



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENKONDISI TEGANGAN KONSTAN PADA
PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)
HORIZON H-1000 MENGGUNAKAN *BUCK CONVERTER***

TESIS

**KHALIF AHADI
0906578365**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENINGKONDISI TEGANGAN KONSTAN PADA
PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)
HORIZON H-1000 MENGGUNAKAN *BUCK CONVERTER***

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister

**KHALIF AHADI
0906578365**

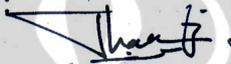
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
TEKNIK KONTROL INDUSTRI
JANUARI 2012**

PERNYATAAN ORISINALITAS

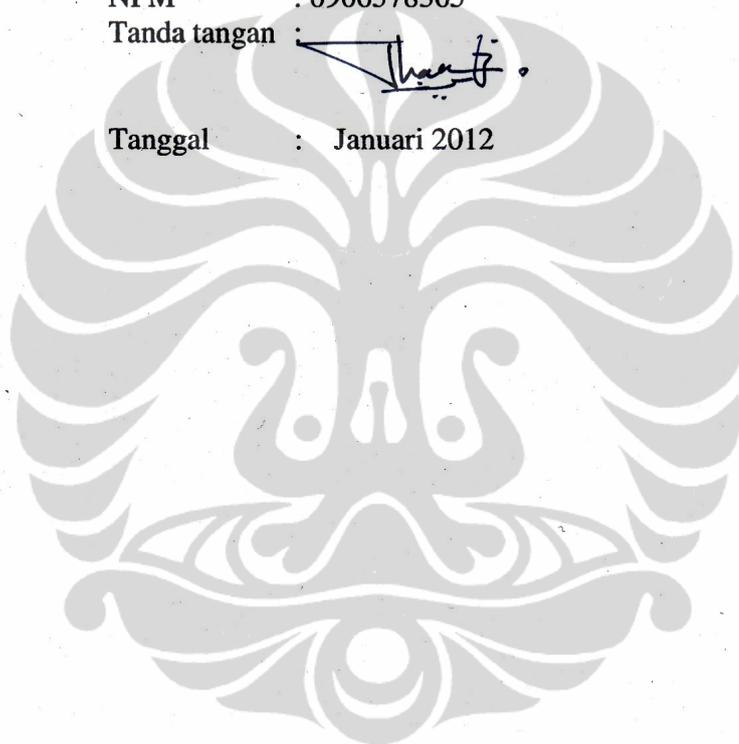
Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Khalif Ahadi

NPM : 0906578365

Tanda tangan : 

Tanggal : Januari 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Khalif Ahadi
NPM : 0906578365
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Tesis : Pengkondisi Tegangan Konstan Pada *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Horizon H-1000* Menggunakan *Buck Converter*

Telah berhasil dipertahankan dihadapan dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Feri Yusivar, M.Eng

Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT

Penguji : Dr. Abdul Halim, M.Eng

Penguji : Dr. Ir. Agus Santoso Tamsir, MT

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Januari 2012

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, atas segala karunia dan petunjuk dari Allah SWT serta kasih sayang-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini. Penyusunan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari betapa besar dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak, baik dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini.

Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sangat mendalam kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Feri Yusivar, M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran dalam mengarahkan penulis dalam penyusunan tesis ini.
2. Dosen-dosen yang telah mengajarkan ilmu yang sangat bermanfaat.
3. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral atas dukungan dana dan kesempatan yang diberikan.
4. Kedua orang tua dan adik-adik atas do'a dan dorongannya.
5. Sahabat-sahabat yang selalu ada setiap saat.

Dan semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Januari 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Khalif Ahadi
NPM : 0906578365
Program Studi : Teknik Kontrol Industri
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PENINGKONDISI TEGANGAN KONSTAN PADA
PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)
HORIZON H-1000 MENGGUNAKAN BUCK CONVERTER**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : Januari 2012

Yang menyatakan,



(Khalif Ahadi)

ABSTRAK

Nama : Khalif Ahadi
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Pengkondisi Tegangan Konstan Pada *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Horizon H-1000* Menggunakan *Buck Converter*

Tesis ini bertujuan untuk melakukan pengembangan metode perlakuan terhadap tegangan keluaran sistem *fuel cell* yang cenderung berubah seiring perubahan beban agar mampu bertahan pada nilai yang relatif konstan. Hal ini dilakukan dengan menambahkan suatu *DC-DC converter* berupa *buck converter* pada keluaran *fuel cell* sebelum diubah menjadi tegangan AC oleh *inverter*. Hasil uji coba menunjukkan tegangan keluaran sistem menjadi relatif tetap pada tegangan 12,4 volt $\pm 2,5\%$ saat diberi beban yang berfluktuasi jika dibandingkan dengan tegangan keluaran *fuel cell* itu sendiri.

Kata kunci: pengkondisi tegangan keluaran *fuel cell*, aplikasi *buck converter*

ABSTRACT

Name : Khalif Ahadi
Study Program : Electric Engineering
Title : Constant Voltage Conditioner of Horizon H-1000 Proton
Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Using Buck Converter

The purpose of this thesis is to conduct method development treatment of output voltage of fuel cell system, which is tend to change along with load fluctuation, to be able to withstands on relatively constant value. It's done by adding a buck converter as a DC-DC converter on fuel cell's output before it's changed as AC voltage by inverter. The experiment result shows that output voltage of the system is relatively constant on 12.4 volt $\pm 2,5\%$ under fluctuated load in comparison with output voltage from fuel cell it self.

Key word : fuel cell's output voltage conditioner, buck converter application

DAFTAR ISI

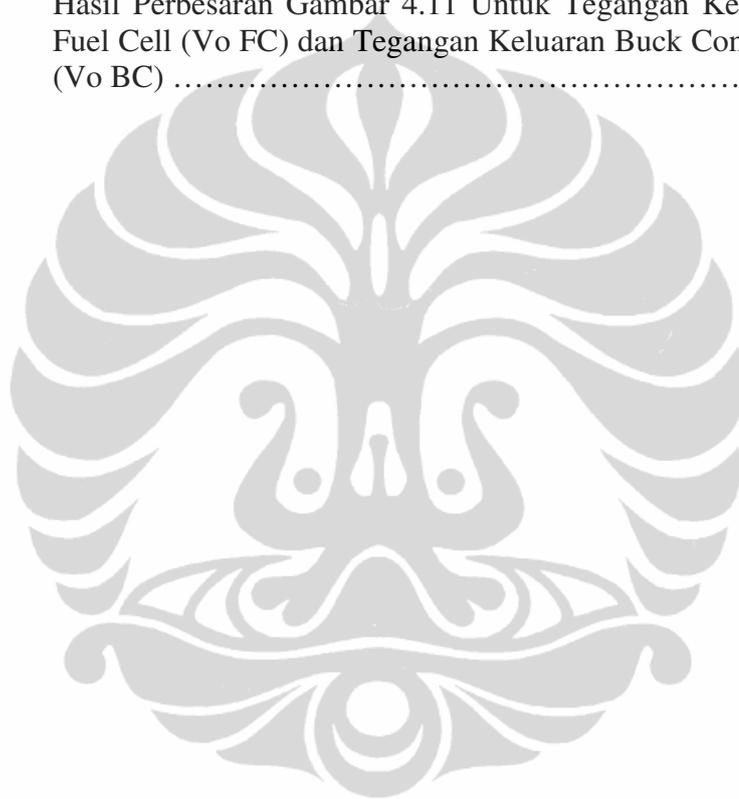
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan.....	6
1.3. Pembatasan Masalah.....	6
1.4. Susunan Penulisan.....	6
2. DASAR TEORI.....	7
2.1. Fuel Cell	7
2.2. Prinsip Kerja Fuel Cell	8
2.3. Jenis-jenis Fuel Cell.....	9
2.4. Karakteristik PEMFC	10
2.5. Persamaan Tegangan Keluaran PEMFC.....	11
2.6. PEMFC Horizon H-1000.....	13
2.7. Buck Converter	16
3. METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1. Perancangan Kebutuhan Perangkat	24
3.2. Pembuatan DC-DC Converter.....	27
3.3. Implementasi Sistem	42
3.4. Uji Coba Sistem	43
4. HASIL PENGUJIAN	44
4.1. Hasil Uji Kinerja Buck Converter	44
4.2. Buck Converter Sebagai Pengkondisi Tegangan Keluaran Fuel Cell ...	52
4.3. Perbandingan Perubahan Tegangan Keluaran	68
4.4. Evaluasi Hasil Percobaan	70
5. KESIMPULAN	71
DAFTAR REFERENSI	72
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Diagram Blok Pengendalian Aliran Masukan Gas Hidrogen Terhadap Perubahan Tegangan Keluaran	2
Gambar 1.2.	Hasil Uji Pengendalian Aliran Masukan Gas Hidrogen Terhadap Perubahan Tegangan Keluaran Fuel Cell	2
Gambar 1.3.	Diagram Blok Pengaturan Buka-an Valve Untuk Melakukan Penghematan Gas Hidrogen	3
Gambar 1.4.	Kurva Karakteristik Tegangan-Arus pada Fuel Cell	4
Gambar 2.1.	Prinsip Kerja Fuel Cell	9
Gambar 2.2.	Kurva Polarisasi Fuel Cell	13
Gambar 2.3.	Bagian-bagian PEMFC H-1000	15
Gambar 2.4.	Kurva Polarisasi Perubahan Tegangan terhadap Perubahan Arus Beban pada PEMFC H-1000	16
Gambar 2.5.	Grafik Perubahan Daya terhadap Perubahan Arus Beban pada PEMFC H-1000	16
Gambar 2.6.	Buck Converter	18
Gambar 2.7.	Rangkaian Snubber pada Rangkaian Switch MOSFET	21
Gambar 3.1.	Diagram Blok Perangkat yang Digunakan	24
Gambar 3.2.	Modul Pembacaan Data pada Program MATLAB	26
Gambar 3.3.	Inti Toroid yang Dihitung Permeabilitasnya	29
Gambar 3.4.	Konstruksi Pembuatan Induktor	31
Gambar 3.5.	Induktor yang dibuat dan Contoh Inti Toroid yang Digunakan	32
Gambar 3.6.	Rangkaian Catu Daya untuk Mensuplai IC Pembangkit PWM dan Driver MOSFET	33
Gambar 3.7.	Rangkaian Driver untuk MOSFET Tipe P	34
Gambar 3.8.	Rangkaian IC TL494 Sebagai Pembangkit PWM	35
Gambar 3.9.	Bentuk Gelombang Tegangan V_{CE} dan Arus I_E Pada Switch	36
Gambar 3.10.	Bagan Pengukuran Tegangan V_{CE} dan Arus I_E	37
Gambar 3.11.	Rangkaian Snubber Pada Buck Converter	38
Gambar 3.12.	Bentuk Gelombang Tegangan V_{CE} dan Arus I_E pada Switch Saat Menggunakan Snubber Dengan Nilai Kapasitor 100nF dan Resistor 100 Ω	38
Gambar 3.13.	Bentuk Gelombang Tegangan V_{CE} dan Arus I_E pada Switch Saat Menggunakan Snubber Dengan Nilai Kapasitor 330nF dan Resistor 100 Ω	39
Gambar 3.14.	Diagram Blok Uji Coba Buck Converter	41
Gambar 3.15.	Peralatan Yang Digunakan Untuk Uji Coba Sistem Fuel Cell	42
Gambar 4.1.	Diagram Blok Uji Coba Sistem Fuel Cell	44
Gambar 4.2.	Pengaruh Penambahan Tegangan Masukan Terhadap Tegangan Keluaran pada Buck Converter yang Dibuat Saat Tanpa Beban	45

Gambar 4.3.	Pengaruh Pengurangan Tegangan Masukan Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter Saat Tanpa Beban	46
Gambar 4.4.	Pengaruh Perubahan Tegangan Masukan Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter Saat Diberi Beban	47
Gambar 4.5.	Pengaruh Penambahan Beban Hingga Arus Keluaran Dapat Mencapai Spesifikasi Desain 60 A pada Tegangan Keluaran Buck Converter	48
Gambar 4.6.	Daya Input dan Daya Output serta Efisiensi Daya Saat Perubahan Tegangan Masukan	49
Gambar 4.7.	Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Buck Converter	50
Gambar 4.8.	Noise dan Ripple Pada Tegangan Keluaran Saat Uji Kinerja Buck Converter Yang Dibuat	51
Gambar 4.9.	Diagram Blok Uji Coba Sistem Fuel Cell	52
Gambar 4.10.	Data Hasil Pengujian Buck Converter Komersial Pada Sistem Fuel Cell	53
Gambar 4.11.	Data Hasil Pengujian Buck Converter yang Dibuat	54
Gambar 4.12.	Daya Keluaran Fuel Cell dan Daya Keluaran Buck Converter Komersial yang Digunakan	56
Gambar 4.13.	Efisiensi Daya Buck Converter Komersial yang Digunakan	56
Gambar 4.14.	Daya Keluaran Fuel Cell dan Daya Keluaran Buck Converter yang Dibuat	57
Gambar 4.15.	Efisiensi Daya Buck Converter yang Dibuat	58
Gambar 4.16.	Hasil Pengujian untuk Melihat Adanya Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Tegangan Keluaran Inverter yang Digunakan	58
Gambar 4.17.	Noise dan Ripple Pada Tegangan Keluaran	59
Gambar 4.18.	Pengaruh Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 600 W (nominal) Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter	60
Gambar 4.19.	Daya Keluaran Fuel Cell (P_{fc}) Saat Diberi Beban 560 W (nominal) dan Daya Keluaran Buck Converter (P_o)	61
Gambar 4.20.	Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 560 W (nominal) Berpengaruh Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter (dilingkari)	61
Gambar 4.21.	Tegangan Keluaran Buck Converter yang Terpengaruh Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 560 W (Perbesaran Gambar 4.20)	62
Gambar 4.22.	Tegangan Keluaran Inverter Pada Saat Fuel Cell Diberi Beban Nominal 560 W	63
Gambar 4.23.	Daya Keluaran Fuel Cell Saat Penurunan Beban 560 W (nominal) dan Daya Keluaran Buck Converter	63
Gambar 4.24.	Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 560 W (nominal) Berpengaruh Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter (dilingkari)	64
Gambar 4.25.	Tegangan Keluaran Buck Converter yang Terpengaruh Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 560 W (Perbesaran Gambar 4.23)	64

Gambar 4.26.	Perbesaran Tegangan Keluaran Buck Converter Saat Uji Kinerja (kondisi pada Gambar 4.7)	65
Gambar 4.27.	Daya Keluaran Fuel Cell dan Daya Keluaran Buck Converter Saat Perubahan Beban Nominal 400 W, 500 W dan 600 W	66
Gambar 4.28.	Hasil Perbesaran Tegangan Keluaran Fuel Cell (V_{fc}) dan Tegangan Keluaran Buck Converter (V_o) Saat Perubahan Beban Nominal 400 W, 500 W dan 600 W	67
Gambar 4.29.	Hasil Perbesaran Gambar 4.10 Untuk Tegangan Keluaran Fuel Cell (V_{fc}) dan Tegangan Keluaran Buck Converter (V_o)	68
Gambar 4.30.	Hasil Perbesaran Gambar 4.11 Untuk Tegangan Keluaran Fuel Cell (V_o_{FC}) dan Tegangan Keluaran Buck Converter (V_o_{BC})	69



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Reaksi Elektrokimia Fuel Cell	10
Tabel 2.2.	Tegangan Ideal Fuel Cell Sebagai Fungsi Temperatur	12
Tabel 2.3.	Spesifikasi PEMFC H-1000	15
Tabel 3.1.	Hasil Perhitungan dan Pengukuran Untuk Mendapatkan Nilai Permeabilitas Relatif Inti Toroid Sebagai Dasar Pembuatan Induktor	30



BAB 1

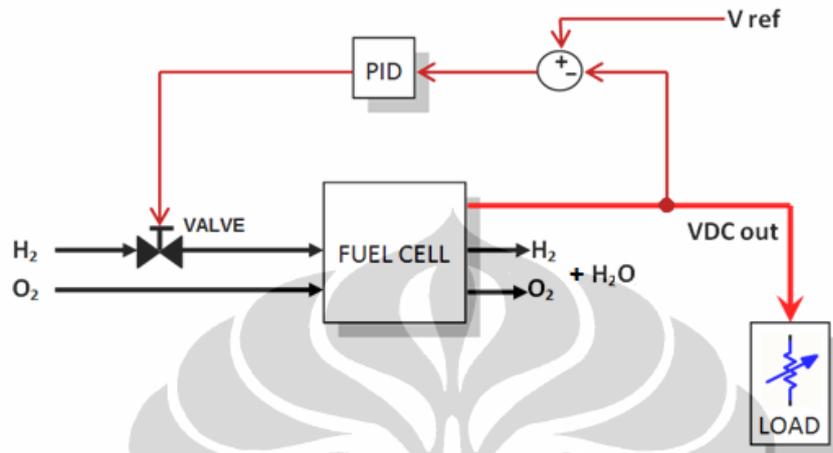
PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

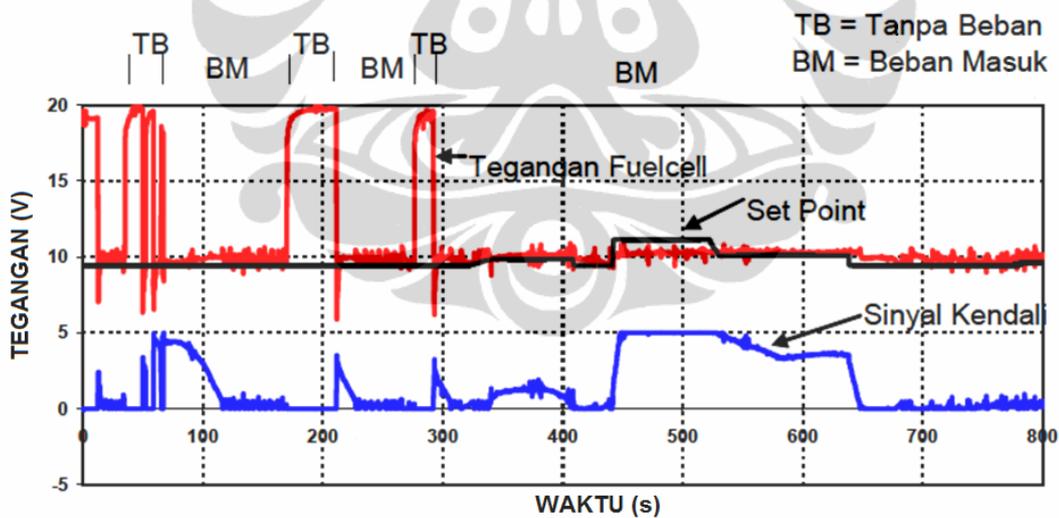
Kebutuhan akan listrik setiap hari semakin meningkat. Pembangkit listrik dari energi terbarukan mulai banyak digunakan terutama pada daerah yang terisolasi maupun sebagai *back-up* jika terjadi gangguan pada aliran listrik utama. Sebagian pembangkit listrik yang menggunakan energi terbarukan tersebut, dapat menghasilkan tegangan AC secara langsung, misalnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). Namun sebagian lainnya hanya dapat menghasilkan tegangan DC, misalnya pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan sistem *fuel cell*, sehingga diperlukan perangkat *inverter* yang berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Namun penggunaan energi terbarukan sebagai pembangkit listrik masih menghadapi kendala. Salah satunya adalah berfluktuasinya listrik yang dibangkitkan akibat perubahan dari sumber energi terbarukan tersebut. Sebagai contoh adalah arah dan kecepatan angin yang tidak konstan pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) atau intensitas cahaya matahari yang berubah sesaat karena terhalang awan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Namun fluktuasi tegangan keluaran pada pembangkit listrik dari energi terbarukan tidak selamanya didominasi oleh perubahan yang terjadi pada sumber energi terbarukan tersebut. Pada sistem *fuel cell*, perubahan masukan gas tidak terlalu mendominasi tegangan keluaran *fuel cell*. Hal ini disebabkan karena *fuel cell* memiliki batas cakupan (*range*) masukan gas yang harus dipenuhi agar dapat bekerja. Selama berada pada cakupan masukan gas tersebut, reaksi kimia pada *fuel cell* akan terjadi dan *fuel cell* akan menghasilkan tegangan keluaran. Namun tegangan keluaran dari *fuel cell* tersebut masih dapat berfluktuasi akibat adanya perubahan beban.

Penambahan suplai gas pada suatu sistem *fuel cell* tidak dapat mengatasi perubahan tegangan keluaran akibat adanya perubahan beban. Hal tersebut telah dibuktikan pada penelitian sebelumnya [1] dimana pengaturan masukan gas dilakukan dengan mengatur bukaan valve dan mengubah banyaknya aliran gas yang masuk ke *fuel cell* seperti yang tampak pada Gambar 1.1. Tetapi

penambahan suplai gas tersebut tidak dapat menanggulangi fluktuasi tegangan keluaran akibat perubahan beban yang cenderung lebih cepat seperti yang tampak pada Gambar 1.2.



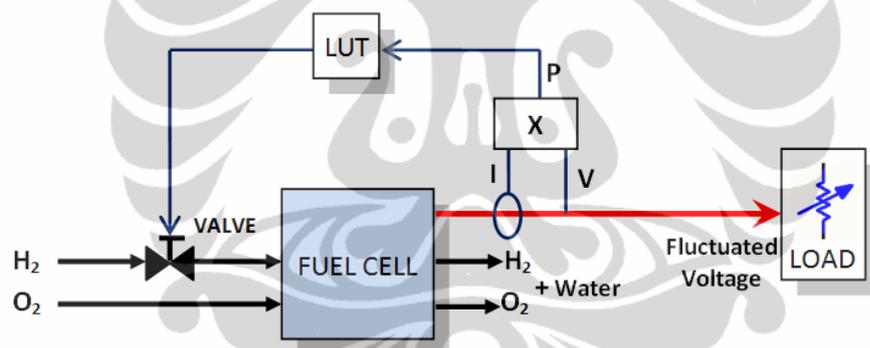
Gambar 1.1. Diagram Blok Pengendalian Aliran Masukan Gas Hidrogen Terhadap Perubahan Tegangan Keluaran [1]



Gambar 1.2. Hasil Uji Pengendalian Aliran Masukan Gas Hidrogen Terhadap Perubahan Tegangan Keluaran Fuel Cell [1]

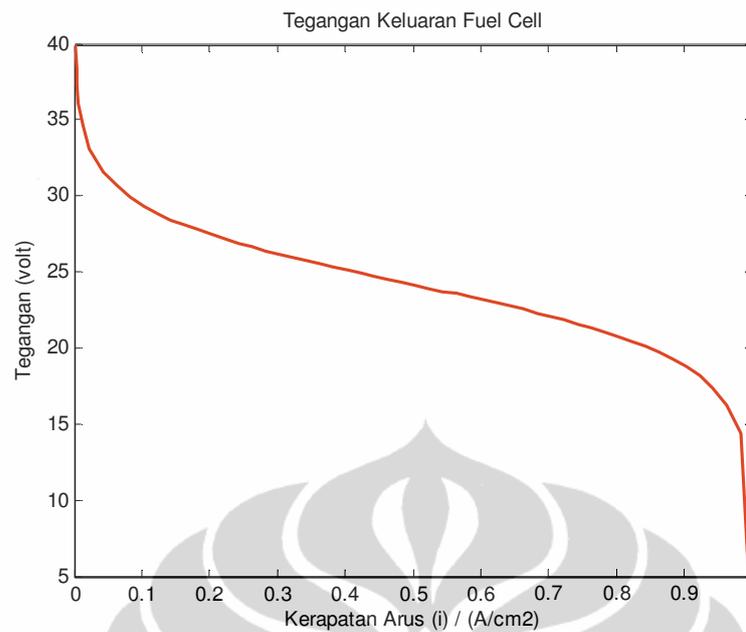
Pada Gambar 1.2 tersebut tampak bahwa tegangan keluaran fuel cell tersebut masih tetap berfluktuasi meskipun aliran hidrogen yang masuk telah dikendalikan. Hal ini masih terjadi karena respon perubahan aliran atau tekanan gas hidrogen yang masuk tidak memberikan respon yang cepat terhadap

perubahan tegangan keluaran fuel cell. Sedangkan perubahan beban memberikan reaksi yang sangat cepat pada perubahan tegangan keluaran fuel cell [1]. Pada bukaan valve maksimum dimana sinyal kendali telah mencapai 5 volt terjadi penambahan bukaan valve agar aliran gas membesar namun ternyata tegangan keluaran masih tetap tidak dapat mengikuti set point. Hal tersebut malah memboroskan gas karena gas hidrogen tidak bereaksi sempurna dan akan ikut terbuang bersama hasil reaksi kimia yang terjadi yaitu air. Begitu juga sebaliknya, saat tidak ada beban, pengurangan bukaan valve yang berlebihan sehingga pasokan gas yang masuk ke fuel cell berada dibawah range yang dibutuhkan, akan membuat fuel cell berhenti beroperasi. Pada penelitian yang lain, pengaturan bukaan valve dilakukan dengan tujuan untuk melakukan penghematan gas hidrogen dimana besarnya bukaan valve mengikuti daya beban yang terpasang seperti yang tampak pada Gambar 1.3. Namun demikian, tegangan keluaran yang dihasilkan masih tetap berfluktuasi.



Gambar 1.3. Diagram Blok Pengaturan Bukaan Valve Untuk Melakukan Penghematan Gas Hidrogen [2]

Fluktuasi tegangan keluaran fuel cell yang dominan dipengaruhi oleh arus beban tersebut sebenarnya dapat dijelaskan dengan kurva karakteristik fuel cell seperti yang tampak pada Gambar 1.4, karakteristik tegangan keluaran fuel cell memang dipengaruhi oleh arus keluaran yang berarti tegangan keluaran fuel cell dipengaruhi oleh besarnya beban. Jika perubahan beban berfluktuasi maka arus yang dihasilkan akan ikut berfluktuasi, sehingga tegangan keluaran dari fuel cell juga ikut berfluktuasi.



Gambar 1.4. Kurva Karakteristik Tegangan-Arus pada Fuel Cell [3]

Kondisi perubahan tegangan keluaran fuel cell yang berfluktuasi tersebut akan menyulitkan pengguna untuk menetapkan tegangan kerja pada beban yang akan dipasang. Sebagai contoh, jika beban yang akan dipasang adalah beberapa lampu pijar dengan tegangan kerja 12 volt, saat hanya ada 1 lampu yang bekerja, fuel cell dapat mengeluarkan tegangan sesuai kebutuhan tegangan kerja lampu tersebut, yaitu 12 volt. Namun ketika dilakukan penambahan beberapa lampu yang sama, tegangan keluaran fuel cell akan menurun dan lampu-lampu tersebut tidak lagi bekerja pada tegangan kerjanya, sehingga nyala lampu akan redup. Atau sebaliknya, jika fuel cell yang digunakan untuk menyalakan beberapa lampu sekaligus dapat mengeluarkan tegangan 12 volt. Namun saat hanya dibebani 1 lampu, tegangan keluaran fuel cell akan melonjak naik sehingga dapat melebihi tegangan kerja lampu tersebut. Akibatnya filamen lampu dapat putus dan lampu tidak dapat digunakan lagi.

Untuk mengatasi hal tersebut, biasanya digunakan *dummy load* yang dapat memaksa fuel cell agar bekerja pada kondisi arus optimal sehingga mengeluarkan tegangan sesuai tegangan kerja lampu sebelum lampu dihubungkan. Setelah lampu terhubung, tegangan keluaran fuel cell akan turun dan lampu akan menyala redup, sehingga *dummy load* harus segera dilepas agar lampu bekerja pada

tegangan kerjanya dan menyala dengan baik. Penggunaan dummy load ini selain memerlukan pengendalian, juga akan berakibat pada penggunaan gas yang boros, terutama saat beban yang terpasang kecil sehingga daya yang dihasilkan fuel cell lebih banyak yang terbuang melalui dummy load dibandingkan daya yang diserap oleh lampu.

Fluktuasi tegangan keluaran fuel cell juga menjadi masalah jika tegangan DC yang dihasilkan akan diubah menjadi tegangan AC menyesuaikan kebutuhan beban yang akan digunakan. Sekalipun pengubah tegangan berupa DC-AC inverter yang beredar komersial mempunyai range tegangan masukan tertentu, namun range tersebut tidak cukup lebar dibandingkan fluktuasi tegangan keluaran fuel cell. Hal ini menyebabkan kinerja inverter terganggu. Pada beban rendah, tegangan keluaran fuel cell dapat berada di atas batas maksimum tegangan masukan inverter, sehingga proteksi *over voltage* yang biasanya terdapat pada inverter komersial akan bekerja dan inverter akan mati. Begitu juga sebaliknya, saat beban yang terhubung besar, tegangan keluaran fuel cell dapat turun hingga di bawah batas minimum tegangan masukan inverter, hal ini akan membuat inverter tidak bekerja.

Pada umumnya, untuk sistem yang lain, fluktuasi tegangan dapat diatasi dengan penggunaan *voltage regulator*. Voltage regulator dapat menghasilkan tegangan yang relatif konstan sekalipun tegangan masukan yang ada berubah-ubah. Namun perlu mendapat perhatian bahwa penggunaan voltage regulator jenis linier tidak kalah borosnya dengan penggunaan dummy load. Hal ini disebabkan karena kelebihan tegangan yang ada akan diserap oleh voltage regulator dan akan didisipasikan dalam bentuk panas. Penggunaan voltage regulator jenis *switching* berupa *DC-DC converter* dapat dipertimbangkan karena lebih efisien dibandingkan voltage regulator jenis linier [4].

Pada tesis ini dicoba untuk mengadaptasi penggunaan *DC-DC converter* untuk mengatasi fluktuasi tegangan keluaran fuel cell sehingga diharapkan dapat menghasilkan tegangan pada range tegangan masukan suatu inverter komersial dan dapat digunakan untuk menyalakan beban berupa lampu dengan tegangan kerja 220 volt AC.

1.2. Tujuan

Tesis ini secara umum bertujuan untuk melakukan pengembangan metode perlakuan terhadap tegangan keluaran sistem fuel cell agar mampu bertahan pada nilai tegangan yang konstan terhadap perubahan beban yang cepat dengan menambahkan suatu DC-DC converter berupa *buck converter*.

1.3. Pembatasan Masalah

Tesis ini membahas tentang metode perlakuan terhadap tegangan keluaran fuel cell dengan menambahkan DC-DC converter berupa buck converter dengan batasan:

- buck converter bekerja pada frekuensi switching 20 kHz
- buck converter menggunakan pengendali proporsional dengan *gain* 100 kali
- induktor pada buck converter menggunakan inti toroid dengan lilitan kawat email berdiameter 0,8 mm yang dirangkap 16 buah kawat sebanyak 26 lilit dengan nilai induktansi 25 mH
- jenis fuel cell yang digunakan adalah PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) produksi Horizon tipe H-1000
- DC-AC inverter yang digunakan adalah DC-AC inverter komersial 660 watt
- beban yang digunakan berupa lampu pijar dengan tegangan kerja 220 volt AC

1.4. Susunan Penulisan

Penulisan laporan tesis ini dibagi ke dalam lima bab yang akan menjelaskan secara bertahap mengenai keseluruhan isi tesis ini.

Bab satu merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, tujuan, pembatasan masalah dan sistematika penulisan. Bab dua membahas dasar teori yang terkait sistem fuel cell dan buck converter. Bab tiga membahas mengenai metodologi perancangan, pembuatan dan pengujian. Bab empat berisi hasil pengujian dan pembahasannya. Bab lima merupakan kesimpulan dari pembahasan dalam laporan tesis ini.

BAB 2 DASAR TEORI

2.1. Fuel Cell

Fuel cell ialah alat konversi elektrokimia yang berfungsi mengubah energi kimia dari *fuel* (bahan bakar) menjadi energi listrik. Sama halnya dengan baterai yang menghasilkan listrik melalui proses elektrokimia. Perbedaan fuel cell dengan baterai adalah karena fuel cell dapat menghasilkan energi secara kontinyu. Hal ini disebabkan karena sumber energi fuel cell diperoleh langsung dari sumber di luar sistem, sedangkan pada baterai sumber energi bersatu dengan sistem, sehingga jika sumber energinya habis, maka harus dilakukan pengisian sumber energi lagi.

Fuel cell mulai mendapat perhatian, ketika NASA mulai menggunakan fuel cell buatan *General Electric* (GE) sebagai sumber energi pada komputer dan alat komunikasinya pada tahun 1965. Pada tahun 1969, pada pesawat Apollo 11 telah terpasang fuel cell. Fuel cell yang digunakan saat itu adalah alkaline fuel cell, yang dayanya lebih besar dibandingkan dengan fuel cell yang diproduksi oleh GE. Fuel cell tersebut digunakan pada *space shuttle* sebagai sumber listrik di dalam pesawat dan sumber air minum hingga saat ini.

Fuel Cell memiliki beberapa keunggulan yaitu :

- Mempunyai kemampuan untuk mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan lebih sempurna (efisiensi tinggi, panas buangan dapat digunakan kembali).
- Ramah lingkungan. Fuel cell beroperasi dengan emisi rendah, tanpa bising dan hasil buangan yang tidak berbahaya (air dan panas).
- Fuel cell dapat ditempatkan di berbagai lokasi sesuai kebutuhan, ukurannya fleksibel.

Namun, fuel cell juga memiliki beberapa kekurangan, diantaranya;

- Harga yang masih tinggi.
- Hidrogen yang akan digunakan sebagai bahan bakar tidak tersedia dengan mudah.

Setiap unit fuel cell terdiri atas 4 komponen utama, yaitu:

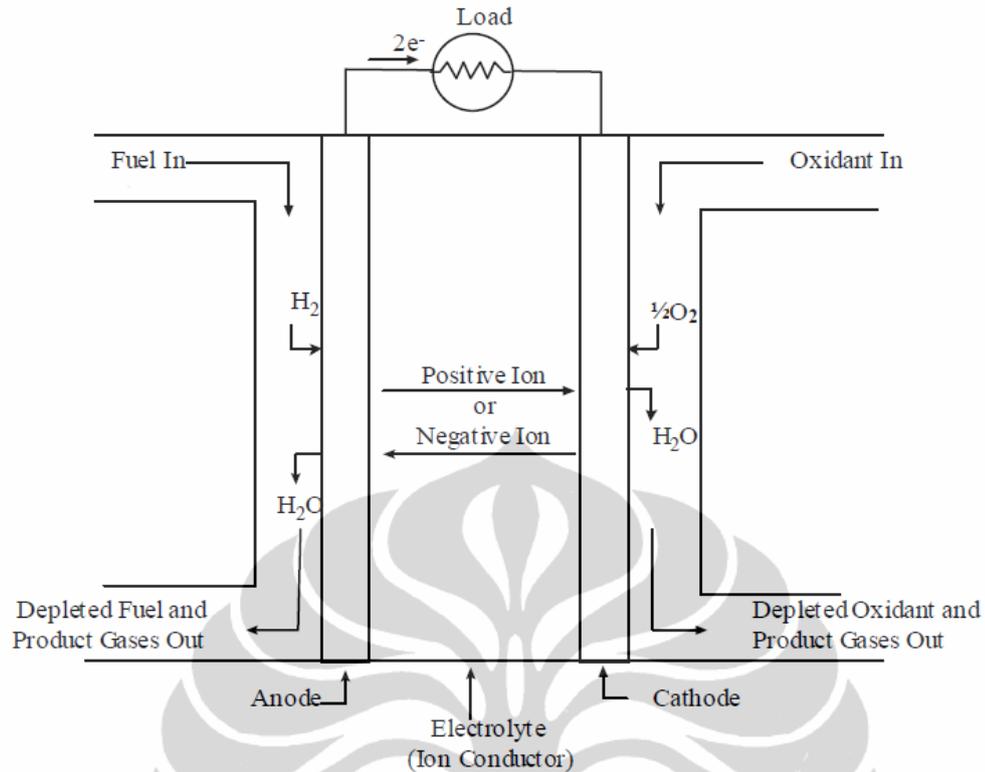
- Anoda (*fuel electrode*) yaitu komponen yang menjadi tempat untuk bertemunya fuel dengan elektrolit, sehingga ia menjadi katalisator dalam reaksi reduksi bahan bakar dan kemudian mengalirkan elektron dari reaksi tersebut menuju rangkaian eksternal (beban)
- Katoda (*oxygen electrode*) yaitu komponen yang menjadi tempat untuk bertemunya oksigen dengan elektrolit, sehingga ia menjadi katalisator dalam reaksi oksidasi oksigen dan kemudian mengalirkan elektron dari rangkaian eksternal kembali ke dalam fuel cell yang akhirnya menghasilkan air dan panas.
- Elektrolit yaitu bahan yang berfungsi sebagai penghantar yang mengalirkan ion yang berasal dari bahan bakar di anoda menuju katoda.
- Katalis yaitu material atau bahan khusus untuk mempercepat reaksi kimiawi atau reduksi-oksidasi.

Untuk mampu menghasilkan tegangan yang lebih tinggi maka sel tersebut disusun secara seri. Kumpulan dari banyak sel tunggal ini disebut *stack*.

2.2. Prinsip Kerja Fuel Cell

Prinsip kerja fuel cell dapat dilihat seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1. Fuel yang berupa gas hidrogen dialirkan ke permukaan anoda dan secara bersamaan, oksigen yang berasal dari udara bebas, dialirkan ke permukaan katoda. Saat elektroda dihubungkan dengan beban dari luar, maka proses yang terjadi adalah sebagai berikut; hidrogen (H_2) yang menyentuh permukaan anoda akan bereaksi secara kimiawi (reduksi), menghasilkan ion hidrogen (H^+) dan ion elektron (e^-).

Sedangkan pada katoda terjadi reaksi oksidasi, menghasilkan air. Ion hidrogen (H^+) akan bergerak dari permukaan anoda menuju katoda melalui elektrolit dan ion elektron (e^-) bergerak ke beban lalu menuju katoda.



Gambar 2.1. Prinsip Kerja Fuel Cell [3]

2.3. Jenis-jenis Fuel Cell

Fuel cell dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis berdasarkan elektrolit yang digunakan yaitu :

a. AFC (Alkaline Fuel Cell)

Fuel cell ini bekerja pada temperatur operasi yang rendah (50⁰-150⁰) dengan menggunakan bahan bakar hidrogen murni. Jenis membran yang digunakan adalah potassium hidroksida yang memiliki sifat konduktor dan melewatkan muatan negatif OH. Sedangkan katalis yang umumnya digunakan berbahan dasar nikel dan perak.

b. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell atau Polymer Electrolyte Fuel Cell)

Fuel cell ini bekerja pada temperatur operasi yang rendah (50⁰-120⁰) dengan menggunakan bahan bakar hidrogen murni. Jenis membran yang digunakan adalah *nafion*. Nafion memiliki sifat konduktor dan melewatkan muatan positif H⁺. Katalis PEMFC umumnya menggunakan bahan dasar platina.

c. PAFC (Phosporic Acid Fuel Cell)

Fuel cell ini bekerja pada temperatur operasi (190^0 - 220^0) dengan menggunakan bahan bakar hidrogen murni. Jenis membran yang digunakan adalah larutan asam yang tak bergerak seperti *phosporic acid* yang memiliki sifat konduktor dan melewati muatan positif H^+ . Katalisnya juga menggunakan platina.

d. MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)

Fuel cell ini bekerja pada temperatur operasi (600^0 - 700^0) dengan menggunakan bahan bakar campuran hidrogen dan karbon monoksida (CO). Jenis membran yang digunakan adalah larutan asam yang tak bergerak seperti larutan litium karbonat atau potasium karbonat, yang memiliki sifat konduktor. Katalis yang digunakan berbahan dasar nikel.

e. SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)

Fuel cell ini bekerja pada temperatur kerja (600^0 - 700^0) dengan menggunakan bahan bakar campuran hidrogen dan karbon monoksida (CO). Jenis membran yang digunakan adalah keramik berjenis *ceramic stabilised zirconta*. Keramik tersebut memiliki sifat konduktor dan dapat melewati ion O^{2-} . Katalisnya menggunakan bahan *porovkites*.

Tabel 2.1. Reaksi elektrokimia Fuel Cell [3]

Fuel Cell	Reaksi pada Anoda	Reaksi pada Katoda
Proton Exchange Membrane dan Phosporic Acid	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Alkaline	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
Molten carbonate	$H_2 + CO_3^= \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^= \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^=$
Solid Oxide	$H_2 + O^= \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^= \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^= \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^=$

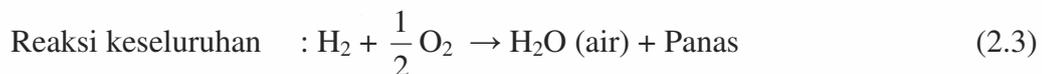
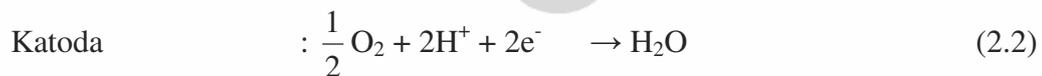
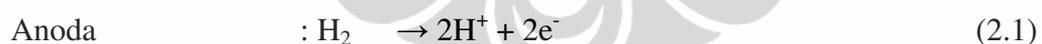
2.4. Karakteristik PEMFC

Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) disebut juga *proton exchange membrane fuel cell*. Disebut Proton Exchange Membrane (PEM),

karena menggunakan proton sebagai konduktor untuk melewati membran dari bahan polimer yang berfungsi sebagai elektrolit dari anoda ke katoda. Membran ini berupa lapisan tipis padat yang berfungsi sebagai elektrolit pemisah katoda dan anoda. Membran ini secara selektif mengontrol transport proton dari anoda ke katoda dalam fuel cell. PEMFC mengandung katalis platina. Untuk menghasilkan energi, PEMFC hanya memerlukan hidrogen, oksigen dan udara, serta air untuk mengoperasikannya. Material berbasis polimer memiliki beberapa keunggulan seperti:

- Mempunyai hantaran yang cocok untuk aplikasi sel elektrokimia.
- Mempunyai hantaran listrik yang rendah.
- Mempunyai sifat mekanik yang baik.
- Mempunyai kestabilan kimia, elektrokimia dan fotokimia yang baik.
- Murah dalam pembuatannya

Struktur satu unit PEMFC yang terdiri dari anoda, katoda serta membran, disebut *Membrane Electrode Assembly* (MEA). Hidrogen yang menyebar di anoda akan dibantu katalisator, dari bahan platina untuk melepaskan elektron menuju beban dan ion positif hidrogen (proton) yang akan dialirkan menuju katoda. Proton tersebut dipindahkan ke katoda melalui membran penghantar proton yang hanya membolehkan ion proton saja yang lewat dan menyaring elektron. Reaksi yang terjadi pada PEMFC adalah sebagai berikut [3]:



2.5. Persamaan Tegangan Keluaran PEMFC

Untuk setiap jenis fuel cell, persamaan tegangan keluaran tergantung pada reaksi sel yang terjadi. Untuk PEMFC, persamaan tegangan keluaran suatu sel adalah [3]:

$$V = N(E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left\{ \frac{p\text{H}_2 (p\text{O}_2 / P_{\text{std}})^{0.5}}{p\text{H}_2\text{O}} \right\} - L) \quad (2.4)$$

dimana :

V : tegangan keluaran stack (V)

N : jumlah cell dalam stack

E^0 : tegangan rangkaian terbuka dari cell (V)

T : temperatur kerja ($^{\circ}\text{K}$)

L : rugi tegangan (V)

pH_2, pO_2 dan pHO_2 : tekanan parsial dari setiap gas dalam cell.

R : konstanta gas (8.3144 J/mole $^{\circ}\text{K}$)

F : konstanta Faraday (96439 C/mole)

P_{std} : tekanan standard

Rugi tegangan L dinyatakan dengan persamaan [3]:

$$L = (i + i_n)r + a \ln\left(\frac{i + i_n}{i_o}\right) - b \ln\left(1 - \frac{i + i_n}{i_l}\right) \quad (2.5)$$

dimana :

i : keluaran kerapatan arus

i_n : kerapatan arus internal terhadap rugi-rugi arus internal

i_o : pertukaran kerapatan arus sehubungan rugi-rugi aktivasi

i_l : batas kerapatan arus sehubungan rugi-rugi konsentrasi

r : luas tahanan spesifik sehubungan rugi-rugi tahanan

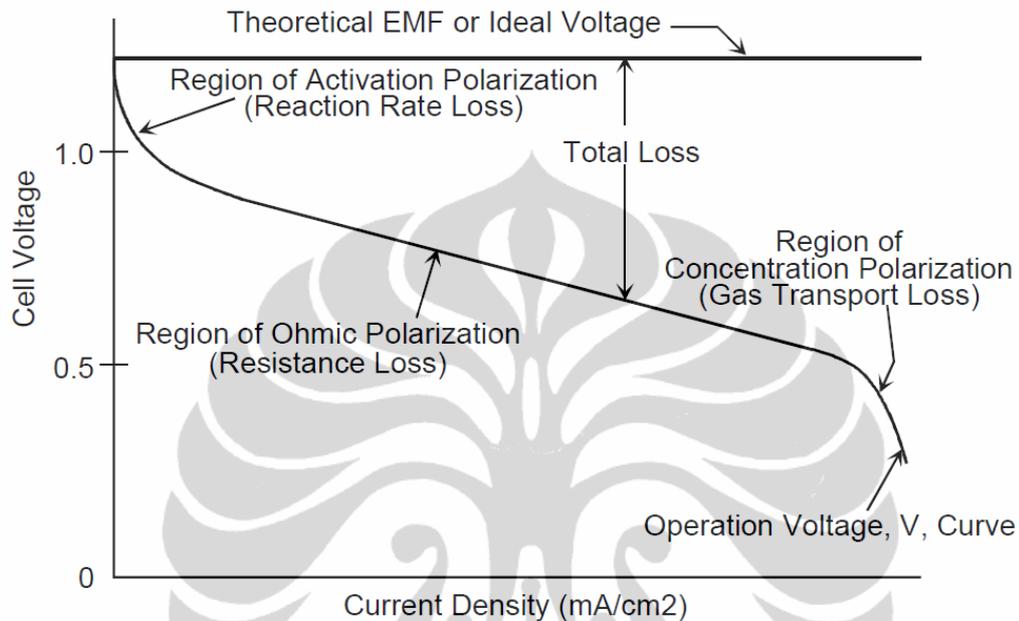
a, b : konstanta.

Tegangan ideal yang disebut juga tegangan *Nernst* yaitu tegangan yang dihasilkan oleh fuel cell saat open circuit pada saat kondisi temperatur dan tekanan ideal [3].

Tabel 2.2. Tegangan ideal tiap jenis fuel cell sebagai fungsi dari temperatur [3]

Temperatur	80°C (353K)	100°C (373K)	205°C (478K)	650°C (923K)	800°C (1073K)	1100°C (1373K)
Jenis Cell	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	TSOFC
Tegangan Ideal	1.17	1.16	1.14	1.03	0.99	0.91

Pada kenyataannya, fuel cell menghasilkan tegangan kurang dari kondisi ideal tersebut dengan makin meningkatnya kerapatan arus. Kerapatan arus sangat dipengaruhi oleh arus yang diperlukan oleh beban pada keluaran fuel cell. Gambar 2.2 adalah kurva polarisasi dari satu unit fuel cell.



Gambar 2.2. Kurva polarisasi fuel cell [3]

Dari Gambar 2.2 terlihat bahwa semakin besar kerapatan arus maka akan terjadi penurunan tegangan dari daerah tegangan ideal. Hal ini dikarenakan adanya rugi-rugi dari proses yang terjadi, baik proses kimia maupun mekanik. Rugi-rugi tersebut biasa disebut *polarisasi* dan terdiri atas 3 bagian yaitu;

- *Kinetic region/activation polarization/activation losses* adalah bagian yang merepresentasikan *losses* atau rugi-rugi energi yang hilang saat terjadi reaksi pada elektroda.
- *Resistance Region/Ohmic polarization* ialah daerah yang merepresentasikan jumlah total energi yang hilang karena hambatan aliran elektron pada elektrolit dan pada material elektroda.
- *Mass transport losses/concentration polarization* yaitu bagian yang merepresentasikan energi yang hilang karena adanya proses perpindahan massa atau proses difusi.

2.6. PEMFC Horizon H-1000

PEMFC Horizon H-1000 ini merupakan jenis fuel cell komersil yang diproduksi oleh Horizon. Fuel cell ini memiliki kapasitas daya 1000 watt. Fuel cell ini memiliki saluran H₂ input dan saluran H₂ output, sedangkan untuk saluran oksigennya hanya dialirkan dari blower.

Gambar 2.3 menunjukkan bagian-bagian sistem PEMFC H-1000 yang terdiri dari:

a. Stack

Stack adalah komponen utama dari sebuah fuel cell. Pada komponen ini terdapat membran polimer, anoda dan katoda. Di dalam stack ini terjadi reaksi gas H₂ dengan oksigen melalui membran polimer yang menguraikan gas H₂ menjadi ion dan menghasilkan aliran elektron.

b. H₂ Supply Valve

Valve ini berfungsi untuk membuka aliran gas H₂ dari tabung gas ke stack dan terletak sebelum input stack.

c. H₂ Purge Valve

Valve purging berfungsi membuang sisa reaksi gas dari dalam stack, berupa air dan gas sisa. Valve ini akan hidup secara periodik, yaitu setiap 10 detik.

d. Blower

Berfungsi untuk mengalirkan O₂ ke sistem serta untuk mengurangi panas pada sistem.

e. Controller

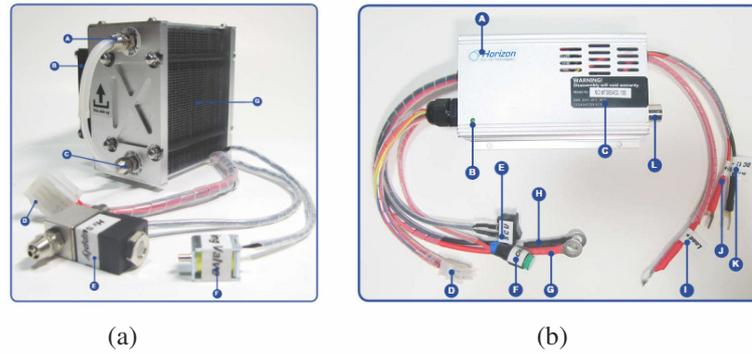
Berfungsi untuk mengontrol temperatur stack, kipas, valve input, valve purging dan *over current*.

f. On/Off Switch

Saklar ini digunakan untuk mematikan atau menghidupkan sistem. Penggunaannya dengan cara menekan tombolnya selama ±5 detik.

g. Short Circuit Unit

Saklar ini berfungsi untuk mematikan sistem dengan cepat. Saklar ini hanya digunakan jika dibutuhkan.



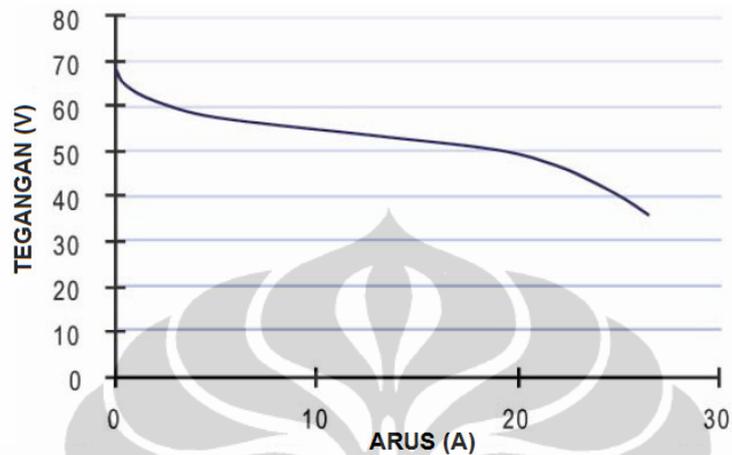
Gambar 2.3. Bagian-bagian PEMFC H-1000 [5]: (a) Stack, valve input, valve purging, blower. (b) Kontroller, saklar on/off, SCU

Sistem PEMFC H-1000 ini membutuhkan suplay H_2 dengan tekanan berkisar antara 7,2 psi sampai 9,4 psi. Gas H_2 yang dipakai haruslah yang murni, sedangkan gas oksigen disalurkan melalui blower yang terdapat pada stack. Spesifikasi PEMFC H-1000 ditunjukkan pada tabel 2.3.

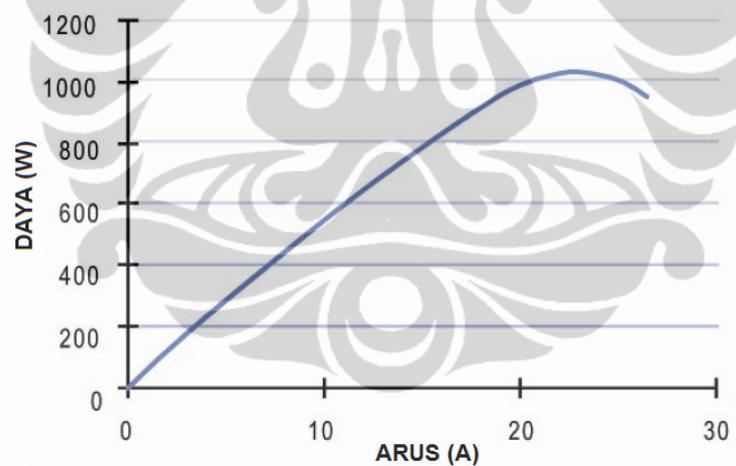
Tabel 2.3. Spesifikasi PEMFC H-1000 [5]

Type of fuel cell	PEM
Number of cells	72
Rated power	1000W
Rated performance	43V@23.5A
Output voltage range	39V-69V
Weight (with fan & casing)	4.2kg (9.3lbs)
Size	324x220x122mm (12.8x8.7x4.8in)
Reactants	Hydrogen and Air
Rated H_2 consumption	14l/min (847in ³ /min)
Hydrogen pressure	0.5-0.6Bar (7.2-9.4PSI)
Controller weight	0.45kg (0.99lbs)
Hydrogen supply valve voltage	12V
Purging valve voltage	12V
Blower voltage	12V
Ambient temperature	5-30°C (41-86°F)
Max stack temperature	65°C (149°F)
Hydrogen purity	99.999% dry H_2
Humidification	Self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Start up time	Immediate
Efficiency of system	40% @43V

Grafik karakteristik polarisasi PEMFC H-1000 ditunjukkan pada Gambar 2.4. dan Gambar 2.5. Grafik karakteristik ini diperoleh dari data spesifikasi yang disertakan dalam user manual Horizon H-1000.



Gambar 2.4. Kurva Polarisasi Perubahan Tegangan terhadap Perubahan Arus Beban pada PEMFC H-1000 [5]



Gambar 2.5. Grafik Perubahan Daya terhadap Perubahan Arus Beban pada PEMFC H-1000 [5]

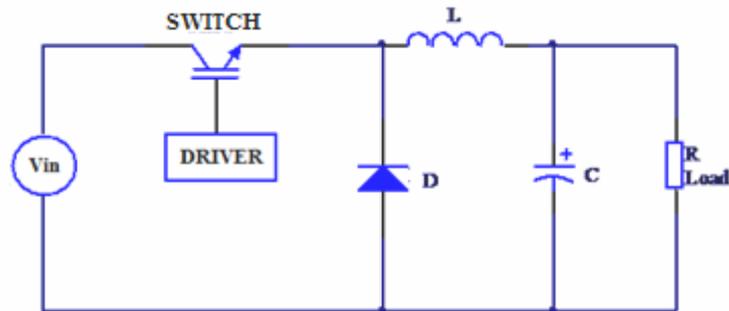
2.7. Buck Converter

Terdapat dua jenis *voltage regulator* yang sering digunakan, yaitu tipe linier dan *switching*. Pada tipe linier, transistor bekerja pada daerah aktif, sedangkan pada tipe *switching*, transistor bekerja sebagai saklar. Untuk tipe linier dapat dikelompokkan menjadi 2 kategori yaitu *series regulator* dan *shunt*

regulator, sedangkan untuk tipe *switching* dapat dikelompokkan dalam tiga kategori, yaitu *pulse-width modulated (PWM) DC-DC converters*, *resonant DC-DC converters* dan *switched-capacitor* atau dikenal juga sebagai *charge-pump voltage regulators* [6]. Voltage regulator tipe *switching* dapat dikategorikan sebagai *isolated* dan *non isolated*. Dikatakan *isolated* jika beban tidak terhubung langsung dengan sumber dan dikategorikan sebagai *non isolated* jika beban terhubung langsung dengan sumber. Untuk membedakan antara yang *isolated* dan *non isolated*, biasanya terdapat trafo yang memisahkan sumber dengan beban.

Secara umum, terdapat tiga topologi dasar PWM DC-DC converter, yaitu buck, boost, dan buck-boost. Rangkaian lain biasanya mempunyai kinerja mirip dengan topologi dasar ini sehingga sering disebut sebagai turunannya. Contoh dari DC-DC converter yang dianggap sebagai turunan rangkaian buck adalah forward, push-pull, half-bridge, dan full-bridge. Contoh dari turunan rangkaian boost adalah konverter yang bekerja sebagai sumber arus. Contoh dari turunan rangkaian buck-boost adalah konverter flyback. Perkembangan pesat terjadi di bidang integrasi, produksi, switch semikonduktor, dan teknik untuk mengurangi rugi-rugi *switching* [4].

PWM DC-DC converter jenis *non isolated*, secara garis besar dapat dikategorikan menjadi tiga, yaitu *buck converter* (penurun tegangan), *boost converter* (penaik tegangan) dan *buck-boost converter* (penaik-penurun tegangan). *Buck converter* merupakan salah satu jenis *switching converter* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan masukan menjadi tegangan keluaran dengan nilai yang lebih rendah. Seperti yang tampak pada Gambar 2.9, buck converter terdiri atas bagian *switching* dan filter. Bagian *switching* berupa switch semikonduktor dan diode *flywheel* atau *freewheeling* atau *catch* [6] bekerja sebagai pemotong tegangan DC menjadi gelombang kotak yang biasa disebut sebagai *DC chopper* [6] sedangkan induktor dan kapasitor membentuk *low pass filter* [7] akan membuat gelombang kotak ini menjadi tegangan DC. Tegangan DC ini kemudian akan diberikan pada beban.



Gambar 2.6 Buck Converter [6,7]

Sebagai penggerak semikonduktor agar bekerja sebagai switch, digunakan pengendali yang berfungsi mengkalkulasi sinyal kendali dari *error* antara tegangan keluaran DC dengan *set point* dan bagian *pulse width modulator* yang mengubah sinyal kendali analog menjadi pulsa digital dengan *duty cycle* tertentu. Untuk kondisi ideal, membuka dan menutupnya *switch* akan membuat induktor L mengalami pengisian dan pelepasan muatan. Induktor dalam keadaan tunak, akan menyimpan dan melepas arus dalam jumlah yang sama. Besarnya LC filter juga perlu ditentukan dalam merancang sistem *buck converter*.

Untuk menentukan besarnya induktansi yang digunakan adalah dengan memperhatikan arus pada induktor. Arus yang mengalir pada induktor harus dibuat untuk selalu kontinu. Artinya arus induktor tidak boleh turun hingga bernilai nol. Berdasarkan hal ini bisa didapatkan bahwa besarnya induktansi harus memenuhi syarat minimum [7] yaitu:

$$L_{min} > \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (2.6)$$

dimana: $D = \text{duty cycle} = t_{ON}/T_S$ [8]

$R = \text{resistansi beban}$

$f = \text{frekuensi switching}$

Sedangkan untuk menentukan besarnya kapasitansi yang harus digunakan adalah dengan memperhatikan *ripple* tegangan yang terjadi pada keluaran. *Ripple* tegangan kapasitor akan sebanding dengan perubahan muatan pada kapasitor. Dari hubungan definisi kapasitansi dimana perubahan muatan sebanding dengan kapasitansi dikalikan dengan perubahan muatan akan didapatkan hubungan faktor *ripple* [7] yaitu:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} \quad (2.7)$$

Dengan demikian besarnya nilai kapasitor dapat dihitung yaitu

$$C = \frac{(1-D)V_o}{8Lf^2\Delta V_o} \quad (2.8)$$

dimana: V_o = tegangan keluaran

ΔV_o = tegangan ripple

D = duty cycle

L = nilai induktansi induktor

f = frekuensi switching

C = nilai kapasitansi dari kapasitor

Dari persamaan (2.8) dapat diturunkan [8] menjadi:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{(1-D)}{8LCf^2} = \frac{\pi}{2}(1-D)\left(\frac{f_c^2}{f^2}\right) \quad (2.9)$$

dimana f_c adalah frekuensi *cut-off* dari low pass filter yang didefinisikan sebagai

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.10)$$

yang berarti bahwa tegangan ripple dapat diminimalisasi dengan memilih frekuensi cut-off dari low pass filter pada output sehingga $f_c \ll f_s$ [8].

Pada buck converter ideal juga berlaku persamaan hubungan tegangan keluaran terhadap tegangan masukan [8] yang dinyatakan sebagai berikut:

$$V_o = V_i \cdot D \quad (2.11)$$

dimana: V_o = tegangan output

V_i = tegangan input

D = duty cycle

Karena besarnya arus rata-rata pada kapasitor pada kondisi tunak adalah 0, maka besarnya arus rata-rata pada induktor sama dengan besarnya arus rata-rata keluaran atau arus beban [2] yaitu:

$$I_L = I_R = \frac{V_o}{R} \quad (2.12)$$

dimana:

- I_L = arus pada induktor
- I_R = arus pada beban
- R = resistansi beban
- V_o = tegangan output

Induktor adalah sebuah komponen elektronika pasif yang dapat menyimpan energi pada medan magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melintasinya. Kemampuan induktor untuk menyimpan energi magnet ditentukan oleh nilai induktansinya yang dinyatakan dalam satuan Henry. Biasanya sebuah induktor adalah sebuah kawat penghantar yang dibentuk menjadi kumparan sehingga dapat membuat medan magnet yang kuat di dalam kumparan dikarenakan hukum induksi Faraday. Sebuah induktor ideal memiliki induktansi, tetapi tanpa resistansi atau kapasitansi, dan tidak memboroskan daya. Sebuah induktor pada kenyataannya merupakan gabungan dari induktansi, resistansi dan kapasitansi. Pada suatu frekuensi, induktor dapat menjadi sirkuit resonansi karena kapasitansi parasitnya. Selain memboroskan daya akibat resistansi kawat, induktor berinti magnet juga memboroskan daya di dalam inti karena efek histeresis dan pada arus tinggi dapat mengalami nonlinearitas karena jenuh.

Toroid merupakan induktor berbentuk silinder dengan menghubungkan ujung-ujungnya menjadi berbentuk donat, sehingga menyatukan kutub utara dan selatan. Pada induktor toroid, medan magnet ditahan pada inti sehingga menyebabkan lebih sedikit radiasi magnetik yang terpancar ke luar dan juga lebih tahan terhadap gangguan medan magnet eksternal. Persamaan untuk menghitung nilai induktansi pada suatu induktor dengan inti berbentuk toroid [9] diantaranya adalah:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{2\pi R} = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 r^2}{D} \quad (2.13)$$

dimana:

L = nilai induktansi dari induktor toroid

μ_0 = permeabilitas vakum = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

μ_r = permeabilitas relatif bahan inti

μ = permeabilitas = $\mu_r \cdot \mu_0$

N = jumlah lilitan

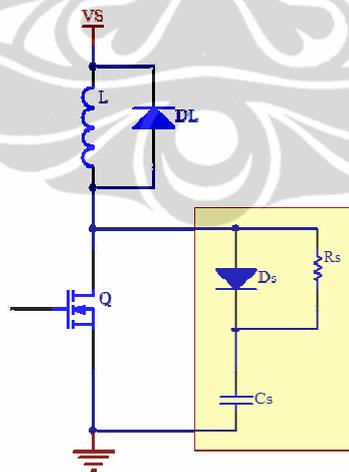
r = jari-jari gulungan kawat

D = diameter toroid

R = jari-jari toroid

A = luas penampang iris toroid

Pada umumnya, switch pada regulator switching perlu dilengkapi rangkaian *snubber*. Secara umum rangkaian snubber berfungsi sebagai pengamanan suatu switch semikonduktor terhadap suatu tekanan (*stress*) akibat kenaikan tegangan dan kenaikan arus saat terjadi transisi dari kondisi ON ke OFF ataupun sebaliknya. Stress tersebut dapat melewati rating dari suatu switch semikonduktor dan dapat menyebabkan kerusakan. Rangkaian snubber dapat meredam stress yang dapat terjadi pada suatu switch semikonduktor agar terhindar dari kerusakan. Gambar 2.7 menunjukkan rangkaian snubber yang terpasang pada switch semikonduktor.



Gambar 2.7. Rangkaian Snubber Pada Rangkaian Switch MOSFET [7]

Dioda D_s untuk rangkaian snubber pada Gambar 2.7 tersebut harus dipilih sedemikian rupa sehingga mampu dilalui arus saat switch transisi dari ON ke OFF dan mampu menahan tegangan yang terjadi. Selain itu, dioda harus dipilih

agar mempunyai *recovery time* yang sangat cepat sehingga dapat ON dan OFF lebih cepat dari frekuensi switching pada switch. Dengan demikian diode yang digunakan sebaiknya menggunakan fast switching diode dengan tegangan rating yang sama dengan kapasitor snubber dan rating arus yang sama dengan arus pada buck converter [10].

Untuk meredam ‘spike’ atau lonjakan tegangan sesaat yang dapat terjadi pada switch saat transisi ON ke OFF atau sebaliknya, besarnya kapasitansi untuk kapasitor snubber dapat dihitung menggunakan persamaan (2.14) [7] berikut:

$$C = \frac{I_L t_f}{2V_f} \quad (2.14)$$

dimana:

I_L = arus saat switching

t_f = waktu yang diperlukan mulai tegangan mencapai V_s hingga arus yang lewat mencapai nilai 0

V_f = tegangan yang diinginkan ketika arus mencapai 0

Resistor pada rangkaian snubber digunakan sebagai beban untuk membuang muatan pada kapasitor, besarnya nilai resistor dapat dihitung dengan asumsi 3 kali *time constant* agar kapasitor benar-benar ter-*discharge* sebelum switch memasuki periode OFF [7] berikutnya .

$$R < \frac{t_{ON}}{3C} \quad (2.15)$$

dimana:

R = nilai resistansi dari resistor

C = nilai kapasitansi dari kapasitor

t_{ON} = waktu saat switch dalam kondisi ON

Besarnya energi yang tersimpan pada kapasitor dapat dihitung dengan persamaan (2.16) [7] sebagai berikut:

$$W = \frac{1}{2} CV_s^2 \quad (2.16)$$

dimana:

W = energi yang tersimpan pada kapasitor

C = nilai kapasitansi dari kapasitor

V_S = tegangan masukan

Energi tersebut akan dipindahkan hampir seluruhnya ke resistor, sehingga besarnya daya yang diserap oleh resistor [7] adalah:

$$P_R = \frac{\frac{1}{2}CV_S^2}{T} = \frac{1}{2}CV_S^2 f \quad (2.17)$$

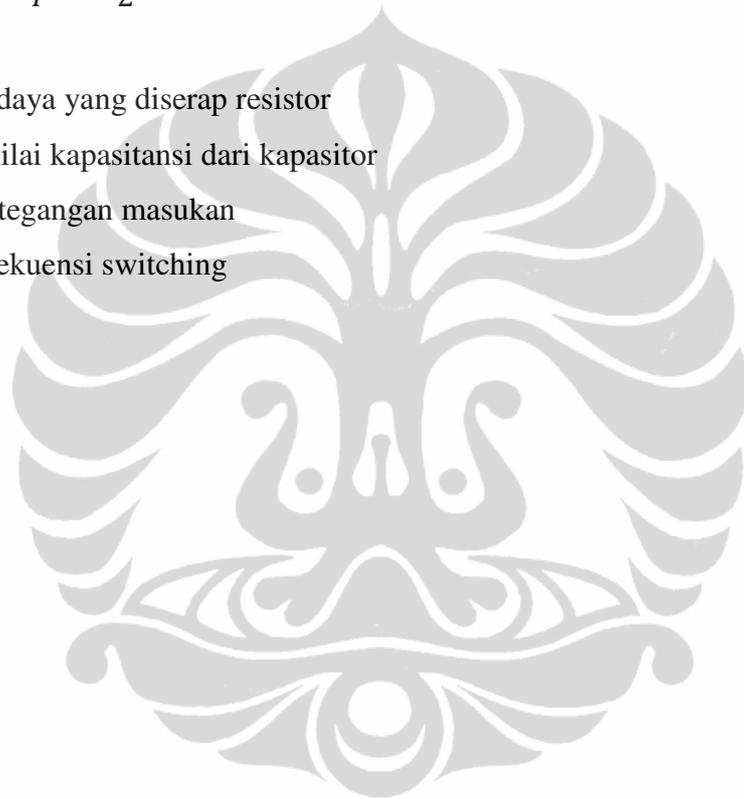
dimana:

P_R = daya yang diserap resistor

C = nilai kapasitansi dari kapasitor

V_S = tegangan masukan

f = frekuensi switching



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

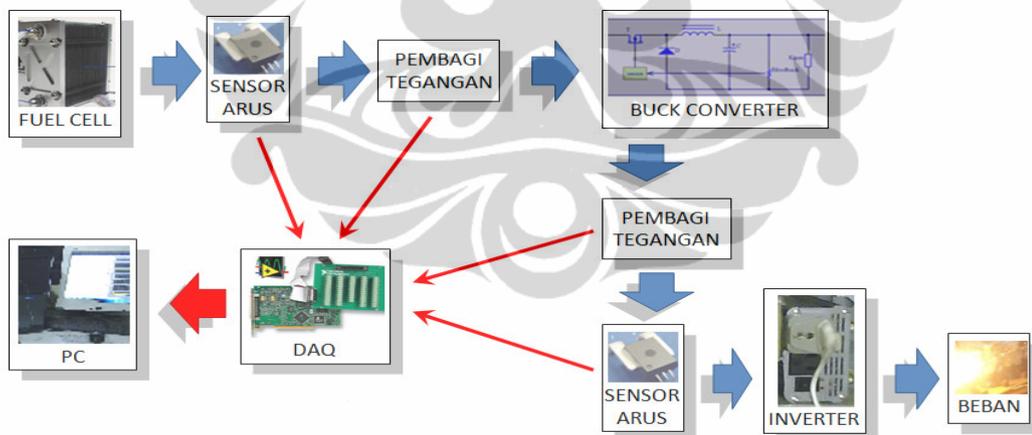
Pada tesis ini dilakukan perancangan dan pengujian terhadap suatu sistem fuel cell jenis PEMFC agar dapat menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai dengan *range* tegangan masukan inverter komersial yang mengubah tegangan DC ke tegangan AC sehingga dapat digunakan untuk menyalakan beban. Pada uji coba yang akan dilakukan, beban yang diberikan berupa lampu pijar dengan tegangan kerja 220 volt AC.

Tahapan penelitian secara garis besar akan meliputi langkah-langkah sebagai berikut:

1. Perancangan kebutuhan perangkat
2. Pembuatan DC-DC converter
3. Implementasi sistem
4. Uji coba sistem

3.1. Perancangan Kebutuhan Perangkat

Diagram blok perangkat yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Blok Perangkat yang Digunakan

3.1.1. Fuel Cell

Fuel cell yang digunakan adalah PEMFC Horizon H-1000 yang merupakan jenis fuel cell komersial produksi Horizon dan memiliki kapasitas daya 1000 watt dengan spesifikasi tegangan keluaran 39 volt hingga 69 volt. Fuel cell ini memiliki saluran gas H₂ input dan saluran gas H₂ output, sedangkan untuk saluran

oksigenya hanya dialirkan dari kipas. Tekanan suplai gas H₂ yang diperlukan agar fuel cell ini dapat bekerja adalah 7,2 psi hingga 9,4 psi. Fuel cell ini telah dilengkapi valve pada masukan dan keluaran yang diatur oleh suatu pengendali agar tekanan didalam fuel cell tetap. Pengendali juga mengatur kecepatan kipas agar dapat mensuplai oksigen dan mengatur temperatur fuel cell. Selain itu, fuel cell ini telah mempunyai sistem proteksi terhadap adanya arus beban berlebih, sehingga relatif aman untuk digunakan tanpa khawatir akan merusak sel yang ada pada fuel cell tersebut.

3.1.2. DC-AC Inverter

DC-AC inverter yang digunakan adalah inverter komersial berkapasitas maksimum 660 watt dengan tegangan masukan berkisar antara 11 hingga 13 volt DC dan tegangan keluaran berdasarkan spesifikasinya adalah 220 volt AC serta efisiensi sekitar 90%.

3.1.3. DC-DC Converter

Terdapat 2 buah DC-DC converter berupa buck converter yang akan digunakan yaitu buck converter komersial dengan *range* masukan 36 volt hingga 72 volt. Dari spesifikasinya, buck converter komersial ini memiliki tegangan keluaran 12 volt dan arus keluaran maksimum 25 volt sehingga daya keluaran maksimum adalah 300 watt.

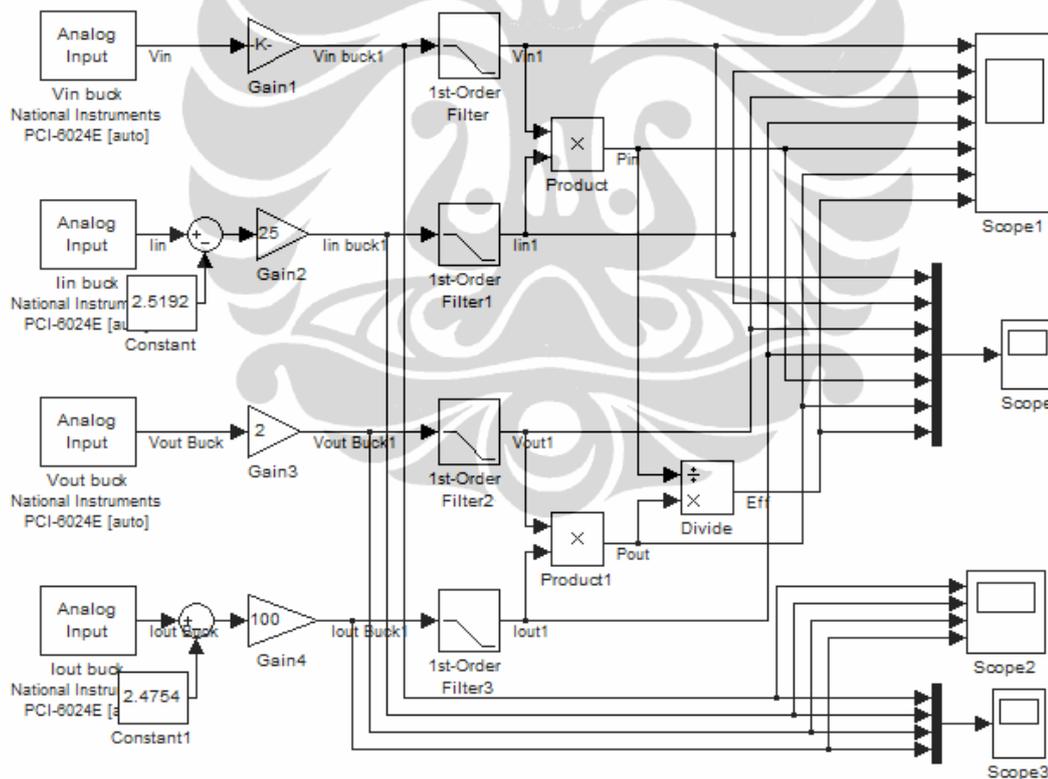
DC-DC converter yang kedua merupakan buck converter yang dibuat dengan range tegangan masukan 18 volt hingga 72 volt. Tegangan keluaran buck converter ini dapat diatur antara 6 volt hingga 20 volt. Untuk percobaan ini, tegangan keluaran diatur pada 12,4 volt. Arus maksimum dari buck converter ini dapat mencapai lebih dari 60 ampere dan efisiensi daya yang didapatkan pada percobaan yang telah dilakukan sebelumnya dapat mencapai lebih dari 60% tergantung dari tegangan masukan dan beban yang terpasang. Buck converter ini juga memiliki noise sekitar 600mV peak to peak pada tegangan keluarannya dan saat diberi beban, tegangan keluaran buck converter ini dapat turun 0,2 volt dari tegangan saat tanpa beban.

3.1.4. Beban

Beban yang akan digunakan adalah beberapa lampu pijar dengan tegangan kerja 220 volt AC dan daya nominal yang tersedia adalah 5 W, 15 W, 25 W, 60 W masing-masing 1 buah dan 6 buah lampu dengan daya nominal 100 W. Beban disusun paralel dengan masing-masing lampu diberi saklar tersendiri. Dengan demikian beban minimum adalah lampu dengan nominal 5 W dan daya maksimum adalah jumlah daya dari seluruh lampu (daya nominal = 705 W).

3.1.5. Perangkat Lunak

Untuk merekam data pengukuran selama pengujian, digunakan *data acquisition system* dari National Instrument yang terintegrasi dengan program MATLAB. Modul pencuplikan data tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Modul Pembacaan Data pada Program MATLAB

Pencuplikan tegangan masukan buck converter menggunakan rangkaian pembagi tegangan berupa resistor. Karena sulitnya mencari nilai resistansi yang tepat, maka dilakukan pengukuran terlebih dahulu pada resistor yang akan

digunakan dan didapatkan nilai resistansinya sebesar 9,76 k Ω dan 68,3 k Ω , sehingga nilai faktor penguatan yang harus dimasukkan pada Gain1 adalah 78,3/9,76. Pembagi tegangan ini dikarenakan tegangan yang diperbolehkan masuk pada data acquisition system yang digunakan maksimal bernilai 10 volt. Sedangkan untuk pembagi tegangan keluaran buck converter cukup dicari 2 buah resistor yang bernilai sama, sehingga penguatannya bernilai 2.

Untuk pembacaan data arus, dilakukan pengurangan dengan nilai offset yang ditentukan dengan melihat data yang terbaca saat tidak adanya arus yaitu 2,5192 volt untuk arus keluaran fuel cell dan 2,4754 untuk arus keluaran buck converter. Kemudian nilai tersebut dikuatkan sesuai sensitivitas yang tertera pada masing-masing datasheet sensor arus yang digunakan. Perhitungan daya langsung dilakukan dengan mengalikan hasil pembacaan arus dan tegangan, begitu juga dengan nilai efisiensi

3.1.6. Sensor

Sensor arus yang digunakan untuk mengukur arus keluaran fuel cell menggunakan ACS754SCB-50 dengan sensitifitas 40mV/A, sedangkan untuk arus keluaran buck converter menuju inverter diukur menggunakan sensor arus tipe ACS754SCB-200 dengan sensitifitas 10mV/A. Pada saat tidak ada arus yang melewati sensor, tegangan keluran sensor ini berada pada kisaran 2,5 VDC, namun perlu dilakukan kalibrasi dengan memberikan nilai offset agar didapat hasil yang lebih akurat. Karakteristik sensitivitas dari sensor arus ini dapat dilihat pada lampiran.

3.2. Pembuatan DC-DC Converter

Untuk pembuatan buck converter ini, penentuan spesifikasi awal dilakukan berdasarkan ketersediaan komponen yang mudah didapat dan kemampuan komponen berdasarkan *datasheet*. Spesifikasi buck converter yang akan dibuat adalah sebagai berikut:

- Tegangan input: 18 – 72 volt
- Tegangan output: 12 volt
- Arus output maksimum: 60 ampere

- Tegangan ripple maksimum 120 mV
- Frekuensi switching: 20 kHz

Langkah-langkah yang dilakukan pada pembuatan buck converter setelah penentuan spesifikasi awal adalah sebagai berikut:

3.2.1. Pembuatan Induktor

Untuk mendapatkan nilai induktansi minimum agar rangkaian buck converter bekerja pada mode kontinu, dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (2.7) yaitu:

$$L_{min} > \frac{(1 - D)R}{2f}$$

dimana nilai duty cycle D dapat dicari menggunakan persamaan (2.12) dan ditentukan pada nilai tegangan input maksimal yaitu 72 volt sehingga nilai duty cycle adalah:

$$D = \frac{V_o}{V_{in\ max}} = \frac{12}{72} = 0,167$$

Nilai R ditentukan agar saat tanpa beban, buck converter masih bekerja pada mode kontinu, sehingga nilai R adalah besarnya nilai resistansi kipas pendingin yang digunakan yang dihitung berdasarkan spesifikasi tegangan kerja dan arus nominal kipas pendingin tersebut yaitu:

$$V = 12 \text{ volt}$$

$$I = 0,2 \text{ ampere}$$

Sehingga resistansi beban adalah:

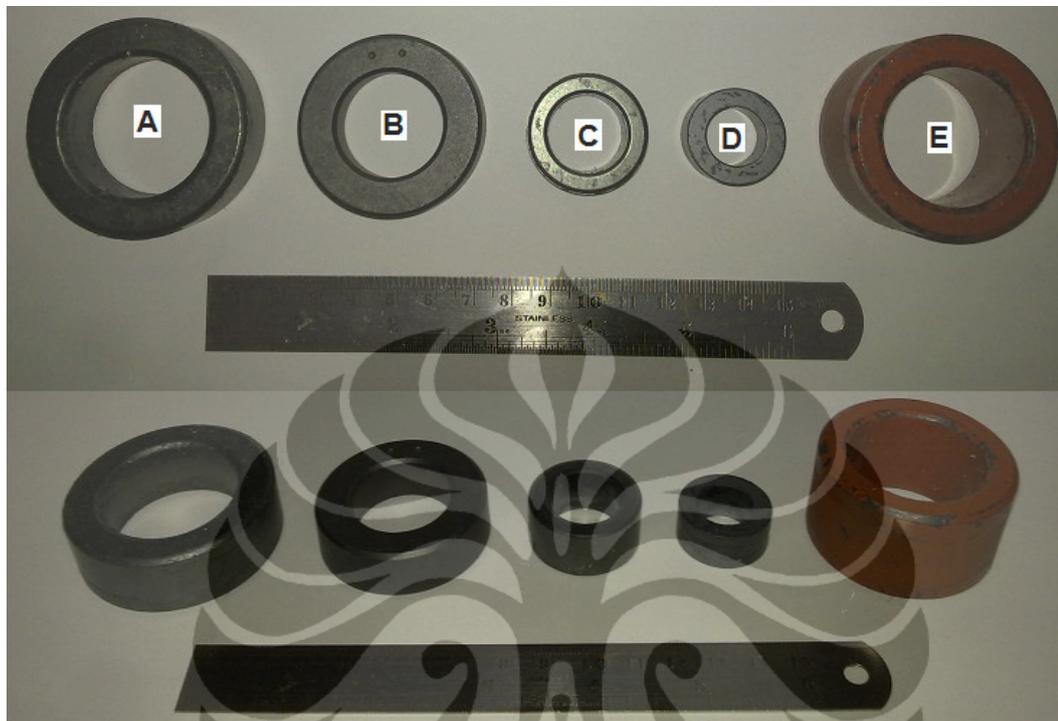
$$R = \frac{V}{I} = \frac{12}{0,2} = 60\Omega$$

Dengan demikian induktansi minimal dapat dihitung menggunakan persamaan (2.6) sebagai berikut:

$$L_{min} = \frac{(1 - D)R}{2f} = \frac{(1 - 0,167)60}{2 \times 20000} = 1,25 \text{ mH}$$

Pembuatan induktor dilakukan dengan memilih inti induktor berbentuk toroid yang mudah didapatkan, namun data parameter inti toroid tersebut tidak tersedia. Sehingga perlu dilakukan pengukuran dan perhitungan untuk mengetahui parameter inti toroid terutama permeabilitas relatif dari inti toroid tersebut. Dari 5

buah inti toroid yang didapat, masing-masing diukur dimensinya dan diberi nama. Perbandingan dimensi dari inti toroid tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Inti Toroid Yang Dihitung Permeabilitasnya

Masing-masing inti toroid dililit sebuah kawat email tembaga dengan jumlah lilitan dipilih secara acak membentuk induktor lalu diukur nilai induktansinya menggunakan *LCR meter*. Setelah didapatkan nilai induktansi pengukuran, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai permeabilitas relatif dari inti toroid tersebut. Perhitungan untuk mencari nilai permeabilitas relatif dari inti toroid tersebut didasarkan pada persamaan (2.13) yaitu:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{2\pi R} = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 r^2}{D}$$

Sehingga untuk mencari nilai permeabilitas inti toroid dapat dihitung sebagai berikut:

$$\mu_0 = \frac{L \cdot D}{\mu_r N^2 r^2}$$

Nilai induktansi hasil pengukuran berbeda-beda pada satu inti toroid yang sama akibat nilai frekuensi yang berbeda menyebabkan nilai permeabilitas relatif juga

berbeda, sehingga diambil nilai pembulatan kemudian dihitung nilai induktansi dari induktor menggunakan nilai pembulatan permeabilitas relatif tersebut. Hasilnya dibandingkan dengan hasil pengukuran sebelumnya. Hasil pengukuran dimensi, jumlah lilitan yang diberikan, hasil pengukuran induktansi dan nilai permeabilitas relatif dari masing-masing inti toroid yang didapat dari hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Hasil Perhitungan dan Pengukuran Untuk Mendapatkan Nilai Permeabilitas Relatif Inti Toroid Sebagai Dasar Pembuatan Induktor

Nama Toroid	Jumlah Lilitan	Dimensi Toroid						L ukur (H)			permeabilitas relatif	L hitung mH
		r coil	d1	d2	tinggi	tebal	keliling	100Hz	120Hz	1KHz		
A	12	0.009549	0.056	0.036	0.02	0.01	0.06	1.38m	1.39m	1.27m	4725	1.392287
B	11	0.007958	0.048	0.028	0.015	0.01	0.05	132u	132u	127u	675	0.135406
C	10.5	0.006525	0.031	0.02	0.015	0.0055	0.041	1.05m	1.05m	0.9m	5520	1.050446
D	10	0.005411	0.025	0.015	0.012	0.005	0.034	167u	167u	165u	1200	0.176624
E	13	0.011937	0.05	0.035	0.03	0.0075	0.075	2.02m	2.02m	1.92m	3350	2.027375
E	33	0.011937	0.05	0.035	0.03	0.0075	0.075	13.1m	13.13m	11.8m	3350	13.06397

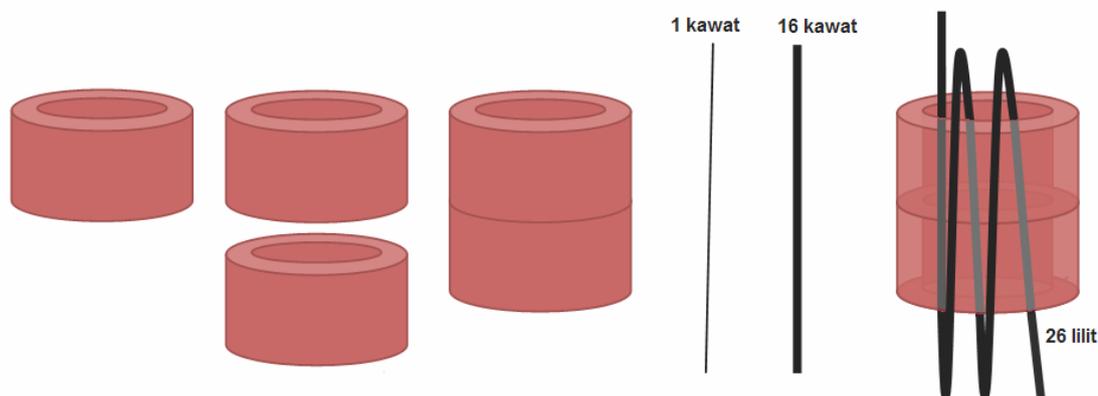
Dari beberapa inti toroid tersebut, dari segi dimensi, yang memungkinkan untuk digunakan adalah toroid A, B dan E karena dimensinya yang lebih besar sehingga memungkinkan untuk jumlah lilitan dan jumlah kawat yang dirangkap agar lebih banyak. Toroid B ternyata memiliki permeabilitas relatif yang terlalu kecil sehingga akan memerlukan lebih banyak kawat lilitan untuk memperbesar nilai induktansi. Toroid A mempunyai dimensi dan nilai permeabilitas yang paling memungkinkan untuk dijadikan inti induktor yang akan digunakan, namun pada saat akan dibuat, toroid A tersebut sulit ditemukan dipasaran. Sehingga dipilih toroid E sebagai inti induktor dan dilakukan perhitungan dan pengukuran ulang pada inti toroid E dengan jumlah lilitan berbeda yaitu 33 lilit untuk memastikan bahwa nilai permeabilitas relatif inti toroid tersebut sama.

Selain pemilihan inti berupa toroid, untuk pembuatan induktor ini ditentukan juga besarnya kawat email yang akan digunakan. Pemilihan besarnya kawat email didasarkan atas frekuensi maksimum yang dapat dilalui kawat tersebut agar tidak menimbulkan panas akibat 'skin depth effect' yaitu arus hanya melewati bagian luar dari suatu kawat penghantar akibat frekuensi yang terlalu tinggi. Berdasarkan hal tersebut, dipilih kawat berukuran diameter 0,8 mm yang

mempunyai spesifikasi frekuensi maksimum 27kHz karena frekuensi switching yang akan digunakan dalam pembuatan buck converter ini adalah 20 kHz. Ukuran kawat dengan diameter 0,8 mm tersebut berdasarkan standar AWG dapat menghantarkan arus hingga 11 ampere sehingga agar dapat dilalui arus sebesar 60 ampere tanpa menimbulkan panas, lilitan kawat berdiameter 0,8 mm tersebut dirangkap hingga 8 rangkap. Namun ternyata penambahan kawat tersebut masih kurang karena saat dilalui arus besar, kawat lilitan pada induktor masih menimbulkan panas berlebih.

Sekalipun secara perhitungan maupun dari hasil pengukuran, jumlah lilitan diatas 13 lilit sudah cukup untuk mendapatkan nilai induktor 2 mH yang berdasarkan desain nilai induktansi minimal untuk frekuensi switching 20 kHz adalah 1,25 mH, namun pada kenyataannya jumlah lilitan yang sedikit tersebut akan membuat switch menjadi panas akibat arus yang melewatinya. Selain itu ada dugaan luas penampang iris inti toroid juga kurang sehingga ikut menambah panasnya induktor saat dilalui arus besar.

Dengan pertimbangan-pertimbangan tersebut dan juga karena membuat lilitan pada inti berbentuk toroid memerlukan waktu yang lama, maka diputuskan untuk membuat induktor dengan 2 buah toroid E disusun bertumpuk untuk mendapatkan luas penampang iris yang lebih besar serta merangkap kawat untuk dililit sebanyak 16 rangkap dan jumlah lilitan sebanyak 26 lilit sehingga didapatkan induktor dengan nilai induktansi sebesar 25 mH. Konstruksi pembuatan induktor tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan pada Gambar 3.5 dapat dilihat induktor yang telah dibuat dan disandingkan dengan contoh inti toroid yang digunakan.



Gambar 3.4. Konstruksi Pembuatan Induktor



Gambar 3.5. Induktor Yang Dibuat dan Contoh Inti Toroid Yang Digunakan

3.2.2. Penentuan Nilai Kapasitor

Penentuan nilai kapasitor dihitung menggunakan persamaan (2.8) dimana nilai tegangan ripple ΔV_O ditentukan pada spesifikasi awal yaitu sebesar 120 mV sedangkan nilai duty cycle D , seperti halnya dalam penghitungan nilai induktor minimum, dicari menggunakan persamaan (2.11) dan ditentukan pada nilai tegangan input maksimal yaitu 72 volt sehingga nilai duty cycle adalah:

$$D = \frac{V_o}{V_{in\ max}} = \frac{12}{72} = 0,167$$

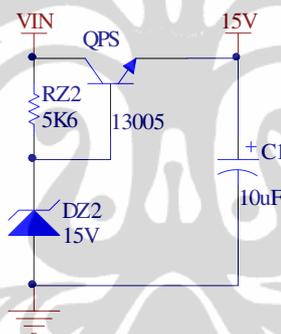
sehingga nilai kapasitor dapat dihitung sebagai berikut:

$$C_{min} = \frac{(1 - D)V_o}{8Lf^2\Delta V_o} = \frac{(1 - 0,167)(12)}{(8)(1,25 \times 10^{-3})(20000^2)(120 \times 10^{-3})} = 20,83 \mu F$$

Namun untuk mengurangi noise, kapasitor yang dipasang adalah 30 mF yang terdiri dari 3 buah kapasitor 10000 μ F/25V yang dipasang paralel.

3.2.3. Catu Daya

Catu daya ini digunakan untuk mensuplai rangkaian pengendali dan pembangkit PWM serta rangkaian driver MOSFET. Rangkaian utamanya menggunakan zener dengan transistor sebagai penguat arus.



Gambar 3.6. Rangkaian Catu Daya untuk Mensuplai IC Pembangkit PWM dan Driver MOSFET

Nilai resistor dihitung agar sanggup menahan sisa tegangan dengan mempertimbangkan kekuatan daya yang dapat ditahan. Tegangan yang harus ditahan resistor RZ adalah

$$V_{RZ} = V_{INmax} - V_{DZ} = 72 - 15 = 57 V$$

Arus yang melewati resistor RZ sama dengan arus untuk menyalakan diode zener DZ. Tetapi nilai arus ini dibatasi oleh kekuatan daya yang sanggup ditahan oleh diode zener. Sehingga arus resistor RZ sama dengan arus maksimum DZ yaitu

$$I_{RZ} = I_{DZ} = \frac{P_{DZ}}{V_{DZ}} = \frac{0,25}{15} = 17 mA$$

Jika nilai arus maksimum pada resistor telah diketahui, maka nilai resistor dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_{RZ} = \frac{V_{RZ}}{I_{RZ}} = \frac{57}{0,017} = 3420 \Omega$$

Daya yang didisipasikan resistor RZ dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_{RZ} = \frac{V_{RZ}^2}{R_{RZ}} = \frac{57^2}{3420} = 0,95 W$$

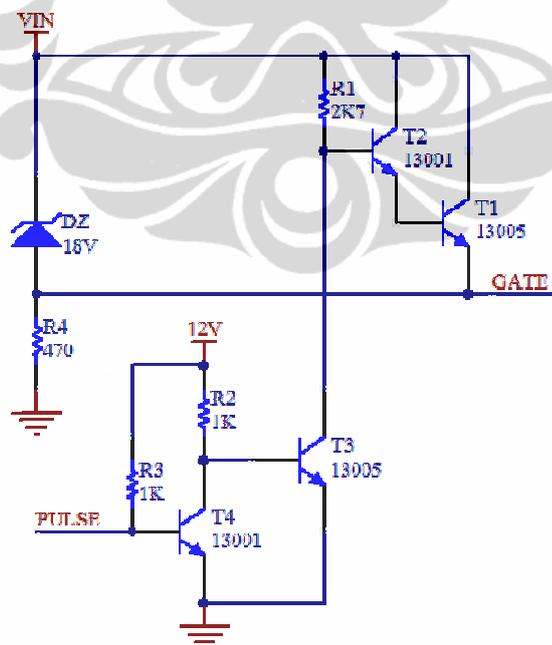
Pada kenyataannya, jika dipasang resistor RZ dengan nilai 4,7 k Ω / 1 W, resistor RZ akan terlalu panas untuk menahan tegangan sisa sebesar 57 volt tersebut. Sehingga dihitung ulang dengan asumsi arus yang lewat hanya 10 mA sebagai berikut:

$$R_{RZ} = \frac{V_{RZ}}{I_{RZ}} = \frac{57}{0,01} = 5700 \Omega$$

Dengan demikian resistor yang dipasang adalah nilai yang mendekati yaitu 5,6 k Ω dan batas daya diperbesar menjadi 2 W.

3.2.4. Rangkaian Driver MOSFET

Untuk rangkaian driver MOSFET tipe P yang akan ON jika tegangan V_{GD} bernilai -10 volt hingga -20 volt, digunakan rangkaian seperti tampak pada Gambar 3.7.

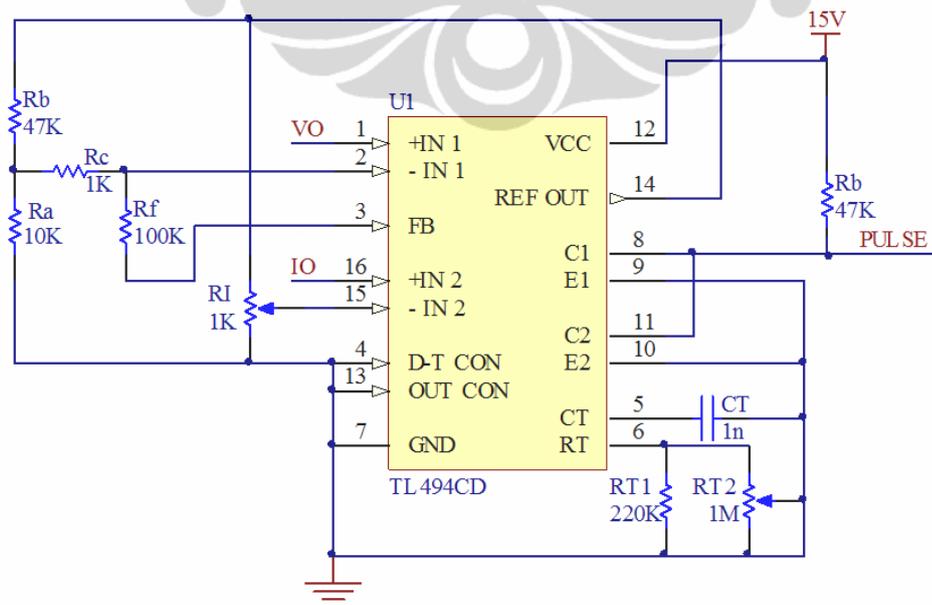


Gambar 3.7. Rangkaian Driver untuk MOSFET Tipe P

Saat kondisi PULSE bernilai tinggi, T4 akan ON, T3 akan OFF sehingga T2 dan T1 akan ON dan membuat $V_{GD} = 0$ volt sehingga MOSFET akan OFF. Sedangkan saat kondisi PULSE bernilai rendah, T4 akan OFF, T3 akan ON sehingga T2 dan T1 akan OFF dan membuat $V_{GD} = -18$ volt sehingga MOSFET akan ON. Perlu diingat bahwa jalur PULSE langsung terhubung pada kaki 8 dan 11 IC TL494 yang merupakan kolektor dari transistor internal sehingga saat terjadi 'duty cycle positif', transistor tersebut akan ON dan keluaran kolektor akan bernilai 0 volt.

3.2.5. Rangkaian Pengendali dan Pembangkit PWM

TL494 merupakan rangkaian terintegrasi yang berfungsi sebagai rangkaian pembangkit PWM. Didalamnya sudah terdapat komparator yang dapat digunakan untuk membandingkan nilai tegangan keluaran dengan set point yang diinginkan [11]. Pada perancangan dan pembuatan buck converter ini, hasil komparasi nilai tegangan keluaran dengan set point berupa nilai kesalahan (error) dikuatkan dengan penguatan 100 kali membentuk pengendali proporsional. Gambar 3.8 memperlihatkan rangkaian pengendali dan pembangkit PWM menggunakan IC TL494. Nilai penguatan didapatkan dari pembagian nilai resistansi $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ dengan $R_c = 1 \text{ k}\Omega$.

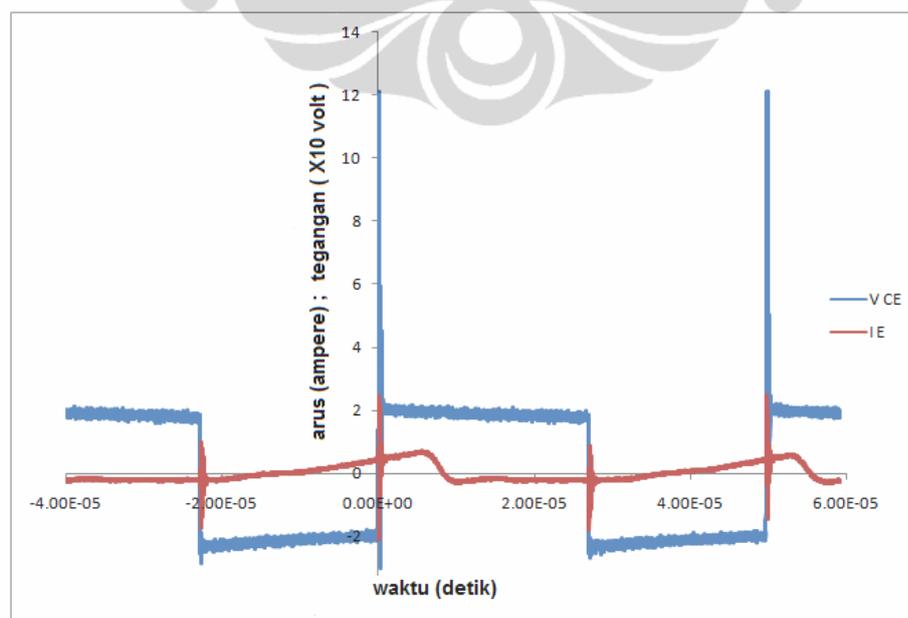


Gambar 3.8. Rangkaian IC TL494 Sebagai Pembangkit PWM [11]

Pada Gambar 3.8 tersebut, tegangan VO yang masuk ke kaki 1 sebelumnya telah melewati rangkaian pembagi tegangan yang dapat diatur menggunakan resistor variable sehingga untuk tegangan keluaran 12 volt akan dihasilkan tegangan sekitar 0,8 volt. Hal ini dilakukan agar keluaran dapat diatur sesuai dengan keperluan. Sedangkan pembandingnya diambil dari tegangan referensi internal sebesar 5 volt yang dilewatkan pada resistor pembagi tegangan Ra dan Rb sehingga didapatkan tegangan sekitar 0,8 volt. Untuk pembatas arus, tegangan yang dihasilkan oleh sensor arus akan langsung dibandingkan dengan tegangan yang diatur oleh resistor variabel RI sehingga jika tegangan yang dihasilkan oleh sensor arus lebih besar dari tegangan pembanding, yang berarti arus yang lewat melebihi yang diinginkan, maka tegangan pembanding akan lebih tinggi dari tegangan sinyal *ramp*, sehingga duty cycle PWM akan bernilai 0 dan switch pada buck converter akan OFF.

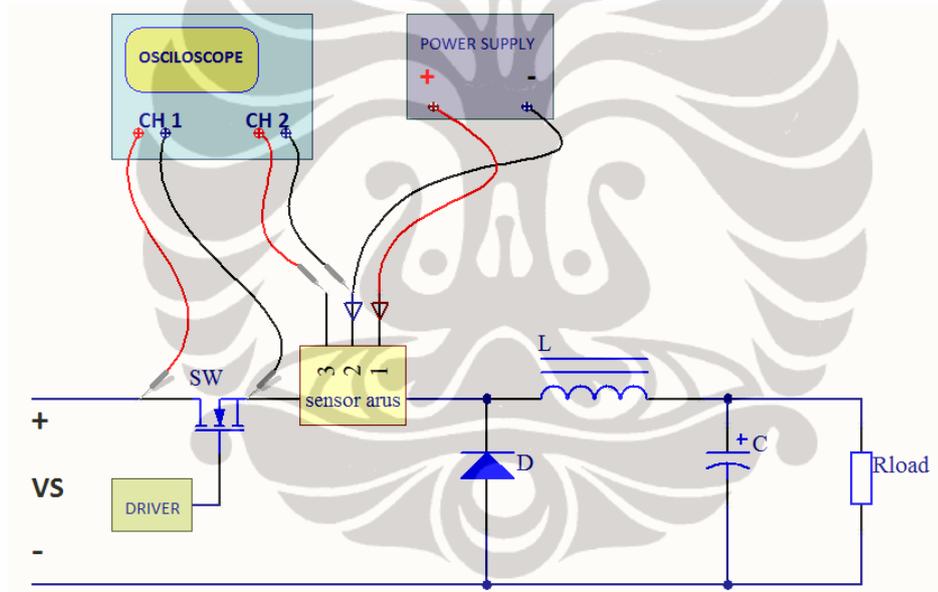
3.2.6. Rangkaian Snubber

Rangkaian snubber digunakan karena saat dilakukan pengukuran awal untuk melihat bentuk gelombang tegangan V_{CE} terlihat 'spike' yang cukup besar saat switching OFF seperti yang tampak pada Gambar 3.9.



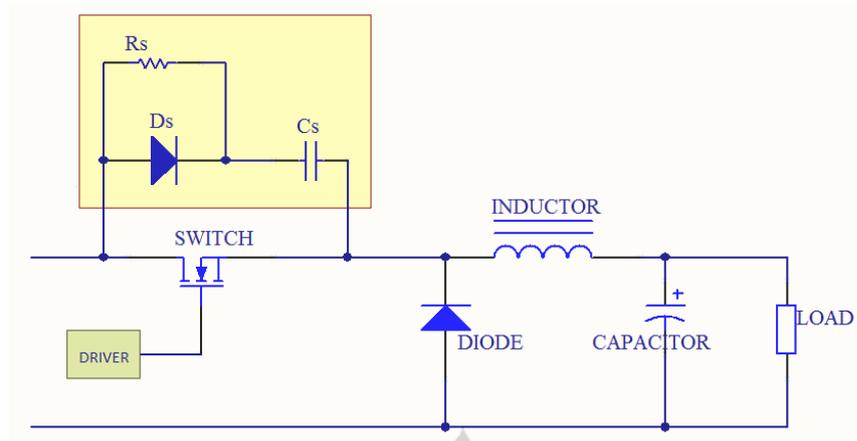
Gambar 3.9. Bentuk Gelombang Tegangan V_{CE} dan Arus I_E pada Switch

Pada Gambar 3.9 yang merupakan data pengukuran tegangan AC menggunakan osiloskop digital Tetronic dimana channel 1 merupakan tegangan V_{CE} dengan penguatan pada probe 10X, sedangkan channel 2 merupakan tegangan yang dihasilkan oleh sensor arus ACS706ELC-20A dengan sensitifitas 100mV/A. Pengukuran dilakukan untuk tegangan masukan 44 volt dan arus beban sekitar 15 ampere, dimana terjadi 'spike' pada tegangan V_{CE} hingga mencapai sekitar 140 volt pada saat switch transisi dari ON ke OFF. Perlu diingat bahwa pada saat switch ON, tegangan V_{CE} idealnya bernilai 0 dan saat switch OFF, tegangan V_{CE} idealnya bernilai sama dengan tegangan input (dalam hal ini bernilai 44 volt). Bagan pengukuran tampak pada Gambar 3.10.



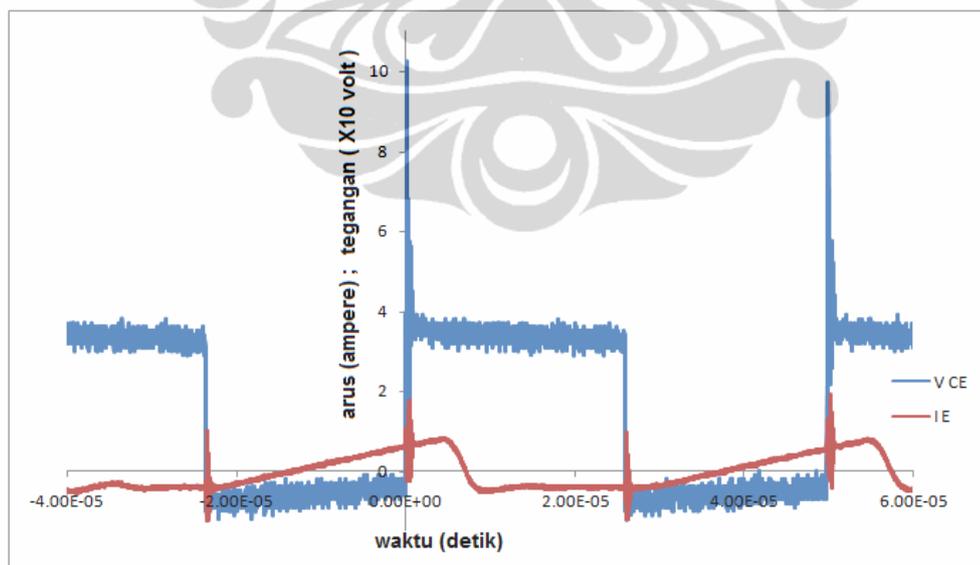
Gambar 3.10. Bagan Pengukuran Tegangan V_{CE} dan Arus I_E

Dari pengukuran awal tersebut, diputuskan untuk menambahkan suatu rangkaian snubber untuk mengurangi 'spike' yang terjadi agar tidak merusak switch yang berdasarkan spesifikasinya hanya mempunyai rating tegangan maksimum 600 volt. Gambar 3.11 menunjukkan rangkaian snubber yang akan digunakan.

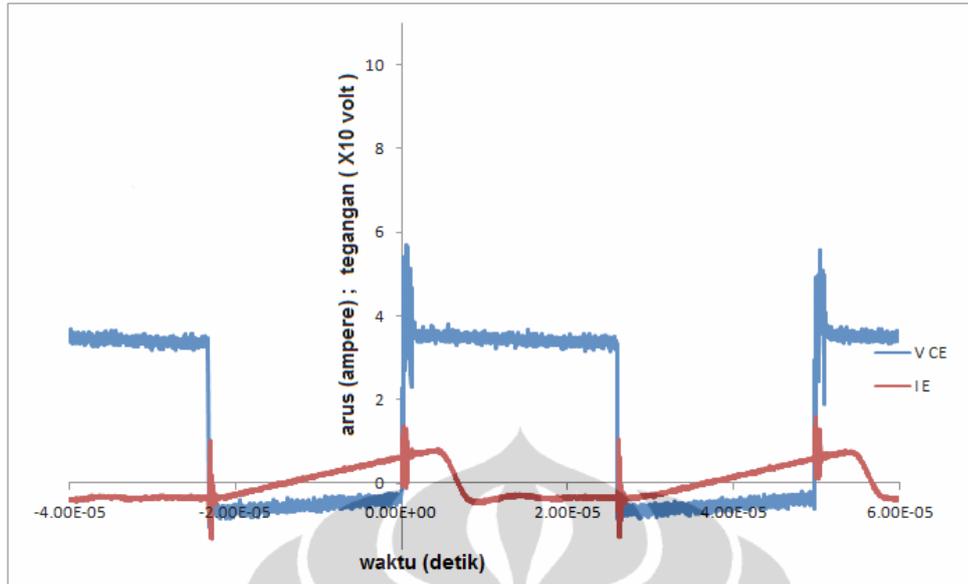


Gambar 3.11. Rangkaian Snubber Pada Buck Converter

Untuk melihat pengaruh penambahan rangkaian snubber pada buck konverter, dilakukan uji coba awal pada kondisi Gambar 3.6 yaitu tegangan masukan 44 volt dan arus 15 ampere dengan nilai kapasitor dan resistor dipilih acak, hasilnya tampak pada Gambar 3.12 untuk nilai kapasitor 100nF dan resistor 100 Ω serta Gambar 3.13 untuk nilai kapasitor 330nF dan resistor 100 Ω . Dari hasil tersebut, dapat dilihat bahwa rangkaian snubber yang akan digunakan dapat mengurangi ‘spike’ yang terjadi.



Gambar 3.12. Bentuk Gelombang Tegangan V_{CE} dan Arus I_E pada Switch Saat Menggunakan Snubber Dengan Nilai Kapasitor 100nF dan Resistor 100 Ω



Gambar 3.13. Bentuk Gelombang Tegangan V_{CE} dan Arus I_E pada Switch Saat Menggunakan Snubber Dengan Nilai Kapasitor 330nF dan Resistor 100 Ω

Untuk mendapatkan nilai komponen yang tepat, penentuan nilai kapasitor mengacu pada persamaan (2.14) yaitu

$$C = \frac{I_L t_f}{2V_f}$$

dimana nilai t_f berdasarkan Gambar 3.9 sekitar 10 μ S dan V_f yang diinginkan adalah 72 volt berdasarkan spesifikasi awal desain untuk tegangan masukan maksimum. Begitu pula dengan nilai arus I_L , yang digunakan adalah nilai arus maksimum dari spesifikasi awal desain yaitu 60 ampere. Sehingga nilai kapasitor untuk rangkaian snubber ini dapat dihitung sebagai berikut:

$$C = \frac{I_L t_f}{2V_f} = \frac{(60)(10^{-5})}{2(72)} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{144} = 4,166\mu F$$

Sedangkan nilai resistansi dihitung berdasarkan persamaan (2.15) yaitu

$$R < \frac{t_{ON}}{3C}$$

dimana nilai t_{ON} adalah duty cycle minimal yang dapat terjadi dikalikan dengan waktu switching. Karena pada kondisi ideal $V_o = D.V_i$, sehingga nilai duty cycle minimal dapat ditentukan berdasarkan besarnya tegangan keluaran V_o dibagi V_i maksimal. Dengan demikian nilai t_{ON} adalah

$$t_{ON} = DT = \frac{D}{f} = \frac{V_o}{V_i \cdot f} = \frac{12}{(72)(20000)} = 8,33 \mu S$$

Sehingga nilai resistansi minimal untuk resistor snubber adalah

$$R = \frac{8,33 \cdot 10^{-6}}{3(4,166 \cdot 10^{-6})} = 0,6 \Omega$$

Daya yang harus dapat diserap oleh resistor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.17)

$$P_R = \frac{1}{2} CV_s^2 f = 0,5(4,17 \cdot 10^{-6})(72^2)(20000) = 216 \text{ watt}$$

Karena untuk merealisasikan rangkaian snubber dengan nilai-nilai yang didapat dari hasil perhitungan tersebut sangat sulit, maka batas tegangan V_f dinaikkan namun masih dibawah rating tegangan maksimum yang diperbolehkan. Penghitungan ulang dilakukan untuk nilai $V_f = 300$ volt sebagai berikut:

$$C = \frac{I_L t_f}{2V_f} = \frac{(60)(10^{-5})}{2(300)} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{600} = 1 \mu F$$

Sehingga nilai resistansi minimal untuk resistor snubber adalah

$$R = \frac{8,33 \cdot 10^{-6}}{3(10^{-6})} = 2,78 \Omega$$

Daya yang harus dapat diserap oleh resistor dapat dihitung

$$P_R = \frac{1}{2} CV_s^2 f = 0,5(10^{-6})(72^2)(20000) = 51,84 \text{ watt}$$

Dengan nilai-nilai yang didapat tersebut, rangkaian snubber direalisasikan dengan nilai kapasitor $1 \mu F$ dan 4 buah resistor $10 \Omega / 20 W$ yang dipasang parallel sehingga menghasilkan nilai resistansi $2,5 \Omega$ dan daya yang dapat diserap mencapai 80 watt. Pada saat pengujian, temperatur resistor sangat panas namun resistor tidak rusak.

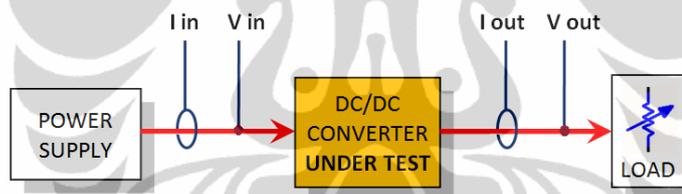
3.2.7. Uji Kinerja Buck Converter

Pengujian dilakukan dengan menggunakan power supply dan beban yang ada untuk melihat kinerja masing-masing buck converter tersebut. Sebagai penyedia daya masukan, digunakan 3 buah power supply switching yang disusun secara seri agar didapatkan tegangan masukan yang tinggi. Power supply yang

digunakan terdiri dari 2 buah power supply 700 watt dengan tegangan keluaran 8,5 volt – 14,5 volt dan 1 buah power supply 700 watt dengan tegangan keluaran 15 volt.

Pada pengujian awal tersebut, tegangan keluaran buck converter yang dibuat saat tanpa beban di-set pada 12,6 volt yang diukur menggunakan multimeter. Hal ini dilakukan dengan perkiraan tegangan keluaran tersebut akan jatuh saat beban terpasang.

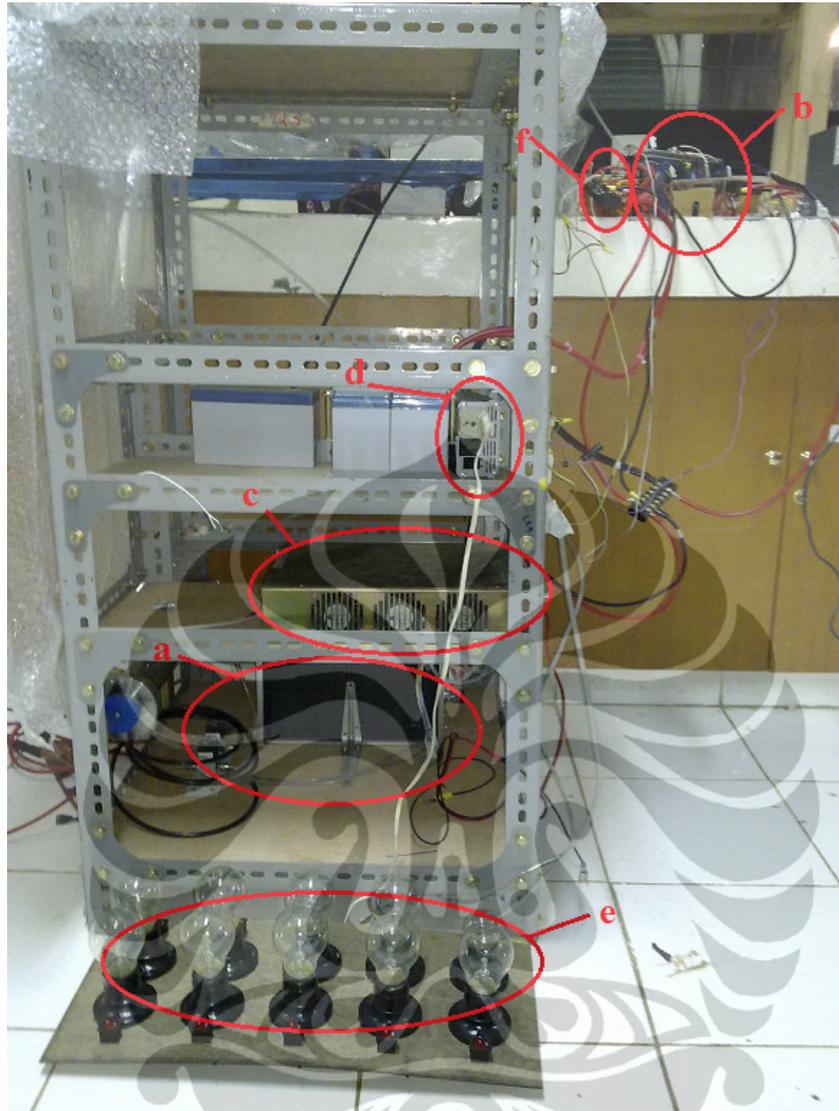
Sebagai beban digunakan 4 buah lampu *head* mobil dengan tegangan kerja 12 volt dan masing-masing mempunyai 2 filamen yang dapat mendisipasi daya sebesar 90 watt dan 100 watt. Disamping itu juga digunakan larutan elektrolit yang dihubungkan dengan elektroda tembaga yang dapat mendisipasi daya antara 300 watt hingga 500 watt. Hal ini sangat dipengaruhi oleh temperatur larutan dan banyaknya katalis (KOH) yang terlarut. Kedua jenis beban ini dikombinasikan dalam pengujian yang dilakukan. Diagram blok uji coba ini dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14. Diagram Blok Uji Coba Buck Converter

3.3. Implementasi Sistem

Implementasi sistem dilakukan dengan memperhatikan keamanan dan keselamatan. Penggunaan kabel penghubung harus sesuai dengan besarnya arus yang akan melewatinya sehingga tidak timbul panas saat dilewati arus. Pemasangan sensor diusahakan sedekat mungkin dari *port data acquisition* dan komputer yang akan digunakan untuk merekam data. Hal ini dilakukan agar data yang akan dicuplik sedapat mungkin terhindar dari *noise*.



Gambar 3.22. Peralatan Yang Digunakan Untuk Uji Coba Sistem Fuel Cell

Sistem diimplementasikan seperti yang tampak pada Gambar 3.22. Pada gambar tersebut dapat dilihat sistem fuel cell beserta peralatan yang akan digunakan seperti:

- a. fuel cell
- b. buck converter yang dibuat
- c. buck converter komersial
- d. inverter
- e. beban berupa lampu pijar
- f. sensor arus

3.4. Uji Coba Sistem

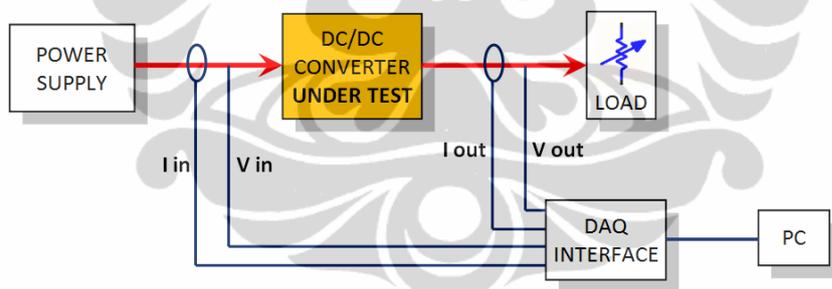
Sebelum uji coba dilakukan, pemasangan saluran gas hidrogen dari tabung utama perlu diperhatikan agar tidak terjadi kebocoran. Bukaan valve dan regulator dilakukan sesuai *standard operating procedure* yang telah ditetapkan. Uji coba sistem dilakukan pada temperatur ruang sekitar 20°C dengan memberikan tekanan hidrogen sekitar 9 psi pada fuel cell. Pengujian dilakukan setelah dilakukan ‘pemanasan’ sehingga gas yang masuk ke fuel cell sepenuhnya merupakan hidrogen karena biasanya setelah digunakan, fuel cell harus di-*flush* menggunakan nitrogen sehingga relatif aman jika tidak digunakan dalam jangka waktu lama. Setelah dilakukan pemanasan yang cukup, fuel cell dianggap telah dapat bekerja dengan baik.



BAB 4 HASIL PENGUJIAN

4.1. Hasil Uji Kinerja Buck Converter

Sebelum buck converter yang telah dibuat diimplementasikan pada sistem fuel cell, dilakukan uji kinerja. Sebagai penyedia daya masukan, digunakan 3 buah power supply switching yang disusun secara seri. Power supply yang digunakan terdiri dari 2 buah power supply 700 watt dengan tegangan keluaran 8,5 volt – 14,5 volt dan 1 buah power supply 700 watt dengan tegangan keluaran 15 volt. Sebagai beban digunakan 4 buah lampu dengan tegangan kerja 12 volt masing-masing mempunyai 2 filamen yang dapat mendisipasi daya sebesar 90 watt dan 100 watt. Disamping itu juga digunakan larutan elektrolit yang dihubungkan dengan elektroda tembaga yang dapat mendisipasi daya antara 300 watt hingga 500 watt. Kedua jenis beban ini dikombinasikan dalam pengujian yang dilakukan. Diagram blok uji kinerja buck converter ini dapat dilihat pada Gambar 4.1.



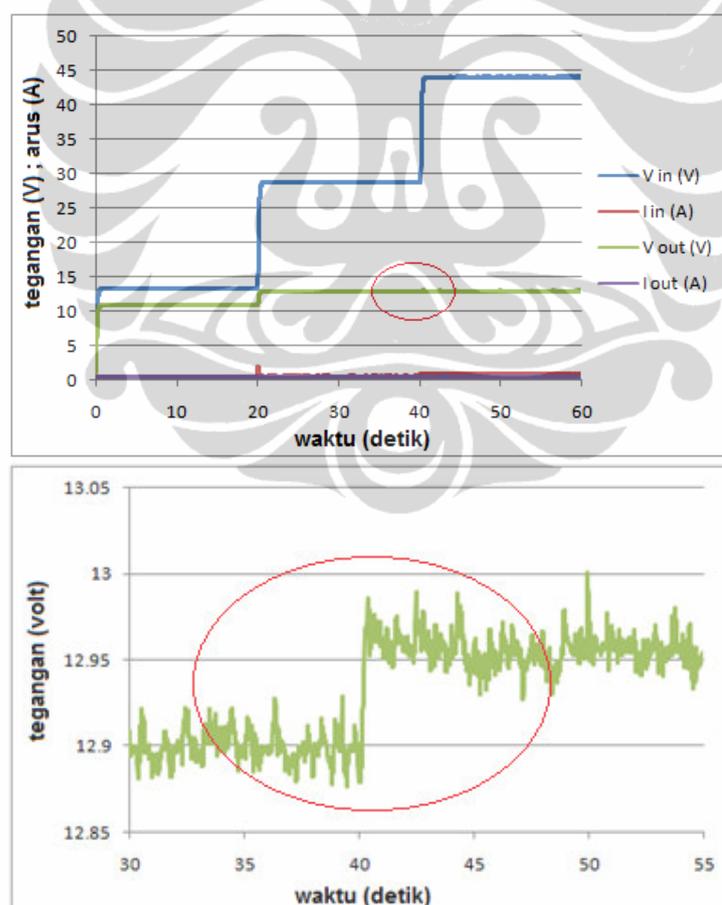
Gambar 4.1. Diagram Blok Uji Kinerja Buck Converter

Pencuplikan tegangan masukan buck converter menggunakan rangkaian pembagi tegangan berupa resistor. Untuk pembacaan data arus masukan (I_{in}), digunakan sensor arus ACS754SCB-50 dengan sensitifitas 40mV/A, sedangkan untuk arus keluaran buck converter (I_{out}) diukur menggunakan sensor arus tipe ACS754SCB-200 dengan sensitifitas 10mV/A. Pada saat tidak ada arus yang melewati sensor, tegangan keluran sensor ini berada pada kisaran 2,5 VDC, namun perlu dilakukan kalibrasi dengan memberikan nilai offset agar didapat hasil yang lebih akurat yaitu dengan melakukan pengurangan nilai tegangan keluaran

sensor dengan nilai offset yang ditentukan dengan melihat data yang terbaca saat tidak adanya arus yaitu 2,5192 volt untuk arus masukan (I_{in}) dan 2,4754 volt untuk arus keluaran (I_{out}). Untuk merekam data pengukuran selama pengujian, digunakan *data acquisition system* dari National Instrument yang dapat terintegrasi dengan program Simulink pada MATLAB.

4.1.1. Pengujian pada kondisi tanpa beban.

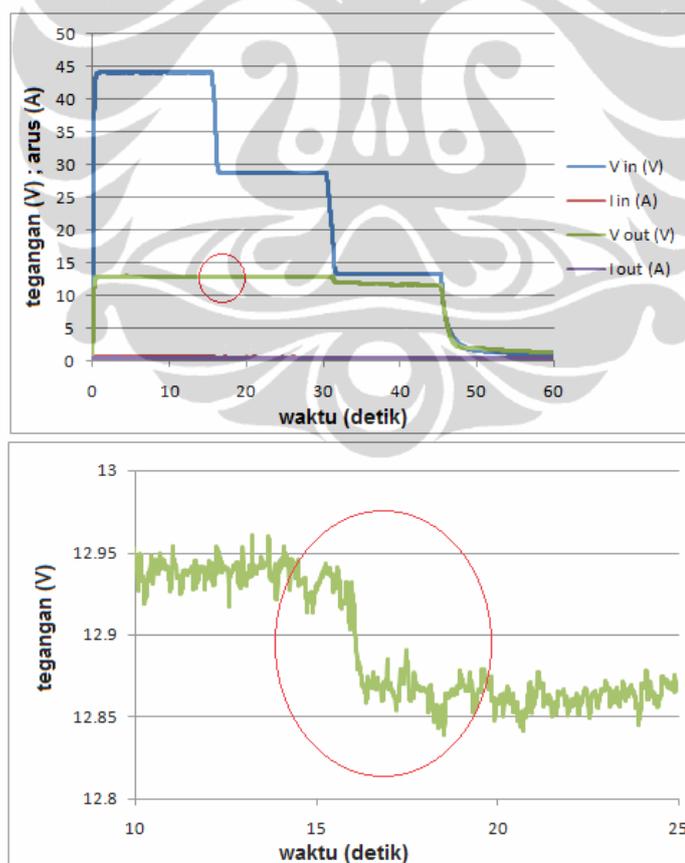
Pengujian tanpa beban dilakukan untuk melihat pengaruh perubahan tegangan masukan terhadap tegangan keluaran buck converter. Pengujian dilakukan dengan dua tahap, penambahan tegangan masukan dan pengurangan tegangan masukan. Hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.2 untuk penambahan tegangan masukan dan Gambar 4.3 untuk pengurangan tegangan masukan.



Gambar 4.2. Pengaruh Penambahan Tegangan Masukan Terhadap Tegangan Keluaran pada Buck Converter yang Dibuat Saat Tanpa Beban

Pada Gambar 4.2 tampak bahwa pada kondisi power supply pertama dinyalakan, tegangan input sekitar 13,5 volt, buck converter telah mengeluarkan tegangan sekitar 11 volt. Kondisi ini disebabkan oleh gate yang telah aktif akibat rangkaian pembangkit PWM menerima sinyal error yang sangat besar karena feedback yang diterima selalu lebih kecil dari set point, sehingga duty cycle yang dihasilkan 100% atau selalu ON. Hal ini menyebabkan tegangan keluaran sama dengan tegangan masukan dikurangi drop pada rangkaian.

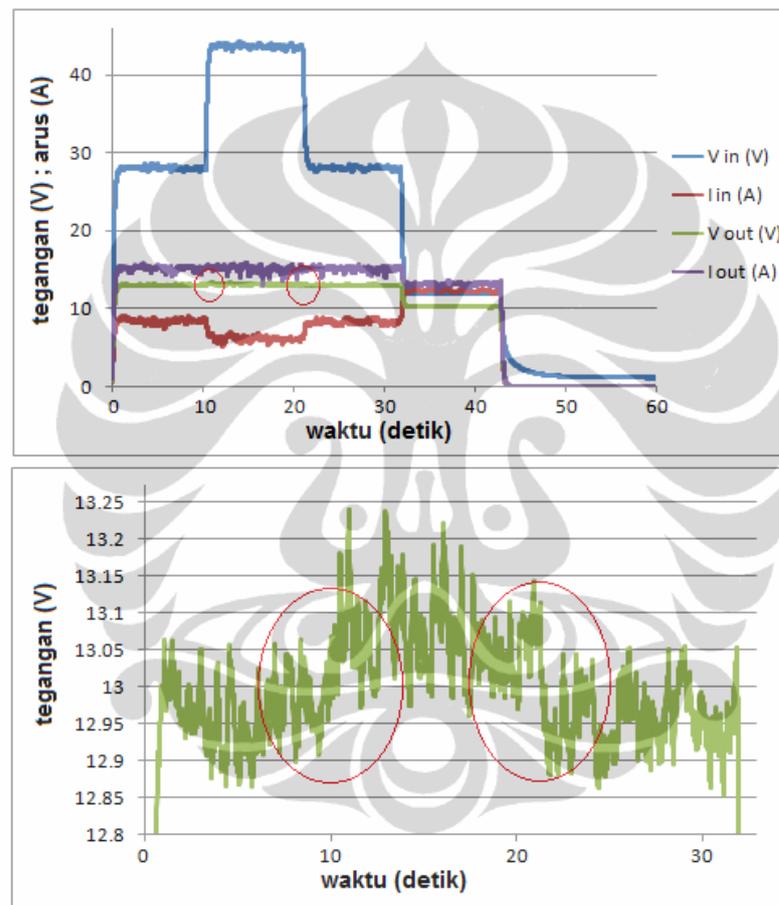
Pada penyalaan power supply kedua, tegangan input naik menjadi sekitar 29 volt dan rangkaian buck converter telah bekerja dengan mengeluarkan tegangan sekitar 12,9 volt. Pada penyalaan power supply ketiga, yaitu bagian yang dilingkari, dimana tegangan input mencapai sekitar 44 volt, tegangan output ikut naik sekitar 0,05 volt menjadi 12,95 volt. Hal ini juga terjadi saat tegangan input dikurangi, tegangan keluaran ikut turun seperti yang tampak pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Pengaruh Pengurangan Tegangan Masukan Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter Saat Tanpa Beban

4.1.2. Pengujian dengan beban

Pengujian dilakukan dengan beban lampu dan larutan elektrolit untuk melihat kemampuan buck converter yang telah dibuat sampai menghasilkan arus dan tegangan sesuai dengan spesifikasi desain. Disamping itu dari percobaan ini diharapkan dapat dilihat efisiensi dari buck converter yang telah dibuat tersebut dan pengaruh pembebanan terhadap efisiensi

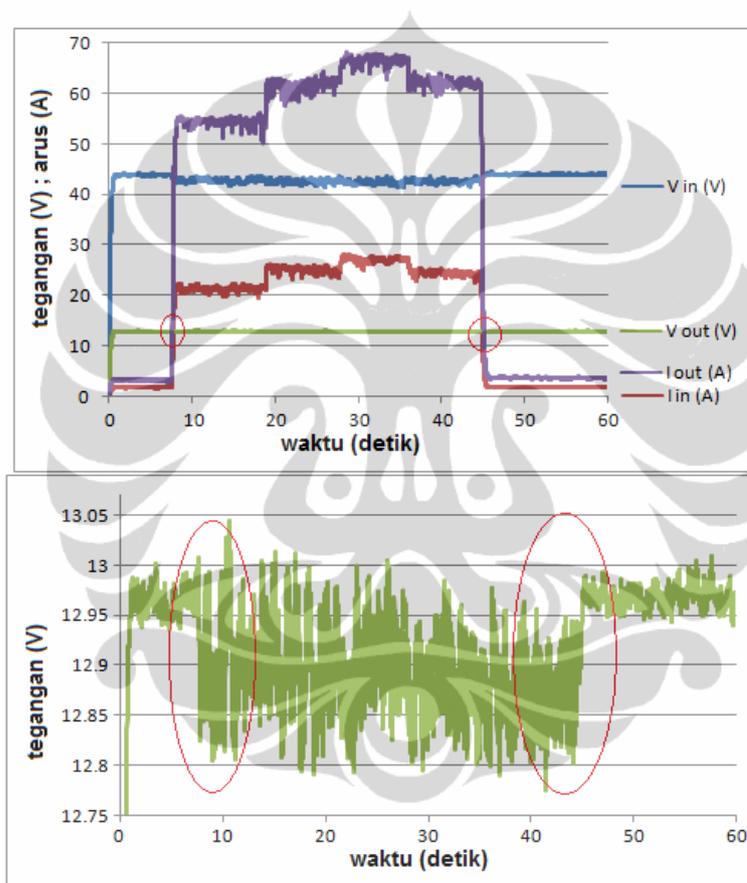


Gambar 4.4. Pengaruh Perubahan Tegangan Masukan Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter Saat Diberi Beban

Untuk melihat pengaruh perubahan tegangan masukan saat buck converter dibebani, dilakukan pengujian dengan memberi beban tetap berupa lampu dengan nominal 100 dan 90 watt yang disusun parallel sehingga menjadi 190 watt dan merubah tegangan masukan. Hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.4. Seperti halnya saat tanpa beban, kedua buck converter saat diberi beban tetap namun tegangan input berubah, maka tegangan keluaran yang dihasilkan juga

berubah sekitar 0,2 volt. Hal ini menguatkan dugaan bahwa perubahan terjadi karena adanya *error steady state* dari pengendali proporsional yang digunakan.

Untuk melihat kemampuan buck converter menghasilkan tegangan dan arus sesuai spesifikasi yang diinginkan, digunakan kombinasi beban berupa lampu dan larutan elektrolit. Hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.5 dimana tampak bahwa arus keluaran buck converter telah mencapai 60 ampere dan tegangan keluaran yang dihasilkan relatif konstan pada nilai sekitar 12,9 volt.

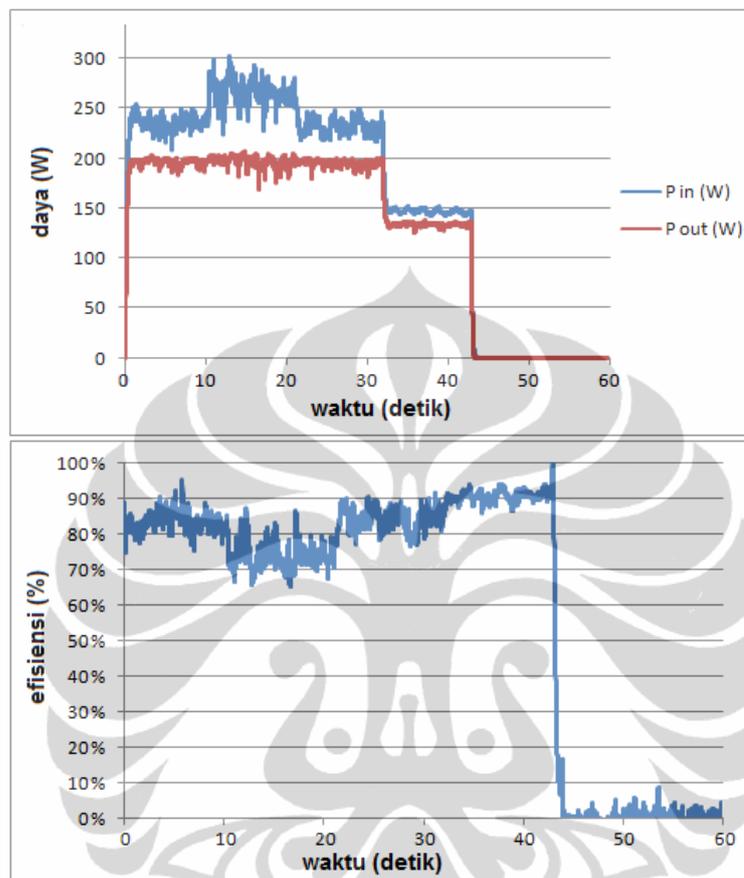


Gambar 4.5. Pengaruh Penambahan Beban Hingga Arus Keluaran Dapat Mencapai Spesifikasi Desain 60 A pada Tegangan Keluaran Buck Converter

4.1.3. Efisiensi Daya

Pada Gambar 4.4 dimana buck converter diberi beban tetap namun tegangan masukan diubah-ubah dapat dihitung daya masukan dan daya keluaran dari buck converter. Kemudian hasil tersebut akan dibandingkan dengan hasil perhitungan daya dan efisiensi dari buck converter saat diberi tegangan masukan

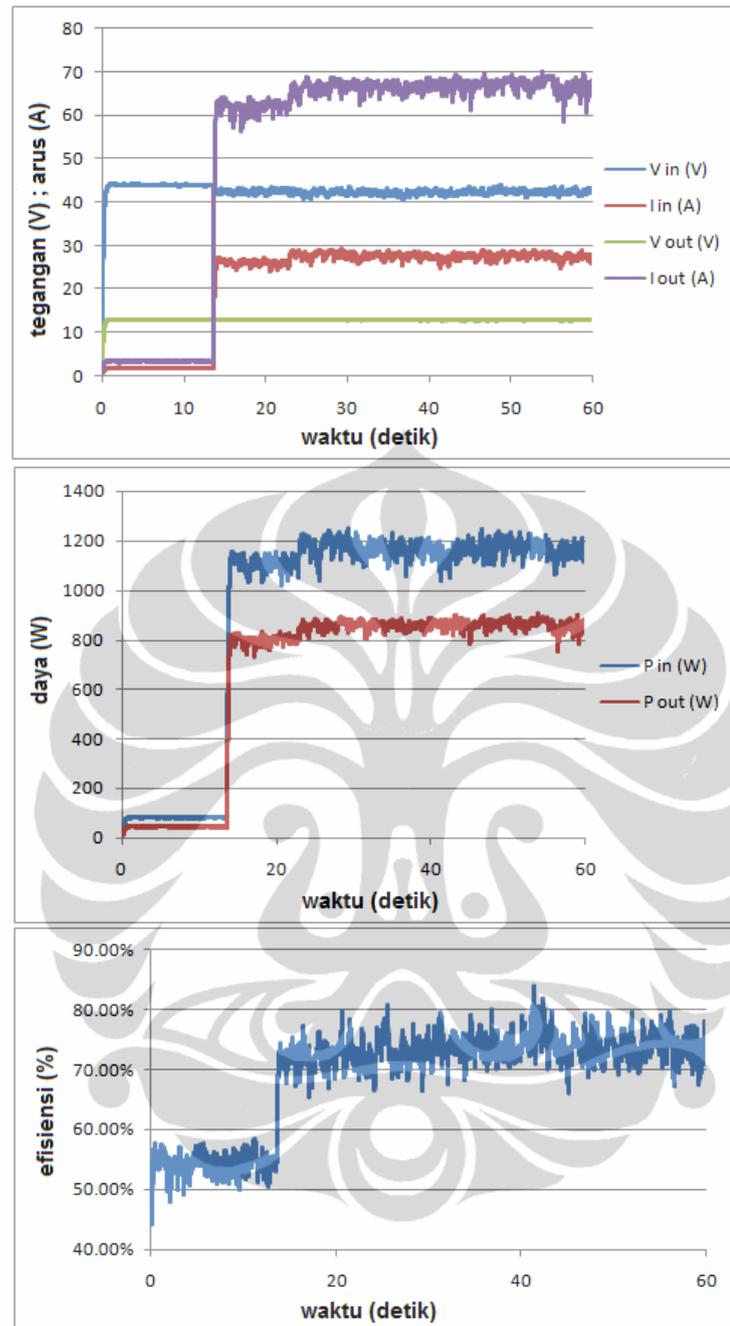
tetap dan beban diubah. Kedua hal tersebut dapat menjadi pertimbangan dalam pengaplikasian buck converter yang dibuat.



Gambar 4.6. Daya Input dan Daya Output serta Efisiensi Daya Saat Perubahan Tegangan Masukan

Untuk perubahan tegangan masukan dan beban tetap, besarnya daya dan efisiensi dapat dilihat pada Gambar 4.6. Dari hasil percobaan tersebut, dapat dilihat bahwa untuk perubahan tegangan, efisiensi daya pada buck converter ikut berfluktuasi seiring perubahan tegangan masukan.

Untuk melihat pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi pada masing-masing buck converter, dilakukan percobaan dengan mengubah beban namun dengan tegangan masukan yang tetap seperti halnya percobaan untuk melihat arus. Hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Efisiensi Buck Converter

Dari hasil percobaan tersebut, ternyata untuk perubahan beban drastis, efisiensi daya pada buck converter ikut berubah drastis dari 55% menjadi 75% jika dibandingkan dengan perubahan tegangan masukan yaitu dari 85% menjadi 75%. Tampak bahwa penambahan tegangan masukan akan menurunkan efisiensi, sedangkan penambahan beban akan menaikkan efisiensi. Hal ini berarti bahwa buck converter yang dibuat mempunyai hambatan dalam, sehingga jika beban

yang terpasang cukup besar dibandingkan hambatan dalam tersebut maka efisiensi daya yang dihasilkan akan semakin besar. Sedangkan saat penambahan tegangan masukan, arus yang dihambat oleh hambatan dalam akan bertambah, sehingga mengakibatkan efisiensi daya yang dihasilkan akan menurun.

4.1.4. Ripple dan Noise

Pengujian terpisah telah dilakukan untuk melihat adanya ripple dan noise pada tegangan keluaran. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan osiloskop yang di-set pada *AC coupling* sehingga dapat diperbesar pada layar osiloskop hingga 200mV/div. Pada pengujian ini data digital tidak terekam dan hanya berupa foto yang dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Noise dan Ripple Pada Tegangan Keluaran Saat Uji Kinerja Buck Converter Yang Dibuat

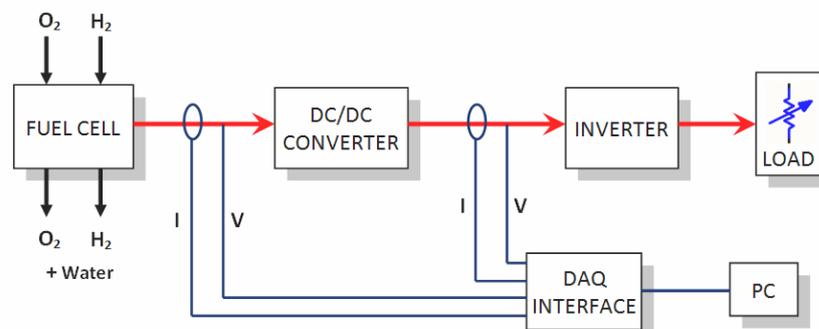
Pada Gambar 4.8 tersebut dapat dilihat bahwa ripple pada tegangan keluaran berada dibawah 1 div yang berarti berada dibawah 200mV peak to peak yaitu sekitar 40mV peak to peak . Namun demikian noise yang ada terlihat cukup besar yaitu dapat mencapai sekitar 600mV peak to peak. Indikator frekuensi yang menunjukkan angka 3,144kHz pada gambar tersebut menunjukkan bahwa noise yang terjadi frekuensinya berada dibawah frekuensi switching yang artinya noise tersebut lebih jarang terjadi dibandingkan dengan switching yang terjadi.

4.1.5. Evaluasi Hasil Uji Kinerja Buck Converter

Pada uji kinerja terhadap buck converter yang telah dibuat menunjukkan tegangan keluaran berada pada kisaran 12,9 volt dan mengalami perubahan sekitar 0,2 volt saat diberi beban serta saat terjadi perubahan tegangan masukan. Dengan keterbatasan power supply untuk percobaan, *range* tegangan masukan dengan yang dapat teruji hanya berkisar dari 29 volt hingga 44 volt, namun demikian arus yang dapat dihasilkan sudah dapat melebihi 60 ampere seperti yang diharapkan pada spesifikasi desain. Buck converter yang telah dibuat bekerja pada frekuensi switching 20 kHz, sehingga dengan nilai induktor dan kapasitor yang lebih besar dari hasil perhitungan, ripple pada tegangan keluaran dapat diredam hingga dibawah 120mV peak to peak yaitu pada kisaran 40 mV peak to peak, namun masih terdapat noise yang dapat mencapai 600mV peak to peak.

4.2. Buck Converter Sebagai Pengkondisi Tegangan Keluaran Fuel Cell

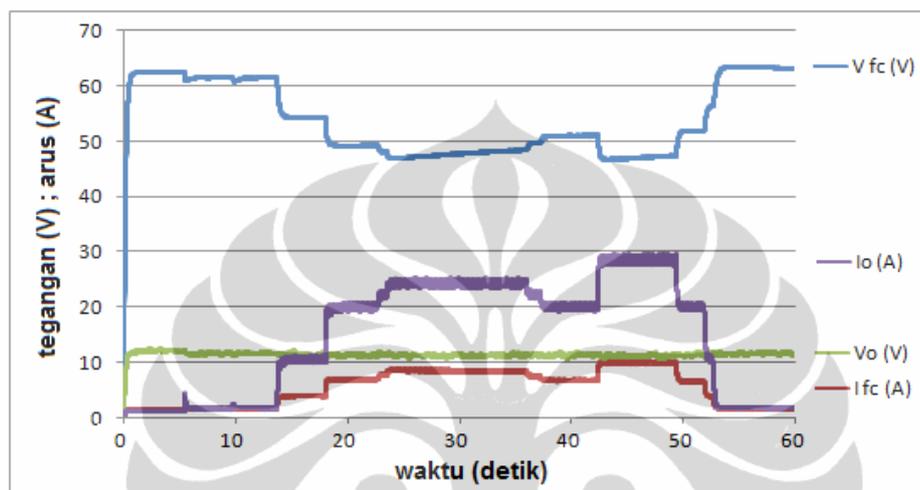
Pengujian dilakukan dengan peralatan yang telah tersedia dengan memberikan tekanan gas hidrogen sekitar 9 psi. Uji coba sistem dilakukan pada temperatur ruang sekitar 20°C. Pengujian dilakukan setelah dilakukan ‘pemanasan’ sehingga gas yang masuk ke fuel cell sepenuhnya merupakan hidrogen karena biasanya setelah digunakan, fuel cell harus di-*flush* menggunakan nitrogen. Pemanasan dilakukan agar gas nitrogen yang sebelumnya telah ada di dalam fuel cell sepenuhnya telah habis dan telah digantikan oleh hidrogen yang masuk. Setelah dilakukan pemanasan yang cukup, fuel cell dianggap telah dapat bekerja dengan baik dan uji coba dapat dilakukan. Diagram blok uji coba ini dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Diagram Blok Uji Coba Sistem Fuel Cell

4.2.1. Pengujian dengan Buck Converter Komersial

Pengujian dilakukan menggunakan beban lampu dengan nilai daya nominal yang terus ditambahkan agar buck converter tersebut dapat bekerja maksimum dan menghasilkan arus 25 ampere sesuai spesifikasinya. Hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti tampak pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Data Hasil Pengujian Buck Converter Komersial pada Sistem Fuel Cell

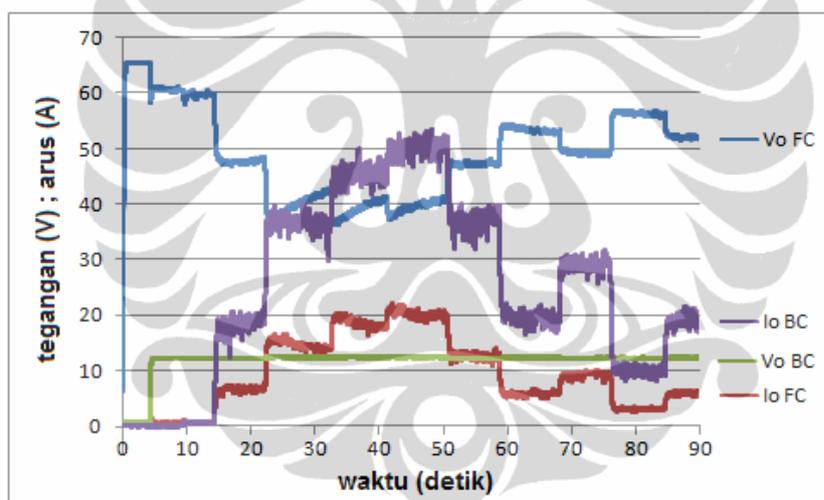
Untuk hasil percobaan tersebut, sumbu horizontal adalah waktu (t) dalam satuan detik, sehingga kronologi percobaan dapat dijelaskan sebagai berikut:

Buck converter telah dinyalakan sebelum waktu perekaman data dimulai, sehingga dapat dilihat bahwa tegangan keluaran buck converter sekitar 12 volt. Inverter baru dinyalakan setelah detik ke 6 dimana terlihat lonjakan arus sesaat pada keluaran buck converter. Pada detik ke 14, lampu dengan nominal 100 w dihubungkan sehingga arus fuel cell dan arus buck converter meningkat. Tegangan keluaran fuel cell tampak menurun hingga sekitar 55 volt sedangkan tegangan keluaran buck converter turun namun tidak terlalu signifikan. Pada detik ke 18, lampu dengan nominal 100 w ditambahkan sehingga arus fuel cell dan arus buck converter semakin meningkat. Tegangan keluaran fuel cell tampak menurun hingga sekitar 49 volt. Pada detik ke 22 secara berurutan dilakukan penambahan 2 buah lampu dengan nominal masing-masing 25 w. Setelah dirasa cukup aman, dimana baik fuel cell, buck converter dan inverter tidak melakukan proteksi, semua beban lampu dengan nominal 25 w dilepas dan digantikan dengan 1 buah

lampu dengan nominal 100w selama sekitar 10 detik dan kemudian ketiga lampu dengan nominal 100 w tersebut dilepas secara berurutan karena arus keluaran buck converter yang terukur sudah mencapai lebih dari 25 ampere. Dari hasil tersebut tampak bahwa tegangan keluaran sistem fuel cell yang diberi tambahan buck converter sebagai masukan inverter relatif konstan dibandingkan tegangan keluaran fuel cell itu sendiri saat diberi beban.

4.2.2. Pengujian dengan Buck Converter yang Dibuat

Pengujian dilakukan dengan beban lampu untuk melihat kemampuan dari buck converter yang dibuat saat digunakan dalam suatu sistem pembangkit listrik yang menggunakan fuel cell. Hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti yang tampak pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Data Hasil Pengujian Buck Converter yang Dibuat

Untuk hasil percobaan tersebut, kronologi percobaan dapat dijelaskan sebagai berikut:

Buck converter baru dinyalakan pada detik ke-3, sehingga dapat dilihat bahwa tegangan keluaran buck converter sekitar 12 volt sedangkan tegangan keluaran fuel cell turun hingga 60 volt. Inverter baru dinyalakan setelah detik ke-10 dimana terlihat lonjakan arus sesaat pada keluaran buck converter. Pada detik ke-15, 2 buah lampu dengan nominal masing-masing 100 watt dihubungkan sehingga arus fuel cell dan arus buck converter meningkat. Tegangan keluaran fuel cell tampak

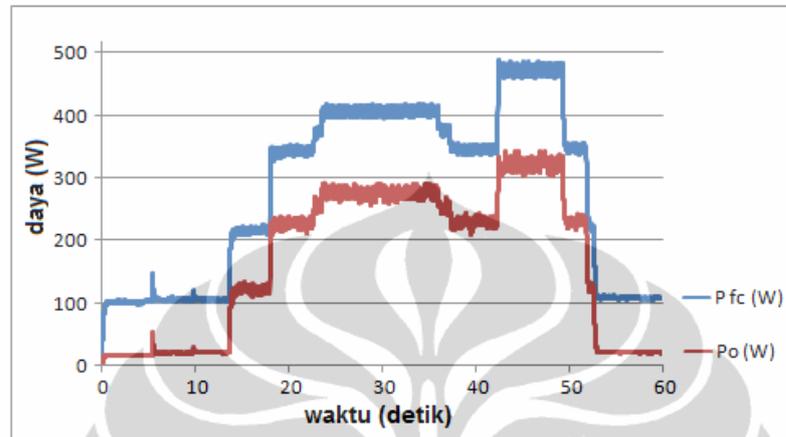
menurun menjadi sekitar 47 volt sedangkan tegangan keluaran buck converter turun namun tidak terlalu signifikan. Penambahan beban terus dilakukan hingga 5 buah lampu dengan nominal masing-masing 100 w dan 1 buah lampu dengan nominal 60 watt terhubung. Pada detik ke-50, 2 buah lampu yaitu nominal 100 watt dan 60 watt dimatikan sekaligus kemudian pada detik ke-58 dimatikan 2 buah lampu dengan masing-masing nominal 100 watt, kemudian pada detik ke-68 dinyalakan kembali sebuah lampu dengan nilai nominal 100w sehingga beban nominal berjumlah 300 watt. Pada detik ke-77, dimatikan 2 buah lampu dengan masing-masing nominal 100 watt sehingga nominal beban yang terpasang menjadi 100 watt dan pada detik ke-85 dinyalakan kembali sebuah lampu dengan nilai nominal 100 watt sehingga nominal beban yang terpasang menjadi 200 watt. Dari hasil tersebut tampak bahwa tegangan keluaran sistem fuel cell yang diberi tambahan buck converter yang telah dibuat sebagai masukan inverter juga menghasilkan tegangan keluaran yang relatif konstan dibandingkan tegangan keluaran fuel cell itu sendiri saat diberi beban.

4.2.3. Efisiensi Daya

Pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 dimana buck converter dihubungkan pada sistem fuel cell dan diberi beban berubah-ubah dapat dihitung daya masukan dan daya keluaran dari setiap buck converter. Kemudian dari hasil tersebut akan didapatkan efisiensi dari tiap buck converter saat diberi beban.

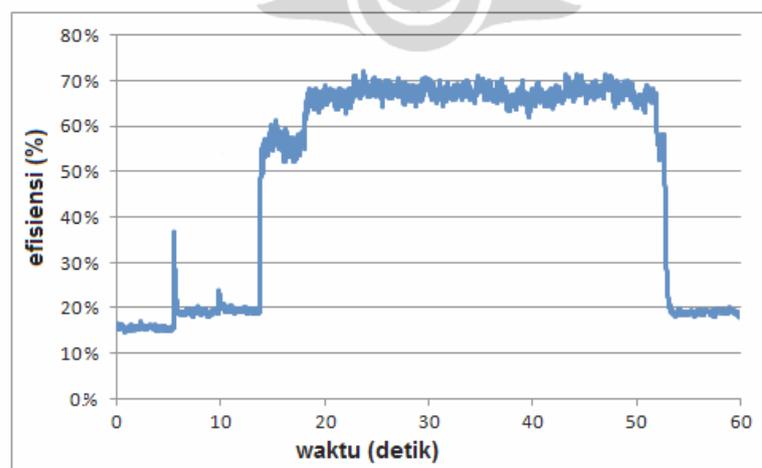
Hasil perhitungan daya untuk buck converter komersial dapat dilihat pada Gambar 4.12. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada saat buck converter telah menyala, daya yang dikeluarkan oleh fuel cell telah mencapai 100 watt. Inverter baru dinyalakan setelah detik ke-6 dimana terlihat lonjakan daya sesaat baik pada keluaran fuel cell maupun buck converter. Pada detik ke-14, lampu dengan nominal 100 watt dihubungkan sehingga arus fuel cell dan arus buck converter meningkat dan menyebabkan daya yang dikeluarkan meningkat. Pada detik ke-18, lampu dengan nominal 100 watt ditambahkan sehingga daya fuel cell dan daya buck converter semakin meningkat. Pada detik ke 22 secara berurutan dilakukan penambahan 2 buah lampu dengan nominal masing-masing 25 watt. Setelah dirasa cukup aman, dimana baik fuel cell, buck converter dan inverter

tidak melakukan proteksi, semua beban lampu dengan nominal 25 watt dilepas dan digantikan dengan 1 buah lampu dengan nominal 100 watt selama sekitar 10 detik dan kemudian ketiga lampu dengan nominal 100 watt tersebut dilepas secara berurutan.



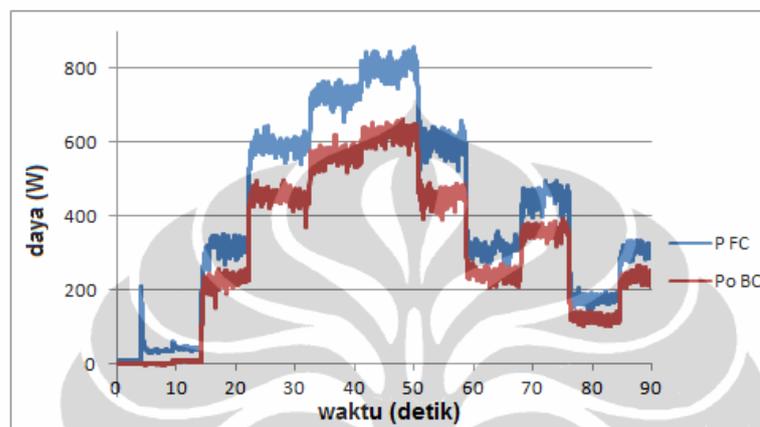
Gambar 4.12. Daya Keluaran Fuel Cell dan Daya Keluaran Buck Converter Komersial yang Digunakan

Dari hasil tersebut tampak bahwa selisih daya yang dikeluarkan fuel cell dengan daya yang dikeluarkan buck converter relatif konstan pada nilai sekitar 100 watt. Namun demikian, hasil perhitungan efisiensi daya buck converter yang digunakan tersebut terpengaruh oleh perubahan beban. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Efisiensi Daya Buck Converter Komersial yang Digunakan

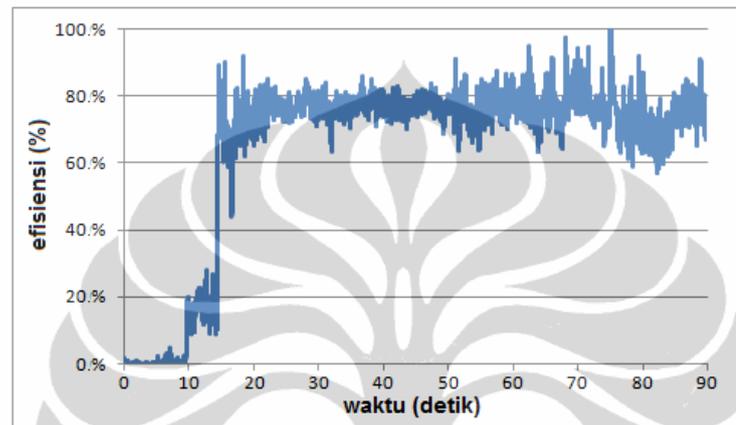
Sedangkan untuk buck converter yang dibuat, hasil perhitungan daya input dan output dapat dilihat pada Gambar 4.14. Pada gambar tersebut tampak bahwa buck converter dinyalakan pada detik ke-3 yang di tandai kenaikan sesaat daya yang dikeluarkan oleh fuel cell. Inverter baru dinyalakan setelah detik ke-10 dimana terlihat sedikit kenaikan daya baik dari fuel cell maupun buck converter.



Gambar 4.14. Daya Keluaran Fuel Cell dan Daya Keluaran Buck Converter yang Dibuat

Pada detik ke-15, 2 buah lampu dengan nominal masing-masing 100 watt dihubungkan sehingga arus fuel cell dan arus buck converter meningkat mengakibatkan daya keluaran fuel cell dan buck converter meningkat. Penambahan beban terus dilakukan hingga 5 buah lampu dengan nominal masing-masing 100 w dan 1 buah lampu dengan nominal 60 watt terhubung. Pada kondisi tersebut, selisih daya yang dikeluarkan oleh fuel cell dan buck converter mencapai sekitar 200 watt. Pada detik ke-50, 2 buah lampu yaitu nominal 100 watt dan 60 watt dimatikan sekaligus kemudian pada detik ke-58 dimatikan 2 buah lampu dengan masing-masing nominal 100 watt, kemudian pada detik ke-68 dinyalakan kembali sebuah lampu dengan nilai nominal 100w sehingga beban nominal berjumlah 300 watt. Pada kondisi tersebut, selisih daya yang dikeluarkan oleh fuel cell dan buck converter mencapai sekitar 100 watt. Pada detik ke-77, dimatikan 2 buah lampu dengan masing-masing nominal 100 watt sehingga nominal beban yang terpasang menjadi 100 watt dan pada detik ke-85 dinyalakan kembali sebuah lampu dengan nilai nominal 100 watt sehingga nominal beban yang terpasang menjadi 200 watt.

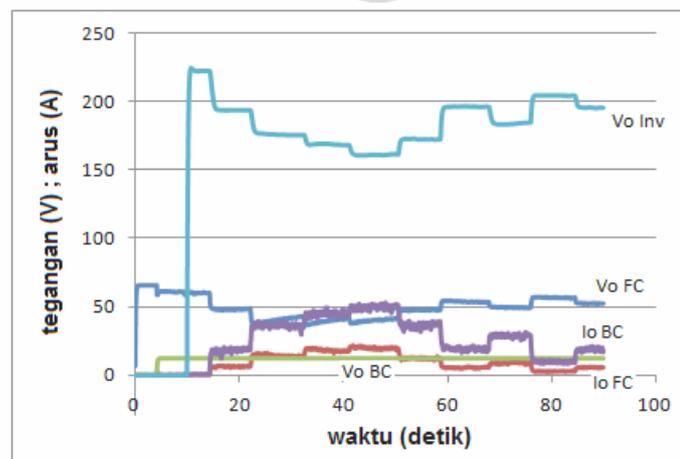
Dari hasil tersebut tampak bahwa selisih daya yang dikeluarkan fuel cell dengan daya yang dikeluarkan buck converter berubah-ubah tergantung dari beban yang terpasang. Sedangkan hasil perhitungan efisiensi daya untuk buck converter yang dibuat ditunjukkan pada Gambar 4.15 dimana efisiensi daya ternyata juga dipengaruhi oleh beban. Hal ini berarti bahwa buck converter tersebut mempunyai *losses*.



Gambar 4.15. Efisiensi Daya Buck Converter yang Dibuat

4.2.4. Perubahan Tegangan Keluaran Inverter

Pengujian juga dilakukan untuk melihat adanya pengaruh perubahan beban terhadap tegangan keluaran inverter yang digunakan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan buck converter yang dibuat agar inverter dapat dibebani secara maksimum. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.16.

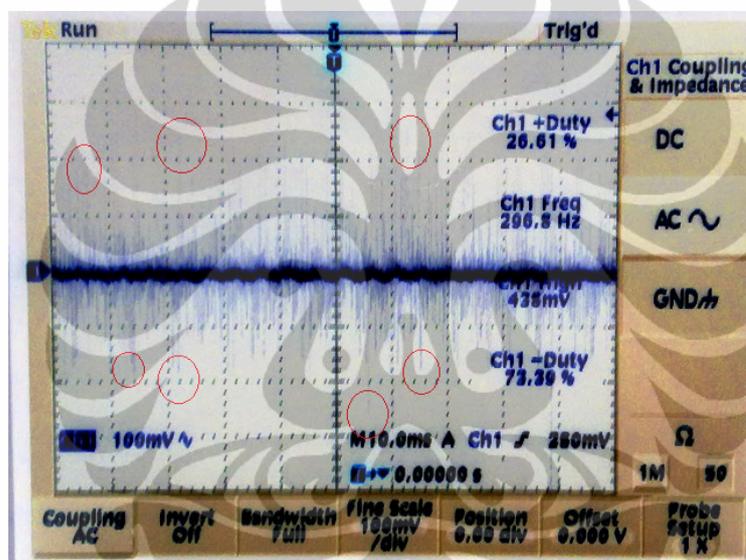


Gambar 4.16 Hasil Pengujian untuk Melihat Adanya Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Tegangan Keluaran Inverter yang Digunakan

Dari hasil tersebut, tampak bahwa tegangan keluaran inverter yang digunakan ikut berubah seiring penambahan beban yang diberikan.

4.2.5. Ripple dan Noise

Pengujian terpisah telah dilakukan untuk melihat adanya ripple dan noise pada tegangan keluaran. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan osiloskop yang di-set pada *AC coupling* sehingga dapat diperbesar pada layar osiloskop hingga 100mV/div. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.17.



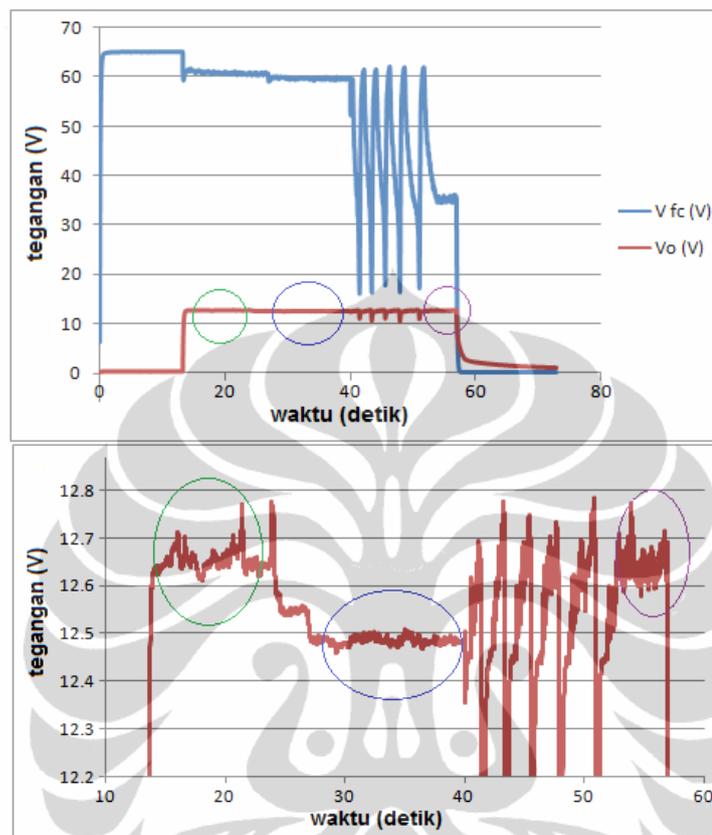
Gambar 4.17. Noise dan Ripple Pada Tegangan Keluaran

Pada Gambar 4.17 tersebut dapat dilihat bahwa ripple pada tegangan keluaran berada dibawah 1 div yang berarti berada dibawah 100mV peak to peak yaitu sekitar 40mV peak to peak . Namun demikian noise yang ada terlihat cukup besar yaitu hampir mencapai sekitar 600mV peak to peak.

4.2.6. Pengaruh Perubahan Beban Besar Secara Tiba-tiba

Secara teori, jika fuel cell telah diberi tekanan yang sesuai dengan spesifikasinya, diberi beban dibawah daya nominalnya, maka fuel cell akan bekerja dengan mengeluarkan tegangan dan arus sesuai kurva polarisasinya. Pada percobaan dimana dilakukan perubahan beban secara tiba-tiba dengan memberi

beban lampu dengan jumlah nominal 600 watt, ternyata tegangan fuel cell jatuh hingga dibawah spesifikasi kurva polirisasinya seperti yang tampak pada Gambar 4.18 dimana fluktuasi jatuhnya tegangan sangat jelas terlihat.



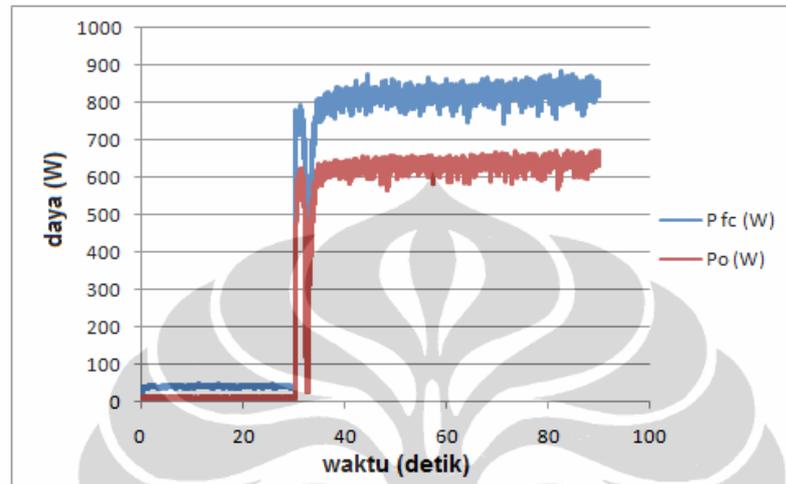
Gambar 4.18. Pengaruh Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 600 W (nominal) Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter

Kronologi percobaan adalah sebagai berikut:

Pada fuel cell telah dilakukan pemanasan awal dan tegangan keluarannya telah stabil, buck converter belum dinyalakan. Penyalan buck converter dilakukan setelah sekitar 13 detik perekaman data dimulai dimana tegangan keluaran buck converter ditandai dengan lingkaran hijau pada Gambar 4.18 tersebut. Pada sekitar detik ke-26 inverter dinyalakan, dimana tegangan keluaran buck converter turun sekitar 0,15 volt (ditandai dengan lingkaran biru). Pada detik ke-39 beban dihubungkan dan tegangan fuel cell jatuh namun fuel cell tidak mati dan mencoba untuk memperbaiki tegangan keluarannya namun ternyata kembali jatuh. Hal tersebut terjadi sampai detik ke-57 dan fuel cell OFF. Hal ini terjadi

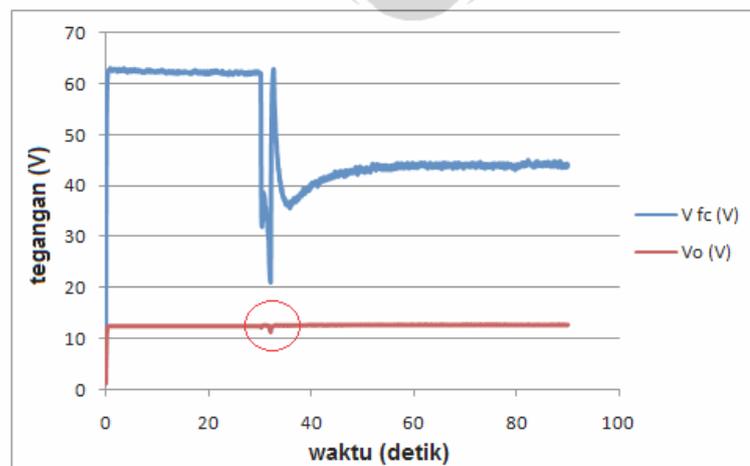
karena reaksi kimia yang lambat pada fuel cell mengakibatkan arus yang diperlukan oleh beban ikut terlambat dihasilkan oleh fuel cell.

Percobaan diulangi dengan mengurangi beban menjadi 560 watt dan hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.19.



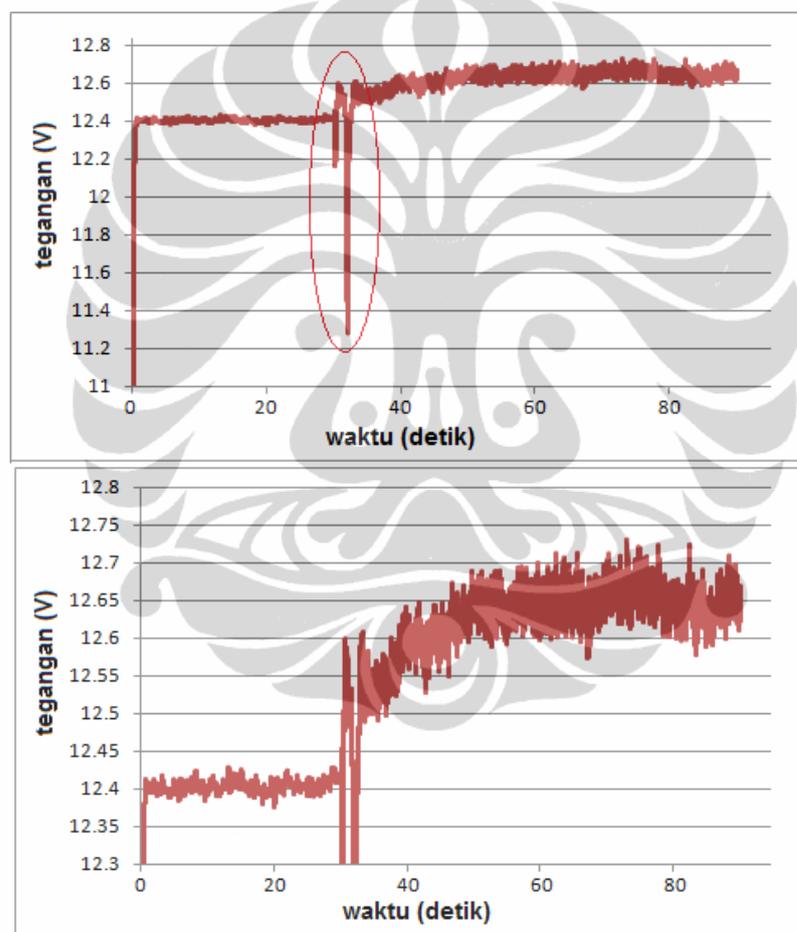
Gambar 4.19. Daya Keluaran Fuel Cell (P_{fc}) Saat Diberi Beban 560 W (nominal) dan Daya Keluaran Buck Converter (P_o)

Pada Gambar 4.19 tersebut, tampak bahwa pada saat diberi beban, fuel cell juga memperlihatkan gejala yang sama yaitu tegangan fuel cell jatuh di bawah kurva polarisasinya yang menyebabkan proteksi pada sistem fuel cell bekerja dengan memutus hubungan keluaran sehingga terlihat adanya ‘dip’ pada sekitar detik ke-33.



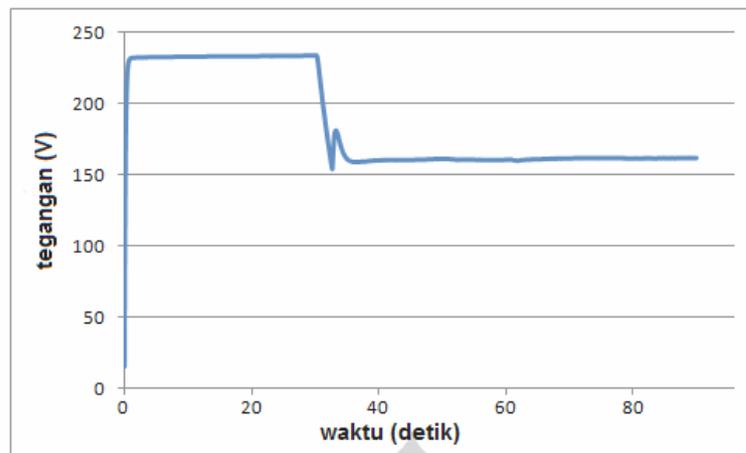
Gambar 4.20. Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 560 W (nominal) Berpengaruh Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter (dilingkari)

Tegangan keluaran fuel cell yang jatuh tersebut juga berpengaruh pada tegangan keluaran buck converter seperti tampak pada Gambar 4.20. Hasil pembesaran tegangan keluaran buck tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.21 dimana setelah pemberian beban, sempat terjadi penurunan tegangan keluaran buck converter hingga mencapai sekitar 11,3 volt akibat keluaran fuel cell yang terputus oleh sistem proteksinya dan setelah keluaran fuel cell kembali, terlihat perubahan tegangan keluaran buck converter sekitar 0,25 volt menjadi 12,65 volt.



Gambar 4.21. Tegangan Keluaran Buck Converter yang Terpengaruh Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 560 W (Perbesaran Gambar 4.20)

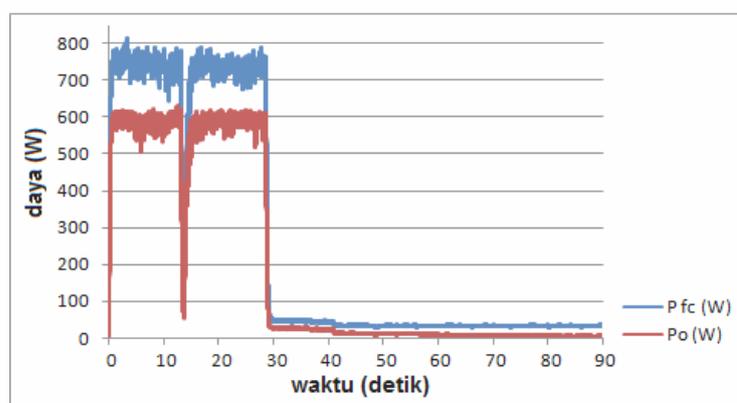
Namun demikian, tegangan keluaran buck converter tersebut masih berada di dalam *range* masukan inverter sehingga inverter masih dapat bekerja dimana tegangan keluaran inverter dapat dilihat pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22. Tegangan Keluaran Inverter Pada Saat Fuel Cell Diberi Beban Nominal 560 W

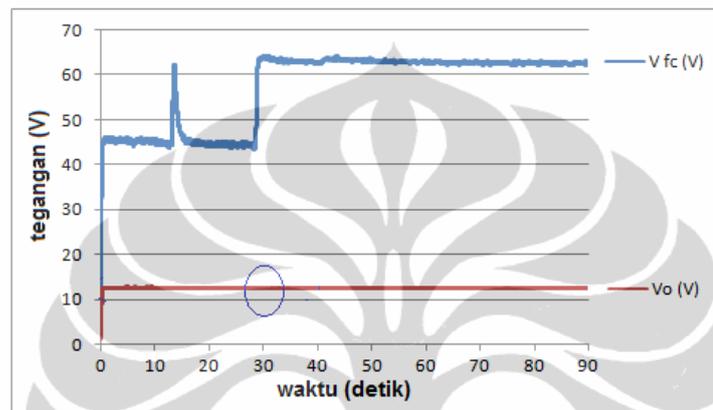
Pada Gambar 4.22 tersebut, tampak terjadi penurunan tegangan keluaran inverter menjadi sekitar 160 volt akibat pemberian beban. Hal ini telah disebutkan pada pembahasan sebelumnya seperti yang tampak pada Gambar 4.16 bahwa tegangan keluaran inverter komersial yang digunakan berubah akibat pembebanan.

Percobaan dilanjutkan dengan pengurangan beban secara tiba-tiba dari beban nominal 560 watt. Gambar 4.23 menunjukkan daya keluaran fuel cell dan daya keluaran buck converter pada kondisi tersebut. Pada saat percobaan pengurangan beban 560 watt ini, sempat terjadi 'dip' pada detik ke-15 dari inverter yang *over heat* namun inverter masih dapat kembali bekerja, kemudian pada detik ke-30 beban dilepas dan pada detik ke-42 inverter dimatikan.

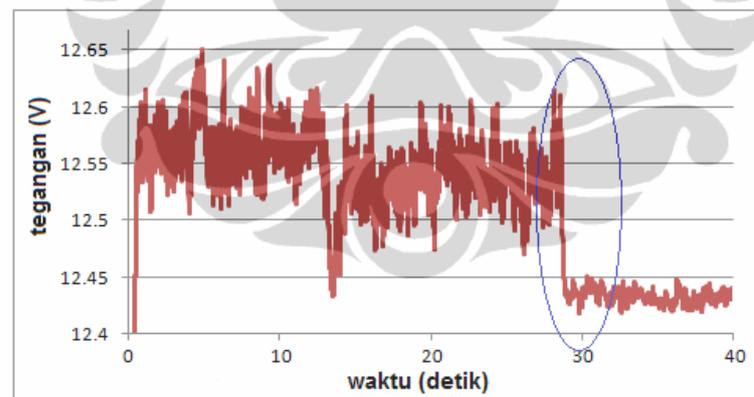


Gambar 4.23. Daya Keluaran Fuel Cell Saat Penurunan Beban 560 W (nominal) dan Daya Keluaran Buck Converter

Gambar 4.24 menunjukkan tegangan keluaran fuel cell dan tegangan keluaran buck converter pada kondisi percobaan pengurangan beban. Pengaruh pelepasan beban sebesar 560 watt secara tiba-tiba menyebabkan tegangan fuel cell ikut naik secara tiba-tiba dari sekitar 44 volt menjadi 63 volt dan hal ini berpengaruh terhadap tegangan keluaran buck converter yang pembesarannya tampak pada Gambar 4.25.



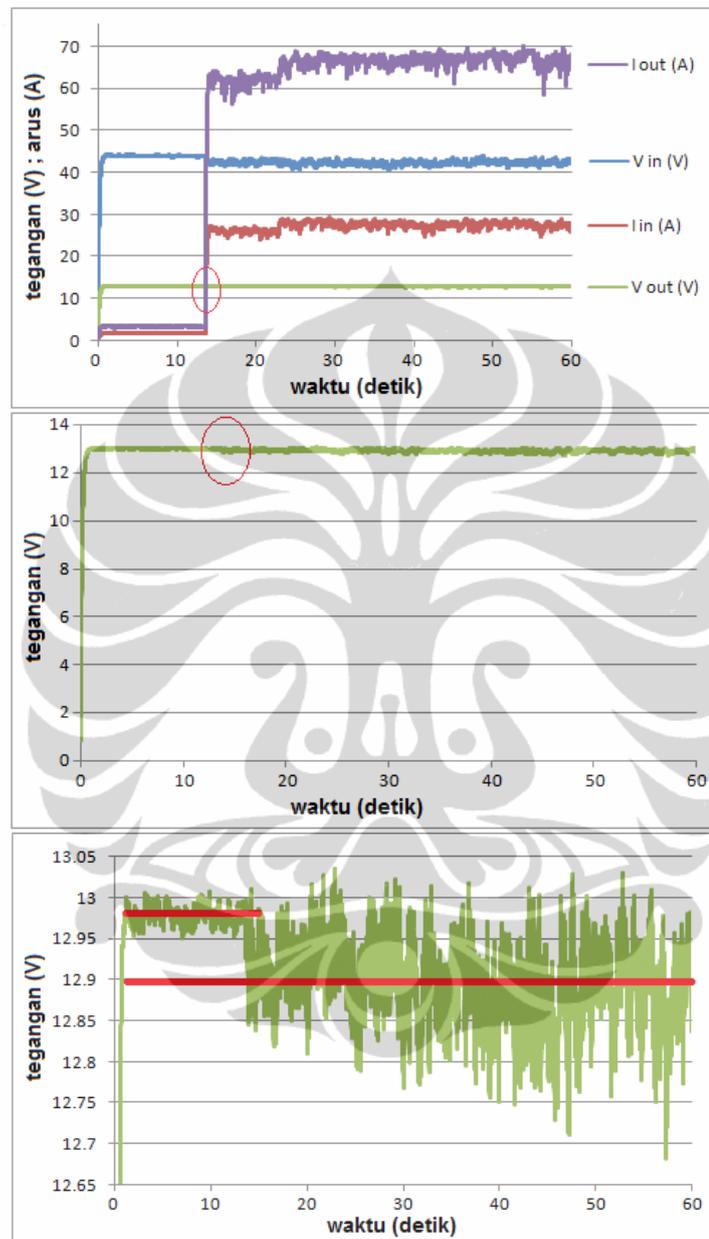
Gambar 4.24. Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 560 W (nominal) Berpengaruh Terhadap Tegangan Keluaran Buck Converter (dilingkari)



Gambar 4.25. Tegangan Keluaran Buck Converter yang Terpengaruh Tegangan Keluaran Fuel Cell Saat Diberi Beban 560 W (Perbesaran Gambar 4.23)

Dari Gambar 4.21 dimana saat penambahan beban secara tiba-tiba mengakibatkan tegangan keluaran fuel cell turun tiba-tiba dan dari Gambar 4.25 dimana saat pelepasan beban secara tiba-tiba menyebabkan tegangan fuel cell naik secara tiba-tiba, dapat dilihat adanya anomali pada tegangan keluaran buck converter yaitu saat beban terpasang, tegangan keluaran fuel cell lebih rendah

dibandingkan saat beban dilepas. Namun tegangan keluaran buck converter saat beban terpasang menjadi lebih besar dibandingkan saat tanpa beban.

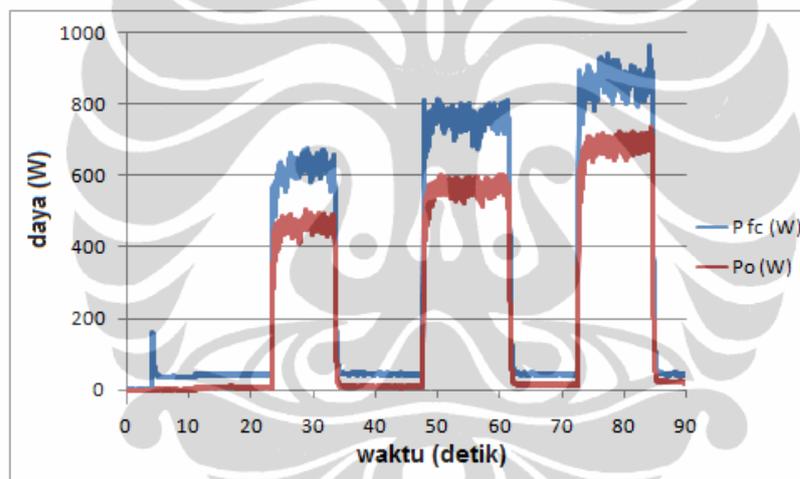


Gambar 4.26. Perbesaran Tegangan Keluaran Buck Converter Saat Uji Kinerja (kondisi pada Gambar 4.7). Garis merah menunjukkan perubahan rata-rata tegangan keluaran buck converter.

Jika dibandingkan dengan kondisi pada saat uji kinerja fuel cell yang tampak pada Gambar 4.7 sebelumnya, menunjukkan hal sebaliknya. Saat beban terpasang dan tegangan keluaran power supply ‘drop’, tegangan keluaran buck

converter akan lebih rendah dibandingkan saat tanpa beban. Perbesaran dari tegangan keluaran buck converter pada kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.26, dimana perubahan nilai rata-rata tegangan keluaran saat beban terpasang dan saat tanpa beban dipertegas dengan garis merah dan menunjukkan penurunan tegangan sekitar 0,08 volt. Sedangkan pada Gambar 4.21, kenaikan tegangan keluaran buck converter saat penambahan beban mencapai 0,24 volt dan pada Gambar 4.25 terlihat penurunan tegangan keluaran buck converter sekitar 0,15 volt.

Percobaan lain dilakukan dengan mengubah-ubah beban yang terpasang untuk memastikan anomali yang terjadi memang ada. Hasil pengukuran daya dapat dilihat pada Gambar 4.27.

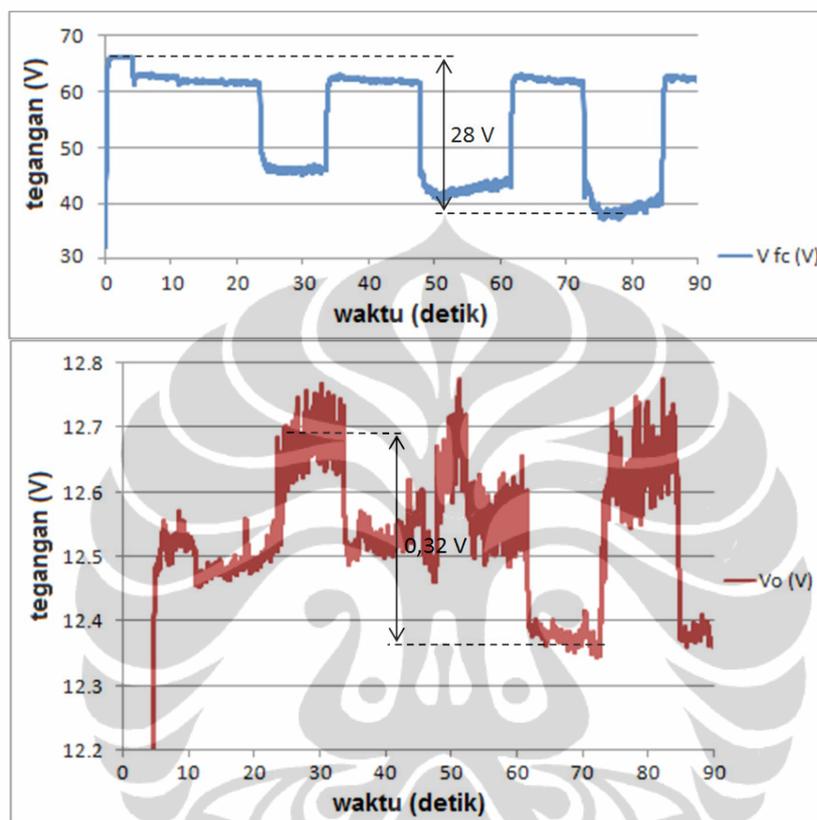


Gambar 4.27. Daya Keluaran Fuel Cell dan Daya Keluaran Buck Converter Saat Perubahan Beban Nominal 400 W, 500 W dan 600 W

Kronologi percobaan adalah sebagai berikut:

Pada fuel cell telah dilakukan pemanasan awal dan tegangan keluarannya telah stabil, buck converter belum dinyalakan. Penyalaan buck converter dilakukan sekitar 4 detik setelah perekaman data dimulai dimana terjadi lonjakan daya keluaran pada fuel cell. Inverter dinyalakan sekitar detik ke-11 dimana daya keluaran fuel cell tampak sedikit meningkat. Pada detik ke-23 beban dengan nominal 400 watt dihubungkan lalu pada detik ke-33, beban tersebut dilepas kembali. Pada detik ke-48 beban dengan nominal 500 watt dihubungkan lalu pada detik ke-62, beban tersebut dilepas kembali. Pada detik ke-73 beban dengan

nominal 600 watt dihubungkan lalu pada detik ke-85, beban tersebut dilepas kembali. Hasil pembesaran tegangan keluaran fuel cell dan tegangan keluaran buck converter pada kondisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.28.



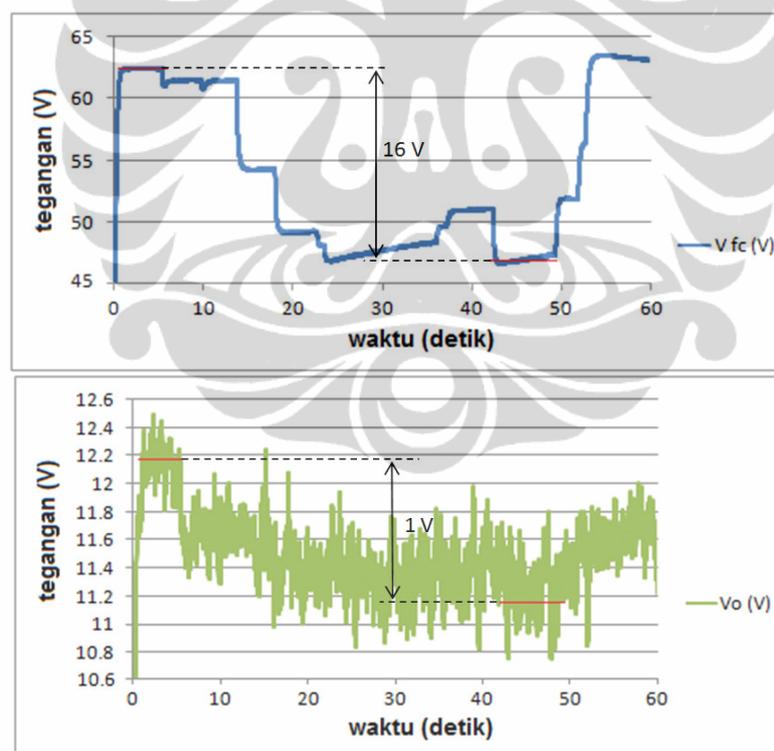
Gambar 4.28. Hasil Perbesaran Tegangan Keluaran Fuel Cell (V_{fc}) dan Tegangan Keluaran Buck Converter (V_o) Saat Perubahan Beban Nominal 400 W, 500 W dan 600 W

Dari Gambar 4.28 tersebut dapat dilihat bahwa saat baru dinyalakan, pada detik ke-4, tegangan keluaran buck converter berada di atas 12,5 volt. Pada saat inverter dinyalakan, terjadi penurunan tegangan keluaran buck converter menjadi di bawah 12,5 volt. Pemberian beban sebesar 400 watt (nominal) pada detik ke-23 membuat tegangan keluaran buck converter naik hingga mencapai kisaran 12,7 volt. Saat beban dilepas pada detik ke-33, tegangan keluaran buck converter kembali turun pada kisaran 12,5. Pada detik ke-48, saat beban dengan nominal 500 watt dihubungkan, tegangan keluaran buck converter kembali naik dan saat beban dilepas pada detik ke-62, tegangan keluaran buck converter turun hingga di bawah 12,4 volt dan anomali kembali terjadi. Bila dilihat pada kondisi tersebut,

trend tegangan keluaran fuel cell selalu berlawanan dengan tegangan keluaran buck converter. Saat tegangan keluaran fuel cell turun akibat pembebanan, tegangan keluaran buck converter malah naik. Jika mempertimbangkan adanya ‘drop’ tegangan pada buck converter, dapat dikatakan bahwa ‘drop’ tegangan pada buck converter menurun saat adanya kenaikan arus akibat beban yang bertambah.

4.3. Perbandingan Perubahan Tegangan Keluaran

Percobaan terhadap perlakuan tegangan keluaran fuel cell dengan menambahkan buck converter menunjukkan bahwa tegangan keluaran sistem menjadi relatif tetap saat diberi beban yang berfluktuasi dan perubahan yang drastis jika dibandingkan dengan tegangan keluaran fuel cell itu sendiri. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.29 untuk buck converter komersial yang digunakan.



Gambar 4.29. Hasil Perbesaran Gambar 4.10 Untuk Tegangan Keluaran Fuel Cell (V_{fc}) dan Tegangan Keluaran Buck Converter (V_o)

Pada kondisi Gambar 4.29 yang merupakan perbesaran Gambar 4.10, dapat dilihat bahwa perubahan tegangan keluaran fuel cell adalah 16 volt atau

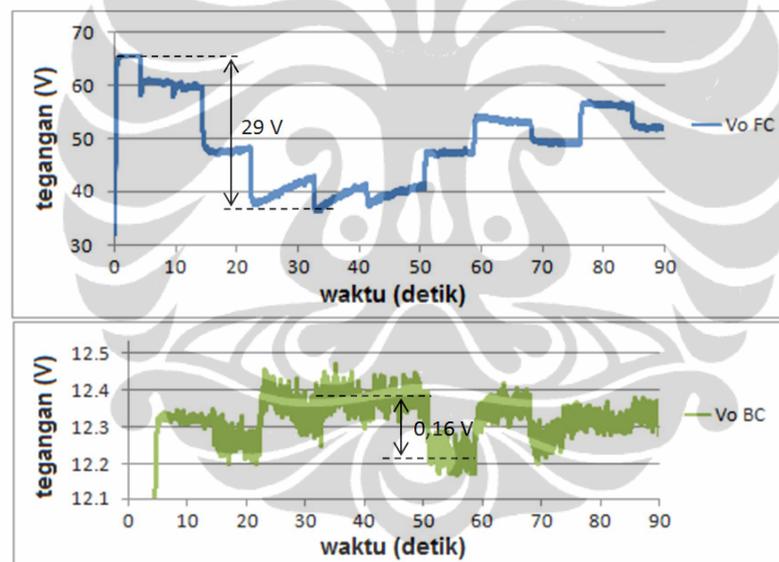
$$\% \Delta V = \frac{16}{63} \times 100\% = 25,4\%$$

dari nilai tegangan keluaran fuel cell maksimum (63 volt) dimana kondisi ini terjadi saat tanpa beban. Sedangkan perubahan tegangan keluaran buck converter komersial yang digunakan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\% \Delta V = \frac{1}{12,2} \times 100\% = 8,2\%$$

dimana nilai tegangan keluaran rata-rata maksimum (12,2 volt) juga diterjadi saat tanpa beban.

Untuk buck converter yang dibuat, kondisi yang terjadi pada Gambar 4.11 dapat diperbesar seperti yang tampak pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30. Hasil Perbesaran Gambar 4.11 Untuk Tegangan Keluaran Fuel Cell (V_o FC) dan Tegangan Keluaran Buck Converter (V_o BC)

Dari Gambar 4.30 tersebut dapat dilihat bahwa perubahan tegangan keluaran fuel cell adalah 29 volt sehingga

$$\% \Delta V = \frac{29}{66} \times 100\% = 43,9\%$$

dimana nilai rata-rata maksimum dari tegangan keluaran fuel cell terjadi saat tanpa beban. Sedangkan perubahan tegangan keluaran buck converter yang dibuat dapat dihitung sebagai berikut:

$$\% \Delta V = \frac{0,16}{12,38} \times 100\% = 1,3\%$$

Untuk kondisi yang berbeda, yaitu kondisi pada Gambar 4.28, perubahan tegangan keluaran fuel cell adalah 28 volt sehingga dapat dihitung

$$\% \Delta V = \frac{28}{67} \times 100\% = 41,8\%$$

Sedangkan pada kondisi tersebut, perubahan tegangan keluaran buck converter yang dibuat adalah

$$\% \Delta V = \frac{0,32}{12,69} \times 100\% = 2,5\%$$

Dari hasil perhitungan tersebut dapat dikatakan bahwa perubahan tegangan keluaran sistem fuel cell yang dikondisikan oleh suatu buck converter akan menjadi lebih konstan jika dibandingkan dengan tegangan keluaran fuel cell itu sendiri pada saat terjadinya perubahan beban yang fluktuatif. Hal ini akan mempermudah dalam penentuan daerah tegangan kerja beban yang akan dipasang pada suatu sistem fuel cell tanpa dikhawatirkan akan terjadinya tegangan yang drop atau tegangan berlebih hingga di luar tegangan kerja beban.

4.4. Evaluasi Hasil Percobaan

Percobaan terhadap perlakuan tegangan keluaran fuel cell dengan menambahkan buck converter menunjukkan bahwa tegangan keluaran sistem menjadi relatif konstan (dengan % perubahan sekitar 2,5% saat percobaan untuk buck converter yang dibuat) saat diberi beban yang berfluktuasi dan perubahan yang drastis jika dibandingkan dengan tegangan keluaran fuel cell itu sendiri.

Dari hasil percobaan dapat dilihat bahwa efisiensi daya kedua buck converter yang digunakan terpengaruh oleh besarnya beban yang terpasang. Namun saat beban mendekati nilai maksimum, efisiensi daya buck converter yang dibuat dapat mencapai sekitar 80%.

Dari hasil percobaan juga didapatkan bahwa tegangan keluaran pada inverter yang digunakan cenderung menurun seiring penambahan beban, sehingga perlu dipertimbangkan untuk menggunakan inverter yang lebih baik.

BAB 5 KESIMPULAN

Percobaan terhadap perlakuan tegangan keluaran fuel cell dengan menambahkan buck converter menunjukkan bahwa:

- tegangan keluaran sistem menjadi relatif konstan pada 12,4 volt $\pm 2,5\%$ saat diberi beban yang berfluktuasi dan perubahan beban yang drastis jika dibandingkan dengan tegangan keluaran fuel cell itu sendiri yang berkisar antara 39 volt hingga 66 volt.
- efisiensi daya kedua buck converter yang digunakan terpengaruh oleh besarnya beban yang terpasang. Saat beban mendekati nilai maksimum, efisiensi daya buck converter yang dibuat dapat mencapai sekitar 80% pada frekuensi switching 20 kHz dan penguatan pengendali proporsional 100 kali.
- tegangan keluaran inverter yang digunakan cenderung menurun seiring penambahan beban hingga sekitar 160 volt, sehingga perlu dipertimbangkan untuk menggunakan inverter yang lebih baik.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Yusivar, Feri., *Permasalahan Stabilitas Pengendalian Tegangan Keluaran Pada Sistem Pembangkit Listrik Berbasis Fuelcell*, Real-Time Measurement and Control Research Group, 2011
- [2] Habibullah., *Metode Penghematan Gas H₂ Pada Sistem PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) Dengan Mengatur Bukaannya Valve Sebanding Perubahan Daya Beban*. Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. 2011
- [3] Aryani, Dharma., *Identifikasi Sistem PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) Dengan Metode Kuadrat Terkecil*. Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. 2008
- [4] Dahono, Pekik Argo., *Topologi Konverter DC-DC*, <http://konversi.wordpress.com/2009/01/07/topologi-konverter-dc-dc/>, 23 Desember 2011.
- [5] Horizon Fuel Cell Technologies, *H-1000 Fuel Cell Stack User Manual V1.3*, June 2009
- [6] Kazimierczuk, Marian K., *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, 2008
- [7] Hart, Daniel W., *Introduction to Power Electronics International Edition*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, 1997
- [8] Mohan, Ned, Undeland, Tore M. & Robbins, William P., *Power Electronics: Converters, Applications, and Design Third Edition*, John Wiley & Sons, 2003
- [9] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/indtor.html#c1>
- [10] Neacsu, Dorin O., *Power Switching Converters: Medium and High-Power*, Taylor & Francis Group, LLC., Boca Raton-FL, 2006
- [11] Griffith, Patrick., *Designing Switching Voltage Regulators with the TL494*, Application Report, Texas Instruments Incorporated, Dallas, 2005

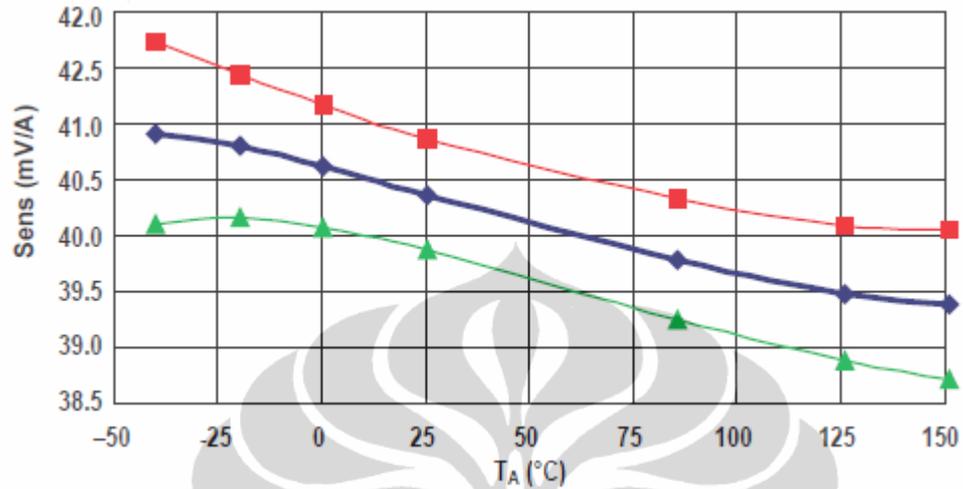
Lampiran A: Tabel Standard AWG

AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper
0000	0.46	11.684	0.049	0.16072	380	302	125 Hz
000	0.4096	10.40384	0.0618	0.202704	328	239	160 Hz
00	0.3648	9.26592	0.0779	0.255512	283	190	200 Hz
0	0.3249	8.25246	0.0983	0.322424	245	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	0.1239	0.406392	211	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	0.1563	0.512664	181	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	0.197	0.64616	158	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	0.2485	0.81508	135	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	0.3133	1.027624	118	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	0.3951	1.295928	101	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	0.4982	1.634096	89	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	0.6282	2.060496	73	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	0.7921	2.598088	64	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	0.9989	3.276392	55	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	1.26	4.1328	47	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	1.588	5.20864	41	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.003	6.56984	35	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.525	8.282	32	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	3.184	10.44352	28	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	4.016	13.17248	22	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	5.064	16.60992	19	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	6.385	20.9428	16	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	8.051	26.40728	14	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	10.15	33.292	11	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	12.8	41.984	9	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	16.14	52.9392	7	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	20.36	66.7808	4.7	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	25.67	84.1976	3.5	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	32.37	106.1736	2.7	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	40.81	133.8568	2.2	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	51.47	168.8216	1.7	0.288	130 kHz

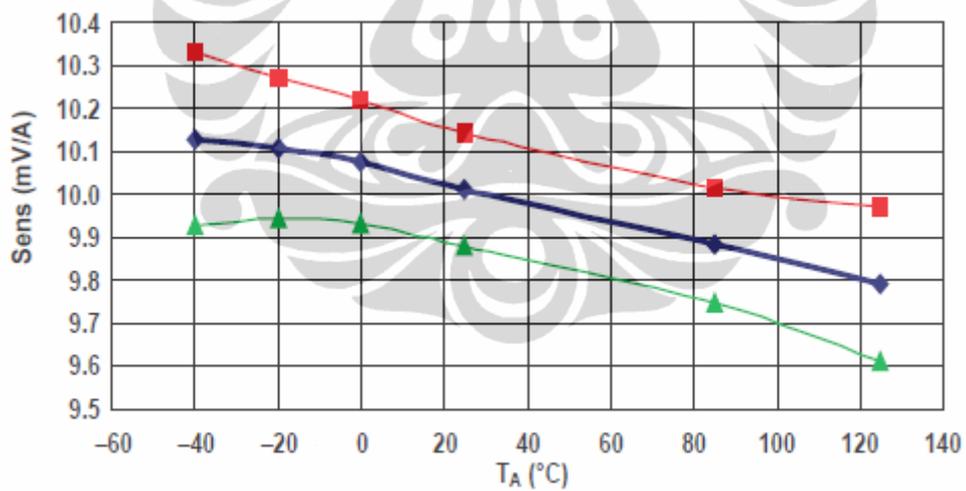
Lampiran A: Tabel Standard AWG (lanjutan)

AWG gauge	Conductor Diameter	Conductor Diameter	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper
28	0.0126	0.32004	64.9	212.872	1.4	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	81.83	268.4024	1.2	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	103.2	338.496	0.86	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	130.1	426.728	0.7	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	164.1	538.248	0.53	0.091	430 kHz
Metric 2.0	0.00787	0.2	169.39	555.61	0.51	0.088	440 kHz
33	0.0071	0.18034	206.9	678.632	0.43	0.072	540 kHz
Metric 1.8	0.00709	0.18	207.5	680.55	0.43	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	260.9	855.752	0.33	0.056	690 kHz
Metric 1.6	0.0063	0.16002	260.9	855.752	0.33	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	329	1079.12	0.27	0.044	870 kHz
Metric 1.4	0.00551	0.14	339	1114	0.26	0.043	900 kHz
36	0.005	0.127	414.8	1360	0.21	0.035	1100 kHz
Metric 1.25	0.00492	0.125	428.2	1404	0.2	0.034	1150 kHz
37	0.0045	0.1143	523.1	1715	0.17	0.0289	1350 kHz
Metric 1.12	0.00441	0.112	533.8	1750	0.163	0.0277	1400 kHz
38	0.004	0.1016	659.6	2163	0.13	0.0228	1750 kHz
Metric 1	0.00394	0.1	670.2	2198	0.126	0.0225	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	831.8	2728	0.11	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	1049	3440	0.09	0.0137	2900 kHz

Lampiran B: Grafik Karakteristik Sensor Arus



Pengaruh temperatur terhadap karakteristik sensitivitas keluaran sensor arus ACS754SCB-50



Pengaruh temperatur terhadap karakteristik sensitivitas keluaran sensor arus ACS754SCB-200