

TUGAS AKHIR - EE184801

Studi Desain Sistem Kelistrikan Kendaraan Bermotor BLDC Ringan 1000 Watt dengan Memanfaatkan Hydrogen - Fuel Cell

MH. GALANG SABILILLAH

NRP 07111840000033

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

NIP.195512071980031004

Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

NIP.196510121990031003

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - EE184801

Studi Desain Sistem Kelistrikan Kendaraan Bermotor BLDC Ringan 1000 Watt dengan Memanfaatkan Hydrogen - Fuel Cell

MH. GALANG SABILILLAH

NRP 07111840000033

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

NIP.195512071980031004

Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

NIP.196510121990031003

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - EE184801

Study on Electrical System Design of Hydrogen-Fuel Cell Vehicle with 1000 Watt Lightweight BLDC Motor

MH. GALANG SABILILLAH

NRP 07111840000033

Supervisor

Prof. Dr. Ir. Soediby, M.MT.

NIP.195512071980031004

Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

NIP.196510121990031003

Electrical Engineering Undergraduate Program

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

Studi Desain Sistem Kelistrikan Kendaraan Bermotor BLDC Ringan 1000 Watt dengan Memanfaatkan Hydrogen - Fuel Cell

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat

memperoleh gelar Sarjana pada

Program Studi S-1 Teknik Sistem Tenaga

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh : **MH. GALANG SABILILLAH**

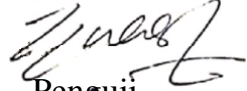
NRP. 07111840000033


Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

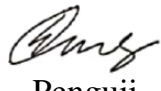
1. Prof. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
2. Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D
3. Dr. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
4. Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
5. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
6. Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

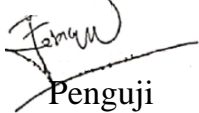

Pembimbing


Ko-Pembimbing


Penguji


Penguji


Penguji


Penguji

SURABAYA

Juni, 2022

APPROVAL SHEET

Study on Electrical System Design of Hydrogen-Fuel Cell Vehicle with 1000 Watt Lightweight BLDC Motor

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a Bachelor degree at
Undergraduate Study Program of Power System
Department of of Electrical Engineering
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **MH. GALANG SABILILLA**

NRP. 07111840000033

Approved by Final Project Proposal Examiner Team:

1. Prof. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
2. Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D
3. Dr. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
4. Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
5. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
6. Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.



Supervisor



Co-Supervisor



Examiner



Examiner



Examiner



Examiner

SURABAYA

June, 2022

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : MH. Galang Sabilillah / 071118400000338
Program studi : Teknik Sistem Tenaga
Dosen Pembimbing 1 / NIP : Prof. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. / 195512071980031004
Dosen Pembimbing 2 / NIP : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D /
196510121990031003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**STUDI DESAIN SISTEM KELISTRIKAN KENDARAAN BERMOTOR BLDC RINGAN 1000 WATT DENGAN MEMANFAATKAN HYDROGEN - FUEL CELL**” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 12 Juni 2022

Mengetahui

Mahasiswa



MH. Galang Sabilillah

NRP. 07111840000033

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : MH. Galang Sabilillah / 0711184000033
Department : Study Program Power System Engineering
1st Supervisor / NIP : Prof. Dr. Ir. Soediby, M.MT. / 195512071980031004
2nd Supervisor / NIP : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D /
196510121990031003

hereby declare that the Final Project with the title of “**STUDY ON ELECTRICAL SYSTEM DESIGN OF HYDROGEN-FUEL CELL VEHICLE WITH 1000 WATT LIGHTWEIGHT BLDC MOTOR**” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 12th June 2022

Acknowledged

Student



MH. Galang Sabilillah
NRP. 0711184000033

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

ABSTRAK

Studi Desain Sistem Kelistrikan Kendaraan Bermotor BLDC Ringan 1000 Watt dengan Memanfaatkan *Hydrogen - Fuel Cell*

Nama Mahasiswa/ NRP : MH. Galang Sabilillah / 07111840000033
Departemen : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Dosen Pembimbing I : Prof. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
Dosen Pembimbing II : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D

Abstrak

Kendaraan listrik dengan memanfaatkan *hydrogen* sebagai bahan bakar dengan bantuan teknologi *fuel cell* merupakan sebuah inovasi yang akan sangat berguna untuk kehidupan lingkungan yang lebih sehat. Pemodelan kelistrikan pada kendaraan listrik ini dirangkai sedemikian rupa dengan menggunakan beberapa rangkaian elektronika seperti *fuel cell*, converter, inverter dan juga pembebanan oleh motor BLDC. Tegangan dan arus *input* dari *fuel cell* akan dialirkan langsung kepada converter yang bertipe *buck-boost*, hal itu dikarenakan dalam kendaraan listrik ini akan dipasang baterai dua arah (*bidirectional*) sebagai penyimpan energi dan juga sebagai membantu mengeluarkan energi apabila diperlukan untuk ketika motor memerlukan tambahan daya. Kemudian karakteristik arus dari *converter* diubah dari yang awalnya berupa arus berkarakteristik DC menjadi arus dengan karakteristik AC oleh inverter dengan tipe *Three-Phases Six-Wires* dengan topologi *full bridge* yang kemudian akan menghasilkan tiga buah aliran arus dari enam mosfet yang terdapat pada inverter. Ketiga arus tersebut akan mengalir stator pada motor BLDC yang kemudian menimbulkan medan magnet pada stator untuk memutar rotor setelah medan magnet memotong medan jangkar yang ditimbulkan oleh arus pada rotor. Arus yang berasal dari inverter baik besar maupun waktu pengaliran arus secara bergantian akan diatur oleh *commutation logic* dan juga *gate pulse* yang memberikan perintah terhadap ke enam mosfet untuk melakukan *switch* pada arus. Daya Motor BLDC sendiri nantinya akan dipilih sebesar 15% dari daya beban, seperti berat beban total kendaraan (dua penumpang, *body* kendaraan, berat baterai dan juga berat tangka *hydrogen*), selain itu kendaraan ini juga memperhitungkan luas permukaan dengan gesekan udara yang dialami, gaya gesek dengan aspal, hingga kecepatan dan percepatan yang diminta.

Kata Kunci: *Fuel Cell, Buck-Boost Konverter, Six-Wires Three-Phases Inverter, PID Controller, Commutation Logic, Gate Pulse, Motor BLDC, Simulink*

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

Study on Electrical System Design of Hydrogen-Fuel Cell Vehicle with 1000 Watt Lightweight BLDC Motor

Student Name / NRP : **MH. Galang Sabilillah / 0711184000033**
Department : **Teknik Elektro FTEIC - ITS**
1st Supervisor : **Prof. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.**
2nd Supervisor : **Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D**

Abstract

Using hydrogen as a fuel for electric vehicles is an innovation that will help create a healthier environment by using fuel cells. In electric vehicles, electrical modeling is done by combining several electronic circuits, such as fuel cells, converters, inverters, and BLDC motors for loading. A buck-boost type converter is directly connected to the input voltage and current from the fuel cell, since in this electric vehicle a bidirectional battery will be installed as an energy store and also to help release power when the motor requires more power. Eventually, the current characteristics of the converter are converted from DC to AC by a Three-Phase Six-Wire Inverter with a full bridge topology which will produce three current flows from the six MOSFETs contained in the inverter. The three currents in the BLDC motor flow through the stator, which creates a magnetic field that rotates the rotor after the magnetic field cuts off the armature field derived from the current in the rotor. The current from the inverter, both large and when the current flows alternately, will be controlled by commutation logic and a gate pulse that controls the six mosfets to switch the current. A BLDC motor will be selected at a rate of 15% of the load power, which includes the weight of the vehicle (two passengers, the body, the battery, and the hydrogen tank); furthermore, it considers the friction with air and the friction with asphalt, as well as the required speed and acceleration.

Keywords: *Fuel Cell, Buck-Boost Konverter, Six-Wires Three-Phases Inverter, PID Controller, Commutation Logic, Gate Pulse, Motor BLDC, Simulink*

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul “Studi Desain Sistem Kelistrikan Kendaraan Bermotor BLDC Ringan 1000 Watt dengan Memanfaatkan Hydrogen - Fuel Cell”. Harapan penulis, penelitian ini dapat dijadikan referensi penelitian selanjutnya.

Selama penulisan penelitian ini tentunya penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak yang telah mendukung dan membimbing penulis. Kasih yang tulus serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Orang tua dan adik saya sebagai motivasi utama yang senantiasa memberi doa, semangat dan bantuan moral maupun materiil.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Soediby, M.MT. dan juga Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik
4. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. selaku kepala Laboratorium Konversi Energi.
5. dr. Iftita Khumairo sebagai salah satu orang yang sangat berjasa dan paling penting dalam hidup saya, yang telah menjadi *support system* dari awal saya memasuki dunia kuliah hingga sekarang.
6. Keluarga Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik KESatuan, KESuksesan dan juga KEjayaan, terutama bagi Aslab dengan nama Prisma Riashuda Prakosa yang telah banyak membantu saya dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman e58 yang telah berjuang bersama penulis sejak awal perkuliahan
8. Dan seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan selama ini. Penulis pun memohon maaf atas segala kekurangan pada penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2022



MH. Galang Sabilillah

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah	1
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.1.1 Penelitian Mobil Listrik dengan Fuel Cell sebagai Sumber Energi	3
2.2 Pemanfaatan Pembangkit EBT Jenis Hidrogen <i>Fuel Cell</i>	3
2.2.1. Metode Produksi Hidrogen	3
2.2.2. Cara Kerja Teknologi <i>Fuel Cell</i>.....	4
2.2.3. Teknologi PEM (<i>Proton Exchange Membrane</i>) pada <i>Fuel Cell</i>.....	5
2.3 Kendaraan Listrik Ringan dengan Memanfaatkan Hidrogen - <i>Fuel Cell</i>	9
2.4 Sistem Penyimpan Energi.....	9
2.4.1 <i>Hybrid Battery Powered Vehicle (Lithium Ion)</i>.....	10
2.4.2 Karakteristik Baterai Lithium Ion	10
2.5 <i>Power Electronic</i>	13
2.5.1. <i>Buck-Boost Converter</i>	13
2.5.2. <i>PID Controller</i>	16
2.6 Topologi 6 Sambungan <i>Switch</i> dari <i>Inverter</i> 3 Fasa.....	19
2.6.1 Indeks Modulasi.....	19
2.6.2 Inverter, Motor dan Efisiensi Sistem	20
2.7 Motor BLDC 1000 Watt.....	21
BAB III PEMODELAN SISTEM, KONTROL DAN SIMULASI.....	25

3.1	Metode Penelitian yang Digunakan	25
3.2	Pemodelan Sistem Kelistrikan	27
3.2.1	<i>Fuel Cell</i>	28
3.2.2	DC/DC Converter 1200 Watt dan PID	29
3.2.3	<i>Inverter dan Controller</i>	30
3.3	Pemodelan Beban Motor BLDC	33
3.3.1	Penentuan Kapasitas Beban Motor	33
3.4	Perhitungan Kapasitas Baterai pada Mobil listrik.....	36
BAB IV HASIL DAN ANALISA DATA		37
4.1	Hasil Simulasi PEM <i>Fuel Cell</i>	37
4.1.1	<i>Plotting Data PEM Fuel Cell</i>	37
4.2	PEM <i>Fuel Cell</i> dengan Rangkaian <i>Close Loop</i>	40
4.3	Hasil Simulasi <i>Buck-Boost Converter</i> secara <i>Close Loop</i>	41
4.4	Hasil Simulasi Inverter untuk Motor BLDC 1000 Watt.....	43
4.5	Hasil Simulasi dari <i>Output</i> Motor BLDC	45
4.6	Hasil Setelah Perhitungan Baterai.....	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		49
5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA		51
LAMPIRAN		55
BIODATA PENULIS		57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Prinsip dari Reaksi Fuel cell (Fuel Cell Handbook (Sixth Edition), 2002)	5
Gambar 2. 2 Lapisan PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell (Larminie & Dicks, 2003)	6
Gambar 2. 3 Lapisan Baterai Lithium Ion (Linden & Reddy, 2002)	11
Gambar 2. 4 Gambaran dari perhitungan kapasitas baterai (Qi et al., 2010)	12
Gambar 2. 5 Pemodelan rangkain buck boost converter (Dalarsson, 1998)	13
Gambar 2. 6 Mode buck converter (Sreekumar & Jiji, 2021)	14
Gambar 2. 7 Mode boost converter (Sreekumar & Jiji, 2021)	15
Gambar 2. 8 Diagram alir PID controller (Rezaei & Mehran, 2019)	17
Gambar 2. 9 Diagram alir kerja PID (Chander et al., 2010; DEY et al., 2009)	18
Gambar 2. 10 Proses perangkaian inverter dengan motor (Hahn, 2006)	19
Gambar 2. 11 Efisiensi three-phase, six-wire inverter (Macahig, 2020)	20
Gambar 2. 12 Three-phases, six-wires inverter dengan topologi full bridge (Macahig, 2020)	21
Gambar 2. 13 Pemodelan Motor BLDC (Usman & Rajpurohit, 2020)	22
Gambar 2. 14 Belitan pada stator (Usman & Rajpurohit, 2020)	22
Gambar 2. 15 Bentuk sinyal Motor back-EMF (Usman & Rajpurohit, 2020)	23
Gambar 2. 16 Karakteristik arus pada Motor back-EMF (Usman & Rajpurohit, 2020)	23
Gambar 3. 1 Flow chart pengerjaan penelitian	26
Gambar 3. 2 Desain sistem kelistrikan	27
Gambar 3. 3 Pemodelan pada Simulink	28
Gambar 3. 4 Pemodelan fuel cell open loop	29
Gambar 3. 5 Blok diagram perhitungan kontrol PID	30
Gambar 3. 6 Pemodelan buck-boost converter pada Simulink	30
Gambar 3. 7 Pemodelan inverter dan beban motor BLDC pada Simulink	31
Gambar 3. 8 Pemodelan commutation logic controller pada Simulink	32
Gambar 3. 9 Pemodelan gate pulse pada Simulink	33
Gambar 4. 1 Grafik perbandingan antara daya dan arus output dari fuel cell	38
Gambar 4. 2 Grafik perbandingan antara tegangan dan arus output dari fuel cell	38
Gambar 4. 3 Grafik perbandingan antara daya dengan tegangan output pada fuel cell	39
Gambar 4. 4 Bentuk gelombang sinyal tegangan output dari fuel cell	40
Gambar 4. 5 Bentuk sinyal tegangan yang masuk pada kapasitor	41
Gambar 4. 6 Bentuk sinyal arus yang masuk melalui induktor	42
Gambar 4. 7 Bentuk sinyal tegangan yang keluar dari konverter	42
Gambar 4. 8 Bentuk sinyal arus yang keluar dari konverter	43
Gambar 4. 9 Arus stator Ia	44
Gambar 4. 10 Arus stator Ib	44
Gambar 4. 11 Arus stator Ic	44
Gambar 4. 12 Logic pulse pada arus stator Ia	45
Gambar 4. 13 Logic pulse pada arus stator Ib	45
Gambar 4. 14 Logic pulse pada arus stator Ic	45
Gambar 4. 15 Putaran rotor motor BLDC dalam rad/sec	46

Gambar 4. 16 Half effect current Ia..... 47
Gambar 4. 17 Half effect current Ib 47
Gambar 4. 18 Half effect current Ic..... 48

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Metode Produksi Hidrogen	3
Tabel 2. 2 Parameter Lapisan Baterai	11
Tabel 3. 1 Data parameter fuel cell	28
Tabel 3. 2 Parameter komponen DC/DC Converter	29
Tabel 3. 3 Parameter inverter	31
Tabel 3. 4 Tabel parameter beban (berat kendaraan) dan gesekan pada kendaraan	33
Tabel 3. 5 Ukuran dan kecepatan maksimum dari motor	34
Tabel 3. 6 Parameter motor BLDC	35
Tabel 4. 1 Plotting data fuel cell	37
Tabel 4. 2 Parameter baterai D12-7.5	48

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fuel cell menggunakan energi kimia dari hidrogen atau bahan bakar lain untuk menghasilkan listrik yang bersih dan efisien. Jika hidrogen adalah bahan bakar, produk yang dihasilkan hanyalah listrik, air, dan sumber panas. Teknologi *fuelcell* memiliki keunikan dalam keberagaman pengaplikasiannya, teknologi tersebut dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar serta kemampuannya dalam menyediakan daya listrik sebesar pembangkit listrik dan dengan ukuran sekecil komputer laptop (Hydrogen and Fuel cell Technologies Office, n.d.). Sistem sel bahan bakar dapat beroperasi pada efisiensi termodinamika yang lebih tinggi daripada mesin panas. Mesin panas, seperti mesin pembakaran internal dan turbin, mengubah energi kimia menjadi panas melalui pembakaran dan menggunakan panas itu untuk melakukan pekerjaan yang bermanfaat (*Hydrogen Fuel Cell Engines MODULE 4: FUEL CELL ENGINE TECHNOLOGY CONTENTS*, n.d.).

Kendaraan berbahan bakar hidrogen menawarkan janji untuk secara signifikan mengurangi jumlah polutan yang dibuang ke lingkungan (Stephens, 2009). Untuk mendapatkan listrik yang cukup untuk menggerakkan kendaraan, *Individual Fuel Cell System* digabungkan secara seri untuk membuat tumpukan sel bahan bakar. Ada beberapa jenis sel bahan bakar, yang masing-masing cocok untuk aplikasi yang berbeda. Sel bahan bakar biasanya dikelompokkan menurut suhu operasinya dan jenis elektrolit yang digunakan (*Hydrogen Fuel Cell Vehicles CLIMATE TECHBOOK*, 2011). Jumlah daya yang dihasilkan oleh sel bahan bakar ditentukan oleh beberapa faktor termasuk jenis sel bahan bakar, ukuran, suhu operasi, dan tekanan di mana gas disuplai ke sel. Jenis sel bahan bakar yang paling umum digunakan dalam FCV adalah membran elektrolit polimer (PEM) (U.S. DOE, 2008).

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana desain kelistrikan menentukan daya dari semua kapasitas dari semua komponen utama dari kendaraan bermotor listrik?
2. Bagaimana cara menentukan torsi beban (kendaraan bermotor listrik ringan) sehingga dapat menentukan kapasitas dari semua komponen yang terdapat dalam sistem kelistrikan kendaraan bermotor listrik ringan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Desain dan memperhitungkan spesifikasi kelistrikan mobil listrik ringan dimulai dari penentuan spesifikasi *fuel cell*, *buck-boost converter*, *inverter* hingga motor BLDC 1000 watt dan juga perhitungan kapasitas baterai.
2. Memperkirakan berat beban penumpang dengan kapasitas 2 orang dengan *body* mobil hingga barang bawaan, termasuk baterai, tangki hidrogen dengan total 485 kg dengan rincian berat maksimum setiap orang 70 kg dan berat *body* mobil dan barang bawaan hingga 345 kg.
3. *Buck-boost converter* menggunakan *PID controller* yang dioperasikan pada sistem *close loop* dari desain kelistrikan mobil.

4. PID *controller* merupakan sistem kontrol kecepatan rotor dari motor BLDC dari konverter untuk menjaga kecepatan rotor agar bekerja secara optimum pada titik tertingginya.
5. Daya keluaran maksimum dari motor BLDC sebesar $\pm 115\%$ dari daya beban (penumpang dan berat lain).
6. Kecepatan rotor diasumsikan konstan untuk mengetahui kemampuan maksimum dari desain.
7. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab Simulink.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui desain kelistrikan guna untuk menentukan spesifikasi yang sesuai dari semua komponen utama dimulai dari *fuel cell*, *buck-boost converter*, *inverter* hingga motor BLDC dari kendaraan bermotor listrik.
2. Mengetahui beban maksimum berdasarkan perkiraan dari berat penumpang yang berjumlah 2 orang dengan berat 70 kg dan *body* mobil dengan kisaran berat 345 kg sehingga dapat menentukan kapasitas dari semua komponen yang terdapat dalam sistem kelistrikan kendaraan bermotor listrik ringan agar dapat bekerja secara optimum.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian yang berjudul Studi Desain Sistem Kelistrikan Kendaraan Bermotor BLDC Ringan 1000 Watt dengan memanfaatkan Hydrogen - Fuel Cell adalah ikut membantu melestarikan dan mengurangi pencemaran lingkungan untuk menciptakan kehidupan yang lebih sehat, tidak hanya untuk manusia saja, tetapi setiap flora dan fauna yang terdapat hidup dan menyerap oksigen sebagai pertukaran energi dalam tubuh demi keberlangsungan hidup yang lebih sehat.

Riset membuktikan bahwasanya sumbangsih untuk polusi udara terbanyak adalah dari segi transportasi pribadi maupun umum. Sebanyak 60% dari polusi udara disumbang oleh asap hasil pembakaran kendaraan berbahan bakar fosil. Oleh karena itu diharapkan dengan adanya inovasi mengenai kendaraan listrik berbahan bakar hidrogen dengan teknologi *fuel cell* ini dapat membantu mengurangi atau bahkan dapat dikembangkan secara massif bagi industri-industri otomotif diseluruh dunia agar permasalahan yang timbul khususnya dalam segi lingkungan satu per satu dapat teratasi dengan adanya inovasi ini. Apabila kendaraan dengan hidrogen ini dapat terealisasikan maka hasil pembakaran yang dikeluarkan hanyalah uap air dan air panas dimana kedua hasil eksitasi tersebut sama sekali tidak berbahaya bagi lingkungan.

Kendaraan jenis ini sangat mengutamakan efisiensi dari perubahan daya listrik yang nantinya akan disimpan kepada baterai. Baterai ini berfungsi untuk menyimpan daya saat surplus energi dari beban motor dengan perangkat elektrik *buck-boost* konverter. Baterai tersebut sangat membantu agar hidrogen tidak terbuang sia-sia ketika kendaraan dipakai.

Selain itu, hidrogen sendiri merupakan sumber energi yang tidak akan pernah habis dari muka bumi (*renewable energy*) dan proses pengambilan sumber energi inipun tidak merusak lingkungan. Hanya saja memang untuk proses peng-ekstraksian gas ini cukup rumit dan masih membutuhkan biaya yang mahal. Akan tetapi apabila inovasi ini terus dikembangkan, harapan yang lain adalah kendaraan jenis ini dapat mengimbangi kendaraan dengan bahan bakar konvensional, baik dari segi pengisian, konsumsi bahan bakar dll.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Berikut merupakan penelitian terdahulu mengenai kendaraan bermotor listrik ringan hidrogen *fuel cell* yang digunakan juga sebagai referensi untuk menyusun tugas akhir ini.

2.1.1 Penelitian Mobil Listrik dengan Fuel Cell sebagai Sumber Energi

Dewasa ini pemberitaan mengenai mobil listrik di Indonesia mulai gencar sehubungan dengan keinginan pemerintah terhadap diversifikasi energi disegala bidang dan pada khususnya dalam rangka penghematan energi disektor transportasi. Salah satunya yang diharapkan adalah mobil listrik. Mobil listrik dapat beroperasi sebagai layaknya mobil konvensional, bahkan mesin listrik yang digunakan memiliki banyak kelebihan di sisi efisiensi dan unjuk kerjanya dibandingkan dengan mesin pembakaran fosil yang digunakan dalam mobil konvensional.

Mobil listrik saat ini lebih unggul dibandingkan mobil konvensional 10 tahun yang lalu, baterai jenis lithium banyak menggantikan posisi baterai *lead-acid* yang digunakan mobil listrik sebelumnya. Baterai lithium mempunyai keunggulan yaitu: ramah lingkungan, densitas energi yang 3-5 kali lebih tinggi dari baterai *lead-acid*. Densitas energi yang tinggi mengakibatkan hanya diperlukan massa dan ruang yang lebih kecil, sehingga berat kendaraan lebih ringan, dan kecepatan serta jarak jelajahnya menjadi lebih jauh.

Kendala yang masih menjadi pertimbangan untuk calon pengguna adalah waktu pengisian baterai yang untuk mencapai kondisi 100% (penuh), diperlukan sekitar 4-8 jam (dengan listrik rumah tangga) dan 30 menit dengan menggunakan *fast charging station* untuk mendapatkan kondisi baterai 80%.

Berdasarkan hal diatas dilakukan penelitian dengan mencoba menerapkan teknologi pembangkit listrik *fuel cell* yang menggunakan bahan bakar hidrogen untuk menghasilkan listrik. Dengan teknologi *fuel cell* pengisian sumber energi dapat dipercepat sebagai layaknya mobil konvensional saat mengisi BBM. Penelitian ini juga menganalisa serta memprediksi keekonomisan hidrogen jika digunakan untuk mobil listrik

2.2 Pemanfaatan Pembangkit EBT Jenis Hidrogen Fuel Cell

2.2.1. Metode Produksi Hidrogen

Hidrogen, penyimpan energi terbersih di Semesta, seringkali dikaitkan dengan biaya tinggi, meskipun diekstraksi dari air, dimana air merupakan elemen paling murah namun paling berharga bagi kehidupan. Ekstraksi hidrogen dari air dilakukan melalui metode yang disebut elektrolisis, tetapi melakukan elektrolisis secara efisien membutuhkan penggunaan katalis berbahan seperti platinum, yang harganya sangat mahal (Sandru, 2010).

Berikut merupakan tabel yang menunjukkan teknik dalam memproduksi hidrogen. (*compiled from: http://en.wikipedia.org/wiki/hydrogen_production*)

Tabel 2. 1 Metode Produksi Hidrogen

Source	Method	Reactions Process	TEMP.
Hydrocarbon	a. Mereformasi bahan bakar fosil (<i>steam reforming; natural gas, benzena, dsb</i>)	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2 + 191.7 \text{ kJ/mol}$	700-1100°C
	b. Karbon Monoksida	$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2 -40.4 \text{ kJ/mol}$	130°C

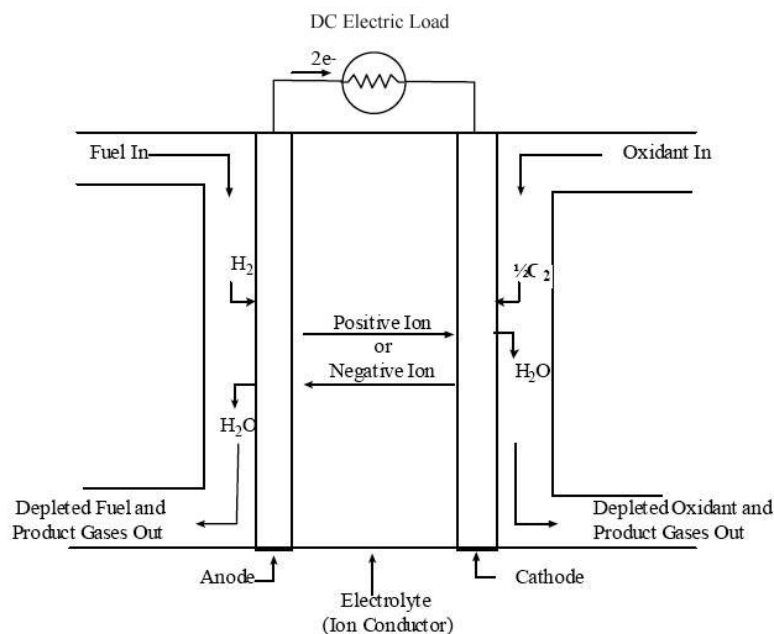
	c. Proses-Kvaerner	Karbon hitam & <i>hydrogen process</i>	
	d. Batu bara	Gasifikasi batu bara; Syngas dan metana	
	e. Fermentatif	Memakai bakteri dengan multi enzim (<i>dark fermentation reactions</i>)	
Air	a. Proses biologi	Dengan menggunakan alga	
	b. Dekomposisi air dengan gelombang radio	Dengan air garam; NaCl-H ₂ O, pada frekuensi 13.56 MHz	25°C
	c. Elektrolisis air 1. Elektrolisis tekanan tinggi 2. Elektrolisis suhu tinggi: - Nuklir - Biokatalis	Hidrogen bertekanan tinggi (120-200 Bar) memanfaatkan panas buang reactor using microbes, using microbial fc and aquatic plants	850-1000°C
	d. Suhu: 1. Konsentrasi pada suhu matahari	Menggunakan energi panas dari matahari	800-2200°C
	e. Produksi kimiawi	a) $Al + 3H_2O + NaOH \rightarrow NaAl(OH)_4 + 1.5H_2$ b) $NaAl(OH)_4 \xrightarrow{NaOH} Al(OH)_3 + 3H_2O$ $(3) Al + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 1.5H_2$	
	f. Produksi <i>thermochemical</i>	Cycles : Cerium (IV) oksida-cerium(III) (CeO ₂ /Ce ₂ O ₃) Siklus oksida besi (Fe ₃ O ₄ /FeO) Sulfur-iodin (S-I) Cerium-klorin (CeCl) , etc.	
	e. Fotoelektro-kimiawi dengan pemisahan air	Menggunakan listrik yang di hasilkan oleh PV sistem	
Metode lain	a. Nanoteknologi fotosintesis b. Biologi sintetis c. Teori <i>hydridic earth</i>		

2.2.2. Cara Kerja Teknologi *Fuel Cell*

Fuel cell adalah perangkat elektrokimia yang mengubah Hidrogen sebagai bahan bakar dan Oksigen sebagai *oxidant* melalui proses elektrokimia dalam reaktor *fuel cell* secara langsung menjadi energi listrik dan air sebagai limbah. Selanjutnya energi listrik tersebut dapat

dialirkan menjadi input tenaga untuk motor listrik DC yang dapat menggerakkan kendaraan listrik (*Fuel Cell Handbook (Sixth Edition)*, 2002).

Prinsip kerja *fuel cell* memiliki ciri khas dimana bahan bakar gas diumpankan terus menerus ke anoda (elektroda negatif) kemudian untuk oksidan (oksigen dari udara) diumpankan terus menerus ke katoda (elektroda positif), reaksi elektrokimia yang berlangsung di elektroda dapat menghasilkan arus listrik. Teknologi *Fuel cell* walaupun memiliki komponen dan karakteristik yang hampir mirip dengan baterai biasa namun terdapat beberapa hal yang berbeda. Baterai adalah alat penyimpan energi, energi maksimum yang tersedia ditentukan oleh jumlah reaktan kimia yang tersimpan di dalam baterai itu sendiri. Baterai akan berhenti menghasilkan energi listrik ketika reaktan kimia tersebut digunakan. Di sisi lain, teknologi *fuel cell* adalah perangkat konversi energi yang secara teoritis memiliki kemampuan menghasilkan energi listrik selama bahan bakar dan oksidan dipasok ke elektroda. Gambar 2.1, menunjukkan skema dan prinsip reaksi sel bahan bakar. Dari Gambar 2.1 dibawah, listrik DC yang dihasilkan dapat digunakan untuk semua beban DC, beban stasioner maupun dinamis seperti kendaraan listrik yang menggunakan motor listrik DC magnet permanen. Alih-alih menghasilkan listrik DC, teknologi *fuel cell* adalah teknologi yang hanya melepaskan emisi H₂O (air hangat) yang aman untuk lingkungan sekitar (Chandrasa, 2009).



Gambar 2. 1 Skema Prinsip dari Reaksi *Fuel cell* (*Fuel Cell Handbook (Sixth Edition)*, 2002)

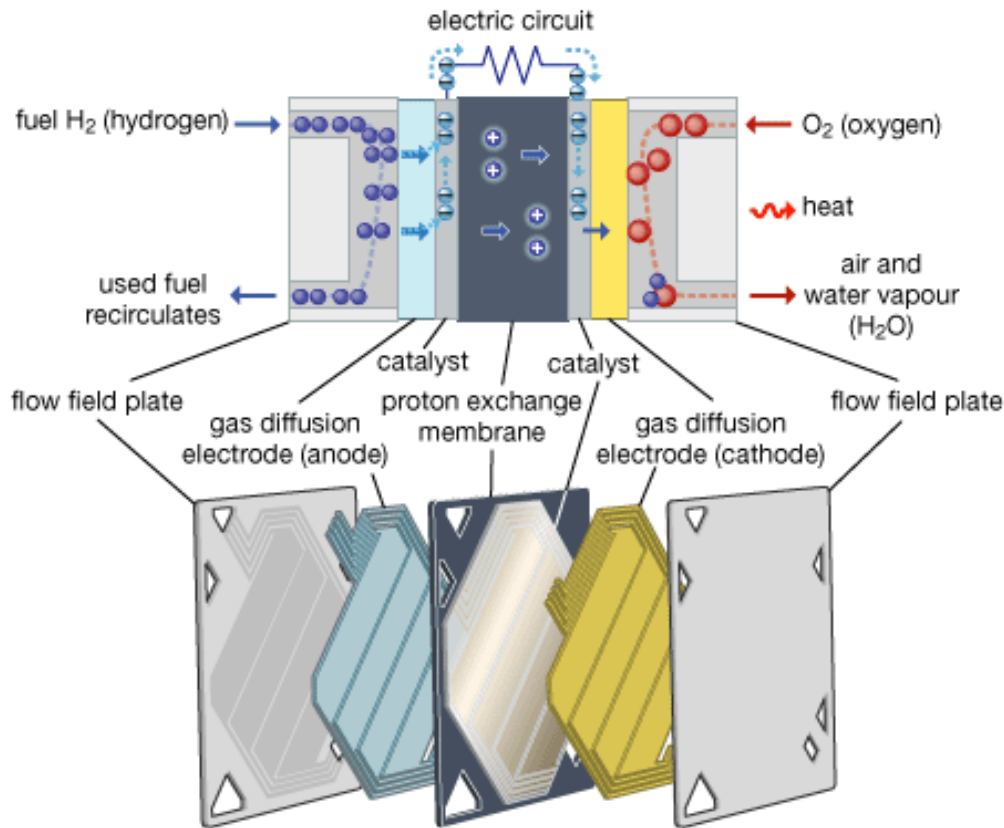
2.2.3. Teknologi PEM (*Proton Exchange Membrane*) pada *Fuel Cell*

2.2.3.1 Struktur PEM

Struktur fisik sel bahan bakar terdiri dari MEA (*Membrane Electrode Assembly*), pelat dengan saluran untuk gas reaksi yang dikenal sebagai FFP (*Flow Field Plate*) kadang-kadang bahkan disebut BP (*Bipolar Plates*) dan CM (*Cooling Medium*), serta Sealing dan pelat terminal dengan elektroda (EP – *End Plate*). MEA terdiri dari PEM (*Proton Exchange Membrane*), katalis dan elektroda (anoda dan katoda), tempat berlangsungnya reaksi kimia. PEM (elektrolit) dibentuk oleh bahan kaku setebal 50 - 200 μm kemudian ditutupi dengan lapisan katalis

(platinum dan nikel). Elektroda (kertas dengan serat karbon) berpori dapat memungkinkan transmisi gas reaksi, yaitu gas bahan bakar (misalnya hidrogen, metana) dan gas pengoksidasi (oksigen, udara) (Moldrik & Chvalek, 2011).

Pelat medan aliran terbuat dari grafit. Plat tersebut berfungsi untuk meminimalkan kontak gas antar membran. Media pendingin yang digunakan untuk keluaran yang lebih rendah (dalam beberapa kW) adalah udara disekitar. Unit *output* yang lebih tinggi memerlukan air yang didemineralisasi. Pelat ujung elektroda adalah pelat konduktif atas dasar baja. Gambar dibawah menunjukkan lapisan yang telah disederhanakan oleh diagram sel bahan bakar PEM (Larminie & Dicks, 2003).



Gambar 2. 2 Lapisan PEM (*Proton Exchange Membrane*) fuel cell (Larminie & Dicks, 2003)

Sebuah sel bahan bakar dilengkapi dengan pasokan simultan dari: bahan bakar gas (hidrogen dalam bentuk molekul H_2 di sisi anoda) dan zat pengoksidasi (oksigen dalam bentuk molekul O_2 atau udara pada sisi katoda). Kontak H_2 molekul hidrogen dengan katalis platinum menginduksi reaksi pada permukaan membran proton, sedangkan molekul hidrogen terurai ke atom individu H terlebih dahulu, untuk selanjutnya didegradasi menjadi H^+ (proton) dan e^- (elektron). Elektron tunduk pada eksternal beban listrik dan mereka diterima oleh atom oksigen pada sisi katoda untuk membentuk ion O_2^- , yang telah terbentuk pada degradasi O_2 molekul menggunakan katalis platinum (P. Moldřik et al., 2009).

Membran sel bahan bakar mampu mentransmisikan positif proton hidrogen hanya karena ini tertarik oleh ion oksigen pada sisi katoda. Setelah proton hidrogen lewat melalui membran, ada reaksi yang terjadi pada sisi katoda, yang terjadi antara H^+ hidrogen proton dan anion O_2^- oksigen. Sel bahan bakar tipe PEM menyediakan untuk reaksi kimia di bawah ini:

- Anode: $2 \text{H}_2 \Rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$
- Cathode: $\text{O}_2 + 4 \text{e}^- + 4 \text{H}^+ \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- Overall reaction: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Sel bahan bakar dapat dioperasikan dengan berbagai jenis bahan bakar dan gas pengoksidasi. Hidrogen telah dianggap yang terbaik dan juga bahan bakar yang efektif untuk waktu yang cukup lama, karena memiliki keunggulan sebagai reaktan dari proses elektrokimia dibandingkan dengan bahan bakar lainnya (hidrokarbon, alkohol). Bahkan jika sel bahan bakar bekerja dengan bahan bakar selain dari hidrogen (metana, metanol, etanol), dekomposisi bahan bakar menjadi hidrogen dan elemen lainnya terlebih dahulu. Oksigen adalah bahan bakar pengoksidasi dikarenakan kemampuan reaksi yang tinggi dan kandungan persentasenya di udara sangat banyak. bahan bakar PEM sel biasanya bekerja pada suhu mulai dari 70 hingga 90°C dan pada tekanan antara 1 – 2 bar (15 hingga 30 PSIG). Setiap sel mampu menghasilkan sekitar 1,1 V DC di udara terbuka. Berikut merupakan karakteristik untuk pemanfaatan PEMFC:

- Relatif cocok untuk mempertahankan kandungan tinggi karbon dioksida (dalam bahan bakar dan zat pengoksidasi), yang membuat mereka cocok untuk operasi menggunakan udara luar dan mereformasi bahan bakar.
- Dapat beroperasi di bawah suhu dan tekanan yang rendah sehingga mengurangi persyaratan untuk bahan yang digunakan, memungkinkan untuk cepat memulai dan meningkatkan keamanan proses.
- Menggunakan elektrolit padat kering, yang mengurangi korosi dan meningkatkan rentang hidup sel.
- Sensitif terhadap kandungan karbon monoksida dan senyawa belerang dalam bahan bakar.

2.2.3.2 Konsumsi Bahan Bakar dari PEM

Pada pembangkit listrik *fuel cell* gas hidrogen dan oksigen direaksikan pada suatu *fuel cell stack* jenis PEM (Proton Exchange Membran). Pembangkit listrik *fuel cell* jenis PEM menghasilkan listrik berdasarkan Reaksi Elektrokimia pada membrane/katalis antara input gas hidrogen dan oksigen.

Teknologi *fuel cell* terkini menggunakan oksigen yang dialirkan langsung dari udara, bersamaan dengan reaksi tersebut dihasilkan produk sampingan berupa uap air dan air panas. Hubungan reaksi ini berlaku untuk seluruh *stack* FC dan disebut daya operasi *stack* P_e (Watt); Tegangan masing-masing sel V_c (Volt). Formulasi hubungan reaksi ini untuk nilai stokiometri λ adalah sebagai berikut:

$$\text{Pemakaian udara} = 3,57 \times 10^{-7} \lambda (P_e / V_c) \text{ kg/detik}$$

$$\text{Pemakaian gas hidrogen} = 1,05 \times 10^{-8} (P_e / V_c) \text{ kg/detik}$$

$$\text{Air yang dihasilkan} = 9,34 \times 10^{-8} (P_e/V_c) \text{ kg/detik}$$

$$\text{Panas yang dihasilkan} = P_e \left(\frac{1,25}{V_c - 1} \right) \text{ Watt}$$

Adapun keluaran yang diinginkan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Daya yang diinginkan } Pe = (nV_c)(miA_c) \text{ Watt}$$

Dimana, n adalah jumlah sel per *stack*, m adalah jumlah *stack* yang digunakan, i adalah arus, dan A_c adalah luasan sel aktif. Tegangan operasional diberikan dengan termin-1 secara parantesis dan arus total diberikan pada termin ke – 2. Selama operasional tegangan sel akan turun sehubungan dengan naiknya arus yang ditarik beban (Chandrasa, 2013).

Hidrogen sebagai bahan bakar dari *fuel cell* itu sendiri bisa dihasilkan dari hasil reformasi bahan bakar gas alam yang secara komersial tersedia ataupun proses elektrolisa air. Elektrolisa air masih sangat mahal karena membutuhkan energi listrik yang besar, namun penelitian yang menggabungkan energi terbarukan sebagai sumber energi, dan teknik *stack* PEM *fuel cell*, diharapkan dalam waktu dekat dapat menurunkan harga hidrogen secara signifikan ke tahap komersialisasi (Friedland & Speranza, 2002).

2.2.3.3 Efisiensi dari PEM Fuel Cell

Efisiensi sel bahan bakar biasanya didefinisikan sebagai efisiensi reaksi elektrokimia. Nilai ini dapat ditentukan melalui proses pelepasan volume energi selama reaksi antara hidrogen dan oksigen menghasilkan yang menghasilkan air dapat digambarkan sebagai entalpi dari reaksi kimia (ΔH°). Nilai ini diukur dengan cara eksperimen dan tergantung pada kondisi produk yang dihasilkan dari reaksi tersebut, contohnya air yang dapat diproduksi baik dalam bentuk gas atau cair. Sejauh ini, air yang dihasilkan akan masuk dalam wujud gas dan selanjutnya entalpi reaksi dapat dihitung menggunakan rumus di bawah ini:

$$\Delta H^\circ = -242 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}_{\text{water}}} = -230 \frac{\text{BTU}}{\text{mol}_{\text{water}}} \quad (1)$$

di mana $\text{mol}_{\text{water}}$ mewakili 6.023.1023 molekul air dan BTU adalah Satuan Termal Inggris ($\text{BTU} = 1055,0592 \text{ J}$) (Moldřík & Šebesta, 2009).

Sisi negatif dari reaksi dalam sel bahan bakar adalah bahwa energi yang dilepaskan selama reaksi tidak akan diserap. Oleh karena itu proses tidak dapat memanfaatkan seluruh volume energi yang sesuai dengan entalpi reaksi untuk bekerja. Beberapa energi akan berkontribusi pada keseluruhan kekacauan di setiap ruang melalui peningkatan entropi yang dapat menyebabkan kerugian. Sisa energi ini dikenal sebagai energi bebas Gibbs (ΔG°). karakteristik air dalam bentuk gas (25°C ; 101.325 kPa), maka kita bisa menggunakan rumus:

$$\varepsilon_{\text{cell}} = - \frac{\Delta G^\circ}{n \times F} \quad (2)$$

Dimana $\varepsilon_{\text{cell}}$ mengacu pada tegangan di setiap sel yang terkait dengan energi bebas Gibbs. Nilainya dapat ditentukan dengan menggunakan rumus (3) dengan cara substitusi hubungan antara unit tertentu:

$$\varepsilon_{\text{cell}} = \frac{-229\text{kJ}}{\text{mol}_{\text{water}}} \cdot 1000 \frac{\text{J}}{\text{kJ}} \cdot \text{mol} \frac{e^-}{96500\text{C}} = 1,187\text{V} \quad (3)$$

Dimana n menunjukkan jumlah elektron yang terlibat dalam reaksi. Nilai yang paling tepat untuk menunjukkan bilangan ini adalah mol e^- , dimana setiap mol $e^- = 6.023.1023$ elektron. Mengingat reaksi anoda dan katoda, setiap molekul air dibentuk oleh dua elektron yang berikatan. Oleh karena itu $n = 2$ mol e^- untuk setiap mol air yang baru terbentuk. Nilai 96500 C/mol mewakili konstanta Faraday. Setiap sel bahan bakar kemudian dapat menghasilkan teoritis maksimum tegangan 1.187 V (25 °C; 101.325 kPa). Sel bahan bakar efisiensi secara sederhana dapat ditunjukkan sebagai rasio dari sebenarnya dihasilkan dan tegangan sel yang dapat dicapai secara teoritis:

$$\eta_{cell} = \frac{V_{real}}{\varepsilon_{cell}} \cong \frac{V_{real}}{1,187} \quad (4)$$

Tegangan khas dalam sel yang sebenarnya diukur pada beban daya per sel antara 0,5 V dan 0,6 V. *Off-load* tegangan mencapai nilai 1,1 V. Layanan tipikal efisiensi elektrokimia per sel berkisar antara 40% dan 50%. Efisiensi mencapai tingkat 90% dalam kasus dari tegangan *off-load* (Kordesch & Simader, 1996).

2.3 Kendaraan Listrik Ringan dengan Memanfaatkan Hidrogen - *Fuel Cell*

Dengan mencermati berbagai studi literatur dan perkembangan teknologi pada mobil listrik masa kini (Chih-Ming & Jheng-Cin, 2010; Clague et al., n.d.; Moawad et al., n.d.), banyak digunakan mesin listrik induksi atau bolak-balik (AC), beberapa dengan mobil-mobil listrik terdahulu yang banyak menggunakan mesin listrik DC (arus searah), sehingga pengaturan kecepatan dari sistem mobil listrik searah dari baterai diubah dahulu dengan inverter menjadi arus bolak-balik kemudian pengaturan frekuensi digunakan untuk mendaoat kecepatan mesin listrik yang diinginkan. Sebagai pengisi ulang baterai terdapat *on-board charging equipment* yang dapat menggunakan listrik rumah tangga, disamping itu secara opsional disediakan terminal pengisian ulang baterai untuk digunakan pada fasilitas *fast charging station* umum, ataupun degan menggunakan opsi *on-board fuel cell generator*. Gambar 2.2, memperlihatkan ilustrasi dari began suatu sistem mobil listrik, Gambar 2.3 juga memperlihatkan mobil *fuel cell* Mercedes di Jerman, dan Gambar 2.4 memperlihatkan foto suatu fasilitas umum pengisian ulang baterai di Pulau Jeju, Korea Selatan yang dikunjungi oleh penulis.

Secara individual pada mobil listrik *fuel cell* listrik yang dihasilkan juga dapat digunakan/disambungkan ke jaringan listrik rumah tangga (*grid*), dan secara ekenomi cukup menjajikan jika bahan bakar *fuel cell*nya menggunakan gas alam (Lipman et al., 2004).

Namun menurut suatu penelitian di USA, komersialisasi dari mobil listrik *fuel cell* ini masih belum jelas, karena menyangkut infrastruktur alat pengubah gas alam menjadi hidrogen untuk pengisian mandiri di rumah dan pasokan gas alam, yang harus dijain jika banyak penduduk yang menggunakan mobil ini.

2.4 Sistem Penyimpan Energi

Kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* adalah kendaraan yang memanfaatkan energi kimia yang tersimpan dalam baterai isi ulang (aki) karena adanya *surplus* daya yang kemudian disimpan kepada sistem penyimpanan energi tersebut, selain itu juga digunakan motor listrik menjadi penggerak kendaraan tersebut sebagai pengganti mesin pembakaran pada kendaraan konvensional (Kim et al., 2008). Kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* akan sangat efisien apabila sistem penyimpanan energinya dapat bekerja secara maksimum sebagai beban (ketika

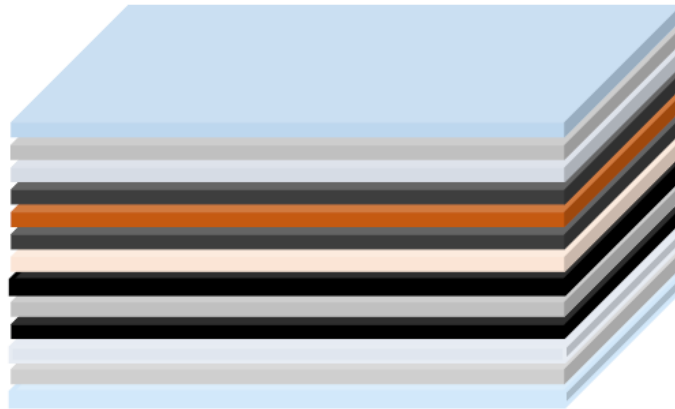
charging) atau pun sebagai generator energi listrik (saat *discharge*). Proses penelitian, produksi dan pengembangan kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* harus segera dilokalisasi dan sangat baik untuk penggunaan dalam jangka waktu yang lama, kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* harus memiliki mobilitas yang baik dan juga harus mendapatkan baterai terbaik agar efisiensi dan umur pemakaian dapat bertahan lama. Kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* termasuk inovasi yang paling awal dalam industry kendaraan. Kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* ini tidak menghasilkan asap seperti pada kendaraan berbahan bakar fosil pada umumnya, dan juga akan meminimalisir polusi apabila diisi dari sebagian besar bentuk dari energi terbarukan (Riezenman, 1995).

2.4.1 Hybrid Battery Powered Vehicle (Lithium Ion)

Akan tetapi kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* juga memiliki masalah dengan biaya baterai yang tidak ekonomis, keterbatasan jarak tempuh yang berhubungan sekali antara tempat pengisian ulang baterai, waktu pengisian, dan masa pakai baterai, yang membatasi penggunaan dari kendaraan listrik hidrogen *fuel cell*. Dimasa depan kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* terutama, akan sangat tergantung pada biaya dan ketersediaan baterai dengan kepadatan permintaan energi yang tinggi, padatnya daya keluaran dan juga cara agar umur pemakaian baterai dapat bertahan lama. Baterai jenis lithium merupakan jenis penyimpanan energi elektrokimia yang memiliki potensi tertinggi dan juga menjadi salah satu elemen paling ringan, yang membuat teknologi baterai lithium ini merupakan pilihan yang sangat tepat untuk digunakan sebagai sistem penyimpanan energi yang canggih (Riezenman, 1995). Baterai polimer lithium telah banyak dikembangkan baik dari segi kapasitas penyimpanan energi yang tinggi, memiliki bobot yang ringan, dan kemampuan mengalirkan arus yang tinggi, yang membuat baterai jenis lithium cocok untuk digunakan pada kendaraan listrik. Polimer litium baterai memiliki kepadatan energi yang cukup tinggi yang berfungsi untuk menghasilkan jangkauan lebih dari 250 mil dengan sekali pengisian daya dan waktu pengisian ulang yang sebanding dengan kendaraan konvensional (Davis, 1997).

2.4.2 Karakteristik Baterai Lithium Ion

Baterai lithium-ion dapat dianggap sebagai struktur baterai yang memiliki banyak lapisan (*multilayer*), struktur pelat berpori disusupi oleh elektrolit karena prinsip kerja dari baterai tersebut. Anoda, katoda dan lapisan yang berfungsi sebagai pemisah memiliki pori-pori untuk lithium-ion yang berfungsi sebagai penyisipan (deinterkalasi). *Multilayer* kaku berpori merupakan koneksi pada model baterai lithium-ion tunggal yang ditampilkan pada gambar 2. 3 Dimana gambar tersebut menunjukkan lapisan-lapisan yang terdapat pada lithium-ion baterai, lapisan-lapisan tersebut adalah lapisan nilon, aluminium foil, CPP (bahan polypropylene), anoda grafit, arus tembaga kolektor, anoda grafit, pemisah, katoda LiCoO, kolektor arus aluminium, katoda LiCoO, cpp, aluminium foil dan nilon (Linden & Reddy, 2002).



Gambar 2. 3 Lapisan Baterai Lithium Ion (Linden & Reddy, 2002)

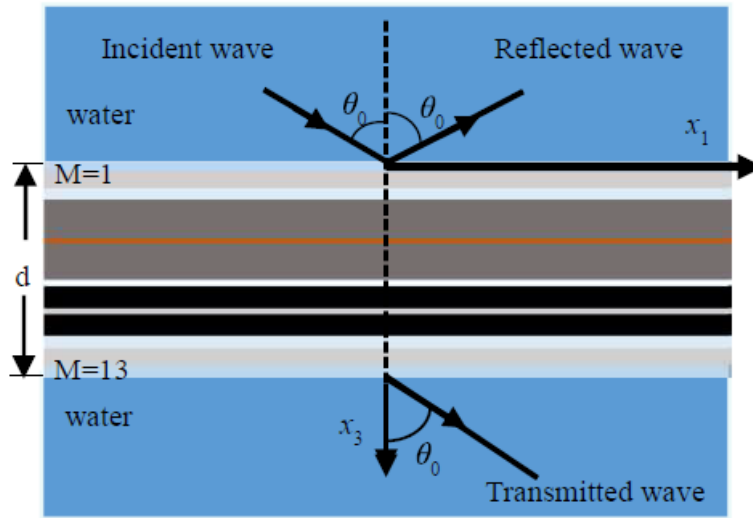
Diketahui dari referensi bahwa hanya porositas, modulus Young, densitas, dan ketebalan perubahan anoda dan katoda selama pengisian dan pemakaian baterai lithium-ion. Parameter dari setiap lapisan baterai lithium-ion yang dihasilkan adalah ditunjukkan pada Tabel 2. 2.

Tabel 2. 2 Parameter Lapisan Baterai

Material	Porositas	Rasio Poisson	Densitiy (g/cm³)	Modulus (10⁹ Pa)	Ketebalan (µm)
Nilon-1	0,0100	0.3909	1.1500	6.1689	25.0000
Nilon-2	0,0100	0.3300	2.7000	70.6765	40.0000
Nilon-3	0,0100	0.4584	0.9200	3.44420	40.0000
Anoda	0,1000- 0.4000	0.1880	1.5980- 1.6663	16.6103- 66.0787	77.0000
Copper	0,0100	0.3400	8.0000	10.7292	8.0000
Separator	0,3090	0.4584	0.9200	3.4442	15.0000
Katoda	0,0100	0.2034	3.6261- 3.7882	169.7927- 108.5120	57.0000
Aluminium	0,0100	0.3300	2.7000	70.6765	12.0000
Larutan elektrolit	-	-	1.2700	-	-

Dalam makalah ini, metode matriks transfer digunakan untuk memecahkan koefisien refleksi/transmisi dari struktur model baterai lithium-ion berpori multilayer. Oleh karena itu, model solusi teoritis untuk multilayer baterai lithium-ion berpori dalam perendaman air lingkungan didirikan (Wu & Zhang, 2015).

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2, lithium-ion berpori multilayer model baterai memiliki 13 lapisan dengan ketebalan total d , dan bagian atas dan bawah model berbentuk cair. Ketika gelombang ultrasonik datang pada pelat miring pada sudut 0 , mereka dipantulkan di antarmuka cair-padat dan menembus batas bawah dari model baterai lithium-ion (Qi et al., 2010).



Gambar 2. 4 Gambaran dari perhitungan kapasitas baterai (Qi et al., 2010)

Persamaan keseimbangan gerak kerangka padat dan fluida pori adalah sebagai berikut:

$$\sigma_{ij,j} = \rho_{11}\ddot{u}_i + \rho_{12}\ddot{U}_i + b(\ddot{u}_i - \ddot{U}_i) \quad (5)$$

$$S_{,i} = \rho_{12}\ddot{u}_i + \rho_{22}\ddot{U}_i - b(\ddot{u}_i - \ddot{U}_i) \quad (6)$$

Dimana $\sigma_{ij,j}$ adalah gaya padat rata-rata, s Fluida rata-rata tekanan dalam pori, b adalah koefisien disipasi dari medium, U dan u adalah perpindahan fase cair/padat dari dua fase media berpori, ρ_{11} adalah massa padat faktor, ρ_{22} adalah faktor massa fluida dan ρ_{12} adalah kualitas dari faktor kopling struktur fluida. Persamaan geometrisnya adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (7)$$

$$e = u_{i,i} \quad (8)$$

$$\varepsilon = U_{i,i} \quad (9)$$

Persamaan konstitutif linier (hubungan tegangan-regangan) kerangka padat dan fluida pori dalam teori Biot adalah:

$$\sigma_{ij} = 2N\zeta_{ij} + \delta_{ij}(Ae + Q\varepsilon) \quad (10)$$

$$s = Q\varepsilon + R\varepsilon \quad (11)$$

Dimana e dan ε adalah volume dari regangan dari bahan padat dan juga cair, secara persamaan, ζ_{ij} merupakan regangan dari bahan padat dan A, R, Q, N merupakan koefisien Biot elastis (Wang et al., 2021).

2.5 Power Electronic

2.5.1. Buck-Boost Converter

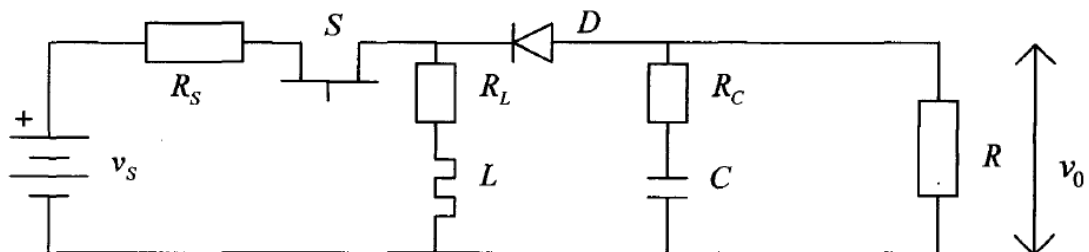
Kendaraan listrik merupakan alternatif yang menjanjikan untuk kendaraan mesin pembakaran internal konvensional untuk memerangi perubahan iklim, produksi besar-besaran Lithium baterai ion untuk kendaraan semacam itu menyebabkan tanah dan udara kontaminasi. Solusi untuk masalah ini adalah memiliki yang lain sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan adaptif di kendaraan elektrik. Sel bahan bakar sangat penting dalam hal ini urusan. Kendaraan listrik sel bahan bakar jauh lebih baik daripada internal kendaraan bermesin bakar karena tidak memiliki knalpot emisi dan ukuran baterai tambahan yang diperlukan di FCEV relatif lebih kecil (Chan, 2007).

Tegangan keluaran sel bahan bakar biasanya sekitar 1,16 V (Santi et al., 2002) yang tidak dapat langsung diterapkan ke bus DC listrik kendaraan yang membutuhkan 250-400V (Bauman & Kazerani, 2008; Kabalo et al., 2010). Oleh karena itu di dalam FCEV, di antara bus DC dan sumber sel bahan bakar ditempatkan sebuah konverter. Umumnya, konverter elektronika daya digunakan untuk FCEV harus memiliki karakteristik tertentu seperti:

- Efisiensi yang tinggi
- Riak arus yang lebih sedikit di sisi input
- *Voltage gain* yang lebih tinggi
- *Voltage stress* yang kecil pada peralatan semikonduktor

Dalam beberapa tahun terakhir kebutuhan untuk pengurangan biaya dan dengan demikian jumlah komponen dan sirkuit perlindungan di konverter DC/DC, sebagai bagian dari daya keseluruhan sistem pasokan, telah meningkat secara signifikan. Banyaknya topologi sirkuit baru dengan parameter sirkuit yang dioptimalkan telah diusulkan dan dalam beberapa kasus bahkan produktif. Semua ini telah meningkatkan minat untuk teknik simulasi yang lebih akurat yang dapat menangani sinyal yang tidak selalu linier dan cukup kecil untuk memungkinkan aplikasi langsung dari model simulasi yang ada seperti yang biasa digunakan pendekatan rata-rata ruang-negara. Dalam makalah ini kami meninjau hasil yang paling penting dari perlakuan analitik yang tepat dari konverter DC/DC buck-boost (Dalarsson, 1998).

Berikut merupakan diagram rangkaian untuk buck-boost DC/DC konverter, dengan sumber disipatif ditunjukkan oleh Gambar 2. 5



Gambar 2. 5 Pemodelan rangkain *buck boost converter* (Dalarsson, 1998)

Konverter DC-DC biasanya digunakan untuk mentransfer DC tegangan dari satu varietas ke varietas lain di mana input tegangan diambil oleh sumber tegangan yang berbeda. Konverter ini adalah sistem dinamis nonlinier dan waktu bervariasi di mana tingkat daya bervariasi dari sangat rendah hingga signifikan tinggi (Dancy et al., 2000). Karena variasi

tegangan elektronik yang berbeda perangkat misalnya IC, konverter menjadi kebutuhan untuk memberikan tegangan yang tepat untuk setiap perangkat (Chomsuwan et al., 2002).

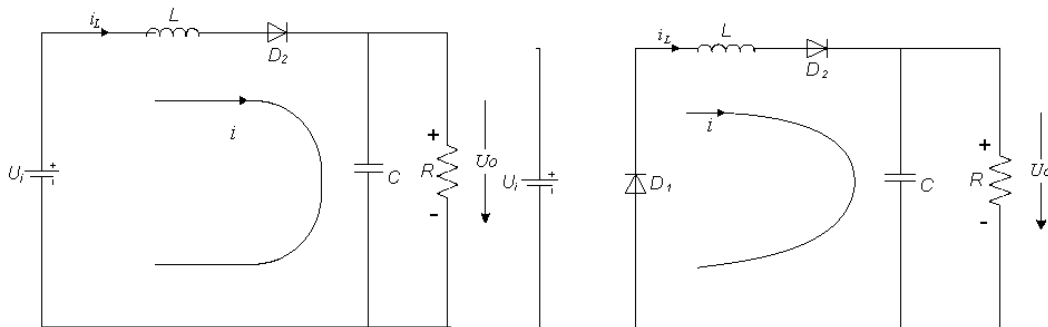
Saat ini, ada berbagai jenis DC-DC konverter tersedia mulai dari konverter *buck-boost* konvensional hingga berbagai macam topologi baru lainnya yang dikembangkan. Diantara berbagai macam topologi yang tersedia, konverter *buck-boost* konvensional memiliki harga yang relatif lebih murah, akan tetapi efisiensi yang dihasilkan kecil dan *gain* tegangan rendah dan juga, konverter *buck-boost* konvensional menghasilkan tegangan keluaran yang negatif (Sreekumar & Jiji, 2021).

2.5.1.1 Mode *Buck* pada Konverter

Konverter dapat beroperasi sebagai *buck* ketika IGBT (*Isolated Gate Bipolar*) K_2 menurunkan umpan balik yang diterima baik itu sinyal tegangan, arus yang kemudian juga akan berpengaruh pada daya keluaran yang dihasilkan oleh konverter. Dibandingkan dengan konverter *buck* tradisional, konverter berjenjang *buck-boost* memiliki satu lagi dioda D_2 saat dalam mode *buck*. Rangkaian ekuivalen diilustrasikan pada Gambar 2. 6 Dalam kondisi CCM (*Continuous Conduction Mode*), rasio konversi tegangan adalah:

$$\frac{U_o}{U_i} = \alpha \quad (12)$$

Dimana U_o merupakan tegangan keluaran dari konverter, U_i merupakan tegangan input dari sumber yang masuk ke konverter, α merupakan nilai *duty cycle* dari K_1 (Sreekumar & Jiji, 2021).



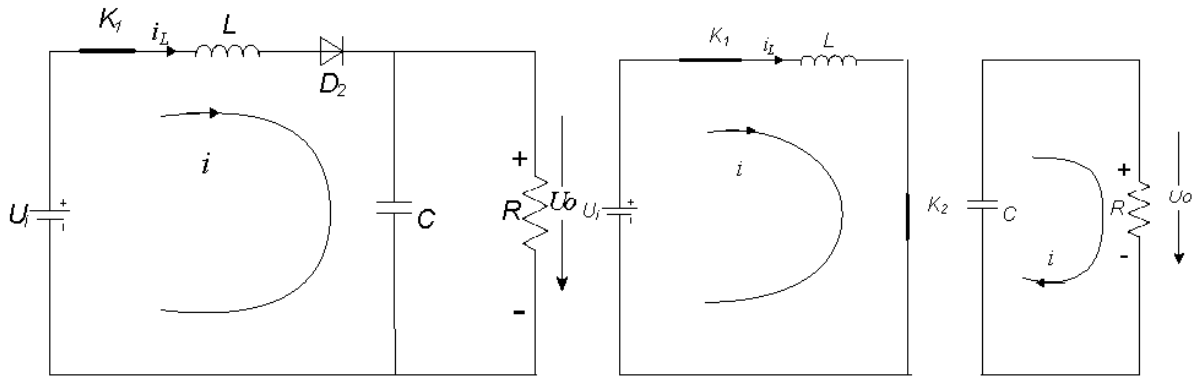
Gambar 2. 6 Mode *buck* converter (Sreekumar & Jiji, 2021)

2.5.1.2 Mode *Boost* pada Konverter

Ketika IGBT K_1 tetap menyala, konverter dioperasikan dalam mode boost. Selalu ada satu lagi IGBT yang disimpan, dibandingkan dengan konverter boost. Rangkaian ekuivalen diilustrasikan pada gambar. 4. Pada kondisi CCM, rasio konversi tegangan adalah:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1-\beta} \quad (13)$$

Dimana β merupakan nilai *duty cycle* dari IGBT K_2 . Gambar dibawah menunjukkan bagaimana aliran arus ketika konverter bekerja dalam mode *boost*:



Gambar 2. 7 Mode *boost converter* (Sreekumar & Jiji, 2021)

Meskipun konverter ini berlapis, *buck-boost* memiliki satu set IGBT dan dioda lebih banyak daripada konverter *buck-boost* konvensional, konverter ini memiliki polaritas tegangan output yang tidak terbalik. Ketika bekerja dalam mode *buck*, permasalahan arus yang akan memasuki C_2 bisa diselesaikan. Selanjutnya, hanya menggunakan satu induktor membuatnya berukuran lebih kecil (Sreekumar & Jiji, 2021).

2.5.1.3 Frekuensi Operasi Konverter

Faktanya, adalah baik untuk mengurangi riak dari tegangan dan arus keluaran maupun ukuran rugi daya dari elemen magnetik dengan cara meningkatkan frekuensi switching. Hal ini pada akhirnya akan mengurangi ukuran dan berat konverter dimana kedua hal tersebut dapat memberikan efisiensi yang baik dalam segi ruang maupun daya yang dibutuhkan. Selain itu, untuk membuat sistem lebih andal dan komponennya lebih sedikit, ada baiknya menggunakan metode PWM dengan tipe *hard switch*. Namun hal ini akan membatasi frekuensi tinggi yang akan digunakan, hal ini dikarenakan rugi-rugi pensaklaran akan meningkat seiring dengan meningkatnya frekuensi pensaklaran. Semakin jauh frekuensi dari *audio*, akan semakin sedikit *noise* mekanisnya. Berdasarkan konverter *buck* yang berhasil digunakan dalam sel bahan bakar kendaraan listrik, frekuensi dipilih menjadi 15 kHz (Xu et al., 2003).

2.5.1.4 Perhitungan Nilai Kapasitor

Kondisi terburuk dari konverter ini yang mempengaruhi riak tegangan *output* adalah dalam mode *boost*. Hal tersebut dapat terjadi karena ketika K_2 menyala, tegangan keluaran hanya disimpan oleh kapasitor C_2 . Untuk mendapatkan lebih sedikit riak tegangan, nilai C_2 yang lebih besar dapat mengurangi riak tegangan *output* secara signifikan. Berikut perumusan nilai kapasitor dari konverter tipe *buck-boost*:

$$C = \frac{\alpha \times P_o}{f_s \times \Delta U_o \times U_o} \quad (14)$$

Dimana ΔU_o merupakan riak tegangan (Zhansong & Xuansan, 2005).

2.5.1.5 Perhitungan Nilai Induktor

Arus induktor memiliki dua mode operasi: mode konduksi kontinu dan mode konduksi terputus-putus. Mode terputus-putus harus dihindari sebisa mungkin karena lonjakan arus yang

besar pada IGBT dan dioda. Hanya ada satu induktor dalam konverter bertingkat buck-boost, jadi kami harus menjamin induktor akan dioperasikan dalam mode kontinu dalam kondisi terburuk. IGBT K1 memiliki rasio tugas terkecil pada rumus dibawah:

$$L_{buck} = \frac{U_o^2}{2P_o f_s} (1 - \alpha) \quad (15)$$

$$L_{boost} = \frac{U_o^2}{2P_o f_s} \beta (1 - \beta) \quad (16)$$

Dimana U_o merupakan tegangan *output*, P_o merupakan daya *output*, f_s merupakan frekuensi *switch*. α merupakan nilai *duty cycle* dari K_1 sedangkan β merupakan nilai *duty cycle* dari K_2 dan biasanya memiliki nilai paling besar dari kondisi *buck* (Zhansong & Xuansan, 2005).

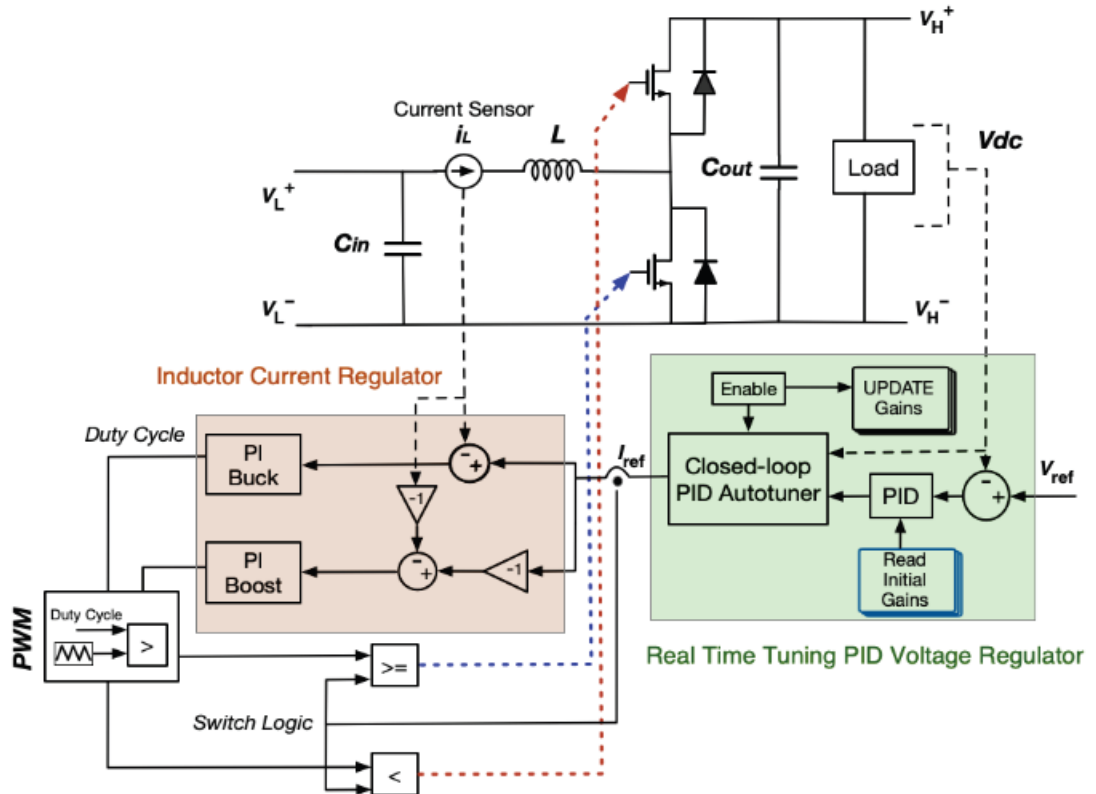
2.5.2. PID Controller

Satu set proporsional-integral-derivatif (PID) yang bisa diterapkan parameter dan model sistem yang akurat harus dikembangkan untuk merancang pengontrol untuk konverter DC-DC. Sejak proses penyetelan bisa menjadi tugas yang memakan waktu dan sulit, auto-tuning telah banyak digunakan dalam aplikasi industri. Meskipun perkembangan pesat dalam teknologi kontrol, fungsionalitasnya pengontrol tetap tidak berubah, terutama penerapan teknik PID standar. Pengendali saat ini sedang melalui fase penting dari evolusi, di mana fitur-fitur seperti adaptasi, penyetelan otomatis, dan penjadwalan perolehan adalah bagian dari sistem. Namun, termasuk fitur tersebut pada aplikasi daya menantang karena stabilitas sistem dan kesulitan dalam implementasi praktis. Autotuner canggih yang disajikan dalam pekerjaan ini optimal dalam pengertian ini bahwa itu tidak sensitif terhadap perkiraan desain dan nilai parasit dari komponen tahap daya. Selain itu, terlepas dari input sistem, seperti input tegangan (saluran) atau gangguan beban, tidak diperlukan penyetelan lebih lanjut untuk simulasi atau implementasi perangkat keras yang mencakup loop penyetelan otomatis waktu nyata. Hasilnya menunjukkan efektivitas pengontrol kaskade yang disajikan berdasarkan autotuner loop tertutup (Krakow & Lin, 1995; Pinnella et al., 1986).

2.5.2.1 Desain PID Controller

Diagram pengontrol yang akan digunakan ditunjukkan pada Gambar 2. 8 *loop* yang berada diluar rangkaian berfungsi untuk mengatur tegangan *output* dengan mode *loop* tertutup secara *real time* pada pengontrol PID. Kontroler PID *loop* tertutup menyuntikka sinyal gangguan sinusoidal dan mengukur sinyal keluaran hasil percobaan dari *loop* tertutup. Struktur *loop* tertutup ini kemudian, akan memastikan bahwa sistm dapat berjalan mendekati operasi titik nominalnya dengan cara menekan keluar sinyal gangguan. Arus induktor mengatur keluarannya arus dengan mengacu pada *output* sinyal dari pengontrol tegangan. Dua pengontrol PI yang berbeda merupakan pengontrol untuk konverter untuk mode *buck* dan *boost*, di mana sinyal PWM berfungsi untuk menciptakan dengan frekuensi 20KHz. Kemudian untuk *logic switch cotroller* bekerja berdasarkan arus yang diekstraksi atau disuntikkan dari/ke konverter, sedangkan tegangan DC secara bersamaan dipantau untuk melacak nilai dari tegangan referensinya. Oleh karena itu, strategi pengendalian berbasis pada referensi saat ini dapat secara otomatis mendeteksi mode operasi yang diperlukan, apakah diperlukan mode *buck* ataupun mode *boost*. Selain itu, pengontrol saat ini mudah untuk diimplementasikan karena hanya

sensor tegangan dan sensor arus diperlukan untuk mengukur tegangan kapasitor dan arus induktor masing-masing, maka nilai yang presisi dari sebuah induktor dan kapasitor tidak terlalu berpengaruh besar terhadap kerja dari konverter (Rezaei & Mehran, 2019).



Gambar 2. 8 Diagram alir PID controller (Rezaei & Mehran, 2019)

Terdapat suatu batasan pada desain untuk kompensasi *loop* dan frekuensi *crossover* pada *Closed PID Loop Controller* untuk boost konverter adalah *right-half-plane* (RHP) nol. Ketika dorongan sakelar konverter dihidupkan untuk waktu yang lama, akibatnya induktor dapat terputus dari beban untuk waktu yang lama pula, kemudian dapat berimbas pada penurunan tegangan *output* di transien awal, meskipun *control command* sedang mencoba untuk menaikkan tegangan tersebut. Selanjutnya untuk mengatasi masalah ini, *bandwidth* dari *loop* harus dibatasi hingga jauh lebih kecil dari frekuensi RHP nol untuk menstabilkan sistem dengan agar dapat bekerja benar, dan juga agar dapat merespon langsung kepada *control comand* (Dey & Mudi, 2009; Lee & Management, 2014).

$$f_{RHP} = \frac{R_{load} - (1 - D_{max})}{2\pi L} \quad (17)$$

Oleh karena itu, masalah kontrol tegangan keluaran adalah diubah menjadi kontrol arus induktor dalam tujuan pengontrol. Ada beberapa manfaat dari implementasi ini, yang pertama, seperti yang ditunjukkan pada (Alvarez-Ramirez & Espinosa-Pã Erez, 2002), kontrol mode saat ini dapat menghasilkan stabilitas semiglobal dengan regulasi asimtotik dari tegangan output dalam konverter *boost*. Kedua, hal tersebut juga dapat meningkatkan ketahanan dan juga respon dinamis dari konverter DC-DC (Rezaei & Mehran, 2020).

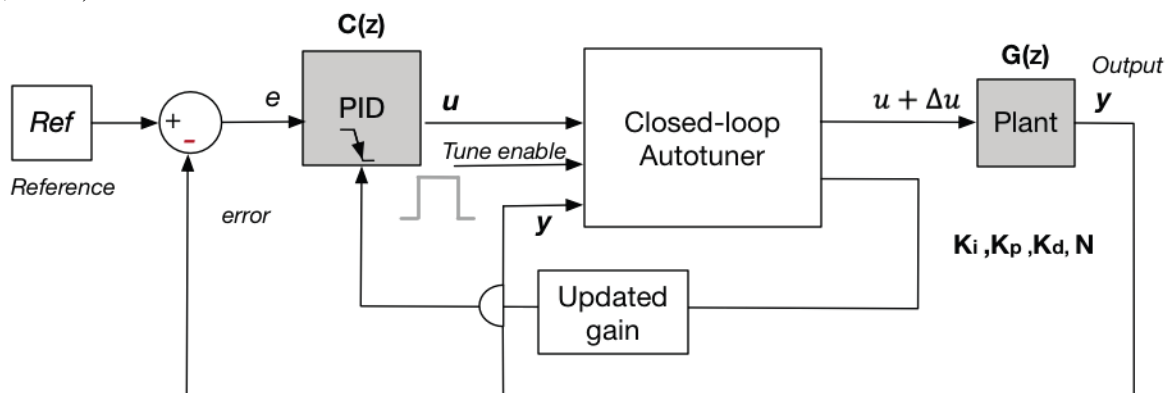
2.5.2.2 Persamaan Matematis PID Controller

Fungsi alih kontroler PID diskrit dengan turunan derivatif filter berdasarkan metode Forward Euler adalah sebagai berikut:

$$G(z) = K_p + K_i T_s \frac{1}{z-1} + K_d \frac{1}{N + \frac{T_s}{z-1}} \quad (18)$$

dimana T_s adalah waktu sampel pengontrol, K_p adalah proporsional *gain*, K_i adalah *gain* integral, K_d adalah *gain* turunan dan N adalah istilah filter. *Output* blok adalah jumlah yang terukur dari sinyal input sementara pada kutub orde pertama yang berfungsi untuk menyaring aksi turunan (DEY et al., 2009).

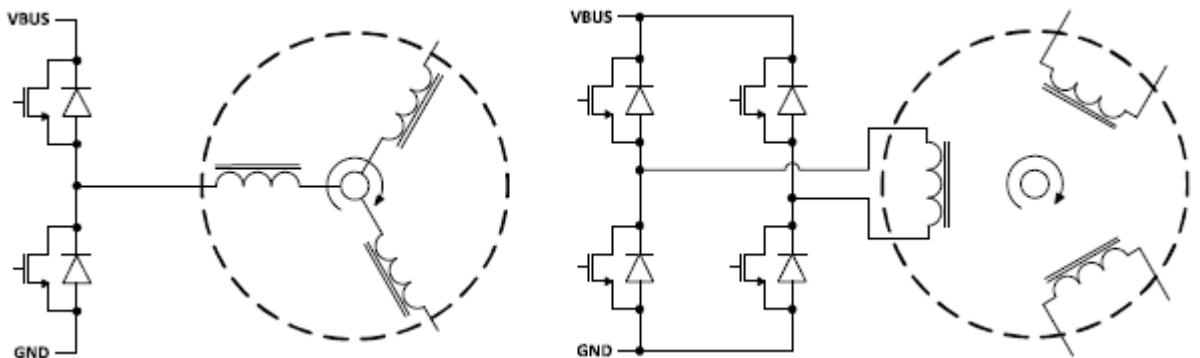
Autotuner PID bekerja dengan melakukan respons berupa sinyal frekuensi pada percobaan estimasi. Di awal penyetelan otomatis proses, sinyal uji dilakukan uji coba kepada sistem untuk mendapatkan data sistem. Pada akhirnya, respon frekuensi *real-time* dari sistem pada beberapa frekuensi di sekitar bandwidth target untuk penyetelan diperkirakan berdasarkan pengamatan *input* proses dan keluaran. Oleh karena itu, model proses dapat dihitung dengan menyesuaikan parameter untuk data *input* dan *output* yang diamati. Parameter tersebut dapat dipasangkan kepada model tertentu yang telah diberi parameter atau dapat juga terhadap model yang lebih umum jika tidak memungkinkan untuk mendefinisikan sistem berdasarkan prinsip-prinsip fisik (Chander et al., 2010). Hal tersebut merupakan beberapa keuntungan dari metode auto-tuner dimana bahwasanya semua jenis *input* dan *output* data dapat digunakan, meskipun beban komputasinya masih besar. Masalah utamanya adalah menemukan fitur yang sesuai yang menjadi ciri khas dari peralatan yang relevan untuk mendesain sistem *loop* tertutup berdasarkan data masukan-keluaran. Parameter dihitung secara rekursif dan kemudian untuk parameter pengontrol melakukan pembaharuan ketika nilai parameter baru diperoleh. Di akhir eksperimen, PID yang diperbarui keuntungannya dihitung berdasarkan perkiraan respons frekuensi dan kemudian *gain* yang disetel ditransfer ke pengontrol PID, memungkinkan kinerja *loop* tertutup secara *real-time*. Objektif dari algoritma ini adalah untuk menyeimbangkan kinerja dan ketahanan sembari menyesuaikan *bandwidth* kontrol dan *phase margin*. Dibawah ini merupakan gambar blok diagram dari *on-line closed loop autotuner* (Chander et al., 2010; DEY et al., 2009):



Gambar 2. 9 Diagram alir kerja PID (Chander et al., 2010; DEY et al., 2009)

2.6 Topologi 6 Sambungan Switch dari Inverter 3 Fasa

Menggunakan tiga setengah jembatan untuk menggerakkan tiga fase, tiga kabel motor adalah topologi standar di seluruh industri (lihat Gambar 2. 10). Satu sakelar sisi tinggi dan satu sakelar sisi rendah dari yang berbeda kaki ditutup setiap siklus. Tegangan input dibagi antara dua belitan fasa yang menghubungkan dua sakelar. Amplitudo tegangan yang diterapkan pada belitan ini menentukan kecepatan putaran, sedangkan arus yang mengalir melalui menentukan torsi diterapkan oleh rotor. Ini skema pergantian umumnya disebut kontrol trapesium. Kontrol berorientasi sinusoidal dan medan lebih kompleks skema pergantian yang menjaga semua belitan tiga fase diberi energi saat memodulasi arus fasa ke referensi sinusoid untuk mengurangi riak torsi dan lebih meningkatkan dinamika tanggapan. Namun, karena pembangunan tiga fase Motor BLDC yang biasanya memiliki konfigurasi tiga kawat, amplitudo tegangan yang diberikan dalam belitan fasa adalah terbatas pada setengah dari tegangan input. Menghapus yang umum simpul menghasilkan tiga gulungan fase terisolasi yang dapat digerakkan dengan jembatan penuh (lihat Gambar 2. 10). Karena belitan fase sekarang tereksitasi secara terpisah oleh jembatan penuh, amplitudo yang diterapkan tegangan dapat mencapai level tegangan input (Michal, 2016). Operasi penuh jembatan untuk mengikuti penggerak gelombang sinus tiga tingkat yang dimodifikasi alih-alih drive gelombang persegi dua tingkat yang dihasilkan oleh setengah jembatan juga mengurangi konten harmonik secara efektif menghilangkan harmonik ketiga dan kelipatannya (Hahn, 2006).



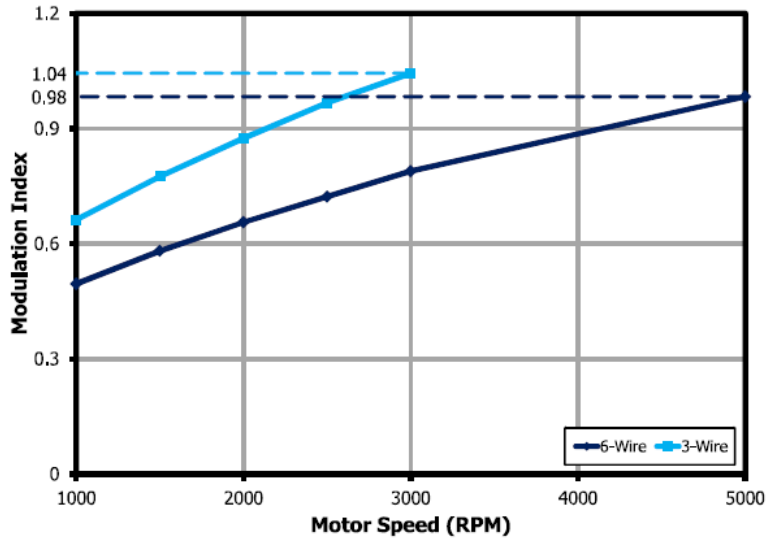
Gambar 2. 10 Proses perangkaian inverter dengan motor (Hahn, 2006)

2.6.1 Indeks Modulasi

Three-Phase, Six-Wires (3P6W) inverter merupakan topologi yang akan diimplementasikan menggunakan rangkaian yang bersifat *full bridge* dan bidang yang dimodifikasi oleh kontrol inverter berorientasi terhadap komponen yang dirangkai khusus untuk BLDC *six wire* motor. Topologi *full bridge* memungkinkan amplitudo tegangan yang diberikan untuk mencapai level tegangan *input* yang diharapkan sehingga meningkatkan rentang kecepatan operasi. Hal ini diilustrasikan oleh mengukur indeks modulasi, m_A , yang merupakan rasio puncak tegangan fasa dan tegangan input yang diterapkan melintasi sambunga, berikut merupakan persamaan indeks modulasi dari *full bridge* inverter:

$$m_A = \frac{\sqrt{2} \times V_{PHASE,RMS}}{V_{BUS}} \quad (19)$$

Menggunakan rem histeresis, kondisi torsi konstan 0,48 Newton-meter diterapkan pada poros motor. 3P3W platform mencapai indeks modulasi 1,04 sedangkan 3P6W platform dioperasikan dengan indeks modulasi 0,79 pada nilai kecepatan operasional motor 3000 putaran/menit (lihat Gambar 2). Pada torsi dan kecepatan terukur, desain 3P6W meningkatkan indeks modulasi hingga 25%. Meningkatkan kecepatan menjadi 5000 putaran/menit, platform 3P6W mencapai modulasi maksimum indeks 0,98 (Macahig, 2020).



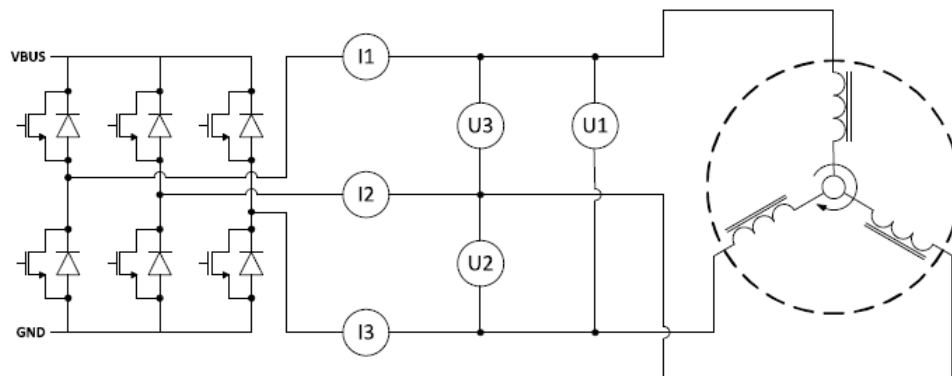
Gambar 2. 11 Efisiensi *three-phase, six-wire inverter* (Macahig, 2020)

2.6.2 Inverter, Motor dan Efisiensi Sistem

Efisiensi diukur sebagai fungsi dari keluaran motor kekuasaan. Kecepatan poros diukur menggunakan tachometer optic sedangkan torsi yang diterapkan diukur menggunakan sensor torsi. Daya keluaran motor divariasikan dengan mengurangi torsi yang diterapkan melalui rem histeris yang digabungkan ke poros motor. Pengoperasian kecepatan berada pada 3000 putaran/menit dan konstan selama keseluruhan pengujian. Efisiensi inverter didefinisikan sebagai rasio daya keluaran inverter dan daya masukan inverter (2). Motor efisiensi dihitung sebagai rasio daya keluaran motor dan daya keluaran inverter (3). Daya keluaran inverter adalah diperoleh dengan menggunakan metode tiga wattmeter untuk 3P3W konfigurasi (lihat Gambar 3). Karena fase motor adalah independen dalam konfigurasi 3P6W, daya diukur oleh wattmeter tunggal yang terhubung pada masing-masing fase motor gulungan.

$$\eta_{inverter} = \frac{P_{out\ inverter}}{P_{in\ inverter}} \quad (20)$$

$$\eta_{motor} = \frac{P_{out\ motor}}{P_{in\ motor}} \quad (21)$$



Gambar 2. 12 *Three-phases, six-wires inverter dengan topologi full bridge* (Macahig, 2020)

2.7 Motor BLDC 1000 Watt

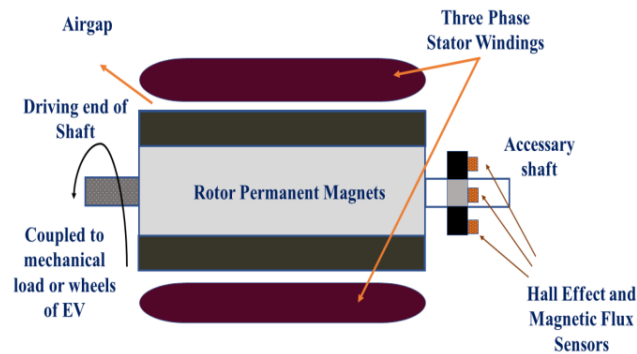
Aplikasi penggerak kecepatan tinggi banyak digunakan untuk aplikasi didalam mesin-mesin industri. Mesin listrik khusus seperti motor sinkron tipe Magnet Permanen yang terutama diklasifikasikan sebagai motor Arus Langsung Brushless (BLDC) dan Motor Sinkron Magnet Permanen (PMSM) banyak digunakan untuk mendapatkan kinerja dinamis dengan efisiensi yang tinggi dari operasi penggerak kecepatan (Toliat et al., 2012). Perbedaan antara motor PMSM dan BLDC adalah yang pertama memiliki back-EMF sinusoidal sedangkan untuk tipe motor BLDC menghasilkan gelombang-persegi (tipe trapesium) back-EMF (Anderson, 1995).

Proliferasi tinggi motor sinkron tipe PM dalam aplikasi industri telah menyebabkan operasi ekstensif mesin dapat digunakan untuk jangka waktu yang lebih lama. Selama operasi pembebanan motor yang dilakukan secara terus menerus, maka motor ini mengalami tekanan yang berasal dari keadaan lingkungan sekitar, pengaruh seara fisik maupun secara termal yang dapat menyebabkan utilitas motor semakin menurun (Hendershot & Miller, 1994). Kesalahan dapat terjadi pada belitan stator atau pada Magnet Permanen (PM) dari rotor mesin, yang dapat bermanifestasi menjadi besaran listrik seperti arus dan/atau tegangan, besaran magnetik seperti kerapatan fluks dan karakteristik termal mesin yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan total pada sistem (Usman & Rajpurohit, n.d.). Jenis dan klasifikasi kesalahan diilustrasikan secara komprehensif dimana metodologi yang diusulkan dengan tujuan menguraikan teknik yang akan diadopsi saat memodelkan kesalahan (Usman & Rajpurohit, 2020).

2.7.1 Permanent Magnet type Synchronous Motor

Motor sinkron tipe Permanent Magnet (PM) memiliki PM pada rotor dan belitan tiga fasa pada stator seperti yang ditunjukkan melalui skema yang diberikan pada Gambar 2. 13. Mereka kebanyakan dikategorikan berdasarkan bentuk belakang motor-EMF. Untuk EMF balik trapesium atau gelombang persegi, motornya disebut motor Brushless Direct Current (BLDC) sedangkan untuk EMF balik sinusoidal, motornya disebut Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) (Basak et al., 2006). Padahal kedua motor memiliki PM pada rotor. Bentuk back-EMF ditentukan oleh bentuk magnet rotor dan distribusi belitan stator. Distribusi belitan umumnya terkonsentrasi untuk motor BLDC dan didistribusikan untuk PMSM seperti yang diberikan pada Gambar 2. 14. Selain itu, terminal tiga fasa motor disuplai dengan arus kuasi-kuadrat sedangkan PMSM membutuhkan arus fasa sinusoidal untuk eksitasi. Itu konfigurasi

rotor dapat berupa rotor dalam atau rotor luar tipe yang memiliki Surface Mounted PM (SPM) atau Interior PM (IPM)(Usman & Rajpurohit, 2020).



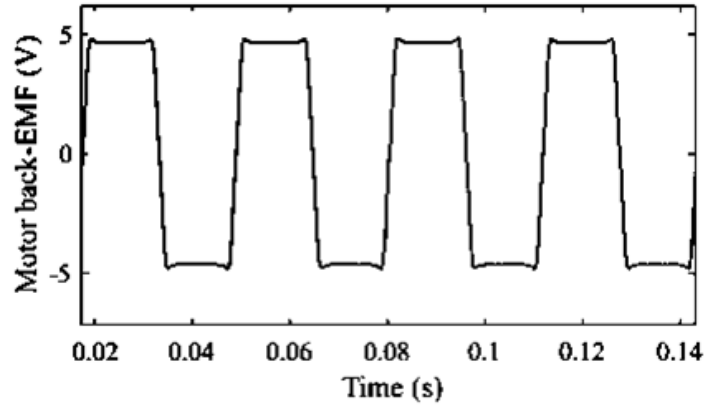
Gambar 2. 13 Pemodelan Motor BLDC (Usman & Rajpurohit, 2020)



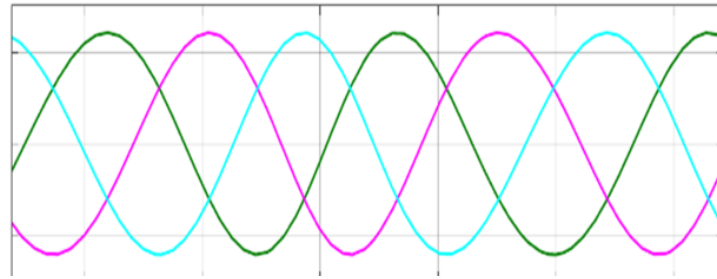
Gambar 2. 14 Belitan pada stator (Usman & Rajpurohit, 2020)

Motor sinkron PM tanpa sikat banyak digunakan pada berbagai aplikasi industri karena kekompakannya, tinggi efisiensi, kepadatan torsi tinggi dan kinerja dinamis tinggi (de Doncker, 2009). Aplikasi umum terdaftar sebagai berikut:

- Aplikasi Otomasi dan Industri (kepadatan torsi tinggi)
- *Disk drives* komputer (aplikasi servo)
- Pesawat (torsi yang tinggi dengan perbandingan berat)
- Aplikasi *direct-driven whell* (kapabilitas flux yang tinggi)
- Aplikasi dalam dunia medi (tidak bisung)
- Kendaraan listrik



Gambar 2. 15 Bentuk sinyal *Motor back-EMF* (Usman & Rajpurohit, 2020)



Gambar 2. 16 Karakteristik arus pada *Motor back-EMF* (Usman & Rajpurohit, 2020)

bentuk PMs rotor dan jenis belitan stator. Motor back-EMF umumnya diatur melalui perhitungan matematis seperti yang diberikan pada persamaan dibawah (1)-(3).

$$v_s = R_s i_s + (L - M) \left(\frac{di_a}{dt} \right) + \left(\frac{d\lambda_{PM,S}}{dt} \right) \quad (22)$$

v_s adalah tegangan fasa, i_s adalah arus fasa stator $\lambda_{PM,S}$ adalah fluks yang berhubungan dengan PM.

$$L_s = L - M \quad (23)$$

di mana L adalah induktansi diri sementara M adalah *mutual* induktansi antara dua belitan. Kemudian e_a, e_b, e_c adalah back-EMF hasil *output* dari PM dinyatakan dalam persamaan dibawah ini

$$e_a = \frac{K_e}{2} \omega_m F \quad \text{untuk fasa A} \quad (24)$$

$$e_a = \frac{d\varphi_a}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} \frac{d\varphi_a}{d\theta_r} = \omega_m \frac{d\varphi_a}{d\theta_r} \quad (25)$$

di mana K_e adalah konstanta back-EMF, $d\theta_r$ adalah sudut listrik rotor, adalah ω_m kecepatan mekanik, $d\varphi_a$ adalah hubungan fluks stator pada belitan fase-A dan $F(\theta_e)$ adalah

fungsi referensi *back*-EMF. Diferensiasi motor dari hasil *back*-EMF menghasilkan *magnetic airgap* dengan kerapatan fluks B_g diberikan melalui persamaan dibawah:

$$B_g = \frac{B_r}{1 + \frac{g}{h_m}} \quad (26)$$

Dimana B_r adalah kerapatan fluks residu PMS, g adalah panjang celah udara dan h_m adalah ketebalan dari masing-masing magnet. Motor dengan *back*-EMF dan kerapatan fluks magnet radial harus digunakan sebagai tanda dari diagnosa saat terjadi kesalahan saat mesin dalam kondisi operasi (pada aplikasi EV) (Usman & Rajpurohit, 2020).

BAB III PEMODELAN SISTEM, KONTROL DAN SIMULASI

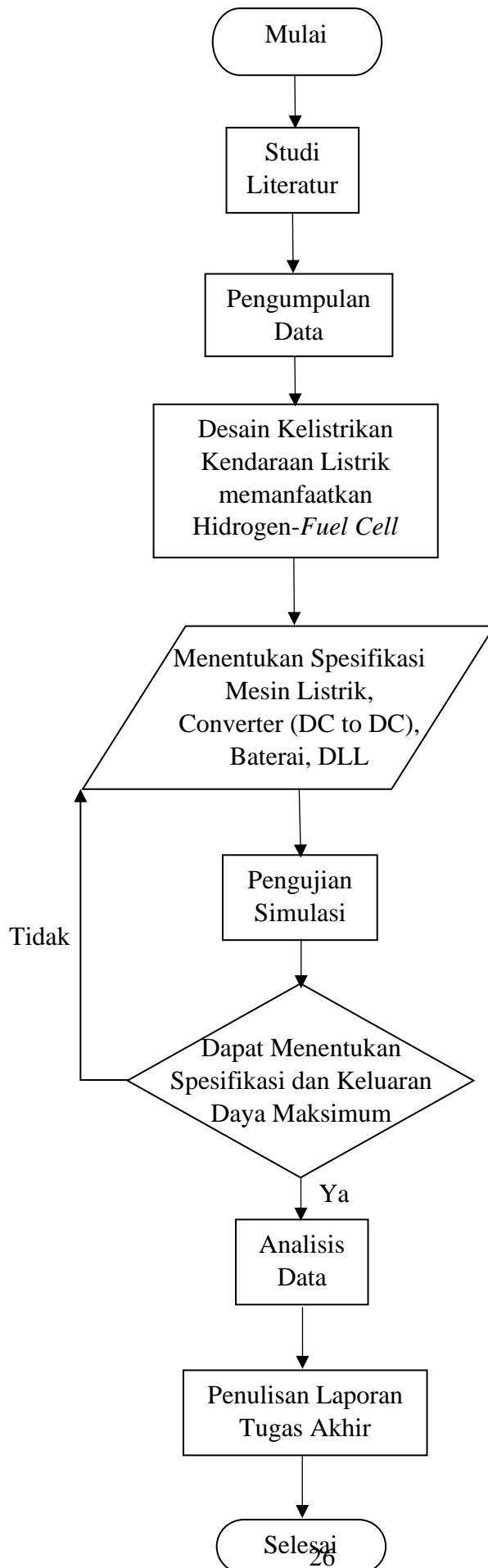
Pada bab tiga ini akan dilakukan pembahasan mengenai proses pemodelan dan simulasi sistem kelistrikan kendaraan mobil listrik ringan hidrogen yang digerakkan oleh teknologi *fuel cell* 1000 watt. Pada pembahasan pemodelan sistem akan dibahas mengenai spesifikasi dari masing-masing komponen dan parameter yang nantinya digunakan dalam sistem. Kemudian akan dilanjutkan proses simulasi dengan menggunakan *software* Matlab Simulink.

3.1 Metode Penelitian yang Digunakan

Metodologi yang digunakan dalam Penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur Mempelajari literatur melalui berbagai jenis literasi berupa paper, jurnal, buku, dan media lainnya yang dapat menunjang pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Pengumpulan data mengenai beban kendaraan dan teori yang berisikan informasi mengenai pemodelan rangkaian, karakteristik, spesifikasi tiap komponen agar sistem dapat disimulasikan dengan benar,
3. Desain Kelistrikan Kendaraan Listrik memanfaatkan Hidrogen-Fuel cell sesuai dengan *input* dan *output* pada rangkaian
4. Menentukan Spesifikasi Mesin Listrik, Inverter, Converter (DC to DC), Baterai, hingga *fuel cell*
5. Pengujian simulasi
6. Analisis data
7. Penyelesaian laporan tugas akhir

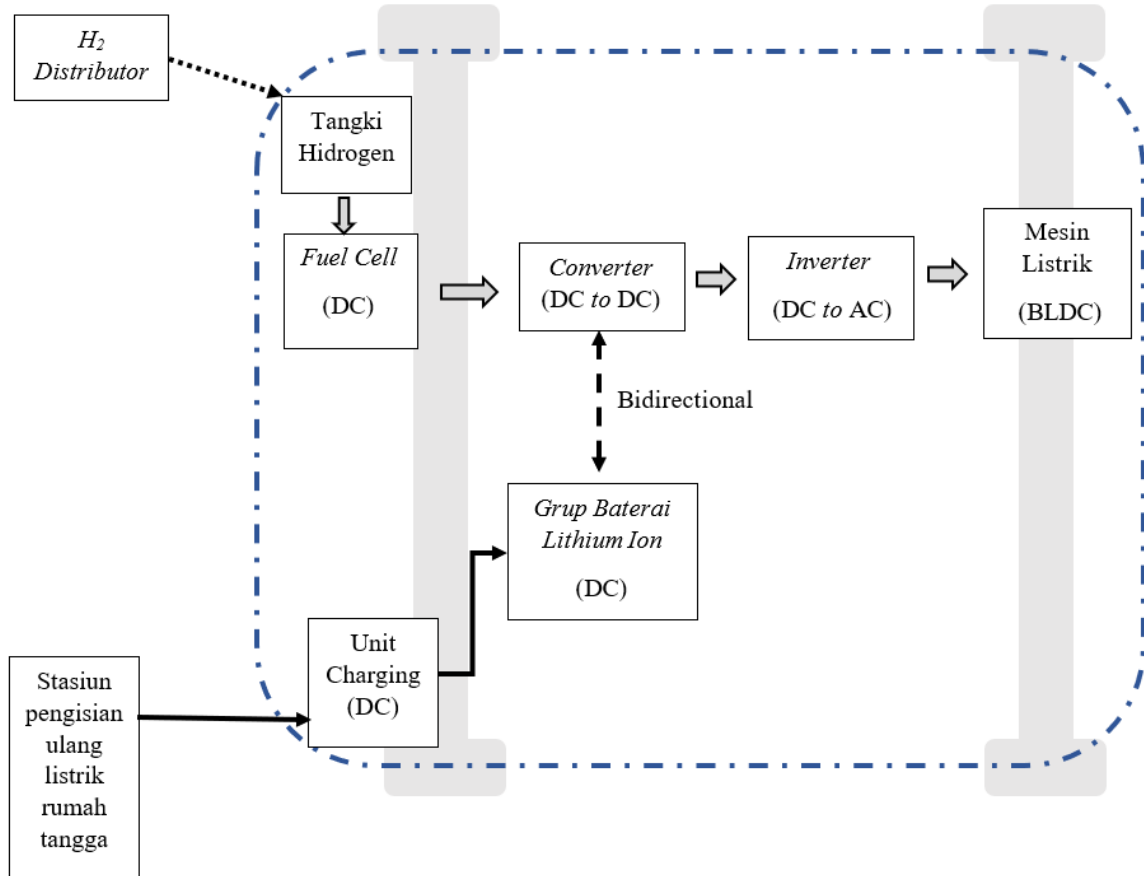
Tahap ini dilakukan sebagai tahap akhir dari serangkaian pengerjaan Tugas Akhir ini. Selain itu, Laporan disusun dalam bentuk buku yang berisi hasil penelitian Tugas Akhir yang telah dikerjakan. Penyelesaian laporan ini dilakukan guna memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah Tugas Akhir. Berikut merupakan diagram alir dari penelitian Tugas Akhir ini:



Gambar 3. 1 Flow chart pengerjaan penelitian

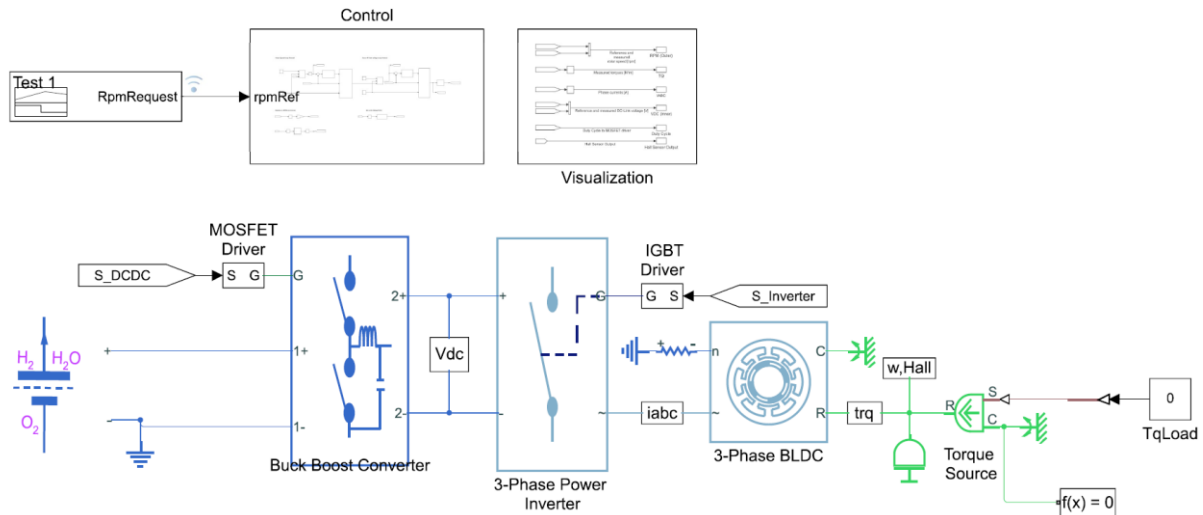
3.2 Pemodelan Sistem Kelistrikan

Fuel cell merupakan sebuah teknologi yang dapat mengubah secara langsung energi kimia menjadi energi listrik melalui sebuah proses yang dinamakan proses elektrolisis. *Fuel Cell* sendiri memiliki berbagai macam tipe, dan pada Pemodelan sistem *fuel cell* sendiri di desain berdasarkan kebutuhan beban seperti *converter*, *inverter* dan motor BLDC (*Brushless DC motor*). Berikut merupakan pemodelan dan desain sistem kelistrikan dari mobil listrik ringan 1000 watt.



Gambar 3. 2 Desain sistem kelistrikan

Setelah desain model flowchart diatas sudah sesuai dengan pembahasan pada penelitian ini, selanjutnya desai tersebut dimodelkan didalam aplikasi Simulink seperti gambar 3. 2 dibawah ini.



Gambar 3. 3 Pemodelan pada Simulink

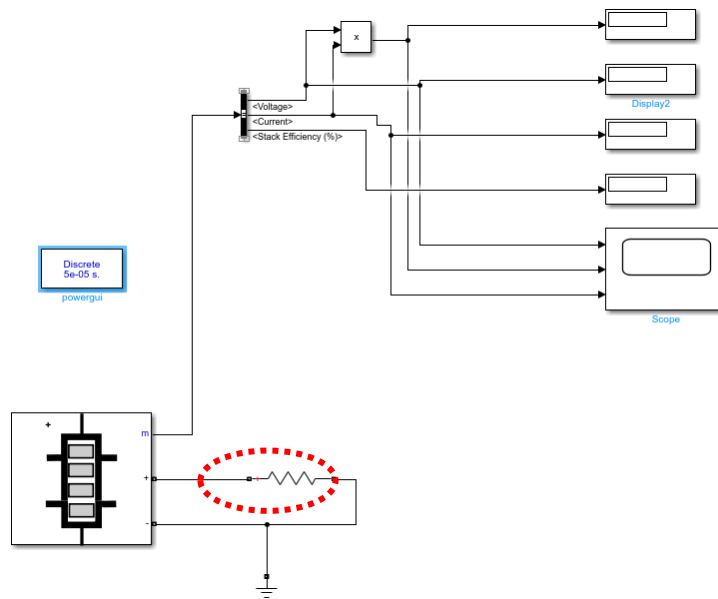
3.2.1 Fuel Cell

Pada simulasi sistem kelistrikan mobil listrik ini, digunakan *fuel cell* sebagai alat untuk mengubah hidrogen menjadi energi listrik untuk menggerakkan listrik. Tipe *fuel cell* yang digunakan adalah PEM (*Proton Exchange Membrane*) dengan daya 1,26 kW dan tegangan yang dihasilkan sebesar 24 Vdc. *Fuel cell* tersebut terdiri dari 42 sel dengan tegangan tiap sel sebesar 1,115 V. dapat memberikan efisiensi sebesar 46% dan dapat bekerja hingga temperatur 55°C. Besar perentase pemanfaatan hidrogen yang dibutuhkan sebesar 99,5% dari volume total hidrogen agar dapat memberikan efisiensi maksimum dalam proses energi listrik. Berikut merupakan spesifikasi dari *fuel cell*.

Tabel 3. 1 Data parameter *fuel cell*

Parameter	Nilai
Daya	1259.96 Watt (nominal) 2000 Watt (maksimum)
Hambatan dalam	0,061871 ohms
Tegangan tiap sel	1,115 Volt
Pemanfaatan bahan bakar	99,92% (H ₂) 1,813% (O ₂)
<i>Flow rate</i> bahan bakar Hidogen	12,2 lpm (nominal) 23,46 lpm (maksimum)
<i>Flow rate</i> udara	2400 lpm (nominal) 4615 lpm (maksimum)
Tekanan bahan bakar	1,5 bar
Tekanan udara	1 bar

Blok diagram untuk *fuel cell* dapat dilihat dari gambar dibawah ini.



Gambar 3. 4 Pemodelan *fuel cell open loop*

Hambatan dari *fuel cell* merupakan input dari DC/DC konverter dengan jenis *buck-boost* yang akan menaikkan atau menurunkan tegangan dari *fuel cell*. Pada simulasi ini dipilih karakteristik *fuel cell* yang dapat memberikan input yang sesuai dengan kebutuhan dari mobil listrik ringan.

3.2.2 DC/DC Converter 1200 Watt dan PID

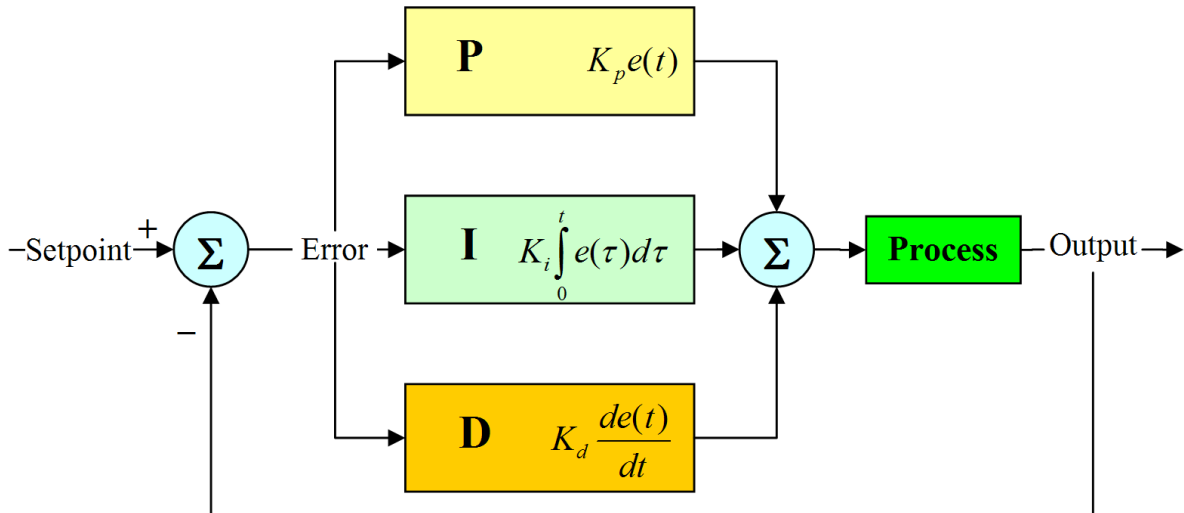
Pada simulasi ini DC/DC *converter* yang digunakan merupakan jenis *buck-boost converter* dengan tujuan untuk menstabilkan tegangan dari *fuel cell* dimana pada umumnya memiliki karakteristik sinyal input (tegangan, arus) yang tidak stabil, selain itu tujuan penggunaan konverter tipe *buck-boost* adalah untuk memperkecil ripple sinyal *output* dari konverter itu sendiri, selain itu tujuan utama dari penggunaan *buck-boost* yaitu agar dapat menghasilkan daya tegangan output yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan kendaraan mobil listrik dimana daya *output* tersebut tentunya harus bisa disesuaikan dengan kondisi jalanan, kebutuhan pengendara dan juga faktor-faktor lain yang juga dapat berpengaruh terhadap daya yang dibutuhkan. Selain untuk kenutuhan motor BLDC pada mobil, dasar pemilihan konverter tipe *buck-boost* adalah agar daya surplus dari setelah diserap oleh motor dapat disimpan kembali (*charge-discharge*) ke tempat penyimpanan daya seperti *flywheel*, dll. Berikut merupakan parameter yang digunakan pada DC/DC *converter*.

Tabel 3. 2 Parameter komponen DC/DC *Converter*

Komponen	Nilai
Induktor	187,50 μH
Kapasitor	2512,50 μF
Resistor	3 Ω
Frekuensi Switching	20 kHz

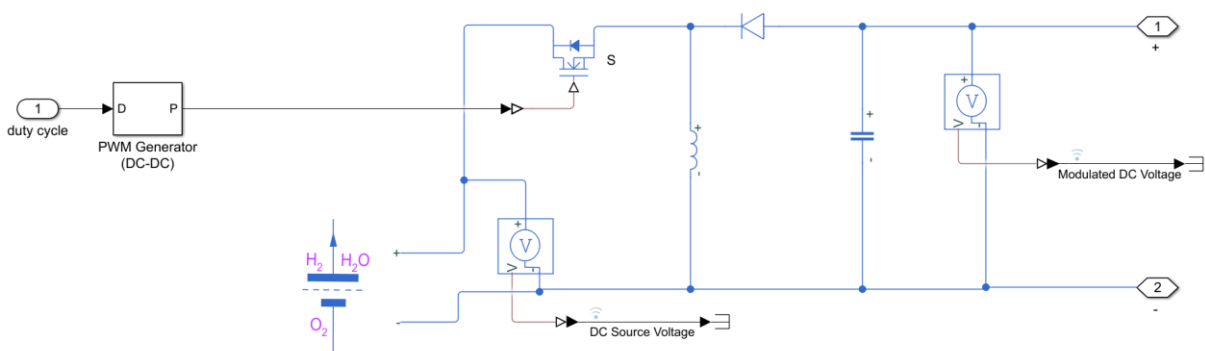
DC/DC *converter* dikontrol oleh sistem PID yang merupakan kontroler dengan mekanisme umpan balik berdasarkan output motor BLDC terukur yang berupa kecepatan rotor

(rpm). Berikut merupakan rangkaian yang akan mengontrol kebutuhan parameter untuk memenuhi kebutuhan proses.



Gambar 3. 5 Blok diagram perhitungan kontrol PID

PID akan membaca nilai output rotor motor BLDC kemudian akan memberikan *feedback* kepada *switch controller* dari konverter berupa sinyal PWM untuk mengontrol *duty cycle* dari konverter. PID bekerja berdasarkan output dari kecepatan rotor motor BLDC kemudian mengirim sinyal kepada converter untuk mengatur *duty cycle* dari konverter agar motor dapat bekerja dengan optimal. Apabila *duty cycle* ditambah, daya yang dihasilkan semakin meningkat, maka nilai *duty cycle* ditingkatkan sesuai parameter dari motor BLDC 1000 watt sehingga dapat menghasilkan rpm yang sesuai dengan yang diharapkan. Berikut merupakan rangkaian dari *buck-boost* DC/DC konverter dengan PID.



Gambar 3. 6 Pemodelan *buck-boost converter* pada Simulink

3.2.3 Inverter dan Controller

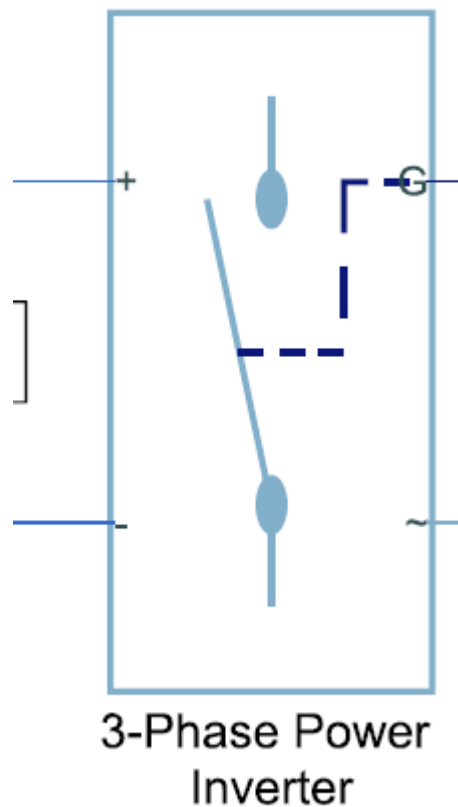
3.2.3.1 Komponen Inverter

Inverter digunakan untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa yang mana akan menjadi input tegangan pada motor BLDC. Parameter yang digunakan pada inverter adalah sebagai berikut.

Tabel 3. 3 Parameter inverter

Komponen	Nilai
Tegangan input	24 V
Arus input	68 A

Pemodelan inverter pada simulasi ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3. 7 Pemodelan inverter dan beban motor BLDC pada Simulink

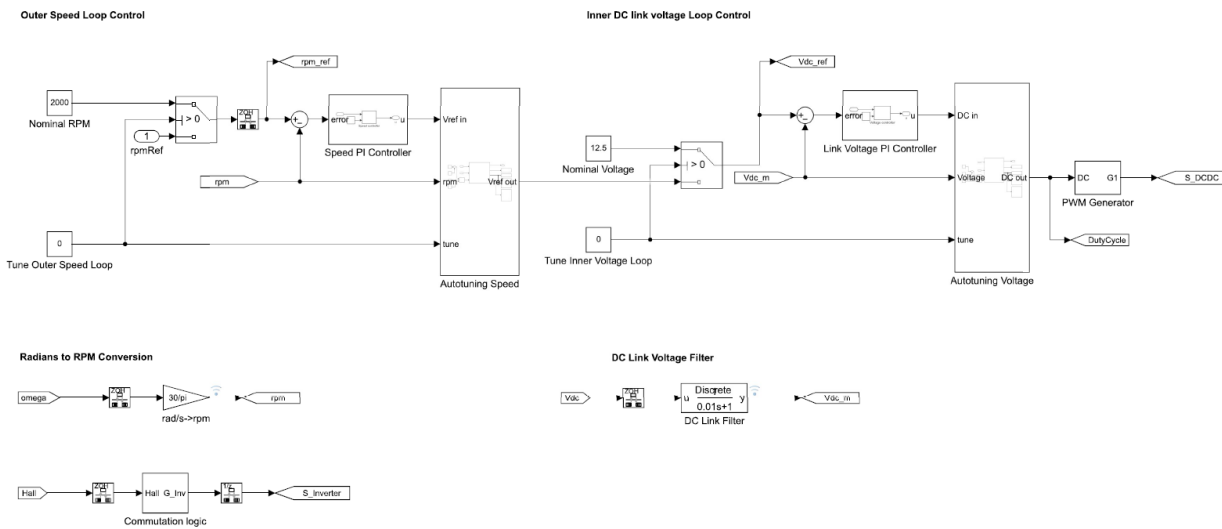
Input tegangan dari inverter tersebut merupakan *output* dari tegangan dan arus yang dihasilkan oleh *buck-boost converter*, dimana kemudian inverter mengubah dan meng-*input*-kan tegangan ke beban motor BLDC 1000 watt dalam bentuk sinyal AC 3 fasa. Begitu juga dengan PID yang memberi sinyal *feedback* dari motor BLDC ke konverter untuk memberikan daya yang cukup agar motor dapat memenuhi kebutuhan dari mobil listrik.

Dalam operasi BLDC memerlukan gelombang untuk bekerja, maka penggunaan inverter diperlukan. Inverter juga digunakan untuk tujuan kontrol kecepatan dikontrol kecepatan BLDC konvensional, inverter bekerja dengan cara mengalirkan arus secara bergantian untuk menimbulkan medan magnet sehingga dapat memutar rotor dari motor BLDC.

3.2.3.2 Commutation Logic dan Gate Pulse

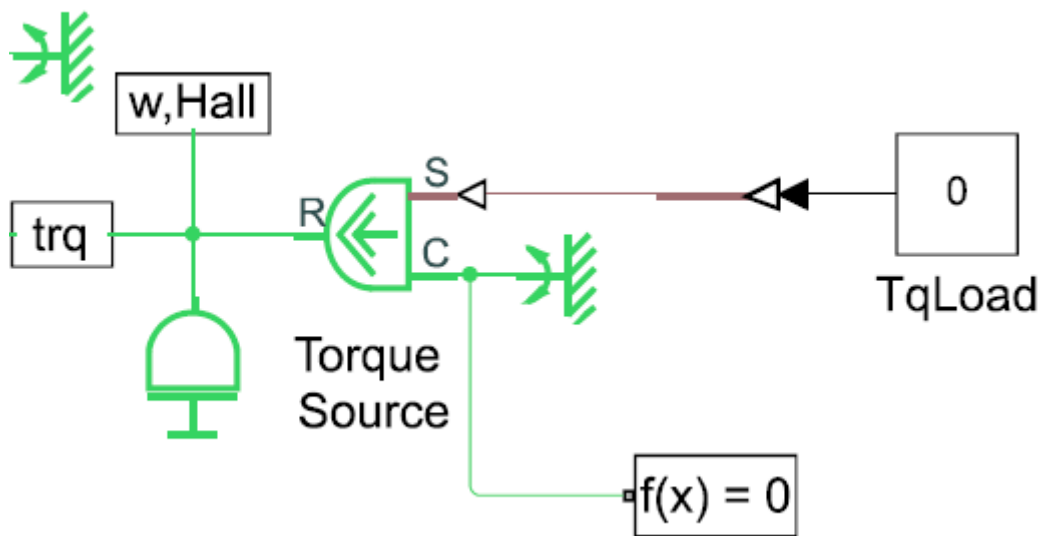
Pada simulasi ini digunakan pengatur arus yang bekerja untuk mengatur besarnya arus yang dibutuhkan oleh beban. Dengan menggunakan rangkaian logika *commutation logic* dan juga *gate pulse* maka arus yang masuk kepada motor BLDC tiga fasa dapat diatur.

Motor BLDC sendiri memiliki tiga belitan pada stator yang membutuhkan tiga fasa arus yang akan mengalir belitan stator tersebut. Dengan menggunakan *six-step commutation inverter* yang akan mengubah arus DC menjadi arus tiga fasa yang berbentuk sinyal trapezoidal untuk mengalir belitan stator yang digunakan untuk membangkitkan medan magnet setiap 60° putaran rotor dari motor BLDC.



Gambar 3. 8 Pemodelan *commutation logic controller* pada Simulink

Pada gambar diatas, merupakan pemodelan rangkaian *commutation logic* yang berfungsi sebagai pengatur *switch* dari MOSFET yang terdapat pada inverter. MOSFET tersebut akan diatur untuk mrngalirkan atau memutus arus sehingga karakteristik dan nilai dari arus dapat sesuai dengan kebutuhna dari motoe BLDC. MOSFET akan membuka dan menutup sesuai dengan pola *switch* yang telah dianalogikan seperti gambar 3.7 diatas.



Gambar 3. 9 Pemodelan *gate pulse* pada Simulink

Sedangkan untuk gambar rangkaian *Gate Pulse* diatas berfungsi untuk mengatur masukan dari aliran arus dari mosfet. *Gate pulse* tersebut berguna untuk mengarahkan arus agar dapat membebani fasa stator yang tepat dari motor BLDC agar arus masukan sesuai dengan yang diinginkan. Sebenarnya motor BLDC memang memiliki sensor sendiri untuk mengarahkan arus pembebanan agar dapat membebani bagian dari motor dengan benar, sensor tersebut bernama *Back-EMF*, akan tetapi untuk *gate pulse* sendiri berfungsi agar arus nilai dari arus AC dapat secara presisi mengeluarkan besaran arus sesuai dengan yang diminta

Untuk arus yang membebani stator dan motor akan masuk ke topologi *full bridge* dari inverter yang mengatur mosfet agar dapat melakukan *switch* sesuai dengan logika dari *commutation logic* yang berupa besaran arus dan dibantu oleh *gate pulse* arus tersebut secara presisi membebani bagian rotor maupun stator dari motor BLDC.

3.3 Pemodelan Beban Motor BLDC

3.3.1 Penentuan Kapasitas Beban Motor

Mobil listrik ringan 1000 watt menggunakan motor BLDC sebagai mesin penggerak. Spesifikasi dari motor BLDC itu sendiri diatur berdasarkan beban dari mobil baik itu *body*, rangka, hambatan eksternal seperti gaya gesek dengan aspal, gaya gesek udara serta berat penumpang maksimum yang akan ditampung oleh mobil. Keseluruhan beban tersebut harus diperhitungkan agar dapat menentukan spesifikasi yang akan digunakan pada mobil listrik ringan hidrogen *fuel cell* 1000 watt.

Berikut merupakan parameter mobil yang digunakan untuk perhitungan daya beban yang dapat diangkut oleh mobil listrik ringan:

Tabel 3. 4 Tabel parameter beban (berat kendaraan) dan gesekan pada kendaraan

Parameter	Nilai
Luas Sisi Depan Mobil	1.905 (m ²)
Percepatan	0.1 m/sec ²

Berat Total Mobil dan Penumpang	485 (kg)
<i>Tire Rolling Resistance coefficient (Crr)</i>	0.004
<i>Brake and steering resistance (CBSR)</i>	0.003
<i>Drag Coefficient (CD)</i>	0.3
<i>Air Density (ρ)</i>	1.2 (kg/m ³)

Pada proses perhitungan daya beban terdapat beberapa faktor gaya yang mempengaruhi, seperti gaya gesek udara, gaya gesek dengan aspal baik gaya gesek statis (*Incline*) maupun gaya gesek kinetis (*Rolling Resistance*). Kemudian tiga gaya yang sifatnya menahan tersebut digunakan sebagai acuan untuk menentukan karakteristik dari motor.

$$F_{air_resistance} = 0,5 \times C_D \times A \times \rho \times V^2 \quad (27)$$

$$F_{air_resistance} = 0,5 \times C_D \times A \times \rho \times V^2 \quad (28)$$

$$F_{rolling_resistance} = m \times g(C_{rr} + C_{BSR}) \quad (29)$$

$$F_{incline} = m \times a \quad (30)$$

$$F_{drag} = \Sigma F = F_{air_resistance} + F_{rolling_resistance} + F_{incline} \quad (31)$$

$$P_w = F_{drag} \times V \quad (32)$$

$$P_w = 485 \times 7.59439 \times 0.1 + 0.007 \times 485 \times 7.59439 \times 9.8 + 0.5 \times 0.3 \times 2.30505 \times 1.2 \times 7.59439^3 \approx \mathbf{802,73 \text{ watt}} \quad (33)$$

$$P_{motorout} = P_w \times 115\% \quad (34)$$

$$P_{motorout} = 802,73 \times 115\% = 923,14 \text{ watt} \quad (35)$$

$$P_{motor} = \frac{923}{95} \% = \mathbf{971,73 \text{ watt} = 1,3 \text{ Hp}} \quad (36)$$

Perhitungan di atas adalah untuk menghitung kapasitas beban dari mobil listrik dengan maksimum 2 penumpang. Perhitungan tersebut meliputi massa total dari berat total keseluruhan beban (*Body* mobil, baterai, tangka hidrogen), kecepatan maksimum yang dapat ditempuh mobil, percepatan mobil listrik, koefisien gesekan ban dengan aspal, koefisien gesek dari udara, luas depan kendaraan dan juga massa jenis dari udara.

Spesifikasi mobil listrik berdasarkan referensi dari mobil listrik secara umum dengan adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 5 Ukuran dan kecepatan maksimum dari motor

Parameter	Nilai
Ukuran (P * l * t)	3615*1210*1905 mm
Berat Net (Body, Baterai, Tangki)	485 kg
Kecepatan Maksimum	27 km/jam

Setelah dilakukan perhitungan untuk penentuan beban daya dari mobil listrik, selanjutnya penentuan spesifikasi motor BLDC sebesar $\pm 15\%$ dari daya beban mobil. Kemudian digunakan spesifikasi motor BLDC sebagai berikut:

Tabel 3. 6 Parameter motor BLDC

Parameter	Satuan	Nilai
Terminal Voltage	V_{DC}	48
Peak Torque	oz-in	684
	Nm	4.83
Rated Speed	RPM	5151
	rad/sec	539
Rated Torque	oz-in	36
	Nm	0.25
Rated Current	Amps	3.3
Rated Power	watts	137
Torque Sensitivity	oz-in/amp	11,76
	Nm/amp	0,083
Back EMF	V/kRPM	8.70
	V/rad/sec	0.083
Terminal Resistance	ohms	0.82
Terminal Inductance	mH	0.90
Motor Constant	oz-in/sq.rt.watt	13.0
	Nm/sq.rt.watt	0.092
Rotor Inertia	oz-in-sec ² $\times 10^{-3}$	1.50
	g-cm ²	105.9
Weight	oz	21
	g	596
# of Poles		8.0
Timing		120°
Mech. Time Constant	ms	1.3
Electrical Time Constant	ms	1.10
Thermal Resistivity	deg. C/watt	4.9
Speed/Torque Gradient	rpm/oz-in	8.0

Spesifikasi beban motor tersebut menggunakan Motor BLDC tipe BS23 *High Performance*. Spesifikasi motor diatas kemudian menjadi parameter dari spesifikasi motor BLDC yang tertera pada Simulink. Selanjutnya untuk mengatur putaran dari rotor yang dihasilkan, digunakan *speed test controller* yang merupakan sinyal *feedback* dari PID Controller agar putaran rotor dari motor BLDC dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan.

Daya maksimum dari motor BLDC dapat dihitung dengan cara mengamati *output* RPM maksimum dikalikan dengan torsi maksimum dari spesifikasi motor. Putaran rotor maksimum dari motor BLDC dan torsi menunjukkan daya keluaran maksimum yang dihasilkan oleh motoro BLDC sebesar:

$$P_{motor} = \omega \times \tau \quad (38)$$

$$P_{motor} = 273,6 \times 3,6 \quad (39)$$

$$P_{motor} = 984.96 \text{ watt} \approx 1,4 \text{ Hp} \quad (40)$$

3.4 Perhitungan Kapasitas Baterai pada Mobil listrik

Baterai pada kendaraan listrik sangat diperlukan untuk menyimpan energi yang terbuang saat kendaraan digunakan, seperti contoh saat berada di lampu merah dimana kendaraan diam dan terus hidup, kemudian pada kendaraan yang melintasi jalan yang menurun dan juga kendaraan yang melakukan pengereman sebelum benar-benar berhenti. Keadaan-keadaan seperti itulah yang menyebabkan energi berlebih (*surplus*) energi. Oleh karena itu baterai digunakan untuk menyimpan energi yang berlebih, maka akibatnya efisiensi penggunaan bahan bakar meningkat.

Penggunaan daya pada baterai digunakan untuk membantu motor BLDC ketika mengalami pembebanan berlebih seperti ketika melakukan percepatan dan juga ketika berada pada medan yang menanjak. Untuk tanjakan yang boleh dilewati oleh kendaraan listrik adalah yang memiliki kemiringan kurang dari 15^0 yang diasumsikan daya tambahan yang dikeluarkan sebesar 15% dari daya keluaran motor BLDC. Waktu yang digunakan untuk menanjak dibatasi selama 10 menit. Maka baterai akan mensuplai daya tambahan untuk melewati medan yang menanjak tersebut. Berikut merupakan perhitungan dari daya baterai:

$$P_{batt} = 15\% \times P_{motor} \quad (41)$$

$$P_{batt} = 15\% \times 984,96 \text{ watt} \quad (42)$$

$$P_{batt} = 147,744 \quad (43)$$

Berdasarkan perhitungan diatas dapat diketahui spesifikasi baterai yang dibutuhkan sebagai sistem penyimpanan energi pada mobil listrik saat terjadi surplus daya ketika kendaraan digunakan.

BAB IV HASIL DAN ANALISA DATA

Pada bab empat ini, akan dilakukan pembahasan dan analisa hasil simulasi desain sistem kelistrikan pada mobil listrik ringan hidrogen *fuelcell* 1000 watt dengan menggunakan motor BLDC dan PID *controller*. Analisa yang dilakukan dibagi menjadi dua tahap yaitu ketika *overshoot* dan ketika motor BLDC mencapai putaran maksimum (stabil).

4.1 Hasil Simulasi PEM Fuel Cell

Sebelum simulasi dilakukan, dilakukan *plotting* data pada *fuel cell* untuk mengetahui tegangan dan arus optimum yang dikeluarkan oleh *fuel cell* dengan jenis PEM (*Proton Exchange Membrane*) dengan nilai karakteristik output sebesar 1,26 kW dan 24 V_{dc}. Kemudian dilakukan percobaan dengan merangkai *fuel cell* dengan konverter, inverter dengan PID kontrol dan juga beban motor BLDC 1000 watt. Dari simulasi, kemudian didapatkan hasil sebagai berikut.

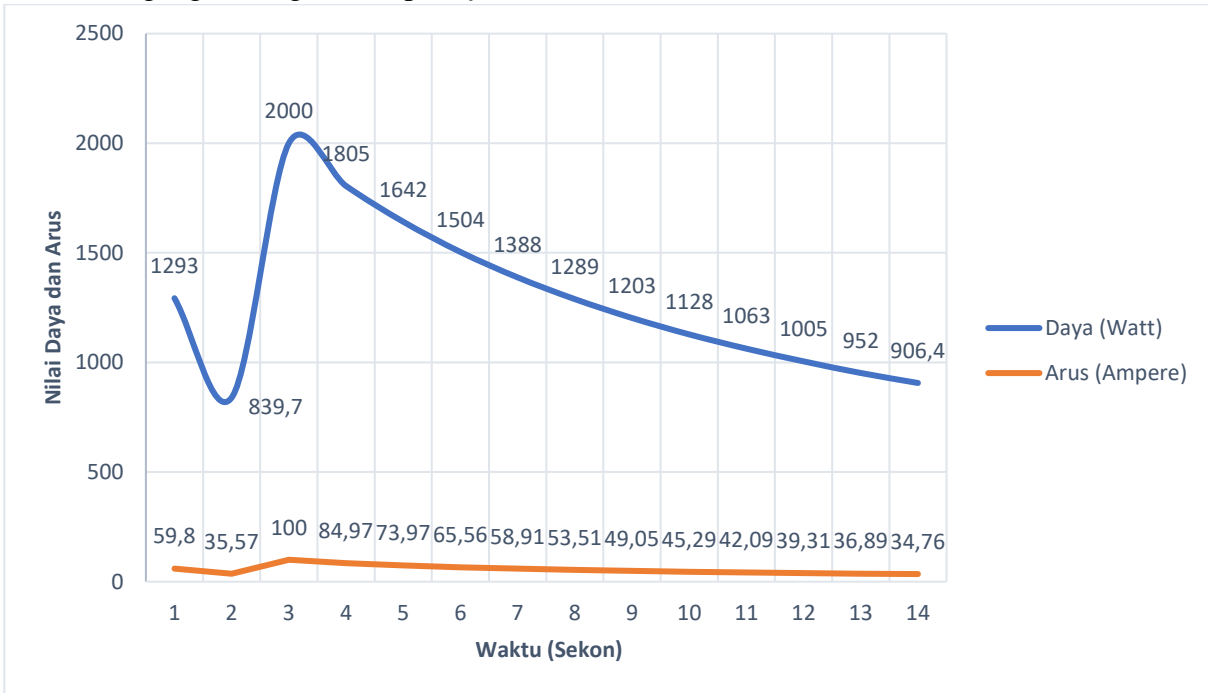
4.1.1 Plotting Data PEM Fuel Cell

Sebelum dilakukan simulasi secara *close loop*, *plotting* data dari *fuel cell* dengan nilai output tegangan maksimum sebesar 24 Volt yang nantinya akan digunakan sebagai *input* tegangan pada konverter agar nantinya motor BLDC dapat bekerja secara maksimal.

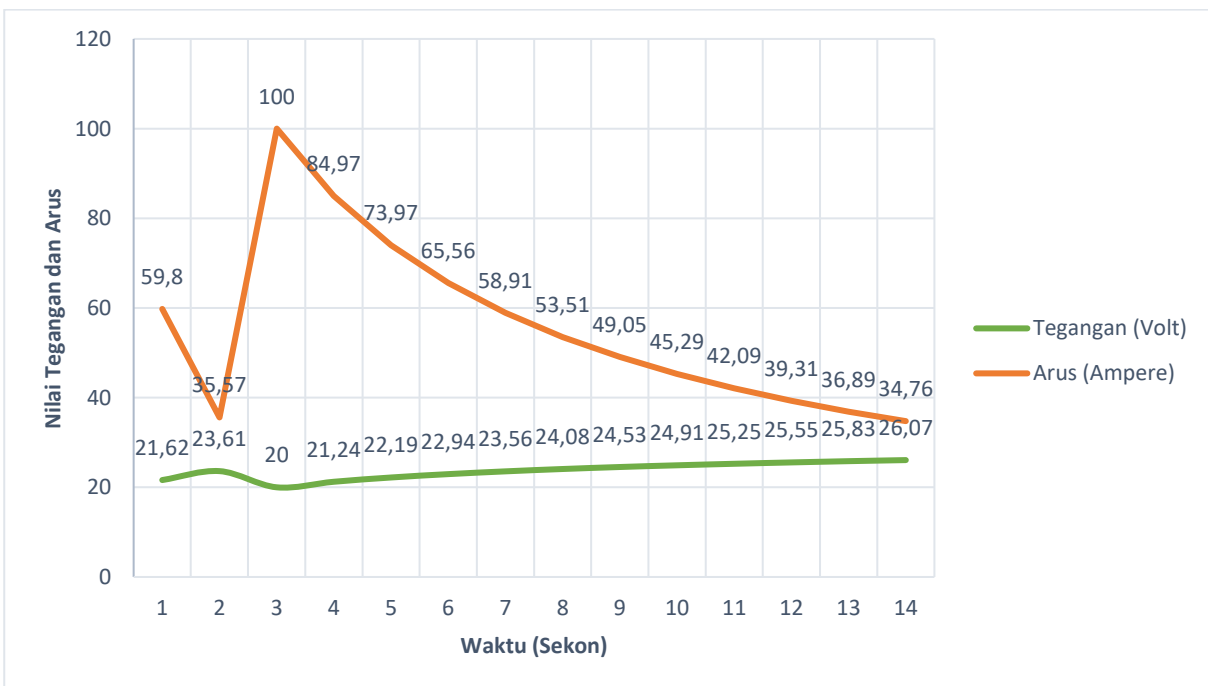
Tabel 4. 1 Plotting data *fuel cell*

Daya Beban (watt)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Stack Efficiency (%)
1293	21,62	59,8	41,5
839,7	23,61	35,57	44,82
2000	20	100	37,97
1805	21,24	84,97	40,33
1642	22,19	73,97	42,13
1504	22,94	65,56	43,56
1388	23,56	58,91	44,73
1289	24,08	53,51	45,72
1203	24,53	49,05	46,56
1128	24,91	45,29	47,29
1063	25,25	42,09	47,94
1005	25,55	39,31	48,51
952	25,83	36,89	49,03
906,4	26,07	34,76	49,5

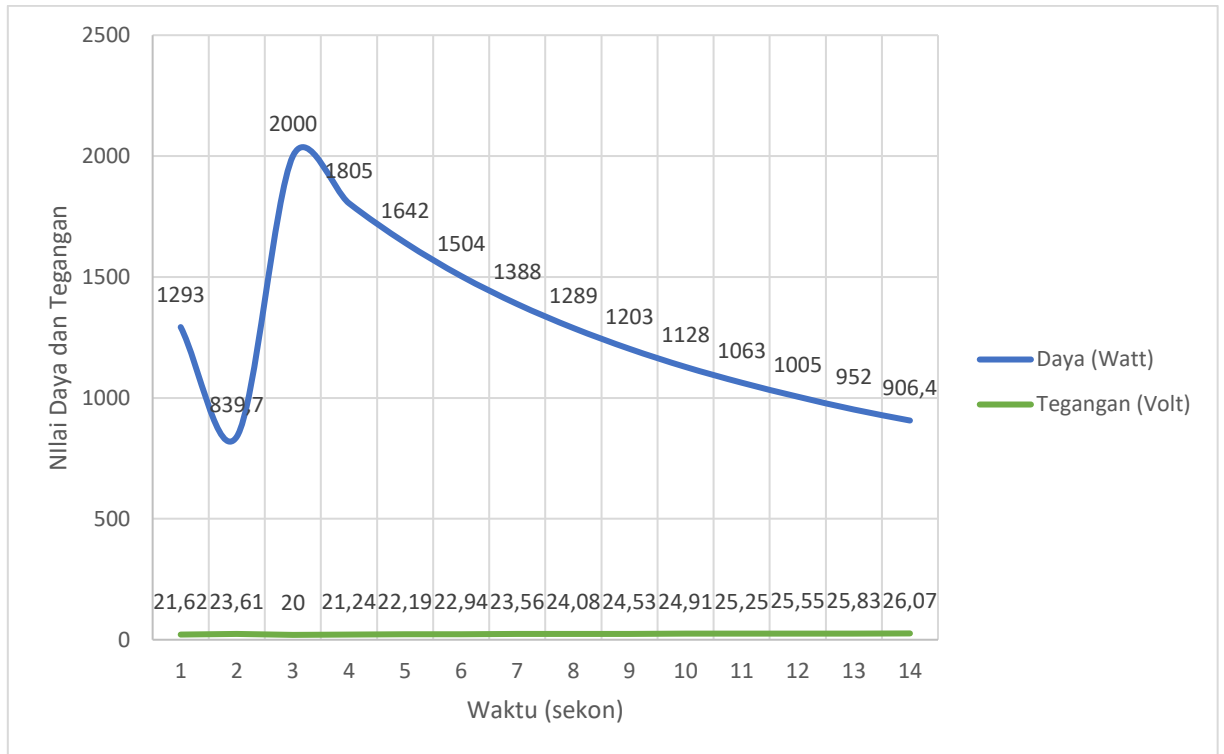
Berikut merupakan grafik perbandingan antara daya dengan tengangan, daya dengan arus dan tengangan dengan arus pada *fuel cell*:



Gambar 4. 1 Grafik perbandingan antara daya dan arus *output* dari *fuel cell*



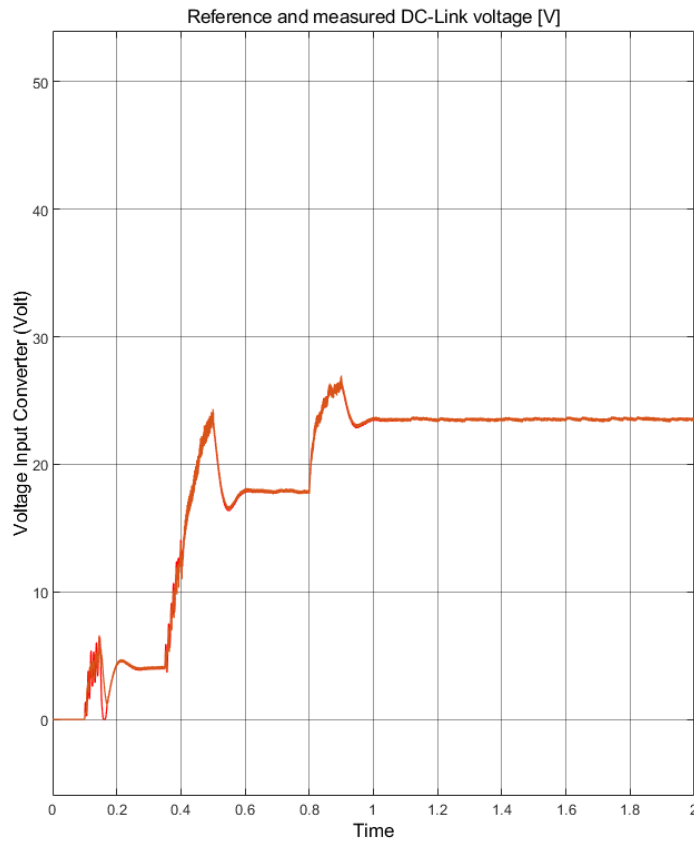
Gambar 4. 2 Grafik perbandingan antara tegangan dan arus *output* dari *fuel cell*



Gambar 4. 3 Grafik perbandingan antara daya dengan tegangan *output* pada *fuel cell*

4.2 PEM Fuel Cell dengan Rangkaian Close Loop

Setelah *fuel cell* tipe PEM (*Proton Exchange Membrane*) disambungkan ke dalam rangkaian kelistrikan mobil (konverter), *buck-boost* konverter kemudian menaikkan tegangan dari awalnya 20 V menjadi 48 Volt, *duty cycle* 0,75 dengan frekuensi 20 kHz secara perhitungan untuk memenuhi beban motor 1000 watt 48 volt. Berikut merupakan gambar grafik dari tegangan, arus, dan daya keluaran dari *fuel cell*:



Gambar 4. 4 Bentuk gelombang sinyal tegangan *output* dari *fuel cell*

Dari Gambar 4. 4-6 diatas, menunjukkan karakteristik dari sinyal tegangan dan sinyal arus yang naik turun secara fluktuatif, hal ini disebabkan oleh permintaan sinyal daya yang berupa perkalian antara sinyal tegangan dan arus oleh konverter. Selain dari pada loses pada perangkat *fuel cell* itu sendiri, *fuel cell* juga membutuhkan tingkat kelembaban yang relatif tinggi pada aliran pereaksinya untuk menghindari kekeringan pada membran elektrolit, khususnya pada saluran masuknya gas. Dari sebab sebab itulah yang menyebabkan karakteristik dari sinyal output *fuel cell* memiliki riak dan juga mengalami kenaikan dan penurunan karakteristik sinyal dan arus.

Dari ke-tiga sinyal diatas dapat diketahui setiap keluaran dari tegangan, arus dan daya yang dihasilkan oleh *fuel cell*. Tegangan *output* sendiri mengeluarkan V_{peak} sebesar 42 volt, sedangkan arus *peak* keluaran dari *fuel cell* sebesar 108,3 A dikarenakan konverter meminta daya keluaran yang lumayan besar yaitu 1200 kW disamping terdapat *loses* daya yang

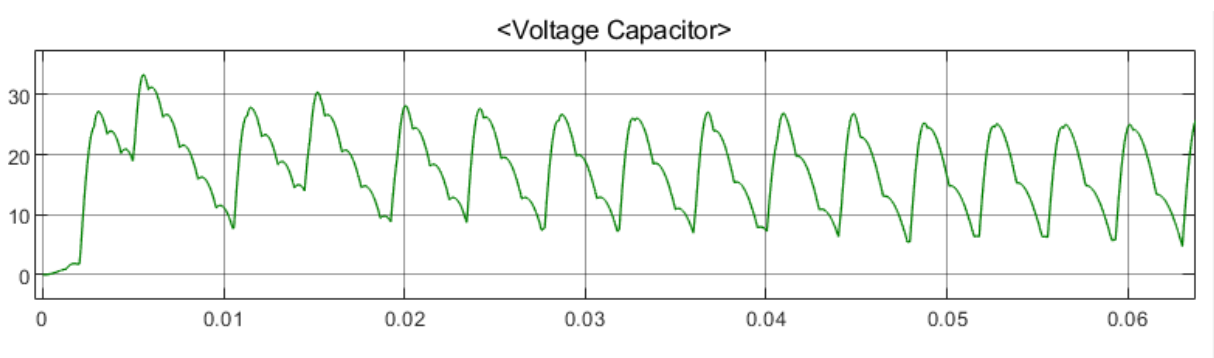
disebabkan oleh setiap komponen yang mengakibatkan W_{peak} keluaran dari *fuel cell* meningkat sebesar 2 kW.

4.3 Hasil Simulasi *Buck-Boost Converter* secara *Close Loop*

Selain simulasi *fuel cell*, simulasi *buck-boost converter* menggunakan PID dilakukan bersamaan dengan pembebanan dari inverter dan motor BLDC. Sinyal yang diharapkan dari keluaran *buck boost converter* haruslah berupa sinyal DC yang kemudian akan diubah oleh inverter menjadi sinyal AC yang akan menjadi input dari motor BLDC. Simulasi konverter tipe *buck-boost* digunakan untuk men-suplai daya ke motor BLDC dengan menaikkan tegangan dari *fuel cell* sesuai dengan tegangan karakteristik dari motor. Konverter merupakan pengatur tegangan yang mendapatkan *feedback* sinyal dari kecepatan rotor motor BLDC melalui PID kontroler, dimana ketika putaran rotor mengalami penurunan, PID mengirimkan sinyal kepada konverter agar dapat memberikan daya untuk mempertahankan putaran rotor tetap stabil. *Output* daya dari konverter setelah mendapat *feedback* dari PID kontroler ditunjukkan dari diagram di bawah ini:

Pada Gambar 4. 7 tegangan output dari *fuel cell* yang diharapkan adalah tegangan satu fasa dengan karakteristik DC dengan nilai 24 volt. Besar tegangan yang ditunjukkan oleh grafik menunjukkan tegangan maksimal dari *output* sebesar 24 volt dengan besar riak tegangan sekitar 28 volt, sedangkan arus *input* ke konverter besarnya sama dengan arus yang keluar dari *fuel cell* sebesar 108 A hal ini dikarenakan daya yang digunakan oleh konverter di *setting* sedemikian rupa sampai hampir mendekati maksimum yaitu 1,2 kW, oleh karena itu *fuel cell* harus mengeluarkan tegangan maksimum tersebut untuk memnuthi permintaan daya dari beban motor.

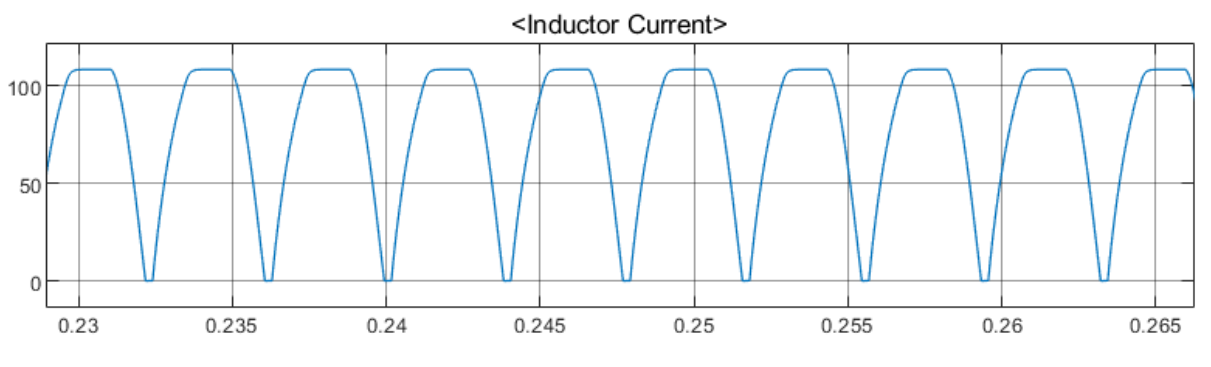
Dapat juga dilihat bahwasanya baik dari segi nilai maupun karakteristik dari sinyal tegangan dan arus *input* dari konverter sama dengan bentuk sinyal output dari konverter, hal ini menunjukkan arah aliran daya dari fuel cell adalah benar menuju konverter. Tergambar juga riak sinyal yang terjadi merupakan hasil dari ketidak idealan dari setiap komponen kelistrika baik itu berasal dari *fuel cell* itu sendiri dan juga setiap komponen pada konverter baik itu induktor, kapasitor maupun komponen yang lain.



Gambar 4. 5 Bentuk sinyal tegangan yang masuk pada kapasitor

Karakteristik sinyal tegangan pada kapasitor berbentuk segitiga degan riak yang menunjukkan bahwa sinyal tegangan dengan karakteristik DC dapat mengisi tegangan pada kapasitor sebagai penyimpan tegangan (bukan baterai). Kapasitor selain sifat alaminya sebagai penyimpan tegangan, kapasitor juga berfungsi sebagai filter tegangan agar sinyal tegangan

output dari konverter dapat menjadi lebih baik. Hal ini terbukti oleh gambar 4. 9 yang menunjukkan bahwa sinyal *output* hanya memiliki sedikit riak.

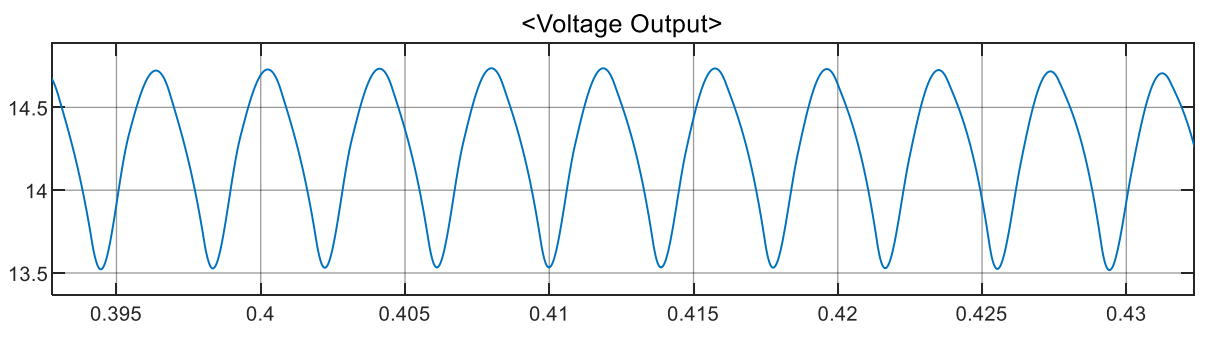


Gambar 4. 6 Bentuk sinyal arus yang masuk melalui induktor

Induktor sendiri berfungsi sebagai penyalur arus (tidak seperti kapasitor yang berfungsi sebagai *filter*) dari *output* dimana tidak ada perubahan karakteristik pada sinyal arus *input* maupun *output*.

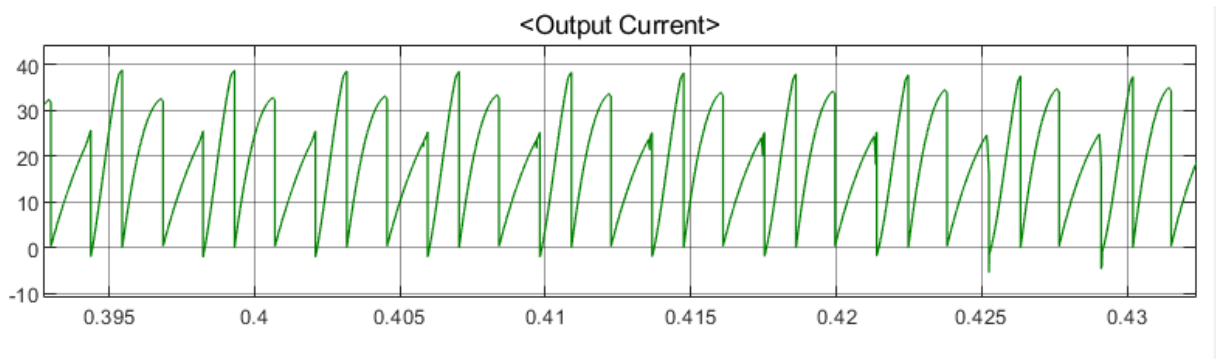
Pada kedua gambar diatas menunjukkan karakteristik dari tegangan kapasitor dan arus induktor dari *buck boost converter*. Tegangan kapasitor mengalami *ripple* sebesar pada posisi *starting point* motor BLDC. Induktor mengalami kondisi naik turun yang disebabkan oleh fenomena *switch* dari mosfet yang dikontrol oleh PID untuk mengalirkan arus berdasarkan *feedback* dari motor dengan titik puncak sinyal arus sebesar 108,3 A. Untuk sinyal tegangan pada kapasitor berupa sinyal DC dan terdapat *ripple* tertinggi sebesar 23 volt yang terjadi pada rentan waktu antara 0,007 sekon hingga 0,012 sekon yang berlangsung selama 0,005 sekon, hal tersebut bisa terjadi karena induktor mengalirkan arus untuk *starting* motor BLDC.

Kapasitas dari induktor didapatkan 187,50 μH dengan arus maksimum yang masuk pada simulasi didapatkan nilai 108,3 A. Pada kapasitor diperoleh kapasitor dengan kapasitas 2512,50 μF dengan kapasitas yang dapat diterima sebesar 30 Volt.



Gambar 4. 7 Bentuk sinyal tegangan yang keluar dari konverter

Gambar sinyal tegangan *output* dari konverter diatas menunjukkan riak yang lebih kecil dari riak tegangan input sebesar 1,2 volt. Nilai tersebut didapatkan dari selisih antara titik puncak dan titik lembah dari sinyal tegangan diatas. Hal ini dikarenakan adanya kapasitor dalam konverter yang berfungsi juga sebagai *filter* khususnya untuk sinyal tegangan dari input.



Gambar 4. 8 Bentuk sinyal arus yang keluar dari konverter

Hasil sinyal arus output dari konverter diatas memiliki nilai yang beragam. Nilai puncak tertinggi dari arus output adalah sebesar 40,56 A dengan riak sebesar 40 A. Hal tersebut dapat dikatakan wajar karena memang tidak ada komponen yang mem-*filter* arus dari konverter.

Selanjutnya untuk tegangan dan arus yang keluar dari output diharapkan dapat menstabilkan putaran rotor pada motor BLDC, oleh karena itu digunakan controller PID yang dapat mengirim sinyal *feedback* dari motor BLDC apabila putaran rotor turun, dimana PID kontroler akan mengirim sinyal kepada mosfet dari konverter agar dapat mengirim sinyal yang berupa tegangan dan arus untuk memenuhi kestabilan dari putaran motor BLDC.

Kapasitas dari konverter tipe *buck boost* disesuaikan dengan spesifikasi dari motor BLDC yang digunakan sebesar 1,2 kW untuk maksimum tegangan *output* yang dapat dihasilkan. Melalui persamaan 3. 40 Telah ditemukan berat beban dan daya keluaran dari motor, sehingga dipilih motor BLDC dengan kapasitas 1,5 Hp. Pemilihan tersebut selain memperhatikan berat beban dari kendaraan listrik itu sendiri, juga mempertimbangkan adanya gesekan udara, gesekan dengan aspal, dan juga gaya tarik dari mesin motor dimana hal tersebut telah ditunjukkan pada persamaan 3. 27-35

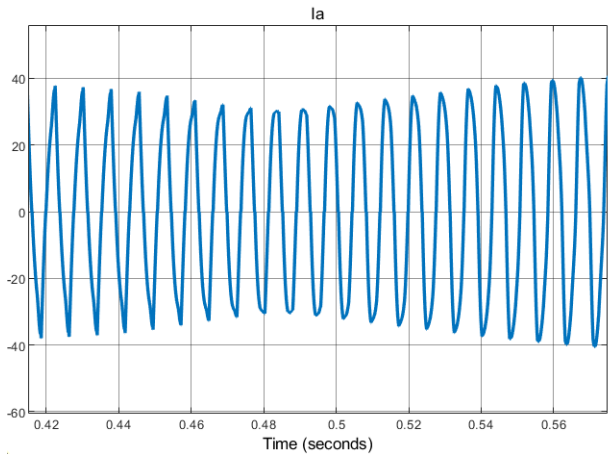
Naik turunnya sinyal baik itu sinyal arus pada induktor, tegangan pada kapasitor, arus output dan tegangan output disebabkan oleh *switching* dari *buck-boost* konverter, jadi ketika PID *controller* mengirimkan sinyal *feedback* dari output motor BLDC maka PID tersebut akan bekerja dengan cara merubah *switch* dari mosfet pada konverter. Pada setiap sinyal pada konverter baik sinyal *input* maupun *output* pasti mengalami *ripple* disebabkan oleh permintaan beban yang selalu berubah setiap waktu dan juga disebabkan oleh komponen-komponen yang terdapat di setiap sistem.

4.4 Hasil Simulasi Inverter untuk Motor BLDC 1000 Watt

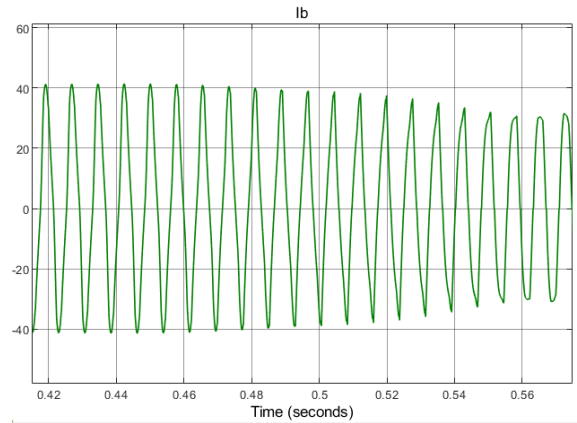
Pada simulasi ini inverter digunakan untuk mengubah karakteristik arus DC yang dihasilkan oleh konverter menjadi arus AC dengan bantuan *commutation logic* yang digunakan untuk mengatur kerja dari mosfet agar dapat secara bergantian mengirim arus ke motor. Topologi yang digunakan dalam inverter ini menggunakan topologi *full bridge six-wire three-phase*. Penggunaan topologi tersebut memungkinkan amplitudo tegangan yang diberikan untuk mencapai level tegangan *input* yang diharapkan sehingga meningkatkan rentang kecepatan operasi yang akan mengalir motor BLDC.

Arus yang akan mengalir motor BLDC sendiri nantinya akan diatur baik dari besar kebutuhan arus dari motor, beban yang akan dialiri oleh arus apakah itu beban stator ataukah

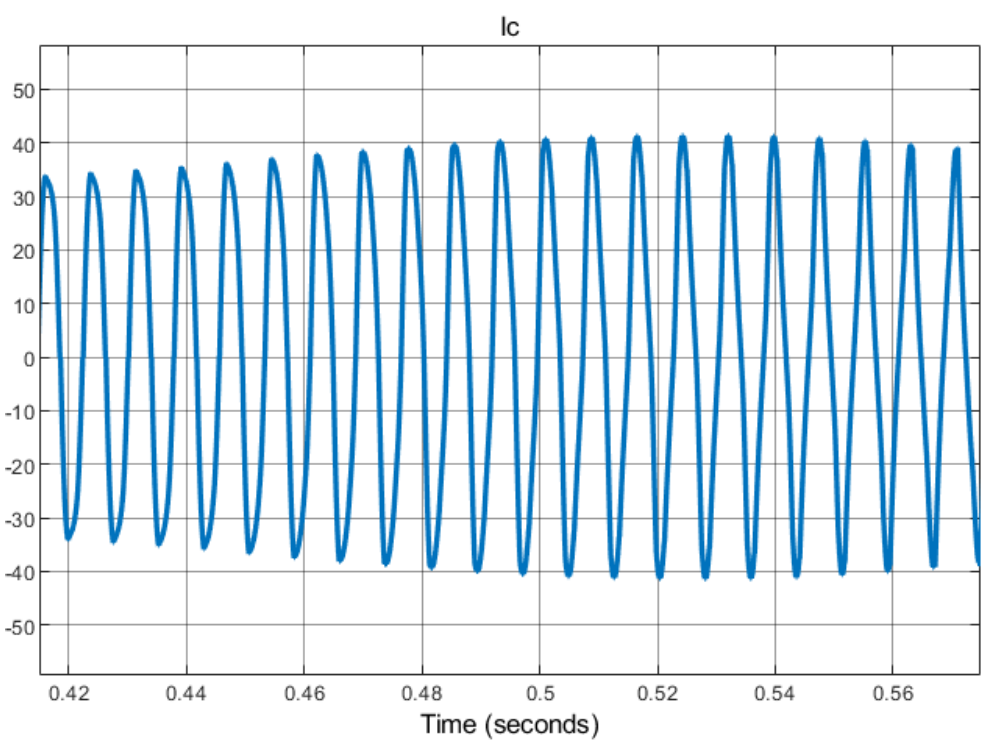
beban rotor dimana motor akan berputar dengan kecepatan putar yang sama (sinkron) antar motor dengan medan magnet dari stator. Selain dari *Back-EMF* yang dimiliki oleh motor BLDC itu sendiri pengaturan arus juga diatur oleh *commutation logic* sebagai pengatur besar arus yang dibutuhkan dan *gate pulse* yang mengatur penempatan aliran arus pada motor.



Gambar 4. 9 Arus stator Ia



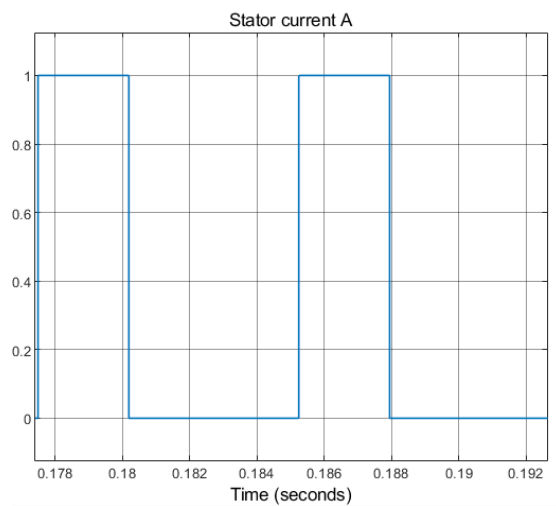
Gambar 4. 10 Arus stator Ib



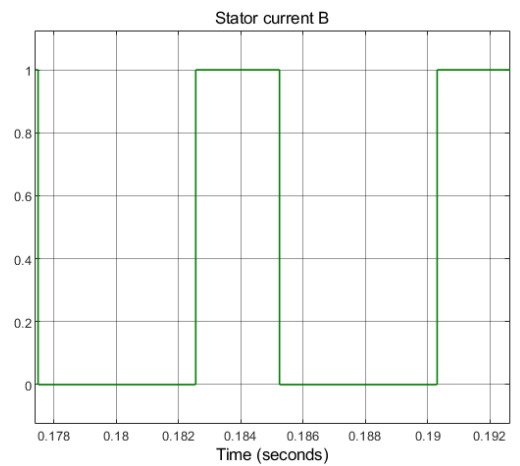
Gambar 4. 11 Arus stator Ic

Ketiga gambar diatas menunjukkan karakteristik arus keluaran dari inverter yang mengubah sinyal DC menjadi sinyal AC. Ketiga sinyal arus tersebut berasal dari hasil kerja mosfet yang mengatur arus yang masuk ke stator secara bergantian dan hal itu juga yang menyebabkan arus DC berubah menjadi arus AC. Arus tertinggi dari Ia sebesar 44,34 A, Ib sebesar 49,47 A, Ic sebesar 46,47 A. Ketiga arus tersebut akan mengalir stator pada motor yang nantinya stator akan menimbulkan medan mangnet yang membuat rotor berputar. Rotor akan

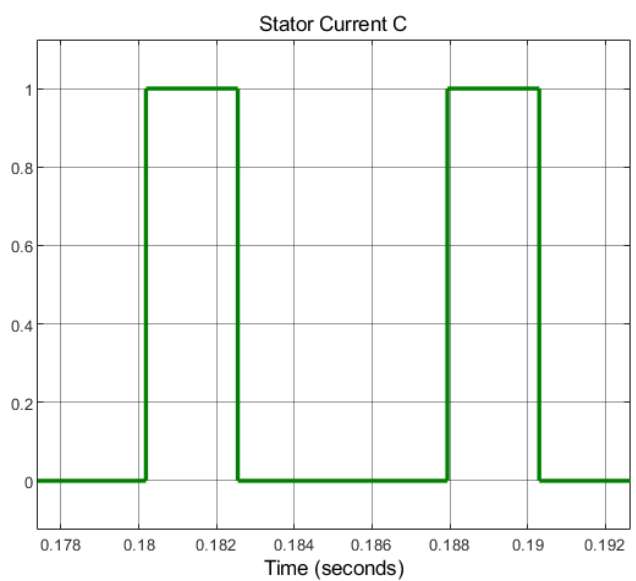
berputar ketika medan magnet yang ditimbulkan oleh stator memotong medan jangkar yang terdapat pada rotor dimana medan jangkar tersebut tercipta karena rotor yang berputar, rotor yang berputar tersebut akhirnya menimbulkan arus yang juga dapat menimbulkan medan jangkar pada motor BLDC.



Gambar 4. 12 Logic pulse pada arus stator Ia



Gambar 4. 13 Logic pulse pada arus stator Ib



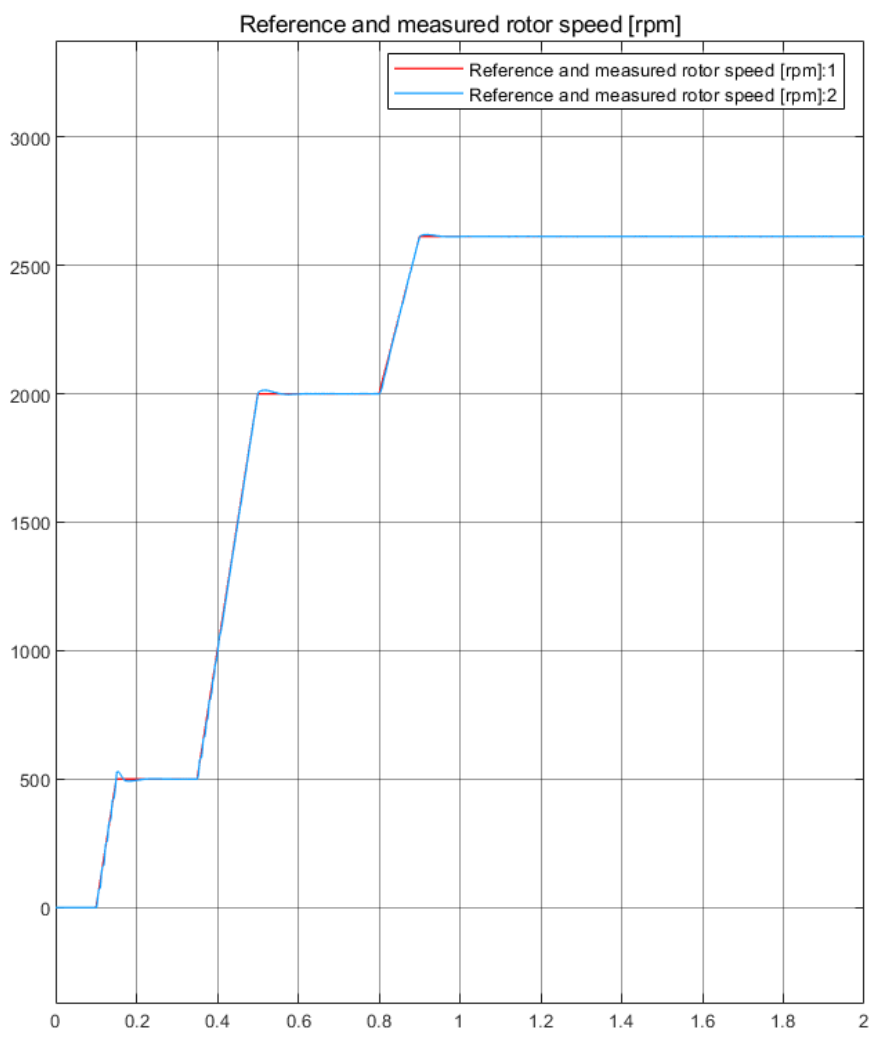
Gambar 4. 14 Logic pulse pada arus stator Ic

Namun untuk ketiga gambar sinyal di atas merupakan sinyal *logic* dari *gate pulse* dan *commutation logic* yang mengatur kerja dari mosfet. Untuk besaran 0 dan 1 adalah perintah *commutation logic* agar dapat mengatur arus keluaran dapat secara bergantian mengalir di stator yang kemudian timbul medan magnet hingga memotong medan jangkar pada motor sehingga motor dapat berputar.

4.5 Hasil Simulasi dari *Output Motor BLDC*

Motor BLDC pada umumnya akan mengalami tiga kondisi, yang pertama merupakan kondisi *starting* yang merupakan kondisi dimana motor baru dijalankan yang mana kondisi ini

membutuhkan daya lebih besar dari pada kedua kondisi yang lain karena motor akan digerakkan dari keadaan diam dan berangsur-angsur motor menuju kondisi yang terakhir yaitu kondisi stabil. Sebelum menuju kondisi normal, motor juga akan mengalami kondisi *overshoot* dimana kondisi ini merupakan kondisi yang mengharuskan motor untuk menstabilkan putaran rotor dari yang awalnya daya listrik berelebihan, hingga akhirnya kondisinya menjadi stabil. Kontrol PID haruslah dengan nilai yang sesuai agar motor BLDC tidak mengalami *overshoot* yang teralalu tinggi nilainya, yang mana hal ini akan sangat berpengaruh sekali dengan kenyamanan kendaran listrik ini.



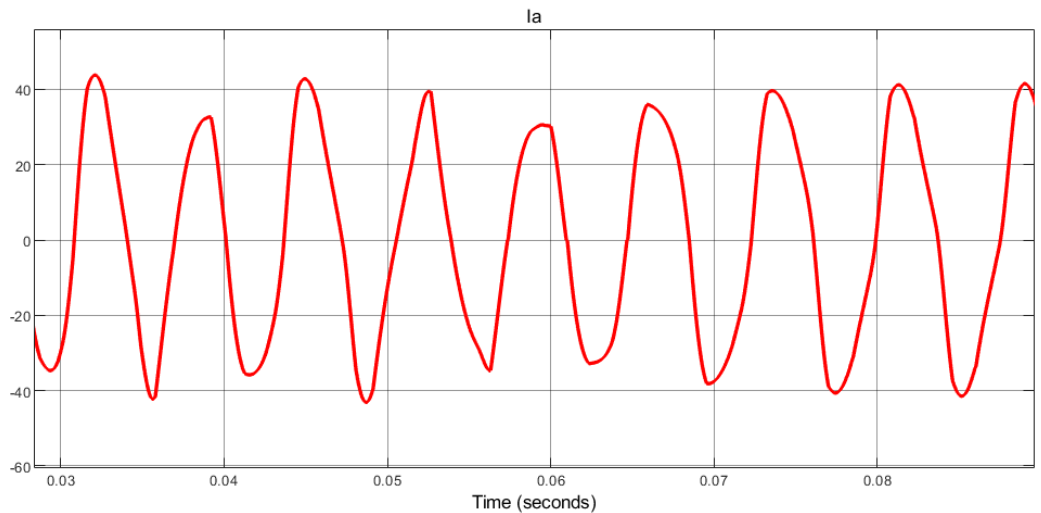
Gambar 4. 15 Putaran rotor motor BLDC dalam rad/sec

Pemilihan motor BLDC harus juga disesuaikan dengan komponen-komponen elektrikal yang telah dipilih pada simulasi sebelumnya. Pada persamaan 3. 40 dipilih motor BLDC 1,5 Hp yang sesuai dan dijual di pasaran. Karakteristik yang dipilih adalah karakteristik motor BLDC yang diproduksi oleh perusahaan *Moog Components Group* dengan seri *Silencer* tipe *BS23 High Performance*. Motor BLDC ini mendekati 1,5 Hp dengan putaran rotor mencapai 2,612.7 RPM dengan tegangan terukur ± 48 V.

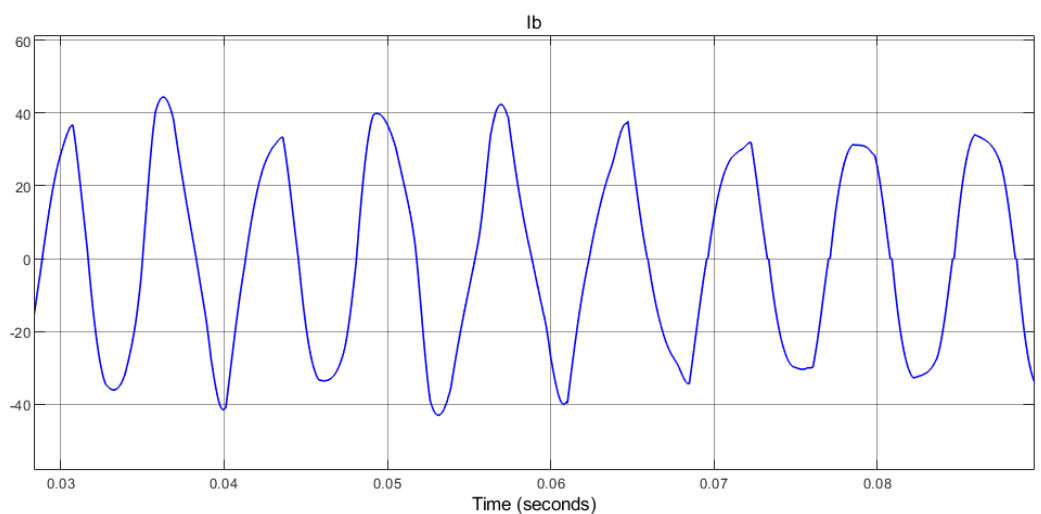
Dari hasil simulasi yang diperoleh didapatkan hasil dari output putaran rotor pada motor BLDC konstan sebesar 273,6 rad/sec, dengan penggunaan referensi torsi 3,6 Nm dengan menggunakan referesi motor BLDC *BS23 High Performance*. Motor tersebut mampu

menghasilkan putaran rotor untuk kendaraan dengan 2 (dua) penumpang, dengan daya motor sebesar 1,5 Hp (1118,029 watt). Besar daya tersebut didapatkan dari perhitungan rumus pada persamaan 3. 40 yang terdapat pada BAB III.

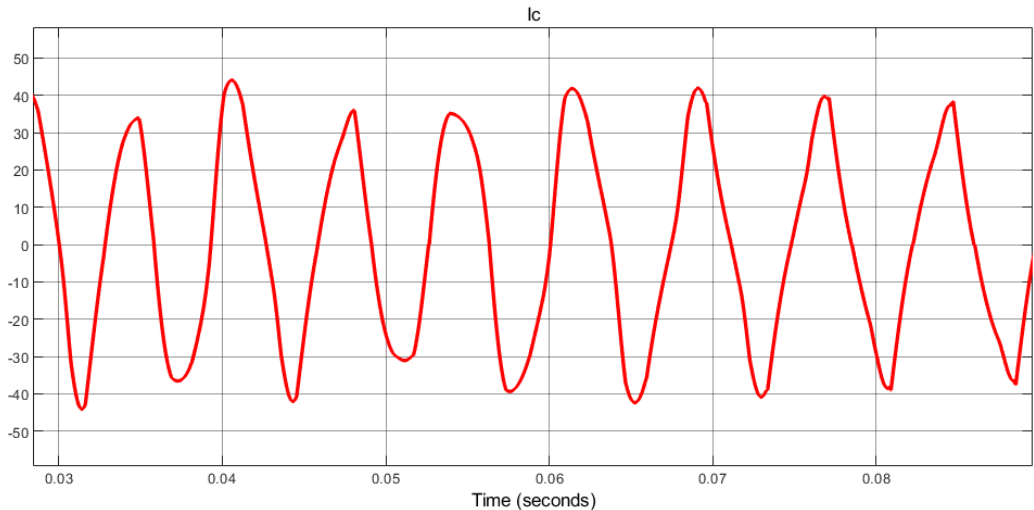
Kemudian RPM dan daya keluaran dari motor BLDC tersebut dapat digunakan untuk menentukan kecepatan maksimum sebesar 27 km/jam dan dengan percepatan kendaraan pada jalan lurus (aspal) sebesar $0,1 \text{ m/s}^2$.



Gambar 4. 16 Half effect current I_a



Gambar 4. 17 Half effect current I_b



Gambar 4. 18 Half effect current I_c

Ketiga sinyal diatas menunjukkan arus dari inverter yang telah menginduksi stator pada motor. Karakteristik sinyal tersebut berbentuk sinyal sinusoidal yang merupakan karakteristik sinyal AC yang tentunya terdapat riak yang ditimbulkan oleh motor. Nilai tertinggi dari arus I_a 44,33 A, untuk arus I_b 49,47 A, arus I_c sebesar 46,47 A.

4.6 Hasil Setelah Perhitungan Baterai

Setelah melakukan perhitungan mengenai spesifikasi baterai yang cocok untuk digunakan dalam kendaraan bermotor, maka didapatkan spesifikasi dalam pasar berdasarkan perhitungan *power* melalui perhitungan dibawah:

$$W_{h, BATT} = P_{BATT} \times t \text{ (hour)} \quad (44)$$

$$W_{h, BATT} = 147,744 \times \frac{1}{6} = 24,624 \text{ Wh} \quad (45)$$

Berdasarkan perhitungan diatas diperoleh spesifikasi baterai dari *datasheet* yang dikeluarkan oleh salah satu produsen baterai lithium-ion yang bernama *Battery Supplies* dengan kode produk D12-7.5. Berikut merupakan tabel parameternya:

Tabel 4. 2 Parameter baterai D12-7.5

Parameter	Nilai
Voltase	12,8 V
Kapasitas	7,5 Ah
Berat	1.1 kg
Arus <i>Discharge</i>	12 A (30 menit)
Voltase <i>Cut-Off</i>	10 V
Arus <i>Charge</i>	≤ 5 A

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi maka dapat diperoleh kesimpulan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Desain kelistrikan dari kendaraan listrik hidrogen *fuel cell* dengan motor BLDC 1000 watt digunakan beberapa komponen kelistrikan seperti konverter dengan topologi *buck boost converter* untuk menaikkan tegangan dari 20 volt ke 48 volt dengan *duty cycle* 0,75, *PID controller* disambungkan pada mosfet dari konverter untuk mengatur *switch* untuk mengatur besaran arus yang masuk menuju *inverter* sesuai yang dibutuhkan oleh motor BLDC, *Inverter* diatur oleh *gate pulse dan commutation logic* untuk mengubah arus DC menjadi AC dan menempatkan pada stator sesuai dengan *Back-EMF*.
2. Daya motor disesuaikan dengan berat dan juga gaya gesek baik dari angin, aspal sehingga didapatkan spesifikasi motor sebesar 1,5 Hp yang juga disesuaikan dengan motor yang ada di pasaran.

5.2 Saran

Saran yang diberikan penulis untuk penelitian ini yang diharapkan dapat memperbaiki dan mengembangkan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Pengujian sistem dilakukan dengan menggunakan *prototype* dengan beban yang lebih kecil dari simulasi
2. Implementasi simulasi desain sistem kelistrikan kendaraan listrik, baiknya dilakukan dalam skala laboratorium agar data yang diperoleh lebih akurat.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR PUSTAKA

- Alvarez-Ramirez, J., & Espinosa-Pã Erez, G. (2002). Stability of current-mode control for DC-DC power converters. In *Systems & Control Letters* (Vol. 45). www.elsevier.com/locate/sysconle
- Anderson, P. M. (Paul M.). (1995). *Analysis of faulted power systems*. IEEE Press.
- Basak, D., Tiwari, A., & Das, S. P. (2006). Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A review. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 3061–3066. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2006.372719>
- Bauman, J., & Kazerani, M. (2008). A comparative study of fuel-cell-battery, fuel-cell-ultracapacitor, and fuel-cell-battery-ultracapacitor vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(2), 760–769. <https://doi.org/10.1109/TVT.2007.906379>
- Chan, C. C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 704–718. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489>
- Chander, S., Agarwal, P. mod, & Gupta, I. (2010). *FPGA-Based PID Controller for DC-DC Converter*.
- Chandrasa, G. T. (2009). *Hydrogen – Fuelcell Electric Motorcyle For Future Alternative Transportation Means*.
- Chandrasa, G. T. (2013). Penelitian Mobil Listrik dengan Fuel Cell Hidrogen Sebagai Sumber Energi. *Enerlink Jurnal Energi Dan Lingkungan*, 9(2), 53–58.
- Chih-Ming, C., & Jheng-Cin, S. (2010). *Performance Analysis of EV Powertrain system with/without transmission*.
- Chomsuwan, K., Prisuwana, P., & Monyakul, V. (2002). Photovoltaic grid-connected inverter using two-switch buck-boost converter. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1527–1530. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2002.1190902>
- Clague, R., Siera, I., & Lamperth, M. (n.d.). *A Novel Hybrid Control Strategy for Maximising Regenerative Braking Capability In a Battery-Supercapacitor Energy Storage System*.
- Dalarsson, N. (1998). *The buck-boost DC/DC converter*. 595–602. <https://doi.org/10.1109/intlec.1998.793605>
- Dancy, A. P., Amirtharajah, R., & Chandrakasan, A. P. (2000). High-efficiency multiple-output DC-DC conversion for low-voltage systems. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 8(3), 252–263. <https://doi.org/10.1109/92.845892>
- Davis, A. J. (1997). *Synergetic Lithium-ion Battery Pack Performance Evaluation*. University of Massachusetts.
- de Doncker, R. W. (2009). *Modern Electrical Drives: Design and Future Trends*. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ipemc.2006.4777944>

- Dey, C., & Mudi, R. K. (2009). An improved auto-tuning scheme for PID controllers. *ISA Transactions*, 48(4), 396–409. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2009.07.002>
- DEY, C., MUDI, R., & LEE, T. (2009). Dynamic Set Point Weighted PID Controller. *Control and Intelligent Systems*, 37(4), 212–219.
- Friedland, R. J., & Speranza, A. J. (2002). *HYDROGEN PRODUCTION THROUGH ELECTROLYSIS*.
Fuel Cell Handbook (Sixth Edition). (2002).
- Hahn, J. H. (2006). Modified sine-wave inverter enhanced. *Power Electronics Technology*, 32(8), 20–22.
- Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (1994). *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. Magna Physics Publishing & Oxford University Press.
- Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. (n.d.). *Fuel Cells : Department of Energy*. Retrieved May 12, 2022, from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- Hydrogen Fuel Cell Engines MODULE 4: FUEL CELL ENGINE TECHNOLOGY CONTENTS*. (n.d.).
- Hydrogen Fuel Cell Vehicles CLIMATE TECHBOOK*. (2011). http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_PEM.shtml
- Kabalo, M., Blunier, B., Bouquain, D., & Miraoui, A. (2010). State-of-the-art of DC-DC converters for fuel cell vehicles. *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010*. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729051>
- Kim, B. G., Tredeau, F. P., & Salameh, Z. M. (2008). *Performance Evaluation of Lithium Polymer Batteries for Use in Electric Vehicles*.
- Kordesch, K., & Simader, G. (1996). Fuel Cells and Their Applications. *Berichte Der Bunsengesellschaft Für Physikalische Chemie Navigation Bar*, 10(11), 1922–1922.
- Krakov, K. I., & Lin, S. (1995, June 24). PI Control of Fan Speed to Maintain Constant Discharge Pressure. *Annual Meeting of the American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE)*.
- Larminie, James., & Dicks, Andrew. (2003). *Fuel cell systems explained*. J. Wiley.
- Lee, S. W., & Management, P. (2014). *Application Report Practical Feedback Loop Analysis for Voltage-Mode Boost Converter*.
- Linden, D., & Reddy, T. (2002). Fuel & Energy Abstracts. In *Handbooks of Batteries* (3rd ed., pp. 265–265).
- Lipman, T., Edwards, J. L., Kammen, D. M., & Lipman, T. E. (2004). FUEL CELL SYSTEM ECONOMICS: COMPARING THE COSTS OF GENERATING POWER WITH STATIONARY AND MOTOR VEHICLE PEM FUEL CELL SYSTEMS. In *Energy Policy* (Vol. 32). <http://www.its.ucdavis.edu/>

- Macahig, N. A. (2020). A 6-Wire 3-Phase Inverter Topology for Improved BLDC Performance and Harmonics. *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 741–744.
- Michal, V. (2016). Three-Level PWM Floating H-Bridge Sinewave Power Inverter for High-Voltage and High-Efficiency Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(6), 4065–4074. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2477246>
- Moawad, A., Singh, G., Hagspiel, S., Fellah, M., & Rousseau, A. (n.d.). *EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium Impact of Real World Drive Cycles on PHEV Fuel Efficiency and Cost for Different Powertrain and Battery Characteristics*.
- Moldrik, P., & Chvalek, R. (2011). PEM fuel cells - The basic characteristics. *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC.EU 2011 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2011.5874673>
- Moldřík, P., & Šebesta, R. (2009). Hydrogen fuel cells as a part of the system for accumulation of electric energy. *2009 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU'09*. <https://doi.org/10.1109/EPQU.2009.5318860>
- P. Moldřík, R. Šebesta, & Z. Hradílek. (2009). Research on fuel cells reliability in order to use in accumulation systems of electric energy. In Radim Bris, Carlos Guedes Soares, & Sebastián Martorell (Eds.), *Reliability, Risk, and Safety, Three Volume Set* (1st ed., Vol. 19, pp. 1671–1675). CRC Press.
- Pinnella, M. J., Wechselberger, E., Hittle, D. C., & Pedersen, C. O. (1986). Self-Tuning Digital Integral Control. *ASHRAE Trans.*, 92(2B).
- Qi, Y., Guo, H., Hector, L. G., & Timmons, A. (2010). Threefold Increase in the Young's Modulus of Graphite Negative Electrode during Lithium Intercalation. *Journal of The Electrochemical Society*, 157(5), A558. <https://doi.org/10.1149/1.3327913>
- Rezaei, N., & Mehran, K. (2019). Dynamic Modelling and Performance Assessment of a Single Battery Electric Vehicle Powertrain System Employing an Induction Motor. *20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 1–8.
- Rezaei, N., & Mehran, K. (2020). *DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF AN OPTIMAL CASCADE CONTROLLER BASED ON REAL-TIME CLOSED-LOOP PID AUTOTUNER FOR BUCK-BOOST CONVERTERS IN EVS*.
- Riezenman, M. J. (1995). The Search for Better Batteries. *IEEE Spectrum*, 32(5), 51–56. <https://doi.org/10.1109/6.381877>
- Sandru, O. (2010, May 19). *New Catalyst for Electrolysis Reduces Costs by 97% and Increases Hydrogen Production Fourfold. The Green Optimistic*. <https://www.greenoptimistic.com/gridshift-electrolysis-catalyst-20100519/#ixzz1FZ6yAAsN>
- Santi, E., Franzoni, D., Monti, A., Patterson, D., Ponci, F., & Barry, N. (2002). A fuel cell based domestic uninterruptible power supply. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power*

Electronics Conference and Exposition - APEC, 1, 605–613.
<https://doi.org/10.1109/apec.2002.989306>

Sreekumar, A., & Jiji, K. S. (2021, May 21). A survey of DC-DC converters for fuel cell electric vehicle applications. *2021 2nd International Conference for Emerging Technology, INCET 2021*. <https://doi.org/10.1109/INCET51464.2021.9456335>

Stephens, D. R. (2009). *Failure Modes and Effects Analysis for Hydrogen Fuel Cell Vehicles-Subtask 1 Final Report*. www.nhtsa.dot.gov

Toliyat, H., Nandi, S., Choi, S., & Meshgin-Kelk, H. (2012). *Electric Machines: Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis*. CRC Press.

U.S. DOE, O. of E. F. C. T. P. (2008, November). *Hydrogen Fuel Cells*. http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/doe_h2_fuelcell_factsheet.pdf

Usman, A., & Rajpurohit, B. S. (n.d.). *Review of Fault Modeling Methods for Permanent Magnet Synchronous Motors and Their Comparison*.

Usman, A., & Rajpurohit, B. S. (2020, October 29). Time-Efficient Fault Diagnosis of a BLDC Motor Drive Deployed in Electric Vehicle Applications. *2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference, GHTC 2020*. <https://doi.org/10.1109/GHTC46280.2020.9342941>

Wang, X. L., Lyu, Y., Song, G. R., Zhang, L. H., & He, C. F. (2021). Theoretical analysis of ultrasonic reflection/transmission characteristics of lithium-ion battery. *Proceedings of the 2020 15th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications, SPAWDA 2020*, 292–296. <https://doi.org/10.1109/SPAWDA51471.2021.9445422>

Wu, L., & Zhang, J. (2015). Ab initio study of anisotropic mechanical properties of LiCoO₂ during lithium intercalation and deintercalation process. *Journal of Applied Physics*, 118(22). <https://doi.org/10.1063/1.4937409>

Xu, H., Ma, G., Sun, C., Wen, X., & Kong, L. (2003). *Implementation of a Bi-directional DC-DC Converter in FCEV*.

Zhansong, Z., & Xuansan, C. (2005). *The Theory and Design of Switching Power Supply*. Publishing House of Electronics Industry.

LAMPIRAN

1. Datasheet BLDC Motor tipe Silencer BS23-23-High Performance

Part Number*		BS23-18HP- <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			BS23-23-HP <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			BS23-28HP <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
Winding Code**		01	02	03	01	02	03	01	02	03
L = Length	inches	1.91			2.41			2.91		
	millimeters	48.5			61.2			73.9		
Terminal Voltage	volts DC	24	36	48	24	36	48	24	36	48
Peak Torque	oz-in	238	287	307	514	637	684	556	681	729
	Nm	1.68	2.03	2.17	3.63	4.50	4.83	3.93	4.81	5.15
Continuous Stall Torque	oz-in	36	35	35	52	53	53	68	69	70
	Nm	0.25	0.25	0.25	0.37	0.37	0.37	0.48	0.49	0.49
Rated Speed	RPM	3000	3881	4198	4022	4800	5151	2796	3368	3628
	rad/sec	314	406	440	421	503	539	293	353	380
Rated Torque	oz-in	32	30	29	40	37	36	58	56	55
	Nm	0.23	0.21	0.20	0.28	0.26	0.25	0.41	0.40	0.39
Rated Current	Amps	3.7	2.9	2.3	5.9	4.3	3.3	6.1	4.6	3.6
Rated Power	watts	71	86	90	119	131	137	120	140	148
Torque Sensitivity	oz-in/amp	9.11	11.02	13.71	7.26	9.38	11.76	10.06	12.94	16.37
	Nm/amp	0.064	0.078	0.097	0.051	0.066	0.083	0.071	0.091	0.116
Back EMF	volts/KRPM	6.74	8.15	10.14	5.37	6.94	8.70	7.44	9.57	12.10
	volts/rad/sec	0.064	0.078	0.097	0.051	0.066	0.083	0.071	0.091	0.116
Terminal Resistance	ohms	0.90	1.36	2.13	0.33	0.52	0.82	0.43	0.68	1.06
Terminal Inductance	mH	0.86	1.26	1.98	0.34	0.57	0.90	0.48	0.79	1.25
Motor Constant	oz-in/sq.rt.watt	9.60	9.45	9.39	12.64	13.0	13.0	15.34	15.69	15.90
	Nm/sq.rt.watt	0.068	0.067	0.066	0.089	0.092	0.092	0.108	0.111	0.112
Rotor Inertia	oz-in-sec ² x10 ⁻³	0.99	0.99	0.99	1.50	1.50	1.50	1.90	1.90	1.90
	g-cm ²	69.9	69.9	69.9	105.9	105.9	105.9	134.1	134.1	134.1
Weight	oz	15	15	15	21	21	21	26	26	26
	g	426	426	426	596	596	596	738	738	738
# of Poles		8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
Timing		120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°	120°
Mech. Time Constant	ms	1.5	1.6	1.6	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1
Electrical Time Constant	ms	0.96	0.93	0.93	1.03	1.10	1.10	1.12	1.16	1.18
Thermal Resistivity	deg. C/watt	5.9	5.7	5.2	4.6	4.5	4.9	4.0	4.0	4.2
Speed/Torque Gradient	rpm/oz-in	14.7	15.1	15.3	8.5	8.0	8.0	5.7	5.5	5.4

2. Datasheet Baterai Cyclic Batteries Lithium-Ion Batteries

Ref.	Terminals	Voltage (V)	Capacity (Ah)	Dimensions (mm)			Weight (kg)	Discharge current (A)		Cut-off voltage (V)	Charge current (A)	Serial/Parallel conf.	Suitable charger*
				Length	Width	Height		Max. (30min)	Peak (3S)				
D12-7.5	T1	12,8	7,5	151	65	93	1,1	12	30	10	≤5	/	LIT/04.01.0052
D12-12	T2	12,8	12	151	99	95	1,6	12	60	10	≤6	≤ 4S or ≤ 4P	LIT/04.01.0053
D12-20	M5	12,8	20	181	76	166	3,0	25	60	10	≤10	≤ 4S or ≤ 4P	LIT/04.01.0053
D12-30N	M8	12,8	30	175	175	112	3,9	30	50	10	≤15	/	LIT/04.01.0053
D12-40	M6	12,8	40	197	135	172	5,4	30	50	10	≤20	/	LIT/04.01.0080
D12-50	M6	12,8	50	196	166	174	6,5	50	170	10	≤25	≤ 4P	LIT/04.01.0080
D12-75	M6	12,8	75	260	168	213	9,8	50	150	10	≤40	≤ 4S or ≤ 4P	LIT/04.01.0043
D12-100	M8	12,8	100	318	165	215	12,0	100	350	10	≤50	≤ 4P	LIT/04.01.0043
D12-125	M8	12,8	125	318	165	215	14,7	100	350	10	≤60	≤ 4S or ≤ 4P	LIT/04.01.0043
D12-200	M8	12,8	200	484	170	241	25,0	100	350	10	≤80	≤ 4S or ≤ 4P	LIT/04.01.0043
D12-300	M8	12,8	300	520	268	221	38,0	200	450	10	≤150	≤ 4S or ≤ 4P	LIT/04.01.0043
D24-10	M5	25,6	10	181	77	167	2,9	15	40	20	≤5	/	LIT/04.01.0008
D24-20	M6	25,6	20	197	135	172	5,1	20	50	20	≤10	/	LIT/04.01.0054
D24-50	M8	25,6	50	318	165	215	12,0	50	130	20	≤25	≤ 4P	LIT/04.01.0046
D24-100	M8	25,6	100	484	170	241	24,5	175	300	20	≤50	≤ 4P	LIT/04.01.0046
D36-100	M8	38,4	100	520	269	220	37,3	50	200	30	≤50	≤ 4P	LIT/04.01.0049
D48-10	Anderson	51,2	10	175	136	145	9,1	10	75	40	≤5	≤ 4P	LIT/04.01.0137
D48-20	Anderson	51,2	20	238	146	165	9,1	20	115	40	≤10	≤ 4P	LIT/04.01.0137
D48-25	M8	51,2	25	318	165	215	12,2	50	115	40	≤12.5	≤ 4P	LIT/04.01.0070
D48-50	M8	51,2	50	484	170	241	24,5	50	150	40	≤25	≤ 4P	LIT/04.01.0056
D48-75	M8	51,2	75	520	269	221	37,7	100	350	40	≤40	≤ 4P	LIT/04.01.0134

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Pamekasan, 29 Maret 2000, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK-IT Al-Uswah Pamekasan, SD *Plus* Nurul Hikmah Pamekasan, SMP *Plus* Nurul Hikmah Pamekasan dan SMAN 1 Pamekasan. Setelah lulus dari SMAN tahun 2018, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Elektro FTEIC - ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 07111840000033.

Di Departemen Teknik Elektro Penulis aktif di beberapa kegiatan Pelatihan yang diselenggarakan oleh Departemen, Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATEKRTO) seperti LKMM-TD dan juga partisipasi dalam proyek dari lab KE untuk instalasi PV di tambak udang.