

**ANALISIS PEMODELAN *HYDROGEN FUEL CELL* DENGAN
BOOST CONVERTER MENGGUNAKAN MATLAB**

SKRIPSI

untuk memenuhi salah satu persyaratan
mencapai derajat Sarjana S1



**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta
2020**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PEMODELAN *HYDROGEN FUEL CELL* DENGAN *BOOST CONVERTER*

MENGGUNAKAN MATLAB

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Disusun oleh:

Tegar Hery Santoso
16524089

Yogyakarta, 06 Oktober 2020

Menyetujui,

Pembimbing 1



Husein Mubarak, S.T., M.Eng.
NIK. 155241305

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

ANALISIS PEMODELAN *HYDROGEN FUEL CELL* DENGAN *BOOST CONVERTER*

MENGGUNAKAN MATLAB

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Tegar Hery Santoso

16524089

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: 06 Oktober 2020

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : Husein Mubarak, S.T., M.Eng.,

Anggota Penguji 1: Setyawan Wahyu Pratomo, S.T., M.T.,

Anggota Penguji 2: Alvin Sahroni, S.T., M.Eng., Ph.D.,

**Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana**

Tanggal: 06 Oktober 2020

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Yusuf Aziz Amrulloh, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIK. 045240101

PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut diatas.



Yogyakarta, 06 Oktober 2020



Tegar Hery Santoso

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaykum Warahmatullahi Wabarakaatuh.

Puji dan syukur Kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Skripsi dengan judul “Analisis Pemodelan *Hydrogen Fuel Cell* dengan *Boost Converter* Menggunakan MATLAB” dengan baik dan benar. Laporan Tugas Akhir ini wajib ditempuh oleh mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, sebagai bentuk syarat dalam menempuh jenjang Strata 1.

Kelancaran dalam mempersiapkan dan menyelesaikan Laporan Skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan karunia-Nya kepada penulis.
2. Kepada Ibu, Bapak dan Keluarga penulis yang selalu memberikan do'a dan dukungan kepada penulis.
3. Bapak Yusuf Aziz Amrulloh, S.T., M.Eng, Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Medilla Kusriyanto, S.T., M.Eng., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia.
5. Pak Husein Mubarak, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing, yang telah memberikan bantuan dan pengarahan sehingga terselesaikan Laporan Skripsi ini.
6. Segenap Dosen Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu pengetahuan selama duduk di bangku perkuliahan.
7. Keluarga Kontrakan Ceria : Andhikajati Kurnia Adi, Muhammad Farid Akbar, Thomas Edin Riyanto, Hasan Mubarak Gasmi dan Tias Septian Hadi yang telah menemani dalam suka dan duka sampai saat ini.
8. Keluarga KKN 59 Unit 8 : Fahri Noor Azgia, Sakir Salaeman, Augusta Alda Pratomo, Dita Rosalia Arini, Sovia Dwi Natasya Putri, Karina Septiani Marzuni, dan Agestya Puspita Sari yang selalu memberikan semangat.
9. Teman-teman Teknik Elektro khususnya Angkatan 2016 yang telah memberikan do'a dan dukungannya.
10. Semua pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Laporan Skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan saat menyusun laporan kerja praktik ini, sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun agar laporan ini menjadi semakin baik. Akhir kata, penulis berharap agar laporan kerja praktik ini dapat berguna bagi banyak pihak.

Wassalamu'alaykum Warahmatullahi Wabarakaatuh.

Yogyakarta, 21 September 2020



Tegar Hery Santoso



ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

FC	<i>Fuel cell</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
UII	Universitas Islam Indonesia
HHV	<i>Higher Heating Value (V)</i>
A	Luas area <i>fuel cell</i> yang aktif (cm ²)
E _{Nernst}	Tegangan Nernst (V)
E ^o	Tegangan ideal (V)
F	Konstanta Faraday (C/mol)
G	Energi bebas Gibbs (J)
$\Delta(g_f)$	Perubahan energi bebas Gibbs (J)
H	Entalpi
K	Konstanta <i>mass transport loss</i>
N _{Cell}	Jumlah <i>fuel cell</i>
P _{H₂}	Tekanan parsial hidrogen (atm)
P _{O₂}	Tekanan parsial oksigen (atm)
P _{air}	Tekanan udara (atm)
P _{FC}	Daya keluaran <i>fuel cell</i> (W)
S	Entropi
T	Suhu (°K)
V _{FC}	Tegangan keluaran <i>fuel cell</i> (V)
V _{act}	Tegangan aktivasi (V)
V _{ohmic}	Tegangan ohmic (V)
B	Konstanta (V)
R _C	Resistansi konstan (Ω)
ξ ₁ , ξ ₂ , ξ ₃ , ξ ₄	Parameter empiris
J _{max}	Kerapatan arus maksimum <i>fuel cell</i> (A/cm ²)
P _{O₂}	Tekanan parsial oksigen (atm)
Ψ	Kandungan membran air
C _{H₂}	Konsentrasi hidrogen (mol/cm ³)
λ	Ketebalan membran (cm)
T ₁	Suhu awal (°K)
γ	Rasio panas udara

ABSTRAK

Energi berperan sangat penting dalam kehidupan manusia. Setiap tahun, permintaan akan kebutuhan energi terus meningkat dan mayoritas pembangkitan energi menggunakan bahan bakar fosil. Sehingga diperlukan sumber energi yang ramah lingkungan. Salah satu sumber energi yang ramah lingkungan adalah *fuel cell*. *Fuel cell* dapat menghasilkan energi listrik dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan energi listrik yang dihasilkan oleh jaringan daya konvensional. Dalam membuat sistem *fuel cell*, diperlukan suatu pemodelan agar sistem *fuel cell* dapat bekerja dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Salah satu metode untuk memodelkan sistem *fuel cell* adalah dengan menggunakan MATLAB. Penggunaan DC-DC *boost converter* dengan PID *controller* secara *loop* tertutup yang dirancang dengan benar mempunyai peran yang sangat penting untuk mengatur PWM pada saklar DC-DC *boost converter* dan memainkan peran yang sangat penting untuk mengontrol regulasi daya. Pada penelitian ini, dilakukan analisis pemodelan *hydrogen fuel cell* NEXA™ 1.2 kW dengan DC-DC *boost converter* yang dikendalikan oleh PID *controller* untuk desain *Power Conditioning Unit* (PCU) yang ringkas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan dan menganalisis karakteristik dari kinerja sistem *hydrogen fuel cell* dan ujuk kerja PID *controller* dalam meregulasi tegangan keluaran DC-DC *boost converter* pada *hydrogen fuel cell*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja *hydrogen fuel cell* dipengaruhi oleh tekanan gas oksigen, hidrogen, dan temperatur. Semakin besar nilai tekanan gas oksigen, tekanan gas hidrogen, dan temperatur pada *fuel cell*, maka tegangan dan arus keluaran *fuel cell* akan semakin membesar. Hasil simulasi menunjukkan tegangan keluaran *fuel cell* sebesar 47.89 V dengan persentase *error* sebesar 4.22 %, dan arus keluaran *fuel cell* sebesar 23.94 A dengan persentase *error* sebesar 0.25 %, serta daya keluaran *fuel cell* sebesar 1147 W dengan persentase *error* sebesar 4.12 %. Unjuk kerja dari PID *controller* dengan DC-DC *boost converter* dalam meregulasi tegangan keluaran *fuel cell* sangat baik. Hal tersebut ditunjukkan dengan hasil kurva respon untuk arus keluaran *fuel cell* yaitu nilai *rise time* (t_r) sebesar 4 detik, *delay time* (t_d) sebesar 0.2 detik, *peak time* (t_p) sebesar 4 detik, *settling time* (t_s) sebesar 4 detik, dan *maximum overshoot* (M_p) sebesar 0 %. Untuk tegangan keluaran, nilai *rise time* (t_r) sebesar 4 detik, *delay time* (t_d) sebesar 0.2 detik, *peak time* (t_p) sebesar 4 detik, *settling time* (t_s) sebesar 4 detik, dan *maximum overshoot* (M_p) sebesar 0 % dengan parameter nilai *Proportional* (P) sebesar 0.001, *Integral* (I) sebesar 10, dan *Derivative* (D) sebesar 0.

Kata kunci : *Hydrogen fuel cell, DC-DC Boost converter, PID controller, MATLAB*

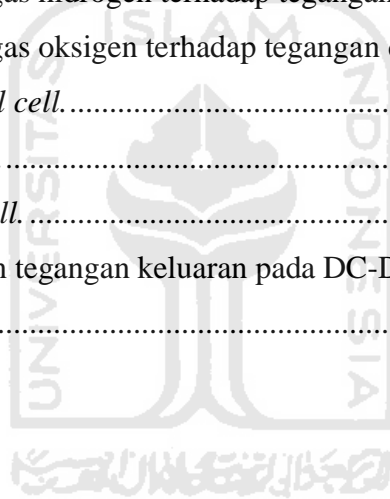
DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Studi Literatur	4
2.2 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2.1 <i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> (PEMFC).....	5
2.2.2 Persamaan Elektrokimia PEMFC	6
2.2.3 Persamaan Nernst untuk Tegangan Reversibel PEMFC.....	6
2.2.4 Tegangan Drop Aktivasi PEMFC	8
2.2.5 Tegangan <i>Ohmic</i> PEMFC	8
2.2.6 Tegangan Drop Konsentrasi PEMFC.....	9
2.2.7 DC-DC <i>Boost Converter</i>	9

2.2.8 PID <i>Controller</i>	10
2.2.9 Tanggapan <i>Transient</i>	11
2.2.10 Persentase <i>Error</i>	12
BAB 3 METODOLOGI	13
3.1 Alur Penelitian	13
3.1.1 Pengumpulan Data	14
3.1.2 Perancangan Sistem dan Pemodelan <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	14
3.1.3 Hasil dan Analisis	14
3.2 Perancangan Simulasi Sistem <i>Hydrogen Fuel Cell</i> FTI UII Menggunakan MATLAB	15
3.2.1 Pemodelan dan Simulasi Sistem <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	15
3.2.2 Pembuatan dan Simulasi Konverter DC-DC <i>Boost</i> dengan Kontroler PID.....	15
3.3 Cara Analisis.....	16
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	18
4.1 Karakteristik Polarisasi Pada <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	18
4.2 Pengaruh Perubahan Suhu terhadap Tegangan dan Arus pada <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	19
4.3 Pengaruh Perubahan Tekanan Gas Hidrogen terhadap Tegangan dan Arus pada <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	20
4.4 Pengaruh Perubahan Tekanan Gas Oksigen terhadap Tegangan dan Arus pada <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	21
4.5 Analisis Kinerja <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	21
4.6 Analisis Unjuk Kerja DC-DC <i>Boost Converter</i> dengan PID <i>Controller</i>	24
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	27
5.1 Kesimpulan	27
5.2 Saran	27
DAFTAR PUSTAKA	28
LAMPIRAN	30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Penampang PEMFC [9].....	5
Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen PEMFC [11].....	6
Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen DC-DC <i>boost converter</i> [15].	9
Gambar 2.4 Diagram blok PID <i>controller</i> [15].....	11
Gambar 2.5 Bentuk sinyal tanggapan <i>transient</i> [17].....	11
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	13
Gambar 3.2 Matlab/Simulink <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	15
Gambar 3.3 Simulasi DC-DC <i>boost converter</i> dengan PID <i>controller</i>	15
Gambar 4.1 Karakteristik polarisasi pada <i>fuel cell</i>	18
Gambar 4.2 Karakteristik perubahan suhu terhadap tegangan dan arus <i>fuel cell</i>	19
Gambar 4.4 Karakteristik tekanan gas hidrogen terhadap tegangan dan arus <i>fuel cell</i>	20
Gambar 4.6 Karakteristik tekanan gas oksigen terhadap tegangan dan arus <i>fuel cell</i>	21
Gambar 4.8 Tegangan keluaran <i>fuel cell</i>	22
Gambar 4.9 Arus keluaran <i>fuel cell</i>	22
Gambar 4.10 Daya keluaran <i>fuel cell</i>	22
Gambar 4.13 Kurva respon arus dan tegangan keluaran pada DC-DC <i>boost converter</i> dengan nilai $P = 0.001$, $I = 10$, dan $D = 0$	25



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter <i>Hydrogen Fuel Cell</i>	14
Tabel 4.1 Konfigurasi PID <i>Controller</i> dan Unjuk Kerja PID <i>Controller</i> dengan DC-DC <i>Boost Converter</i> untuk Arus Keluaran.	24
Tabel 4.2 Konfigurasi PID <i>Controller</i> dan Unjuk Kerja PID <i>Controller</i> dengan DC-DC <i>Boost Converter</i> untuk Tegangan Keluaran.	24



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi berperan sangat penting dalam kehidupan manusia. Misalnya untuk proses industri, penerangan, dan masih banyak peralatan yang memerlukan energi agar dapat bekerja. Sebagian besar produksi energi berasal dari sumber energi fosil berupa minyak bumi dan gas alam. Berdasarkan data *International Energy Agency* (IEA), pada tahun 2018 produksi energi dunia adalah 14.421 Mtoe [1]. Sebagian besar didorong oleh pembangkitan yang berasal dari bahan bakar fosil yaitu sebesar 370 Mtoe. Produksi energi yang berasal dari energi terbarukan dan nuklir juga meningkat, masing-masing sebesar 60 Mtoe dan 19 Mtoe. Bahan bakar fosil pada akhirnya menyumbang lebih dari 81% produksi energi pada tahun 2018 [1].

Penggunaan sumber daya energi secara konvensional semakin terbatas karena pengoperasiannya yang tidak efisien dan tidak rapi. Sektor swasta dan utilitas saat ini berkonsentrasi pada teknologi energi terbarukan dengan manfaat yang terus bertambah karena kebersihan, modularitas, dan keandalannya [2]. Di antara berbagai energi terbarukan misalnya tenaga angin, *solar photovoltaic*, turbin mikro, dan *fuel cell*, pembangkitan terdistribusi berbasis *fuel cell* dianggap sebagai salah satu teknologi yang paling menjanjikan karena efisiensi operasi yang tinggi yaitu 40 % - 60 %, keandalan, dan kemampuan potensial yang lebih tinggi [3][4]. *Fuel cell* merupakan perangkat elektrokimia yang menghasilkan listrik menggunakan gas hidrogen dan gas oksigen sebagai bahan bakar. Dari semua jenis *fuel cell*, PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) telah menjadi pilihan yang menarik karena efisiensinya yang tinggi, suhu operasi yang rendah pada rentang 40°C sampai 100°C, nol emisi, kepadatan daya (*power density*) yang tinggi dan memiliki umur *stack* yang panjang [5].

Dalam penelitian terkini, pemodelan telah menjadi salah satu langkah utama untuk mengembangkan *fuel cell* [6]. Pemodelan *fuel cell* secara elektro-kimia digunakan untuk mensimulasikan dan menguji keseluruhan sistem semirip mungkin dengan kondisi kerja *fuel cell* yang efektif [6]. Pemodelan *fuel cell* pada dasarnya dilakukan dengan menggunakan tiga pendekatan, yaitu analitik, empiris atau semi empiris [6]. Pendekatan analitik akan membantu mencapai model matematika yang dibutuhkan lebih akurat daripada menggunakan pendekatan empiris. MATLAB adalah platform yang lebih baik untuk implementasi model matematika dan pemrosesan yang lebih cepat [6].

Fuel cell beroperasi pada tegangan rendah sehingga tegangan keluarannya harus dinaikkan. Salah satu peralatan elektronika yang dapat menaikkan tegangan adalah DC-DC *boost converter*.

Desain DC-DC *boost converter* beserta pengontrolnya memainkan peran yang sangat penting untuk mengontrol regulasi daya terutama untuk DC bus secara umum. DC-DC *boost converter* menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dan jumlah komponen yang lebih sedikit dibandingkan dengan topologi konverter DC-DC yang lainnya [2].

Tujuan dari desain DC-DC *boost converter* adalah untuk meregulasi tegangan keluaran yang akan tetap dalam kisaran tertentu saat terjadi gangguan [7]. Untuk mencapai tujuan tersebut, loop kontrol umpan balik negatif (*negative feedback control loop*) dimasukkan untuk secara otomatis menyesuaikan siklus kerja PWM agar memiliki tegangan keluaran konstan. PID *controller* telah banyak digunakan untuk mengkompensasi kesalahan yang disebabkan oleh perbedaan antara tegangan referensi (*set point voltage*) dan tegangan umpan balik dalam desain konverter daya karena kesederhanaan dan efektivitasnya [7].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis tertarik untuk meneliti studi pemodelan *hydrogen fuel cell* dengan DC-DC *boost converter* yang dikendalikan oleh PID *controller*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan dan menganalisis karakteristik dari kinerja sistem *hydrogen fuel cell* dan unjuk kerja PID *controller* dalam meregulasi tegangan keluaran DC-DC *boost converter* pada *hydrogen fuel cell*.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana cara memodelkan dan mengetahui karakteristik dari kinerja *hydrogen fuel cell* ?
2. Bagaimana unjuk kerja PID *controller* dalam meregulasi tegangan keluaran DC-DC *boost converter* pada *hydrogen fuel cell* ?

1.3 Batasan Masalah

1. Data yang digunakan mengacu pada *standar test condition fuel cell* secara global dan studi literatur jurnal ilmiah.
2. Parameter yang dianalisis adalah parameter tekanan gas oksigen, hidrogen, dan temperatur.
3. Jenis *fuel cell* yang digunakan adalah PEMFC dengan merk NEXA™ 1.2 kW.
4. Sistem *fuel cell* tidak terhubung dengan beban AC.
5. Identifikasi pemodelan dan simulasi *hydrogen fuel cell* menggunakan bantuan *software* MATLAB R2019b.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk memodelkan dan menganalisis karakteristik dari kinerja sistem *hydrogen fuel cell*.
2. Untuk menganalisis unjuk kerja dari DC-DC *boost converter* dengan PID *controller* pada *hydrogen fuel cell*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menjadi referensi dalam mengembangkan sistem *hydrogen fuel cell* di lingkup FTI UII.
2. Memberikan pemahaman literatur untuk energi terbarukan.
3. Berkontribusi dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya mengenai pengoptimuman kinerja *hydrogen fuel cell*.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Dalam penelitian yang dilakukan oleh A. Kirubakaran dkk, diketahui bahwa terdapat banyak pemodelan *hydrogen fuel cell* yang dikembangkan berdasarkan persamaan termodinamika dan elektrokimia [2]. Sebagian besar model tidak memperhitungkan efek perubahan suhu dan tekanan gas pada *hydrogen fuel cell*. Ketika tekanan gas pada *fuel cell* atau suhu meningkat, maka *power density* atau densitas daya pada *fuel cell* juga akan meningkat untuk menaikkan kapasitas beban. Namun pada kenyataannya, terdapat perbedaan karakteristik bahan, konstruksi, dan kesesuaian pada aplikasi *fuel cell*. Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik mengenai karakteristik dan respon dari *fuel cell* dalam suatu sistem, pemodelan pada *fuel cell* yang akurat perlu dikembangkan untuk merancang antarmuka elektronika daya yang akurat dan efisien. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Manoj Sharma dkk, melakukan penelitian mengenai analisis secara matematis *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) [8]. Analisis matematika PEMFC dengan menggunakan MATLAB/Simulink dalam penelitian tersebut sangat membantu untuk menyelidiki perilaku kinerja dan pemodelan PEMFC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efek parametrik dan kinerja *fuel cell* dapat ditampilkan dengan kurva polarisasi tegangan terhadap arus. Dan juga penelitian yang dilakukan oleh Lamei Xu dkk, tentang memodelkan dan mensimulasikan PEMFC dengan MATLAB/Simulink berdasarkan elektrokimia [9]. Dengan bantuan model simulasi tersebut, serangkaian analisis dapat dilakukan. Pemodelan dengan menggunakan MATLAB/Simulink ternyata mampu mencirikan sifat-sifat dinamis dari *fuel cell* dan dapat dengan mudah digunakan dalam pengoptimalan PEMFC yang dipasang pada aplikasi stasioner dan otomotif.

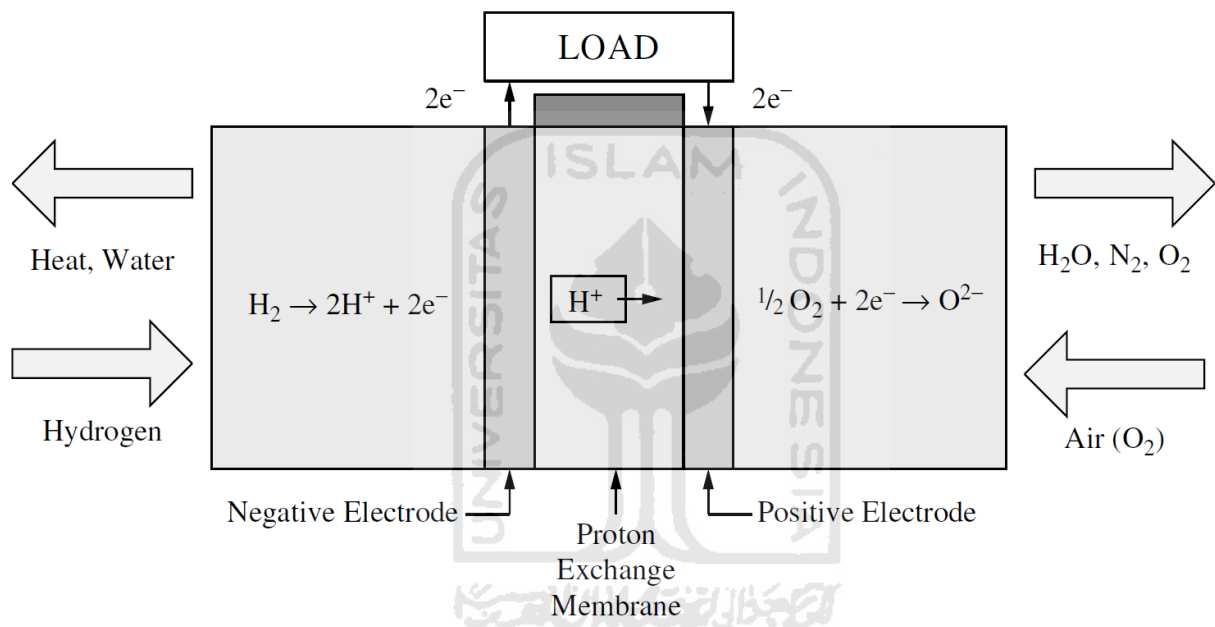
Tegangan yang dihasilkan dari *fuel cell* sangat kecil, sehingga diperlukan suatu peralatan elektronika daya yang berfungsi untuk menaikkan tegangan DC dari *fuel cell*. Peralatan tersebut adalah DC-DC *boost converter*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Dhia Mzoughi dkk tentang studi *boost converter* pada PEMFC [10]. Pada penelitian tersebut dilakukan studi dan pemodelan *fuel cell* dengan *boost converter* untuk memahami perilaku dari *fuel cell* dalam elektronika daya. Pemodelan dilakukan dengan memperhitungkan fenomena fisika-kimiawi yang berbeda pada *fuel cell*. Model *fuel cell* diimplementasikan dengan MATLAB/Simulink dan dihubungkan dengan konverter yang tegangannya diatur. Konverter dikendalikan menggunakan sinyal PWM dengan sistem regulasi kontrol tegangan ditentukan berdasarkan penggunaan PID *controller*. Tujuan penelitian ini adalah untuk memahami kinerja *boost converter* pada PEMFC.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil pemodelan diperoleh beberapa respon dalam loop terbuka dan loop tertutup, dan tegangan keluaran *fuel cell* dapat dinaikkan dari 20 V menjadi 66 V.

2.2 Tinjauan Pustaka

2.2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

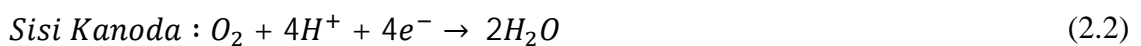
PEMFC merupakan perangkat elektrokimia yang dapat menghasilkan energi listrik dengan cara mengubah energi kimia hidrogen dan oksigen dengan bantuan elektro-katalis. Gambar 2.1, menunjukkan penampang dari PEMFC tunggal [9].

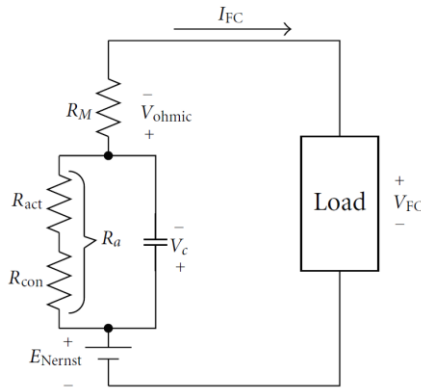


Gambar 2.1 Penampang PEMFC [9].

Sel PEMFC terdiri dari satu membran, dua elektroda dengan lapisan katalis, dan dua papan. Gas hidrogen dan oksigen memiliki afinitas kimia yang sangat kuat, oleh karena itu membran yang memisahkan kedua gas tersebut hanya memungkinkan ion hidrogen (H^+) saja yang dapat melewatinya. Gas hidrogen teroksidasi menjadi ion H^+ dan elektron (e^-). Ion H^+ digabungkan dengan oksigen untuk menghasilkan air dan energi panas sebagai produk sampingan dari *fuel cell*.

Berikut ini persamaan kimia dari *fuel cell* :





Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen PEMFC [11].

2.2.2 Persamaan Elektrokimia PEMFC

Tegangan keluaran dari satu sel PEMFC didefinisikan pada persamaan 2.4 [12].

$$V_{FC} = E_{Nernst} + V_{Act} + V_{Ohmic} + V_{Con} \quad (2.4)$$

Keterangan :

- V_{FC} = Tegangan keluaran *fuel cell* (V)
- E_{Nernst} = Tegangan Nernst / tegangan saat *open circuit* (V)
- V_{Act} = Tegangan Aktivasi (saat *activation polarzation*) (V)
- V_{Ohmic} = Tegangan Ohmic (saat *ohmic polarization*) (V)
- V_{Con} = Tegangan Konsentrasi (V)

Dalam persamaan di atas, E_{Nernst} adalah tegangan termodinamika dari *fuel cell* dan merepresentasikan tegangan *reversible* disebut juga sebagai tegangan *open-circuit*. V_{Act} adalah penurunan tegangan yang disebabkan oleh aktivasi anoda dan katoda (dikenal juga dengan tegangan aktivasi berlebih). V_{Act} juga menunjukkan nilai penurunan tegangan yang berkaitan dengan elektroda. V_{Ohmic} adalah penurunan tegangan *ohmic* (yang dikenal juga sebagai tegangan *ohmic* berlebih). V_{Ohmic} juga menunjukkan penurunan tegangan *ohmic* yang dihasilkan dari resistansi konduksi dari proton melalui zat elektrolit padat dan elektron. V_{Con} adalah penurunan tegangan yang diakibatkan oleh perpindahan gas reaktan.

2.2.3 Persamaan Nernst untuk Tegangan Reversibel PEMFC

Tegangan reversibel dari *fuel cell* (E_{Nernst}) adalah tegangan yang dihasilkan dari satu sel *fuel cell* dalam keadaan *open circuit*. Pada persamaan ini, berhubungan dengan konsentrasi dan tekanan dari gas oksigen dan oksigen yang berakibat pada hilangnya energi. Berikut ini persamaan E_{Nernst} untuk menghitung tegangan reversible dari *fuel cell* [13].

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{ref}) + \frac{RT}{2F} \cdot \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \cdot (P_{O_2}) \right] \quad (2.5)$$

Keterangan :

- E_{Nernst} = Tegangan *Nernst* / tegangan saat *open circuit* (V)
 ΔG = Perubahan energi bebas gibbs (*gibbs free energy*) (J/mol)
 ΔS = Perubahan entropi (J/mol)
 F = Konstanta faraday (96,487 C/mol)
 R = Konstanta gas universal (8,314 J/K mol)
 T = Suhu *fuel cell* (°K)
 T_{ref} = Suhu referensi (298°K)
 P_{H_2} = Tekanan parsial gas hidrogen (atm)
 P_{O_2} = Tekanan parsial gas oksigen (atm)

Dimana ΔG adalah perubahan energi Gibbs (J/mol). F adalah konstanta Faraday (96,487 C/mol). ΔS adalah perubahan entropi (J/mol). R adalah konstanta universal gas (8,314 J/K mol). Sedangkan P_{H_2} dan P_{O_2} adalah tekanan parsial gas hidrogen dan oksigen (atm).

Sehingga persamaan E_{Nernst} dapat didefinisikan menjadi [13]:

$$E_{Nernst} = 1.229 - [0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15)] + [4.3085 \times 10^{-5} \cdot T \cdot (\ln P_{H_2} + 0.5 P_{O_2})] \quad (2.6)$$

Efektifitas tekanan parsial pada setiap permukaan perlu dihitung. Perhitungan tersebut untuk mencari tekanan parsial pada sektor bagian yang lainnya. Berikut ini adalah persamaan untuk menghitung tekanan parsial pada setiap elektroda dari *fuel cell* [14].

$$P_{H_2O} = 10^{-X} \quad (2.7)$$

$$X = -2.1974 + 0.02953 \cdot T_{ref} - 9.1837 \times 10^{-5} \cdot T_{ref}^2 + 1.4454 \times 10^{-7} T_{ref}^3 \quad (2.8)$$

$$P_{O_2} = \frac{P_{Udara}}{e^{(4.192 \cdot \frac{i}{T^{1.3334}})}} - P_{H_2O} \quad (2.9)$$

$$P_{H_2} = \frac{0.5 \times P_{Udara}}{e^{(1.653 \cdot \frac{i}{T^{1.3334}})}} - P_{H_2O} \quad (2.10)$$

Keterangan :

- P_{H_2O} = Tekanan parsial air (atm)
 T_{ref} = Suhu referensi (298 °K)
 P_{O_2} = Tekanan parsial gas oksigen (atm)
 P_{H_2} = Tegangan parsial gas hidrogen (atm)
 P_{Udara} = Tekanan parsial udara (atm)
 T = Suhu *fuel cell* (°K)

2.2.4 Tegangan Drop Aktivasi PEMFC

Persamaan tegangan drop aktivasi direpresentasikan pada persamaan 2.11. Persamaan tegangan drop aktivasi juga disebut sebagai Persamaan Tafel [8].

$$V_{Act} = -[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(I_{FC})] \quad (2.11)$$

$$\xi_2 = 0.00286 + (0.0002 \times \ln A) + (4.5 \times 10^{-5}) \times \ln C_H \quad (2.12)$$

Keterangan :

V_{Act} = Tegangan Drop Aktivasi (V)

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ = Parameter empiris

T = Temperatur *fuel cell* (°K)

I_{FC} = Arus *fuel cell* (A)

C_H = Konsentrasi gas hidrogen (mol/cm³)

A = Luas setiap *cell* (cm²)

Konsentrasi gas oksigen ditentukan dalam persamaan [13].

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \left(e^{\frac{-498}{T}} \right)} \quad (2.13)$$

Keterangan :

C_{O_2} = Konsentrasi gas oksigen (mol/cm³)

P_{O_2} = Tekanan parsial gas oksigen (atm)

T = Temperatur *fuel cell* (°K)

2.2.5 Tegangan Ohmic PEMFC

Tegangan *ohmic* merupakan tegangan yang hilang yang disebabkan oleh adanya hambatan pada saat proton berpindah tempat. Berikut ini adalah persamaan tegangan *ohmic* [12].

$$V_{Ohmic} = I_{FC} \cdot (R_M + R_C) \quad (2.14)$$

$$R_M = \frac{\rho_M \times \lambda}{A} \quad (2.15)$$

$$\rho_M = \frac{181.6 \left[1 + \left(0.03 \cdot \frac{I_{FC}}{A} \right) + 0.062 \cdot \left(\frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{FC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\psi - 0.634 - 3 \cdot \left(\frac{I_{FC}}{A} \right) \right] \cdot e^{\left[4.18 \cdot \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]}} \quad (2.16)$$

Keterangan :

V_{Ohmic} = Tegangan *ohmic* (V)

I_{FC} = Arus *fuel cell* (A)

R_M = Resistansi membran (Ω)

R_C	= Resistansi konstan (Ω)
ρ_M	= Resistivitas membran untuk pertukaran elektron (Ω)
λ	= Ketebalan membran (cm)
A	= Luas setiap <i>cell</i> (cm^2)
T	= Temperatur <i>fuel cell</i> ($^\circ\text{K}$)
ψ	= Kandungan membran air

2.2.6 Tegangan Drop Konsentrasi PEMFC

Tegangan drop konsentrasi muncul karena adanya perubahan jumlah konsentrasi. Adanya perubahan jumlah konsentrasi tujuannya untuk mengurangi konsentrasi dari gas hidrogen dan gas oksigen pada elektroda *fuel cell* pada saat *fuel cell* beroperasi. Perubahan jumlah konsentrasi akan mengakibatkan berkurangnya tekanan parsial sehingga akan terjadi *open circuit* dari *fuel cell*. Tegangan drop konsentrasi ditunjukkan pada persamaan 2.17 [9].

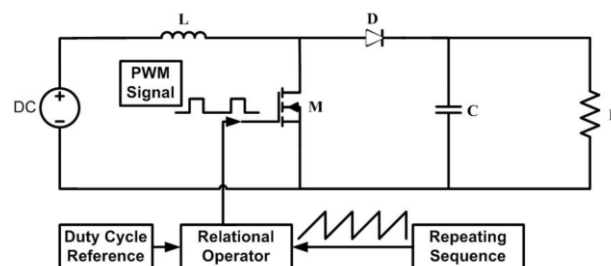
$$V_{Con} = -B \times \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (2.17)$$

Keterangan :

V_{Con}	= Tegangan drop konsentrasi (V)
B	= Konstanta (V)
J	= Kerapatan arus aktual <i>fuel cell</i> (A/cm^2)
J_{max}	= Kerapatan arus maksimum <i>fuel cell</i> (A/cm^2)

2.2.7 DC-DC Boost Converter

DC-DC *boost converter* merupakan sebuah konverter DC-DC yang menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dari tegangan sumbernya. DC-DC *boost converter* juga disebut sebagai konverter *step-up*. Bentuk rangkaian dari DC-DC *boost converter* ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen DC-DC *boost converter* [15].

Berikut ini adalah persamaan untuk mendesain DC-DC *boost converter* [16].

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (2.18)$$

Keterangan :

D = *Duty ratio*

V_{in} = Tegangan masukan (V)

$$R_{load} = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (2.19)$$

Keterangan :

R_{load} = Resistansi beban (Ω)

V_{out} = Tegangan keluaran (V)

I_{out} = Arus keluaran (A)

$$C = \frac{D}{R_{load} \times f_s \times \Delta V_{out}} \quad (2.20)$$

Keterangan :

C = Kapasitansi (F)

ΔV_{out} = Tegangan *ripple* (5% dari V_{out})(%)

R_{load} = Resistansi beban (Ω)

f_s = Frekuensi *switching* (Hz)

D = *Duty ratio*

$$L = \frac{R_{load} \times D \times (1 - D)^2}{2 \times f_s} \quad (2.21)$$

Keterangan :

L = Induktansi (H)

V_{in} = Tegangan masukan (V)

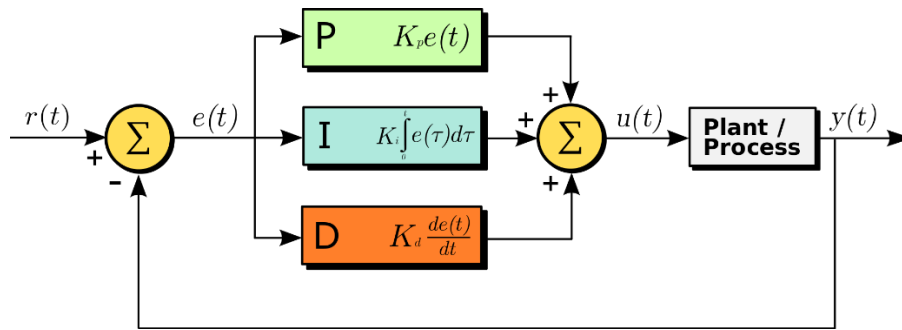
R_{load} = Resistansi beban (Ω)

f_s = Frekuensi *switching* (Hz)

D = *Duty ratio*

2.2.8 PID Controller

Salah satu jenis kontroler yang paling sederhana dan paling banyak digunakan selama beberapa dekade adalah *PID controller*. *PID* adalah singkatan dari *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivative* (D). Gambar 2.4, menunjukkan diagram blok dari *PID controller*.



Gambar 2.4 Diagram blok PID controller [17].

PID controller dapat diekspresikan sebagai berikut.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.22)$$

Keterangan :

K_p = Proportional gain

K_i = Integral gain

K_d = Derivative gain

$e(\tau)$ = $SP - PV(t)$ adalah error

SP = Set point

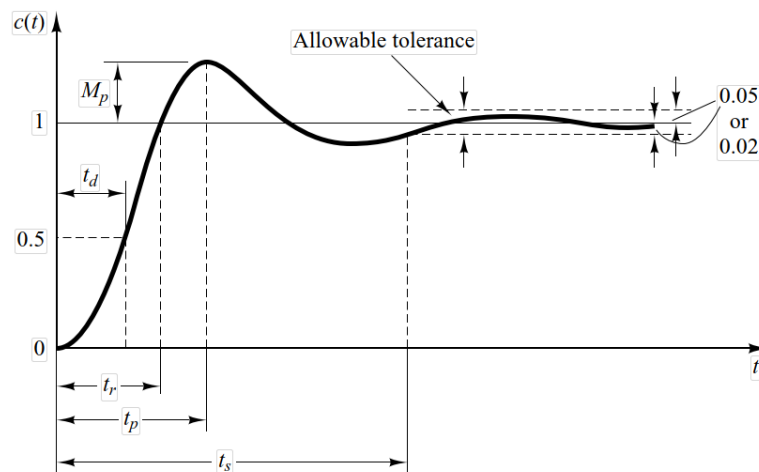
$PV(t)$ = Process variable

t = Waktu

τ = Variabel integrasi (nilai saat $t = 0$ sampai dengan nilai saat t sekarang)

2.2.9 Tanggapan Transient

Bentuk dari tanggapan transient digambarkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Bentuk sinyal tanggapan transient [18].

Sistem kendali orde 2 merupakan pendekatan yang paling banyak dipakai dengan spesifikasi ukuran kualitas tanggapan *transient* sebagai berikut [18] :

1. *Rise Time* (t_r) merupakan ukuran waktu yang diukur pada saat respon mulai $t=0$ sampai dengan respon memotong pada sumbu *steady state* yang pertama.
2. *Settling Time* (t_s) merupakan ukuran waktu yang menyatakan respon telah masuk sebesar 2% atau 5% atau 0,5% dari respon *steady state*.
3. *Delay Time* (t_d) merupakan ukuran waktu yang menyatakan faktor keterlambatan respon keluaran terhadap respon masukan yang diukur saat $t=0$ sampai dengan respon mencapai 50% dari respon *steady state*.
4. *Overshoot* (M_p) merupakan nilai relatif yang menyatakan perbandingan harga maksimum respon yang melampaui harga *steady state* dibandingkan dengan nilai *steady state*.

2.2.10 Persentase Error

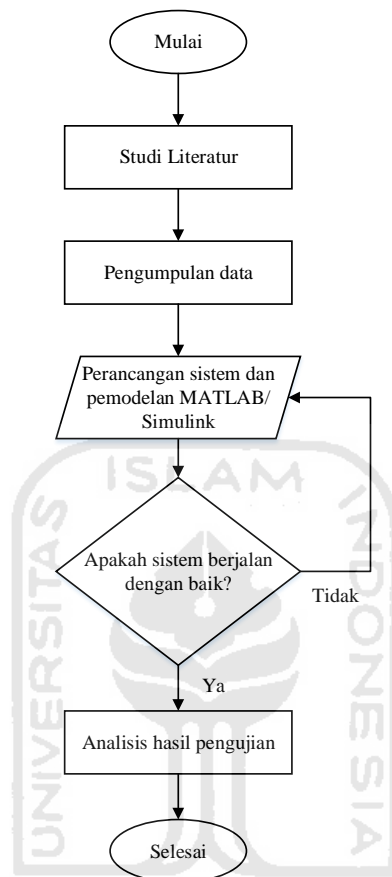
Persentase *error* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.23.

$$\% \text{ error} = \left| \frac{\text{nilai asli} - \text{nilai ukur}}{\text{nilai asli}} \right| \times 100 \% \quad (2.23)$$

BAB 3

METODOLOGI

3.1 Alur Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir dari penelitian yang dilakukan. Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan kajian studi literatur dari penelitian yang relevan.
2. Mengumpulkan data-data untuk pendukung penelitian yaitu data parameter *hydrogen fuel cell* secara global.
3. Melakukan perancangan dan pemodelan sistem *hydrogen fuel cell* yang terhubung dengan DC-DC *boost converter* dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2019b.
4. Melakukan analisis kinerja dari sistem *hydrogen fuel cell* dan unjuk kerja dari PID *controller* terhadap DC-DC *boost converter* melalui perangkat lunak MATLAB R2019b.

3.1.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data parameter sistem *hydrogen fuel cell* dengan standar global dari beberapa jurnal dan studi literatur [19][20]. *Hydrogen fuel cell* yang digunakan adalah Nexa™ 1.2 kW.

Tabel 3.1 Parameter *Hydrogen Fuel Cell*.

Parameter	Nilai
A	62.05 cm ²
T	323.15 °K
B	0.0179
R_C	0.00028 Ω
ξ_1	-0.289
ξ_2	*Perhitungan
ξ_3	8.2×10^{-5}
ξ_4	-1.58×10^{-4}
J_{max}	1.537 A/cm ²
P_{O_2}	1 atm
P_{H_2}	1 atm
ψ	23.06
λ	131 μm
N_{cell}	34
l	89 μm

3.1.2 Perancangan Sistem dan Pemodelan *Hydrogen Fuel Cell*

Perancangan dan pemodelan didasarkan atas data parameter yang sesuai dengan standar global menggunakan perangkat lunak MATLAB R2019b dengan *tools* MATLAB *simulink* dan MATLAB *function*. Simulasi yang akan dibuat terdiri atas beberapa blok simulasi yaitu blok sistem *hydrogen fuel cell* dan blok DC-DC *boost converter*.

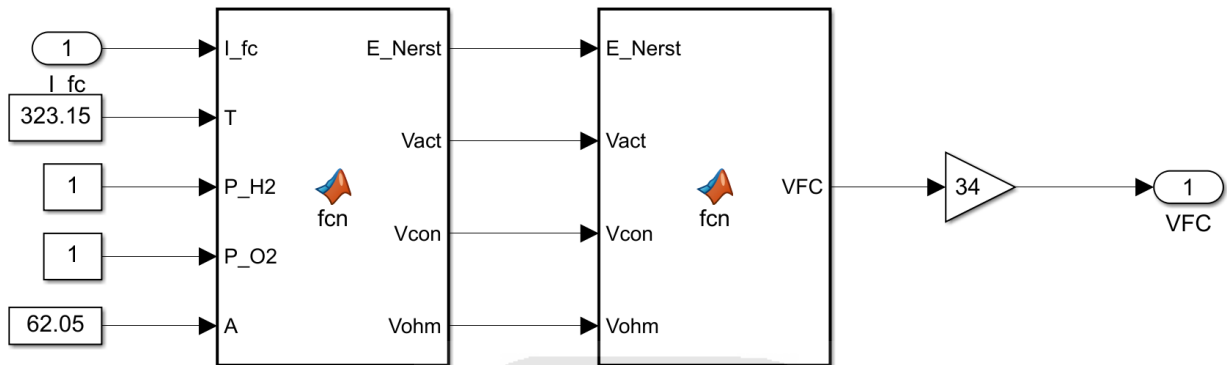
3.1.3 Hasil dan Analisis

Dilakukan hasil dan analisis dari sistem *hydrogen fuel cell*, dengan menganalisis kinerja sistem. Terdapat beberapa jenis karakteristik grafik yang ingin dianalisis dan diamati, yaitu karakteristik tekanan parsial oksigen dan hidrogen, temperatur, tegangan keluaran *fuel cell*, arus keluaran *fuel cell*, daya keluaran *fuel cell*, dan ujuk kerja dari PID *controller* terhadap DC-DC *boost converter*. Semua data diolah menggunakan persamaan matematis elektrokimia.

3.2 Perancangan Simulasi Sistem *Hydrogen Fuel Cell* FTI UII Menggunakan MATLAB

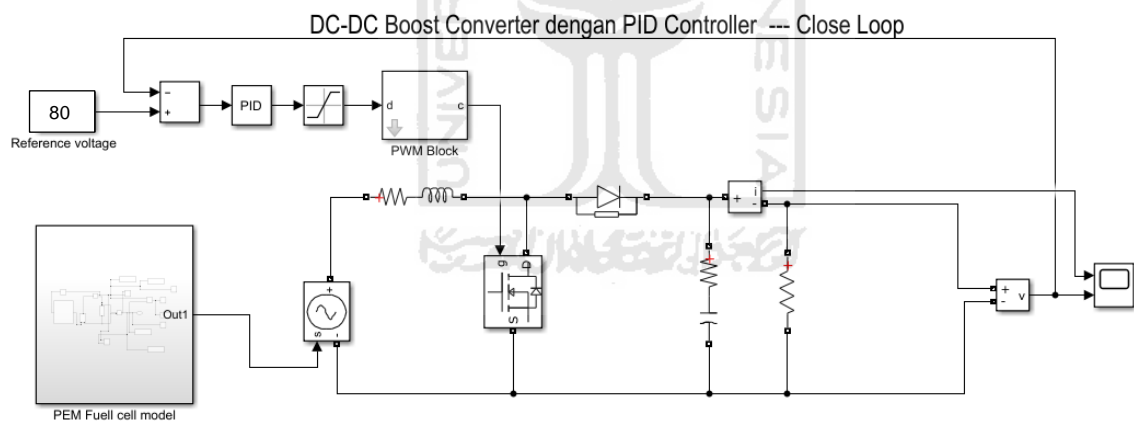
3.2.1 Pemodelan dan Simulasi Sistem *Hydrogen Fuel Cell*

Sistem *hydrogen fuel cell* pada penelitian ini dibuat sesuai dengan persamaan matematis elektrokimia (1.1) sampai (1.22). *Tools* yang digunakan adalah menggunakan MATLAB *function* dan MATLAB/Simulink.



Gambar 3.2 Matlab/Simulink *Hydrogen Fuel Cell*.

3.2.2 Pembuatan dan Simulasi Konverter DC-DC *Boost* dengan Kontroler PID



Gambar 3.3 Simulasi DC-DC *boost converter* dengan PID *controller*.

a. Nilai *Duty Ratio*

Tegangan masukan yang digunakan pada konverter adalah tegangan keluaran dari *fuel cell* (V_{in}) yang bernilai 47.89 V. Sedangkan tegangan keluaran yang diinginkan (V_{out}) adalah 80 V. Nilai *duty ratio* dihitung dengan persamaan 2.18. Didapatkan nilai *duty ratio* minimal sebesar 0.68.

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - \frac{47.89}{80} = 0,4$$

b. Nilai Resistansi Beban

Untuk menghitung nilai resistansi beban (R_{load}) menggunakan persamaan 2.19. Arus keluaran yang diinginkan (I_{out}) adalah 14.33 A dan tegangan keluaran yang diinginkan adalah 80 V. Didapatkan nilai resistansi beban (R_{load}) sebesar 3.34 Ω .

$$R_{load} = \frac{V_{out}}{I_{out}} = \frac{80}{14.33} = 5,58 \Omega$$

c. Nilai Kapasitansi

Untuk menghitung nilai kapasitansi menggunakan persamaan 2.20. Nilai *duty ratio* (D) adalah 0,4. Nilai resistansi beban (R_{load}) adalah 3.34 Ω . Nilai tegangan *ripple* yang digunakan sebesar 5% atau 0.05. Didapatkan nilai kapasitansi minimal sebesar $14.33 \times 10^{-6} F$. Dikarenakan nilai kapasitansi terlalu kecil yang dapat menghasilkan sinyal tegangan yang tidak halus atau terdapat *ripple*, maka digunakan nilai kapasitansi sebesar 1200 μF .

$$C = \frac{D}{R_{load} \times f_s \times \Delta V_{out}} = \frac{0.4}{5.58 \times 100 \times 10^3 \times 0.05} = 14.33 \times 10^{-6} F$$

d. Nilai Induktansi

Untuk menghitung nilai kapasitor menggunakan persamaan 2.21. Nilai *duty ratio* (D) adalah 0.4. Nilai R_{load} adalah 3.34 Ω . Frekuensi *switching* yang digunakan adalah 100 kHz. Didapatkan nilai induktansi minimal adalah $4 \times 10^{-6} H$.

$$L = \frac{R_{load} \times D \times (1 - D)^2}{2 \times f_s} = \frac{5.58 \times 0.4 \times (1 - 0.4)^2}{2 \times 100 \times 10^3} = 4 \times 10^{-6} H$$

3.3 Cara Analisis

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui parameter-parameter yang dibutuhkan dalam memodelkan sistem *hydrogen fuel cell* yang mengacu pada standar global dan beberapa referensi dari jurnal ilmiah.
2. Setelah semua data telah lengkap, maka dilakukan pemodelan dan simulasi secara matematis menggunakan MATLAB. *Tools* yang digunakan yaitu *simulink* dan pemrograman.
3. Untuk memvalidasi dari kinerja *fuel cell* dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan model data. Berdasarkan model data, nilai tegangan keluaran maksimal 50 V

dan arus maksimal 24 A. Kemudian untuk mengetahui kinerja dari *fuel cell* dengan cara menganalisis pengaruh tekanan gas hidrogen, oksigen, dan temperatur terhadap arus dan tegangan keluaran *fuel cell*. Juga menganalisis karakteristik kurva polarisasi E_{Nernst} , V_{Con} , V_{Act} , dan V_{Ohmic} .

4. Untuk memvalidasi unjuk kerja dari DC-DC *boost converter* untuk menaikkan tegangan dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan model data. Berdasarkan model data, tegangan keluaran DC-DC *boost converter* adalah 80 V dengan arus sebesar 15 A. Untuk mengetahui unjuk kerja PID *controller* dalam meregulasi tegangan keluaran DC-DC *boost converter* pada *fuel cell* dilakukan dengan cara menganalisis *respon transient*. Karakteristik *respon transient* yang baik untuk tegangan dan arus keluaran DC-DC *boost converter* adalah dengan nilai *settling time* (t_s) kurang dari 10 detik, *rise time* (t_r) kurang dari 10 detik, *delay time* (t_d) kurang dari 1 detik, dan *maximum overshoot* kurang dari 5%.

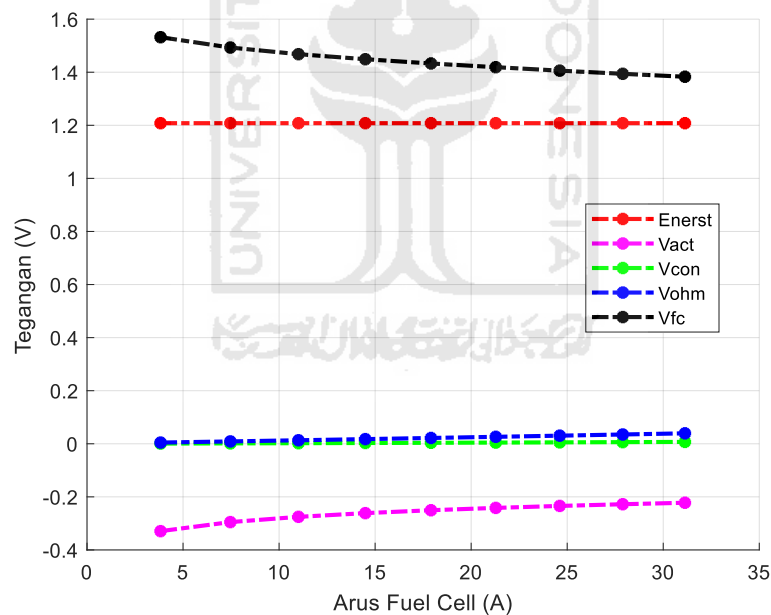


BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Efek parametrik pada karakteristik tegangan dan arus dari *fuel cell* akan dianalisis dengan nilai operasi parameter yang berbeda-beda. Parameter yang akan dianalisis adalah pengaruh perubahan nilai suhu, tekanan gas hidrogen, tekanan gas oksigen terhadap arus dan tegangan *fuel cell* serta karakteristik kurva polarisasi E_{nemst} , V_{ohm} , V_{con} , V_{fc} , dan V_{act} . Untuk meregulasi tegangan keluaran *fuel cell* dan meningkatkan kinerja sistem *fuel cell*, DC-DC *boost converter* dengan PID *controller* dihubungkan ke *fuel cell*. Hasil simulasi tegangan dan arus keluaran *fuel cell* dibandingkan dengan model data *fuel cell*. Unjuk kerja dari PID *controller* dengan DC-DC *boost converter* dalam meregulasi tegangan keluaran *fuel cell*, ditunjukkan dengan analisis kurva respon keluaran.

4.1 Karakteristik Polarisasi Pada *Hydrogen Fuel Cell*

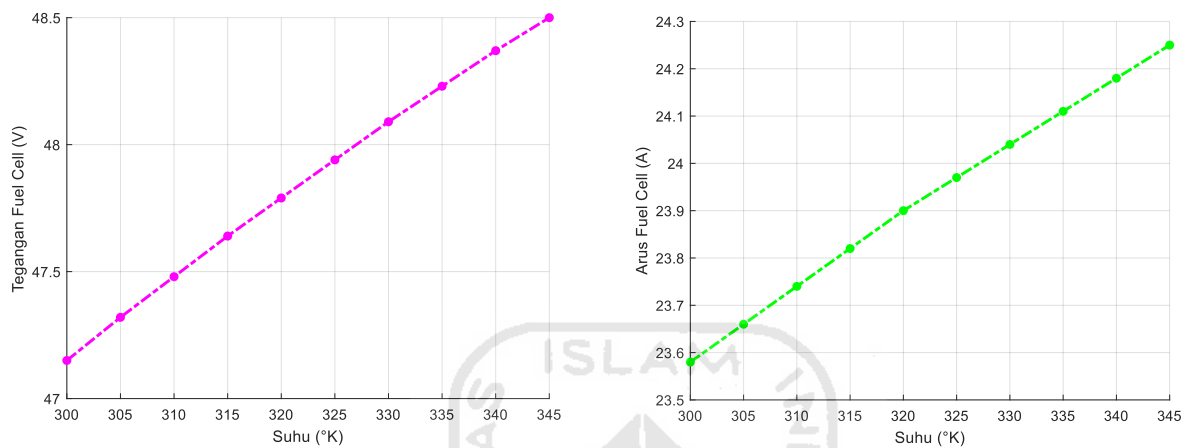


Gambar 4.1 Karakteristik polarisasi pada *fuel cell*.

Berdasarkan pada Gambar 4.1. mengenai karakteristik polarisasi pada *fuel cell* dapat diketahui bahwa semakin besar nilai arus keluaran pada *fuel cell*, maka nilai tegangan keluaran pada *fuel cell* akan semakin menurun. Hal tersebut dikarenakan nilai tegangan keluaran akan berbanding terbalik dengan nilai arus yang sesuai dengan Hukum Ohm. Kemudian nilai E_{nemst} akan tetap konstan, dikarenakan tidak dipengaruhi oleh perubahan nilai arus, melainkan dipengaruhi oleh tekanan oksigen, tekanan hidrogen, dan temperatur *fuel cell*. Nilai V_{con} cenderung

konstan, dikarenakan nilai V_{con} dipengaruhi oleh perubahan nilai tekanan oksigen. Nilai V_{act} akan semakin membesar, hal tersebut dikarenakan nilai V_{act} dipengaruhi oleh nilai perubahan arus pada *fuel cell*. Kemudian nilai V_{ohm} akan semakin membesar, dikarenakan nilai V_{ohm} dipengaruhi oleh perubahan arus pada *fuel cell*.

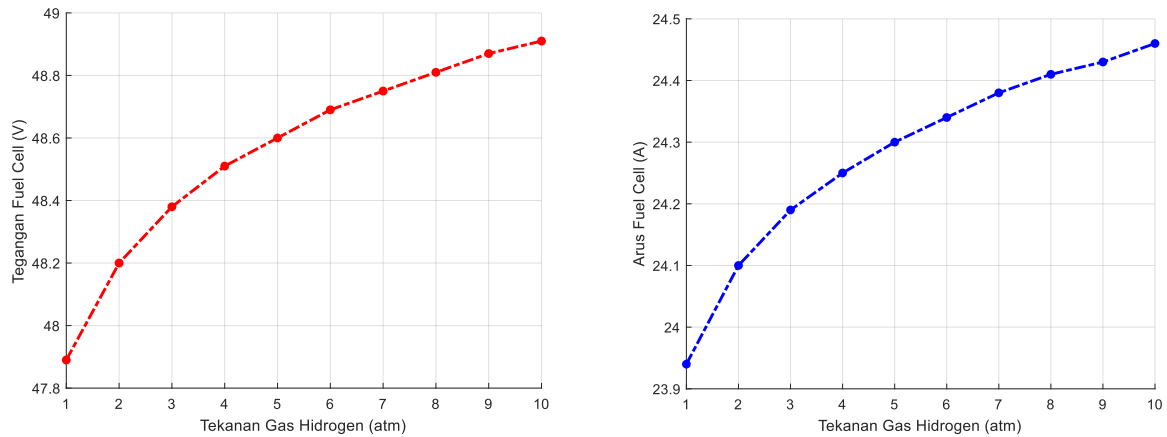
4.2 Pengaruh Perubahan Suhu terhadap Tegangan dan Arus pada *Hydrogen Fuel Cell*



Gambar 4.2 Karakteristik perubahan suhu terhadap tegangan dan arus *fuel cell*.

Berdasarkan Gambar 4.2, mengenai karakteristik perubahan suhu terhadap tegangan keluaran pada *fuel cell*, dapat diketahui bahwa semakin besar nilai suhu pada *fuel cell*, maka tegangan keluaran *fuel cell* akan semakin membesar. Suhu operasi pada *fuel cell* memiliki pengaruh yang signifikan pada kinerja *fuel cell*. Terlihat bahwa ketika suhu *fuel cell* meningkat dari 300°K ke 345°K, maka tegangan keluaran *fuel cell* akan meningkat sebesar 1,35 V. Meningkatnya suhu operasi pada *fuel cell*, akan mengurangi tahanan *ohmic* atau resistansi *ohmic* dari elektrolit yang akan mempengaruhi pada nilai tegangan *ohmic* yaitu tegangan *ohmic* akan semakin membesar. Apabila tegangan *ohmic* semakin membesar, maka tegangan keluaran *fuel cell* juga akan membesar. Berdasarkan Gambar 4.2, mengenai karakteristik perubahan suhu terhadap arus keluaran pada *fuel cell*, dapat diketahui bahwa semakin besar nilai suhu pada *fuel cell*, maka arus keluaran pada *fuel cell* akan semakin membesar. Peningkatan suhu operasi pada *fuel cell* dari dari 300°K ke 345°K, akan menghasilkan peningkatan arus sebesar 0.67 A. Meningkatnya suhu operasi pada *fuel cell*, akan mengakibatkan tegangan aktivasi (V_{Act}) menjadi meningkat. Meningkatnya tegangan aktivasi juga akan mengakibatkan meningkatnya tegangan keluaran *fuel cell*. Sesuai dengan hukum Ohm, tegangan berbanding lurus dengan kuat arus, sehingga apabila tegangan keluaran *fuel cell* membesar, maka arus keluaran *fuel cell* juga akan semakin membesar.

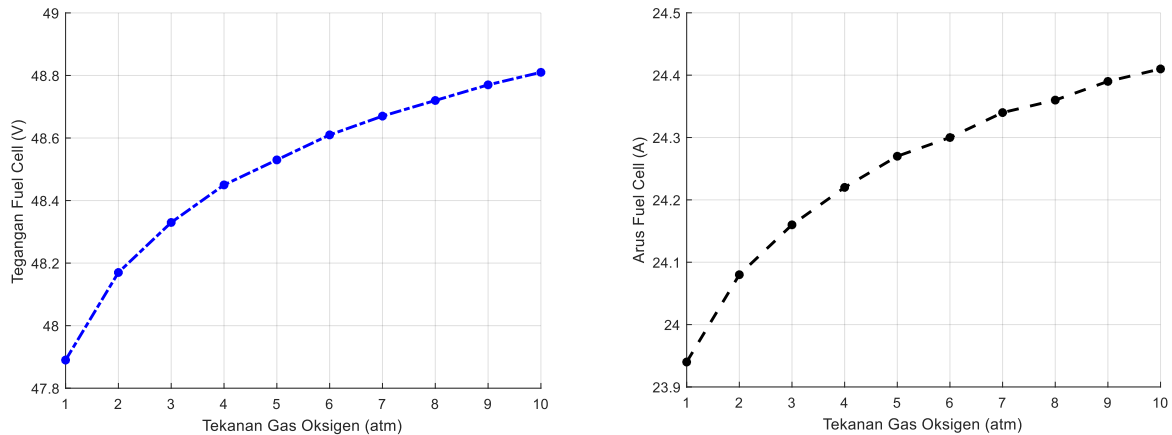
4.3 Pengaruh Perubahan Tekanan Gas Hidrogen terhadap Tegangan dan Arus pada *Hydrogen Fuel Cell*



Gambar 4.3 Karakteristik tekanan gas hidrogen terhadap tegangan dan arus *fuel cell*.

Berdasarkan pada Gambar 4.4, mengenai karakteristik tekanan gas hidrogen terhadap tegangan *fuel cell* dapat diketahui bahwa, semakin besar nilai tekanan gas hidrogen, maka tegangan keluaran pada *fuel cell* akan semakin membesar. Tekanan gas hidrogen juga mempengaruhi kinerja *fuel cell* secara signifikan terlihat bahwa peningkatan tekanan gas hidrogen dari 1 atm hingga 2 atm, menghasilkan peningkatan tegangan sebesar 0.31 V. Berdasarkan persamaan tegangan aktivasi (V_{Act}), peningkatan tekanan gas hidrogen akan menyebabkan polarisasi aktivasi meningkat. Berdasarkan pada Gambar 4.4, mengenai karakteristik tekanan gas hidrogen terhadap arus *fuel cell* dapat diketahui bahwa, semakin besar nilai tekanan gas hidrogen, maka arus keluaran pada *fuel cell* akan semakin membesar. Penambahan tekanan gas hidrogen memberikan pengaruh yang signifikan terhadap bertambahnya arus listrik *fuel cell*, karena dengan bertambahnya tekanan gas hidrogen akan menambah keseimbangan stoikiometri antara gas hidrogen dan gas oksigen, maka kontak antara gas dengan anoda akan semakin cepat sehingga arus listrik yang dihasilkan oleh *fuel cell* akan semakin besar. Terlihat bahwa pada saat tekanan gas hidrogen dinaikkan dari 1 atm menjadi 2 atm, terjadi penambahan arus secara signifikan dari 23.94 A menjadi 24.1 A.

4.4 Pengaruh Perubahan Tekanan Gas Oksigen terhadap Tegangan dan Arus pada *Hydrogen Fuel Cell*

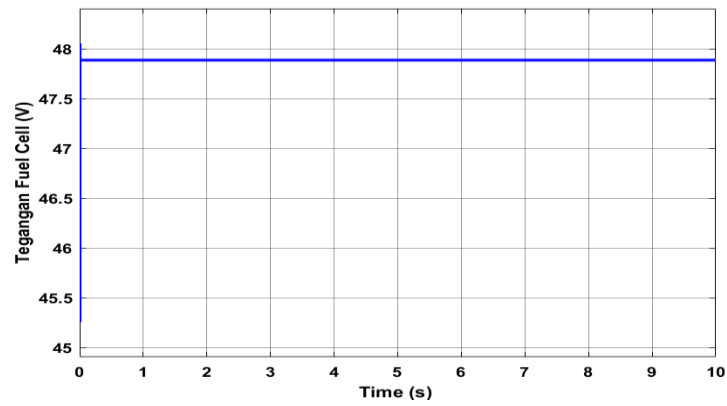


Gambar 4.4 Karakteristik tekanan gas oksigen terhadap tegangan dan arus *fuel cell*.

Berdasarkan Gambar 4.6, mengenai karakteristik tekanan gas oksigen terhadap tegangan *fuel cell* dapat diketahui bahwa, semakin besar nilai tekanan gas oksigen, maka tegangan keluaran *fuel cell* akan semakin mengecil. Peningkatan tekanan gas oksigen mempengaruhi konsentrasi gas oksigen dan tegangan aktivasi (V_{Act}). Apabila tekanan gas oksigen semakin membesar, maka konsentrasi gas oksigen semakin membesar sehingga dapat mengakibatkan tegangan aktivasi semakin meningkat. Meningkatnya tegangan aktivasi menyebabkan peningkatan tegangan keluaran *fuel cell*. Terjadi kenaikan tegangan keluaran *fuel cell* secara signifikan pada saat tekanan gas oksigen dari 1 atm menjadi 2 atm yaitu sebesar 47.89 V menjadi 48.17 V. Berdasarkan Gambar 4.6, mengenai karakteristik tekanan gas oksigen terhadap arus *fuel cell*, dapat diketahui bahwa, semakin besar nilai tekanan gas oksigen, maka nilai arus keluaran *fuel cell* juga akan semakin membesar. Berdasarkan persamaan 2.11 dan 2.13, meningkatnya tekanan gas oksigen akan mengakibatkan konsentrasi gas oksigen juga meningkat sehingga akan mempengaruhi polarisasi aktivasi yaitu polarisasi aktivasi akan meningkat. Meningkatnya polarisasi aktivasi akan menyebabkan nilai tegangan aktivasi mengecil sehingga arus keluaran *fuel cell* akan membesar. Terjadi kenaikan arus keluaran *fuel cell* secara signifikan sebesar 23,94 menjadi 24,08 A pada saat tekanan oksigen dinaikkan dari 1 atm menjadi 2 atm.

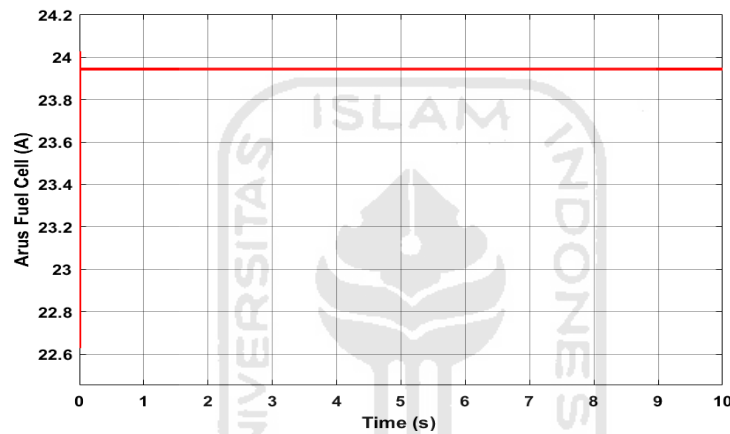
4.5 Analisis Kinerja *Hydrogen Fuel Cell*

Berdasarkan hasil simulasi yang dijalankan, diketahui tegangan keluaran *fuel cell* (V_{cell}) adalah 1.408 Volt dengan total 34 *cell* yang tersusun secara seri. Nilai arus, tegangan, dan daya keluaran pada *fuel cell* ditunjukkan pada gambar 4.8, 4.9, dan 4.10.



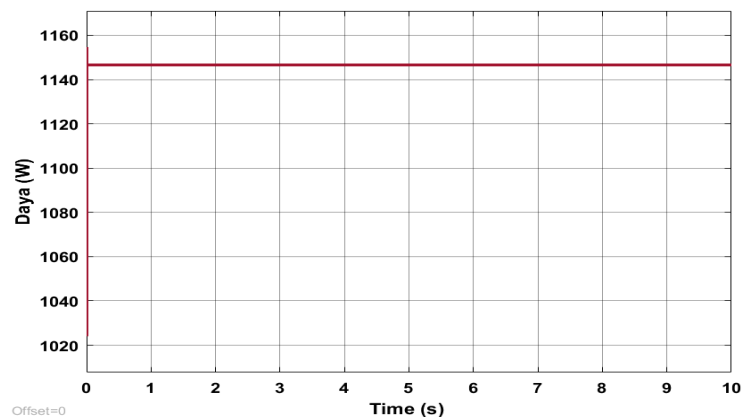
Gambar 4.5 Tegangan keluaran *fuel cell*.

Berdasarkan pada gambar 4.8, dapat diketahui bahwa tegangan keluaran pada *fuel cell* bernilai 47.89 Volt.



Gambar 4.6 Arus keluaran *fuel cell*.

Berdasarkan pada gambar 4.9, dapat diketahui bahwa arus keluaran pada *fuel cell* bernilai 23.94 A.



Gambar 4.7 Daya keluaran *fuel cell*.

Berdasarkan pada gambar 4.10, daya keluaran pada *fuel cell* bernilai 1147 W.

Terdapat perbedaan nilai pada model data dengan hasil simulasi. Model data untuk *fuel cell* Nexa™, tegangan keluaran *fuel cell* maksimal sebesar 50 V dan arus keluaran *fuel cell* maksimal sebesar 24 A serta untuk daya yang dihasilkan sebesar 1200 W. Sedangkan hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan keluaran *fuel cell* sebesar 47.89 V dan arus keluaran *fuel cell* sebesar 23.94 A serta daya yang dihasilkan sebesar 1147 W. Berikut ini adalah perhitungan dalam menentukan persentase *error* hasil simulasi terhadap model data.

$$\begin{aligned} \% \text{ error tegangan keluaran} &= \left| \frac{\text{model data} - \text{hasil simulasi}}{\text{model data}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{50 - 47.89}{50} \right| \times 100 \% = 4.22 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ error arus keluaran} &= \left| \frac{\text{model data} - \text{hasil simulasi}}{\text{model data}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{24 - 23.94}{24} \right| \times 100 \% = 0.25 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ error daya keluaran} &= \left| \frac{\text{model data} - \text{hasil simulasi}}{\text{model data}} \right| \times 100 \% \\ &= \left| \frac{1200 - 1147}{1200} \right| \times 100 \% = 4.12\% \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, dapat diketahui bahwa persentase *error* untuk tegangan keluaran sebesar 4.22 %, persentase *error* untuk arus keluaran sebesar 0.25 %, dan persentase *error* untuk daya keluaran sebesar 4.12 %. Persentase *error* tertinggi pada tegangan keluaran, dikarenakan sesuai dengan persamaan 2.4, bahwa terjadi kehilangan tegangan yang disebabkan oleh tegangan *Nernst* (E_{Nernst}), tegangan *ohmic* (V_{Ohm}), tegangan *activation* (V_{Act}), dan tegangan *concentration* (V_{Con}). Ketika energi listrik dihasilkan dari *fuel cell*, tegangan aktual pada *fuel cell* akan menurun terhadap tegangan teoritis pada *fuel cell*. Hal tersebut dikarenakan oleh rugi-rugi pada saat mekanisme reaksi pada *fuel cell*. Rugi-rugi tersebut didefinisikan sebagai tegangan *Nernst* (E_{Nernst}), tegangan *ohmic* (V_{Ohm}), tegangan *activation* (V_{Act}), dan tegangan *concentration* (V_{Con}). Reaksi elektrokimia mengontrol laju produksi energi dari *fuel cell* dan merupakan penyebab utama dari kehilangan tegangan aktivasi. Tegangan aktivasi adalah kehilangan tegangan karena reaksi kimia untuk mengatasi penghalang aktivasi katalis untuk mengubah produk menjadi reaktan. Jenis kehilangan tegangan ini sangat kompleks karena melibatkan bahan bakar gas, katalis logam padat, dan elektrolit. Katalis mengurangi ketinggian penghalang aktivasi, tetapi kehilangan tegangan tetap terjadi karena reaksi oksigen yang lambat. Perpindahan muatan pada saat reaksi elektrokimia melalui lapisan membran *fuel cell* secara konduksi. Oleh karena itu, kehilangan tegangan *ohmic* terjadi karena kurangnya kontak reaksi yang tepat oleh lapisan difusi gas, pelat bipolar, pelat pendingin, kontak, dan interkoneksi. Namun, kehilangan tegangan *ohmic* terbesar

terjadi selama pengangkutan ion-ion melalui membran. Untuk mengurangi rugi-rugi ion melalui membran, membran perlu dibuat menjadi lebih konduktif atau lebih tipis. Reaksi elektrokimia dalam lapisan katalis dapat menyebabkan penipisan pada lapisan reaktan yang dapat mempengaruhi kinerja *fuel cell* melalui kehilangan konsentrasi (V_{Con}). Perbedaan reaktan lapisan katalis dan konsentrasi produk menentukan tingkat kehilangan konsentrasi.

4.6 Analisis Unjuk Kerja DC-DC Boost Converter dengan PID Controller

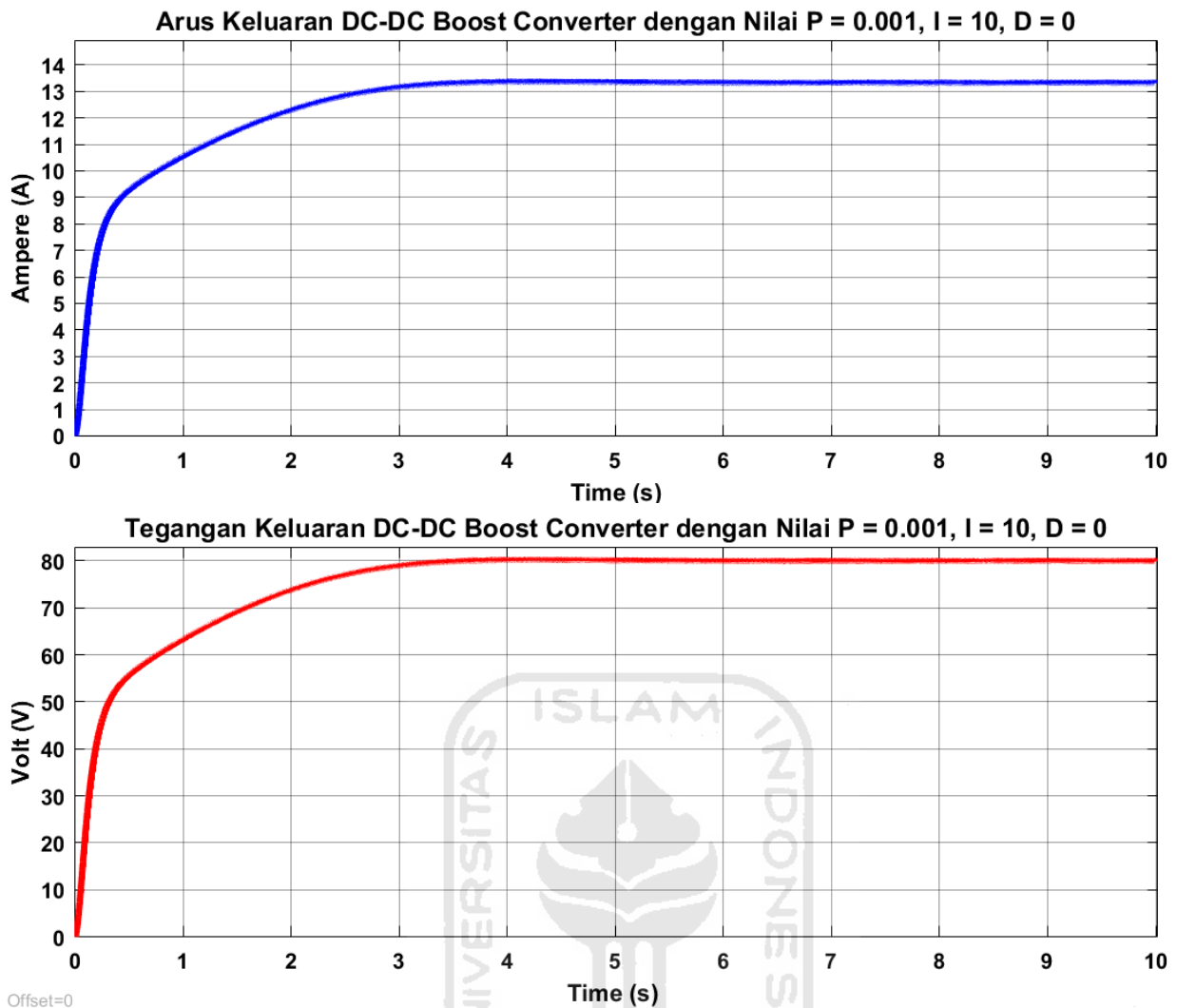
PID controller secara sederhana telah diterapkan ke DC-DC boost converter dengan nilai parameter *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivative* (D) yang berbeda-beda untuk mengetahui unjuk kerja PID controller dengan DC-DC boost converter dalam meregulasi dan menaikkan tegangan. Tegangan keluaran pada DC-DC boost converter yang diinginkan bernilai 80 V, sedangkan arus keluarannya bernilai 13 A.

Tabel 4.1 Konfigurasi PID Controller dan Unjuk Kerja PID Controller dengan DC-DC Boost Converter untuk Arus Keluaran.

	Konfigurasi PID Controller			Hasil Unjuk Kerja					
	P	I	D	Rise Time (t_r)	Delay Time (t_d)	Peak Time (t_p)	Setling Time (t_s)	Maximum Overshoot (M_p)	Arus Keluaran
Percobaan 1	0	5	0	7 s	0.2 s	7 s	7 s	0 %	13.2 A
Percobaan 2	0.001	5	0	8 s	0.2 s	8 s	8 s	0 %	13.2 A
Percobaan 3	0.001	10	0	4 s	0.2 s	4 s	4 s	0 %	13.2 A

Tabel 4.2 Konfigurasi PID Controller dan Unjuk Kerja PID Controller dengan DC-DC Boost Converter untuk Tegangan Keluaran.

	Konfigurasi PID Controller			Hasil Unjuk Kerja					
	P	I	D	Rise Time (t_r)	Delay Time (t_d)	Peak Time (t_p)	Setling Time (t_s)	Maximum Overshoot (M_p)	Tegangan Keluaran
Percobaan 1	0	5	0	7 s	0.2 s	7 s	7 s	0 %	80 V
Percobaan 2	0.001	5	0	8 s	0.2 s	8 s	8 s	0 %	80 V
Percobaan 3	0.001	10	0	4 s	0.2 s	4 s	4 s	0 %	80 V



Gambar 4.8 Kurva respon arus dan tegangan keluaran pada DC-DC *boost converter* dengan nilai $P = 0.001$, $I = 10$, dan $D = 0$.

Berdasarkan pada Gambar 4.13, dapat diketahui bahwa respon arus dan tegangan keluaran pada DC-DC *boost converter* sangat stabil pada nilai 13.2 A dan 80 V. Unjuk kerja dari PID *controller* dengan DC-DC *boost converter* untuk arus keluaran ditunjukkan dengan nilai *rise time* (t_r) sebesar 4 detik, *delay time* (t_d) sebesar 0.2 detik, *peak time* (t_p) sebesar 4 detik, *settling time* (t_s) sebesar 4 detik, dan *maximum overshoot* (M_p) sebesar 0 %. Unjuk kerja dari PID *controller* dengan DC-DC *boost converter* untuk tegangan keluaran, nilai *rise time* (t_r) sebesar 4 detik, *delay time* (t_d) sebesar 0.2 detik, *peak time* (t_p) sebesar 4 detik, *settling time* (t_s) sebesar 4 detik, dan *maximum overshoot* (M_p) sebesar 0 %.

PID *controller* dengan DC-DC *boost converter* terbukti dapat memberikan respon *time* yang cepat dengan nilai kurang dari 10 detik, stabil pada nilai 80 V untuk tegangan dan 13,2 A untuk arus, dan mengurangi efek *overshoot* pada arus dan tegangan. *Overshoot* pada tegangan dan arus harus dikurangi, dikarenakan akan mengakibatkan berkurangnya umur peralatan yang terhubung dengan keluaran DC-DC *boost converter*. Parameter untuk kurva respon yang sesuai dengan

kriteria yang diinginkan adalah dengan nilai *Proportional* (P) sebesar 0.001, *Integral* (I) sebesar 10, dan *Deivative* (D) sebesar 0.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Kinerja *hydrogen fuel cell* dipengaruhi oleh tekanan gas oksigen, hidrogen, dan temperatur. Semakin besar nilai tekanan gas oksigen, tekanan gas hidrogen, dan temperatur pada *fuel cell*, maka tegangan dan arus keluaran *fuel cell* akan semakin membesar. Hasil simulasi menunjukkan tegangan keluaran *fuel cell* sebesar 47.89 V dengan persentase *error* sebesar 4.22 %, dan arus keluaran *fuel cell* sebesar 23.94 A dengan persentase *error* sebesar 0.25 %, serta daya keluaran *fuel cell* sebesar 1147 W dengan persentase *error* sebesar 4.12 %.
2. Unjuk kerja dari PID *controller* dengan DC-DC *boost converter* dalam meregulasi tegangan keluaran *fuel cell* sangat baik. Hal tersebut ditunjukkan dengan hasil respon untuk arus keluaran *fuel cell* yaitu nilai *rise time* (t_r) sebesar 4 detik, *delay time* (t_d) sebesar 0.2 detik, *peak time* (t_p) sebesar 4 detik, *settling time* (t_s) sebesar 4 detik, dan *maximum overshoot* (M_p) sebesar 0 %. Untuk tegangan keluaran, nilai *rise time* (t_r) sebesar 4 detik, *delay time* (t_d) sebesar 0.2 detik, *peak time* (t_p) sebesar 4 detik, *settling time* (t_s) sebesar 4 detik, dan *maximum overshoot* (M_p) sebesar 0 % dengan parameter nilai *Proportional* (P) sebesar 0.001, *Integral* (I) sebesar 10, dan *Derivative* (D) sebesar 0.

5.2 Saran

1. Menambahkan sistem pengendalian dan monitoring *hydrogen fuel cell* secara *online* dan *real-time* agar kinerja secara aktual dari *hydrogen fuel cell* dapat dipantau dan diamati dengan baik.
2. Memodifikasi pemodelan sistem *hydrogen fuel cell* dengan sistem *hydrogen fuel cell* suhu tinggi yang memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan sistem *hydrogen fuel cell* suhu rendah.
3. Memperluas analisis pemodelan dengan menambahkan parameter pengendalian aliran gas hidrogen, oksigen dan manajemen kontrol suhu dan air, karena suhu dan hidrasi pada *fuel cell* merupakan faktor penting yang harus ditangani dengan benar agar memiliki perilaku kinerja sistem yang lebih stabil.

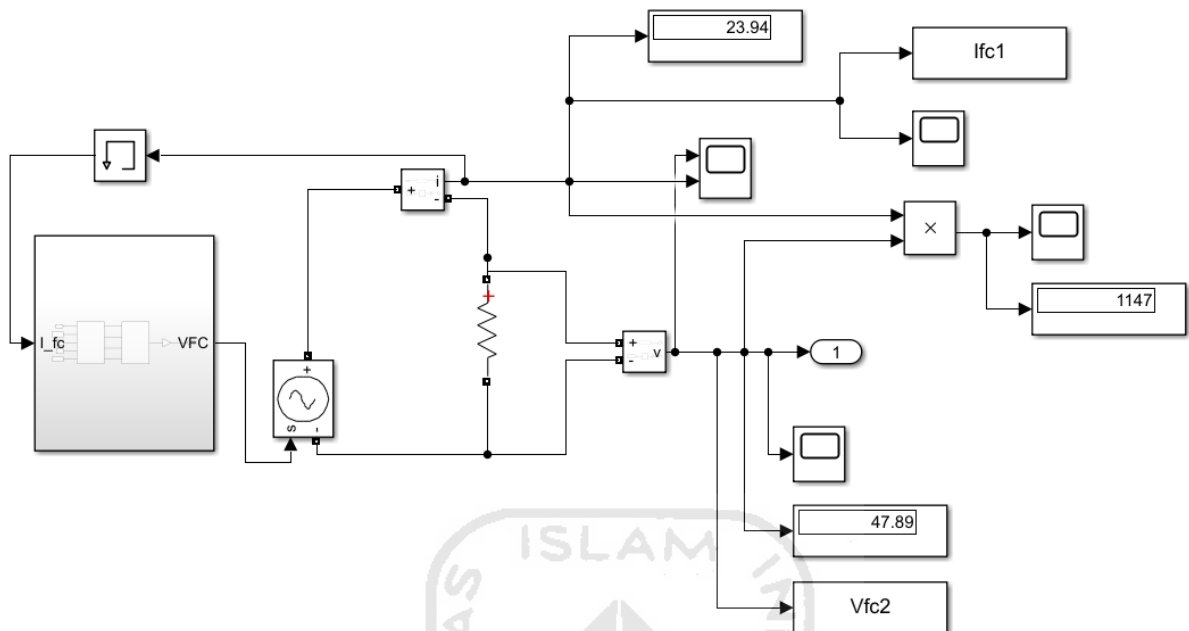
DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency (IEA), "International Energy Agency (IEA)- Report," 2018.
- [2] a Kirubakaran, S. Jain, and R. K. Nema, "The PEM Fuel Cell System with DC/DC Boost Converter: Design, Modeling and Simulation," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 157–161, 2009.
- [3] M. Farooque and H. C. Maru, "Fuel Cells - The Clean and Efficient Power Generators," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1819–1829, 2001.
- [4] M. W. Ellis, M. R. Von Spakovsky, and D. J. Nelson, "Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21st Century," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1808–1817, 2001.
- [5] K. Thanapalan, F. Zhang, G. Premier, J. Maddy, and A. Guwy, "Control-oriented PEM fuel cell system modeling and repetitive controller design," *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing, ICICIP 2011*, no. PART 2, pp. 1055–1060, 2011.
- [6] P. Pokharkar, Rajesh Krishnan, Dayaram Sonawane, Aliasger Zaidy, "Dynamic Modeling and Simulation of A PEM Fuel Cell: MATLAB and Lab VIEW Modeling Approach," *International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)*, no. ICONCE, pp. 272–276, 2014.
- [7] O. Ibrahim, N. Z. Yahaya, and N. Saad, "Comparative studies of PID controller tuning methods on a DC-DC boost converter," *International Conference on Intelligent and Advanced Systems, ICIAS 2016*, pp. 1–5, 2017.
- [8] M. Sharma, R. K. Pachauri, and S. K. Goel, "MATLAB/Simulink modeling and analysis of parametric effects on PEMFC performance," *2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering, RDCAPE 2015*, pp. 226–231, 2015.
- [9] L. Xu and J. Xiao, "Modeling and simulation of PEM fuel cells based on electrochemical model," *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE 2011 - Proceedings*, no. 5, pp. 471–474, 2011.
- [10] D. Mzoughi, H. Allagui, and A. Mami, "Study of a boost converter for PEM fuel cell," *2013 10th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2013*, pp. 1–5, 2013.
- [11] L. Y. Chang, K. H. Chao, and T. C. Chang, "A high voltage ratio and low ripple interleaved DC-DC converter for fuel cell applications," *The Scientific World Journal*, vol. 2012, 2012.

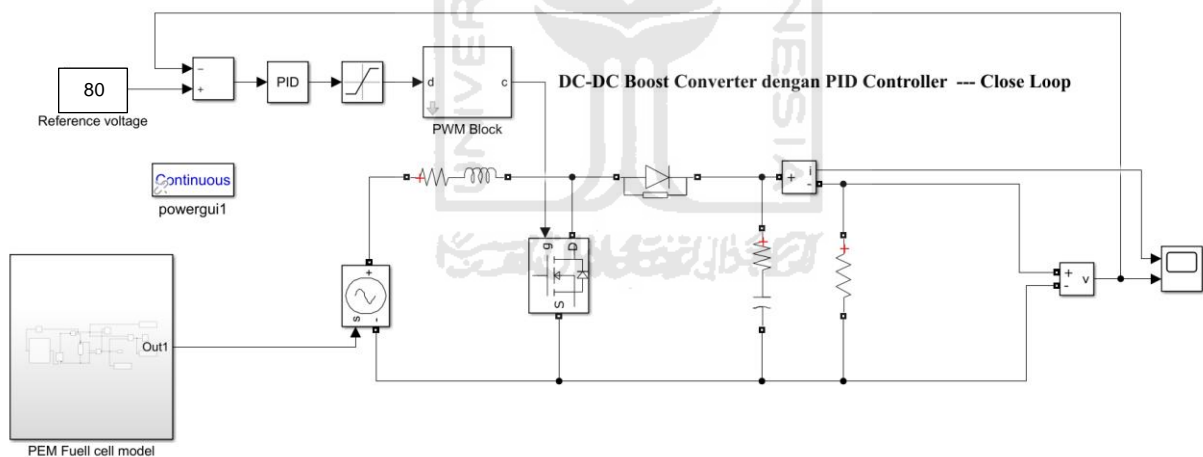
- [12] A. F. Abdul Aziz, A. S. Samosir, K. Kamal, I. Amin, and S. Mathavan, "Modeling and analyzing the proton exchange membrane of fuel cell (PEMFC) in Matlab/SIMULINK environment," *Proceedings of the 14th IEEE International Multitopic Conference 2011, INMIC 2011*, pp. 238–243, 2011.
- [13] X. Qian, Z. Shi, J. Zhang, and D. Xuan, "Measurement and control platform of the proton exchange membrane of fuel cell based on the MATLAB/Simulink," *Proceedings - 2017 Chinese Automation Congress, CAC 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 5236–5241, 2017.
- [14] D. B. Setiabudi, "RANCANG BANGUN MODEL PROTON EXCHANGE," Universitas Jember, 2018.
- [15] Mirza Fuad Adnan, Mohammad Abdul Moin Oninda, Mirza Muntasir Nishat, and Nafiul Islam, "Design and Simulation of a DC - DC Boost Converter with PID Controller for Enhanced Performance," *International Journal of Engineering Research and*, vol. V6, no. 09, 2017.
- [16] A. Emadi, A. Khaligh, Z. Nie, and Y. J. Lee, *Integrated Power Electronic Converters and Digital Control (Power Electronics and Applications Series)*. 2009.
- [17] "https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller." p. 1.
- [18] K. Ogata, *Modern control engineering*. 2010.
- [19] C. Restrepo, T. Konjedic, A. Garces, J. Calvente, and R. Giral, "Identification of a Proton-Exchange Membrane Fuel Cell's Model Parameters by Means of an Evolution Strategy," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 2, pp. 548–559, 2015.
- [20] M. T. Outeiro, R. Chibante, A. S. Carvalho, and A. T. de Almeida, "A parameter optimized model of a Proton Exchange Membrane fuel cell including temperature effects," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 952–960, 2008.

LAMPIRAN

Sistem *Hydrogen Fuel Cell* tanpa DC-DC *Boost Converter* pada MATLAB/Simulink :



Sistem *Hydrogen Fuel Cell* dengan DC-DC *Boost Converter* pada MATLAB/Simulink :



Kode Program Matlab *Function* Sistem PEMFC :

```
function [E_Nerst, Vact, Vcon, Vohm] = fcn(I_fc, T, P_H2, P_O2, A)
```

```
E_Nerst=1.229 - (0.85*10.^(-3)*(T-298.15)) + (4.31*(10.^(-5))*T*(ln(P_H2)-ln(P_O2)));
```

```
% Vact Calculation
```

```
A=62.05;
```

```
C_O2=P_O2/(5.08*10.^(6)*exp(-498/T));
```

```
C_H2=5.64*10.^(-5);
```

```
e1= -0.289;
```

```
e2= 0.00286 + 0.0002*ln(A) + 4.3*10.^(-5)*ln(C_H2);
```

```
e3=8.2*10.^(-5);
```

```

e4=-1.58*10.^(-4);

Vact= -[e1 + (e2*T) + (e3*T*ln(C_O2)) + (e4*T*ln(I_fc))]

% VOhmic Caltulation
RC=0.00028;
rowM=181.6*[1 + (0.03*(I_fc/A)) +
(0.062*((T/303).^2)*((I_fc/A).^(2.5)))]/([23.06 - 0.634 -
(3*(I_fc/A))] *exp(4.18*(T-303)/T))
RM=0.0089*rowM/A;
Vohm=I_fc*(RM+RC);

% Vcon Caltulation

B=0.0179;
Jmax=1.537;
J=I_fc/A;
Vcon=-B*ln(1 - (J/Jmax));

Kode Program Fungsi ln :
function ln_ans=ln(x)
ln_ans=log(x)/log(exp(1));
end

Kode Program Menghitung Tegangan Keluaran Fuel Cell :
function VFC = fcn(E_Nerst,Vact,Vcon,Vohm)

VFC=E_Nerst-Vohm -Vcon-Vact;

```

