



TUGAS AKHIR - RE 141581

**PENGOLAHAN AIR LIMBAH REVERSE OSMOSIS MELALUI  
ELEKTROLISIS UNTUK MENGHASILKAN ELEKTROLIT  
BERNILAI EKONOMI DAN GAS HIDROGEN UNTUK FUEL  
CELL**

*REVERSE OSMOSIS WASTEWATER TREATMENT USING ELECTROLYSIS  
TO GENERATE VALUABLE ELECTROLYTE AND HYDROGEN GAS FOR  
FUEL CELL*

NISSA MASTURINA JANANI

0321144000109

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





TUGAS AKHIR - RE 141581

**PENGOLAHAN AIR LIMBAH REVERSE OSMOSIS  
MELALUI ELEKTROLISIS UNTUK  
MENGHASILKAN ELEKTROLIT BERNILAI  
EKONOMI DAN GAS HIDROGEN UNTUK FUEL  
CELL**

NISSA MASTURINA JANANI  
03211440000109

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Ir. Wahyono Hadi, M. Sc., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



FINAL PROJECT - RE 141581

***REVERSE OSMOSIS WASTEWATER  
TREATMENT USING ELECTROLYSIS TO  
GENERATE VALUABLE ELECTROLYTE AND  
HYDROGEN GAS FOR FUEL CELL***

NISSA MASTURINA JANANI  
03211440000109

SUPERVISOR  
Prof. Ir. Wahyono Hadi, M. Sc., Ph. D.

DEPARTEMEN OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering  
Institute of Technology Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGOLAHAN AIR LIMBAH REVERSE OSMOSIS MELALUI ELEKTROLISIS UNTUK MENGHASILKAN ELEKTROLIT BERNILAI EKONOMI DAN GAS HIDROGEN UNTUK *FUEL CELL*

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memenuhi Gelar  
Sarjana Teknik  
Pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

NISSA MASTURINA JANANI  
NRP. 03211440000109

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir



Prof. Ir. Wahyono Hadi, M. Sc., Ph. D.  
NIP. 19500114 197903 1 001







# ELEKTROLISIS UNTUK MENGHASILKAN ELEKTROLIT BERNILAI EKONOMI DAN GAS HIDROGEN UNTUK *FUEL CELL*

Nama : Nissa Masturina Janani  
NRP : 03211440000109  
Departemen : Teknik Lingkungan  
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Wahyono Hadi, M. Sc., Ph. D.

## ABSTRAK

Peningkatan penggunaan Reverse Osmosis (RO) sebagai metode desalinasi air laut untuk menghasilkan air bersih mengakibatkan kenaikan produksi air limbah RO. Limbah yang berupa konsentrat air laut tersebut masih memiliki kandungan mineral yang dapat dimanfaatkan kembali. Evaporasi sebagai pengolahan konvensional limbah RO menghilangkan seluruh nilai ekonomi yang dimiliki oleh limbah tersebut.

Elektrolisis merupakan metode pengolahan air limbah alternatif yang dapat mengolah air limbah RO untuk menghasilkan hidrogen, oksigen, dan elektrolit yang memiliki nilai ekonomi seperti desinfektan, garam, dan larutan basa. Pada penelitian ini dilakukan pengolahan air limbah RO dengan elektrolisis untuk menganalisis karakteristik dan *mass balance* elektrolit yang dihasilkan, mengetahui produksi hidrogen, membuat simulasi *fuel cell* sebagai perhitungan konversi energi, dan mengetahui tegangan yang dihasilkan oleh simulasi *fuel cell*.

Penelitian ini menggunakan dua jenis limbah RO dengan konsentrasi TDS sebesar 26.400 mg/L dan 1.060 mg/L. Kedua sampel dielektrolisis dengan variabel tegangan sebesar 6V, 9V, dan 13,8V. Elektroda yang digunakan adalah Perak (Ag) pada katoda dan Graphite (C) pada anoda. Karakteristik elektrolit yang dihasilkan kemudian dianalisis pada parameter  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $OCl^-$ ,  $OH^-$ , TDS, salinity, dan pH. Produksi gas hidrogen diukur setiap 30-60 menit selama 12 jam periode elektrolisis. Volume hidrogen yang telah didapatkan kemudian

disimulasikan dengan model *fuel cell* untuk mengetahui produksi tegangan secara teoritis.

Hasil elektrolisis menunjukkan bahwa sampel dengan konsentrasi TDS 26.400 mg/L menghasilkan desinfektan berupa  $\text{Ca(OCl)}_2$  dengan konsentrasi terbesar 15.393,92 mg/L dan NaOCl dengan konsentrasi terbesar 13.813,22mg/L. Sedangkan sampel dengan konsentrasi TDS 1.060 mg/L menghasilkan garam NaCl dengan konsentrasi terbesar 2.272,32mg/L. Seiring dengan kenaikan variabel tegangan yang digunakan, terjadi peningkatan pada TDS dan salinitas. Namun pH mengalami penurunan pada anoda dan peningkatan pada katoda. Peningkatan juga terjadi pada produksi hidrogen, yang diikuti dengan peningkatan penghasilan energi listrik oleh simulasi *fuel cell*. Efisiensi energi pada sistem elektrolisis-*fuel cell* ini mencapai 293%.

**Keywords:** desinfektan, electrolisis, *fuel cell*, grafit, hidrogen, perak.

# **REVERSE OSMOSIS WASTEWATER TREATMENT USING ELECTROLYSIS TO GENERATE VALUABLE ELECTROLYTE AND HYDROGEN GAS FOR FUEL CELL**

Name : Nissa Masturina Janani  
NRP : 03211440000109  
Departemen : Environmental Engineering  
Supervisor : Prof. Ir. Wahyono Hadi, M. Sc., Ph. D.

## **ABSTRACT**

The increase in Reverse Osmosis (RO) usage to produce fresh water from sea water causes increase in the generation of RO wastewater and demands high electrical energy for operational process. RO wastewater which basically is concentrated sea water has valuable minerals with reuse potentials. Evaporation as conventional RO wastewater treatment eliminated any economical value that the RO wastewater had.

Electrolysis is an alternative wastewater treatment method that allows RO wastewater to produce hydrogen, oxygen, and valuable electrolytes, such as disinfectant, salts, and base solution. This research treats RO wastewater with electrolysis to analyze the electrolyte characteristics and its mass balance, to determine the hydrogen production, to make a fuel cell simulation model as energy conversion calculation, and to determine the voltage generated by the fuel cell simulation.

This research is conducted using two kinds of RO wastewater with TDS concentration of 26.400 mg/L and 1.210 mg/L. Both samples are electrolyzed using 6V, 9V, and 13,8V voltage variables. The electrode used is Silver (Ag) on cathode and Graphite (C) on anode. The characteristic of the resulted electrolyte was analyzed further to understand its utilization potentials. The analyzed parameters are  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $OCl^-$ ,  $OH^-$ , TDS, salinity, and pH. The hydrogen gas production is measured every 30-60 minutes periodically during 12 hours of electrolysis running time. The volume measured

then simulated using fuel cell model in MATLAB to obtain the theoretical voltage theoretical production.

The electrolysis result shows that sample with TDS concentration of 26.400 mg/L produces disinfectant in form of  $\text{Ca(OCl)}_2$  with highest concentration of 15.393,92 mg/L dan NaOCl with highest concentration of 13.813,22mg/L. Whilst sample with TDS concentration of 1.060 mg/L produces NaCl salt with highest concentration of 2.272,32mg/L. As higher voltage was set, occurred an increasing trend of TDS and salinity. However, the pH in anode decreased while those in cathode increased. Increasing trend also occurred on the hydrogen production rate on each sample, that was followed by increase in the electrical energy produced by the fuel cell simulation. The efficiency of this electrolysis-fuel cell system is up to 293%.

**Keywords:** electrolysis, electrolyte, *fuel cell*, graphyte, hydrogen, silver.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, berkah, dan hidayah-Nya sehingga laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan. Laporan tugas akhir dengan judul “Pengolahan Air Limbah Reverse Osmosis melalui Elektrolisis untuk Menghasilkan Elektrolit Bernilai Ekonomi dan Gas Hidrogen untuk Fuel Cell” ini dibuat dalam rangka memenuhi prasyarat kelulusan sarjana Teknik Lingkungan ITS. Dalam penulisan laporan ini, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu penulis antara lain:

1. Dosen Pembimbing Tugas akhir, Bapak Prof. Ir. Wahyono Hadi, M. Sc., Ph.D., terimakasih atas segala ilmu, nasehat, arahan, dan motivasinya dalam membimbing penulis.
2. Dosen Pengarah Tugas Akhir, Bapak Dr. Ali Masduqi, S.T., M.T., Bapak Ir. Bowo Djoko Marsono, M. Eng., dan Bapak Alfian Purnomo, S.T., M.T., terima kasih atas segala arahan dan bimbingannya dalam penulisan tugas akhir ini.
3. Ayah, Ibu, Rina, dan Eyang Putri yang selalu memberi semangat, doa, dan menjadi motivasi utama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Pihak PLTU Paiton UBJOM Unit 9 yang telah mengizinkan dan membantu dalam proses *sampling*.
5. Teman-teman dan pihak yang telah membantu secara langsung dalam proses penyelesaian tugas akhir ini namun tidak bisa disebutkan satu persatu.
6. Teman-teman Envijoyo yang selalu setia membantu, menyalurkan energi positif, dan memberikan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, oleh karena itu penulis menerima kritik dan saran yang membangun. Terima kasih.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
BAB 1    PENDAHULUAN.....	1
1.1    Latar Belakang.....	1
1.2    Rumusan Masalah.....	3
1.3    Tujuan Penelitian.....	4
1.4    Manfaat Penelitian.....	4
1.5    Ruang Lingkup.....	4
BAB 2    TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 <i>Reject Water Reverse Osmosis</i> .....	7
2.2    Karakterisasi Air Limbah.....	10
2.2.1 <i>Total Dissolved Solid</i> .....	10
2.2.2    Konduktivitas.....	11
2.2.3    Salinitas.....	11
2.2.4    pH.....	11
2.2.5    Kesadahan.....	11
2.3    Reaksi Reduksi-Oksidasi.....	12
2.4    Bar Graph Miliekivalen per Liter.....	14
2.5    Elektrolisis.....	16
2.5.1    Elektroda.....	17
2.5.2    Faktor Penentu Elektrolisis.....	20
2.5.3    Produk Elektrolisis.....	21
2.6    Fuel Cell.....	24
2.6.1    Prinsip Kerja.....	25
2.6.2    Jenis Fuel Cell.....	27
2.6.3    Perancangan Fuel Cell.....	30
2.7    Simulasi Konversi Energi.....	31
2.7.1    Program MATLAB.....	31
2.7.2    Persamaan Elektrokimia dalam Simulasi.....	33

BAB 3	METODE PENELITIAN .....	39
3.1	Umum.....	39
3.2	Kerangka Penelitian.....	39
3.3	Tahapan Penelitian .....	41
3.3.1	Studi Literatur.....	42
3.3.2	Persiapan Penelitian .....	42
3.3.3	Variabel Penelitian .....	45
3.3.4	Pelaksanaan Penelitian Inti .....	46
3.3.5	Pengolahan Data .....	49
3.3.6	Analisis Data dan Pembahasan.....	49
3.3.7	Kesimpulan dan Saran .....	50
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1	Penelitian Pendahuluan .....	51
4.2	Operasi Proses Elektrolisis .....	52
4.3	Elektrolit Hasil Proses Elektrolisis.....	56
4.3.1	Produk Elektrolit.....	56
4.3.2	<i>Mass Balance</i> Elektrolit .....	65
4.4	Produksi Gas Hidrogen Proses Elektrolisis .....	69
4.5	Simulasi <i>Fuel Cell</i> .....	72
4.5.1	Penyusunan Program Simulasi <i>Fuel Cell</i> ....	72
4.5.2	Analisis Hasil Simulasi .....	77
4.6	Aplikasi Sistem Elektrolisis dan <i>Fuel Cell</i> .....	82
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	87
5.1	Kesimpulan .....	87
5.2	Saran.....	87
	DAFTAR PUSTAKA.....	89
	LAMPIRAN .....	99
	BIOGRAFI PENULIS .....	135



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Reverse Osmosis PLTU Paiton Unit 9 .....	8
Gambar 2.2 Contoh Bar Graf Miliekivalen.....	15
Gambar 2.3 Proses Kimia yang Terjadi pada Fuel Cell .....	26
Gambar 2.4 Skema Kerja MCFC .....	27
Gambar 2.5 Skema Kerja SOFC .....	28
Gambar 2.6 Skema Kerja PAFC .....	29
Gambar 2.7 Skema Kerja PEFC atau PEM .....	30
Gambar 2.8 Diagram Rancangan Sel Tunggal <i>Fuel Cell</i> .....	31
Gambar 2.9 Tampilan Awal Program MATLAB R2013a .....	32
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian .....	41
Gambar 3.2 Sketsa Reaktor Elektrolisis.....	43
Gambar 4.1 Rangkaian Reaktor Elektrolisis .....	54
Gambar 4.2 Perubahan TDS Elektrolit terhadap Tegangan .....	57
Gambar 4.3 Perubahan Salinitas Elektrolit terhadap Tegangan.....	57
Gambar 4.4 Perubahan pH Elektrolit terhadap Tegangan.....	59
Gambar 4.5 Diagram Batang Ion Sampel SWRO .....	60
Gambar 4.6 Diagram Batang Ion Sampel BWRO .....	61
Gambar 4.7 Diagram Alir Elektrolisis .....	66
Gambar 4.8 Produksi Hidrogen Sampel BWRO .....	70
Gambar 4.9 Produksi Hidrogen Sampel SWRO .....	71
Gambar 4.10 Diagram Alir Simulasi Fuel Cell.....	73
Gambar 4.11 Tampilan M-File Editor .....	74
Gambar 4.12 Tampilan Hasil Pemrograman M-File Editor .....	74
Gambar 4.13 Tampilan Awal .....	76
Gambar 4.14 GUI Simulasi Fuel Cell .....	76
Gambar 4.15 Skema Sistem Elektrolisis-Fuel Cell.....	82
Gambar 4.16 Reaktor Elektrolisis Skala Besar .....	83

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik <i>Reject Water</i> SWRO.....	7
Tabel 2.2 Data Operasional SWRO dan BWRO 2 PLTU Paiton Unit 9 Periode Desember 2017 .....	9
Tabel 2.3 Potensial Reduksi Standar .....	12
Tabel 2.4 Contoh Karakteristik Air.....	15
Tabel 2.5 Perbedaan Produk Elektrolisis .....	22
Tabel 3.1 Perlakuan untuk Setiap Variasi Variabel .....	46
Tabel 3.2 Nilai Konstanta dan Hasil Penelitian .....	49
Tabel 4.1 Karakteristik Awal Air Limbah Reverse Osmosis .....	51
Tabel 4.2 Hasil Analisis Proses Elektrolisis secara Umum .....	54
Tabel 4.3 Kebutuhan Energi Listrik Elektrolisis .....	55
Tabel 4.4 Pembentukan Senyawa pada Elektrolit Sampel BWRO .....	63
Tabel 4.5 Pembentukan Senyawa pada Elektrolit Sampel SWRO .....	63
Tabel 4.6 Mass Balance Elektrolisis.....	68
Tabel 4.7 Hasil Simulasi Fuel Cell.....	80
Tabel 4.8 Efisiensi Energi Sistem Elektrolisis- <i>Fuel Cell</i> .....	81
Tabel 4.9 Rincian Harga pada Analisis Finansial.....	84
Tabel 4.10 Perbandingan Penelitian Skala Lab dan <i>Scale-up</i> ....	84
Tabel 4.11 Perhitungan Analisis Finansial Sistem Elektrolisis-Fuel Cell .....	86

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I Data Hasil Laboratorium.....	99
Lampiran II <i>Script</i> Model Simulasi.....	115
Lampiran III Dokumentasi Penelitian.....	131

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Peningkatan penggunaan desalinasi, utamanya dengan metode *Reverse Osmosis* (RO) sebagai metode penyediaan air bersih menyebabkan kenaikan drastis air limbah RO. Salah satu penyebab naiknya limbah RO yang sering disebut dengan *reject water* secara drastis adalah karena volumenya yang dapat mencapai 70% dari keseluruhan air yang diolah (Rao, 2016). Sehingga dalam satu kali pengolahan, *reject water* yang dihasilkan sangat besar. Selain itu, energi yang dibutuhkan untuk operasional RO sangat besar. Menurut Elimelech dan Phillip (2011), energi minimum yang dibutuhkan untuk melakukan pemisahan air laut dengan proses desalinasi secara teori adalah 1,06 kWh/m<sup>3</sup>. Energi tersebut digunakan untuk mencukupi tekanan yang dibutuhkan oleh sistem. Namun menurut Greenlee (2009) RO tetap menjadi metode desalinasi yang paling banyak digunakan, salah satu faktornya adalah karena tingginya efisiensi reduksi *Total Dissolved Solid* (TDS) dan salinitasnya, yaitu hingga 99,6% (Wilf, 2010).

Salah satu industri yang menggunakan metode RO adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton. Dalam siklus PLTU, dibutuhkan air demineralisasi yang diperoleh dari air tawar untuk menjaga alat-alat dari korosi (Indrianty, 2010). Di PLTU Paiton, terdapat dua jenis RO, yaitu *Sea water Reverse Osmosis* (SWRO) dan *Brackish Water Reverse Osmosis* (BWRO). SWRO merupakan unit yang mengolah air laut, sedangkan BWRO merupakan unit yang mengolah kembali hasil olahan dari SWRO yang produknya digunakan untuk operasional PLTU dan air domestik.

Efisiensi reduksi yang tinggi tersebut menghasilkan limbah pengolahan dengan kandungan TDS dan salinitas yang tinggi. Sehingga diperlukan pengolahan terlebih dahulu sebelum limbah dibuang menuju badan air, untuk mencegah rusaknya ekosistem dan biota pada badan air tersebut. Saat ini pengolahan yang banyak digunakan adalah evaporasi dengan menggunakan kolam untuk menghasilkan garam atau nigari. Bahkan terdapat pula

sistem dimana padatan yang dihasilkan oleh proses evaporasi diolah secara termal dengan insenerasi. Pengolahan ini menghilangkan semua nilai ekonomi yang dimiliki oleh *reject water* tersebut. Gupta *et al.* (2012) menjelaskan bahwa terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk mengolah *reject water* kembali, seperti destilasi, presipitasi, *ion exchange*, dan elektrolisis.

Penelitian ini akan mempelajari pengolahan *reject water* dengan metode elektrolisis. Metode ini dipilih karena menurut penelitian Mollah *et al.* (2004), pada proses elektrolisis ion-ion logam akan melekat pada permukaan elektroda, sedangkan senyawa organik lainnya akan mengurangi atau menghilangkan toksisitasnya. Elektrolisis juga dapat memisahkan senyawa ataupun molekul berdasarkan pada partikel komponennya dengan menambahkan arus listrik serta menyediakan alur untuk partikelnya, sehingga dapat memisahkan hidrogen dan oksigen dalam air (US Dept. of Energy, 2014). Produk yang dihasilkan oleh proses elektrolisis sangat bergantung pada karakteristik elektrolit dan sumber listrik yang digunakan pada sistem.

Kandungan pada elektrolit yang dihasilkan oleh elektrolisis bergantung pada kandungan awalnya. Pada larutan dengan salinitas tinggi dihasilkan elektrolit berupa basa. Sedangkan pada larutan dengan salinitas rendah, dapat dihasilkan hipoklorit (Abdel-Aal *et al.*, 2010). Basa dan hipoklorit merupakan dua hal yang sangat berguna dalam kehidupan sehari-hari. Menurut PubChem (2005), basa dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan sabun, kertas, deterjen, dan produk petroleum. Selain itu juga digunakan dalam proses pembuatan kain katun, pencucian-pemutihan, serta produksi dan pembersihan logam. Hipoklorit banyak dimanfaatkan sebagai desinfektan pada pengolahan air dan air limbah serta peralatan sanitasi. Hipoklorit juga dapat dimanfaatkan pada industri makanan untuk proses sanitasi dan produksi makanan.

Selain menghasilkan elektrolit yang dapat dimanfaatkan kembali, elektrolisis juga menghasilkan gas hidrogen. Penelitian Abdel-Aaal (2010) menunjukkan bahwa gas hidrogen akan diproduksi semakin cepat pada tegangan yang tinggi dan akan semakin besar pada TDS yang besar. Produksi hidrogen tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi energi



berkelanjutan dengan emisi mendekati nol, yaitu dengan menggunakan metode *fuel cell* (Yuvaraj dan Santhanaraj, 2014; Carmo *et al.*, 2012). US Dept. of Energy (2006) menjelaskan bahwa *fuel cell* mengkonversi energi kimiawi langsung menjadi energi listrik tanpa pembakaran dengan mengkombinasikan oksigen dari udara dan gas hidrogen. Energi akan diproduksi selama bahan bakarnya, yaitu gas hidrogen tersedia. Produk sampingan yang dihasilkan hanyalah air dan energi panas (Dincer, 2008). Sehingga penyediaan energi listrik menggunakan gas hidrogen dan *fuel cell* dapat menjadi pilihan yang harus dipertimbangkan untuk konversi energi berkelanjutan nantinya. Namun biaya investasi untuk pembuatan *fuel cell* yang tidak sedikit menjadikan perhitungan efisiensi konversi energi sangat dibutuhkan. Perhitungan ataupun permodelan yang dapat melakukan kalkulasi energi listrik atau tegangan yang akan dihasilkan pada sistem tersebut sangat krusial untuk penentuan sebanding atau tidaknya penggunaan *fuel cell*. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan membuat simulasi konversi energi dengan menggunakan program MATLAB.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang akan menjadi dasar penelitian dalam tugas akhir ini, antara lain:

1. Bagaimana kandungan elektrolit setelah proses elektrolisis?
2. Bagaimana *mass balance* elektrolit setelah proses elektrolisis?
3. Bagaimana gas hidrogen yang diproduksi proses elektrolisis?
4. Bagaimana tingkat tegangan yang dihasilkan oleh *fuel cell* pada simulasi konversi energi berdasarkan produksi gas hidrogen hasil elektrolisis?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Menganalisis kandungan elektrolit yang dihasilkan proses elektrolisis dan mengetahui *mass balance* elektrolitnya.
2. Mengetahui produksi gas hidrogen oleh proses elektrolisis.
3. Membuat model simulasi *fuel cell* sebagai perhitungan konversi energi.
4. Mengetahui tingkat tegangan yang dihasilkan oleh simulasi *fuel cell* berdasarkan produksi gas hidrogen hasil elektrolisis

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Mengetahui produk yang didapatkan dari elektrolit hasil proses elektrolisis dan pemanfaatannya.
2. Mengetahui *mass balance* kandungan pada elektrolit hasil elektrolisis.
3. Mengetahui volume produksi hidrogen dengan metode elektrolisis.
4. Mendapatkan model simulasi *fuel cell*.
5. Mendapatkan informasi produksi tegangan menggunakan hidrogen dengan simulasi metode *fuel cell*.

### 1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS
2. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis sampel dan tegangan pada proses elektrolisis.
3. Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah SWRO dan BWRO PLTU Paiton Unit 9.
4. Variasi tegangan yang digunakan pada penelitian ini adalah 6V, 9V, dan 13,8 V.

5. Parameter ukur dalam penelitian ini adalah volume gas hidrogen pada proses elektrolisis dan tegangan yang dihasilkan pada simulasi fuel cell.
6. Elektroda yang digunakan adalah Perak (Ag) pada katoda dan Grafit (C) pada anoda.
7. Tidak menganalisis produk samping.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *Reject Water Reverse Osmosis*

*Reject water* yang dihasilkan oleh proses *Reverse Osmosis* (RO) merupakan sisa dari air baku yang masuk ke dalam sistem RO yang sudah tidak bisa menembus membran karena tingginya tekanan osmosis (Praneeth *et al.*, 2013). Secara umum, *reject water* RO bersifat *hyper-saline* dengan kadar *Total Dissolved Solid* (TDS) sangat tinggi. Konsentrasi garamnya mencapai 20.000-50.000 ppm (Rao, 2016), sedangkan konsentrasi TDS-nya berkisar 40.000-61.000 mg/L dengan dominasi ion-ion  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , dan  $\text{HCO}_3^-$  (Praneeth, 2014). Menurut Diaratih (2015), hasil analisis laboratorium untuk parameter TDS terhadap sampel *reject water* unit RO Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton dengan air baku air laut adalah 36.330 mg/L. Karakteristik *reject water* SWRO dapat dilihat pada Tabel 2.1.

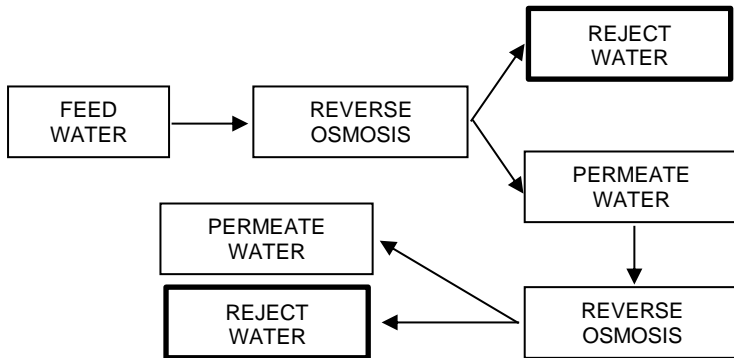
**Tabel 2.1 Karakteristik *Reject Water* SWRO**

Parameter (mg/L)	<i>Feed Water</i> (air laut)	<i>Reject Water</i> (demin water)
Natrium ( $\text{Na}^+$ )	12.200	25.237
Magnesium ( $\text{Mg}^+$ )	1.620	2.867
Kalsium ( $\text{Ca}^+$ )	533	960
Bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ )	100	1.829
Klorida ( $\text{Cl}^-$ )	23.484	41.890
Sulfat ( $\text{SO}_4^-$ )	3.181	6.050
TDS	41.661	79.660

Sumber: Ahmed *et al.* (2001)

Tingginya kadar salinitas dan TDS pada *reject water* tersebut dikarenakan tingginya efisiensi pengolahan dengan menggunakan metode RO. Menurut Lee *et al.* (2013), efisiensi yang didapatkan oleh pengolahan dengan reverse osmosis adalah lebih dari 94% untuk parameter COD, Total N, Total P, TDS dan turbiditas, pada berbagai variasi temperatur dan tekanan. Menurut Wilf (2010), untuk tipikal *salt rejection* atau persentase kandungan garam yang tersisihkan adalah 99.0-99.6% untuk SWRO dan 99.6-99.8% untuk BWRO. Nilai salinitas ataupun TDS tersebut bergantung pada konsentrasi *feed water* yang digunakan.

Instalasi *Reverse Osmosis* yang dimiliki oleh PLTU Paiton Unit 9 berjumlah dua pasang, yaitu *Seawater Reverse Osmosis* (SWRO) - *Brackish Water Reverse Osmosis* (BWRO) 1 dan SWRO-BWRO 2. SWRO merupakan unit yang mengolah *feed water* berupa air laut, sedangkan BWRO merupakan unit yang *feed water*-nya merupakan *permeate water* hasil olahan dari SWRO dengan produk yang akan menjadi air demineralisasi dan air konsumsi domestik. Skema RO di PLTU Paiton dan rata-rata hasil operasional RO di PLTU Paiton Unit 9 pada bulan Desember 2017 (sampai dengan 25 Desember 2017) terdapat pada Gambar 2.1 dan Tabel 2.2.



**Gambar 2.1 Skema Reverse Osmosis PLTU Paiton Unit 9**

**Tabel 2.2 Data Operasional SWRO dan BWRO 2 PLTU Paiton Unit 9 Periode Desember 2017**

No.	Parameter	Nilai		Satuan
		SWRO	BWRO	
1	<i>Feed Flow</i>	215,46	82,99	m <sup>3</sup> /jam
2	<i>Reject Flow</i>	113,97	57,41	m <sup>3</sup> /jam
3	<i>Permeate Flow</i>	101.49	25,58	m <sup>3</sup> /jam
4	Persentase <i>Reject Water</i>	47,21	69,10	%
5	<i>Feed TDS</i>	30.832,21	554,23	mg/L
6	<i>Permeate TDS</i>	556,00	9,78	mg/L
7	<i>Salt Rejection</i>	98,20	98,24	%

Sumber: Data Eksternal Treatment Water UBJOM Paiton Desember 2017

Selain memiliki karakteristik TDS dan salinitas yang tinggi, volume *reject water* yang dihasilkan oleh proses RO juga besar. Volume *reject water* yang dihasilkan dapat mencapai 70% dari keseluruhan *feed water*, bergantung pada kualitas air baku dan jenis membran yang digunakan (Rao, 2016). Dimana pada RO PLTU Paiton, persentase *feed water* yang menjadi *reject* adalah 50% pada SWRO dan 70% pada BWRO, sebagaimana tertera pada Tabel 2.2. Menurut Praneeth *et al.* (2014) besarnya volume diakibatkan sudah maksimumnya tekanan osmosis pada *reject water* sehingga sudah tidak bisa diolah kembali dengan RO pada sistem yang sama. Alternatif yang dapat digunakan resirkulasi dengan menggunakan *Pressure Exchanger* untuk mengurangi tekanan pada *reject water* dan mengembalikannya pada sistem RO (Migliorini, 2004). Namun meski sudah menggunakan sistem resirkulasi, RO tetap akan menghasilkan *reject water* dengan

volume yang besar karena berbagai faktor, antara lain kemampuan dan efisiensi membran RO.

Menurut Ahmed *et al.* (2001), pembuangan *reject water* RO berdampak buruk, baik secara ekonomi maupun lingkungan. Pembuangan yang tidak seharusnya dapat menyebabkan pencemaran pada sumber air yang digunakan untuk proses RO, utamanya pada ekosistem laut yang merupakan sumber utama *feed water* RO. Pencemaran tersebut mayoritas diakibatkan oleh tingginya salinitas pada *reject water*. Bentuk-bentuk kerusakan yang dapat ditimbulkan seperti timbulnya kondisi anoksik di dasar laut dan kerusakan spesies laut terutama makrobentos (Raventos *et al.*, 2006). Sadhwani *et al.* (2005) mengungkapkan terdapat beberapa biota laut yang sangat sensitif terhadap perubahan kondisi salinitas, seperti rumput laut jenis *Cymodocea nodose* dan *Caulerpa prolifera* serta ganggang merah jenis *Risoella Verruculosa*.

Berdasarkan pada penelitian Eri (2017), pemanfaatan *reject water* di Indonesia belum banyak dilaporkan. Pada berbagai kasus, *reject water* yang dihasilkan sistem RO dibuang dengan kolam evaporasi dan pengolahan termal untuk sisa padatannya dengan insenerasi. Menurut Rao (2016) beberapa metode yang banyak digunakan untuk pembuangan *reject water* RO adalah kolam evaporasi, injeksi pada sumur dalam, pembuangan pada badan air, pembuangan dengan saluran air limbah, pemanfaatan irigasi untuk spesies yang toleran terhadap salinitas (*halophyte*), dan pengolahan *ex-situ* oleh vendor tertentu.

## **2.2 Karakterisasi Air Limbah**

### **2.2.1 Total Dissolved Solid**

*Total Dissolved Solid* (TDS) merupakan istilah yang digunakan untuk mendeskripsikan garam anorganik dan zat-zat anorganik yang ada pada larutan yang terkandung pada air. Konstituen penyusunnya secara garis besar adalah kalsium, magnesium, sodium, kation potassium, hidrogen, karbonat, klorida, sulfat, dan anion nitrat (WHO, 1996).



### **2.2.2 Konduktivitas**

Konduktivitas merupakan kemampuan air untuk melewati suatu arus listrik. Kemampuan ini berhubungan dengan konsentrasi ion dalam air. Ion yang konduktif berasal dari material garam terlarut. Material yang terlarut sebagai ion disebut juga elektrolit. Semakin banyak ion yang dikandung pada air, maka semakin tinggi konduktivitasnya, begitu juga kebalikannya. Air yang telah didestilasi memiliki ion yang sangat sedikit, sehingga ia memiliki konduktivitas yang sangat rendah. Kebalikannya adalah air laut yang mengandung banyak ion dan tinggi konduktivitasnya (Fondriest, 2014).

### **2.2.3 Salinitas**

Salinitas merupakan pengukuran tingkat garam yang terlarut dalam air, biasanya menggunakan satuan *parts per thousands* (ppt atau ‰). Rata-rata salinitas air laut adalah 35 ppt, sedangkan salinitas air sungai adalah 0,5 ppt. Salinitas pada air laut sebagian besar disebabkan oleh adanya sodium (Na) dan klorin (Cl). Keduanya mencapai 85,7% dari kandungan garam pada air laut (U.S. EPA, 2014)

### **2.2.4 pH**

pH adalah nilai yang ditetapkan berdasarkan pada skala tertentu, seperti suhu. Hal ini menunjukkan bahwa pH bukan parameter fisik yang bisa diukur sebagai konsentrasi atau dalam satuan kuantitas. Pengukuran pH berdasarkan pada skala logaritma 0-14 yang menunjukkan tingkat asam dan basa suatu air. Semakin tinggi nilainya, maka semakin basa sifat air tersebut. Sedangkan semakin rendah nilainya maka semakin asam air tersebut (Fondriest, 2013). Menurut Brewer (2008), nilai pH air laut cenderung stabil pada 8,2 sebelum era industrialisasi, namun saat ini, pH air laut rata-rata 8,1.

### **2.2.5 Kesadahan**

Said (2008) menjelaskan bahwa kesadahan adalah istilah yang digunakan pada air yang mengandung kation penyebab kesadahan. Pada umumnya kesadahan disebabkan oleh adanya logam-logam atau kation-kation yang bervalensi 2, seperti Fe, Sr, Mn, Ca dan Mg, tetapi penyebab utama dari kesadahan adalah kalsium (Ca) dan magnesium (Mg). Kalsium dalam air mempunyai

kemungkinan bersenyawa dengan bikarbonat, sulfat, khlorida dan nitrat, sementara itu magnesium terdapat dalam air kemungkinan bersenyawa dengan bikarbonat, sulfat dan khlorida.

### 2.3 Reaksi Reduksi-Oksidasi

Proses oksidasi dan reduksi sebagai reaksi pelepasan dan penangkapan yang dilakukan oleh suatu zat. Oksidasi adalah proses pelepasan elektron dari suatu zat, sedangkan reduksi adalah proses penangkapan oleh suatu zat. Pada proses pelepasan elektron, zat berubah menjadi bentuk teroksidasinya, sehingga zat bertindak sebagai pereduksi. Sebaliknya, saat proses penangkapan, zat berubah menjadi bentuk tereduksi, maka ia bertindak sebagai pengoksidasi.

Bentuk teroksidasi dan tereduksi dari suatu zat merupakan suatu zat yang berpasangan dan disebut dengan sistem redox. Bentuk teroksidasi sering ditandai dengan "ox" dan bentuk tereduksi ditandai dengan "red". Kestimbangan reaksinya ditulis sebagai berikut:

Proses reduksi:  $ox + ne = red$

Proses oksidasi:  $red = ox + ne$

Pada reaksi tersebut, "ne" adalah jumlah elektron yang dilepaskan atau diterima (Rivai, 1995).

Konsep dari oksidasi-reduksi berdasarkan pada struktur atom dan perpindahan elektron. Sebuah atom, molekul, atau ion dikatakan oksidasi apabila melepaskan elektron dan dikatakan reduksi ketika menerima sebuah elektron. Reaksi oksidasi yang terjadi diantara atom membentuk molekul atau ion dengan ikatan kovalen polar. Asumsi tertentu diperlukan untuk mempertahankan suatu konsep yang konsisten (Sawyer, 2003).

Potensial reduksi standar menunjukkan ion mana yang akan mengoksidasi ataupun mereduksi ion lainnya. Nilai potensial reduksi standar pada elektroda hidrogen standar = 0 terdapat pada Tabel 2.3.

**Tabel 2.3 Potensial Reduksi Standar**

Kopel (oks/red)	Reaksi katoda (reduksi)	E° (Volt)
Li <sup>+</sup> /Li	$Li^+ + e^- \rightleftharpoons Li$	-3,04

<b>Kopel (oks/red)</b>	<b>Reaksi katoda (reduksi)</b>	<b>E° (Volt)</b>
<b>K<sup>+</sup>/K</b>	$K^+ + e^- \rightleftharpoons K$	-2,92
<b>Ca<sup>2+</sup>/Ca</b>	$Ca^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Ca$	-2,87
<b>Na<sup>+</sup>/Na</b>	$Na^+ + e^- \rightleftharpoons Na$	-2,71
<b>Mg<sup>2+</sup>/Mg</b>	$Mg^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Mg$	-2,37
<b>Al<sup>3+</sup>/Al</b>	$Al^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Al$	-1,66
<b>Zn<sup>2+</sup>/Zn</b>	$Zn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Zn$	-0,76
<b>Fe<sup>2+</sup>/Fe</b>	$Fe^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Fe$	-0,44
<b>PbSO<sub>4</sub>/Pb</b>	$PbSO_4 + 2e^- \rightleftharpoons Pb + 2SO_4$	-0,36
<b>Co<sup>2+</sup>/Co</b>	$Co^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Co$	-0,28
<b>Ni<sup>2+</sup>/Ni</b>	$Ni^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Ni$	-0,25
<b>Sn<sup>2+</sup>/Sn</b>	$Sn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Sn$	-0,14
<b>Pb<sup>2+</sup>/Pb</b>	$Pb^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Pb$	-0,13
<b>D<sup>+</sup>/D<sub>2</sub></b>	$2D^+ + 2e^- \rightleftharpoons D_2$	- 0,003
<b>H<sup>+</sup>/H<sub>2</sub></b>	$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$	0,000
<b>Sn<sup>4+</sup>/Sn<sup>2+</sup></b>	$Sn^{4+} + 2e^- \rightleftharpoons Sn^{2+}$	+0,15
<b>Cu<sup>2+</sup>/Cu</b>	$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cu$	+0,34
<b>I<sub>2</sub>/I<sup>-</sup></b>	$I_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2I^-$	+0,54
<b>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2O_2$	+0,68
<b>Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup></b>	$Fe^{3+} + e^- \rightleftharpoons Fe^{2+}$	+0,77
<b>Hg<sub>2</sub><sup>2+</sup>/Hg</b>	$Hg_2^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons 2Hg$	+0,79
<b>Ag<sup>+</sup>/Ag</b>	$Ag^+ + e^- \rightleftharpoons Ag$	+0,80
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/N<sub>2</sub>O<sub>4</sub></b>	$2NO_3^- + 4H^+ + 2e^- \rightleftharpoons N_2O_4 + 2H_2O$	+0,80
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/NO</b>	$NO_3^- + 4H^+ + 3e^- \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	+0,96
<b>Br<sub>2</sub>/Br</b>	$Br_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Br$	+1,07

Kopel (oks/red)	Reaksi katoda (reduksi)	E° (Volt)
O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup> ⇌ 2H <sub>2</sub> O	+1,23
Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> /Cr <sup>3+</sup>	Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> + 14H <sup>+</sup> + 6e <sup>-</sup> ⇌ 2Cr <sup>3+</sup> + 7H <sub>2</sub> O	+1,33
Cl <sub>2</sub> /Cl <sup>-</sup>	Cl <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> ⇌ 2Cl <sup>-</sup>	+1,36
PbO <sub>2</sub> /Pb <sup>2+</sup>	PbO <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ Pb <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O	+1,46
Au <sup>3+</sup> /Au	Au <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup> ⇌ Au	+1,50
MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /Mn <sup>2+</sup>	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> + 8H <sup>+</sup> + 5e <sup>-</sup> ⇌ Mn <sup>2+</sup> + 4H <sub>2</sub> O	+1,51
HClO/Cl <sub>2</sub>	2HClO + 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ Cl <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	+1,63
PbO <sub>2</sub> /PbSO <sub>4</sub>	PbO <sub>2</sub> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 4H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ PbSO <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O	+1,68
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ 2H <sub>2</sub> O	+1,78
F <sub>2</sub> /F	F <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> ⇌ 2F	+2,87

Sumber: Murry (2001)

## 2.4 Bar Graph Miliekivalen per Liter

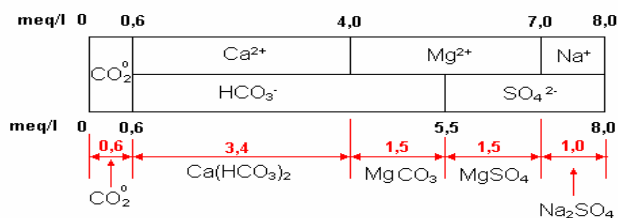
Said (2008) menjelaskan bahwa untuk menyatakan konsentrasi ion atau senyawa kimia yang ada di dalam air umumnya dinyatakan dengan berat unsur atau senyawa dalam miligram per liter disingkat dengan mg/l. Kadang-kadang untuk menyatakan konsentrasi ditunjukkan dengan *part per millions* (ppm) dibanding dengan miligram per liter. Part per million identik dengan 1 mg/1.000.000.

Berat ekuivalen suatu unsur atau senyawa adalah berat atom unsur atau berat molekul senyawa dibagi dengan muatan positif atau negatif yang dihasilkan akibat pelarutan di dalam air. Misalnya asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) dengan berat molekul 98,1, jika dilarutkan ke dalam air akan terionisasi dan melepaskan dua ion H<sup>+</sup> dan satu ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Oleh karena itu berat ekuivalen asam sulfat adalah 98,1 dibagi 2 sama dengan 49,0. Istilah miliekivalen per liter (meq/l) adalah menunjukkan konsentrasi zat terlarut dalam bentuk berat ekuivalen.

Hasil analisa kualitas air biasanya dinyatakan dalam miligram per liter dan dilaporkan dalam bentuk tabel. Untuk menggambarkan komposisi kimia dengan lebih baik, maka data tersebut dinyatakan dalam bentuk miliekivalen per liter dalam bentuk diagram batang (*bar graf*). Diagram batang miliekivalen per liter terdiri dari dua baris (batang). Baris atas menunjukkan konsentrasi ion positif (kation) utama yang dijejer mulai dari kalsium, magnesium, sodium (natrium) dan potasium (kalium). Sedangkan baris bawah menunjukkan konsentrasi ion negatif (anion) utama yang dijejer mulai dari ion karbonat (bila ada), bikarbonat, sulfat dan khlorida. Jumlah miliekivalen per liter dari ion positif (kation) harus sama dengan jumlah miliekivalen per liter dari ion negatif (anion) untuk air dalam keadaan kesetimbangan. Hipotesa kombinasi ion positif dan negatif dapat ditulis dari diagram batang (*bar graf*). Contoh karakteristik penyusun air dan *bar graf* miliekivalennya terdapat pada Tabel 2.4 dan Gambar 2.2.

**Tabel 2.4 Contoh Karakteristik Air**

Komponen	mg/l	Berat Ekivalen	meq/l
CO <sub>2</sub>	13,2	22,0	0,6
Ca <sup>2+</sup>	68	20,0	3,4
Mg <sup>2+</sup>	36,6	12,2	3,0
Na <sup>+</sup>	23	23,0	1,0
Total Kation = 7,4			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	299	61,0	4,9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	120	48	2,5
Total Anion = 7,4			



**Gambar 2.2 Contoh Bar Graf Miliekivalen**

Sumber: Said (2008)

## 2.5 Elektrolisis

Menurut Skoog (1993), elektrolisis adalah suatu peristiwa dimana suatu larutan akan diuraikan menjadi ion-ionnya, yaitu ion positif (kation) dan ion negatif (anion), ketika arus listrik searah dialirkan kedalam larutan elektrolit melalui elektroda. Pada peristiwa ini kation akan mengalami reduksi karena menangkap elektron, sedangkan anion akan mengalami oksidasi karena melepaskan elektron. Maka peristiwa reduksi terjadi di katoda dan oksidasi terjadi di anoda, dan kation akan menuju katoda sedangkan anion akan menuju anoda.

Periode elektrolisis bergantung pada tujuan penggunaan elektrolisis. Berbagai penelitian telah dibuat untuk melihat waktu optimumnya. Berdasarkan pada penelitian Watson (2015), dilakukan *running* elektrolisis dengan periode 8, 12, dan 24 jam pada beberapa reaktor. Namun didapatkan bahwa anoda dan katoda tidak bekerja maksimal pada periode 24 jam, dimana laju produksi hidrogen sangat rendah selama periode elektrolisis. Laju produksi hidrogen tertinggi terjadi pada periode elektrolisis 8 jam. Sehingga dapat disimpulkan, terjadi penurunan produksi hidrogen pada periode 12 jam, meskipun tidak sebesar pada periode 24 jam.

Penelitian Elicker (2014) menunjukkan bahwa periode pelaksanaan elektrolisis juga bergantung pada konduktivitas elektrolitnya. Penggunaan arus listrik DC pada proses ini membutuhkan elektrolit dengan konduktivitas tinggi sebagai penghantar listrik. Titik penyelesaian elektrolisis merupakan titik disaat konduktivitas elektrolit sudah turun, sehingga hambatan ( $R$ ) pada elektrolit sudah naik. Pada kondisi ini, proses elektrolisis dapat dihentikan karena sudah tidak efisien lagi.

Tilley (2013) menjelaskan bahwa proses kunci dalam elektrolisis adalah pertukaran atom dan ion dengan penghapusan atau penambahan elektron dari sirkuit eksternal. Produk elektrolisis yang dihasilkan dalam beberapa keadaan fisik yang berbeda dari elektrolit dan dapat dihilangkan dengan beberapa proses fisika. Sebagai contoh, dalam elektrolisis air garam untuk menghasilkan hidrogen dan klorin, produk yang dihasilkan adalah gas hidrogen dan klorin. Produk gelembung gas tersebut berasal dari elektrolit dan diakumulasikan.

Komponen utama yang diperlukan dalam proses elektrolisis adalah:

a. Elektrolit

Elektrolit adalah zat yang mengandung ion bebas yang merupakan pembawa arus listrik dalam elektrolit. Jika ion-ion dalam elektrolit tidak bergerak, seperti pada garam padat (*solid salt*) maka elektrolisis tidak dapat terjadi.

b. Sumber arus listrik searah (DC)

Sumber arus listrik searah (DC) ini berfungsi sebagai penyedia energi yang diperlukan untuk membuat atau melepaskan ion dalam elektrolit. Arus listrik dibawa oleh elektron dalam sirkuit eksternal.

c. Elektroda

Elektroda adalah sebuah penghantar listrik antara sumber listrik atau rangkaian listrik sebagai penyedia energi dan elektrolit. Elektroda yang digunakan kebanyakan terbuat dari logam, grafit dan bahan semikonduktor. Pemilihan bahan elektroda tergantung pada reaksi kimia antara elektroda dan elektrolit dan biaya pembuatannya. Setiap elektroda menarik ion yang berlawanan muatan. Ion bermuatan positif (kation) bergerak membawa elektron menuju katoda (negatif), sedangkan ion bermuatan negatif (anion) bergerak menuju anoda positif.

### 2.5.1 Elektroda

Menurut Eggen (2009), elektroda adalah konduktor yang digunakan untuk bersentuhan dengan bagian atau media non-logam. Elektroda merupakan salah satu komponen yang sangat penting dalam proses elektrolisis. Elektroda berfungsi sebagai menghantarkan arus listrik dari sumber listrik ke air yang dielektrolisis. Pada elektrolisis dengan sumber DC, elektroda terbagi menjadi dua kutub yaitu kutub positif (anoda) dan kutub negatif (katoda). Anoda didefinisikan sebagai elektroda positif dimana elektron datang dari sel elektrolisa dan oksidasi terjadi, sedangkan katoda didefinisikan sebagai elektroda negatif dimana elektron memasuki sel elektrolisa dan reduksi terjadi. Elektroda yang digunakan dalam elektrolisis harus mempunyai konduktivitas listrik dan ketahanan korosi yang baik (Hampton, 1925).

Wulansari (2013) menjelaskan bahwa elektroda yang digunakan umumnya merupakan elektroda inert, seperti Grafit (C), Platina (Pt), dan Emas (Au). Elektroda berperan sebagai tempat berlangsungnya reaksi. Reaksi reduksi berlangsung di katoda, sedangkan reaksi oksidasi berlangsung di anoda. Kutub negatif sumber arus mengarah pada katoda (sebab memerlukan elektron) dan kutub positif sumber arus tentunya mengarah pada anoda. Akibatnya, katoda bermuatan negatif dan menarik kation-kation yang akan tereduksi menjadi endapan logam. Sebaliknya, anoda bermuatan positif dan menarik anion-anion yang akan teroksidasi menjadi gas.

Terdapat berbagai aspek yang harus diperhatikan saat memilih elektroda yang akan digunakan pada proses elektrolisis, yaitu stabilitas fisik dan kimiawi bahan (meliputi ketahanan terhadap korosi, pembentukan oksida atau hidrida tertentu, dan selektivitas produk yang akan terbentuk), konduktivitas listrik, ketahanan, dan harga elektroda tersebut (Artadi, 2007).

Selain itu, aspek yang harus dipertimbangkan saat menentukan jenis elektroda yang akan digunakan pada proses elektrolisis adalah deret elektrokimia atau sering disebut deret volta. Dogra (1990) menjelaskan bahwa deret volta merupakan urutan logam berdasarkan kenaikan potensial elektroda standarnya. Urutan tersebut adalah Li K Ba Sr Ca Na Mg Al Mn Zn Cr Fe Cd Co Ni Sn Pb H Sb Bi Cu Hg Ag Pt Au. Pada deret tersebut, unsur logam dengan potensial elektroda yang lebih negatif ditempatkan di bagian kiri, sedangkan unsur dengan potensial elektroda yang lebih positif ditempatkan di bagian kanan. Semakin ke kiri kedudukan suatu logam dalam deret tersebut, maka logam semakin reaktif (semakin mudah melepas elektron) dan merupakan reduktor yang semakin kuat. Sebaliknya, semakin ke kanan kedudukan suatu logam-logam dalam deret tersebut, maka logam tersebut semakin kurang reaktif (semakin sulit melepas elektron) dan merupakan oksidator yang kuat. Beberapa logam yang dapat digunakan sebagai elektroda adalah:

- Grafit/Karbon (C)

Grafit adalah satu inti karbon yang merupakan konduktor listrik yang bisa digunakan sebagai material elektroda pada sebuah lampu listrik. Bahan grafit mempunyai keistimewaan seperti sifat mekanis seperti logam, ringan dan



mempunyai sifat yang baik serta dari segi ekonomi bahan dasar grafit buatan tersedia melimpah dan murah. Artadi (2007) juga mengungkapkan bahwa keuntungan menggunakan elektroda grafit antara lain adalah harganya relatif murah dibandingkan elektroda logam karena pemurnian grafit untuk elektroda lebih sederhana bila dibandingkan dengan pemurnian logam untuk dijadikan elektroda.

Grafit memiliki kekuatan dan ketahanan fisik yang baik pada kondisi elektrolisis biasa, tidak mengalami pasivasi, dan dapat digunakan dalam waktu yang lama pada densitas arus tinggi. Berbagai penelitian mengenai elektrolisis memanfaatkan bahan ini untuk berbagai keperluan, seperti sebagai elektroda dalam oksidasi ion CN<sup>-</sup>, oksidasi asam sulfat, oksidasi EDTA dan oksidasi limbah organik. Fakta tersebut menunjukkan bahwa grafit (karbon) dapat digunakan sebagai elektrode yang cukup baik untuk berbagai proses dan kondisi elektrolisis (Widodo *et al.*, 2008).

- Perak (Ag)

Perak adalah unsur kimia logam dengan simbol kimia Ag (Latin: Argentum) dan nomor atom 47. Lembut, putih, berkilau logam transisi, ia memiliki konduktivitas listrik tertinggi dari setiap elemen dan konduktivitas termal tertinggi dari semua logam. Logam terjadi secara alamiah dalam murni, bentuk bebas (asli perak), sebagai paduan dengan emas dan logam lain, dan dalam mineral seperti argentite dan chlorargyrite.

- Stainlees Steel

Stainlees steel dapat bertahan dari serangan karat dan tahan terhadap air dan udara. Stainless steel terdiri dari besi, krom, mangan, silikon, karbon, dan seringkali nikel serta molybdenum dalam jumlah yang cukup banyak. Elemen-elemen ini bereaksi dengan oksigen yang ada di air dan udara sehingga membentuk sebuah lapisan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau hidroksida yang terus menerus bertambah seiring dengan berjalannya waktu. Lapisan korosi ini makin lama makin menebal dan dikenal sebagai karat. Stainlees steel dapat bertahan atau tidak bernoda karena dilindungi oleh lapisan karat dalam skala atomik (Peckner, 1977).

- Platina (Pt)  
Platina adalah logam yang berbentuk padat berwarna keperakan putih. Platina tidak bereaksi dengan udara, air, atau bahan kimia sehingga tahan korosi. Platina merupakan logam yang sangat stabil karena tahan korosi oleh air, oksigen di udara, dan bahan kimia lainnya bahkan pada suhu yang sangat tinggi (Cavendish, 2004). Metal seperti platina biasanya dipergunakan mengingat ia tidak mudah bereaksi dengan kebanyakan larutan, biasanya disebut sebagai elektroda inert (Day dan Underwood, 2001).

### 2.5.2 Faktor Penentu Elektrolisis

- Penggunaan katalisator  
Misalnya  $H_2SO_4$  dan  $KOH$  berfungsi mempermudah proses penguraian air menjadi hidrogen dan oksigen karena ion-ion katalisator mampu mempengaruhi kestabilan molekul air menjadi menjadi ion  $H$  dan  $OH$  yang lebih mudah di elektrolisis karena terjadi penurunan energi pengaktifan. Zat tersebut tidak mengalami perubahan yang kekal (tidak dikonsumsi dalam proses elektrolisis). Penggunaan asam sulfat sebagai katalis dalam proses elektrolisis menjadi pilihan utama dibandingkan  $KOH$ . Karena asam sulfat melepaskan  $H^+$  yang memudahkan membentuk gas hidrogen. Sedangkan  $KOH$  melepaskan  $OH^-$  yang menghambat pembentukan gas hidrogen.
- Luas permukaan tercelup  
Semakin banyak luas yang semakin banyak menyentuh elektrolit maka semakin mempermudah suatu elektrolit untuk mentransfer elektronnya. Sehingga terjadi hubungan sebanding jika luasan yang tercelup sedikit maka semakin mempersulit elektrolit untuk melepaskan elektron dikarenakan sedikitnya luas penampang penghantar yang menyentuh elektrolit. Sehingga transfer elektron bekerja lambat dalam mengelektrolisis elektrolit.
- Sifat logam bahan elektroda  
Penggunaan medan listrik pada logam dapat menyebabkan seluruh elektron bebas bergerak dalam metal, sejajar, dan berlawanan arah dengan arah medan listrik. Ukuran dari kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan

arus listrik. Jika suatu beda potensial listrik ditempatkan pada ujung-ujung sebuah konduktor, muatan-muatan Bergeraknya akan berpindah, menghasilkan arus listrik. Konduktivitas listrik didefinisikan sebagai rasio rapat arus terhadap kuat medan listrik.

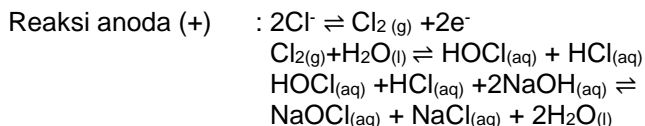
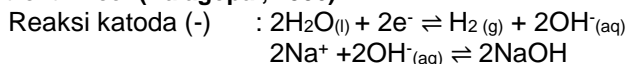
- Konsentrasi pereaksi

Semakin besar konsentrasi suatu larutan pereaksi maka akan semakin besar pula laju reaksinya. Ini dikarenakan dengan persentase katalis yang semakin tinggi dapat mereduksi hambatan pada elektrolit. Sehingga transfer elektron dapat lebih cepat meng-elektrolisis elektrolit dan didapat ditarik garis lurus bahwa terjadi hubungan sebanding terhadap persentase katalis dengan transfer elektron.

### 2.5.3 Produk Elektrolisis

Menurut Craighton (1922) reaksi yang akan terjadi pada elektrolisis dengan elektrolit pekat dan encer berbeda. Hal ini disebabkan perbedaan pada konsentrasi penyusunnya. Reaksi yang dapat terjadi pada elektrolisis adalah:

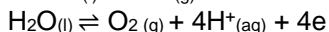
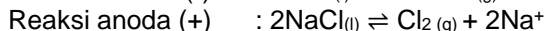
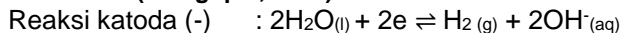
#### **Elektrolit Encer (Balagopal, 2006) 2.1**



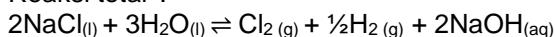
Reaksi total :



#### **Elektrolit Pekat (Balagopal, 2006) 2.2**



Reaksi total :



Produk yang akan didapatkan oleh proses elektrolisis adalah berupa gas dan elektrolit. Berdasarkan pada penelitian

diatas, kedua jenis proses akan memproduksi gas hidrogen pada katodanya, sedangkan karakteristik elektrolit dan gas yang diproduksi pada anodanya akan berbeda. Perbedaan untuk produk elektrolisis pada kedua jenis elektrolit terdapat pada Tabel 2.4. Namun penelitian ini berfokus pada gas hidrogen dan elektrolit yang dihasilkan.

**Tabel 2.5 Perbedaan Produk Elektrolisis**

	<i>Conventional Alkaline Water</i> (Air Alkali)	<i>Brine Water</i> (Air Salin)	<i>Sea Water</i> (Air Laut)
Gas Terproduksi	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /(Cl <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> )
Produk Utama	H <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub> dan NaOH	H <sub>2</sub>
Produk Sampingan	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub> dan NaOCl

Sumber: Abdel *et al.* (2010)

Berdasarkan pada penelitian Abdel *et al.* (2010), kuantitas dan karakteristik produk elektrolisis dan produksi hidrogennya juga bergantung pada tegangan yang digunakan. Pada penelitian yang menggunakan tegangan 6-20 V, kenaikan produksi hidrogen diikuti dengan peningkatan TDS. Laju produksi gas pada tegangan yang rendah (6-8 V) lebih lambat daripada laju pada tegangan yang lebih tinggi (10 V keatas).

a. Elektrolit

Berdasarkan pada persamaan 2.1 dan 2.2 dapat dilihat bahwa elektrolit yang dihasilkan pada elektrolisis dengan elektrolit pekat adalah soda kaustik. Sedangkan elektrolisis dengan elektrolit encer akan menghasilkan hipoklorit.

Soda kaustik (NaOH) adalah senyawa kimiawi yang digunakan secara luas untuk pengolahan air dan air limbah. Di Amerika, produksinya mencapai 25 juta pound pertahun. Metode yang paling banyak digunakan untuk memproduksi senyawa ini adalah elektrolisis air dengan konsentrasi garam

tinggi atau *brine water* dengan produk lain berupa gas klor dan hidrogen (Kurt dan Bittner, 2000).

Lee (2016) menjelaskan pada elektrolisis *brine water*, ketika arus listrik mengalir melalui air garam, ion klor negatif ( $\text{Cl}^-$ ) berpindah dari anoda positif dan kehilangan elektron sehingga berubah menjadi gas klor. Sementara itu, ion natrium ( $\text{Na}^+$ ) tertarik menuju katoda. Namun tidak terjadi ikatan elektron dengan ion natrium untuk menjadi atom metal, karena pada air garam, molekul air lebih mudah mengikat elektron dibandingkan dengan natrium. Reaksi yang terjadi pada katoda adalah ion hidroksida berikatan dengan ion natrium yang sudah ada ada larutan dan membentuk natrium hidroksida yang dapat diolah lebih lanjut dengan evaporasi. Proses yang seringkali disebut *chloroalkali* ini adalah dasar proses pada industri-industri yang sudah ada sejak ratusan tahun. Dengan listrik, larutan konsentrat garam dapat dikonversi menjadi natrium hidroksida, gas klor, dan hidrogen yang bernilai.

Menurut Fukuzaki (2006), hipoklorit merupakan bahan yang paling banyak digunakan sebagai desinfektan pada berbagai industri. Hipoklorit memenuhi berbagai syarat desinfektan yang ideal dan memiliki hasil desinfeksi yang sangat baik. Efektivitas hipoklorit bergantung pada ketersediaan klorin dan pH larutan. Jeong *et al.* (2002) mengungkapkan beberapa kelebihan penggunaan  $\text{NaOCl}$  antara lain:

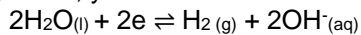
- $\text{NaOCl}$  mudah diproduksi dengan menggunakan air yang mengandung garam
- Konsentrasi dan volume produksi  $\text{NaOCl}$  dapat diatur dengan mudah menggunakan sumber listrik
- $\text{NaOCl}$  mudah diubah menjadi  $\text{NaCl}$  dengan menggunakan panas alami.

Saleem *et al.* (2012) melakukan penelitian mengenai produksi  $\text{NaOCl}$  melalui elektrolisis dengan larutan garam dengan periode 180 menit terhadap beberapa elektroda. Penelitiannya menunjukkan bahwa jenis elektroda sangat menentukan konsentrasi  $\text{NaOCl}$  yang dihasilkan pada elektrolit hasil elektrolisis. Pada penggunaan elektroda

titanium, konsentrasi yang dihasilkan mencapai 1.900 mg/L sedangkan aluminium hanya menghasilkan konsentrasi 34 mg/L. Selain itu, dilakukan juga penelitian terhadap jarak antar elektroda dengan tujuh variasi (2,5-11,5cm). Didapatkan jarak optimal untuk pembentukan NaOCl, yaitu pada 7 cm, 8,5 cm, dan 5,5 cm dengan hasil yang relatif sama.

b. Gas Hidrogen

Gas hidrogen diproduksi oleh elektrolisis pada katoda. Baik pada elektrolisis dengan elektrolit pekat maupun encer, terjadi reaksi yang sama, yaitu:



Smolinka *et al.* (2015) menjelaskan bahwa gas hidrogen dianggap sebagai salah satu pembawa energi dengan energi spesifik tertinggi (dan densitas energi terendah pada kondisi biasa) sehingga dapat dipindahkan dan disimpan dengan berbagai cara. Pada sektor energi, hidrogen masih berada pada kategori inferior. Hal ini disebabkan masih banyak digunakannya sumber energi konvensional seperti bahan bakar fosil yang lebih murah. Namun dengan semakin dituntutnya sumber energi berkelanjutan saat ini, hidrogen memiliki prospek yang sangat baik. Hidrogen dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dengan menggunakan mesin termal maupun *fuel cell*. Aplikasinya dapat digunakan sebagai bahan bakar kendaraan, benda-benda stasioner, ataupun sebagai bahan baku proses kimiawi.

## 2.6 Fuel Cell

*Fuel cell* ialah alat elektrokimia yang berfungsi mengubah bahan bakar (*fuel*) secara kontinyu menjadi energi listrik. Secara sederhana, *fuel cell* mengkonversi hidrogen sebagai bahan bakar utama dan oksigen sebagai oksidator melalui reaksi kimia dalam suatu sel sehingga menghasilkan energi listrik.

*Fuel cell* memiliki persamaan dengan baterai yaitu proses yang terjadi merupakan proses elektrokimia dan sama-sama menghasilkan listrik arus searah (DC). Pembangkit listrik *fuel cell* biasanya akan ditambahkan inverter agar menjadi arus bolak-balik

(AC) sehingga dapat disesuaikan dengan sistem listrik yang telah ada. Namun terdapat perbedaan yang mendasar pada baterai dan *fuel cell*, yaitu kebutuhan bahan bakar dan penghasilan energi.

Linden (1990) menjelaskan perbedaan mendasar antara *fuel cell* dan baterai ialah sifat kontinuitas dari energi yang diberikan. Pada *fuel cell* sumber energi (bahan bakar/ *fuel*) biasanya diberikan secara kontinyu dari sumber diluar sistem. Pada baterai, bahan bakarnya sudah berpadu jadi satu kesatuan, jika energinya habis maka perlu di ganti atau diisi kembali (*recharged*). Sedangkan pada *fuel cell*, selama bahan bakar diberikan, maka sistem akan terus menghasilkan energi listrik.

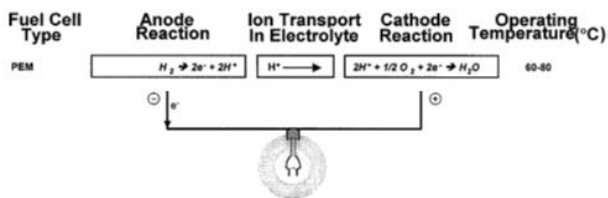
Menurut penelitian Farooque dan Maru (2001), keunggulan *fuel cell* dibandingkan dengan pembangkit listrik jenis lain karena beberapa hal antara lain: dapat menggunakan bahan bakar selain bahan bakar fosil (gas metan, etanol dan lain-lain), konversi energi yang lebih sempurna (efisien tinggi, panas buangan dapat digunakan kembali), ramah lingkungan (emisi rendah, tidak berisik, dan hasil buangan tidak berbahaya contoh air), dapat ditempatkan dimana saja sesuai kebutuhan, ukuran yang fleksibel, cukup tahan lama dengan tingkat kehandalan tinggi (selama bahan bakar diberikan), dan digunakan untuk banyak aplikasi (peralatan elektronika, kendaraan, antariksa, pembangkit listrik besar)

### **2.6.1 Prinsip Kerja**

Cara kerja sel bahan bakar kebalikan kerja sel elektrolisis. Sel elektrolisis memerlukan bahan baku air dan energi listrik dari luar sistem untuk memutuskan ikatan air menjadi hidrogen dan oksigen. Produk sel elektrolisis adalah hidrogen pada sisi katode. Sel bahan bakar bekerja dengan menggunakan gas hidrogen atau gas lain yang mudah teroksidasi sebagai bahan bakar yang dimasukkan di sisi anode. Selanjutnya bahan bakar diionisasi oleh anode menghasilkan ion  $H^+$  dan elektron(e). Elektron kemudian dipisahkan dari ion positif menggunakan selaput pemisah (membran penukar kation) yang hanya permeabel terhadap ion positif menuju ke sisi katode, sedangkan elektron dilewatkan melalui rangkaian alat listrik dan akhirnya menuju ke sisi katode.

Di sisi katode oksigen dimasukkan dari udara dan di sisi katode terjadi serangkaian reaksi ionisasi molekul oksigen menjadi ion. Ion oksigen, elektron dan ion  $H^+$  bergabung membentuk

molekul air ( $H_2O$ ). Air tersebut merupakan produk samping sel bahan bakar ygn keluar dari sisi katode. Dilihat dari produk yang berupa uap air, sel bahan bakar ini merupakan mesin yang tidak menimbulkan polusi sama sekali (*zero emission divide*).



**Gambar 2.3 Proses Kimia yang Terjadi pada Fuel Cell**

Sumber: Farooque dan Hans (2001)

Cara kerja dari *fuel cell* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.3 dimana terdapat 2 karbon elektroda yang terpisah satu sama lain. Bahan bakar, dalam hal ini hidrogen, akan dialirkan kepermukaan anoda dengan tekanan gas tertentu sesuai kebutuhan. Dan secara bersamaan oksigen yang berasal dari udara bebas, dialirkan kepermukaan elektroda yang lain (katoda). Hoogers (2002) menjelaskan bahwa saat elektroda dihubungkan dengan beban dari luar, maka proses yang terjadi sebagai berikut:

1. Hidrogen ( $H_2$ ) yang menyetuh permukaan anoda akan beraksi secara kimiawi (reduksi), menghasilkan ion hidrogen ( $H^+$ ) dan ion elektron ( $e^-$ ). Sedangkan di katoda terjadi reaksi kimia (oksidasi) dimana oksigen ( $O_2$ ) diubah menjadi ion.
2. Ion hidrogen ( $H^+$ ) akan bergerak dari permukaan fuel elektroda (anoda) menuju katoda melalui elektrolit (cairan/gas).
3. Sedangkan ion elektron ( $e^-$ ) di anoda bergerak melalui kawat yang dihubungkan dengan beban/circuit diluar yang akhirnya menuju elektoda yang sama dituju ion hidrogen ( $H^+$ ) yaitu katoda.
4. Oksigen, ion hidrogen dan elektron mengalami rekasi kimia dengan oksigen elektroda maka pada



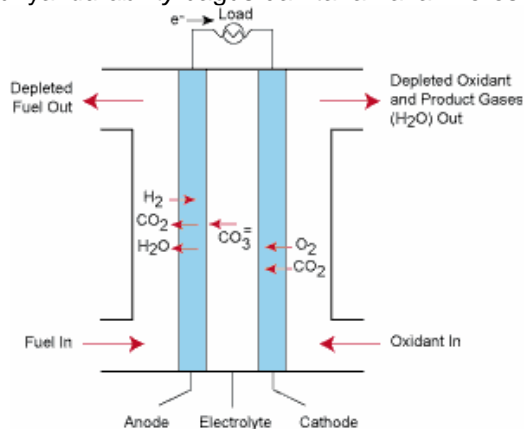
permukaannya akan menghasilkan air ( $H_2O$ ) dan panas sebagai efek dari reaksi tersebut.

### 2.6.2 Jenis Fuel Cell

Perkembangan sel bahan bakar (*fuel cell*) memunculkan berbagai tipe *fuel cell* dengan suhu operasi dan skala produksi energi yang berbeda. Berdasarkan suhu operasionalnya *fuel cell* dapat dibagi menjadi dua, yaitu yang bekerja pada suhu tinggi dan pada suhu rendah. Tipe pada suhu tinggi adalah MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) dan SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*). Kedua tipe ini berkerja pada suhu  $500-1000^{\circ}C$ . Sedangkan untuk tipe suhu rendah adalah PAFC (*Phosphoric acid Fuel Cell*) dan PEFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Pada kedua tipe ini, berkerja pada suhu dibawah  $200^{\circ}C$ . Penjelasan masing-masing tipe sebagai berikut:

- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell).

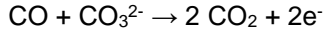
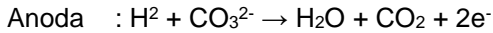
*Fuel cell* ini sangat sesuai digunakan untuk pembangkit tenaga listrik berskala besar. Suhu operasinya sekitar  $600^{\circ}C$ , lebih rendah daripada SOFC. Elektrolit yang digunakan adalah garam karbonat ( $Li_2CO_3$ ,  $K_2CO_3$ , dll) dalam bentuk larutan. Pada suhu tinggi, kecepatan reaksi bisa berlangsung cepat, sehingga tidak diperlukan katalis (Pt). Namun pada suhu tinggi pula, diperlukan bahan yang mempunyai *durability* bagus dan tahan akan korosi.



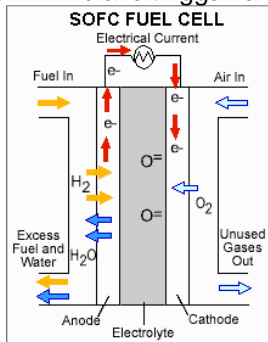
**Gambar 2.4 Skema Kerja MCFC**

Sumber: U.S. Department of Energy (2002)

Reaksi yang dapat terjadi :



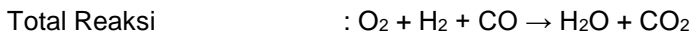
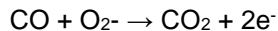
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell),  
Suhu Operasi 1000°C, dengan keramik padat (misal, ZrO<sub>2</sub>) sebagai elektrolitnya. Keunggulan pada tipe ini adalah waktu untuk mengaktifkannya cukup cepat dan bisa diterapkan dalam skala kecil. Fuel cell ini sangat sesuai digunakan untuk pembangkit tenaga listrik berskala besar, sehingga dapat menyediakan listrik untuk pabrik maupun sebuah kota. Suhu operasinya yang sangat tinggi (sekitar 1000°C) memang menjadi masalah tersendiri, tetapi uap dari fuel cell ini dapat digunakan untuk menggerakkan turbin dan membangkitkan listrik secara efisien. Namun karena harga elektroda platina yang cukup mahal, maka kedua tipe fuel cell ini mulai ditinggalkan.



**Gambar 2.5 Skema Kerja SOFC**

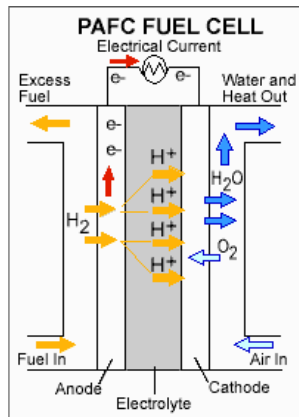
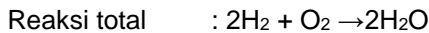
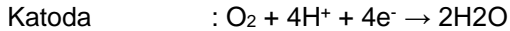
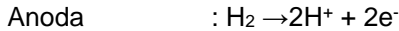
Sumber: U.S. Department of Energy (2002)

Reaksi yang terjadi :



- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell ),  
 Fuel cell ini sangat potensial digunakan untuk pembangkit tenaga listrik berskala kecil. Suhu operasinya 200°C, dan menggunakan asam fosfat (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) sebagai elektrolitnya. Ditemukan pada tahun 1967, dan sejak tahun 1980-an , di Jepang dan Amerika mulai dipergunakan pada hotel, rumah sakit, dan lain-lain. Menggunakan reforming untuk mendapatkan bahan bakar hidrogen dan menghasilkan produk samping CO<sub>2</sub>(g). Sistem operasinya sama dengan PEM.

Reaksi yang dapat terjadi :



**Gambar 2.6 Skema Kerja PAFC**

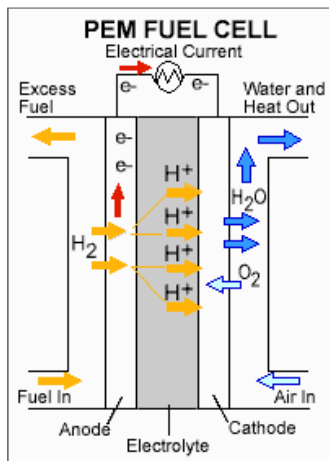
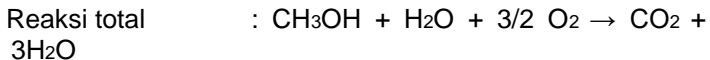
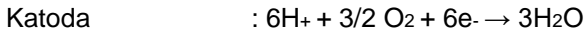
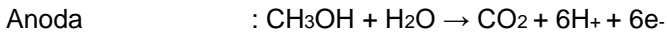
Sumber: U.S. Department of Energy (2002)

- PEFC (Proton Exchange Fuel cell) atau PEM (Proton Exchange Membran)

*Fuel cell* jenis ini menggunakan membran padat sebagai elektrolit untuk menghantarkan proton. Karena menggunakan lapisan tipis membran polimer, ukuran secara keseluruhan sangatlah kecil. PEMFC paling sering

digunakan karena lebih efisien dan suhu operasinya rendah, yaitu sekitar 75°C (167°F). Rendahnya suhu operasi ini menyebabkan rendahnya waktu pemanasan (*warm-up time*). Selain itu, pada *fuel cell* ini tidak dipakai fluida yang bersifat korosif seperti pada jenis *fuel cell* lainnya, melainkan membrane polimer yang lebih mudah didapatkan secara komersial. Dewasa ini, penggunaan *fuel cell* tipe ini sudah cukup luas digunakan, mulai dari mobil hingga telepon seluler.

Reaksi yang dapat terjadi:



**Gambar 2.7 Skema Kerja PEFC atau PEM**

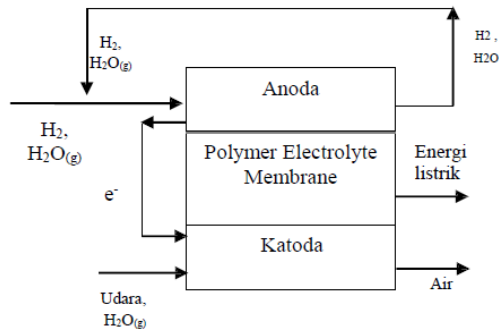
Sumber: U.S. Department of Energy (2002)

### 2.6.3 Perancangan Fuel Cell

*Stack fuel cell* atau rak-rak *fuel cell* terdiri dari dua elektroda, yaitu anoda dan katoda. Setiap elektroda dilapisi dengan *platinum-based catalyst*. Keduanya dipisahkan oleh suatu media, salah satu media yang dapat digunakan adalah *Polymer Electrolyte Membrane*. Hidrogen (sebagai bahan bakar) bertekanan

dilewatkan ke anoda, oksigen (sebagai oksidan) diambil dari udara dengan menggunakan kompresor yang tersedia dialirkan ke katoda. *Stack fuel cell* ini berguna untuk mereaksikan hidrogen dengan oksigen untuk menghasilkan arus listrik. Rancangan proses sistem menggunakan hidrogen langsung dan oksigen dari udara sebagai reaktan diperlihatkan pada Gambar 2.4. Sel tunggal atau *stack fuel cell* menggunakan reaktan berupa hidrogen murni dan mengalir masuk ke dalam sisi anoda. Sedangkan gas reaktan lainnya adalah udara sebagai sumber oksigen yang mengalir masuk ke dalam sisi katoda.

Pada sisi anoda terjadi perpindahan uap air yakni uap air bersama dengan proton berpindah melewati membran polimer elektrolit dari anoda ke katoda. Pada sisi katoda udara yang mengandung uap air juga mengalir masuk, dan terjadi reaksi kimia yang menghasilkan arus listrik, panas dan uap air. Jika konsentrasi uap air pada sisi katoda lebih besar daripada konsentrasi uap air di sisi anoda, maka berlaku resapan balik uap air dari sisi katoda ke sisi anoda.



**Gambar 2.8 Diagram Rancangan Sel Tunggal *Fuel Cell***

Sumber: Mulyazmi (2016)

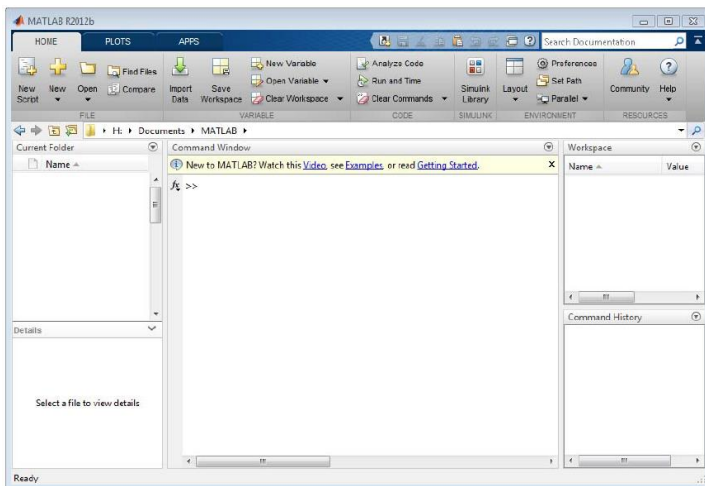
## 2.7 Simulasi Konversi Energi

### 2.7.1 Program MATLAB

MATLAB merupakan singkatan dari *Matrix Laboratory* yang berarti Bahasa pemrograman level tinggi (semakin tinggi level bahasa pemrograman maka semakin mudah cara

menggunakannya) dengan kinerja tinggi untuk komputasi masalah teknik. MATLAB mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam sebuah lingkungan tunggal. MATLAB memberikan sistem interaktif yang menggunakan konsep *array/matrix* sebagai variabel elemennya tanpa membutuhkan pendeklarasian *array* dengan hasil berupa *Graphic User Interface* (GUI) (Tjolleng, 2017).

Kegunaan umum dari MATLAB diantaranya untuk Matematika dan Komputasi, Pengembangan Algoritma, Akuisisi Data, Pemodelan dan Simulasi, Pembuatan Prototipe, Analisis Data, Eksplorasi, Visualisasi, dan Pengembangan Aplikasi. MATLAB juga memiliki fungsi toolbox yang memungkinkan pengguna untuk belajar dan menerapkan teknologi khusus seperti pemrosesan sinyal, sistem kontrol, jaringan saraf, logika fuzzy, simulasi, dan banyak teknologi lainnya (Arhami dan Desiani, 2005).



**Gambar 2.9 Tampilan Awal Program MATLAB R2013a**

Sumber: MathWorks (2013)

Gambar 2.8 tersebut merupakan tampilan awal yang muncul ketika program MATLAB dibuka. Dalam melakukan pemrograman dengan menggunakan program ini, terdapat beberapa cara yang dapat digunakan, antara lain:

1. Menggunakan Command Window.
2. Menggunakan M-File

## 2.7.2 Persamaan Elektrokimia dalam Simulasi

Kinerja dari fuel cell dipengaruhi oleh beberapa variabel yaitu temperatur, tekanan, gas, komposisi satuan reaktan dan faktor lain (kemurnian dan umur sel). Energi listrik bersih didapatkan dari *fuel cell* setelah mempertimbangkan beberapa kerugian *irreversible* dalam aplikasi *fuel cell*. Kerugian (*loses*), yang sering disebut polarisasi (*polarization*) ini berasal utamanya dari tiga sumber, yaitu polarisasi aktivasi, polarisasi *ohmic*, dan polarisasi konsentrasi (U.S. Department of Energy, 2000). Tegangan hasil fuel cell dapat di definisikan dengan persamaan:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohmic} - V_{Mt} \quad 2.3$$

Dimana:

$V_{FC}$  = tegangan keluaran FC (V)

$E_{Nernst}$  = tegangan Nernst/tegangan *open circuit* (V)

$V_{Act}$  = tegangan aktivasi (disaat *activation*

*polarization*) (V)

$V_{Ohmic}$  = tegangan Ohmic (disaat *Ohmic polarization*) (V)

$V_{Mt}$  = tegangan akibat perpindahan (*Mass transport losses*) (V)

### i. Persamaan Nernst

Farooque dan Hans (2001) menjelaskan bahwa tegangan reversibel dari cell ( $E_{Nernst}$ ) ialah tegangan maksimum dari sel yang dihasilkan pada temperatur dan tekanan tertentu. Pada keadaan tersebut, *fuel cell* bebas dari beban. Persamaan ini berhubungan dengan tekanan dan konsentrasi reaktan (hidrogen dan oksigen) yang mengakibatkan adanya energi. Persamaan Nernst juga bergantung pada bahan bakar yang digunakan. Menurut U.S. Department of Energy (2000), persamaan Nernst untuk *fuel cell* dengan bahan bakar  $H_2/O_2$  adalah:

$$E_{nernst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \times (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad 2.4$$

Dimana:

$E_{nernst}$  = Tegangan Nernst (V)

$E^0$  = Tegangan ideal (V)

R = Konstanta gas (0,08205 L atm/K mol)

T = Temperature (K)

- F = Konstanta Faraday (96,485 C/mol)
- $P_{H_2O}$  = Tekanan air (atm)
- $P_{H_2}$  = Tekanan parsial hidrogen (atm)
- $P_{O_2}$  = Tekanan parsial oksigen (atm)

Glass (1999) dalam *U.S. Department of Energy* (2000) menjelaskan tegangan ideal *fuel cell* dengan bahan bakar  $H_2/O_2$  ( $E^0$ ) adalah 1.229 Volt dengan produk air dalam bentuk cairan. Standar potensial atau tegangan juga dapat dihitung dengan perubahan energi bebas Gibbs (*Gibbs free energy*) untuk reaksi hidrogen dan oksigen. Energi bebas Gibbs mengalami peningkatan seiring dengan penurunan temperatur *fuel cell*. Hal ini proporsional dengan perubahan tegangan Nernst terhadap penurunan temperatur *fuel cell*. Kashyap (2004) dalam Kuncoro (2008) menjelaskan bahwa prosedur untuk menghitung tekanan yang terpisah melibatkan pemeriksaan 3 perbedaan fenomena perpindahan di elektroda yaitu:

- Antara saluran aliran gas dan poros elektroda
- Antara gas phase di elektroda dan sejumlah lapisan air yang mungkin menutupi sisi katalis.
- Antara lapisan air dan permukaan katalis.

Efektifitas tekanan parsial disetiap permukaan dihitung dan nilainya dimanfaatkan untuk mencari tekanan parsial di bagian lain. Tekanan parsial pada elektroda dicari dengan secara empiris maupun berdasarkan pada hasil penelitian. Perhitungan tekanan secara empiris dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{H_2O} = 10^{-X} \quad \text{2.5}$$

$$X = 2.1974 + 0.02953T_c - 9.1837 \times 10^{-5}T_c^2 + 1.4454 \times 10^{-7}T_c^3 \quad \text{2.6}$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{udara}}{\exp\left(\frac{4.192}{T_c^{1.334}}\right)} - P_{H_2O} \quad \text{2.7}$$

$$P_{H_2} = \frac{0.5 P_{udara}}{\exp\left(\frac{1653}{T_c^{1.334}}\right)} - P_{H_2O} \quad \text{2.8}$$

Dimana:

- $P_{H_2O}$  = Tekanan air (atm)
- $P_{H_2}$  = Tekanan parsial hidrogen (atm)
- $P_{O_2}$  = Tekanan parsial oksigen (atm)
- $T_c$  = Temperatur (C)
- $i$  = Kerapatan arus (mA/cm<sup>2</sup>)
- T = Temperatur (K)



ii. Polarisasi Aktivasi (*Activation Polarization*)

Poliarisasi aktivasi berhubungan langsung dengan laju reaksi elektrokimia pada permukaan kedua elektroda. Polarisasi atau kehilangan ini seringkali ditunjukkan dengan *Tafel Plot*, yaitu grafik polarisasi potensial atau tegangan dalam Volt dibandingkan dengan kerapatan arus pada sel dalam A/cm<sup>2</sup>. Pada dasarnya kerapatan arus menunjukkan kecepatan reaksi (jumlah elektron per detik, dibagi dengan permukaan dari elektrolit). Tegangan tersebut dapat dikalkulasikan dengan persamaan berikut:

$$V_{act} = \frac{RT}{2F\alpha} \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad 2.9$$

Dimana:

- $V_{act}$  = Tegangan Aktivasi (Volt)
- $i$  = Kerapatan arus (mA/cm<sup>2</sup>)
- $i_0$  = Pertukaran kerapatan arus (mA/cm<sup>2</sup>)
- $R$  = Konstanta Gas (L atm/mol K)
- $F$  = Konstanta Faraday
- $T$  = Suhu (K)

iii. Polarisasi *Ohmic* (*Ohmic Loses*)

Polarisasi *Ohmic* ialah tegangan yang hilang akibat adanya hambatan ketika ion berpindah tempat. Hambatan tersebut terjadi pada aliran ion dan elektron saat melalui material elektroda ataupun membran. apat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{ohm} = -i \cdot R_{internal} \quad 2.10$$

Dimana:

- $V_{ohm}$  = Tegangan Ohmic (Volt)
- $i$  = Kerapatan arus (mA/cm<sup>2</sup>)
- $R$  = Hambatan internal ( $\Omega$ )

Menurut Kashyap (2004) dalam Kuncoro (2008), nilai dari R internal memiliki besar yaitu 0.191 sampai 0.275. Hambatan membran berkurang sebanding dengan berkurangnya ketebalan. Menurut percobaan dari Xuezhong Du (2001) didapatkan bahwa pada membran komersial dipasaran bahwa didapatkan spesifikasi  $i = 0.01A/cm^2$ .

iv. Polarisasi Konsentrasi (*Mass Transport Loses*)

Polarisasi konsentrasi ini muncul sebagai akibat dari konsumsi reaktan pada elektroda oleh reaksi elektrokimia. Terdapat kehilangan potensial karena adanya ketidakmampuan material untuk mempertahankan konsentrasinya. Sehingga terbentuk gradien konsentrasi. Bertujuan untuk mengurangi

konsentrasi dari oksigen dan hidrogen di daerah elektroda saat beroperasi. Kerugian ini dipengaruhi oleh kondisi operasi (temperatur cell, tekanan gas, dan lain-lain), bentuk susunan membrane dan elektroda, dan desain cell. Menurut U.S Departement of Energy (2000), polarisasi konsentrasi dapat diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$V_{MT} = \alpha_1 i^K \ln(1 - \beta i) \quad 2.11$$

Dimana:

- $V_{MT}$  = Tegangan (Volt)
- $\beta$  = Limit kerapatan arus
- $\alpha_1$  = Konstanta tambahan
- $i$  = Kerapatan arus (mA/cm<sup>2</sup>)
- $K$  = Konstanta *mass transport*

v. Produksi Daya dan Energi Listrik

Daya dan energi listrik yang dihasilkan oleh *fuel cell* sangat bergantung pada debit bahan bakar yang diberikan pada sistem tersebut. Saeed dan Warkozek (2015) dan Kabza (2016) menyatakan bahwa secara umum pemanfaatan hidrogen pada *fuel cell* dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$U_{H_2} = 1.047 \times 10^{-8} \times \frac{P}{V_{FC}} \quad [Kg/jam] \quad 2.12$$

Dimana:

- $U_{H_2}$  = Massa H<sub>2</sub> yang digunakan
- $V_{FC}$  = Tegangan *Fuel Cell* (V)
- $P$  = Daya *Fuel Cell* (W)

Sehingga volume yang didapatkan dari proses elektrolisis harus terlebih dahulu dikonversikan dalam bentuk massa dengan persamaan densitas sederhana. Densitas yang digunakan merupakan densitas hidrogen yang spesifik pada suhu yang sama dengan suhu operasional reaktor.

$$M = \rho \times V \quad 2.13$$

Setelah didapatkan massa hidrogennya, maka dilakukan perhitungan daya dengan menggunakan Persamaan 2.13.

Energi listrik yang dihasilkan oleh suatu pembangkit bergantung pada periode operasional pembangkit tersebut. Periode ini berkaitan dengan periode masukan bahan bakar pembangkit. Sehingga energi listrik dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$E_{FC} = P \times t \quad 2.14$$

vi. Panas yang Dihasilkan

Total panas yang dihasilkan pembangkit yaitu  $Q_{cell}$  (W) untuk tiap  $n$  unit tumpukan fuel cell adalah berbeda antara total daya yang dihasilkan saat pada kondisi ideal (tidak rugi-rugi) dan daya yang dihasilkan saat kenyataan (operasi) karena ada rugi-rugi. Dan dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$Q_{cell} = nI (HHV - V_{FC}) \quad 2.15$$

Dimana:

$Q_{cell}$  = Panas yang dihasilkan (W)

$n$  = jumlah rak *fuel cell*

$I$  = arus yang keluar dari *fuel cell* (A)

$V_{FC}$  = Tegangan *Fuel Cell* (V)

HHV = *Higher Heating Value* (1,48 V)

vii. Produksi Air

Menurut Saeed dan Warkozek (2015), produksi air pada sistem *fuel cell* berkaitan dengan kesetaraan reaksi dalamnya. Air yang dihasilkan oleh sistem ini berupa uap yang disebabkan oleh ikatan antara hidrogen pada anoda dan oksigen pada katoda yang bertemu dalam membrane.

Produksi air dalam kg/jam dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Produksi air} \left( \frac{L}{jam} \right) = \frac{9,328 \cdot x \cdot 10^{-8} \cdot x P}{3600 \cdot x V_{FC} \cdot x \rho} \quad 2.16$$

Dimana:

$V_{FC}$  = Tegangan *Fuel Cell* (V)

$P$  = Daya *Fuel Cell* (W)

$\rho_{air}$  = Densitas air (1 kg/L)

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Umum**

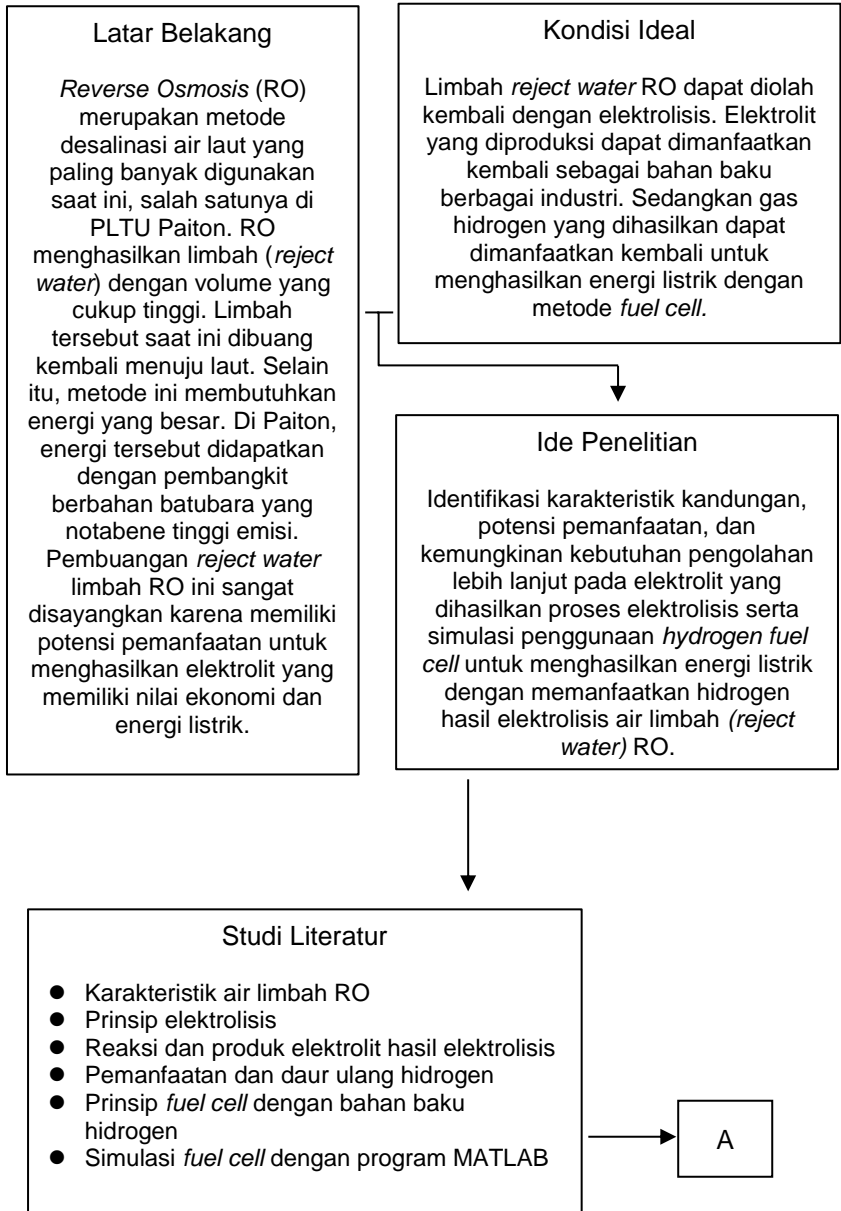
Pada penelitian ini dilakukan analisis produksi hidrogen dan karakteristik elektrolit yang diproduksi oleh proses elektrolisis. Kandungan elektrolit dianalisis lebih lanjut mengenai potensi pemanfaatan serta kebutuhan pengolahan lebih lanjut apabila diperlukan. Sedangkan gas hidrogen yang dihasilkan akan digunakan untuk melakukan analisis produksi tegangan listrik yang dihasilkan oleh simulasi *fuel cell* menggunakan program MATLAB. Penelitian ini dilakukan terhadap variasi jenis sampel dan tegangan yang digunakan pada proses elektrolisis. Variasi yang digunakan pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan kandungan elektrolit, besarnya produksi volume (ml) gas hidrogen, dan besarnya energi listrik yang dihasilkan proses elektrolisis dengan keadaan sesuai perlakuan variabel dan pada simulasi fuel cell berdasarkan volume gas tersebut.

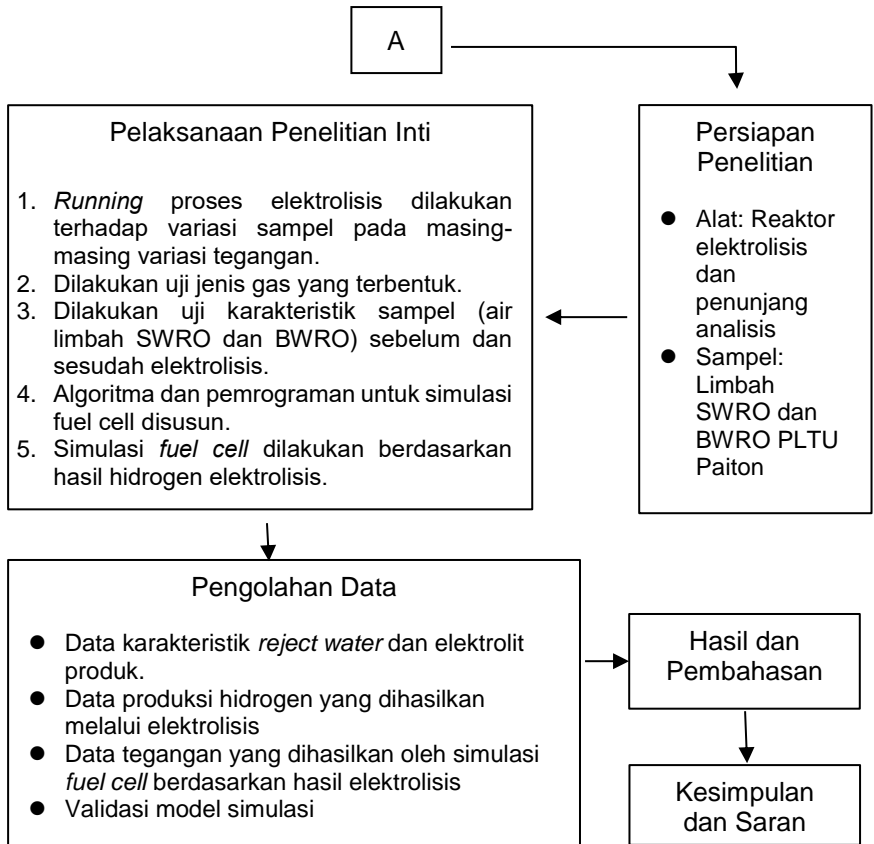
#### **3.2 Kerangka Penelitian**

Kerangka penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui langkah-langkah penelitian sesuai dengan kegiatan pelaksanaan pada Tugas Akhir. Kerangka penelitian disusun dengan tujuan:

1. Langkah awal tahapan penelitian agar pelaksanaan penulisan laporan Tugas Akhir menjadi sistematis
2. Memudahkan hal-hal pelaksanaan penelitian Tugas Akhir yang berkaitan untuk mencapai tujuan penelitian.
3. Menghindari kesalahan penelitian maupun penulisan Laporan Tugas Akhir.

Kerangka penelitian yang telah disusun terdapat pada Gambar 3.1.





**Gambar 3.1 Kerangka Penelitian**

### 3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian merupakan langkah kerja selama proses penelitian. Langkah-langkah yang akan dilakukan ini harus direncanakan untuk mengeliminasi kemungkinan kurangnya data ataupun kesalahan dalam penelitian.

### 3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan pada penelitian ini dibutuhkan dari awal hingga akhir penelitian untuk memperoleh dasar teori yang jelas dan dapat dipertanggungjawabkan. Penggunaan literatur yang jelas dan tepat dapat menunjang jalannya penelitian dan semakin akuratnya hasil yang didapatkan. Sumber literatur yang digunakan dalam penelitian ini meliputi buku-buku, jurnal penelitian baik internasional maupun nasional yang diakses di internet dan beberapa penelitian pendahuluan. Literatur yang digunakan disesuaikan dengan penelitian yang dibahas dan perlu diperhatikan mengenai bahasan dari beberapa literatur yang akan digunakan. Keterbaharuan dari sumber literatur harus tetap diperhatikan supaya memperoleh dasar teori yang *update* dan tidak ketinggalan. Beberapa sumber literatur yang lama atau sudah terdahulu juga tetap harus dijadikan pedoman sebagai bahan perbandingan dengan beberapa literatur yang baru.

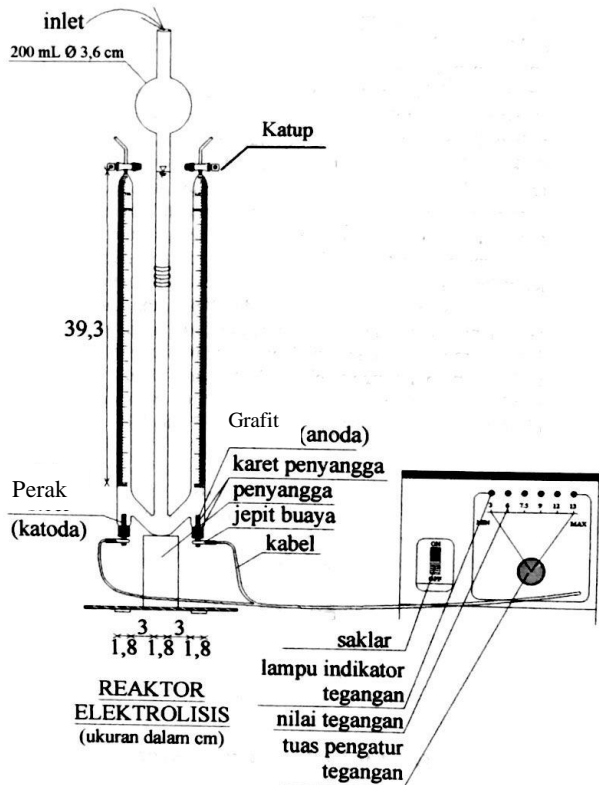
### 3.3.2 Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian mencakup kegiatan-kegiatan yang harus dilakukan sebelum melaksanakan penelitian utama. Persiapan ini mencakup perakitan reaktor, persisapan alat-alat penunjang, dan pengambilan sampel di PLTU Paiton Unit 9.

#### 1. Reaktor elektrolisis

Reaktor merupakan tempat terjadinya proses elektrolisis untuk menghasilkan hidrogen. Reaktor elektrolisis yang digunakan adalah *Hofmann Electrolysis Apparatus* yang berbentuk seperti trisula. Bentuk ini ditujukan agar gas dan elektrolit yang terbentuk pada tiap – tiap elektroda tidak tercampur. Reaktor ini berbahan gelas yang bersifat tidak reaktif terhadap elektrolit dan gas yang dihasilkan oleh proses ini. Pada bagian atas reaktor terdapat katup yang berbahan teflon untuk menahan agar gas yang terbentuk tidak lolos dari reaktor dan untuk mengeluarkan gas. Elektroda diletakkan pada bagian bawah reaktor ini. Elektroda ini dikaitkan pada tutup reaktor dan direkatkan sehingga reaktor tidak bocor. Sketsa reaktor elektrolisis dapat dilihat pada Gambar 3.2.





**Gambar 3.2 Sketsa Reaktor Elektrolisis**

Dengan menimbang sifat, harga, dan ketersediaan elektroda, dalam penelitian ini elektroda yang digunakan adalah Perak (Ag) pada katoda dan Grafit (C) pada anoda dengan ukuran yang sama, yaitu dengan diameter 1 cm dan panjang 10 cm.

Reaktor elektrolisis tersebut dirakit dengan urutan:

- a. Persiapan reaktor utama  
 Persiapan yang dilakukan adalah meletakkan reaktor pada statif agar stabil dan mudah dalam

pemasangan elektroda dan pengaliran listrik ke reaktor. Oleh karena itu, reaktor ini diletakan pada statif jarak 7 cm dari dasar statif.

- b. Pemasangan elektroda pada reaktor elektrolisis  
Elektroda yang berbentuk silinder dipasang di bagian dasar reaktor dengan menggunakan penutup. Penutup tersebut direkatkan dengan menggunakan lem dan isolasi pipa. Isolasi pipa melilit seluruh permukaan penutup reaktor untuk mencegah kebocoran pada tempat pemasangan elektroda. Tebal isolasi pipa yang digunakan disesuaikan dengan kondisi kedap reaktor setelah rangkaian elektroda disisipkan ke dalam lubang dibagian bawah reaktor.
- c. Uji kebocoran rangkaian reaktor  
Sebelum memulai penelitian, dilakukan uji kebocoran terlebih dahulu. Uji ini dapat memastikan reaktor dapat bekerja dengan baik, sehingga data yang didapatkan akan lebih valid. Uji kebocoran dilakukan dengan cara menuangkan air kran dan menunggu selama satu menit hingga dapat dipastikan tidak ada kebocoran pada reaktor.

## 2. Persiapan alat penunjang

### a. Adaptor

Adaptor digunakan untuk mengubah aliran listrik bolak-balik dari sumber listrik menjadi searah. Hal ini dilakukan karena pada sel elektrolisis diperlukan aliran listrik searah. Adaptor yang digunakan memiliki rentang tegangan sebesar 3 volt; 6 volt; 7,5 volt; 9 volt; 12 volt dan 13,8 volt dengan kuat arus maksimal 6 ampere. Adaptor ini digunakan karena memiliki kuat arus maksimum yang lebih besar bila dibandingkan dengan adaptor lainnya. Selain itu, tegangan pada adaptor sesuai dengan variasi tegangan pada penelitian ini (6 volt, 9 volt, dan 13,8 volt).

- b. Statif.  
Statif berfungsi sebagai penyangga reaktor elektrolisis. Statif terbuat dari besi dengan pelindung karet pada penjepitnya. Karet tersebut berfungsi sebagai penahan agar reaktor dan gelas ukur tetap pada tempatnya.
  - c. Stopwatch  
Stopwatch digunakan untuk menghitung waktu yang digunakan untuk menentukan waktu elektrolisis. Selain itu, produksi gas yang dihasilkan nantinya akan diukur berdasarkan satuan waktu (30-60 menit). Sehingga stopwatch sangat dibutuhkan pada penelitian ini agar hasil yang didapatkan lebih akurat.
3. Pengambilan sampel  
Sampel air limbah *Reverse Osmosis* (RO) atau biasa disebut *reject water* diambil di PLTU Paiton Unit 9. Pada industri ini terdapat dua jenis RO, yaitu SWRO dan BWRO, sehingga terdapat dua jenis sampel. Menurut prosedur yang telah ditentukan PLTU Paiton, *sampling* harus dilakukan oleh operator. Pihak luar yang membutuhkan sampel hanya boleh mengamati proses pengambilan sampel.

### 3.3.3 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan variasi variabel dari tegangan listrik dan jenis sampel dengan rincian sebagai berikut:

1. Jenis Sampel

Penelitian ini akan menggunakan dua jenis sampel air limbah atau *reject water reverse osmosis* dari PLTU Paiton. Kedua sampel tersebut berasal dari dua unit RO yang berbeda, yaitu SWRO dan BWRO. *Feed water* SWRO adalah air laut, sedangkan *feed water* BWRO adalah *permeate water* dari unit SWRO. Sehingga secara teori, konsentrasi kandungan sampel SWRO lebih tinggi. Berdasarkan uji karakteristik awal, nilai TDS sampel *reject water* SWRO dan BWRO adalah sekitar 26.400 mg/L dan 1.210 mg/L.

## 2. Tegangan Listrik

Disediakan dua buah elektroda sebagai anoda (+) dan katoda (-) yang saling berhubungan dalam satu bejana. Untuk menghasilkan perpindahan elektron maka diperlukan bantuan listrik menggunakan adaptor. Tegangan yang digunakan antara lain 6V; 9V; dan 13,8V. Adanya perbedaan tegangan maka akan didapatkan tegangan optimum untuk memproduksi gas.

Kedua variabel (1) dan (2) dilakukan pada pasangan-pasangan variabel sebagai dasar perlakuan untuk setiap proses penelitian. Pasangan variabel dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1 Perlakuan untuk Setiap Variasi Variabel**

Jenis Sampel	Tegangan		
	6 Volt	9 Volt	13,8 Volt
<i>Reject</i> SWRO	SWRO; 6 V	SWRO; 9 V	SWRO; 13,8 V
<i>Reject</i> BWRO	BWRO; 6 V	BWRO; 9 V	BWRO; 13,8 V

### 3.3.4 Pelaksanaan Penelitian Inti

Pada tahap penelitian ini, dilakukan penyusunan algoritma untuk simulasi *fuel cell*, *running* proses elektrolisis, uji karakteristik sampel, serta simulasi *fuel cell*.

#### 1. *Running* proses elektrolisis

Proses elektrolisis ini menggunakan *Hofmann Electrolysis Apparatus* yang merupakan reaktor elektrolisis paling optimum untuk analisis pembentukan gas, dimana dimensinya telah ditentukan oleh alat yang dijual secara komersil. Sampel dimasukkan ke dalam reaktor dari mulut tabung tengah atau bagian inlet dengan katup terbuka untuk memastikan tidak ada udara yang terperangkap. Pengisian reaktor tersebut dilakukan hingga ketinggian muka air sejajar dengan kedua katup pada tabung kanan dan kiri. Kemudian katup tersebut ditutup untuk mencegah lepasnya gelembung gas dihasilkan dari proses elektrolisis. Proses elektrolisis dilakukan selama 12 jam. Setiap 30-60 menit diukur volume gas hidrogen yang terbentuk pada katoda dengan melihat garis volume batas ruang

kosong pada elektroda yang tertera pada reaktor elektrolisis. Kemudian katup dibuka untuk mengeluarkan gas dan ditutup kembali dengan cepat.

Dilakukan pula pembuktian jenis gas yang terbentuk pada masing-masing elektroda dengan menggunakan tabung reaksi dan sebatang lidi. Tabung reaksi akan digunakan untuk memerangkap gas yang terbentuk pada kedua elektroda. Ujung lidi dibakar namun api dinyalakan sehingga hanya menghasilkan nyala api. Kemudian ujung lidi tersebut dimasukkan kedalam tabung reaksi. Jenis nyala api yang terbentuk akan menunjukkan jenis gas yang terbentuk pada elektroda tersebut.

Selama proses elektrolisis, elektroda akan dialiri listrik (dengan tegangan listrik yang divariasikan menggunakan adaptor dengan variasi tegangan 6V, 9V dan 13,8V). Penghubungan tersebut dilakukan dengan cara menjepitkan penghubung adaptor pada bagian elektroda yang muncul di luar reaktor bagian bawah. Perlakuan ini berlaku untuk kedua variasi jenis sampel (sampel SWRO dan BWRO).

## 2. Uji Karakteristik Sampel

Uji karakteristik dilakukan untuk mengetahui perubahan kandungan sampel sebelum dan setelah dilakukan elektrolisis. Perubahan ini dapat menunjukkan seberapa besar pengaruh pengolahan elektrolisis terhadap limbah RO serta hubungannya terhadap karakteristik sampel dan tegangan yang digunakan. Parameter yang akan diuji adalah  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{OCl}^-$ , TDS, dan pH. Parameter-parameter tersebut dipilih karena merupakan parameter dengan kandungan terbesar dalam air limbah RO, yaitu mencapai 99% (Ahmed *et al.*, 2001 dan Badea, 2007).

## 3. Simulasi *Fuel Cell*

Sebelum dilakukan simulasi, terlebih dahulu disusun algoritma yang berisi perhitungan sistematis proses

konversi hidrogen menjadi tegangan listrik. Untuk memudahkan pembuatan algoritma pemrograman pada simulasi ini, maka akan lebih mudah jika menggunakan diagram alur sebagai prioritas awal. Kemudian membuat GUI (*Graphical User Interfaces*) beserta pada pemrograman agar hasilnya dapat langsung diuji dan diamati selama proses pengerjaannya. Selain itu, pengguna selain pembuat program akan lebih mudah menggunakan program ini jika digunakan tampilan yang menyenangkan, pilihan data dan keterangan penggunaan (*user friendly*). Dan pada simulasi ini digunakan 2 sistem dalam Matlab tersebut yaitu M-file editor (sistem untuk melakukan pemrograman) dan GUIDE (sistem untuk membuat GUI). Lalu keduanya dipadukan sehingga menjadi program simulasi seperti yang diinginkan. Penentuan kinerjanya ditunjukkan oleh nilai volt yang dihasilkan. Simulasi dilakukan terhadap variasi volume reaktan (hidrogen), dengan seluruh kondisi pada operasional *fuel cell* dijaga konstan atau tetap. Nilai-nilai konstanta yang dibutuhkan berdasarkan pada penelitian terdahulu yang menggunakan jenis *fuel cell* yang sama. Algoritma untuk perhitungan empiris didasarkan pada persamaan 2.4 – 2.16. Dalam penyusunan algoritma ini terdapat beberapa asumsi yang harus digunakan, antara lain:

- a. Membran diasumsikan dalam keadaan lembab dan mampu menghantarkan ion dengan baik.
- b. Tekanan reaktan awal dianggap seragam (berdasarkan perhitungan empiris sesuai dengan volume hasil elektrolisis)
- c. Sel yang digunakan berjumlah satu (*Single Stack Fuel Cell*).
- d. Beberapa konstanta dan nilai tipikal yang digunakan pada simulasi berdasarkan pada penelitian terdahulu oleh Kashyap (2004) dalam Kuncoro (2008) terdapat pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2 Nilai Konstanta dan Hasil Penelitian**

Konstanta	Nilai	Konstanta	Nilai
$i_0$	$10^{-6,912} A/cm^2$	K	1,1
r	$0,191 \Omega/cm^2$	b	0,06 V
$\alpha$	0,5	$\beta$	$1,148 cm^2/A$
$\alpha_1$	0,085	$\mu_f$	0,8014

Sumber: Kashyap, 2004 dalam Kuncoro, 2008

*Running* pemodelan matematik yang telah dibangun pada rancangan sistem *fuel cell* dilakukan dengan menggunakan software GUI MATLAB. Data yang didapatkan nantinya berupa tegangan yang dihasilkan oleh simulasi tersebut.

### 3.3.5 Pengolahan Data

Data yang diolah adalah data primer yang di dapatkan selama tahap penelitian inti. Data karakteristik elektrolit yang dihasilkan oleh proses elektrolisis dianalisis dengan menggunakan *bar graph* stokiometri, sehingga dapat diketahui ikatan-ikatan yang terjadi pada senyawa yang ada dalam elektrolit. Data mengenai volume gas hidrogen yang dihasilkan pada katoda diolah dengan cara dikelompokkan sesuai dengan variasi yang dilakukan. Data yang telah dikelompokkan tersebut kemudian ditabulasi dan dibentuk ke dalam grafik untuk memudahkan analisis data. Data tegangan yang dihasilkan pada simulasi *fuel cell* diolah dalam bentuk tabel untuk dianalisis kondisi dengan produksi tegangan tertinggi.

### 3.3.6 Analisis Data dan Pembahasan

Analisis data dilakukan untuk menjawab tujuan penelitian. Hasil pengolahan data yang telah dilakukan kemudian dianalisis efektivitasnya pada masing masing variasi yang ditentukan. Data yang dihasilkan oleh *bar graph* dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui potensi pemanfaatan serta kebutuhan pengolahan lebih lanjut apabila diperlukan. Selain itu dibuat *mass balance* pada keseluruhan sistem RO dan elektrolisis pada parameter TDS untuk melihat tren perubahan yang terjadi. Sedangkan data mengenai volume hidrogen dan tegangan yang dihasilkan dianalisis untuk mengetahui keadaan produksi optimal. Berdasarkan pada

keseluruhan analisis tersebut dibahas mengenai manfaatnya terhadap permasalahan limbah RO yang ada saat ini.

### **3.3.7 Kesimpulan dan Saran**

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan yang menyatakan ringkasan dari hasil penelitian. Saran diberikan untuk perbaikan penelitian dalam pelaksanaan penelitian lebih lanjut dan diberikan setelah didapatkan kesimpulan.



## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Penelitian Pendahuluan

Elektrolisis adalah proses penguraian suatu larutan yang disebut elektrolit karena adanya aliran arus listrik searah (*Direct Current/DC*). Terdapat berbagai penerapan prinsip elektrolisis pada upaya pengolahan air limbah, bergantung pada karakteristik limbah yang akan diolah dan tujuan pengolahannya.

Karakterisasi sampel air limbah *Reverse Osmosis* (RO) yang digunakan pada penelitian ini dilakukan sebelum proses penelitian dimulai. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perubahan-perubahan yang terjadi setelah proses elektrolisis.

**Tabel 4.1 Karakteristik Awal Air Limbah Reverse Osmosis**

Parameter	BWRO	SWRO
Na <sup>+</sup>	125 mg/L	7000 mg/L
Mg <sup>2+</sup>	32.57 mg/L	1765.71 mg/L
Ca <sup>+</sup>	0 mg/L	400 mg/L
K <sup>+</sup>	10 mg/L	1111 mg/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	56 mg/L	132 mg/L
Cl <sup>-</sup>	716 mg/L	17860 mg/L
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	17.19 mg/L	3223.38 mg/L
OH <sup>-</sup>	0 mg/L	0 mg/L
OCl <sup>-</sup>	0 mg/L	0 mg/L
TDS	1060 mg/L	26400 mg/L
Salinitas	1,19 psu	33,2 psu
pH	6.55	8.15

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium, 2018

Kedua sampel memiliki karakteristik yang sangat berbeda. Air limbah *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) memiliki konsentrasi yang lebih besar pada semua parameter dibandingkan

air limbah *Brackish Water Reverse Osmosis* (BWRO). Hal tersebut berkaitan dengan air baku yang digunakan oleh kedua sistem di PLTU Paiton. SWRO menggunakan air laut sebagai air baku sistem RO, sedangkan BWRO mengolah air yang dihasilkan oleh SWRO.

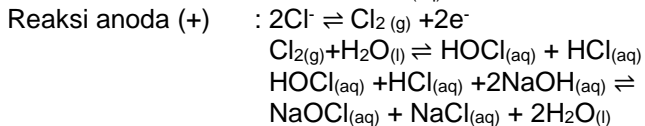
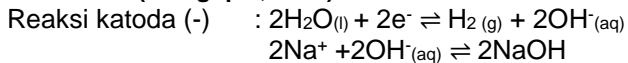
## 4.2 Operasi Proses Elektrolisis

Tilley (2013) menjelaskan bahwa proses kunci dalam elektrolisis adalah pertukaran atom dan ion dengan penghapusan atau penambahan elektron dari sirkuit eksternal. Produk elektrolisis yang dihasilkan dalam beberapa keadaan fisik yang berbeda dari elektrolit dan dapat dihilangkan dengan beberapa proses fisika.

Pada elektrolisis, elektroda merupakan salah satu faktor utama penentu efektivitas prosesnya. Elektroda akan dialiri dengan arus listrik searah sehingga menghasilkan gas. Elektroda yang digunakan berupa perak (katoda) dan karbon (anoda) dengan dimensi yang sama, yaitu diameter 1 cm dan panjang 10 cm. Persamaan kimia yang terjadi pada proses elektrolisis air salin secara umum adalah:

### Elektrolit Encer (Balagopal, 2006)

4.1

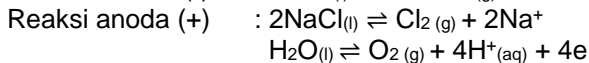
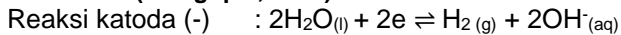


Reaksi total :

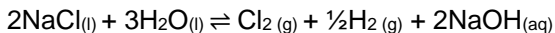


### Elektrolit Peekat (Balagopal, 2006)

4.2



Reaksi total :



Perubahan susunan kimia pada elektrolit yang dihasilkan terjadi seiring dengan proses elektrolisis. Ketika katoda dan anoda pada sistem tersebut diberi arus listrik, elektroda-elektroda

tersebut akan saling terhubung melalui elektrolit. Elektrolit berperan sebagai penghantar listrik yang menyebabkan terbentuknya kutub-kutub bermuatan pada masing-masing elektroda. Hal tersebut mengakibatkan adanya penguraian pada elektrolit, karena ion-ion didalamnya akan bergerak menuju kutub-kutubnya. Sebagai contoh, ketika atom hidrogen membentuk ion bermuatan positif ( $H^+$ ), maka ion tersebut akan bergerak menuju katoda yang bermuatan negatif.

Namun pembentukan gas pada proses tersebut membutuhkan kondisi tertentu. Pada katoda terjadi reduksi air, sedangkan pada anoda terjadi proses oksidasi. Berdasarkan pada persamaan tersebut, didapatkan potensial reduksi standar ( $E^0$ ) sebesar  $-2.06$  V. Nilai tersebut merupakan tegangan minimum yang dibutuhkan oleh elektrolit sehingga dapat mengalami proses reduksi dan oksidasi untuk menghasilkan gas. Sedangkan negatif menunjukkan reaksi tidak terjadi secara spontan.

Jenis reaktor yang digunakan juga harus dipilih secara selektif karena dapat mempengaruhi efektivitas elektrolisis. Berdasarkan pada karakteristik air limbah dan tujuan pengolahan pada penelitian ini, digunakan *Hoffmann Electrolysis Apparatus* sebagai reaktor pada penelitian ini. Reaktor tersebut dipilih karena dapat memaksimalkan pengukuran volume gas yang terbentuk dan dapat memisahkan ion-ion elektrolit yang terbentuk di katoda dan anoda. Rangkaian reaktor elektrolisis yang digunakan terdapat pada Gambar 4.1.

Penelitian ini meliputi analisis pembentukan gas di kedua elektroda dan perubahan ion-ion yang terbentuk pada dua jenis air limbah RO pada proses elektrolisis dilakukan selama 12 jam. Variasi yang digunakan adalah jenis sampel terhadap tegangan yang digunakan, yaitu 6V; 9V; dan 13,8V. Ringkasan data hasil proses elektrolisis disajikan pada Tabel 4.2.



**Gambar 4.1 Rangkaian Reaktor Elektrolisis**

**Tabel 4.2 Hasil Analisis Proses Elektrolisis secara Umum**

		TDS (mg/L)	Salinitas (psu)	pH	Produksi Gas (ml)
BWRO AWAL		1060	1.19	6.55	
BWRO, 6V	Cathode	1183	1.21	10.21	3.4
	Anode	1533	1.59	2.79	0.3
BWRO, 9V	Cathode	1222	1.28	10.75	20.8
	Anode	1767	1.85	2.51	1.1
BWRO, 13,8V	Cathode	1396	1.4	11.05	35
	Anode	2158	2.44	2.39	1.5
SWRO AWAL		26400	33.2	8.15	
SWRO, 6V	Cathode	31200	42	8.78	242.5
	Anode	32000	42.8	1.85	13.55
SWRO, 9V	Cathode	28700	38.2	9.3	428
	Anode	30100	40.5	2.59	87
SWRO, 13.8V	Cathode	28600	38.2	9.63	717.5
	Anode	29500	39.3	4.31	186.75

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium, 2018

Selama 12 jam periode *running*, elektrolisis membutuhkan energi listrik secara kontinyu. Kebutuhan energi listrik ini dapat dihitung dengan Persamaan 2.14 berdasarkan pengaturan voltase dan rata-rata arus listrik pada sistem. Data arus listrik terdapat pada Lampiran A Tabel 3-8. Hasil perhitungan kebutuhan energi listrik terdapat pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3 Kebutuhan Energi Listrik Elektrolisis**

	Arus (A)	Tegangan (V)	Periode (h)	Energi Listrik (Wh)
BWRO, 6V	8.21	6	12	590.95
BWRO, 9V	8.96	9	12	967.51
BWRO, 13,8V	9.09	13.8	12	1505.30
SWRO, 6V	7.97	6	12	573.96
SWRO, 9V	8.43	9	12	910.40
SWRO, 13.8V	8.57	13.8	12	1419.33

Sumber: Hasil Perhitungan

Pada masing-masing sampel air limbah, kenaikan tegangan yang digunakan diikuti oleh naiknya rata-rata arus listrik. Hal ini sesuai dengan Hukum Ohm, dimana tegangan berbanding lurus dengan arus dan resistansi. Sehingga pada nilai resistensi yang sama (sampel atau elektrolit yang sama), kenaikan tegangan akan menyebabkan kenaikan arus. Energi listrik yang dibutuhkan juga semakin besar, linear dengan kenaikan tegangan dan arus.

Gas yang diproduksi di masing-masing elektroda diidentifikasi jenisnya terlebih dahulu. Pada prosesnya, terbentuk gelembung-gelembung gas pada kedua elektroda. Gelembung tersebut kemudian naik ke puncak reaktor, terakumulasi, dan menjadi gas yang tertahan pada reaktor.

Identifikasi dilakukan dengan cara memasang tabung reaksi pada outlet gas. Kemudian lidi dengan ujung yang sudah dipanaskan dimasukkan kedalam tabung tersebut. Apabila terjadi letupan menunjukkan terperangkapnya gas hidrogen. Sedangkan apabila lidi menyala, maka gas oksigen terindikasi terperangkap pada tabung reaksi tersebut.

Identifikasi yang telah dilakukan membuktikan bahwa gas hidrogen terbentuk pada katoda, baik pada elektrolisis sampel SWRO maupun BWRO. Pada anoda sampel BWRO terbentuk gas oksigen, karena lidi terbakar saat dimasukkan pada tabung reaksi. Sedangkan pada anoda sampel SWRO tidak terindikasi pembentukan oksigen, karena saat lidi dimasukkan dalam tabung reaksi, nyala api langsung mati. Namun terdapat bau klor yang sangat menyengat dari tabung reaksi tersebut. Hal ini mengindikasikan gas yang terbentuk bukanlah oksigen, melainkan gas klor.

Hasil identifikasi gas tersebut merupakan indikasi awal perbedaan hipotesis awal dan hasil penelitian. Pada hipotesis awal, air limbah SWRO diklasifikasikan sebagai air dengan salinitas tinggi, sedangkan air limbah BWRO diklasifikasikan sebagai air salinitas rendah. Sehingga apabila merujuk pada penelitian Abdel-Aal (2010), maka secara teoritis produk gas yang akan dihasilkan oleh elektrolisis air limbah SWRO dan BWRO adalah gas hidrogen dan klor. Namun air limbah BWRO menghasilkan gas utama berupa hidrogen dan oksigen.

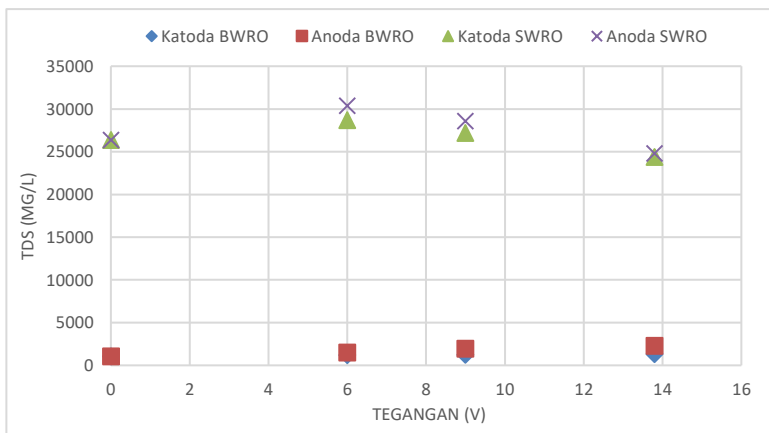
### **4.3 Elektrolit Hasil Proses Elektrolisis**

Elektrolisis dapat digunakan sebagai metode pengolahan air limbah karena prosesnya dapat mengubah kandungan ion pada air tersebut. Elektrolit yang dihasilkan cenderung membentuk suatu produk seperti garam, desinfektan, larutan basa, dan lain-lain sehingga tidak bisa langsung dibandingkan dengan bakumutu untuk mencari efisiensi pengolahannya. Perubahan kandungan yang terjadi tidak hanya secara keseluruhan proses. Masing-masing elektroda juga akan menghasilkan elektrolit dengan kandungan yang berbeda.

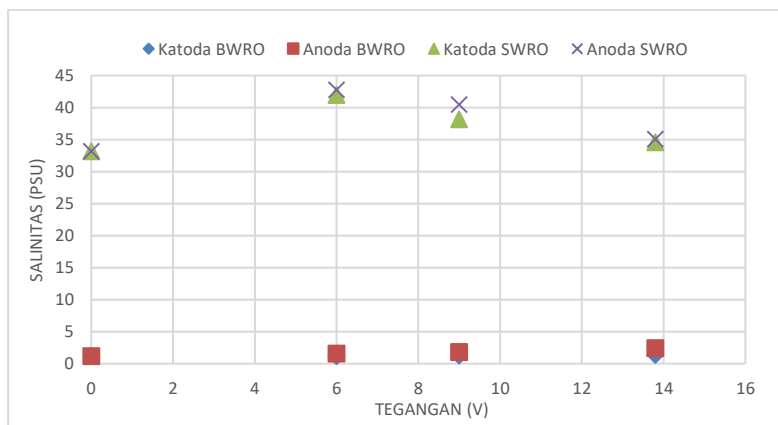
#### **4.3.1 Produk Elektrolit**

Parameter umum yang digunakan untuk melihat perubahan kandungan ion pada elektrolit adalah TDS, salinitas, dan pH. Selain parameter tersebut, dilakukan juga analisis terhadap kandungan ion pada sampel awal elektrolit dan hasil akhir elektrolisis. Hasil lengkap analisis laboratorium dari parameter-parameter tersebut terdapat pada Lampiran A Tabel 9.

Hasil analisis laboratorium untuk perubahan karakteristik umum elektrolit terdapat pada Tabel 4.2. Berdasarkan pada data tersebut, dibuat grafik perubahannya yang terdapat pada Gambar 4.2 – 4.4.



**Gambar 4.2 Perubahan TDS Elektrolit terhadap Tegangan**



**Gambar 4.3 Perubahan Salinitas Elektrolit terhadap Tegangan**

Hasil analisis tersebut menunjukkan adanya persamaan dalam tren perubahan TDS dan salinitas elektrolit. Persamaan tren

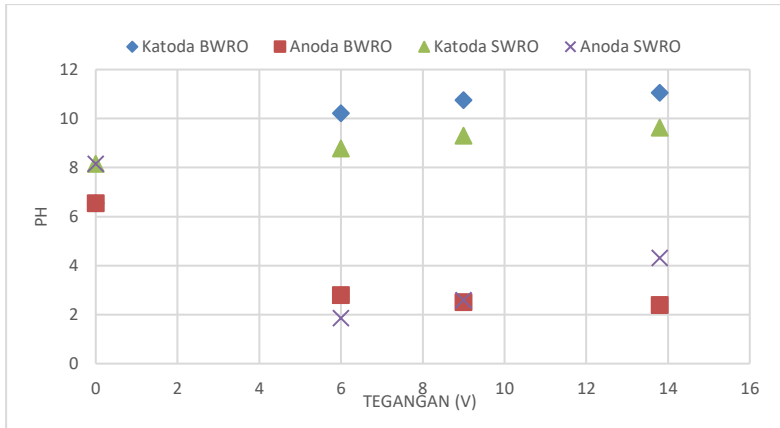
ini disebabkan karena TDS dan salinitas merupakan dua parameter yang berhubungan. Menurut Fondriest Environmental (2014), salinitas merupakan total konsentrasi seluruh garam terlarut dalam air, dimana terdapat berbagai garam terlarut yang berkontribusi pada tingkat salinitas air. Pada air laut, garam-garam dengan konsentrasi tertinggi adalah klorida, natrium, magnesium, sulfat, kalsium, kalium, dan bikarbonat. Sedangkan TDS merupakan total seluruh partikel ion terlarut dalam air yang ukurannya lebih kecil dari 0,0002 cm. Ion partikel tersebut termasuk garam pada salinitas dan zat-zat lainnya seperti zat organik terlarut.

Kecuali pada elektrolisis air limbah SWRO dengan tegangan 13,8V, terjadi kenaikan TDS dan salinitas jika dibandingkan dengan karakteristik awalnya. Abdel-Aal *et al.* (2010) menyatakan bahwa semakin besar tegangan yang digunakan pada elektrolisis, maka produksi hidrogen dan nilai TDS juga semakin besar. Hal ini berkaitan dengan kenaikan konduktivitas dan Hukum Ohm, dimana nilai konduktivitas berbanding terbalik dengan resistansi dan berbanding lurus dengan tegangan dan arus.

Namun pada elektrolisis air limbah SWRO dengan tegangan 13,8 V terjadi penurunan nilai TDS dan salinitas pada kedua elektroda. Hal ini dapat disebabkan oleh overpotensial yang terlalu tinggi pada proses elektrolisis. Sehingga banyak ion terlarut yang tereduksi atau teroksidasi secara lebih sempurna. Hal ini didukung dengan terbentuknya endapan yang melekat pada katoda setelah proses elektrolisis sampel ini berakhir. Endapan tersebut berwarna putih dan mulai terbentuk pada jam ketujuh proses elektrolisis.

Selain perubahan pada parameter TDS dan salinitas, pH sampel dan elektrolit juga diamati untuk melihat perubahannya. Grafik perubahan pH pada elektrolit terdapat pada Gambar 4.4. Berdasarkan pada grafik tersebut, terjadi kenaikan pH di katoda dan penurunan pH di anoda pada kedua sampel. Perubahan pH ini berkaitan dengan reaksi yang terjadi pada masing-masing elektroda sebagaimana terdapat pada Persamaan 4.1 dan 4.2.





**Gambar 4.4 Perubahan pH Elektrolit terhadap Tegangan**

Persamaan tersebut menunjukkan adanya reduksi air pada katoda yang menyebabkan terbentuknya gas hidrogen dan ion hidroksida. Ion hidroksida tersebut adalah penyebab kenaikan pH elektrolit pada katoda.

Sebaliknya, elektrolit yang terbentuk pada anoda mengalami penurunan pH. Pada elektrolisis air limbah BWRO, hal ini disebabkan oleh pembentukan ion hidrogen di elektrolit karena terjadinya oksidasi air. Sedangkan pada elektrolisis air limbah SWRO, air berikatan dengan klorida pada elektrolit yang menyebabkan terbentuknya asam klorida. Asam klorida tersebut mengakibatkan turunnya pH dari sampel awal.

Selanjutnya dilakukan analisis ionik pada produk elektrolit yang dihasilkan oleh elektrolisis dengan air limbah SWRO dan BWRO. Hasil analisis ion pada elektrolit diolah dengan menggunakan *bargraph milliequivalent per liter* atau diagram batang miliequivalen per liter untuk mengetahui kemungkinan pembentukan senyawa pada elektrolit. Sehingga harus dilakukan konversi dari satuan mg/L menjadi miliequivalen per liter (meq/L). Diagram batang disusun berdasarkan solubilitas ion-ion yang di analisis dan berat ekivalennya. Diagram batang untuk masing-masing elektroda dan variabel terdapat pada Gambar 4.5 dan 4.6.

SWRO 6V KATODA



SWRO 6V ANODA



SWRO 9V KATODA



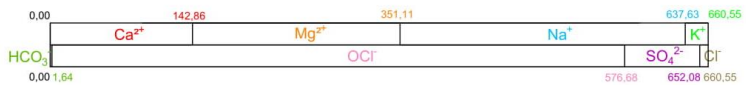
SWRO 9V ANODA



SWRO 13,8V KATODA

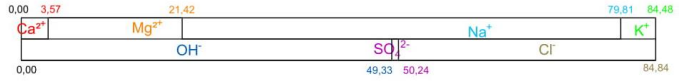


SWRO 13,8V ANODA

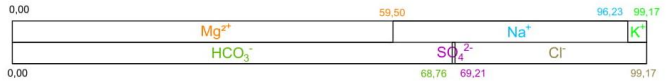


Gambar 4.5 Diagram Batang Ion Sampel SWRO

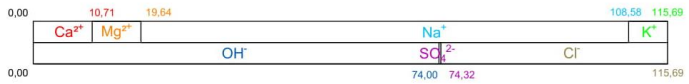
BWRO 6V KATODA



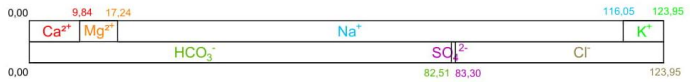
BWRO 6V ANODA



BWRO 9V KATODA



BWRO 9V ANODA



BWRO 13,8V KATODA



BWRO 13,8V ANODA



Gambar 4.6 Diagram Batang Ion Sampel BWRO

Masing-masing diagram batang di Gambar 4.5 dan 4.6 diolah untuk mendapatkan data jenis dan konsentrasi dari senyawa-senyawa yang terbentuk. Data pembentukan senyawa terdapat pada Lampiran A Tabel 10.

Berdasarkan data tersebut, senyawa yang terbentuk dengan konsentrasi terbesar pada elektrolisis sampel BWRO adalah NaCl,  $Mg(HCO_3)_2$ , NaOH, dan  $NaHCO_3$ . Sedangkan pada elektrolisis sampel SWRO, senyawa dengan konsentrasi terbesar adalah  $Ca(OCl)_2$ ,  $Mg(OCl)_2$ , dan NaOCl.

Pada hipotesis awal, air limbah SWRO yang merupakan konsentrat air laut diklasifikasikan sebagai elektrolit pekat (*brine water*), sedangkan air limbah BWRO yang merupakan konsentrat air payau diklasifikasikan setara dengan air laut.

Menurut Balagopal (2006) elektrolisis pada elektrolit dengan salinitas tinggi akan menghasilkan larutan basa. Sedangkan elektrolisis pada elektrolit dengan salinitas yang lebih rendah akan menghasilkan desinfektan berupa hipoklorit. Hal tersebut didukung oleh Abdel-Aal (2010) yang mengklasifikasikan larutan atau elektrolit menjadi tiga, yaitu air alkali, air laut, dan air salinitas tinggi atau *brine water*. Elektrolisis ketiga jenis air tersebut akan menghasilkan produk seperti tertera pada Tabel 2.4.

Namun berdasarkan pada hasil analisis ion produk elektrolisis, sampel BWRO yang diklasifikasikan sebagai elektrolit encer tidak membentuk hipoklorit sama sekali. Sedangkan pada sampel SWRO yang merupakan elektrolit pekat tidak terjadi pembentukan basa. Elektrolit yang terbentuk justru berupa hipoklorit.

Perbedaan hasil penelitian dengan teori ini disebabkan oleh perbedaan TDS sampel berdasarkan perhitungan dengan hasil analisis awalnya. Perhitungan TDS secara teoritis didasarkan pada Data Operasional SWRO dan BWRO PLTU Paiton Unit 9 Periode Desember 2017. Sedangkan sampel air limbah SWRO dan BWRO yang digunakan selama penelitian merupakan sampel air limbah yang diambil pada akhir Maret 2018.

Sampel air limbah SWRO yang merupakan konsentrat air laut, belum bisa dikategorikan pada *brine water*. Hal ini ditunjukkan dengan hasil elektrolisis sampelnya yang menghasilkan hipoklorit, bukan larutan basa. Sedangkan elektrolisis air limbah BWRO

menghasilkan elektrolit dengan berbagai kandungan ion, salah satunya adalah garam.

Lebih lanjut, Temeev (2006) menjelaskan bahwa produksi hidrogen sebagai produk utama elektrolisis dengan air baku air laut dapat terjadi dengan tiga kemungkinan:

- a. Elektrolisis untuk memproduksi hidrogen, oksigen, dan berbagai alkali;
- b. Elektrolisis untuk memproduksi hidrogen, oksigen, klorin, dan berbagai alkali;
- c. Elektrolisis untuk memproduksi hidrogen dan natrium hipoklorit (NaOCl).

Maka apabila merujuk pada penjelasan Temeev (2006) tersebut, elektrolisis SWRO mengalami proses ketiga. Sedangkan elektrolisis BWRO mengalami proses pertama.

Berbagai senyawa yang terbentuk pada elektrolit hasil elektrolisis air limbah BWRO dan SWRO masih memiliki nilai potensi ekonomi dan dapat dimanfaatkan kembali. Senyawa dengan konsentrasi terbesar pada masing-masing variabel terdapat pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

**Tabel 4.4 Pembentukan Senyawa pada Elektrolit Sampel BWRO**

	Jenis Ion	Konsentrasi (mg/L)
BWRO 6V		
Katoda	NaCl	1727.59
Anoda	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	4353.79
BWRO 9V		
Katoda	NaOH	2174.55
Anoda	NaHCO <sub>3</sub>	4406.15
BWRO 13.8V		
Katoda	NaOH	2899.62
Anoda	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	4143.20

**Tabel 4.5 Pembentukan Senyawa pada Elektrolit Sampel SWRO**

	Jenis Ion	Konsentrasi (mg/L)		
		SWRO 6V	SWRO 9V	SWRO 13.8V
Katoda	Ca(OCl) <sub>2</sub>	11612.47	13511.60	5797.57
	Mg(OCl) <sub>2</sub>	9925.21	14890.74	8273.90

	Jenis Ion	Konsentrasi (mg/L)		
		SWRO 6V	SWRO 9V	SWRO 13.8V
	NaOCl	10654.69	7277.83	13813.22
Anoda	Ca(OCl) <sub>2</sub>	15393.92	12786.46	12634.54
	Mg(OCl) <sub>2</sub>	14890.20	14885.03	11577.93
	NaOCl	6675.96	8128.47	8394.93

Pada sampel BWRO, senyawa dengan konsentrasi terbesar bervariasi pada masing-masing variabel tegangan. Hal ini dikarenakan masing-masing ion penyusun elektrolit pada sampel tersebut memiliki nilai potensial reduksi yang berbeda-beda. Sehingga laju reaksi reduksi dan oksidasi pada masing-masing elektroda berbeda. Pada kompartemen katoda terbentuk basa NaOH, menurut Luo *et al.* (2017) hal ini terjadi karena pada kompartemen tersebut terjadi reduksi air menjadi gas hidrogen dan meninggalkan ion hidroksida (OH<sup>-</sup>) yang kemudian berikatan dengan ion natrium (Na<sup>+</sup>). Namun pada tegangan terendah; 6V, NaOH tidak terbentuk, dimana justru NaCl merupakan yang senyawa yang paling banyak terbentuk. Menurut Saleet *et al.* (2017) pembentukan NaCl tersebut berhubungan dengan adanya ion Na<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup> bebas pada elektrolit sehingga kedua ion lebih mudah berikatan. Hal ini didukung dengan adanya senyawa NaCl yang terbentuk pada semua elektrolit hasil variabel elektrolisis. Konsentrasi NaCl tersebut juga cukup besar jika dibandingkan dengan senyawa lainnya.

Pada kompartemen anoda sampel BWRO, senyawa dengan konsentrasi terbesar yang terbentuk adalah senyawa-senyawa bikarbonat (HCO<sub>3</sub>). Menurut Rau (2008) senyawa bikarbonat memiliki berbagai manfaat, seperti soda kue dan penetrasilir kadar pH pada tubuh. Namun konsumsi bikarbonat untuk tubuh yang berasal dari limbah dirasa sangat riskan dan memerlukan proses pemurnian yang sangat teliti. Sehingga dirasa kurang efisien secara ekonomi.

Pada sampel SWRO, senyawa dengan konsentrasi pembentukan terbesar adalah senyawa-senyawa dengan ion hipoklorit (OCl<sup>-</sup>). Ion hipoklorit tersebut berikatan dengan ion kalsium (Ca<sup>2+</sup>), magnesium (Mg<sup>2+</sup>), dan natrium (Na<sup>+</sup>). Dari ketiga

jenis senyawa hipoklorit tersebut, senyawa  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  dan  $\text{NaOCl}$  adalah senyawa-senyawa yang dijual bebas sebagai desinfektan.

$\text{Ca}(\text{OCl})_2$  (Kalsium Hipoklorit) atau lebih sering dikenal sebagai kaporit merupakan oksidator kuat yang larut dalam air. Kaporit dijual dalam bentuk padat berupa serbuk, *granular*, maupun tablet.

Sedangkan  $\text{NaOCl}$  (Natrium Hipoklorit) atau banyak dikenal sebagai *duclean* adalah agen pemutih (*bleaching*) yang banyak digunakan sebagai pembasmi kuman, penghilang baum dan penghilang noda warna. Konsentrasi  $\text{NaOCl}$  harus sesuai pada penggunaannya.  $\text{NaOCl}$  juga telah dikenal sebagai desinfektan air minum yang sangat umum. Menurut PSATS (2013) konsentrasi  $\text{NaOCl}$  sebanyak 1 liter dapat membersihkan 4000 liter air. Tapi hal itu tentunya berubah-ubah tergantung dari kondisi air itu sendiri, temperatur air, dan keberadaan gumpalan, endapan, bakteri dan bahan-bahan kimia lainnya.

Namun sebagaimana telah digambarkan pada diagram batang ion-ion penyusun elektrolit, senyawa yang terbentuk masih berada dalam satu larutan. Sehingga elektrolit tersebut membutuhkan pengolahan lebih lanjut untuk pemurnian ataupun ekstraksinya.

#### **4.3.2 Mass Balance Elektrolit**

*Mass balance* (kesetimbangan massa) merupakan analisa terhadap proses pengolahan yang digunakan untuk mengetahui aliran massa bahan masuk dan keluar pada proses tersebut, sehingga satuan yang digunakan adalah satuan massa (Sötemann *et al*, 2006). Prinsip dasar yang digunakan pada perhitungan kesetimbangan massa adalah Hukum Kekekalan Massa, dimana massa tidak diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Massa Inflow} = \text{Massa Outflow}$$

Pada proses elektrolisis yang telah dilakukan, dibuat kesetimbangan massa berdasarkan pada nilai *Total Dissolved Solid* (TDS). Sebelum dilakukan perhitungan kesetimbangan massa, diagram alir sistem dibuat terlebih dahulu untuk

mempermudah pemahaman terhadap sistem yang digunakan. Diagram alir elektrolisis terdapat pada Gambar 4.7.



**Gambar 4.7 Diagram Alir Elektrolisis**

Parameter TDS digunakan karena TDS mencakup seluruh ion, garam, dan komponen yang terlarut dalam limbah yang digunakan. Pengukuran TDS tidak membedakan jenis ion yang terlarut didalamnya (Weber-scannel dan Duffy, 2007). Pada input kesetimbangan massa, digunakan TDS limbah yang diukur tepat sebelum elektrolisis dilakukan dan dikonversi menjadi satuan massa, yaitu milligram (mg). Sedangkan output TDS mencakup massa ion (TDS) elektrolit, massa komponen yang luruh atau menempel pada elektroda, massa gas yang diproduksi, dan kehilangan yang ada pada sistem.

Massa gas yang diproduksi juga diperhitungkan karena pada awal proses, gas hidrogen, oksigen, maupun klorin terbaca sebagai TDS pada limbah. Berdasarkan pada hasil identifikasi gas yang telah dilakukan, didapatkan bahwa gas yang diproduksi pada anoda elektrolisis limbah SWRO adalah gas klorin. Sedangkan anoda elektrolisis limbah BWRO menghasilkan gas oksigen.

Data-data yang digunakan untuk perhitungan kesetimbangan massa terdapat pada Lampiran A Tabel 10. Berikut adalah contoh perhitungan kesetimbangan massa pada elektrolisis limbah SWRO dengan tegangan 6 Volt.

1. Perhitungan massa input

$$\begin{aligned} M_1 &= \text{Konsentrasi TDS (mg/L)} \times \text{Volume Limbah (L)} \\ &= 32.100 \text{ mg/L} \times (267 \text{ mL} / 1000 \text{ L/mL}) \\ &= 8570,70 \text{ mg} \end{aligned}$$

2. Perhitungan massa elektrolit

$$\begin{aligned} M_{2 \text{ Katoda}} &= \text{Konsentrasi TDS (mg/L)} \times \text{Volume (L)} \\ &= 31.200 \text{ mg/L} \times (134 \text{ mL} / 1000) \\ &= 4180,80 \text{ mg} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 M_2 \text{ Anoda} &= \text{Konsentrasi TDS (mg/L)} \times \text{Volume (L)} \\
 &= 32.000 \text{ mg/L} \times (127,5 \text{ mL} / 1000) \\
 &= 4180,80 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

3. Perhitungan massa gas

Densitas gas diasumsikan pada keadaan *Normal Temperature Pressure* (NTP) yaitu 20°C dan tekanan 1 atm.

$$\text{Densitas H}_2 = 0.08375 \text{ kg/m}^3 \text{ (NIST, 2017)}$$

$$\text{Densitas Cl}_2 = 2.994 \text{ kg/m}^3 \text{ (Teknopoli, 2009)}$$

$$\text{Densitas O}_2 = 1.331 \text{ kg/m}^3 \text{ (Teknopoli, 2009)}$$

$$\begin{aligned}
 M_3 \text{ Katoda} &= \text{Volume Gas H}_2 \text{ (L)} \times \text{Densitas H}_2 \text{ (mg/L)} \\
 &= (242,5\text{mL} / 1000) \times 82,35 \text{ mg/L} \\
 &= 35,25 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_3 \text{ Anoda} &= \text{Volume Gas Cl}_2 \text{ (L)} \times \text{Densitas Cl}_2 \text{ (mg/L)} \\
 &= (13,55\text{mL} / 1000) \times 2.994 \text{ mg/L} \\
 &= 8,30 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

4. Perhitungan massa elektroda

$$\begin{aligned}
 M_4 \text{ Katoda} &= \text{Massa Elektroda Akhir} - \text{Massa Elektroda Awal} \\
 &= 62,72 \text{ gram} - 62,27 \text{ gram} \\
 &= 50 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_4 \text{ Anoda} &= \text{Massa Elektroda Akhir} - \text{Massa Elektroda Awal} \\
 &= 17,276 \text{ gram} - 17,18 \text{ gram} \\
 &= 96 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

5. Perhitungan total massa output

$$\begin{aligned}
 M_5 &= M_2 + M_3 + M_4 \\
 &= (4180,8+4080,0) + (19,97+40,57) + (50+96) \\
 &= 8.467,34 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

6. Perhitungan massa yang hilang

$$\begin{aligned}
 M_6 &= M_1 - M_5 \\
 &= 8.570,70 - 8.467,34 \\
 &= 103,36 \text{ mg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \% \text{Loses} &= (M_6 / M_1) \times 100\% \\
 &= (103,36 / 8.570,70) \times 100\% \\
 &= 1 \%
 \end{aligned}$$

Massa yang hilang pada salah satunya disebabkan oleh adanya sejumlah kecil volume limbah pada reaktor yang berada pada rongga penyangga reaktor. Sebagaimana dijelaskan oleh Dwimerti (2010), apabila terdapat sebagian kecil dari limbah terolah yang tidak mengalami proses pengolahan karena adanya *dead zone*, maka volume tersebut termasuk *loses* (kehilangan)

dalam sistem. Limbah pada proses elektrolisis ini tidak mengalami kontak secara langsung dengan elektroda dan memiliki outlet yang berbeda pada reaktor. Kecilnya volume menyebabkan TDSnya tidak dapat diukur. Volume limbah tersebut terdapat pada Lampiran A Tabel 11.

Berdasarkan pada perhitungan diatas, dilakukan juga perhitungan terhadap 6 variabel sistem lainnya. Perhitungan kesetimbangan massa selengkapnya terdapat pada Tabel 4.5.

**Tabel 4.6 Mass Balance Elektrolisis**

Variabel	BWRO 6V	BWRO 9V	BWRO 13.8V	SWRO 6V	SWRO 9V	SWRO 13.8V	
Awal (mg)	484.55	388.93	369.43	8570.70	8347.50	8056.00	
P r o s e s	Elektrolit (mg)						
	Katoda	166.80	158.86	181.48	4180.80	3702.30	3889.60
	Anoda	196.22	224.41	274.07	4080.00	3837.75	3599.00
	Gas (mg)						
	Katoda	0.28	1.71	2.88	19.97	35.25	59.09
	Anoda	0.40	1.46	2.00	40.57	260.48	559.13
	Elektroda (mg)						
	Katoda	90.00	0.00	1.20	50.00	404.60	59.10
	Anoda	10.00	0.00	-92.90	96.00	84.30	-116.90
	Total (mg)	463.71	386.45	368.72	8467.34	8324.67	8049.02
L o s e s	Selisi h (mg)	20.84	2.48	0.70	103.36	22.83	6.98
	Selisi h (%)	4%	1%	0%	1%	0%	0%

Sumber: Hasil Perhitungan

Nilai negatif pada anoda menunjukkan adanya sebagian dari elektroda yang meluruh, mengakibatkan adanya penambahan massa ion pada elektrolit. Namun karena massa tersebut bukan berasal dari limbah awal, maka harus dikurangkan. Pada kedua

sampel, anoda luruh pada tegangan tertinggi, yaitu 13,8 V. Menurut Yuvaraj dan Santhanaraj (2014) hal ini berhubungan dengan kuat hantar anoda yang berbahan grafit. Semakin tinggi tegangan yang digunakan, maka arus yang dihantarkan oleh elektroda semakin besar. Luruhnya grafit menunjukkan bahwa material tersebut tidak dapat mengimbangi laju arus listrik pada proses. Selain itu, Widodo *et al* (2008) menjelaskan bahwa luruhnya elektroda dapat disebabkan oleh semakin cepatnya perpindahan ion pada elektrolit seiring dengan naiknya tegangan yang digunakan. Frekuensi tumbukan dan gesekan pada permukaan elektroda yang semakin besar mengakibatkan elektroda lebih rentan luruh. Sedangkan nilai positif menunjukkan adanya komponen yang menempel pada elektroda di akhir proses elektrolisis. Pada penelitian ini tidak dianalisis komponen yang menempel tersebut. Namun Hardee dan Bard (1976) menjelaskan bahwa elektrolisis air alkali dapat menyebabkan deposisi berupa logam seperti besi dan tembaga pada elektrodanya.

Berdasarkan pada kesetimbangan massa tersebut, elektrolisis limbah BWRO menunjukkan adanya fluktuasi pada massa ion elektrolit. Hal ini berhubungan dengan fluktuasi komponen yang menempel dan meluruh pada elektroda, sehingga massa input dan output pada masing-masing sistem masih seimbang. Sedangkan pada sampel SWRO terbentuk tren yang stabil pada elektrolit dan gasnya, dimana penurunan massa pada elektrolit akan terjadi seiring dengan naiknya massa gas yang dihasilkan.

#### **4.4 Produksi Gas Hidrogen Proses Elektrolisis**

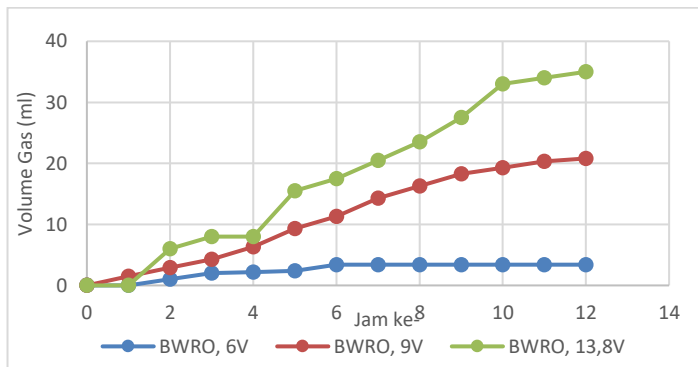
Santos dan Sequeira (2013) menjelaskan bahwa unit elektrolisis paling sederhana terdiri dari anoda dan katoda yang direndam dalam elektrolit dan dihubungkan melalui *power supply* eksternal. Arus listrik searah (DC) digunakan sebagai input listrik. Elektron mengalir dari kutub negatif *power supply* menuju katoda, dimana elektron tersebut berikatan dengan ion hidrogen (proton) untuk membentuk atom hidrogen. Secara umum, ion hidrogen bergerak menuju katoda, sedangkan ion hidroksida menuju anoda.

Penelitian ini difokuskan pada pembentukan gas hidrogen. Namun analisis terhadap volume gas oksigen yang diproduksi juga

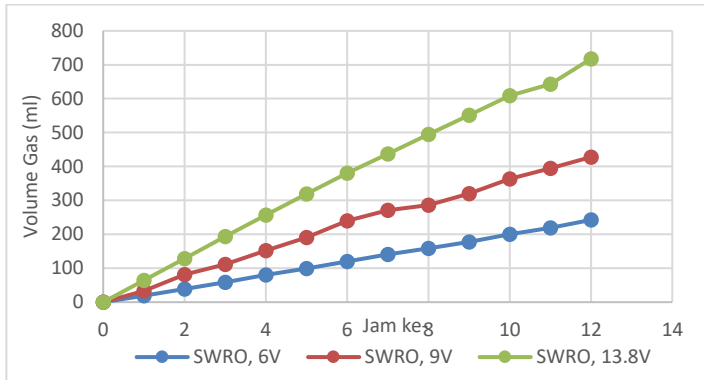
dilakukan sebagai data pembandingan. Volume gas diukur secara berkala setiap 30 menit atau satu jam selama *running* elektrolisis (12 jam) yang terdapat pada Lampiran A (Tabel 1-8).

Pada setiap perlakuan elektrolisis, gelembung gas terbentuk di katoda terlebih dahulu, meskipun waktu awal pembentukannya berbeda pada setiap tegangan. Hal tersebut menunjukkan bahwa gas hidrogen lebih cepat terbentuk dibandingkan dengan gas oksigen. Perbedaan tersebut salah satunya disebabkan oleh perbedaan nilai potensial reduksi ( $E^0$ ) pada gas hidrogen dan oksigen. Berdasarkan pada nilai standar potensial reduksi (Tabel 2.3), oksigen akan teroksidasi di anoda pada  $E^0 = -1,23V$  sedangkan gas hidrogen dapat direduksi oleh katoda pada  $E^0 = -0,83V$ . Hidrogen lebih mudah terbentuk karena memiliki nilai potensial reduksi yang lebih rendah. Sehingga produksinya pada periode waktu yang sama dengan oksigen akan lebih besar.

Terdapat berbagai faktor yang mempengaruhi pembentukan gas hidrogen pada suatu proses elektrolisis. Namun menurut Artadi (2007), faktor utamanya adalah karakteristik elektrolit, tegangan input, dan jenis elektroda. Penelitian ini menggunakan karakteristik elektrolit dan tegangan input sebagai variabel. Sedangkan jenis elektroda digunakan sebagai variabel tetap, sehingga dapat dianalisis pengaruh kedua faktor tersebut. Berdasarkan pada data pembentukan gas hidrogen pada Lampiran A, didapatkan grafik pembentukannya yang tertera pada Gambar 4.8 dan 4.9.



**Gambar 4.8 Produksi Hidrogen Sampel BWRO**



**Gambar 4.9 Produksi Hidrogen Sampel SWRO**

Kedua grafik tersebut menunjukkan bahwa peningkatan produksi gas hidrogen yang konsisten seiring dengan kenaikan tegangan yang digunakan. Rosley *et al.* (2015) menjelaskan bahwa peningkatan ini disebabkan oleh peningkatan arus yang selalu mengikuti peningkatan tegangan. Hukum Ohm menyatakan hubungan tegangan ( $V$ ), arus ( $I$ ), dan hambatan ( $R$ ) yang terdapat pada Persamaan 4.3.

$$V = I \cdot R$$

**4.3**

Tegangan memberikan dorongan terhadap arus untuk memasuki sistem dan melalui hambatan. Arus akan menyuplai energi dalam bentuk elektron yang akan berikatan dengan ion hidrogen untuk proses elektrolisis. Sehingga semakin besar tegangan yang digunakan secara umum akan memperbesar arus yang dihasilkan. Penggunaan tegangan yang semakin besar akan mempercepat laju pembentukan gas hidrogen pada roses elektrolisis.

Hal tersebut diperkuat oleh Saleet *et al.* (2017) yang melakukan penelitian pada sampel air laut yang diolah dengan elektrolisis pada rentang te 5-20V. Produksi hidrogen didapatkan lebih besar pada elektrolisis menggunakan tegangan yang lebih tinggi.

Selain itu, terdapat perbedaan pada akumulasi volume hidrogen yang diproduksi oleh elektrolisis dengan sampel SWRO dan BWRO. Kedua sampel memiliki karakteristik awal yang sangat

berbeda. TDS pada sampel BWRO hanya sebesar 1.060 mg/L, sedangkan TDS pada sampel SWRO mencapai 26.400 mg/L. Selisih produksi hidrogen tersebut mencapai 71x pada penggunaan tegangan yang sama. Hal ini dapat disebabkan oleh berbagai hal, antara lain:

- d. Fakta bahwa nilai TDS suatu larutan berbanding lurus dengan nilai konduktivitas larutan tersebut (Walton, 1989). Mahrous *et al.* (2011) menyatakan semakin besar konduktivitas suatu larutan, maka semakin besar kemampuan arus listrik untuk mengalir pada larutan tersebut. Sehingga produksi hidrogen semakin besar.
- e. Semakin besarnya nilai TDS menyebabkan semakin besarnya jumlah tumbukan ionik efektif per satuan waktu. Trautz (1916) dalam IUPAC (1987) menyatakan bahwa semakin besar konsentrasi partikel pada suatu reaktan akan meningkatkan jumlah tumbukan ion dan tumbukan ion yang berhasil. Sehingga laju reaksi akan semakin cepat dan produk yang dihasilkan semakin besar.

## **4.5 Simulasi *Fuel Cell***

Simulasi atau model *fuel cell* dibuat berdasarkan mekanisme dan kebutuhan konstanta *fuel cell* yang sudah ada dengan menggunakan program *Matrix Laboratory* (MATLAB). Konstanta tersebut sebagaimana tertera pada Tabel 3.2. Prinsip *fuel cell* yang digunakan adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) dimana kerapatan arus diatur berdasarkan spesifikasi membrane yang akan digunakan.

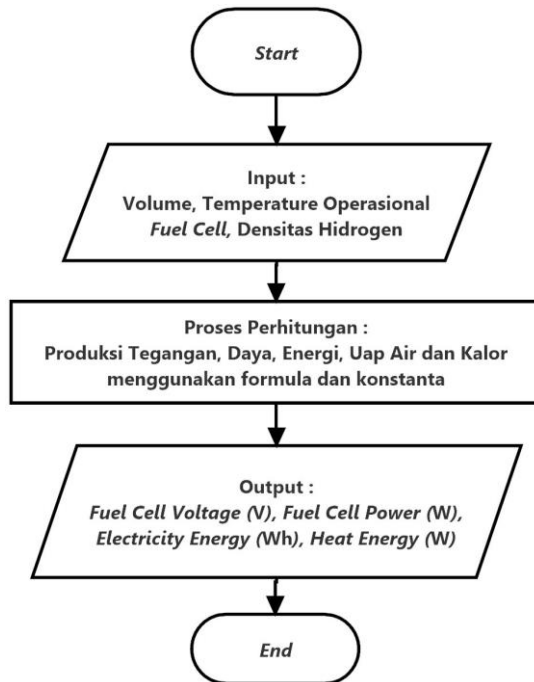
### **4.5.1 Penyusunan Program Simulasi *Fuel Cell***

Simulasi atau model *fuel cell* dibuat berdasarkan mekanisme dan kebutuhan konstanta *fuel cell* yang sudah ada dengan menggunakan program *Matrix Laboratory* (MATLAB). Konstanta tersebut tertera pada Tabel 3.2. Untuk memudahkan pembuatan algoritma pemrograman pada simulasi ini, maka dibuat diagram alir sebagai prioritas awal. Diagram alir yang digunakan pada permodelan ini terdapat pada Gambar 4.10.

Simulasi ini menggunakan dua sistem dalam Matlab, yaitu M-file editor (sistem untuk melakukan pemrograman) dan GUIDE (sistem untuk membuat GUI). Pembuatan program diawali dengan

penyusunan program dengan Bahasa pemrograman menggunakan M-file editor. Selanjutnya dibuat GUI (*Graphical User Interfaces*) berdasarkan pada algoritma yang telah dibuat. GUI dibuat untuk mempermudah pengguna dan pembuat untuk menggunakan program ini karena tampilannya lebih sederhana (*user friendly*). Lalu keduanya dipadukan sehingga menjadi program simulasi seperti yang diharapkan.

Penyusunan pemrograman dasar dikerjakan pada *M-file editor* yang telah disediakan oleh Matlab seperti pada Gambar 4.11, sedangkan hasil logaritma dasarnya terdapat pada Gambar 4.12. Rumusan yang digunakan disesuaikan dengan karakteristik yang ingin ditampilkan pada output data.



**Gambar 4.10 Diagram Alir Simulasi Fuel Cell**

```

30 - Vol = V / 1000;
31 - RoH2 = Ro / 1000;
32
33 - X = 2.1974 + (0.02953 * Tc) - (9.1837 * (10^(-5)) * (Tc^2)) + (1.4454 * (10^(-7)))
34 - P_H2O = 1;
35
36 - Pudara = 1;
37 - F_O2 = 1;
38
39 - F_H2 = 1;
40
41 - my_ln1= log((P_H2 * (P_O2^0.5))/P_H2O) / log( exp(1) );
42 - E_nernst = E0 + (((R*Tc)/(2*F)) * (my_ln1));
43
44 - my_ln2 = log(1/10)/log(exp(1));
45 - V_act = ((R * Tc)/(2 * F * Alpha)) * (my_ln2);
46
47 - V_fc = E_nernst - V_act - Vohmic - Vmt;
48
49 - U_H2 = ((1.047 * (10^(-8)) * (PFC / V_fc)));
50
51 - U_H2d = U_H2 * 3600 * 24;
52
53 - M_H2 = Vol * RoH2 ;

```

**Gambar 4.11 Tampilan M-File Editor**

```

Command Window
Mencari Tegangan Hasil Fuel Cell
=====
Rumus VFC = ENernst - VAct - VOhmic - Vmt
=====
n      = 2
R      = 0.08205 L atm/K mol
F      = 96.485 C/mol
Pudara = 1 atm
i      = 0.01 mA/cm^2
=====
Masukan Nilai Volume (mL)      : 0
Masukan Nilai Temperature (Celcius) : 0
Masukan Nilai Densitas H2 pada T (kg/m3) : 0

```

**Gambar 4.12 Tampilan Hasil Pemrograman M-File Editor**

Secara urutan teknis pemrograman ini menggunakan kode (aturan) yang telah disediakan di Matlab, yang semuanya lengkap terdapat pada MATLAB HELP (F1). Secara umum program ini memiliki urutan langkah sebagai berikut:

1. Pengaturan tampilan masukan data berupa volume hidrogen, suhu sistem *fuel cell*, dan densitas hidrogen pada suhu yang ditentukan tersebut.

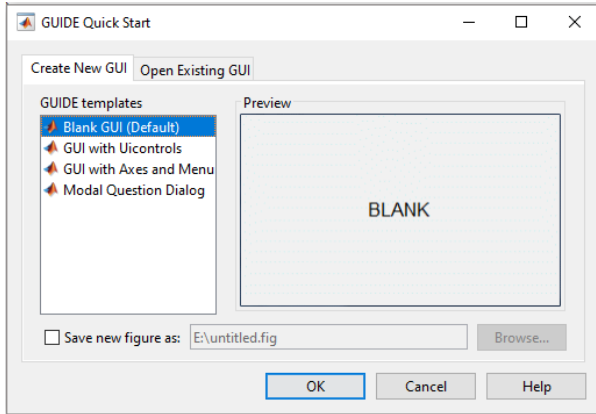


2. Pengaturan konstanta umum dan asumsi yang digunakan dalam persamaan yang membantu perhitungan karakteristik *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) seperti konstanta Faraday dan tegangan ideal.
3. Pemasukan persamaan-persamaan yang digunakan pada perhitungan tegangan *fuel cell* yang terdapat pada Persamaan 2.2-2.16.
4. Penghitungan tegangan Nernst atau tegangan maksimum menggunakan tekanan parsial dengan Persamaan 2.3-2.7
5. Penghitungan polarisasi untuk mendapatkan nilai kehilangan tegangan aktivasi, ohmik, dan konsentrasi.
6. Penghitungan produk tegangan *fuel cell* dengan Persamaan 2.2.
7. Konversi volume hidrogen menjadi massa berdasarkan densitas hidrogen pada suhu yang ditentukan dengan Persamaan 2.13.
8. Penghitungan daya dan energi yang dihasilkan dengan Persamaan 2.12 dan 2.14.
9. Pehitungan produk samping *fuel cell* dengan Persamaan 2.15 dan 2.16.

Selanjutnya dibuat GUI untuk memudahkan penggunaan simulasi ini. Langkah awal untuk membuat GUI pada MATLAB ialah membuat perintah berupa tulisan (*command*) pada bagian *command window* dengan menulis perintah:

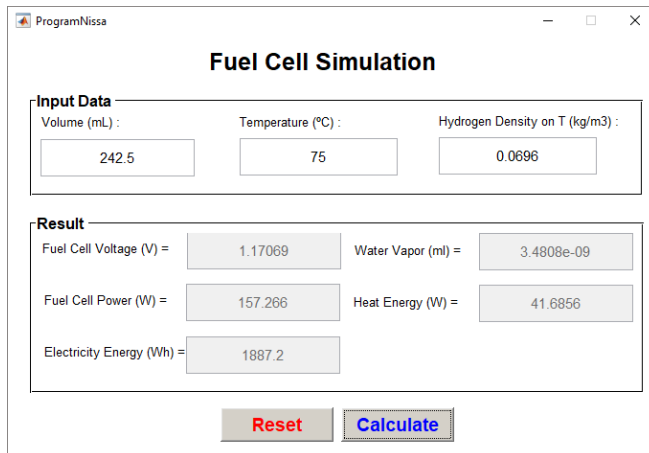
```
>> guide
```

Maka akan muncul tampilan seperti Gambar 4.13, langkah selanjutnya membuat GUI dari awal yaitu memilih Blank GUI, atau jika sudah dibuat bisa diambil dari file yang sudah ada (Open Existing GUI). Kemudian dibuat sesuai kebutuhan.



**Gambar 4.13 Tampilan Awal**

GUI yang dirancang untuk simulasi penghasilan *fuel cell* seperti pada Gambar 4.14 membutuhkan input volume hidrogen, pengaturan suhu, dan densitas hidrogen pada suhu tersebut. Data yang akan dihasilkan oleh simulasi ini berupa tegangan, daya, energi, uap air, dan energi panas yang diperkirakan dapat dihasilkan oleh suatu sistem *fuel cell* dengan asumsi yang sudah ditentukan.



**Gambar 4.14 GUI Simulasi Fuel Cell**

#### 4.5.2 Analisis Hasil Simulasi

Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui energi listrik yang dapat dihasilkan oleh hidrogen yang diproduksi pada proses elektrolisis. Energi tersebut sangat dipengaruhi oleh suhu operasional *fuel cell*, sehingga pengaturan suhu dan densitas hidrogen pada suhu tersebut harus dimasukkan sebagai masukan data. Selain itu, dilakukan juga perhitungan terhadap produk sampingan yang dihasilkan oleh hidrogen tersebut. *Running* simulasi dilakukan pada program sebagaimana Gambar 4.8. Analisis dilakukan terhadap tren data yang dihasilkan oleh *fuel cell*. Data tersebut meliputi hasil tegangan, daya dan energi, dan produk sampingan *fuel cell berupa* uap air dan panas.

Simulasi dilakukan pada suhu 75°C. Menurut Riascos dan Pereira (2010), 75°C merupakan suhu optimum operasional *fuel cell*. Rendahnya suhu operasional jika dibandingkan dengan prinsip operasional *fuel cell* lainnya merupakan salah satu alasan PEMFC menjadi jenis *fuel cell* yang paling banyak digunakan. Berikut adalah proses perhitungan simulasi *fuel cell* pada program yang telah disusun, sedangkan hasil simulasi selengkapnya terdapat pada Tabel 4.4.

##### 1. Perhitungan tekanan bahan bakar sel pada elektroda

$$X = 2.1974 + 0.02953T_c - 9.1837x10^{-5}T_c^2 + 1.4454x10^{-7}T_c^3$$

$$X = 2.1974 + 0.02953 \times 75 - 9.1837x10^{-5}75^2 + 1.4454x10^{-7}75^3$$

$$X = 3,9565$$

$$P_{H_2O} = 10^{-X}$$

$$P_{H_2O} = 10^{-3,9565}$$

$$P_{H_2O} = 3.4808e - 09 \text{ atm}$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{udara}}{\exp\left(4.192 \frac{i}{7^{1.334}}\right)} - P_{H_2O}$$

$$P_{O_2} = \frac{1}{\exp\left(4.192 \frac{i}{(75+273.15)^{1.334}}\right)} - 3.4808e - 09$$

$$P_{O_2} = 0.9999 \text{ atm}$$

$$P_{H2} = \frac{0.5 P_{udara}}{\exp\left(\frac{i}{1.334}\right)} - P_{H2O}$$

$$P_{H2} = \frac{0.5 \times 1}{\exp\left(\frac{i}{(75+273.15)^{1.334}}\right)} - 3.4808e - 09$$

$$P_{H2} = 0.4999 \text{ atm}$$

## 2. Perhitungan persamaan Nernst

$$E_{nernst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H2} \times (P_{O2})^{0.5}}{P_{H2O}}\right)$$

$$E_{nernst} = 1.229 + \frac{0.08205 \times (75 + 273.15)}{2 \times 96.85} \ln\left(\frac{0.499 \times 0.99^{0.5}}{3.4808e - 09}\right)$$

$$E_{nernst} = 2.750 \text{ Volt}$$

## 3. Perhitungan polarisasi aktivasi, ohmik, dan konsentrasi

$$V_{act} = \frac{RT}{2F\alpha} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right)$$

$$V_{act} = \frac{0.08205 \times (75 + 273.15)}{2 \times 96.485 \times 0.5} \ln\left(\frac{0.01}{0.0001225}\right)$$

$$V_{act} = 1.3033 \text{ Volt}$$

$$V_{ohmic} = -i \times R_{internal}$$

$$V_{ohmic} = -(0.01 \times 0.191)$$

$$V_{ohmic} = -0.0019 \text{ Volt}$$

$$V_{MT} = \alpha_1 \cdot i^K \ln(1 - \beta i)$$

$$V_{MT} = 0.085 \times 0.01^{1.1} \times \ln(1 - (1.148 \times 0.01))$$

$$V_{MT} = -6.1925e - 06 \text{ Volt}$$

## 4. Perhitungan tegangan hasil fuel cell

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohmic} - V_{Mt}$$

$$V_{FC} = 2.4750 - 1.3033 - (-0.0019) - (-6.1925e - 06)$$

$$V_{FC} = 1.1735 \text{ Volt}$$

5. Perhitungan daya dan energi listrik yang dihasilkan

$$\text{Massa}_{H_2} / \text{jam} = \frac{\rho \times V}{t_{\text{elektrolisis}}}$$

$$\text{Massa}_{H_2} = \frac{0.0696 \times \left(\frac{242.5}{1000}\right)}{12}$$

$$\text{Massa}_{H_2} = 1.4065e - 06 \text{ kg/jam}$$

$$U_{H_2} \text{ (kg/jam)} = 1.047 \times 10^{-8} \times \frac{P_{FC}}{V_{FC}}$$

$$1.4065e - 06 \text{ (kg/jam)} = 1.047 \times 10^{-8} \times \frac{P_{FC}}{1.1735}$$

$$P_{FC} = 157.6484 \text{ Watt}$$

$$E_{FC} = P \times t_{\text{elektrolisis}}$$

$$E_{FC} = 157.6484 \times 12$$

$$E_{FC} = 1891,8 \text{ Wh}$$

6. Perhitungan hasil samping (uap air dan energi panas)

$$Q_{\text{cell}} = nI (HHV - V_{FC})$$

$$Q_{\text{cell}} = 1 \times \frac{P_{FC}}{V_{FC}} \times (HHV - V_{FC})$$

$$Q_{\text{cell}} = 1 \times \frac{157.6484}{1.1735} \times (1.48 - 1.1735)$$

$$Q_{\text{cell}} = 41.3035 \text{ Watt}$$

$$\text{Produksi air} \left(\frac{L}{\text{jam}}\right) = \frac{9,328. \times 10^{-8} \times P}{3600 \times V_{FC} \times \rho}$$

$$\text{Produksi air} \left(\frac{L}{\text{jam}}\right) = \frac{9,328. \times 10^{-8} \times 157.6484}{3600 \times 1.1735 \times 1}$$

$$\text{Produksi air} \left(\frac{L}{\text{jam}}\right) = 3.4808e - 09 \text{ L/jam}$$

**Tabel 4.7 Hasil Simulasi Fuel Cell**

	Vol (H <sub>2</sub> )	Tegangan Hasil (V)	Daya (W)	Energi (Wh)	Uap Air (L/jam)	Panas (W)
BWRO, 6V	3.4	1.17	2.20	26.46	4.88E-11	0.58
BWRO, 9V	20.8	1.17	13.49	161.87	2.99E-11	3.57
BWRO, 13.8V	35	1.17	22.69	273.38	5.02E-10	6.02
SWRO, 6V	242.5	1.17	157.64	1891.80	3.48E-09	41.30
SWRO, 9V	428	1.17	277.57	3330.80	6.14E-09	73.57
SWRO, 13.8V	717.5	1.17	465.31	5583.76	1.03E-08	123.34

Sumber: Hasil Perhitungan

Data hasil simulasi menunjukkan peningkatan hidrogen tidak mempengaruhi tegangan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan pada sistem *fuel cell*, debit hidrogen yang memasuki sistem harus dalam keadaan konstan dan stabil. Sehingga harus dibuat suatu sistem untuk mengekualisasi debit dan tekanan hidrogen yang digunakan. Pengaturan ini biasa dilakukan dengan menggunakan storage tank. Untuk tegangan yang dihasilkan oleh *fuel cell*, faktor yang paling berpengaruh adalah kerapatan arus pada membran. Semakin besar kerapatannya maka akan semakin besar tegangan yang akan dihasilkan. kerapatan arus tersebut merupakan salah satu spesifikasi yang dapat digunakan sebagai dasar pemilihan membran polimer yang dijual di pasaran.

Hidrogen yang dihasilkan oleh proses elektrolisis mempengaruhi daya yang dapat dihasilkan oleh *fuel cell* tersebut. Saeed dan Warkozek (2015) dan Kabza (2016) menjelaskan bahwa daya dan energi yang dihasilkan oleh *fuel cell* bergantung pada laju bahan bakunya, yaitu hidrogen dalam satuan massa per waktu. Daya adalah laju hantaran energi listrik dalam suatu sistem. Sedangkan energi listrik adalah daya yang dapat dihasilkan suatu sistem dalam kurun waktu tertentu.

Masing-masing parameter meningkat seiring dengan peningkatan volume hidrogen yang digunakan. Namun

penghasilan kalor atau energi panas, harus selalu dikontrol untuk menjaga suhu operasional agar sistem selalu pada kondisi optimal. Hal ini berkaitan dengan pemilihan membran *fuel cell*. Tingginya kerapatan membrane akan mempercepat reaksi dan meningkatkan produksi energi listrik. Sebagai konsekuensinya, energi panas yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini dapat berdampak pada kinerja sistem dalam jangka panjang, dimana suhu sistem yang terlalu tinggi akan menyebabkan *overheating* yang dapat merusak keseluruhan sistem.

Berdasarkan pada perhitungan produksi energi tersebut, dapat dilakukan perhitungan efisiensi energi untuk penggunaan sistem elektrolisis-*fuel cell*. Efisiensi sistem elektrolisis-*fuel cell* adalah perbandingan kebutuhan energi untuk menghasilkan hidrogen pada elektrolisis dan energi yang dihasilkan oleh hidrogen tersebut pada sistem *fuel cell*. Efisiensi dapat dihitung dengan membandingkan kedua nilai energi yang didapatkan pada penelitian yang telah dilakukan. Perhitungan efisiensi sistem terdapat pada Tabel 4.5. Energi yang dimaksudkan pada tabel tersebut adalah kebutuhan dan produksi energi dalam periode waktu 12 jam.

**Tabel 4.8 Efisiensi Energi Sistem Elektrolisis-Fuel Cell**

Variabel	Energi Listrik Elektrolisis(Wh)	Energi Listrik Fuel Cell(Wh)	Efisiensi
BWRO, 6V	590.95	26.46	-96%
BWRO, 9V	967.51	161.87	-83%
BWRO, 13,8V	1505.30	273.38	-82%
SWRO, 6V	573.96	1891.80	229%
SWRO, 9V	910.40	3330.80	266%
SWRO, 13.8V	1419.33	5583.76	293%

Sumber: Hasil Perhitungan

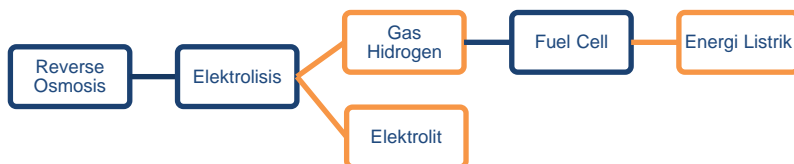
Dapat disimpulkan dari perhitungan efisiensi tersebut, sistem *fuel cell* lebih efektif apabila diterapkan dengan menggunakan air limbah SWRO. Hal ini dikarenakan produksi hidrogen menggunakan air limbah SWRO lebih besar, sehingga daya dan energi listrik yang dihasilkan oleh *fuel cell* juga lebih

besar. Efisiensi yang bernilai negatif menunjukkan bahwa kebutuhan energi untuk menghasilkan hidrogen lebih besar daripada energi listrik yang dapat dihasilkan oleh sistem *fuel cell*.

#### 4.6 Aplikasi Sistem Elektrolisis dan *Fuel Cell*

Dalam penerapan alternatif pengolahan air limbah, berbagai aspek harus dikaji untuk menentukan kelayakannya. Pada aplikasi sistem skala besar, aspek finansial merupakan salah satu pertimbangan penting yang harus dianalisis. Namun aspek tersebut tidak bisa dijadikan tolak ukur utama, karena pengolahan air limbah beririsan dengan berbagai kepentingan untuk meminimalisir dampak lingkungan yang dapat disebabkan (Faile, 2004).

Sistem elektrolisis-*fuel cell* ini dapat mengolah limbah RO untuk menghasilkan gas hidrogen dan elektrolit yang memiliki potensi ekonomi untuk dimanfaatkan. Gas hidrogen yang dihasilkan diolah lebih lanjut untuk menghasilkan energi listrik dengan menggunakan *fuel cell*. Sedangkan produk elektrolit yang dimaksud meliputi desinfektan, dan garam. Untuk mempermudah pemahaman, skema sistem terdapat pada Gambar 4.15.

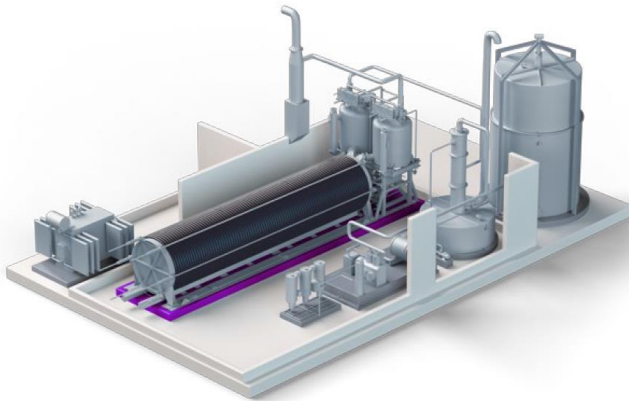


**Gambar 4.15 Skema Sistem Elektrolisis-Fuel Cell**

Menurut Parmariza (2014), aspek finansial berkaitan dengan kebutuhan investasi (*Capital Expenditure/ Capex*), biaya operasional (*Operational Expenditure/ Opex*), proyeksi pengembalian modal, dan kemungkinan keuntungan. Investasi (*Capex*) yang dibutuhkan untuk sistem ini meliputi reaktor elektrolisis dan reaktor *fuel cell*. Sedangkan biaya operasional (*Opex*) yang dibutuhkan meliputi biaya energi listrik untuk operasional.



Salah satu acuan yang dapat digunakan adalah reaktor elektrolisis milik Nel ASA (2016), yaitu *Atmospheric Alkaline Electrolyser*. Reaktor ini memiliki kapasitas pengolahan hingga 10.476 L/hari. Reaktor ini merupakan reaktor *built-in* yang dapat melakukan proses elektrolisis dan konversi energi dengan metode *fuel cell*. Reaktor ini digunakan sebagai acuan karena proses elektrolisisnya memang menggunakan elektrolit pekat seperti air limbah RO. Ilustrasi dari reaktor tersebut terdapat pada Gambar 4.16.



**Gambar 4.16 Reaktor Elektrolisis Skala Besar**

Sumber: Nel ASA (2016)

Analisis finansial dilakukan dengan membandingkan volume pengolahan pada penelitian skala lab dan reaktor tersebut. Data perbandingan didasarkan pada elektrolisis dengan variabel jenis limbah SWRO dan tegangan 13,8V. Variabel ini dipilih karena dirasa merupakan variabel dengan produk elektrolisis yang paling optimum. Nilai harga yang dicantumkan pada analisis ini berdasarkan pada data yang didapatkan dari berbagai sumber. Rincian harga dan sumbernya terdapat pada Tabel 4.9, sedangkan data perbandingan proses *running* skala laboratorium dan *scale-up* terdapat pada Tabel 4.10.

**Tabel 4.9 Rincian Harga pada Analisis Finansial**

	Harga	Ket	
Listrik <sup>[1]</sup>	Rp 1,467	1	kWh
Hoffmann Electrolysis Apparatus <sup>[2]</sup>	Rp 4.000,000	1	reaktor
Atmospheric Alkaline Electrolyser <sup>[3]</sup>	Rp 26,637,616,200	1	reaktor
NaOCl <sup>[4]</sup>	Rp 10,000	1	L
Ca(Ocl)2 <sup>[5]</sup>	Rp 34,000	1	kg

Sumber: <sup>[1]</sup>PLN (2018), <sup>[2]</sup>Thomas Scientific (2018), <sup>[3]</sup>Jacobs (2016), <sup>[4]</sup>Sinar Kimia (2017), dan <sup>[5]</sup>Heansa Kimia (2018)

**Tabel 4.10 Perbandingan Penelitian Skala Lab dan *Scale-up***

Lab				
	Nilai	Satuan	Pengeluaran	Pendapatan/ running
Volume Pengolahan	0.265	L/12 jam		
Reaktor				
Hoffmann Electrolysis Apparatus			Rp 4,000,000	
Kebutuhan Energi Listrik	1419.33	wh		
	1.41932	kwh	Rp 2,083	
Produksi H2	0.7175	L/12 jam		
Produksi Energi Listrik	5583.76	wh		
	5.58376	kwh		Rp 8,193
Produksi Elektrolit				
Ca(OCl)2	623.93	mg		Rp 21
NaOCl	0.07	L		Rp 2,313
Scale up				
	Nilai	Satuan	Pengeluaran	Pendapatan/ running
Volume Pengolahan	5238	L/12 jam		
Reaktor				
Atmospheric Alkaline Electrolyser			Rp 26,637,616,200	
	Nilai	Satuan	Pengeluaran	Pendapatan/ running

Kebutuhan Energi Listrik	4.4	kwh/ m3		
	23.0472	kwh	Rp 33,817	
Produksi H2	14182.1320 8	L/12 jam		
Produksi Energi Listrik	116991	wh		
	116.991	kwh		Rp 171,659
Produksi Elektrolit				
Ca(OCl)2	12332675	mg		Rp 419,311
NaOCl	1406.54	L		Rp 14,065,423

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan pada perbandingan tersebut, dilakukan analisis terhadap debit produksi limbah SWRO di unit RO PLTU Paiton. Menurut data operasional unit RO PLTU Paiton periode Desember 2017, rata-rata produksi limbah unit SWRO adalah 113 m<sup>3</sup>/jam Apabila unit RO beroperasi selama 24 jam, maka diperlukan reaktor elektrolisis yang mampu beroperasi seimbang dengan unit RO.

Analisis diawali dengan perkiraan jumlah unit elektrolisis yang harus dimiliki untuk dapat mengolah seluruh limbah RO yang dihasilkan dalam waktu satu hari. Jumlah unit dihitung dengan cara:

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah unit elektrolisis} &= \frac{\text{Debit produksi limbah}}{\text{Kapasitas reaktor}} \\
 &= \frac{1367640 \text{ L/12jam}}{5238 \text{ L/12jam}} \\
 &= 261 \text{ unit}
 \end{aligned}$$

Jumlah unit tersebut merupakan unit yang dibutuhkan untuk mengolah seluruh debit limbah yang dihasilkan oleh proses RO PLTU Paiton dalam kurun waktu satu kali *running* elektrolisis, yaitu 12 jam. Perhitungan aplikasi penerapan sistem elektrolisis-*fuel cell* selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut.

Berdasarkan perhitungan *cash flow* tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem elektrolisis-*fuel cell* membutuhkan investasi sebesar Rp5,178,847,272,879 dan menghasilkan Rp2,747,874,458,952 setelah dikurangi dengan biaya operasional. Sistem ini sudah dapat mencapai pengembalian modal pada tahun

kedua operasional dengan keuntungan sebesar Rp 316,901,645,026.

**Tabel 4.11 Perhitungan Analisis Finansial Sistem Elektrolisis-Fuel Cell**

Scale up		
Jumlah Unit	1	261
Investasi		
Atmospheric Alkaline Electrolyser	Rp 26,637,616,200	Rp 5,178,847,272,879
Operasional		
Energi Listrik	Rp 24,348,021	Rp 6,354,833,440
Pendapatan		
Produksi Energi Listrik	Rp 123,594,159	Rp 32,258,075,558
Produksi Elektrolit		
Ca(OCl)2	Rp 301,903,904	Rp 78,796,919,026
NaOCl	Rp 10,127,104,589	Rp 2,643,174,297,809
Total	Rp 10,552,602,653	Rp 2,754,229,292,392
Data Cash Flow		
Akhir Tahun	Net Cash Flow	Cumulative Net Flow
0	-Rp 5,178,847,272,879	-Rp 5,178,847,272,879
1	Rp 2,747,874,458,952	-Rp 2,430,972,813,927
2	Rp 2,747,874,458,952	Rp 316,901,645,026
3	Rp 2,747,874,458,952	Rp 3,064,776,103,978
4	Rp 2,747,874,458,952	Rp 5,812,650,562,930
5	Rp 2,747,874,458,952	Rp 8,560,525,021,882

Sumber: Hasil Perhitungan

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Elektrolisis SWRO dengan TDS awal 26.400mg/L menghasilkan desinfektan berupa  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  sebesar 15.393,92 mg/L dan NaOCl sebesar 13.813,22mg/L, sedangkan elektrolisis BWRO dengan TDS awal 1.060mg/L menghasilkan garam NaCl sebesar 2.272,32mg/L.
2. Volume gas hidrogen terbesar diproduksi oleh sampel SWRO pada tegangan 13,8V; yaitu 717,5 ml.
3. Tegangan yang dihasilkan oleh pemanfaatan hidrogen pada simulasi *fuel cell* adalah 1.17V.

#### 5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan untuk pengembangan penelitian kedepan antara lain:

1. Penelitian untuk menganalisis laju pembentukan elektrolit secara periodik menggunakan reaktor dengan volume yang lebih besar.
2. Penelitian mengenai pemurnian elektrolit yang dihasilkan oleh proses elektrolisis.
3. Penelitian mengenai penerapan penggunaan hidrogen pada perangkat *fuel cell*.
4. Penelitian mengenai gas klor sebagai desinfektan.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Aal, H.K., Zohdy, K.M., dan Kareem, M. Abdel. 2010. **Hydrogen Production Using Sea Water Electrolysis.** The Open Fuel Cells Journal Vol. 3, 01-07
- Alghoul, M.A., Poovanaesvaran, P., Sopian, K., dan Sulaiman, S.Y. 2009. **Review of Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO) System Designs.** Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 13, 2661-2667
- Andewi, Ni Made Ayu Yasmitha. 2011. **Produksi Hidrogen melalui Proses Elektrolisis sebagai Sumber Energi.** Surabaya: ITS.
- Arhami, Muhammad. dan Desiani, Anita. 2005. **Pemrograman Matlab.** Yogyakarta: ANDI.
- Artadi, Arif., Sudaryo, dan Aryadi. 2007. **Penggunaan Grafit Batu Baterai sebagai Alternatif Elektroda Spektrografi Emisi.** Jurnal Forum Nuklir Vol. 01, 105-120
- Atab, M. Sarai., Smallbone, A.J., dan Roskilly, A.P. 2016. **An Operational and Economic Study of a Reverse Osmosis Desalination System for Potable Water and Land Irrigation.** Journal of Desalination Vol. 397, 174-84
- Badea, G. E., Caraban, A., Cret, P., dan Corbu, I. 2007. **Hydrogen Electrolysis of Seawater.** Fascicle of Management and Technological Engineering Vol. 6, 244-249
- Balagopal, Shekar., Malhotra, Vinod., Pendleton, Justin., dan Reid, Kathy Jo. 2006. **Electrolytic Process to Produce Sodium Hypochlorite Using Sodium Ion Conductive Ceramic Membranes.** United States Patent; US 8,268,159 B2
- Boal, Andrew K. 2009. **On-Site Generation of Disinfectants.** Virginia: Tech Brief, Spring Vol. 9
- Brewer, Peter G. dan Barry, James. 2008. **Rising Acidity in the Ocean: The Other CO<sub>2</sub> Problem.** <URL:<https://www.scientificamerican.com/article/rising-acidity-in-the-ocean/>> diakses pada 01/01/2018.
- Carmo, Marcelo., Fritz, David L., Mergel, Juergen., dan Stolten, Detlef. 2012. **A Comprehensive Review on PEM Water**

- Electrolysis.** Journal of Hydrogen Energy Vol.38, 4901-4934
- Cavendish, M. 2004. **The Element Platinum.** New York: Benchmark Books
- Creighton, Henry Jermain Maude. 1922. **Electrolytic Concentration of Aqueous Solutions of Nitric Acid.** Journal of the Franklin Institute Vol. 193, 89-95
- Day, R.A., dan Underwood, A.L. 2001. **Analisis Kimia Kuantitatif 6<sup>th</sup> Edition.** Jakarta: Airlangga.
- Diaratih, Vien Inggit. 2015. **Alternatif Pemanfaatan Air Limbah dari Reverse Osmosis dengan Metode Elektrolisis untuk Menghasilkan Gas Oksigen, Hidrogen, dan Chlor.** Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- Dincer, Ibrahim. 2008. **Hydrogen and Fuel Cell Technologies for Sustainable Future.** Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering Vol. 2, 01-14.
- Dogra. 1990. **Kimia Fisik dan Soal-Soal.** Jakarta: Universitas Indonesia.
- Du, Xuezhong., Yu, Jingrong. Yi, Baolian. Han, Ming. dan Bi, Kewan. 2001. **Performances of Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Alternate Membranes.** Journal of Physics Chemistry Vol. 3, 3175-3179.
- Dwimerti, K. L. dan Handjani, M. 2010. **Studi Optimasi Penggunaan Lahan Basah untuk Penyisihan Padatan Terlarut pada Air Terproduksi.** Jurnal Teknik Lingkungan Vol. 16, 125-137
- Eggen, Per-Odd. 2009. **A Simple Hydrogen Electrode.** Journal of Chemical Education Vol. 86, 352-354
- Elicker, C., Filho, Sanches., dan Castagno, K.R.L. 2014. **Electroremediation of Heavy Metals In Sewage Sludge.** Brazilian Journal of Chemical Engineering Vol. 31, 365-371
- Elimelech, Menachem. dan Phillip, William A. 2011. **The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment.** Journal of Science Vol. 333, 712-717.
- Eri, Iva Rustanti. **Pengaruh Koagulan Alami dan Sintetis Proses Basa pada Pemodelan Pengendapan Selektif Pemurnian Reject Water SWRO.** Surabaya: ITS



- Farooque, Mohammad. dan Maru, Hans C. 2001. Fuel Cells—The Clean and Efficient Power Generators. **Proceedings of the IEEE**. 12 Desember 2001, hal. 1819-1829.
- Fondriest Environmental, Inc. 2014. **Conductivity, Salinity and Total Dissolved Solids**. <[URL: http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/](http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/)> diakses pada 01/01/2018.
- Fondriest Environmental, Inc. 2014. **pH of Water**. <[URL: http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/](http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/)> diakses pada 01/01/2018
- Faile, Ines. 2004. Multi- dimensional Aspects of Wastewater Treatment – Fez: What Happens When You Don't Get It Right. Water Week 2004 Session: Innovations in Urban Wastewater.<[URL: http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources/4602122-1213366294492/5106220-1213389414833/6.3Aspects\\_of\\_Wastewater\\_Treatment.pdf](http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources/4602122-1213366294492/5106220-1213389414833/6.3Aspects_of_Wastewater_Treatment.pdf)> diakses 20/05/2018
- Fravel, Harold. 2014. **Understanding Salt Passage Vs. Salt Rejection in Reverse Osmosis Systems**. <[URL: https://www.wateronline.com/doc/understanding-salt-passage-vs-salt-rejection-in-reverse-osmosis-systems-0001](https://www.wateronline.com/doc/understanding-salt-passage-vs-salt-rejection-in-reverse-osmosis-systems-0001)> diakses 30/12/2017.
- Ghaffour, Noreddine., Lattemann, Sabine., Missimer, Thomas M., Ng, Kim Choon., Sinha, Shah Nawaz., dan Amy, Gary L. 2014. **Renewable energy-driven innovative energy-efficient desalination technologies**. Journal of Applied Energy Vol. 136, 1155-1165
- Glass, M. 1999. **Fuel Cell Codes and Standards Summit III Summary** dalam U.S. Department of Energy. Fuel Cell Handbook 5<sup>th</sup> Edition. Morgantown: National Energy Technology Laboratory
- Guler, E., Onkal, Engin G., Celen, M., dan Sari, Erkan H. 2015. **Cost Analysis of Seawater Desalination Using an Integrated Reverse Osmosis System on a Cruise Ship**. Journal of Global NEST Vol. 17, 389-396.
- Gupta, Vinod K., Ali, Imran., Saleh, Tawfik A., Nayaka, Arunima., dan Agarwal, Shilpi. 2012. **Chemical Treatment**

- Technologies for Waste-Water Recycling—An Overview.** Journal of The Royal Society of Chemistry Vol. 2, 6380-6388.
- Hampton, W.H. 1925. **The Potentials of The Iron Electrode.** Journal of Physics Chemistry Vol. 30, 980-981
- Hardee, K. L. dan Bard, A. J. 1976. **Semiconductor Electrodes: V. The Application o Chemically Vapor Deposited Iron Oxide Films to Photosensitized Electrolysis.** Journal o The Electrochemical Society Vol. 123, 1024-1026
- Heansa Kimia. 2018. **Katalog Produk.** <URL: <https://www.tokopedia.com/heansakimia>> diakses 16/05/2018
- Hoogers. 2002. **Fuel Cell Technology Handbook.** Boca Raton: CRC Press
- Indriaty, Putri Wahyuni. 2010. **Analisis Efisiensi Desalinasi Unit 1 B Pt. Pembangkit Jawa Bali UP. Muara Karang.** Jakarta: Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Jacobs, Jeffrey. 2016. **Economic Modelling of Cost Effective Hydrogen Production from Water Electrolysis by Utilizing Iceland's Regulating Power Market.** Thesis for M.Sc in Sustainable Energy. Iceland: Reykjavic University
- Kashyap, V. A. 2004. **PEM Fuel Cell Power Plant Simulation Using MATLAB** dalam Kuncoro, Dhanar Dwi. Simulasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) sebagai Pembangkit Listrik Perumahan. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Khordagui, H. 1997. **Environmental Aspects of Brine Reject from Desalination Industry in The ESCWA Region.** Beirut: ESCWA
- Kuncoro, Dhanar Dwi. 2008. **Simulasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) sebagai Pembangkit Listrik Perumahan.** Jakarta: Universitas Indonesia.
- Kurt, C. dan Bittner, J. 2000. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.** Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Lewabrane. 2013. **Reverse Osmosis Theory Principles of Reverse Osmosis Membrane Separation.** Köln Germany: LANXESS Deutschland GmbH.

- Lee, Kwanghyun., Choi, YongJin., Kim, Yong-Cheol., dan Lee, Jong-Baek. 2013. **The Evaluation of RO Membrane Performance with Pretreatment Membrane on Municipal Sewage Treatment**. Journal of Desalination and Water Treatment Vol. 51, 01-07.
- Linden, David. 1990. **Handbook of Batteries and Fuel Cell**. New York USA: McGraw-Hill
- Luo, Haiping., Li, Hui., dan Lu, Yaobin. 2017. **Treatment of Reverse Osmosis Concentrate Using Microbial Electrolysis Desalination and Chemical Production Cell**. Journal o Desalination Vol 408, 52-59
- MathWorks. 2013. **MATLAB Primer R2013a**. Natick: The MathWorks, Inc.
- Migliorini, Giorgio dan Luzzo, Elena. 2004. **Seawater Reverse Osmosis Plant Using the Pressure Exchanger for Energy Recovery: A Calculation Model**. Journal of Desalination Vol. 165, 289-298
- Miller, James E. 2003. **Review of Water Resources and Desalination Technologies**. California USA: Sandia National Laboratories.
- Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, A. G., Kesmez, M., Parga, J., dan Cocke D. L. 2004. **Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation**. Journal of Hazard. Materials Vol. B114, 199–210.
- Murry, Mc. John dan Robert, C.F. 2001. **Chemistry**. New Jersey USA: Prentice Hall.
- National Institute of Standards and Technology. 2017. **NIST Chemistry WebBook; NIST Standard Reference Database Number 69**. <URL: <https://h2tools.org/tools>> diakses pada 27/04/2018
- Nel ASA. 2016. **The World's Most Efficient and Reliable Electrolyser**. Nel Hydrogen Electrolyser
- Nontji, A. 2005. **Laut Nusantara**. Jakarta: Ed. Ke IV Djambatan.
- Parmariza, Yennida. 2014. **Studi Kelayakan Bisnis**. Jakarta: PPBA-UMB Universitas Mercu Buana
- Peckner, Donald. dan Bernstein, Irving Melvin. 1977. **Handbook of Stainless Steels**. USA: McGraw-Hill.
- Pennsylvania State Association of Township Supervisors (PSATS). 2013. **Drinking Water Plant Operator**

**Certification Training Module 25: Hypochlorite.** Penn State Harrisburg Environmental Training Centre  
Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 492 Tahun 2010 tentang **Persyaratan Kualitas Air Minum**  
Peraturan Menteri (Permen) Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang **Baku Mutu Air Limbah**

- Perusahaan Listrik Negara. 2018. Tarif Dasar Listrik 2018. <URL: <https://infopln.com/2017/09/05/tarif-dasar-listrik-juli-september-2017/>> diakses pada 23/01/2018
- Phy Edumedia. 2017. **Katalog Harga Jual Bahan Kimia Laboratorium.** <URL: <http://www.phyedumedia.com/2017/01/jual-bahan-kimia-laboratorium-sekolah.html>> diakses 16/05/2018
- Praneeth, K., Manjunath D., Suresh K., Bhargava, Tardio, J., dan Sridhar, S. 2013. **Economical Treatment of Reverse Osmosis Reject of Textile Industry Effluent by Electrodialysis–Evaporation Integrated Process.** Journal of Desalination Vol. 333, 82-91
- PubChem. 2005. **Sodium Hydroxide.** <URL: [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/sodium\\_hydroxide#section=Top](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/sodium_hydroxide#section=Top)> diakses pada 23/01/2018
- Rao, Sharat V. Agustus 2016. **Reverse Osmosis Reject Water – Methods of Disposal.** Indian Plumbing Today, 26-28
- Rau, Greg H. 2008. **Electrochemical Splitting of Calcium Carbonate to Increase Solution Alkalinity: Implications for Mitigation of Carbon Dioxide and Ocean Acidity.** Journal of Environmental Science Tech Vol. 42, 8935-8940
- Raventos, N., Macpherson, dan A., Garcia-Rubies, A. 2006. **Effect of Brine Discharge from a Desalination Plant on Macrobenthic Communities in the NW Mediterranean.** Journal of Marine Environmental Research Vol. 62, 1-14.
- Rivai, Harrizul. 1995. **Asas Pemeriksaan Kimia.** Jakarta: UI-Press
- Rosley, M. Nazry Bin., Tamaldin, Noreffendy Bin., Abdollah, M. F. B., dan Zulfattah, Z. M. 2015. **The Effects of Voltage Flow and pH Value in Alkaline Electrolyser System to Performance.** Applied Mechanics and Materials Journal Vol. 773-774, 440-444

- Said, Nusa Idaman. 2008. **Teknologi Pengolahan Air Minum: Teori dan Pengalaman Praktis**. Jakarta: PTL-BPPT
- Saleet, Hanan., Abdallah, Salah., dan Yousem, Essaf. 2017. **The Effect of Electrical Variables on Hydrogen and Oxygen Production Using a Water Electrolyzing System**. International Journal of Applied Engineering Research Vol 12, 3730-3739
- Santos, Diogo M. F. dan Sequeira César A. C. 2013. **Hydrogen Production by Alkaline Water Electrolysis**. Química Nova Journal Vol. 36, 1176-1193
- Satish. 2016. **Disposal of Reverse Osmosis Reject Water for Achieving Zero Liquid Discharge (ZLD)**. International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM) Vol. 3, 414-416.
- Sawyer, C.N., Perry, L.M., dan Gene, F.P. 2003. **Chemistry for Environmental Engineering and Science**. Singapore: 5th ed. McGraw Hill.
- Skoog, D. A., West, D. M., dan Holler, F. J. 1993. **Principle of Instrumental Analysis, 6th Ed**. Philadelphia: Saunders Collage Pub.
- Smolinka, Tom., Ojong, Emile Tabu., Garche, Ju"rgen. **Hydrogen Production from Renewable Energies Electrolyzer Technologies**. Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, 103-128
- Sötemann, SW., Wentzel, MC., dan Ekama, GA. **Mass Balance-Based Plant-Wide Wastewater Treatment Plant Models – Part 4: Aerobic Digestion of Primary and Waste Activated Sludges**. Journal of Water SA Vol. 32, 297-306
- Teknopoli. 2009. **Gas Density, Molecular Weight, and Density**. <URL: [http://www.teknopoli.com/PDF/Gas\\_Density\\_Table.pdf](http://www.teknopoli.com/PDF/Gas_Density_Table.pdf)> diakses pada 27/04/2018
- Temeev, A. A., Belokopytov, Viktor P., dan Temeev, Sergey A. 2006. **An Integrated System of the Floating Wave Energy Converter and Electrolytic Hydrogen Producer**. Journal of Renewable Energy Vol. 31, 225-239
- Thomas Scientific. 2018. **Hoffman Electrolysis Apparatus**. <URL: <https://www.thomassci.com/Laboratory->

[Supplies/Chemistry-Kits/ /Hoffman-Electrolysis-Apparatus](#)> diakses pada 19/04/2018

- Tilley, R. J. D. 2013. **Understanding Solids: The Science of Materials, 2<sup>nd</sup> Edition**. USA: John Wiley and Sons.
- Tjollenng, Amir. 2017. **Pengantar Pemrograman MATLAB**. Jakarta: Elex Media Komputindo.
- Trautz, Max. 1916. **Die Theorie der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit und ein neues Grenzgesetz für ideale Gase** dalam [IUPAC] International Union of Pure and Applied Chemistry. 1987. Compendium of Chemical Terminology. Switzerland: IUPAC
- UBJOM PLTU Paiton Unit 9. 2017. **Data Eksternal Treatment Water Desember 2017**.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2016. **Six Common Air Pollutants**. <URL:<http://www.epa.gov/airquality/urbanair>> diakses pada 22/12/2017.
- U.S. Department of Energy. 2000. **Fuel Cell Handbook 5<sup>th</sup> Edition**. Morgantown: National Energy Technology Laboratory
- U.S. Department of Energy. 2002. **Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program**. Washington: Office of Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies
- U.S. Department of Energy. 2006. **Hydrogen Fuel Cell**. <URL:<http://www.hydrogen.energy.gov>> diakses pada 02/01/2018
- U.S. Department of Energy. 2014. **Electrolysis of Water**. US: Energy Education and Workforce Development
- Walton, N.R.G. 1989. **Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids- What is Their Precise Relationship?**. International Journal of Desalination Vol. 72, 275-292
- Weber-Scannel, P. dan Duffy, I. 2007. **Effects of Total Dissolved Solids on Aquatic Organisms: A Review of Literature and Recommendation for Salmonid Species**. American Journal of Environmental Science Vol. 3, 1-6
- World Health Organization. 1996. **Total Dissolved Solids in Drinking-Water. Guidelines For Drinking-Water Quality, 2nd ed**. Geneva: WHO.

- Widodo, Didik Setiyo., Gunawan, dan Kristanto, Wahyu Adi. **Elektroremediasi Perairan Tercemar: Penggunaan Grafit pada Elektrodekolorisasi Larutan Remazol Black B.** Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi Vol. 11, 34-37
- Wilf, Mark. 2010. Future of the Osmotic Processes. Journal of Desalination and Water Treatment Vol. 15, 292-298
- Wulansari, R. 2013, **Pengaruh Elektroda Grafit-Grafit, Aluminium-Grafit, dan Seng-Grafit pada Elektrolisis Cobalt (Co<sup>2+</sup>) Dengan Pengotor Ion Seng (Zn<sup>2+</sup>),** E-Journal Karya Ilmiah S1, UNDIP, Vol 1, No 1.
- Yuvaraj, A.L., dan Santhanaraj, D. 2014. **A Systematic Study on Electrolytic Production of Hydrogen Gas by Using Graphite as Electrode.** Journal of Materials Research Vol. 17, 83-87
- Zhang, Houcheng., Lin, Guoxing., dan Chen, Jinchan. 2010. **Evaluation and Calculation on the Efficiency of a Water Electrolysis System for Hydrogen Production.** International Journal of Hydrogen Energy Vol. 35, 10851-1085

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



# LAMPIRAN

## Lampiran I Data Hasil Laboratorium

Tabel 1. Rekapitulasi Produksi Gas Hidrogen Proses Elektrolisis

Jam ke-	BWRO, 6V	BWRO, 9V	BWRO, 13,8V	SWRO, 6V	SWRO, 9V	SWRO, 13.8V
0	0	0	0	0	0	0
1	0	1.5	0	19	33.5	64
2	1	2.9	6	39	81.5	129
3	2	4.3	8	59	112	194
4	2.2	6.3	8	80	152.5	257
5	2.4	9.3	15.5	99	191	319
6	3.4	11.3	17.5	120	239.5	381
7	3.4	14.3	20.5	141	271.5	437
8	3.4	16.3	23.5	159	286.5	495
9	3.4	18.3	27.5	178	320	551
10	3.4	19.3	33	200	364	609
11	3.4	20.3	34	219.5	394.5	643
12	3.4	20.8	35	242.5	428	717.5

Tabel 2. Rekapitulasi Produksi Gas Oksigen Proses Elektrolisis

Jam ke-	BWRO, 6V	BWRO, 9V	BWRO, 13,8V	SWRO, 6V	SWRO, 9V	SWRO, 13.8V
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0.8	6.5	2
2	0	0	0.5	1.6	12.5	5.25
3	0	0	0.5	2.4	16.5	7.75

Jam ke-	BWRO, 6V	BWRO, 9V	BWRO, 13,8V	SWRO, 6V	SWRO, 9V	SWRO, 13.8V
4	0	0	0.5	3.55	21.5	17.75
5	0.2	0.5	1	4.55	26.5	34.75
6	0.3	0.5	1.5	5.8	34.5	54.25
7	0.3	0.7	1.5	7.55	40	75.25
8	0.3	0.9	1.5	8.55	43.5	96.25
9	0.3	1.1	1.5	9.55	52.5	118.25
10	0.3	1.1	1.5	10.05	69	141.75
11	0.3	1.1	1.5	11.55	78	156.75
12	0.3	1.1	1.5	13.55	87	186.75

Tabel 3. Produksi Gas Elektrolisis BWRO 6 Volt

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
7.38	0	0	8.36
8.38	0	0	8.25
9.38	1	0	8.21
10.38	1	0	8.2
11.38	0.2	0	8.01
12.38	0.2	0.2	8.2
13.38	1	0.1	8.33
14.38	0	0	8.34
15.38	0	0	7.63
16.38	0	0	8.24
17.38	0	0	8.25
18.38	0	0	8.46
19.38	0	0	8.22
Total Gas/ Rata-rata Arus	3.4	0.3	8.21

Tabel 4. Produksi Gas Elektrolisis BWRO 9 Volt

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
8.36	0	0	9.2
9.36	1.5	0	9.04
10.36	1.4	0	8.74
11.36	1.4	0	8.73
12.36	2	0	8.87
13.36	3	0.5	8.95
14.36	2	0	9.23
15.36	3	0.2	8.4
16.36	2	0.2	9.15
17.36	2	0.2	8.9
18.36	1	0	9.7
19.36	1	0	8.9
20.36	0.5	0	8.65
Total Gas/ Rata-rata Arus	20.8	1.1	8.96

Tabel 5. Produksi Gas Elektrolisis BWRO 13.8 Volt

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
9	0	0	9.06
10	0	0	9.02
11	6	0.25	9.04
12	2	0.25	9.22
13	3	0.25	9.2
14	3.5	0.5	9.13
15	2	0.25	9.16

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
16	3	0	9.08
17	3	0	9.05
18	4	0	9.03
19	5.5	0	9.01
20	1	0	8.98
21	1	0	9.19
Total Gas/ Rata-rata Arus	35	1.5	9.09

Tabel 6. Produksi Gas Elektrolisis SWRO 6 Volt

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
7.44	0	0	8.62
8.14	9	0.4	7.87
8.44	10	0.4	8.22
9.14	10.5	0.4	7.8
9.44	9.5	0.4	7.65
10.14	10	0.4	7.45
10.44	10	0.4	8.23
11.14	10	0.4	8.07
11.44	11	0.75	8.18
12.14	10	0.5	8.25
12.44	9	0.5	7.77
13.14	11	0.5	7.14
13.44	10	0.75	7.45
14.14	8	1	8.94
14.44	13	1	7.96

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
15.14	7	0.75	7.33
15.44	11	0.5	7.78
16.14	8	0.5	8.1
16.44	11	1	7.9
17.14	10	1	7.83
17.44	12	1	8.08
18.14	7	0.5	8.27
18.44	12.5	0.5	7.67
19.14	11	0	8.45
19.44	12	0	8.28
Total Gas/ Rata-rata Arus	242.5	13.55	7.97

Tabel 7. Produksi Gas Elektrolisis SWRO 9 Volt

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
8.55	0	0	8.76
9.25	15	3	8.63
9.55	18.5	3.5	8.62
10.25	19	3	8.56
10.55	29	3	8.87
11.25	16	2	8.75
11.55	14.5	2	8.73
12.25	19	2.5	8.54
12.55	21.5	2.5	8.4
13.25	19.5	2.5	8.29
13.55	19	2.5	8.28

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
14.25	30.5	5.5	8.6
14.55	18	2.5	8.5
15.25	16	3	8.5
15.55	16	3.5	8.54
16.25	15	3.5	8.55
16.55	18.5	3	8.6
17.25	15	5	8.8
17.55	15	8	8.7
18.25	15	5.5	9.08
18.55	15	3	8.75
19.25	14	4.5	8.52
19.55	16.5	4.5	8.5
20.25	16.5	4.5	8.57
20.55	17	4.5	8.69
Total Gas/ Rata-rata Arus	428	87	8.43

Tabel 8. Produksi Gas Elektrolisis SWRO 13.8 Volt

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
7.20	0	0	9.12
7.50	14	0.5	9.02
8.20	15.5	0.5	8.86
8.50	13	0.5	8.86
9.20	6	0.25	8.62
9.50	14	1	8.6
10.20	20	0.5	8.71

Waktu	Volume H2	Volume H2	Arus
	(ml)	(ml)	(A)
10.50	16	3	8.63
11.20	31	6	8.67
11.50	0	0	8.21
12.20	44.5	16	9.1
12.50	11	4.5	8.39
13.20	17	5	8.2
13.50	0	0	8.03
14.20	14.5	5	8.48
14.50	17.5	7	8.31
15.20	26	9	8.13
15.50	28.5	9	8.04
16.20	13.5	6	8.1
16.50	16.5	2	8.11
17.20	14	3	9.11
17.50	12	4	9.05
18.20	0	0	8.04
18.50	12	3	8.01
19.20	14.5	5	9.24
Total Gas/ Rata-rata Arus	717.5	186.75	8.570816

Tabel 10. Pembentukan Ion Pada Elektrolit

	Ion yang Terbentuk	Konsentrasi (meq/L)	Konsentrasi (mg/L)
BWRO 6V			
Katoda	Ca(OH) <sub>2</sub>	3.57	132.24

	Ion yang Terbentuk	Konsentrasi (meq/L)	Konsentrasi (mg/L)
	Mg(OH) <sub>2</sub>	17.86	519.63
	NaOH	27.90	1116.04
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.90	64.19
	NaCl	29.58	1727.59
	KCl	4.66	347.31
	Total	84.48	
Anoda	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	59.50	4353.79
	NaHCO <sub>3</sub>	9.25	781.01
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.45	31.79
	NaCl	27.03	1578.64
	KCl	2.94	218.68
	Total	99.17	
BWRO 9V			
Katoda	Ca(OH) <sub>2</sub>	10.72	396.57
	Mg(OH) <sub>2</sub>	8.92	259.54
	NaOH	54.36	2174.55
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.33	23.35
	NaCl	34.24	1999.81
	KCl	7.12	530.40
	Total	115.69	
Anoda			
	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	9.85	797.51



	Ion yang Terbentuk	Konsentrasi (meq/L)	Konsentrasi (mg/L)
	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	5.92	433.19
	NaHCO <sub>3</sub>	52.21	4406.15
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.63	44.74
	NaCl	26.15	1527.31
	KCl	6.38	475.66
	Total	101.14	
BWRO 13.8V			
Katoda			
	Ca(OH) <sub>2</sub>	14.29	528.67
	Mg(OH) <sub>2</sub>	11.90	346.26
	NaOH	72.49	2899.62
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.07	5.19
	NaCl	38.21	2231.35
	KCl	8.85	659.40
	Total	145.81	
Anoda			
	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>1</sub>	8.82	714.27
	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	56.62	4143.20
	NaHCO <sub>3</sub>	44.56	3760.99
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.81	57.59
	NaCl	38.91	2272.32
	KCl	6.75	502.95
	Total	156.48	

	Ion yang Terbentuk	Konsentrasi (meq/L)	Konsentrasi (mg/L)
SWRO 6V			
Katoda	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	13.10	1060.78
	Ca(OCl) <sub>2</sub>	129.75	11612.47
	Mg(OCl) <sub>2</sub>	178.49	9925.21
	NaOCl	286.42	10654.69
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	70.09	4976.27
	NaCl	17.34	1012.67
	KCl	29.95	2231.37
	Total	725.14	
Anoda	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6.61	535.08
	Ca(OCl) <sub>2</sub>	172.00	15393.92
	Mg(OCl) <sub>2</sub>	267.79	14890.20
	NaOCl	179.46	6675.96
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	67.04	4759.70
	NaCl	17.62	1028.77
	KCl	21.04	1567.57
	Total	731.55	
SWRO 9V			
Katoda	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	9.81	794.31
	Ca(OCl) <sub>2</sub>	150.97	13511.60
	Mg(OCl) <sub>2</sub>	267.79	14890.74

	Ion yang Terbentuk	Konsentrasi (meq/L)	Konsentrasi (mg/L)
	NaOCl	195.64	7277.83
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	71.91	5105.78
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6.05	353.51
	KCl	21.79	1623.48
	Total	723.97	
Anoda			
	Ca(OCl) <sub>2</sub>	142.87	12786.46
	Mg(OCl) <sub>2</sub>	267.69	14885.03
	NaOCl	218.51	8128.47
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	67.22	4772.89
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9.50	554.82
	KCl	13.23	985.51
	Total	719.02	
SWRO 13.8V			
Katoda	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6.60	534.66
	Ca(OCl) <sub>2</sub>	64.78	5797.57
	Mg(OCl) <sub>2</sub>	148.80	8 273.90
	NaOCl	371.32	13813.22
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	44.30	3145.56
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21.14	1234.86
	KCl	12.08	900.17
	Total	669.03	

	Ion yang Terbentuk	Konsentrasi (meq/L)	Konsentrasi (mg/L)
Anoda			
	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1.66	134.21
	Ca(OCl) <sub>2</sub>	141.17	12634.54
	Mg(OCl) <sub>2</sub>	208.22	11577.93
	NaOCl	225.67	8394.93
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	60.86	4321.31
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	14.58	851.52
	KCl	8.39	625.43
	Total	660.55	

Tabel 9. Hasil Analisis Laboratorium

	BWRO Awal	BWRO, 6V		BWRO, 9V		BWRO, 13,8V	
	(mg/L)	Katoda	Anoda	Katoda	Anoda	Katoda	Anoda
Na+	125	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	32.57	214.29	714.29	107.14	88.86	142.86	678.57
Ca+	0	71	0	214.29	196.86	285.71	178.57
K+	10	0	0	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	56	0	4195	0	5034	0	6712
Cl <sup>-</sup>	716	1215.43	1063.50	1468.64	1443.32	1671.21	1620.57
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	17.19	43.59	21.88	15.4	37.82	3.15	39.1
OH <sup>-</sup>	0	839	0	1258.5	0	1678	0
OCl <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0
TDS	1060	1183	1533	1222	1767	1396	2158
pH	6.55	10.21	2.79	10.75	2.51	11.05	2.39
Salinitas	1.19	1.21	1.59	1.28	1.85	1.4	2.44

Tabel 9. Hasil Analisis Laboratorium

	SWRO Awal	SWRO, 6V		SWRO, 9V		SWRO, 13.8V	
	(mg/L)	Cathode	Anode	Cathode	Anode	Cathode	Anode
Na+	7000	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	1765.71	2142.86	3214.29	3214.29	3214	1785.71	2500.00
Ca+	400	2857.14	3571.43	3214.29	2857.14	1428.57	2857.14
K+	1111	0	0	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	132	800	400	600	0	400	100
Cl <sup>-</sup>	17860	1675.65	1374.89	988.20	472.62	30132.50	29626.07
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	3223.38	3366.24	3215.75	3453.37	3683.06	3144.46	3619.7
OH <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0
OCl <sup>-</sup>	0	30638.93	31905.00	31651.79	32411.43	429.65	300.76
TDS	26400	31200	32000	28700	30100	28600	29500
pH	8.15	5.93	1.85	9.3	2.59	9.63	4.31
Salinitas	33.2	42	42.8	38.2	40.5	38.2	39.3

Tabel 11. Data *Mass Balance*

Variabel		BWRO 6V	BWRO 9V	BWRO 13.8V	SWRO 6V	SWRO 9V	SWRO 13.8V	
Awal	mg/L	1762	1476	1402	32100	31500	30400	
	mL	275	263.5	263.5	267	265	265	
P r o s e s	Elektrolit							
	Katoda	mg/L	1183	1222	1396	31200	28700	28600
		mL	141	130	130	134	129	136
	Anoda	mg/L	1533	1767	2158	32000	30100	29500
		mL	128	127	127	127.5	127.5	122
	Gas							
	Katoda	ml	3.4	20.8	35	242.5	428	717.5
		Densitas (mg/L)	82.35	82.35	82.35	82.35	82.35	82.35
	Anoda	ml	0.3	1.1	1.5	13.55	87	186.75
		Densitas (mg/L)	1331	1331	1331	2994	2994	2994

Variabel		BWRO 6V	BWRO 9V	BWRO 13.8V	SWRO 6V	SWRO 9V	SWRO 13.8V	
	Elektroda							
	Katoda	Awal (gr)	61.65	59.84	59.83	62.67	59.5828	59.739
		Akhir (gr)	61.74	59.84	59.8312	62.72	59.9874	59.7981
	Anoda	Awal (gr)	17.08	17.04	17.04	17.18	15.3574	16.2698
		Akhir (gr)	17.09	17.04	16.9471	17.276	15.4417	16.1529
Lo- ses	mL	6	6.5	6.5	5.5	8.5	7	



## Lampiran II

### Script Model Simulasi

#### Script I. Dasar

```
function [ output_args ] = Untitled2( input_args
)
clear all;
clc;
disp('Mencari Tegangan Hasil Fuel Cell');
disp('=====
==');
disp('Rumus VFC = ENernst - VAct - VOhmic -
VMt');
disp('=====
==');
disp('n      = 2');
disp('R      = 0.08205 L atm/K mol');
disp('F      = 96.485 C/mol');
disp('Pudara = 1 atm');
disp('i      = 0.01 mA/cm^2');
disp('=====
==');
V = input('Masukan Nilai Volume (mL)
: ');
Tc = input('Masukan Nilai Temperature (Celcius)
: ');
Ro = input('Masukan Nilai Densitas H2 pada T
(kg/m3) : ');
disp('=====
==');

n = 2;
R = 0.08205;
i = 0.01;
E0 = 1.229;
Tk = Tc + 273.15;
F = 96.485;
```

```

Rint = 0.191;
Alpha = 0.5;
Alpha1 = 0.085;
cK = 1.1;
Beta = 1.148;
i0 = 0.0001225;
PFC = 1000;
Vol = V / 1000;
RoH2 = Ro / 1000;
Roair = 1;
HHV = 1.481;

X = 2.1974 + (0.02953 * Tc) - (9.1837 * (10^(-
5)) * (Tc^2)) + (1.4454 * (10^(-7)) * (Tc^3));
P_H2O = 10^(-X);

Pudara = 1;
P_O2 = ((Pudara)/( exp(( 4.192 ) * (( i ) / ( Tk
^ 1.334 ) )))) - P_H2O;

P_H2 = ((0.5 * (Pudara))/( exp(( 1.653 ) * (( i
) / ( Tk ^ 1.334 ) )))) - P_H2O;

Vohmic = - (i * Rint);

V_fc = E_nernst - V_act - Vohmic - Vmt;

U_H2 = ((1.047 * (10^(-8)) * (PFC / V_fc)));

U_H2d = U_H2 * 3600 * 24;

M_H2 = (Vol * RoH2)/(12) ;

P_MH2 = (M_H2 * V_fc)/(1.047 * (10^(-8)));

P_MH2d = P_MH2 * 12;

```

```
P_H2O = (9.328 * (10^(-8)) * P_MH2)/(3600 * V_fc  
* Roair);
```

```
P_Panas = 1 * (P_MH2 / V_fc) * (HHV - V_fc);
```

```
X = X  
PH2O = P_H2O  
PH2 = P_H2  
PO2 = P_O2  
Eernst = E_ernst  
Vact = V_act  
Vmt = Vmt  
Vohmic = Vohmic  
VFC = V_fc  
MH2 = M_H2  
PFC = P_MH2  
EFC = P_MH2d  
H2O = P_H2O  
Kalor = P_Panas  
end
```

## Script 2. Graphic User Interface

```
function varargout = ProgramNissa(varargin)
% PROGRAMNISSA MATLAB code for ProgramNissa.fig
%     PROGRAMNISSA, by itself, creates a new
PROGRAMNISSA or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = PROGRAMNISSA returns the handle to a
new PROGRAMNISSA or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%
PROGRAMNISSA('CALLBACK', hObject,eventData,handle
s,...) calls the local
%     function named CALLBACK in PROGRAMNISSA.M
with the given input arguments.
%
%     PROGRAMNISSA('Property','Value',...)
creates a new PROGRAMNISSA or raises the
%     existing singleton*. Starting from the
left, property value pairs are
%     applied to the GUI before
ProgramNissa_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid
value makes property application
%     stop. All inputs are passed to
ProgramNissa_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu.
Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to
help ProgramNissa
```

```

% Last Modified by GUIDE v2.5 17-May-2018
14:59:43

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',           mfilename,
...
                  'gui_Singleton',
gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',
@ProgramNissa_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',
@ProgramNissa_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',    [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback =
str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] =
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before ProgramNissa is made
visible.
function ProgramNissa_OpeningFcn(hObject,
eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see
OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user
data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to
ProgramNissa (see VARARGIN)

% Choose default command line output for
ProgramNissa
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes ProgramNissa wait for user
response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user
data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user
data (see GUIDATA)
set(handles.edit2, 'String', ''); % Clear edit
field control with tag "edit2"

```

```

set(handles.edit3, 'String', ''); % Clear edit
field control with tag "edit3"
set(handles.edit4, 'String', ''); % Clear edit
field control with tag "edit4"

function edit1_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user
data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents
of edit1 as text
%          str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after
setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until
after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white
background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user
data (see GUIDATA)
V = eval(get(handles.edit2, 'string'));
Tc = eval(get(handles.edit3, 'string'));
Ro = eval(get(handles.edit6, 'string'));

n = 2;
R = 0.08205;
i = 0.01;
EO = 1.229;
Tk = Tc + 273.15;
F = 96.485;
Alpha = 0.5;
i0 = 0.0001225;
Vmt = -0.0009814;
Vohmic = 0.00191;
PFC = 1000;
Vol = V / 1000;
RoH2 = Ro / 1000;
Roair = 1;
HHV = 1.481;

X = 2.1974 + (0.02953 * Tc) - (9.1837 * (10^(-
5)) * (Tc^2)) + (1.4454 * (10^(-7)) * (Tc^3));
P_H2O = 10^(-X);

Pudara = 1;
P_O2 = ((Pudara)/( exp(( 4.192 ) * (( i ) / ( Tk
^ 1.334 ) )))) - P_H2O;

P_H2 = ((0.5 * (Pudara))/( exp(( 1.653 ) * (( i
) / ( Tk ^ 1.334 ) )))) - P_H2O;

```



```

my_ln1= log((P_H2 * (P_O2^0.5))/P_H2O) / log(
exp(1) );
E_ernst = E0 + ((R*Tk)/(2*F)) * (my_ln1);

M_H2 = (Vol * RoH2)/(12) ;

P_MH2 = (M_H2 * V_fc)/(1.047 * (10^(-8)));

P_MH2d = P_MH2 * 12;

P_H2O = (9.328 * (10^(-8)) * P_MH2)/(3600 * V_fc
* Roair);

P_Panas = 1 * (P_MH2 / V_fc) * (HHV - V_fc);

%PH2 = P_H2
%PH2O = P_H2O
%PO2 = P_O2
%Enernst = E_ernst
%Vact = V_act
VFC = V_fc
PFC = P_MH2
EFC = P_MH2d
H2O = P_H2O
Kalor = P_Panas

set(handles.edit4,'string',VFC);
set(handles.edit7,'string',PFC);
set(handles.edit8,'string',EFC);
set(handles.edit9,'string',H2O);
set(handles.edit10,'string',Kalor);

function edit4_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles structure with handles and user
data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents
of edit4 as text
% str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit4 as a double

% Hint: edit controls usually have a white
background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles structure with handles and user
data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents
of edit2 as text
% str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit2 as a double

% --- Executes during object creation, after
setting all properties.

```

```

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until
after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white
background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user
data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents
of edit3 as text
%         str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit3 as a double

% --- Executes during object creation, after
setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)

```

```
% eventdata reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until
after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white
background on Windows.
```

```
% See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit7_Callback(hObject, eventdata,
handles)
```

```
% hObject handle to edit7 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
```

```
% handles structure with handles and user
data (see GUIDATA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents
of edit7 as text
```

```
% str2double(get(hObject,'String'))
```

```
returns contents of edit7 as a double
```

```
function edit8_Callback(hObject, eventdata,
handles)
```

```
% hObject handle to edit8 (see GCBO)
```

```
% eventdata reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
```

```

% handles      structure with handles and user
data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents
of edit8 as text
%           str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after
setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until
after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white
background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.

function edit9_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user
data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents
of edit9 as text
%           str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit9 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after
setting all properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until
after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white
background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit10_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user
data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents
of edit10 as text
%         str2double(get(hObject,'String'))
returns contents of edit10 as a double

% --- Executes during object creation, after
setting all properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)

```

```
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until
after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white
background on Windows.
```

```
%         See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit6_Callback(hObject, eventdata,
handles)
```

```
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
```

```
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
```

```
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a
future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until
after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white
background on Windows.
```

```
%         See ISPC and COMPUTER.
```



```
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```



**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



**Lampiran III**  
**Dokumentasi Penelitian**

No	Gambar	Keterangan
1		Proses Sampling Air Limbah BWRO
2		Proses Sampling Air Limbah SWRO

3		Rangkaian Reaktor Elektrolisis
4		Elektroda Kiri: Grafit-Anoda Kanan: Perak-Katoda

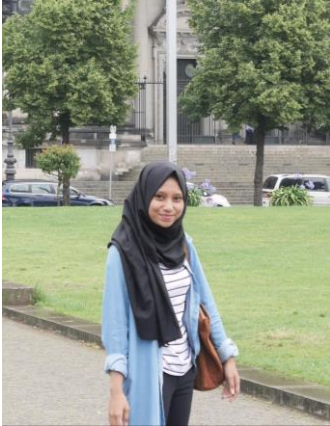
5	 A laboratory setup for the SWRO process. It features a central metal stand with two vertical glass tubes. The tubes are connected to a power source at the bottom. The setup is placed on a white surface. In the background, there are shelves with various bottles and a sign that reads "TA Nisse M.j." and "0400016 (0812119)".	Proses Running Elektrolisis (SWRO)
6	 A laboratory setup for the BWRO process. It features a central metal stand with two vertical glass tubes. The tubes are connected to a power source at the bottom. The setup is placed on a white surface. In the background, there are shelves with various bottles and a sign that reads "TA Nisse M.j." and "0400016 (0812119)".	Proses Running Elektrolisis (BWRO)

7



Elektrolit  
Hasil  
Elektrolisis

## BIOGRAFI PENULIS



Nama Penulis adalah Nissa Masturina J. Lahir di Surabaya, pada tanggal 18 Mei 1996. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu TK Cendekia, SD Muhammadiyah 1 Sidoarjo, SMPN 4 Sidoarjo, dan SMA Muhammadiyah 2 Sidoarjo. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan, ITS, pada tahun 2014. Selama di bangku kuliah, Penulis aktif di berbagai organisasi internal kampus seperti

BEM Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, BEM ITS, dan berbagai kepanitiaan di ITS. Pada tahun pertama, Penulis menjadi Bendahara untuk kegiatan YESS Summit ASEAN dan menjadi *volunteer* di program YELP ITS. Pada tahun kedua, Penulis menjadi staff di Departemen Sosial Masyarakat BEM FTSP ITS dan dilanjutkan menjadi Sekertaris Departemen pada tahun ketiga. Selain itu, pada tahun ketiga hingga keempat penulis menjadi Asisten Direktur Jenderal di BEM ITS untuk Kedirjenan Lingkungan Hidup-Kementerian Sosial Masyarakat. Pada tahun keempat, Penulis diberi kesempatan berupa beasiswa untuk mengikuti semester pendek pada program *Environmental Engineering* di Kassel University, Jerman. Penulis juga telah melakukan Kerja Praktek di PDAM Gianyar, Bali pada departemen *Non-Revenue Water*. Penulis berharap segala bentuk komunikasi baik kritik, saran maupun diskusi yang ingin disampaikan kepada Penulis terkait dengan Tugas Akhir dengan judul “Pengolahan Air Limbah Reverse Osmosis melalui Elektrolisis untuk Menghasilkan Elektrolit Bernilai Ekonomi dan Gas Hidrogen untuk Fuel Cell” ini dapat disampaikan langsung via email di [nissa.mj1@gmail.com](mailto:nissa.mj1@gmail.com).

