty cycle* 20% memiliki warna yang keruh berwarna kecoklatan, dibanding dengan *duty cycle* 40%, 60%, 80% dan tanpa PWM. Karena pada *duty cycle* 20% pengambilan data sampai dengan menit ke-240, sehingga seiring dengan lamanya waktu pengujian (pengambilan data) menyebabkan katalis yang bereaksi dengan H<sub>2</sub>O banyak

mengikis permukaan logam *stainless steel* sebagai kutub anoda. Kemudian disusul oleh *duty cycle* 60%, non-PWM (*duty cycle* 100%), 80%, dan terakhir 40% dengan endapan paling sedikit. Terbentuknya endapan pada larutan ini disebabkan ketika proses elektrolisis berlangsung, elektroda *stainless steel* yang terendam dalam larutan elektrolit dan mengalami penurunan ketahanan terhadap korosi.

Pada proses elektrolisis elektroda *stainless steel* dialiri arus listrik yang memiliki elektron-elektron yang mengalir. Logam ini yang kehilangan elektron akan terionisasi dalam larutan elektrolit. Kehilangan elektron pada logam dapat disebabkan oleh oksidasi pada anoda. Pada *stainless steel*, Cr yang seharusnya membentuk lapisan justru teroksidasi terlebih dahulu membentuk  $\text{CrO}_3$  karena Cr lebih reaktif dari Fe (pada deret volta  $E^\circ \text{Cr} < E^\circ \text{Fe}$ ), sehingga Cr akan terlepas dari permukaan *stainless steel* dan membentuk endapan oksida Cr berwarna kuning kecoklatan pada larutan.

Ketika Cr telah habis terkorosi, maka Fe yang selanjutnya akan teroksidasi. Semakin besar arus yang mengalir, maka aktifitas ion akan semakin tinggi sehingga endapan yang terjadi juga semakin banyak.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

LAMPIRAN A  
DATA PENGUJIAN GENERATOR HHO

Percobaan Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Kombinasi Titanium dan SS 316 serta Elektroda *Full SS 316*

Tabel A.1 Data Percobaan *Duty Cycle* 100% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell* Elektroda Kombinasi Titanium dan SS 316

No.	Waktu Pengujian (menit)	Arus Awal (A)	Arus Akhir (A)	Arus Rata-Rata (A)	Tegangan Rata-Rata (V)	Temperatur Awal (°C) elektrolit	Temperatur Akhir (°C) elektrolit	Temperatur reRata(°C) elektrolit	Waktu Produksi (detik)
1	5	8,0	9,3	8,65	12	27,5	42,7	35,1	191
2	10	9,3	9,6	9,45	12	42,7	52,5	47,6	161
3	15	9,6	9,6	9,60	12	52,5	57,9	55,2	129
4	20	9,6	10,2	9,90	12	57,9	61,7	59,8	119
5	25	10,2	10,9	10,55	12	61,7	64,9	63,3	118
6	30	10,9	11,8	11,35	12	64,9	65,6	65,3	109
7	35	11,8	12,7	12,25	12	65,6	69,5	67,6	101
8	40	12,7	12,3	12,50	12	69,5	72,7	71,1	95
9	45	12,3	13,1	12,70	12	72,7	73,5	73,1	89

Tabel A.2 Data Percobaan *Duty Cycle* 100% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell* Elektroda *Full SS 316*

No.	Waktu Pengujian (menit ke-)	Arus Masuk Generator (Ampere)			Tegangan (Volt)			Temperatur Generator (°C)			Waktu Produksi per 500 cc (detik)
		Arus Awal	Arus Akhir	Arus Rata-Rata	Teg. awal	Teg. akhir	Teg. Rata-rata	T awal	T akhir	T rata-rata	
1	1	42,5	47,3	44,90	12,4	12,0	12,20	29	34	31,5	46
2	2	47,5	49,6	48,55	11,8	11,5	11,65	35	39	37,0	45
3	3	50,4	52,0	51,20	11,2	10,8	11,00	40	44	42,0	43
4	4	52,2	55,0	53,60	10,7	10,5	10,60	45	49	47,0	42
5	5	55,1	57,4	56,25	10,4	10,3	10,35	50	54	52,0	40
6	6	58,0	60,0	59,00	10,2	10,0	10,10	55	59	57,0	38
7	6,5	61,0	64,5	62,75	10,0	9,8	9,90	60	64	62,0	36
8	7	65,0	67,6	66,30	9,8	9,7	9,75	65	68	66,5	35
9	8	64,2	66,5	65,35	9,7	9,6	9,65	68	72	70,0	34

Tabel A.3 Data Percobaan *Duty Cycle* 80% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

No.	Waktu Pengujian (menit ke-)	Tegangan Rata-rata (Volt)	Arus Masuk Generator (Ampere)			Temperatur Generator (°C)			Waktu Produksi per 500 cc (detik)
			Arus Awal	Arus Akhir	Arus Rata-rata	T awal	T akhir	T rata-rata	
1	1	12	19,7	19,90	19,80	29	33	31,0	120
2	4	12	20,0	21,20	20,60	34	36	35,0	115
3	8	12	21,3	21,50	21,40	37	39	38,0	112
4	11	12	21,6	21,80	21,70	39	42	40,5	108
5	14	12	21,9	22,10	22,00	43	45	44,0	105
6	17	12	22,1	22,30	22,20	45	47	46,0	102
7	20	12	22,4	22,60	22,50	48	51	49,5	98
8	23	12	22,7	22,90	22,80	52	54	53,0	95
9	26	12	22,9	23,00	22,95	55	57	56,0	92
10	28	12	23,1	23,30	23,20	58	60	59,0	88
11	30	12	23,3	23,40	23,35	61	62	61,5	85
12	32	12	23,4	23,50	23,45	63	65	64,0	82
13	34	12	23,5	23,60	23,55	66	68	67,0	79
14	36	12	23,6	23,60	23,60	69	71	70,0	76

Tabel A.4 Data Percobaan *Duty Cycle* 60% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

No.	Waktu Pengujian (menit ke-)	Tegangan Rata-rata (Volt)	Arus Masuk Generator (Ampere)			Temperatur Generator (°C)			Waktu Produksi per 500 cc (detik)
			Arus Awal	Arus Akhir	Arus Rata-rata	T awal	T akhir	T rata-rata	
1	1	12	14,9	15,2	15,05	29	32	30,5	166
2	4	12	15,2	15,4	15,30	33	35	34,0	163
3	8	12	15,5	15,7	15,60	36	38	37,0	161
4	12	12	15,8	16,0	15,90	39	42	40,5	158
5	16	12	16,0	16,1	16,05	43	45	44,0	155
6	20	12	16,2	16,3	16,25	45	47	46,0	152
7	24	12	16,3	16,4	16,35	48	50	49,0	149
8	28	12	16,5	16,6	16,55	50	52	51,0	146
9	32	12	16,6	16,7	16,65	52	54	53,0	143
10	35	12	16,7	16,8	16,75	55	58	56,5	139
11	38	12	16,9	17,0	16,95	58	60	59,0	135
12	41	12	17,0	17,0	17,00	61	63	62,0	130
13	44	12	17,1	17,2	17,15	63	65	64,0	125
14	47	12	17,2	17,3	17,25	65	67	66,0	121
15	50	12	17,4	17,5	17,45	68	69	68,5	117
16	53	12	17,6	17,6	17,60	69	71	70,0	112

Tabel A.5 Data Percobaan *Duty Cycle* 40% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

No.	Waktu Pengujian (menit ke-)	Tegangan Rata-rata (Volt)	Arus Masuk Generator (Ampere)			Temperatur Generator (°C)			Waktu Produksi per 500 cc (detik)
			Arus Awal	Arus Akhir	Arus Rata-rata	T awal	T akhir	T rata-rata	
1	1	12	9,2	9,5	9,35	28	32	30,0	285
2	5	12	9,6	9,8	9,70	33	35	34,0	274
3	10	12	9,9	10,1	10,00	35	37	36,0	264
4	15	12	10,2	10,4	10,30	38	41	39,5	254
5	20	12	10,5	10,7	10,60	42	44	43,0	245
6	25	12	10,7	10,8	10,75	45	46	45,5	238
7	30	12	10,9	11,0	10,95	47	49	48,0	230
8	35	12	11,1	11,2	11,15	50	51	50,5	225
9	40	12	11,3	11,5	11,40	52	53	52,5	216
10	44	12	11,6	11,6	11,60	54	56	55,0	210
11	48	12	11,7	11,8	11,75	57	59	58,0	204
12	52	12	11,8	12,0	11,90	59	60	59,5	198
13	56	12	12,0	12,0	12,00	61	63	62,0	194
14	60	12	12,1	12,3	12,20	63	64	63,5	185
15	64	12	12,4	12,5	12,45	65	67	66,0	178
16	68	12	12,6	12,8	12,70	67	68	67,5	170
17	72	12	12,9	13,0	12,95	69	71	70,0	163

Tabel A.6 Data Percobaan *Duty Cycle* 20% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

No.	Waktu Pengujian (menit ke-)	Tegangan Rata-rata (Volt)	Arus Masuk Generator (Ampere)			Temperatur Generator (°C)			Waktu Produksi per 500 cc (detik)
			Arus Awal	Arus Akhir	Arus Rata-rata	T awal	T akhir	T rata-rata	
1	1	12	5,4	5,6	5,50	28	31	29,5	520
2	9	12	5,7	5,8	5,75	32	34	33,0	495
3	17	12	5,8	5,9	5,85	35	36	35,5	482
4	25	12	5,9	6,0	5,95	37	39	38,0	490
5	33	12	6,0	6,1	6,05	40	42	41,0	475
6	40	12	6,1	6,2	6,15	43	45	44,0	456
7	47	12	6,2	6,3	6,25	46	47	46,5	448
8	54	12	6,4	6,6	6,50	48	50	49,0	420
9	61	12	6,6	6,7	6,65	51	52	51,5	398
10	68	12	6,7	6,8	6,75	52	53	52,5	385
11	75	12	6,8	7,0	6,90	53	54	53,5	372
12	82	12	7,0	7,0	7,00	54	55	54,5	360
13	89	12	7,0	7,1	7,05	56	58	57,0	350
14	96	12	7,0	7,2	7,10	58	60	59,0	342
15	103	12	7,2	7,2	7,20	61	62	61,5	334
16	110	12	7,1	7,3	7,20	63	64	63,5	322
17	116	12	7,3	7,4	7,35	67	68	67,5	310
18	122	12	7,5	7,6	7,55	69	71	70,0	290

Percobaan Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Elektroda kombinasi SS 316 dan Titanium

Tabel A.7 Data Percobaan *Duty Cycle* 80% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

No.	Waktu Pengujian (menit)	Arus Awal (A)	Arus Akhir (A)	Arus Rata-Rata (A)	Tegangan Rata-Rata (V)	Temperatur Awal (°C) elektrolit	Temperatur Akhir (°C) elektrolit	Temperatur reRata(°C) elektrolit	Waktu Produksi (detik)
1	5	7,6	9	8,30	12	26,5	42,1	34,3	253
2	10	9,0	11,5	10,25	12	42,1	50,5	46,3	217
3	15	11,5	10,7	11,10	12	50,5	57	53,8	193
4	20	10,7	10,7	10,70	12	57	62	59,5	163
5	25	10,7	10	10,35	12	62	64,5	63,3	159
6	30	10,0	10,9	10,45	12	64,5	68,6	66,6	129
7	35	10,9	10,8	10,85	12	68,6	70,4	69,5	113
8	40	10,8	9,8	10,30	12	70,4	72,4	71,4	110
9	45	9,8	10,4	10,10	12	72,4	73,7	73,1	103

Tabel A.8 Data Percobaan *Duty Cycle* 60% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

No.	Waktu Pengujian (menit)	Arus Awal (A)	Arus Akhir (A)	Arus Rata-Rata (A)	Tegangan Rata-Rata (V)	Temperatur Awal (°C) elektrolit	Temperatur Akhir (°C) elektrolit	Temperatur reRata(°C) elektrolit	Waktu Produksi (detik)	Volume Gas Terukur (liter)
1	5	3,4	3,2	3,30	12	27,5	33,5	30,5	423	0,5
2	10	3,2	3,7	3,45	12	33,5	38,8	36,2	367	0,5
3	15	3,7	3,8	3,75	12	38,8	41,9	40,4	329	0,5
4	20	3,8	3,8	3,80	12	41,9	45,4	43,7	314	0,5
5	25	3,8	4,2	4,00	12	45,4	48,1	46,8	309	0,5
6	30	4,2	4,2	4,20	12	48,1	50,8	49,5	289	0,5
7	35	4,2	4,2	4,20	12	50,8	53,4	52,1	270	0,5
8	40	4,2	4,4	4,30	12	53,4	56,8	55,1	263	0,5
9	45	4,4	4,6	4,50	12	56,8	59,8	58,3	269	0,5
10	50	4,6	4,7	4,65	12	59,8	61,2	60,5	267	0,5
11	55	4,7	4,9	4,80	12	61,2	61,5	61,4	257	0,5
12	60	4,9	4,9	4,90	12	61,5	60,7	61,1	243	0,5
13	65	4,9	4,9	4,90	12	60,7	62	61,4	237	0,5
14	70	4,9	4,92	4,91	12	62	61,7	61,9	237	0,5
15	75	4,9	5,1	5,01	12	61,7	62,9	62,3	229	0,5
16	80	5,1	4,9	5,00	12	62,9	64,5	63,7	216	0,5
17	85	4,9	5,3	5,10	12	64,5	64,6	64,6	211	0,5
18	90	5,3	5,2	5,25	12	64,6	66	65,3	209	0,5
19	95	5,2	5,2	5,20	12	66	64,8	65,4	197	0,5
20	100	5,2	5,3	5,25	12	64,8	66,6	65,7	179	0,5
21	105	5,3	5,3	5,30	12	66,6	67,2	66,9	166	0,5
22	110	5,3	5,8	5,55	12	67,2	67,2	67,2	159	0,5
23	115	5,8	5,85	5,83	12	67,2	67,3	67,3	145	0,5
24	120	5,85	5,9	5,88	12	67,3	67,7	67,5	147	0,5
25	125	5,9	5,9	5,90	12	67,7	68,4	68,1	138	0,5
26	130	5,9	6	5,95	12	68,4	69,1	68,8	135	0,5
27	135	6,0	6	6,00	12	69,1	69,1	69,1	136	0,5
28	140	6,0	6,2	6,10	12	69,1	69,2	69,2	139	0,5
29	145	6,2	6,3	6,25	12	69,2	69,9	69,6	135	0,5
30	150	6,3	6,45	6,38	12	69,9	68,5	69,2	134	0,5
31	155	6,45	6,5	6,48	12	68,5	68,9	68,7	133	0,5
32	160	6,5	6,55	6,53	12	68,9	69,1	69,0	129	0,5
33	165	6,6	6,65	6,60	12	69,1	69,2	69,2	127	0,5
34	170	6,7	6,7	6,68	12	69,2	69,3	69,3	125	0,5
35	175	6,7	6,8	6,75	12	69,3	69	69,2	119	0,5
36	180	6,8	6,9	6,85	12	69	70	69,5	109	0,5

Tabel A.9 Data Percobaan *Duty Cycle* 40% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

No.	Waktu Pengujian (menit)	Arus Awal (A)	Arus Akhir (A)	Arus Rata-Rata (A)	Tegangan Rata-Rata (V)	Temperatur Awal (°C) elektrolit	Temperatur Akhir (°C) elektrolit	Temperatur reRata(°C) elektrolit	Waktu Produksi (detik)
1	5	3,2	3,4	3,30	12	35,7	37,6	36,7	703
2	10	3,4	3,5	3,45	12	37,6	42	39,8	677
3	15	3,5	3,6	3,55	12	42	46,8	44,4	669
4	20	3,6	3,6	3,60	12	46,8	50,2	48,5	661
5	25	3,6	3,7	3,65	12	50,2	53	51,6	669
6	30	3,7	3,8	3,75	12	53	55,9	54,5	664
7	35	3,8	3,9	3,85	12	55,9	57,6	56,8	657
8	40	3,9	3,8	3,85	12	57,6	57,2	57,4	662
9	45	3,8	3,9	3,85	12	57,2	58,4	57,8	659
10	50	3,9	3,9	3,90	12	58,4	60,2	59,3	636
11	55	3,9	4	3,95	12	60,2	60	60,1	621
12	60	4,0	3,8	3,90	12	60	61,6	60,8	617
13	65	3,8	4,1	3,95	12	61,6	63,3	62,5	609
14	70	4,1	4,2	4,15	12	63,3	63,7	63,5	589
15	75	4,2	4,1	4,15	12	63,7	63,3	63,5	595
16	80	4,1	4,3	4,20	12	63,3	65	64,2	563
17	85	4,3	4,1	4,20	12	65	64,1	64,6	447
18	90	4,1	4,2	4,15	12	64,1	64,4	64,3	443
19	95	4,2	4,4	4,30	12	64,4	64,7	64,6	418
20	100	4,4	4,6	4,50	12	64,7	65,1	64,9	389
21	105	4,6	4,6	4,60	12	65,1	65,6	65,4	377
22	110	4,6	4,8	4,70	12	65,6	65,8	65,7	369
23	115	4,8	4,8	4,80	12	65,8	65,9	65,9	359
24	120	4,8	4,9	4,85	12	65,9	66,1	66,0	358
25	125	4,9	5	4,95	12	66,1	66,2	66,2	351
26	130	5,0	4,9	4,95	12	66,2	66,4	66,3	340
27	135	4,9	5,1	5,00	12	66,4	66,3	66,4	329
28	140	5,1	5,2	5,15	12	66,3	66,4	66,4	307
29	145	5,2	5,2	5,20	12	66,4	67,3	66,9	296
30	150	5,2	5,4	5,30	12	67,3	66,5	66,9	297
31	155	5,4	5,3	5,35	12	66,5	67,5	67,0	289
32	160	5,3	5,5	5,40	12	67,5	67,7	67,6	284
33	165	5,5	5,4	5,45	12	67,7	68,7	68,2	282
34	170	5,4	5,5	5,45	12	68,7	68,4	68,6	279
35	175	5,5	5,5	5,50	12	68,4	69	68,7	277
36	180	5,5	5,6	5,55	12	69	68,9	69,0	275
37	185	5,6	5,6	5,60	12	68,9	70,1	69,5	273
38	190	5,6	5,7	5,65	12	70,1	69,7	69,9	269
39	195	5,7	5,8	5,75	12	69,7	70,4	70,1	259
40	200	5,8	5,9	5,85	12	70,4	70,3	70,4	251
41	205	5,9	5,8	5,85	12	70,3	70,4	70,4	247
42	210	5,8	6	5,90	12	70,4	70,1	70,3	243

Tabel A.10 Data Percobaan *Duty Cycle* 20% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

No.	Waktu Pengujian (menit)	Arus Awal (A)	Arus Akhir (A)	Arus Rata-Rata (A)	Tegangan Rata-Rata (V)	Temperatur Awal (°C) elektrolit	Temperatur Akhir (°C) elektrolit	Temperatur Rata-Rata (°C) elektrolit	Waktu Produksi (detik)
1	5	3,0	3,1	3,05	12	30,5	32,1	31,3	903
2	10	3,4	3,2	3,30	12	34,5	37,3	35,9	884
3	20	3,2	3,4	3,30	12	37,3	43,6	40,5	875
4	30	3,4	3,8	3,60	12	43,6	47,6	45,6	869
5	40	3,8	4,4	4,10	12	47,6	52	49,8	856
6	50	4,4	4,3	4,35	12	52,0	55,6	53,8	865
7	60	4,3	4,2	4,25	12	55,6	60,8	58,2	854
8	70	4,2	4,0	4,10	12	60,8	62,6	61,7	843
9	80	4,0	4,5	4,25	12	62,6	64,9	63,8	838
10	90	4,5	4,4	4,45	12	64,9	65,1	65,0	803
11	100	4,4	4,3	4,35	12	65,1	65,4	65,3	792
12	110	4,3	4,5	4,40	12	65,4	65,5	65,5	781
13	120	4,5	4,6	4,55	12	65,5	64,2	64,9	762
14	130	4,6	4,8	4,70	12	64,2	64,4	64,3	741
15	140	4,8	4,7	4,75	12	64,4	64	64,2	719
16	150	4,7	4,6	4,65	12	64,0	64,2	64,1	689
17	160	4,6	4,8	4,70	12	64,2	63,9	64,1	653
18	170	4,8	4,2	4,50	12	63,9	64,1	64,0	613
19	180	4,2	4,4	4,3	12	64,1	64,8	64,5	581
20	190	4,4	4,8	4,6	12	64,8	63,3	64,1	533
21	200	4,8	4,9	4,85	12	63,3	64,7	64,0	497
22	210	4,9	4,6	4,75	12	64,7	64,5	64,6	472
23	220	4,6	5	4,8	12	64,5	66,9	65,7	437
24	230	5,0	5	5	12	66,9	66,9	66,9	416
25	240	5,0	5	5	12	66,9	67,3	67,1	383

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

LAMPIRAN B  
DATA PERHITUNGAN UNJUK KERJA GENERATOR HHO

Tabel B.1 Data Pehitungan yang Diketahui

Volume Gas Terukur	$\rho_{\text{HHO}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	R (L.atm/mol.K)	Tekanan Gas Ideal (P) (atm)	Entalphy ( $\Delta H_g$ ) (J/g.mole)	Temperatur Gas Ideal (K)
0,5	0,49117	0,08206	1	285840	298

Tabel B.2 Data Pehitungan *Duty Cycle* 100% Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Elektroda *Full SS 316*

$\dot{n}$ (g.mol/s)	Daya Generator (watt)	Debit Q (L/jam)	Debit Q (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/s)	SGP (kg/J)	$\eta$ generator (%)
0.000417279	547.780	36.73469	1E-05	5.0E-06	9.14949E-09	21.77424
0.000454370	565.607	40.00000	1.1E-05	5.5E-06	9.64876E-09	22.96241
0.000475504	563.200	41.86047	1.2E-05	5.7E-06	1.01407E-08	24.13316
0.000486825	568.160	42.85714	1.2E-05	5.8E-06	1.02915E-08	24.49206
0.000511166	582.187	45.00000	1.3E-05	6.1E-06	1.05457E-08	25.09703
0.000538070	595.900	47.36842	1.3E-05	6.5E-06	1.08453E-08	25.81001
0.000567963	621.225	50.00000	1.4E-05	6.8E-06	1.09811E-08	26.13327
0.000584190	646.425	51.42857	1.4E-05	7.0E-06	1.08546E-08	25.83206
0.000601372	630.628	52.94118	1.5E-05	7.2E-06	1.14537E-08	27.25796

Tabel B.3 Data Perhitungan *Duty Cycle* 80% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

$\dot{n}$ (g.mol/s)	Daya Generator (watt)	Debit Q (L/jam)	Debit Q (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/s)	SGP (kg/J)	$\eta$ generator (%)
1.7039E-04	237.6	15	4.167E-06	2.047E-06	8.61334E-09	20.49828601
1.7780E-04	247.2	15.652174	4.348E-06	2.136E-06	8.63879E-09	20.55885503
1.8256E-04	256.8	16.071429	4.464E-06	2.193E-06	8.53859E-09	20.32039701
1.8932E-04	260.4	16.666667	4.63E-06	2.274E-06	8.73242E-09	20.78167245
1.9473E-04	264	17.142857	4.762E-06	2.339E-06	8.85943E-09	21.08395132
2.0046E-04	266.4	17.647059	4.902E-06	2.408E-06	9.03784E-09	21.5085354
2.0864E-04	270	18.367347	5.102E-06	2.506E-06	9.28131E-09	22.08794901
2.1523E-04	273.6	18.947368	5.263E-06	2.585E-06	9.44843E-09	22.48565446
2.2225E-04	275.4	19.565217	5.435E-06	2.669E-06	9.69276E-09	23.06712492
2.3235E-04	278.4	20.454545	5.682E-06	2.791E-06	1.00241E-08	23.85576389
2.4055E-04	280.2	21.176471	5.882E-06	2.889E-06	1.03113E-08	24.53907422
2.4935E-04	281.4	21.95122	6.098E-06	2.995E-06	1.06429E-08	25.32837254
2.5882E-04	282.6	22.78481	6.329E-06	3.109E-06	1.10002E-08	26.17857376
2.6903E-04	283.2	23.684211	6.579E-06	3.231E-06	1.14102E-08	27.1542861

Tabel B.4 Data Perhitungan *Duty Cycle* 60% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

$\dot{n}$ (g.mol/s)	Daya Generator (watt)	Debit Q (L/jam)	Debit Q (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/s)	SGP (kg/J)	$\eta$ generator (%)
0.000123173	180,6	10,8434	3,01205E-06	1,47942E-06	8,19169E-09	19,49483
0.00012544	183,6	11,0429	3,06748E-06	1,50665E-06	8,20614E-09	19,52922
0.000126998	187,2	11,1801	3,10559E-06	1,52536E-06	8,14831E-09	19,39159
0.000129409	190,8	11,3924	3,16456E-06	1,55433E-06	8,14636E-09	19,38696
0.000131914	192,6	11,6129	3,22581E-06	1,58441E-06	8,22643E-09	19,5775
0.000134517	195	11,8421	3,28947E-06	1,61568E-06	8,28554E-09	19,71819
0.000137226	196,2	12,0805	3,3557E-06	1,64821E-06	8,40067E-09	19,99217
0.000140046	198,6	12,3288	3,42466E-06	1,68208E-06	8,46968E-09	20,15641
0.000142984	199,8	12,5874	3,4965E-06	1,71737E-06	8,59543E-09	20,45567
0.000147098	201	12,9496	3,59712E-06	1,76679E-06	8,78999E-09	20,91868
0.000151457	203,4	13,3333	3,7037E-06	1,81914E-06	8,94364E-09	21,28436
0.000157282	204	13,8462	3,84615E-06	1,8891E-06	9,26031E-09	22,03798
0.000163573	205,8	14,4	0,000004	1,96467E-06	9,54649E-09	22,71903
0.000168981	207	14,876	4,13223E-06	2,02962E-06	9,80491E-09	23,33402
0.000174758	209,4	15,3846	4,2735E-06	2,099E-06	1,00239E-08	23,85518
0.000182559	211,2	16,0714	4,46429E-06	2,19271E-06	1,03821E-08	24,70776

Tabel B.5 Data Perhitungan *Duty Cycle* 40% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

$\dot{n}$ (g.mol/s)	Daya Generator (watt)	Debit Q (L/jam)	Debit Q (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/s)	SGP (kg/J)	$\eta$ generator (%)
8,346E-05	130,20	7,34694	2,041E-06	1,00238E-06	7,68E-09	18,321801
8,664E-05	131,40	7,62712	2,119E-06	1,04061E-06	7,70009E-09	18,84681
8,89E-05	133,20	7,82609	2,174E-06	1,06775E-06	7,752E-09	19,077136
9,047E-05	135,00	7,9646	2,212E-06	1,08665E-06	7,82253E-09	19,15592
9,336E-05	137,40	8,21918	2,283E-06	1,12139E-06	7,88036E-09	19,422914
9,555E-05	139,20	8,41121	2,336E-06	1,14759E-06	7,99894E-09	19,619694
9,83E-05	141,00	8,65385	2,404E-06	1,18069E-06	8,12598E-09	19,927957
0,0001007	142,80	8,867	2,463E-06	1,20977E-06	8,15757E-09	20,161414
0,0001033	144,00	9,09091	2,525E-06	1,24032E-06	8,31112E-09	20,498286
0,0001054	146,40	9,27835	2,577E-06	1,26589E-06	8,40119E-09	20,577965
0,0001105	149,40	9,72973	2,703E-06	1,32748E-06	8,53788E-09	21,145741
0,0001149	152,40	10,1124	2,809E-06	1,37968E-06	8,68572E-09	21,544691
0,0001175	155,40	10,3448	2,874E-06	1,4114E-06	8,79093E-09	21,614489
0,0001217	156,60	10,7143	2,976E-06	1,46181E-06	9,06748E-09	22,214891
0,0001262	158,40	11,1111	3,086E-06	1,51595E-06	9,23482E-09	22,775873
0,0001319	159,60	11,6129	3,226E-06	1,58441E-06	9,47906E-09	23,62548
8,346E-05	130,20	7,34694	2,041E-06	1,00238E-06	9,69528E-09	18,321801

Tabel B.6 Data Perhitungan *Duty Cycle* 20% dan Frekuensi 1 kHz pada Generator *Dry Cell*

$\dot{n}$ (g.mol/s)	Daya Generator (watt)	Debit Q (L/jam)	Debit Q (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{m}$ (kg/s)	SGP (kg/J)	$\eta$ generator (%)
3,917E-05	66,00	3,44828	9,57854E-07	4,70466E-07	7,12828E-09	16,964099
4,0649E-05	69,00	3,57853	9,94036E-07	4,88238E-07	7,07591E-09	16,83946
4,1474E-05	70,20	3,65112	1,0142E-06	4,98141E-07	7,09603E-09	16,887338
4,1728E-05	71,40	3,67347	1,02041E-06	5,01191E-07	7,01948E-09	16,705172
4,3046E-05	72,60	3,78947	1,05263E-06	5,17018E-07	7,12146E-09	16,947865
4,4839E-05	73,80	3,94737	1,09649E-06	5,3856E-07	7,29757E-09	17,366969
4,564E-05	75,00	4,01786	1,11607E-06	5,48177E-07	7,30903E-09	17,39426
4,8683E-05	78,00	4,28571	1,19048E-06	5,84723E-07	7,49644E-09	18,840267
5,1374E-05	79,80	4,52261	1,25628E-06	6,17044E-07	7,73238E-09	18,401756
5,3108E-05	81,00	4,67532	1,2987E-06	6,37879E-07	7,87505E-09	18,74129
5,4964E-05	82,80	4,83871	1,34409E-06	6,60171E-07	7,97308E-09	18,97457
5,6796E-05	84,00	5	1,38889E-06	6,82176E-07	8,12115E-09	19,326955
5,8419E-05	84,60	5,14286	1,42857E-06	7,01667E-07	8,29394E-09	19,738167
5,9786E-05	85,20	5,26316	1,46199E-06	7,1808E-07	8,42817E-09	20,057626
6,1218E-05	86,40	5,38922	1,49701E-06	7,3528E-07	8,51018E-09	20,252798
6,3499E-05	86,40	5,59006	1,5528E-06	7,62682E-07	8,82733E-09	21,00756
6,5957E-05	88,20	5,80645	1,6129E-06	7,92205E-07	8,98191E-09	21,375435
7,0506E-05	90,60	6,2069	1,72414E-06	8,4684E-07	9,34702E-09	22,244315

Perhitungan Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Elektroda kombinasi SS 316 dan Titanium

Tabel B.7 Data Pehitungan *Duty Cycle* 100% Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Elektroda Kombinasi Titanium SS 316

$\dot{n}$ (g.mol/s)	Daya Generator (Watt)	Debit Q Hidrogen (lt/jam)	Debit Q Hidrogen (m <sup>3</sup> /s)	mdot Hidrogen (kg/s)	$\eta$ generator (%)	SGP (kg/Watt.ja m)
1,0705E-04	103,8	12,7225131	3,534E-06	1,7358E-06	29,47911967	4,459E-05
1,2700E-04	113,4	15,0931677	4,1925E-06	2,05924E-06	32,0115203	4,842E-05
1,5850E-04	115,2	18,8372093	5,2326E-06	2,57006E-06	39,32810688	5,949E-05
1,7182E-04	118,8	20,4201681	5,6723E-06	2,78603E-06	41,34108103	6,254E-05
1,7328E-04	126,6	20,5932203	5,7203E-06	2,80964E-06	39,12276292	5,918E-05
1,8758E-04	136,2	22,293578	6,1927E-06	3,04163E-06	39,36784348	5,955E-05
2,0244E-04	147	24,0594059	6,6832E-06	3,28255E-06	39,36466159	5,955E-05
2,1523E-04	150	25,5789474	7,1053E-06	3,48987E-06	41,01383373	6,204E-05
2,2974E-04	152,4	27,3033708	7,5843E-06	3,72514E-06	43,08938119	6,518E-05

Tabel B.8 Data Pehitungan *Duty Cycle* 80% Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Elektroda Kombinasi Titanium SS 316

$\dot{n}$ (mol/s)	Daya Generator (Watt)	Debit Q Hidrogen (L./jam)	Debit Q Hidrogen (m <sup>3</sup> /s)	mdot Hidrogen (kg/s)	$\eta$ generator (%)	SGP (kg/Watt.jam)
8,08168E-05	99,6	9,604743	2,66798E-06	1,3104E-06	23,19345091	3,5085E-05
9,42242E-05	123	11,19816	3,1106E-06	1,5278E-06	21,89678658	3,31235E-05
0,000105941	133,2	12,59067	3,49741E-06	1,7178E-06	22,73441047	3,43906E-05
0,00012544	128,4	14,90798	4,1411E-06	2,034E-06	27,92496276	4,22424E-05
0,000128595	124,2	15,28302	4,24528E-06	2,0851E-06	29,5955565	4,47696E-05
0,000158501	125,4	18,83721	5,23256E-06	2,5701E-06	36,12916995	5,46531E-05
0,000180944	130,2	21,50442	5,97345E-06	2,934E-06	39,72425884	6,00914E-05
0,000185879	123,6	22,09091	6,13636E-06	3,014E-06	42,98669687	6,50265E-05
0,000198511	121,2	23,59223	6,5534E-06	3,2188E-06	46,81719461	7,0821E-05

Tabel B.9 Data Pehitungan *Duty Cycle* 60% Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Elektroda Kombinasi Titanium SS 316

n (mol/s)	Daya Generator (Watt)	Debit Q Hidrogen (L./jam)	Debit Q Hidrogen (m <sup>3</sup> /s)	mdot Hidrogen (kg/s)	$\eta$ generator (%)	SGP (kg/Watt.jam)
4,83372E-05	39,6	5,74468085	1,59574E-06	7,83777E-07	34,89069959	5,27796E-05
5,5713E-05	41,4	6,62125341	1,83924E-06	9,03373E-07	38,46615927	5,81882E-05
6,21479E-05	45	7,38601824	2,05167E-06	1,00771E-06	39,47633439	5,97164E-05
6,51167E-05	45,6	7,7388535	2,14968E-06	1,05585E-06	40,81790777	6,17458E-05
6,61704E-05	48	7,86407767	2,18447E-06	1,07294E-06	39,40447213	5,96076E-05
7,07497E-05	50,4	8,4083045	2,33564E-06	1,14719E-06	40,12516688	6,06978E-05
7,57283E-05	50,4	9	0,0000025	1,22792E-06	42,94878973	6,49692E-05
7,77439E-05	51,6	9,23954373	2,56654E-06	1,2606E-06	43,06652008	6,51473E-05
7,60099E-05	54	9,03345725	2,50929E-06	1,23248E-06	40,23455395	6,08633E-05
7,65792E-05	55,8	9,1011236	2,52809E-06	1,24171E-06	39,22832553	5,93412E-05
7,9559E-05	57,6	9,45525292	2,62646E-06	1,29003E-06	39,48113453	5,97236E-05
8,41426E-05	58,8	10	2,77778E-06	1,36435E-06	40,90360927	6,18754E-05
8,62728E-05	58,8	10,2531646	2,8481E-06	1,39889E-06	41,93914368	6,34419E-05
8,62728E-05	58,92	10,2531646	2,8481E-06	1,39889E-06	41,85372791	6,33127E-05
8,92867E-05	60,12	10,6113537	2,9476E-06	1,44776E-06	42,45127871	6,42166E-05
9,46604E-05	60	11,25	0,000003125	1,5349E-06	45,09622922	6,82176E-05
9,69036E-05	61,2	11,5165877	3,19905E-06	1,57127E-06	45,25966691	6,84649E-05
9,78309E-05	63	11,6267943	3,22967E-06	1,5863E-06	44,38726594	6,71452E-05
0,00010379	62,4	12,3350254	3,4264E-06	1,68293E-06	47,54385744	7,19202E-05
0,000114227	63	13,575419	3,77095E-06	1,85217E-06	51,82647253	7,83986E-05
0,000123173	63,6	14,6385542	4,06627E-06	1,99722E-06	55,35795358	8,37407E-05
0,000128595	66,6	15,2830189	4,24528E-06	2,08514E-06	55,19171348	8,34892E-05
0,000141011	69,9	16,7586207	4,65517E-06	2,28647E-06	57,66337435	8,72281E-05
0,000139093	70,5	16,5306122	4,59184E-06	2,25536E-06	56,39476342	8,53091E-05
0,000148164	70,8	17,6086957	4,8913E-06	2,40245E-06	59,81813751	9,04877E-05
0,000151457	71,4	18	0,000005	2,45584E-06	60,6335855	9,17212E-05
0,000150343	72	17,8676471	4,96324E-06	2,43778E-06	59,68618573	9,02881E-05
0,000147098	73,2	17,4820144	4,85612E-06	2,38516E-06	57,4406505	8,68912E-05
0,000151457	75	18	0,000005	2,45584E-06	57,7231734	8,73186E-05
0,000152587	76,5	18,1343284	5,03731E-06	2,47416E-06	57,01366995	8,62453E-05
0,000153734	77,7	18,2706767	5,07519E-06	2,49276E-06	56,55520371	8,55518E-05
0,000158501	78,3	18,8372093	5,23256E-06	2,57006E-06	57,8620423	8,75286E-05
0,000160997	79,2	19,1338583	5,31496E-06	2,61053E-06	58,10537766	8,78967E-05
0,000163573	80,1	19,44	0,0000054	2,6523E-06	58,37174838	8,82997E-05
0,000171821	81	20,4201681	5,67227E-06	2,78603E-06	60,6335855	9,17212E-05
0,000186957	82,2	22,293578	6,19266E-06	3,04163E-06	65,01177013	9,86741E-05

Tabel B.10 Data Pehitungan *Duty Cycle* 40% Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Elektroda Kombinasi Titanium SS 316

n (mol/s)	Daya Generator (Watt)	Debit Q Hidrogen (lt./jam)	Debit Q Hidrogen (m <sup>3</sup> /s)	mdot Hidrogen (kg/s)	η generator (%)	SGP (kg/Watt.jam)
2,90849E-05	39,6	3,456614509	9,602E-07	4,71604E-07	20,993977	3,17579E-05
3,02019E-05	41,4	3,589364845	9,970E-07	4,89716E-07	20,852408	3,15437E-05
3,0563E-05	42,6	3,632286996	1,009E-06	4,95572E-07	20,507349	3,10217E-05
3,09329E-05	43,2	3,676248109	1,021E-06	5,0157E-07	20,467275	3,09611E-05
3,0563E-05	43,8	3,632286996	1,009E-06	4,95572E-07	19,945503	3,01718E-05
3,07932E-05	45	3,659638554	1,017E-06	4,99304E-07	19,55981	2,95884E-05
3,11212E-05	46,2	3,698630137	1,027E-06	5,04624E-07	19,25475	2,91269E-05
3,08862E-05	46,2	3,670694864	1,020E-06	5,00812E-07	19,109321	2,89069E-05
3,10268E-05	46,2	3,687405159	1,024E-06	5,03092E-07	19,196314	2,90385E-05
3,21488E-05	46,8	3,820754717	1,061E-06	5,21286E-07	19,635513	2,97029E-05
3,29254E-05	47,4	3,913043478	1,087E-06	5,33877E-07	19,855247	3,00353E-05
3,31388E-05	46,8	3,938411669	1,094E-06	5,37338E-07	20,240173	3,06176E-05
3,35741E-05	47,4	3,990147783	1,108E-06	5,44397E-07	20,246483	3,06271E-05
3,47142E-05	49,8	4,125636672	1,146E-06	5,62882E-07	19,925104	3,01410E-05
3,43641E-05	49,8	4,084033613	1,134E-06	5,57206E-07	19,724178	2,98370E-05
3,63173E-05	50,4	4,31616341	1,199E-06	5,88877E-07	20,597111	3,11575E-05
4,5742E-05	50,4	5,436241611	1,510E-06	7,41695E-07	25,942222	3,92431E-05
4,6155E-05	49,8	5,485327314	1,524E-06	7,48392E-07	26,491842	4,00745E-05
4,89154E-05	51,6	5,813397129	1,615E-06	7,93152E-07	27,096877	4,09898E-05
5,25621E-05	54	6,246786632	1,735E-06	8,52282E-07	27,822866	4,20880E-05
5,42352E-05	55,2	6,445623342	1,790E-06	8,7941E-07	28,084378	4,24836E-05
5,5411E-05	56,4	6,585365854	1,829E-06	8,98476E-07	28,082758	4,24811E-05
5,69545E-05	57,6	6,768802228	1,880E-06	9,23503E-07	28,263653	4,27548E-05
5,71136E-05	58,2	6,787709497	1,885E-06	9,26083E-07	28,05041	4,24322E-05
5,82526E-05	59,4	6,923076923	1,923E-06	9,44552E-07	28,031844	4,24041E-05
6,01372E-05	59,4	7,147058824	1,985E-06	9,75111E-07	28,938757	4,37760E-05
6,21479E-05	60	7,386018237	2,052E-06	1,00771E-06	29,607251	4,47873E-05
6,66015E-05	61,8	7,915309446	2,199E-06	1,07993E-06	30,804799	4,65988E-05
6,90765E-05	62,4	8,209459459	2,280E-06	1,12006E-06	31,642365	4,78658E-05
6,88439E-05	63,6	8,181818182	2,273E-06	1,11629E-06	30,940809	4,68046E-05
7,07497E-05	64,2	8,408304498	2,336E-06	1,14719E-06	31,500131	4,76506E-05
7,19953E-05	64,8	8,556338028	2,377E-06	1,16739E-06	31,757908	4,80406E-05
7,25059E-05	65,4	8,617021277	2,394E-06	1,17567E-06	31,689718	4,79374E-05
7,32855E-05	65,4	8,709677419	2,419E-06	1,18831E-06	32,030468	4,84529E-05
7,38146E-05	66	8,772563177	2,437E-06	1,19689E-06	31,968446	4,83591E-05
7,43515E-05	66,6	8,836363636	2,455E-06	1,20559E-06	31,910845	4,82719E-05
7,48962E-05	67,2	8,901098901	2,473E-06	1,21442E-06	31,857619	4,81914E-05
7,60099E-05	67,8	9,033457249	2,509E-06	1,23248E-06	32,04522	4,84752E-05
7,89446E-05	69	9,382239382	2,606E-06	1,28007E-06	32,703661	4,94712E-05
8,14608E-05	70,2	9,6812749	2,689E-06	1,32087E-06	33,169154	5,01754E-05
8,278E-05	70,2	9,83805668	2,733E-06	1,34226E-06	33,706306	5,09880E-05
8,41426E-05	70,8	10	2,778E-06	1,36435E-06	33,970794	5,13881E-05

Tabel B.11 Data Perhitungan *Duty Cycle* 20% Menggunakan PWM Generator *Dry Cell* dengan Elektroda Kombinasi Titanium SS 316

n (mol/s)	Daya Generator (Watt)	Debit Q Hidrogen (lt./jam)	Debit Q Hidrogen (m <sup>3</sup> /s)	mdot Hidrogen (kg/s)	η generator (%)	SGP (kg/Watt.jam)
2,2643E-05	36,60	2,6910299	7,47508E-07	3,672E-07	17,6838326	2,6751E-05
2,313E-05	39,60	2,7488688	7,63575E-07	3,750E-07	16,6954366	2,5255E-05
2,3368E-05	39,60	2,7771429	7,71429E-07	3,789E-07	16,8671611	2,5515E-05
2,3529E-05	43,20	2,7963176	7,76755E-07	3,815E-07	15,5683185	2,355E-05
2,3886E-05	49,20	2,838785	7,88551E-07	3,873E-07	13,8773443	2,0992E-05
2,3638E-05	52,20	2,8092486	7,80347E-07	3,833E-07	12,9437054	1,958E-05
2,3942E-05	51,00	2,8454333	7,90398E-07	3,882E-07	13,4189083	2,0299E-05
2,4255E-05	49,20	2,8825623	8,00712E-07	3,933E-07	14,0913484	2,1316E-05
2,4399E-05	51,00	2,8997613	8,05489E-07	3,956E-07	13,6751165	2,0687E-05
2,5463E-05	53,40	3,0261519	8,40598E-07	4,129E-07	13,6297669	2,0618E-05
2,5816E-05	52,20	3,0681818	8,52273E-07	4,186E-07	14,136749	2,1385E-05
2,618E-05	52,80	3,1113956	8,64277E-07	4,245E-07	14,1729506	2,144E-05
2,6833E-05	54,60	3,1889764	8,85827E-07	4,351E-07	14,0474539	2,125E-05
2,7593E-05	56,40	3,2793522	9,10931E-07	4,474E-07	13,9845314	2,1155E-05
2,8438E-05	57,00	3,379694	9,38804E-07	4,611E-07	14,260721	2,1572E-05
2,9676E-05	55,80	3,5268505	9,79681E-07	4,812E-07	15,2016878	2,2996E-05
3,1312E-05	56,40	3,7212864	1,03369E-06	5,077E-07	15,8691237	2,4005E-05
3,3355E-05	54,00	3,9641109	1,10114E-06	5,408E-07	17,6559462	2,6708E-05
3,5192E-05	51,60	4,1824441	1,16179E-06	5,706E-07	19,4948275	2,949E-05
3,8361E-05	55,20	4,5590994	1,26642E-06	6,220E-07	19,8645597	3,0049E-05
4,114E-05	58,20	4,889336	1,35815E-06	6,671E-07	20,2053258	3,0565E-05
4,3319E-05	57,00	5,1483051	1,43008E-06	7,024E-07	21,7234289	3,2861E-05
4,6789E-05	57,60	5,5606407	1,54462E-06	7,587E-07	23,2188823	3,5123E-05
4,9151E-05	60,00	5,8413462	1,6226E-06	7,970E-07	23,4153498	3,5421E-05
5,3386E-05	60,00	6,3446475	1,7624E-06	8,656E-07	25,4328603	3,8473E-05

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

LAMPIRAN C  
TABEL KONVERSI SATUAN

DIMENSION	METRIC	METRIC / ENGLISH
Acceleration	1 m/s <sup>2</sup> = 100 cm/s <sup>2</sup>	1 m/s <sup>2</sup> = 3.2808 ft/s <sup>2</sup> 1 ft/s <sup>2</sup> = 0.3048 m/s <sup>2</sup>
Area	1 m <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> cm <sup>2</sup> = 10 <sup>6</sup> mm <sup>2</sup> = 10 <sup>-6</sup> km <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup> = 1550 in <sup>2</sup> = 10.764 ft <sup>2</sup> 1 ft <sup>2</sup> = 144 in <sup>2</sup> = 0.09290304 m <sup>2</sup>
Density	1 g/cm <sup>3</sup> = 1 kg/L = 1000 kg/m <sup>3</sup>	1 g/cm <sup>3</sup> = 62.428 lbm/ft <sup>3</sup> = 0.036127 lbm/in <sup>3</sup> 1 lbm/in <sup>3</sup> = 1728 lbm/ft <sup>3</sup> 1 kg/m <sup>3</sup> = 0.062428 lbm/ft <sup>3</sup>
Energy, heat, work, internal energy, enthalpy	1 kJ = 1000 J = 1000 N.m = 1 kPa.m <sup>3</sup> 1 kJ/kg = 1000 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> 1 kWh = 3600 kJ 1 cal <sup>o</sup> = 4.184 J 1 ITcal <sup>o</sup> = 4.1868 J 1 Cal <sup>o</sup> = 4.1868 kJ	1 kJ = 0.94782 Btu 1 Btu = 1.055056 kJ = 5.40395 psia.ft <sup>3</sup> = 778.169 lbf.ft 1 Btu/lbm = 25.037 ft <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = 2.326 kJ/kg 1 kJ/kg = 0.430 Btu/lbm 1 kWh = 3412.14 Btu 1 therm = 10 <sup>5</sup> Btu = 1.055 x 10 <sup>5</sup> kJ (natural gas)
Force	1 N = 1 kg.m/s <sup>2</sup> = 10 <sup>5</sup> dyne 1 kgf = 9.80665 N	1 lbf = 32.174 lbm.ft/s <sup>2</sup> = 4.44822 N 1 N = 0.22481 lbf
Heat flux	1 W/cm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> W/m <sup>2</sup>	1 W/m <sup>2</sup> = 0.3171 Btu/h.ft <sup>2</sup>
Heat generation rate	1 W/cm <sup>3</sup> = 10 <sup>6</sup> W/m <sup>3</sup>	1 W/m <sup>3</sup> = 0.09665 Btu/h.ft <sup>3</sup>
Heat transfer coefficient	1 W/m <sup>2</sup> .°C = 1 W/m <sup>2</sup> .K	1 W/m <sup>2</sup> .°C = 0.17612 Btu/h.ft <sup>2</sup> .°F
Length	1 m = 100 cm = 1000 mm 1 km = 1000 m	1 m = 39.370 in = 3.2808 ft = 1.0926 yd 1 ft = 12 in = 0.3048 m 1 mile = 5280 ft = 1.6093 km 1 in = 2.54 cm
Mass	1 kg = 1000 g 1 metric ton = 1000 kg	1 kg = 2.2046226 lbm 1 lbm = 0.45359237 kg 1 ounce = 28.3495 g 1 slug = 32.174 lbm = 14.5939 kg 1 short ton = 2000 lbm = 907.1847 kg

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini adalah :

1. Besarnya arus listrik meningkat seiring dengan waktu kerja pada setiap variasi pengujian generator HHO. Pada *duty cycle* 80% berkisar antara 7,65 A – 8,25 A, pada *duty cycle* 60% antara 3,3 – 6,85 A, pada *duty cycle* 40 % antara 3,3 – 5,9 A, dan pada *duty cycle* 20% antara 3,05 – 5 A. Sedangkan pada *duty cycle* 100% (*direct connection*) terjadi kenaikan cukup drastis mencapai 8,65 A – 12,7 A.
2. Temperatur fluida generator meningkat seiring dengan perubahan *duty cycle* pada setiap variasi pengujian generator HHO. Kenaikan temperatur terbesar pada pengujian generator tanpa PWM dikarenakan penambahan arus yang berlangsung secara *continue* dan terus menerus. Sedangkan kenaikan temperatur terlama pada generator *dry cell* dengan *duty cycle* 20% selama 240 menit.
3. Daya untuk membangkitkan generator HHO semakin meningkat seiring dengan bertambahnya arus listrik yang digunakan untuk proses elektrolisa. Konsumsi daya generator tanpa PWM (*direct connection*) terbesar yaitu 152,4 Watt. Sedangkan dengan penambahan PWM, daya tertinggi dengan *duty cycle* 80% sebesar 99,0 Watt dan daya terendah pada tipe *dry cell* dengan *duty cycle* 20% sebesar 36,6 Watt.
4. Laju produksi gas HHO menunjukkan semakin meningkat seiring bertambahnya temperatur elektrolit pada saat pengujian untuk semua generator. Laju produksi gas HHO terbesar dengan penambahan PWM pada *duty cycle* 80% sebesar  $3,2188 \times 10^{-6}$  kg/s dan Laju produksi gas HHO terkecil ada pada generator dengan *duty cycle* 20% sebesar  $3,672 \times 10^{-7}$ .

5. Efisiensi cenderung mengalami kenaikan secara bertahap seiring bertambahnya waktu kerja generator untuk semua variasi pengujian. Pada generator gas HHO dengan *duty cycle* 60% memiliki efisiensi tertinggi yaitu 65,01%. Sedangkan efisiensi variasi *duty cycle* 80% berkisar 8% - 18%, *duty cycle* 40% berkisar 21 - 34%, dan *duty cycle* 20% berkisar 17 - 25%, Sedangkan pada pengujian (*direct connection*) memiliki efisiensi sekitar 29 - 43 %.

## 5.2. Saran

Saran untuk penelitian ini antara lain :

1. Melakukan eksperimen variasi dimensi luasan plat elektroda yang digunakan untuk mendapatkan proses elektrolisis yang lebih sempurna.
2. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan menggunakan *batteri* terbaik kapasitas 12V dengan arus 10A - 20A agar didapatkan hasil yang optimal.
3. Membuat Desain dan rancang bangun PWM Generator Gas HHO yang baru untuk kedepannya, dengan tahanan kawat kabel yang tinggi, dan dimensi yang lebih kecil, diharapkan agar mendapatkan optimasi terbaik yang bisa diaplikasikan pada kendaraan bermotor.
4. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat menstabilkan kebutuhan arus listrik dengan laju produksi gas HHO yang dihasilkan relatif meningkat, serta dapat menjaga temperatur antara dibawah 50°C .

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Finance detik.com, 2013. **Cadangan Minyak Dunia**, <http://finance.detik.com/read/2013>
- [2] Kawano, Djoko. Sungkono. 2011. **Pencemaran Udara**. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS
- [3] Verhelst, S. and Wallner, T., **Hydrogen-fueled internal combustion engines**, Progress in Energy and Combustion Science 35 (2009) 490–527.
- [4] Cheng, T.S. 1992. **Chemistry Book 3. Second Edition**. EPB Publisher Pte. Singapura
- [5] Pudjanarsa, Astu dan Djati Nursuhud: 2006. **Mesin Konversi Energi**. Yogyakarta.
- [6] O'Connor, Ken., Maret 2006. **Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems**. BMS Document GLM-QSA-1700.1.
- [7] kimia sma.com, 2013. **Entalpi Pembakaran dari berbagai zat pada 298 K**, 1 atm, <https://dsupardi.wordpress.com/kimia-xi/termokimia/>
- [8] Rossum, J.R., 2000. **Fundamental Of Metallic Corrosions In Fresh Water**. Roscoe Moss Company.
- [9] Pyle, Walt. 1994. **Solar Hydrogen Production by Electrolysis**. Article of Electrolyzer, WA6DUR, Richmond, CA • 510-237-7877
- [10] Santilli RM.2003 **The Novel Magnecular Species of Generator and Oxygen with Increased Specific Weight and Energy Density**. Internasional Jurnal Hydrogen Energy 2003; 28:177–96
- [11] Callister, William D. 2007. **Materials Science and Engineering** Department of Metallurgical Engineering The University of Utah.

- [12] Shaily M. Bhola., Brajendra Mishra. Mei 2013. **Effect of pH on the Electrochemical Properties of Oxides formed over  $\beta$ -Ti-15Mo and Mixed Ti-6Al-4V Alloys.** Internasional. Jurnal. Electrochem. Sci.,8 (2013) 7075-7087 Department of Metallurgical and Materials Engineering; Colorado School of Mines, Golden, CO, USA.
- [13] Incropera, Frank, P., Dewitt, D.P. 2011. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 7th edition Engineering University of Notre Dame. Netherland.
- [14] Dayconter.com, 2013. **Rangkaian PWM-V2 menggunakan LM-324N**, <http://alt-nrg.org/pwm-v2.html>
- [15] Sudarmanta, Bambang., Darsopuspito, Sudjud., Kawano, Djoko, Sungkono. 2016. **Application of dry cell HHO Gas Generator with pulse width modulation on sinjai spark ignition engine performance**, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308
- [16] Fitriana, Barkah. 2011. **Komparasi Performa Generator HHO dengan Elektroda SS 304 Plat dan Spiral.** Surabaya: Teknik Mesin – ITS.
- [17] Wahyudzin, Iqbal. 2011. **Studi Karakteristik Generator HHO Dry Cell dan aplikasinya pada kendaraan Bermesin Injeksi 1300cc.** Surabaya: Teknik Mesin – ITS.
- [18] Yanur Arzaqa Ghiffari. 2013. **Studi Karakteristik Generator Gas HHO Tipe Dry Cell dan Wet Cell berdimensi 80 x 80 mm dengan Penambahan PWM E-3 FF (1 kHz),** Surabaya: Teknik Mesin ITS



## RIWAYAT PENULIS

Abdul Hakim dilahirkan di Tegal - Jawa Tengah. Bertepatan pada 27 Juni 1991. Penulis merupakan putra dari Alm. Bapak H. Abu Sudja'i dan Ibu Hj. Mursidah, dan merupakan anak terakhir dari enam bersaudara. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Madrasah Ibtidaiyah (MI) assalafiyah padaharja, Tegal pada tahun 1997-2003, lulus dari sekolah tingkat dasar penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 2

Tegal pada tahun 2003-2006, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMKN 3 Tegal pada tahun 2006-2009. Setelah selesai menempuh pendidikan di sekolah menengah kejuruan, penulis melanjutkan pendidikan Diploma 3 di Jurusan Teknik Mesin, Konsentrasi Alat Berat Politeknik Manufaktur Astra pada tahun 2009, melalui jalur mandiri di tahun pertama dan program beasiswa yaitu program Beasiswa Astra Honda Motor pada tahun 2010-2012.

Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan-kegiatan kampus dan bergabung di beberapa organisasi baik didalam kampus sebagai sekretaris Badan eksekutif mahasiswa, maupun diluar kampus sebagai Humas organisasi Ikatan Pemuda Nahdhatul Ulama. Selama kuliah Diploma 3 penulis juga pernah menjalani kerja praktek (*on the job training*) di United Tractor Site Bontang dan cabang Manado. Setelah lulus penulis sempat bekerja selama 1 tahun di PT. Sugity Creatives sebagai *Purchasing*. Kemudian pada tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Sarjana (S1) di Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan NRP. 2113 106 005 dan menyelesaikannya pada bulan Juli 2016.

Di Jurusan Teknik Mesin ITS, penulis memilih bidang studi Konversi Energi dan mengambil Tugas Akhir dibidang yang

sama. Selain itu penulis aktif sebagai Asisten praktikum Internal Combustion Engine di Lab. Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar. Keinginan untuk mengamalkan ilmu yang didapat selama kuliah, mendorong penulis untuk mengambil topik tugas akhir “Karakteristik Unjuk Kerja Generator Gas HHO Tipe *Dry Cell* dengan Elektroda Titanium dan Penambahan PWM”. Penulis berharap agar ilmu yang didapatkan dapat bermanfaat untuk keluarga, lingkungan kampus, dan masyarakat Indonesia. Amin.

e-mail : [hakim\\_4550@yahoo.co.id](mailto:hakim_4550@yahoo.co.id) / [baim640ul@gmail.com](mailto:baim640ul@gmail.com)