

**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS PERANCANGAN DAN SIMULASI KONVERTOR  
PENAIK TEGANGAN PADA SISTEM JARINGAN LISTRIK  
MIKRO ARUS SEARAH (JLMAS)**

**SKRIPSI**

**ADITYA KURNIAWAN**

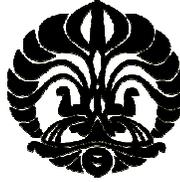
**0806330655**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS PERANCANGAN DAN SIMULASI KONVERTOR  
PENAIK TEGANGAN PADA SISTEM JARINGAN LISTRIK  
MIKRO ARUS SEARAH (JLMAS)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana**

**ADITYA KURNIAWAN**

**0806330655**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**JULI 2012**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

**ANALISIS PERANCANGAN DAN SIMULASI KONVERTOR  
PENAIK TEGANGAN PADA SISTEM JARINGAN LISTRIK  
MIKRO ARUS SEARAH (JLMAS)**

Yang dibuat sebagai salah satu syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 9 Juli 2012

Penulis,



Aditya Kurniawan

NPM. 0806330655

**HALAMAN PENGESAHAN**

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Aditya Kurniawan  
NPM : 0806330655  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisis Perancangan Dan Simulasi Konverter  
Penaik Tegangan Pada Sistem Jaringan Listrik  
Mikro Arus Searah (JLMAS)

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

**DEWAN PENGUJI**

Pembimbing : Dr. -Ing Eko Adhi Setiawan S.T., M.T. (.....)

Penguji : Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA. (.....)

Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M.T. (.....)

Ditetapkan di : Ruang Sidang Multimedia A, DTE FTUI

Tanggal : 5 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karenadengan rahmat dan karunia-Nya lah penulis dapat menyelesaikan buku skripsi ini. Mulai dari proses pembelajaran dan analisa yang telah dijalani dan proses penyusunan dari buku skripsi ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. -Ing Eko Adhi Setiawan S.T., M.T., selaku pembimbing skripsi yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material, moral, dan tenaga
3. Bapak Ir. Budiyanto, MT., selaku mahasiswa S3 di Teknik Elektro UI yang telah mendukung dan mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
4. Teman-teman satu bimbingan ataupun satu angkatan dngan saya yang telah banyak membantu: Leonardo, Gilbert, Kalmin, Saut, Sulun, Roni, Ainul, Yunan, dan Atar ; dan
5. Seluruh keluarga besar Civitas Akademika Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia yang telah banyak membantu saya dan tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmupengetahuan.sehingga penulisan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Depok, 9 Juli 2012

Penulis,



Aditya Kurniawan  
NPM.0806330655

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

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

Nama : Aditya Kurniawan  
NPM : 0806330655  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**ANALISIS PERANCANGAN DAN SIMULASI KONVERTOR PENAIK  
TEGANGAN PADA SISTEM JARINGAN LISTRIK MIKRO ARUS  
SEARAH (JLMAS)**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 9 Juli 2012  
Yang menyatakan



Aditya Kurniawan

## ABSTRAK

Nama : Aditya Kurniawan  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisis Perancangan Dan Simulasi Konverter Penaik Tegangan Pada Sistem Jaringan Listrik Mikro Arus Searah (JLMAS)  
Pembimbing : Dr. -Ing Eko Adhi Setiawan S.T., M.T.

Riset-riset tentang energi terbarukan saat ini semakin lama semakin berkembang. Hal ini membuat adanya sistem Jaringan Listrik Mikro (JLM) semakin terasa cocok untuk menjadi solusi. JLM terbagi dalam dua katagori yaitu jaringan listrik mikro arus bolak – balik dan jaringan listrik mikro arus searah. Perkembangan jenis beban dalam rumah tangga seperti, komputer, lampu hemat energi, lampu led, dan peralatan elektronika lain membuat jaringan listrik mikro arus searah mudah di terapkan. Konverter penaik tegangan merupakan peralatan yang penting dalam sistem jaringan listrik mikro arus searah. Konverter berfungsi sebagai penaik tegangan dari sumber energi terbarukan ke jaringan listrik mikro. Konverter yang digunakan dalam jaringan listrik mikro arus searah biasanya dibuat khusus sesuai dengan karakteristik jaringan, yang meliputi parameter tegangan dan daya yang dibutuhkan, sehingga desain peralatan ini membutuhkan waktu yang panjang dan biaya yang mahal. Dalam penelitian ini akan dijabarkan bagaimana merancang suatu konverter penaik tegangan agar menghasilkan performa yang andal dari konverter tersebut. Lalu akan digunakan inverter sebagai konverter penaik tegangan yang penerapannya akan lebih efisien, karena peralatan ini sudah tersedia di pasaran sehingga mudah diterapkan. Inverter yang digunakan pada penelitian ini jenis inverter merk Augen dengan spesifikasi input 12 Vdc, output 220-240 V, output daya 600 VA. Konverter ini menghasilkan penaik tegangan dari 12 Vdc ke 253 Vdc, dengan gelombang riak yang dihasilkan sangat kecil sehingga kualitas dayanya sangat baik.

Kata kunci: jaringan listrik mikro arus searah, inverter, dan konverter penaik tegangan.

## ABSTRACT

Name : Aditya Kurniawan  
Study Program : Teknik Elektro  
Title : Analysis of Design and Simulation of Boost Converter for DC  
Microgrids System  
Supervisor : Dr. -Ing Eko Adhi Setiawan S.T., M.T.

Research on renewable energy is currently more developed. This makes the microgrids system is increasingly felt right to be a solution. Microgrids is divided into two categories, AC microgrids and DC microgrids. Development of the type of load in such household, computer, energy saving lamps, LED lamps, and other electronic equipment make DC microgrids easily applied. Boost converter is an essential piece of equipment in the DC microgrids system. Converter serves as a booster of voltage from renewable energy sources into the microgrids. Converters are used in DC microgrids usually tailor made to suit the characteristics of the network, which includes the parameters of voltage and power needed, so the design of this equipment requires a lengthy and expensive. In this study we will clarify how to design a boost converter to produce reliable performance of these converters. Then be used inverter as a boost converter application would be more efficient, because the equipment is already available on the market so easily applied. Inverter used in this study with the type of inverter brand Augen with 12 Vdc input, output is 220-240 V, output power of 600 VA. This converter generates a booster voltage of 12 Vdc to 253 Vdc, with the resulting ripple waves are so small that its quality is very good.

Key words: DC microgrids, inverter, and boost converter.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 TUJUAN .....	2
1.3 BATASAN MASALAH .....	2
1.4 METODOLOGI PENELITIAN .....	3
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN .....	3
BAB 2 LANDASAN TEORI .....	5
2.1 SISTEM JARINGAN LISTRIK MIKRO .....	5
2.2 JARINGAN LISTRIK MIKRO ARUS SEARAH DAN ARUS BOLAK-BALIK .....	6
2.2.1 JARINGAN LISTRIK MIKRO ARUS BOLAK BALIK (JLMABB) .....	7
2.2.2 JARINGAN LISTRIK MIKRO ARUS SEARAH (JLMAS) .....	9
2.3 INVERTOR .....	11
2.3.1 PRINSIP KERJA INVERTOR .....	13
2.3.2 PARAMETER PERFORMA INVERTOR .....	17
2.3.2.1 Harmonic factor dari harmonisa ke-n ( $HF_n$ ) .....	17
2.3.2.2 Total Harmonic Distortion (THD) .....	17
2.3.2.3 Distortion factor (DF) .....	17
2.3.2.4 Lowest-order harmonic (LOH) .....	18
2.3.3 JENIS-JENIS INVERTOR .....	18
2.3.3.1 Invertor Gelombang Persegi .....	18
2.3.3.2 Invertor Gelombang Persegi yang Dimodifikasi .....	19
2.3.3.3 Invertor Gelombang Sinusoidal Murni .....	19
2.4 KONVERTOR .....	20
2.4.1 KONVERTOR PENAIK TEGANGAN (BOOST CONVERTER) .....	20
2.4.2 PRINSIP KERJA KONVERTOR PENAIK TEGANGAN .....	21
2.4.3 CONTINUOUS CONDUCTION MODE (CCM) .....	22

BAB 3 PERANCANGAN KONVERTOR PENAIK TEGANGAN.....	25
3.1 PERANCANGAN KONVERTOR PENAIK TEGANGAN .....	25
3.1.1 PENENTUAN BESARNYA INDUKTANSI DAN KAPASITANSI .....	26
3.1.2 SIMULASI KONVERTOR PENAIK TEGANGAN.....	27
3.1.3 SISTEM KENDALI PID .....	28
3.1.4 HASIL SIMULASI.....	29
3.1.4.1 Konverter dengan input 10-15 V menjadi 254 V .....	30
3.1.4.2 Konverter dengan input 10-15 V menjadi 48 V .....	35
3.1.4.3 Konverter dengan input 10-15 V menjadi 24 V .....	38
3.2 MEMODIFIKASI INVERTOR MENJADI KONVERTOR PENAIK TEGANGAN .....	42
3.3 PERALATAN DAN RANGKAIAN PENGUJIAN .....	43
3.3.1 PENGUJIAN TANPA BEBAN.....	45
3.3.2 PENGUJIAN DENGAN TEGANGAN VARIABEL DAN BEBAN TETAP 20 W .....	46
3.3.3 PENGUJIAN KARAKTERISTIK MAKSIMUM KONVERTOR PENAIK TEGANGAN .....	46
BAB 4 PENGUKURAN.....	47
4.1 PENGUJIAN TANPA BEBAN.....	47
4.2 PENGUJIAN DENGAN TEGANGAN VARIABEL DAN BEBAN TETAP 20 W .....	48
4.3 PENGUJIAN KARAKTERISTIK MAKSIMUM KONVERTOR PENAIK TEGANGAN .....	49
4.3.1 BEBAN N BUAH LAMPU PIJAR 100 W .....	49
4.3.2 BEBAN N BUAH LAMPU HEMAT ENERGI 20 W .....	50
4.3.3 BEBAN N BUAH LAMPU PIJAR 60 W .....	51
4.4 ANALISIS DATA.....	52
4.4.1 PENGUJIAN TANPA BEBAN.....	52
4.4.2 PENGUJIAN DENGAN TEGANGAN VARIABEL DAN BEBAN TETAP 20 W .....	52
4.4.3 PENGUJIAN KARAKTERISTIK MAKSIMUM KONVERTOR PENAIK TEGANGAN .....	53
4.4.4 ANALISIS TERHADAP HASIL SIMULASI.....	54
BAB 5 KESIMPULAN.....	55
DAFTAR REFERENSI .....	56

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skema sederhana sistem JLM .....	5
Gambar 2.2. Konsep jaringan listrik mikro.....	7
Gambar 2.3. Sebuah JLM yang disuplai oleh turbin angin dan sel surya .....	8
Gambar 2.4. Antarmuka sistem inverter.....	8
Gambar 2.5. Sistem Jaringan DC Tegangan Rendah.....	10
Gambar 2.6. Sistem Jaringan DC Tegangan Menengah .....	10
Gambar 2.7. Skema Sederhana Prinsip Kerja Inverter .....	11
Gambar 2.8. Gelombang keluaran inverter sederhana.....	12
Gambar 2.9. Single-phase half-bridge inverter.....	14
Gambar 2.10. Single-phase full-bridge inverter.....	16
Gambar 2.11. Gelombang keluaran inverter berbentuk persegi .....	19
Gambar 2.12. Gelombang keluaran inverter berbentuk persegi yang dimodifikasi .....	19
Gambar 2.13. Gelombang keluaran inverter berbentuk sinusoidal murni.....	20
Gambar 2.14. Skema Konverter Penaik Tegangan.....	21
Gambar 2.15. Skema Prinsip Kerja Konverter Penaik Tegangan Saat Saklar $t_{on}$ .....	21
Gambar 2.16. Skema Prinsip Kerja Konverter Penaik Tegangan Saat Saklar $t_{off}$ .....	22
Gambar 2.17. Continuous Conduction mode: (a) saklar on; (b) saklar of .....	24
Gambar 3.1. Hubungan <i>duty cycle</i> dan penguatan input <i>boost converter</i> .....	26
Gambar 3.2. Rangkaian dalam sub-sistem konverter penaik tegangan .....	28
Gambar 3.3. Blok Diagram PID.....	29
Gambar 3.4. Simulai Konverter Penaik Tegangan dengan PID untuk Output 254 V .....	29
Gambar 3.5. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 10 V.....	31
Gambar 3.6. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 11 V.....	31
Gambar 3.7. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 12 V.....	31
Gambar 3.8. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 13 V.....	32
Gambar 3.9. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 14 V.....	32
Gambar 3.10. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 15 V... 32	32
Gambar 3.11. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 10 V.....	33
Gambar 3.12. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 11 V.....	33
Gambar 3.13. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 12 V.....	33
Gambar 3.14. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 13 V.....	34
Gambar 3.15. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 14 V.....	34
Gambar 3.16. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 15 V.....	34

Gambar 3.17. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 10 V.....	36
Gambar 3.18. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 11 V.....	36
Gambar 3.19. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 12 V.....	36
Gambar 3.20. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 13 V.....	37
Gambar 3.21. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 14 V.....	37
Gambar 3.22. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 15 V.....	37
Gambar 3.23. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 10 V.....	39
Gambar 3.24. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 11 V.....	39
Gambar 3.25. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 12 V.....	39
Gambar 3.26. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 13 V.....	40
Gambar 3.27. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 14 V.....	40
Gambar 3.28. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 15 V.....	40
Gambar 3.29. Skema modifikasi inverter sebagai konverter [12].....	43
Gambar 3.30. Inverter merk Augen.....	44
Gambar 3.31. Rangkaian dalam inverter.....	44
Gambar 3.32. Inverter yang telah dimodifikasi menjadi konverter.....	45
Gambar 3.33. Rangkaian pengujian tanpa beban.....	46
Gambar 3.34. Rangkaian pengujian dengan beban tetap.....	46
Gambar 3.35. Rangkaian pengujian karakteristik maksimum konverter.....	46
Gambar 4.1. Grafik Hasil Pengujian Tanpa Beban.....	47
Gambar 4.2. Grafik Hasil Pengujian Dengan Beban 20 W.....	48
Gambar 4.3. Grafik Hasil Pengujian Dengan Lampu Pijar 100 W.....	49
Gambar 4.4. Grafik Hasil Pengujian Dengan Beban Lampu Hemat Energi 20 W.....	51
Gambar 4.5. Grafik Hasil Pengujian Dengan Beban Lampu Pijar 60 W.....	51

**DAFTAR TABEL**

Tabel 3.1. Data hasil simulasi konverter penaik tegangan.....	41
Tabel 4.1. Data hasil pengujian tanpa beban .....	47
Tabel 4.2. Data hasil pengujian dengan beban tetap 20 W .....	48
Tabel 4.3. Data hasil pengujian dengan beban lampu pijar 100 W.....	49
Tabel 4.4. Data hasil pengujian dengan beban n buah lampu hemat energi 20 W .....	50
Tabel 4.5. Data hasil pengujian dengan beban n buah lampu pijar 60 W.....	51



## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Semakin mahalannya harga Bahan Bakar Minyak (BBM) saat ini disebabkan keterbatasan dari kesediaan BBM itu sendiri. Kenaikan harga BBM yang tidak diikuti dengan kenaikan daya beli masyarakat akan menimbulkan masalah yang sangat kompleks mulai dari masalah ekonomi, sosial dan keamanan. Untuk mengurangi beban penggunaan BBM, ada beberapa energi alternatif yang sekarang banyak dilakukan riset baik dari segi harga keekonomiannya maupun dari segi keefektifannya.

Sekarang ini mulai banyak penelitian tentang energi terbarukan (*renewable energy*) seperti tenaga angin, tenaga surya, tenaga mikrohidro, dll. Banyak keuntungan yang diperoleh dari energi terbarukan diantaranya adalah aspek ramah lingkungan. Namun, ada beberapa alasan yang mengapa energi ini masih sedikit diterapkan dari total energi yang dikonsumsi masyarakat dunia, termasuk Indonesia. Diantaranya alasan tersebut adalah masih mahalannya biaya investasi awal yang sulit dijangkau oleh masyarakat Indonesia yang notabene memiliki daya beli yang relatif rendah.

Tidak hanya masalah investasi awal, masalah pengoperasian dan pengendaliannya juga perlu perlakuan khusus dibanding dengan pembangkit listrik yang konvensional. Sumber energi terbarukan sangat fluktuatif dan sulit diprediksi secara pasti, sehingga tenaga yang dihasilkanpun akan ikut berfluktuatif terhadap waktu. Sebagai contoh tenaga angin, kecepatan angin akan berubah-ubah sangat cepat terhadap waktu, sehingga jika dirubah menjadi listrik akan menghasilkan output yang fluktuatif baik tegangan, frekuensi maupun power.

Sedangkan di pihak user (pelanggan), kestabilan tegangan dan frekuensi sangat diharapkan. Sehingga diperlukan pengendali yang baik dan andal. Sedangkan untuk mengatasi ketidakpastian daya yang dihasilkan, diperlukan sumber tenaga lain seperti pembangkit listrik tenaga diesel yang diparalel dengannya sehingga sistem seperti ini sering disebut *Hybrid Wind-diesel power generation*. Selain diesel, ada beberapa alternatif lain yang dapat dikoneksikan

dengan sistem tersebut diantaranya adalah tenaga surya, *fuel cell*, mikrohidro, dll. Sehingga jika sistem tersebut membentuk suatu jaringan kecil, itulah yang disebut Jaringan Listrik Mikro (JLM) atau biasa dikenal dengan sebutan *microgrids*, dimana masing-masing sumber pembangkit tersebut juga mempunyai karakteristik yang berbeda-beda pula.

JLM ini terdiri dari dua jenis, yakni Jaringan Listrik Mikro Arus Searah (JLMAS) dan Jaringan Listrik Mikro Arus Bolak-balik (JLMABB). Dalam JLMAS, penggunaan konverter penaik tegangan (*boost converter*) adalah sangat penting, karena output yang dihasilkan sumber energi terbarukan tentunya masih perlu disesuaikan dengan tegangan dan daya yang dibutuhkan oleh beban. Oleh karena itu, sangat penting untuk dapat merancang konverter penaik tegangan ini sesuai dengan spesifikasi yang diperlukan agar memiliki keandalan yang tinggi.

## 1.2 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah untuk:

- Perancangan konverter penaik tegangan (*boost converter*) pada kondisi input dan output yang berbeda-beda
- Memodifikasi inverter menjadi konverter penaik tegangan pada sistem JLMAS

## 1.3 Batasan Masalah

Pembahasan pada skripsi ini akan dibatasi pada:

- Tegangan input dari konverter penaik tegangan adalah 10-15 Vdc dengan tegangan keluaran konstan dapat disesuaikan
- Perancangan konverter penaik tegangan ini hanya disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink
- Proses modifikasi inverter menjadi konverter penaik tegangan serta menganalisis keandalannya dilihat dari tegangan keluaran saja

#### 1.4 Metodologi Penelitian

Metode penulisan yang dilakukan dalam menyusun skripsi ini meliputi:

- Melakukan perancangan sebuah konverter dengan menghitung nilai komponen-komponen dalam konverter yang sesuai untuk input dan output yang berbeda-beda
- Melakukan simulasi terhadap hasil perhitungan konverter dengan menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink.
- Memodifikasi sebuah inverter yang dijual umum untuk dijadikan sebuah konverter penaik tegangan
- Melakukan pengujian dengan konverter hasil modifikasi
- Menganalisis hasil perancangan, simulasi, dan hasil percobaan serta membuat kesimpulannya

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan skripsi ini penulis membaginya ke dalam 5 bagian yang terdiri atas:

Bab satu, membahas mengenai latar belakang masalah yang menjelaskan mengapa masalah yang dikemukakan dalam skripsi ini dianggap penting untuk dibahas, tujuan skripsi yang menjelaskan hal apa saja yang ingin dicapai lewat penulisan skripsi ini, batasan masalah yang menjelaskan parameter-parameter yang menjadi pembatas dalam pembahasan yang dilakukan, metodologi penulisan yang menjelaskan langkah-langkah yang akan dikerjakan dalam penulisan skripsi ini, dan yang terakhir sistematika penulisan yang menggambarkan sistematis keseluruhan penulisan skripsi ini. Bab dua yang berisi landasan teori membahas konsep dan prinsip dasar mengenai seperti apa sistem JLM, tipe-tipe pada JLM, serta dasar-dasar inverter dan konverter yang dibutuhkan untuk memecahkan masalah dalam penelitian dan untuk membentuk hipotesis bila diperlukan. Landasan teori berupa uraian deskriptif dan matematis yang berkaitan dengan permasalahan yang dibahas.

Bab tiga membahas mengenai perancangan suatu konverter penaik tegangan serta disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab. Pada simulasi ini dibahas seperti apa perancangan dan penerapannya dalam simulasi untuk melihat keandalan dari konverter yang dirancang. Lalu dibahas pula tahap-tahap dalam memodifikasi inverter hingga menjadi konverter penaik tegangan serta rangkaian uji yang dilakukan untuk menguji konverter hasil modifikasi ini untuk dilihat keandalannya, data-data yang dibutuhkan dalam penulisan skripsi ini, dan analisis singkat untuk merumuskan tindakan-tindakan apa yang akan diambil untuk membuat konverter ini.

Bab empat membahas mengenai data hasil percobaan yang dilakukan pada konverter penaik tegangan yang merupakan hasil modifikasi dari inverter ini, lalu seperti apa analisisnya jika konverter ini digunakan dalam sistem jaringan listrik mikro arus searah. Bab lima membahas kesimpulan skripsi berisikan pernyataan singkat dan tepat yang merupakan rangkuman dari hasil studi dan penelitian yang dilakukan dalam skripsi ini.

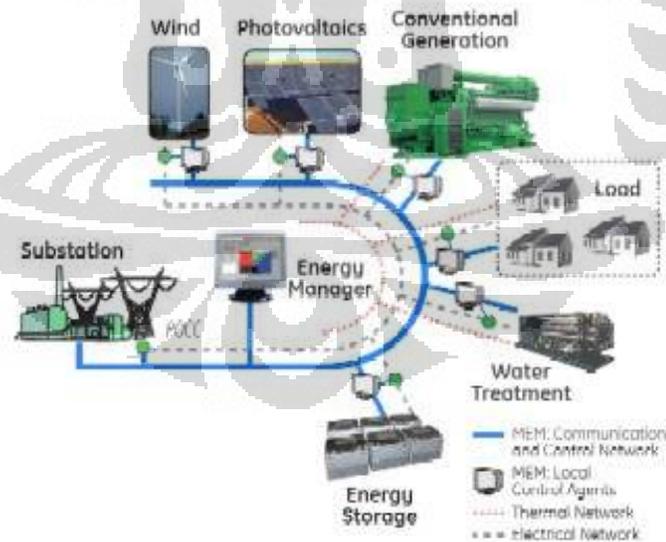
## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Sistem Jaringan Listrik Mikro

Ekonomi, teknologi, dan lingkungan telah mengubah pola pembangkitan dan penyaluran energi listrik kekinian. Pola pembangkitan energi listrik sudah mulai berubah dari pola tersentralisasi menjadi pola yang lebih kecil, pola terdistribusi, karena adanya rugi-rugi secara ekonomi yang cukup besar.

Jaringan Listrik Mikro (JLM) merupakan salah satu contoh pola pembangkitan terdistribusi yang dapat melingkupi berbagai macam sumber energi, mulai dari sumber fosil, maupun sumber energi terbarukan seperti angin, surya, biogas, dan sebagainya. Secara definisi JLM merupakan sistem interkoneksi beban dan berbagai macam sumber energi yang terdistribusi. Sebagai satu sistem, JLM dapat beroperasi parallel dengan sistem interkoneksi yang lebih besar atau beroperasi mandiri. JLM merupakan bagian dari suatu sistem utama yang memiliki keunggulan pengaturan terhadap dirinya sendiri, sehingga apabila terjadi gangguan pada sistem utama, JLM masih dapat menjalankan fungsi pembangkitan dan penyaluran sendiri untuk melayani bebannya.



Gambar 2.1. Skema sederhana sistem JLM [1]

Akibat adanya keterbatasan secara ekonomi maupun kondisi geografis, sistem penyaluran listrik tersentralisasi belum dapat melingkupi semua daerah

yang membutuhkan. Dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan lokal yang tersedia di masing-masing daerah, JLM dapat dijadikan suatu solusi untuk mewujudkan daerah mandiri energi bagi daerah yang tidak terjangkau listrik. Isu utama dari struktur JLM adalah antarmuka, pengaturan, dan proteksi untuk masing-masing sumber energi yang mungkin ada di lokal, serta pengaturan tegangan, aliran daya, proteksi, stabilitas operasi dan sebagainya. Karakteristik yang berbeda-beda dari masing-masing sumber energi terbarukan dan juga kondisi potensi sumber energi yang dapat dimanfaatkan dari daerah juga menjadi tantangan untuk mewujudkan ide ini.

Kondisi geografi kepulauan di Indonesia mengemukakan fakta bahwa belum semua daerah di Indonesia mendapatkan fasilitas listrik yang disediakan pemerintah. Di sisi lain sumber daya alam di Indonesia dirasa masih cukup melimpah untuk dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Namun sumber energi tersebut pada umumnya melimpah di daerah-daerah yang cukup jauh dari pusat-pusat keramaian. Disinilah diharapkan konsep JLM ini dapat diterapkan sehingga masing-masing daerah dapat membuat suatu interkoneksi kecil sendiri dengan memanfaatkan potensi alam lokal yang ada di daerah itu sendiri.

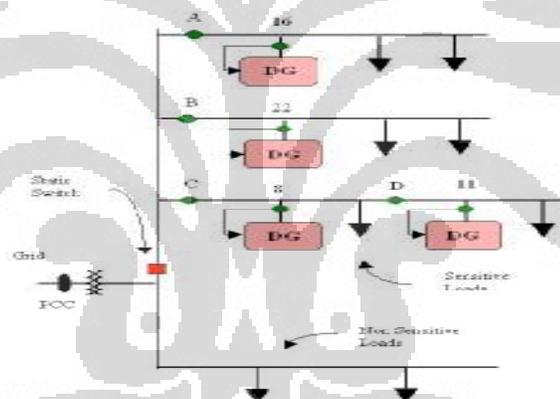
Di dunia, JLM ini belum banyak dikembangkan secara komersil. Maka menjadi tantangan bagi berbagai pihak untuk dapat menerapkan JLM di Indonesia agar terwujudnya konsep daerah mandiri energi.

## **2.2 Jaringan Listrik Mikro Arus Searah dan Arus Bolak-Balik**

Berkembangnya teknologi pembangkitan saat ini cenderung mengubah pola pembangkitan dari tersentralisasi menjadi terdistribusi, hal ini yang menjadikan konsep Jaringan Listrik Mikro mulai dikembangkan dalam sistem kelistrikan di negara-negara berkembang. Sistem Jaringan Listrik Mikro ada dua jenis, yaitu Jaringan Listrik Mikro Arus Bolak-Balik (JLMABB) dan Jaringan Listrik Mikro Arus Searah (JLMAS). JLMABB adalah JLM yang menggunakan bus AC sebagai penghubung sumber dengan beban-beban AC, sedangkan JLMAS menggunakan bus DC.

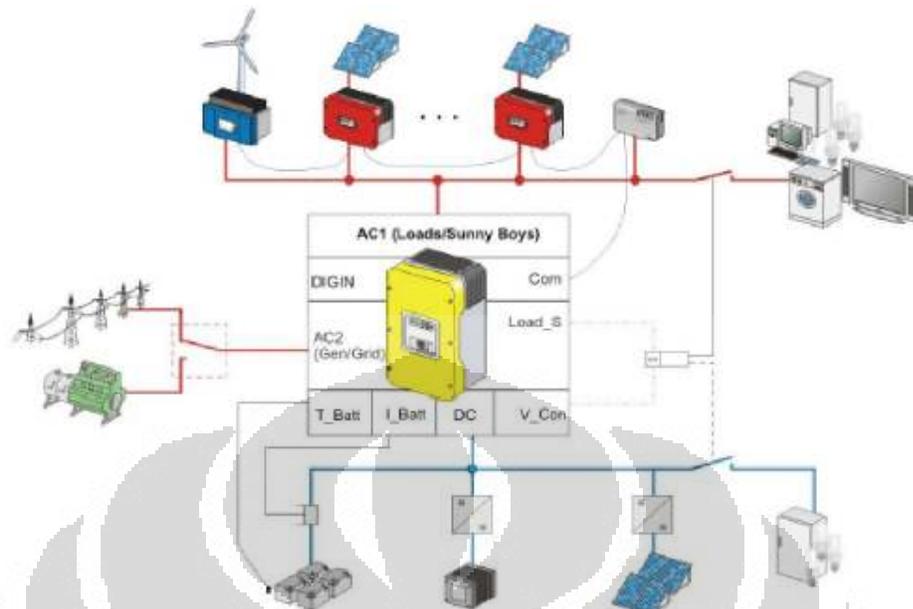
### 2.2.1 Jaringan Listrik Mikro Arus Bolak balik (JLMABB)

Contoh skema dari JLMABB (*AC Microgrids*) dapat di lihat pada gambar 2.2, ada beberapa sumber energi yang terdiri dari sekelompok jaringan radial, yang dapat menjadi bagian dari suatu sistem distribusi atau seperti sistem listrik pada jaringan rumah tangga. Jaringan utama dilengkapi saklar statik (*static switch*) bilamana terjadi gangguan atau terjadi beban puncak pada jaringan distribusi maka saklar statik akan melepas secara otomatis, sehingga JLM akan bekerja secara mandiri. Dalam contoh ini, ada empat sumber energi mikro (*microsources*) di titik 8, 11, 16 dan 22, yang mengendalikan pengoperasian lokal JLM merupakan bagian dari suatu sistem utama yang memiliki keunggulan pengaturan terhadap dirinya sendiri, sehingga apabila terjadi gangguan pada sistem utama, JLM masih dapat menjalankan fungsinya sebagai pembangkit dan penyaluran sendiri untuk melayani bebannya. [2]



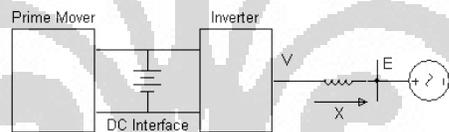
Gambar 2.2. Konsep jaringan listrik mikro [2]

Penggunaan JLM yang terhubung dalam suatu sistem distribusi memerlukan peralatan elektronika daya dan kontrol sistem sehingga JLM dapat berfungsi sebagai jaringan yang andal dan terjaga dari kestabilan sistem. Gambar 2.3 menjelaskan suatu JLM yang disuplai oleh sel surya dan turbin angin yang dilengkapi dengan sumber baterai cadangan. [3]



Gambar 2.3. Sebuah JLM yang disuplai oleh turbin angin dan sel surya [4]

### Kontrol Daya Aktif dan Reaktif JLM



Gambar 2.4. Antarmuka sistem inverter [5]

Model untuk sebuah sumber energi mikro (*microsource*) terdiri dari 3 dasar elemen yaitu : *prime mover*, *DC interface* dan sumber tegangan Inverter.

Sumber tegangan inverter mengontrol *magnitude* dan *tegangan fasa output*. Vektor antara tegangan inverter ( $V$ ) dan tegangan lokal JLM ( $E$ ) dihubungkan dengan reaktansi induktor ( $X$ ) yang akan menentukan aliran daya aktif dan reaktif ( $P$  dan  $Q$ ) dari sumber mikro (*microsource*) ke grid. Magnitude  $P$  dan  $Q$  didapat dari persamaan (2.1).

$P$  tergantung sudut daya ( $\delta$ ) dan  $Q$  tergantung magnitude tegangan inverter ( $V$ ).

$$P = \left( \frac{3 VE}{2 X} \right) \sin \delta_p \dots\dots\dots(2.1)$$

$$Q = \left( \frac{3}{2} \frac{V}{X} \right) (V - E \cos \delta_p) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\delta_p = \delta_V - \delta_E \dots \dots \dots (2.3)$$

### 2.2.2 Jaringan Listrik Mikro Arus Searah (JLMAS)

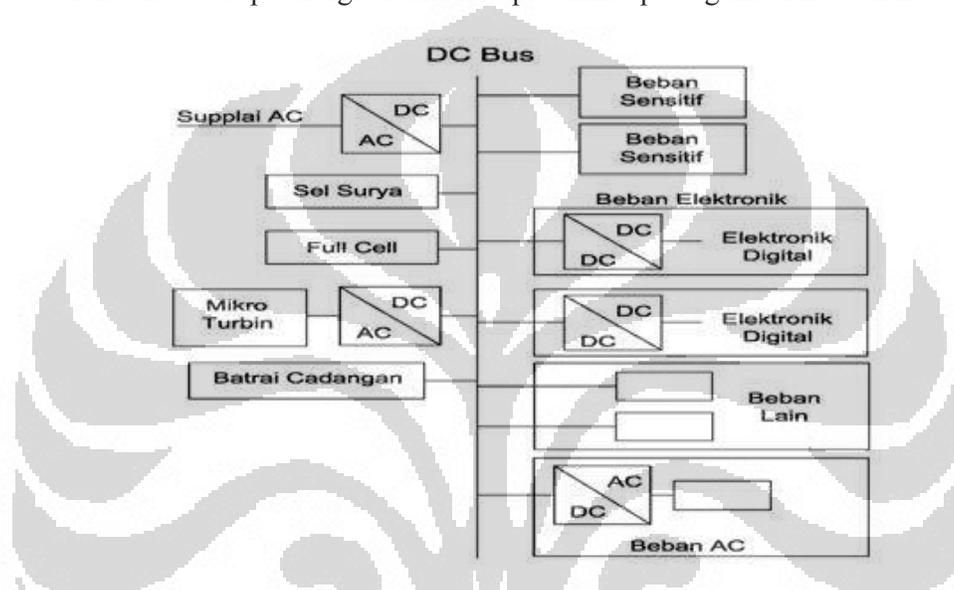
Salah satu riset aplikasi komersial di dunia menggunakan daya listrik tentang sistem pencahayaan adalah cahaya dibuat oleh busur antara dua lapisan tipis karbon yang memberikan cahaya putih yang menyilaukan. Sistem ini dikembangkan pada awal abad ke-19 dan dicatu oleh bateraipada tahun 1850-an dan bukan menggunakan generator. Sistem ini cocok digunakan untuk penerangan jalan, bangunan, industri, dan komersial.

Tahun 1878 di Boston, Thomas A. Edison menemukan lampu busur yang lebih baik yang dapat diaplikasikan di dalam ruang maupun diluar ruang yang tanpa perawatan, dan dia yakin bahwa dia dapat membangun sistem yang lebih baik. Sejak Edison menggunakan daya listrik untuk lampu dan mesin dia memilih arus searah (DC) bukan arus bolak-balik (AC). Edison mengembangkan semua komponen yang diperlukan untuk tegangan rendah arus searah (DC) lengkap dengan sistem distribusi, termasuk sistem feeder. Sistem Edison dibangunsekitar Pearl Street, pusat kota Manhattan, New York dan melayani sekitar satu mil persegi (2,6 km<sup>2</sup>). Meskipun penggunaan sistem tenaga listrik arus bolak – balik meningkat pada abad 20-an, sistem tenaga arus searah (DC) tetap beroperasi.

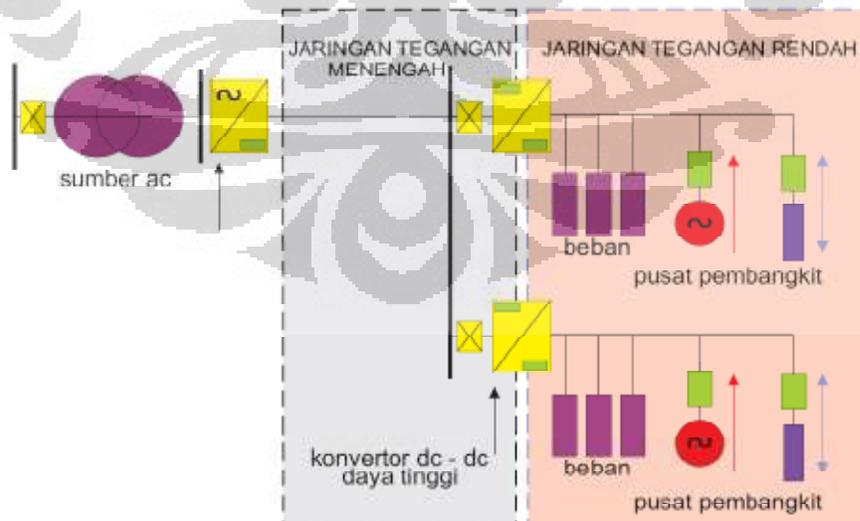
Banyaknya tipe beban yang digunakan dalam kebutuhan rumah tangga maupun perkantoran adalah jenis elektronika, dari beberapa beban menggunakan sistem satu fasa yang menggunakan transformator dan penyearah untuk mengkonversi dari tegangan arus bolak-balik menjadi tegangan arus searah sehingga sesungguhnya yang diperlukan adalah tegangan arus searah. Dalam beberapa peralatan baru, penyearah diberikan langsung oleh sistem arus bolak-balik yang diatur oleh regulator / DC ke DC.

Meskipun tegangan arus bolak-balik (AC) mengalami terobosan besar di awal abad ke-20, Penelitian tentang penggunaan tegangan arus searah telah dikembangkan dalam aplikasi baru seperti sistem transmisi arus searah tegangan

tinggi digunakan (HVDC) dengan tegangan 10-100 kV, sistem HVDC mengalami peningkatan efisiensi dalam pengiriman daya meskipun ada kerugian daya pada sisi konverter, peningkatan ini juga tidak adanya arus reaktif seperti pada sistem arus bolak-balik. Sistem distribusi arus searah pada tegangan rendah banyak digunakan seperti pada sistem telekomunikasi, sistem perkapalan, kereta listrik, dan pada peralatan rumah tangga dan perkantoran. Sistem jaringan listrik arus searah dari beberapa energi alternatif dapat dilihat pada gambar 2.5 dan 2.6.



Gambar 2.5. Sistem Jaringan DC Tegangan Rendah [6]

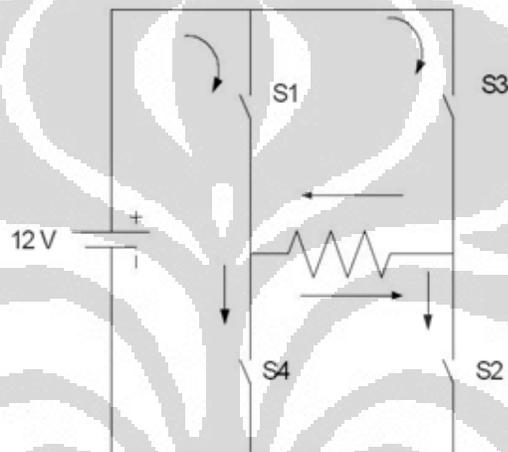


Gambar 2.6. Sistem Jaringan DC Tegangan Menengah [7]

### 2.3 Invertor

Invertor adalah suatu alat elektronik yang berfungsi mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Sumber tegangan input invertor dapat menggunakan baterai, tenaga surya, turbin angin, atau sumber DC yang lain. Tegangan output yang biasa dihasilkan disesuaikan dengan kebutuhan peralatan rumah tangga, yakni 220 V dengan frekuensi 50 Hz.

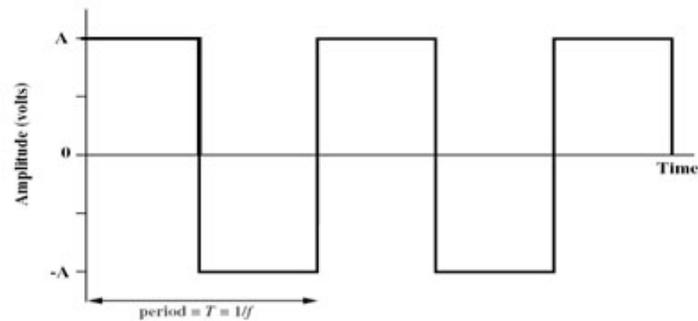
Prinsip kerja dasar dari invertor sederhana secara umum dapat digambarkan dengan empat saklar sebagai berikut.



Gambar 2.7. Skema Sederhana Prinsip Kerja Invertor

Bila sakelar S1 dan S2 yang dihubungkan (kondisi menyala), maka akan mengalir aliran arus searah dari arah kiri ke kanan pada beban sehingga terbentuk tegangan positif. Sedangkan jika sakelar S3 dan S4 yang dihubungkan, maka akan mengalir arus searah dari arah kanan ke kiri pada beban sehingga terbentuk tegangan negatif. Jika kombinasi saklar yang tertutup (closed) ini terus dilakukan secara kontinu, maka yang terjadi adalah arus bolak-balik yang mengalir pada beban.

Pembentukan gelombang yang merupakan hasil ON-OFF keempat saklar tersebut dapat dilihat dari gambar berikut.



Gambar 2.8. Gelombang keluaran inverter sederhana

Dari grafik dapat dilihat bahwa pada pada  $\frac{1}{2}$  periode pertama, saklar S1 dan S2 yang terhubung, maka arus mengalir dari kiri ke kanan pada beban sehingga dihasilkan tegangan positif. Lalu pada  $\frac{1}{2}$  periode kedua, ketika saklar S3 dan S4 yang terhubung, maka arus akan mengalir dari kanan ke kiri pada beban, sehingga dihasilkan tegangan negatif.

Untuk mengatur frekuensi output, inverter dapat mengatur waktu ON-OFF saklar-saklarnya. Contohnya apabila S1 dan S2 terhubung selama 0,5 detik begitu juga dengan S3 dan S4 secara bergantian terus menerus, maka akan dihasilkan gelombang bolak-balik dengan frekuensi 1 Hz.

Bentuk gelombang keluaran dari sebuah inverter ideal seharusnya berupa gelombang sinusoidal. Namun demikian, bentuk gelombang inverter yang digunakan biasanya tidak berupa gelombang sinusoidal dan memuat harmonik-harmonik. Pada aplikasi daya rendah dan daya medium, gelombang tegangan keluaran berbentuk persegi (*square-wave*) dan berbentuk persegi termodifikasi (*quasi-square-wave*) mungkin dapat diterima. Pada aplikasi daya tinggi, bentuk gelombang sinusoidal terdistorsi minimum dibutuhkan. Dengan adanya divais semikonduktor daya berkecepatan tinggi, kandungan harmonisa pada tegangan keluaran dapat diminimalisasi atau dikurangi secara signifikan dengan teknik switching. [8]

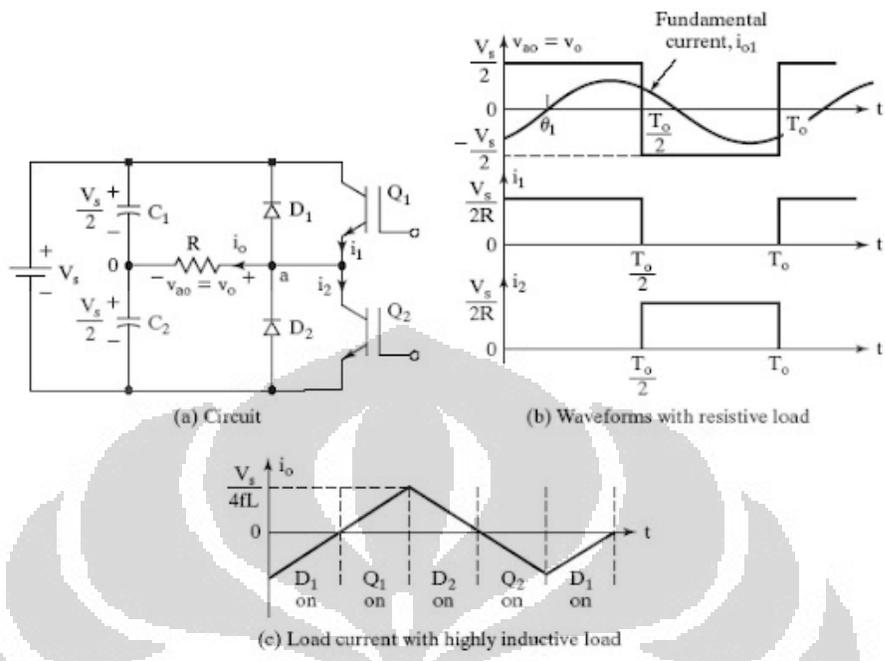
Inverter secara luas digunakan dalam aplikasi-aplikasi industri, seperti *variable speed AC motor drives*, *induction heating*, *standby power supplies*, *uninterruptible power supplies* (UPS). Tegangan keluaran satu fasa secara tipikal diantaranya, 120 V pada frekuensi 60 Hz, 220 V pada frekuensi 50 Hz, dan 115 V pada frekuensi 400 Hz. Untuk sistem daya tiga fasa, tegangan keluaran tipikalnya,

yaitu 220/380 V pada frekuensi 50 Hz, 120/208 V pada frekuensi 60 Hz, dan 115/200 V pada frekuensi 400 Hz.

Inverter secara umum dapat diklasifikasikan kedalam dua tipe, yaitu inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Masing-masing tipe dapat menggunakan devais pengontrol *turn-on* dan *turn-off* (seperti BJT, MOSFET, IGBT, MCT, SIT, dan GTO) atau dengan menggunakan *forced-commutated thyristor* tergantung pada aplikasinya. Secara umum, inverter menggunakan sinyal pengendali PWM untuk menghasilkan tegangan keluaran AC. Sebuah inverter disebut sebagai *voltage fed inverter* (VFI) jika tegangan masukan tetap konstan, *current-fed inverter* (CFI) jika arus masukan dijaga konstan, dan *variable DC linked inverter* jika tegangan masukan dapat dikendalikan.

### 2.3.1 Prinsip Kerja Inverter

Prinsip kerja inverter satu fasa dapat diterangkan dengan gambar 2.9(a), rangkaian inverter ini memuat dua buah *choppers*. Ketika hanya transistor  $Q_1$  yang berkonduksi untuk selang waktu  $T_0/2$ , tegangan yang melewati beban  $v_0$  adalah  $V_s/2$ . Jika transistor  $Q_2$  yang berkonduksi untuk selang waktu  $T_0/2$ , tegangan yang melewati beban adalah  $-V_s/2$ . Rangkaian logika sebaiknya didesain sedemikian sehingga  $Q_1$  dan  $Q_2$  tidak berkonduksi pada waktu yang bersamaan. Gambar 2.9(b) menunjukkan bentuk gelombang untuk tegangan dan arus keluaran untuk beban resistif. Inverter seperti ini dikenal sebagai *single-phase half-bridge inverter*. [8]



Gambar 2.9. Single-phase half-bridge inverter [8]

Tegangan keluaran efektif dapat diperoleh dari persamaan berikut, yaitu :

$$V_o = \left( \frac{2}{T_o} \int_0^{T_o/2} \frac{V_s^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_s}{2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Tegangan keluaran dapat diekspresikan dalam *Fourier series* sebagai :

$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin n\omega t$$

$$= 0 \quad \text{for } n = 2, 4, \dots \dots\dots (2.5)$$

dimana,  $\omega = 2\pi f_0$  adalah frekuensi dari tegangan keluaran dalam rad/s.

Untuk  $n=1$  pada persamaan di atas, nilai efektif untuk komponen fundamentalnya sesuai dengan persamaan berikut, yaitu :

$$V_1 = \frac{2V_s}{\sqrt{2}\pi} = 0,45 V_s \dots\dots\dots(2.6)$$

Untuk beban induktif, arus beban tidak dapat berubah dengan segera bersamaan dengan tegangan keluaran. Jika  $Q_1$  mati pada  $t = T_o/2$ , arus beban akan mengalir melewati  $D_2$ , beban, dan setengah bagian yang lebih bawah dari

sumber arus searah hingga arus bernilai nol. Dengan cara yang sama, ketika  $Q_2$  mati pada  $t = T_0$ , arus beban mengalir melewati  $D_1$ , beban, dan setengah bagian yang lebih atas dari sumber arus searah. Ketika dioda  $D_1$  atau  $D_2$  bekerja, energi dikembalikan menuju sumber arus searah dan dioda ini diketahui sebagai *feedback diodes*. Gambar 2.9(c) menunjukkan interval arus beban dan konduksi dari devais untuk beban induktif murni. [8]

Transistor pada rangkaian sebelumnya dapat diganti dengan GTO atau *forced-commutated thyristor*. Jika  $t_q$  adalah waktu pemutusan tiristor, maka terdapat nilai minimum waktu tunda dari  $t_q$  diantara tiristor *outgoing* dan penyalaan tiristor *incoming* selanjutnya. Jika tidak, akan terjadi hubung singkat antara dua tiristor tersebut. Oleh karena itu, waktu konduksi maksimum dari sebuah tiristor sebaiknya  $T_0 / 2 - t_q$ .

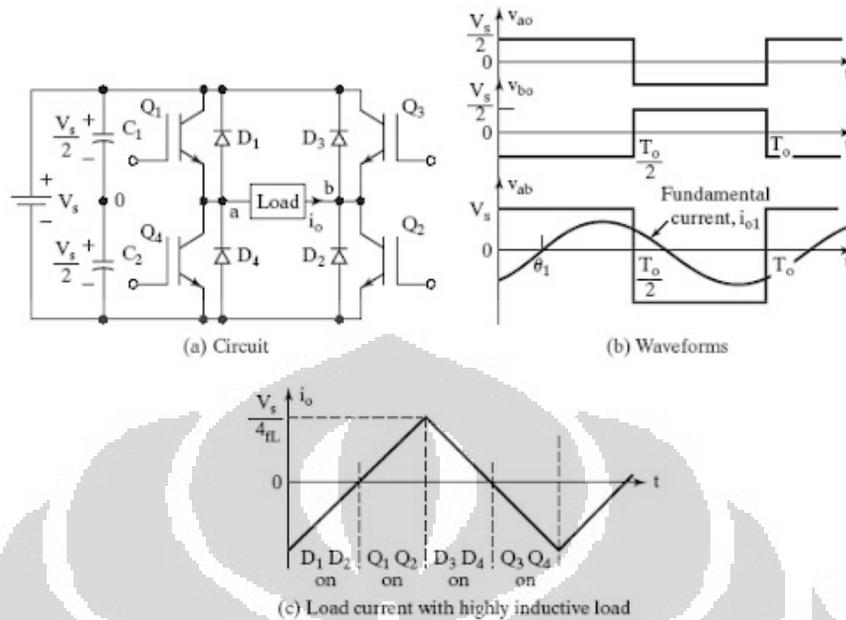
Untuk beban RL, besarnya arus beban  $i_0$  dapat diperoleh dari persamaan berikut, yaitu :

$$i_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \theta_n) \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana,  $\theta_n = \tan^{-1}(\omega L / R)$ . Jika  $I_{01}$  adalah arus beban fundamental efektif, daya keluaran fundamentalnya (untuk  $n = 1$ ) adalah :

$$\begin{aligned} P_{01} &= V_1 I_{01} \cos \theta_1 = I_{01}^2 R \\ &= \left[ \frac{2V_s}{\sqrt{2\pi}\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right]^2 R \quad \dots\dots\dots(2.8) \end{aligned}$$

Rangkaian *single-phase full-bridge inverter* memuat empat buah *choppers* yang ditunjukkan pada gambar 2.10(a). Ketika transistor  $Q_1$  dan  $Q_2$  berkonduksi secara bersama-sama, tegangan masukkan  $V_s$  dihasilkan melewati beban. Jika transistor  $Q_1$  dan  $Q_2$  berkonduksi pada waktu yang bersamaan pula, tegangan yang dihasilkan nilainya menjadi negatif,  $-V_s$ . Bentuk gelombang tegangan keluaran ditunjukkan oleh gambar 2.10(b). [8]



Gambar 2.10. Single-phase full-bridge inverter [8]

Tegangan keluaran efektif dapat diperoleh dari persamaan berikut, yaitu :

$$V_o = \left( \frac{2}{T_o} \int_0^{T_o/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s \tag{2.9}$$

Tegangan keluaran dapat diekspresikan dalam *Fourier series* sebagai :

$$v_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t \tag{2.10}$$

dimana,  $\omega = 2\pi f_0$  adalah frekuensi dari tegangan keluaran dalam rad/s.

Untuk  $n=1$  pada persamaan di atas, nilai efektif untuk komponen fundamentalnya sesuai dengan persamaan berikut, yaitu :

$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2} \pi} = 0,90 V_s \tag{2.11}$$

Untuk beban RL, besarnya arus beban  $i_o$  dapat diperoleh dari persamaan berikut, yaitu :

$$i_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \theta_n) \tag{2.12}$$

dimana,  $\theta_n = \tan^{-1}(n\omega L / R)$ .

Ketika dioda  $D_1$  atau  $D_2$  bekerja, energi dikembalikan menuju sumber arus searah dan dioda ini diketahui sebagai *feedback diodes*. Gambar 2.10(c) menunjukkan interval arus beban dan konduksi dari devais untuk beban induktif murni. [8]

### 2.3.2 Parameter Performa Inverter

Secara praktikal, keluaran inverter memuat harmonisa-harmonisa dan kualitas inverter secara normal dievaluasi melalui parameter-parameter berikut ini, yaitu : [8]

#### 2.3.2.1 Harmonic factor dari harmonisa ke-n ( $HF_n$ )

Faktor harmonisa (dari harmonisa ke-n) merupakan ukuran kontribusi harmonisa diri, sesuai dengan persamaan :

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana  $V_1$  adalah nilai efektif dari komponen fundamental dan  $V_n$  adalah nilai efektif dari komponen harmonisa ke-n.

#### 2.3.2.2 Total Harmonic Distortion (THD)

Distorsi harmonisa total (THD) adalah ukuran kemiripan bentuk antara sebuah gelombang dan komponen fundamentalnya yang didefinisikan oleh persamaan berikut, yaitu :

$$THD = \frac{1}{V_1} \left( \sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.14)$$

#### 2.3.2.3 Distortion factor (DF)

THD memberikan informasi tentang konten harmonisa total, tetapi tidak mengindikasikan level masing-masing komponen harmonisa. Jika sebuah filter digunakan pada keluaran inverter, harmonisa orde tinggi akan dilemahkan (dikurangi) dengan lebih efektif. Oleh karena itu, pengetahuan tentang frekuensi dan magnitudo dari masing-masing harmonisa sangat dibutuhkan. Faktor distorsi menunjukkan sejumlah distorsi harmonisa yang masih tersisa dalam gelombang setelah harmonisa-harmonisa pada gelombang tersebut mengalami pelemahan

orde kedua (misal, dibagi dengan  $n^2$ ). Jadi, DF adalah ukuran efektivitas dari pengurangan harmonisa-harmonisa yang tidak diinginkan tanpa nilai spesifik filter beban orde kedua dan didefinisikan melalui persamaan berikut, yaitu :

$$DF = \frac{1}{V_1} \left[ \sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left( \frac{V_n}{n^2} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2.15)$$

Faktor distorsi untuk harmonisa ke-n diperoleh dari persamaan :

$$DF_n = \frac{V_n}{V_1 n^2} \dots\dots\dots (2.16)$$

#### 2.3.2.4 Lowest-order harmonic (LOH)

Harmonisa orde terendah adalah harmonisa yang frekuensi komponen harmonisanya mendekati komponen fundamentalnya dan amplitudonya lebih besar atau sama dengan 3% dari komponen fundamentalnya.

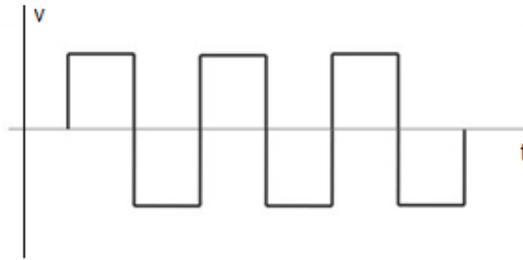
#### 2.3.3 Jenis-jenis Invertor

Jenis-jenis invertor dapat dibedakan menurut beberapa hal diantaranya berdasarkan jenis fasanya, jenis masukkannya, dan bentuk gelombang keluarannya. Berdasarkan bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan, invertor dapat dikelompokkan menjadi tiga macam, yaitu invertor gelombang persegi, invertor gelombang persegi yang dimodifikasi, dan invertor gelombang sinusoidal murni. [8]

Berikut ini penjelasan ketiga macam jenis invertor berdasarkan bentuk gelombangnya tersebut, yaitu :

##### 2.3.3.1 Invertor Gelombang Persegi

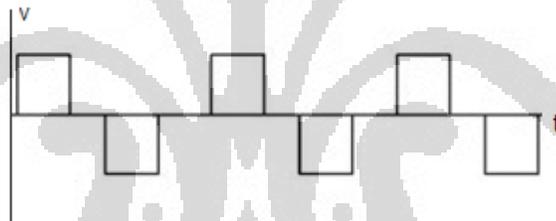
Invertor jenis ini mempunyai kualitas yang buruk meskipun tegangan keluarannya 220 V pada frekuensi 50 Hz. Hal ini disebabkan karena karakteristik keluaran invertor ini memiliki level distorsi harmonisa yang tinggi. Konsekuensinya, invertor ini hanya digunakan untuk pemanas beban resistif yang kecil dan lampu pijar.



Gambar 2.11. Gelombang keluaran inverter berbentuk persegi [8]

### 2.3.3.2 Inverter Gelombang Persegi yang Dimodifikasi

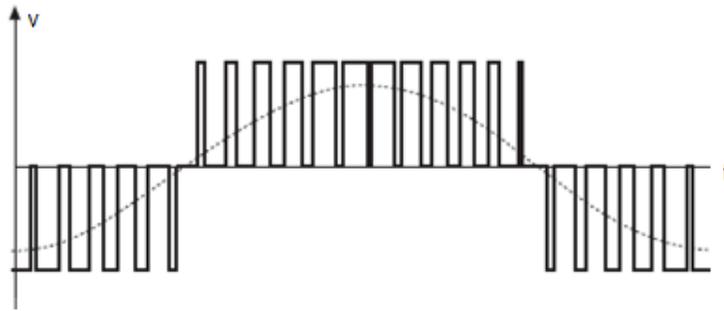
Inverter jenis ini menggunakan *field effect transistors* (FET) atau *silicon-controlled rectifiers* (SCR) untuk sakelar arus searah dan arus bolak balik serta dapat menangani *surge* (pergerakan seperti gelombang) dan menghasilkan daya dengan sedikit distorsi harmonisa. Pada inverter gelombang persegi yang dimodifikasi gelombang keluarannya menyentuh titik nol selama beberapa saat sebelum pindah ke positif atau negatif.



Gambar 2.12. Gelombang keluaran inverter berbentuk persegi yang dimodifikasi [8]

### 2.3.3.3 Inverter Gelombang Sinusoidal Murni

Inverter ini mempunyai keluaran yang gelombangnya hampir menyerupai gelombang sinusoidal pada jaringan listrik PLN, bahkan lebih baik dari segi kestabilan daya listriknya. dengan *total harmonic distortion* (THD) < 3%, sehingga cocok untuk semua peralatan elektronik. Oleh sebab itu, inverter ini disebut juga *clean supply*. Teknologi yang digunakan inverter jenis ini umumnya disebut modulasi lebar pulsa (PWM) yang dapat mengubah tegangan DC menjadi AC dengan bentuk gelombang yang hampir menyerupai gelombang sinusoidal.



Gambar 2.13. Gelombang keluaran inverter berbentuk sinusoidal murni [8]

## 2.4 Konverter

Konverter arus searah ke arus searah (*DC to DC Converter*) adalah peralatan yang dapat mengubah tegangan pada sistem arus searah dari nilai tertentu ke nilai yang lain. Nilai yang diubah pada umumnya menjadi lebih besar ataupun lebih kecil dari nilai sebelumnya. Konverter DC-DC biasanya digunakan untuk aplikasi baterai dan mesin-mesin yang membutuhkan tegangan arus searah yang variabel. Penggunaan Konverter DC-DC memungkinkan untuk menghemat penggunaan baterai jika membutuhkan nilai tegangan tertentu.

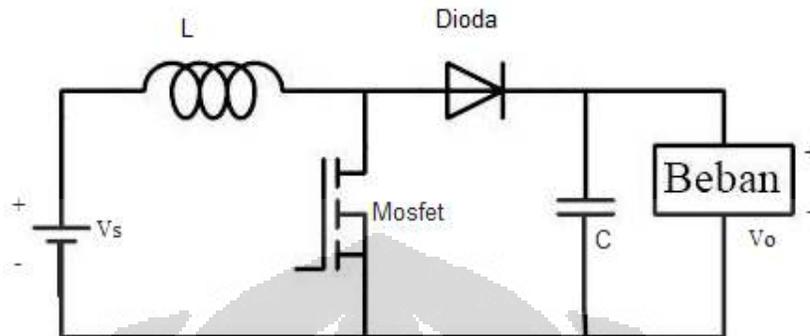
Sistem catu daya yang bekerja dalam mode pensaklaran (*switching*) mempunyai efisiensi yang jauh lebih tinggi dibanding sistem catu daya linier. Oleh karena itu, hampir semua catu-daya modern bekerja dalam mode *switching* atau dikenal sebagai *SMPS (Switched Mode Power Supply)*. Komponen utama dari sistem catu-daya adalah konverter DC-DC yang berfungsi untuk mengkonversikan daya elektrik bentuk DC ke nilai DC lainnya.

Berdasarkan tegangan keluarannya, *DC to DC Converter* terdiri dari tiga jenis, yaitu Konverter Penurun Tegangan (*Buck Converter*), Konverter Penaik Tegangan (*Boost Converter*), dan Konverter Penaik dan Penurun Tegangan (*Buck-Boost Converter*). [9]

### 2.4.1 Konverter Penaik Tegangan (*Boost Converter*)

Konverter penaik tegangan (*boost converter*) adalah salah satu topologi *DC-DC converter* yang digunakan untuk menaikkan tegangan DC. Rangkaian ini digunakan ketika dibutuhkan tegangan keluaran yang lebih besar daripada tegangan masukannya. Komponen utama pada topologi ini adalah induktor,

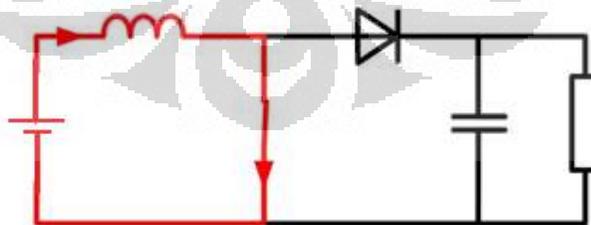
kapasitor, dioda, dan switch (MOSFET). Rangkaian dari Konverter penaik tegangan dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut ini.



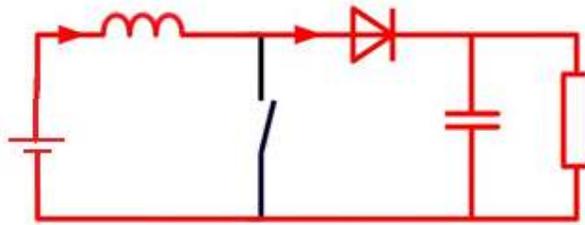
Gambar 2.14. Skema Konverter Penaik Tegangan [9]

#### 2.4.2 Prinsip Kerja Konverter Penaik Tegangan

Kemampuan *boost converter* untuk menaikkan tegangan DC berkaitan dengan prinsip switch duration ( $t_{on}$  dan  $t_{off}$  switch). Jika saklar MOSFET ditutup maka arus di induktor akan naik (energi tersimpan di induktor naik). Saat saklar dibuka maka arus induktor akan mengalir menuju beban melewati dioda (energi tersimpan di induktor turun). Kondisi ini yang menyebabkan tegangan keluaran menjadi lebih besar dibandingkan dengan tegangan masukannya. Rasio antara tegangan keluaran terhadap tegangan masukan konverter sebanding dengan rasio antara periode penyaklaran dan waktu pembukaan saklar. Ciri khas utama konverter ini adalah dapat menghasilkan arus masukan yang kontinu. Skema Prinsip kerja dari konverter penaik tegangan ini ditunjukkan oleh gambar 2.16 berikut



Gambar 2.15. Skema Prinsip Kerja Konverter Penaik Tegangan Saat Saklar  $t_{on}$



Gambar 2.16. Skema Prinsip Kerja Konverter Penaik Tegangan Saat Saklar  $t_{off}$

Dalam operasionalnya, terdapat dua modus operasi untuk *Boost converter*, yaitu *Continuous Conduction Mode* (CCM) dan *Discontinuous Conduction Mode* (DCM). Pada mode CCM, arus induktor tidak pernah jatuh ke nol dalam semua siklus pensaklaran. Sedangkan untuk mode DCM, arus pada induktor akan jatuh ke nol sebelum selesai satu periode pensaklaran.

#### 2.4.3 Continuous Conduction Mode (CCM)

Pada mode ini, kondisi switch ON akan menyebabkan tegangan input ( $V_s$ ) sama dengan tegangan induktor. Kondisi ini menyebabkan terjadinya peningkatan arus yang melewati induktor, perubahan arus yang melewati inductor pada periode waktu tertentu  $t$  dirumuskan:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_s}{L} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana  $V_s$  adalah tegangan masukan konverter

$$\Delta I_{Lon} = \frac{1}{L} \int_0^{DT} V_s dt = \frac{DT}{L} V_s \dots\dots\dots(2.18)$$

Saat switch OFF, menyebabkan energi dalam bentuk arus yang tersimpan pada inductor mengalir ke beban, sehingga perubahan arus induktor dapat dirumuskan:

$$V_s - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana  $V_o$  adalah tegangan keluaran konverter

$$\Delta I_{Loff} = \int_{DT}^T \frac{(V_s - V_o) dt}{L} = \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} \quad \dots(2.20)$$

Karena integral tegangan induktor terhadap waktu pada keadaan tunak untuk jangka waktu tertentu (satu periode) harus 0, maka:

$$V_s \cdot t_{on} + (V_s - V_o)t_{off} = 0 \quad \dots(2.21)$$

$$\Delta I_{Loff} + \Delta I_{Lon} = 0 \quad \dots(2.22)$$

$$\frac{DT}{L} V_s + \frac{(V_s - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad \dots(2.23)$$

Dengan membagi persamaan (2.17) dengan  $T_s$  didapat persamaan:

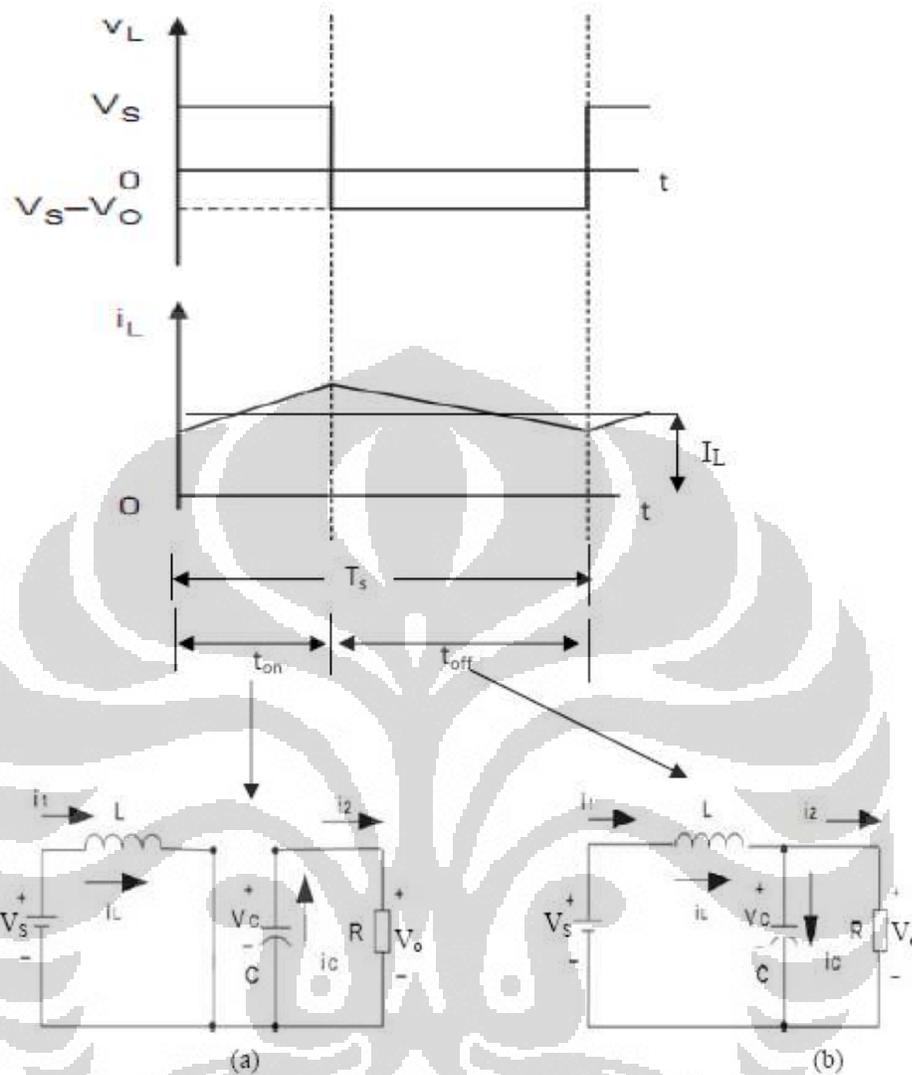
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad \dots(2.24)$$

Jika diasumsikan tidak ada rugi – rugi pada rangkaian ( $P_s = P_o$ ), maka

$$V_s I_s = V_o I_o \quad \dots(2.25)$$

Dan

$$\frac{I_o}{I_s} = (1 - D) \quad \dots(2.26)$$



Gambar 2.17. Continuous Conduction mode: (a) saklar on; (b) saklar off

### BAB 3

#### PERANCANGAN KONVERTOR PENAIK TEGANGAN

Konsep dasar jaringan listrik mikro (*microgrids*) adalah pola pembangkitan terdistribusi yang melingkupi berbagai macam sumber energi, terutama sumber energi terbarukan seperti sel surya, angin, dan biogas. Jaringan listrik mikro merupakan sistem jaringan interkoneksi dari berbagai macam sumber energi yang terdistribusi kedalam suatu jaringan kecil yang dapat beroperasi secara mandiri maupun terhubung ke jaringan jaringan utama (PLN).

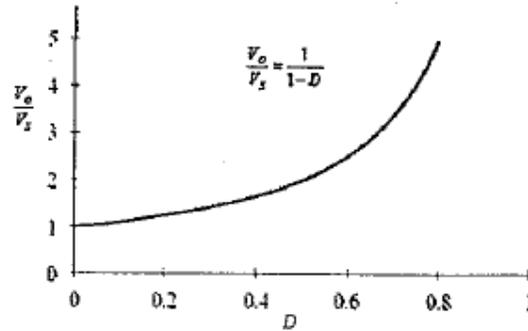
Pada jaringan listrik mikro arus searah (JLMAS), konverter penaik tegangan memiliki peran yang sangat penting mengingat kebutuhan tegangan pada beban, khususnya rumah tangga, yang cenderung memerlukan nilai tegangan tertentu yang tidak selalu sesuai dengan output pada sumber-sumber energi terbarukan yang berada dalam sistem jaringan listrik mikro arus searah. Oleh karena itulah menjadi sangat penting untuk merancang dengan baik sebuah konverter penaik tegangan agar didapat karakteristik yang sesuai dengan jaringan.

#### 3.1 Perancangan Konverter Penaik Tegangan

Dalam perancangan konverter penaik tegangan, perlu diperhatikan persamaan (2.24) yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_s$$

Persamaan ini memiliki arti bahwa penguatan tegangan input hanya bergantung pada lamanya saklar terhubung (*duty cycle*). Karena nilai *duty cycle* selalu lebih kecil daripada 1, maka nilai  $V_o$  dipastikan akan selalu lebih besar dari  $V_i$ . Berikut ini adalah hubungan antara *duty cycle* dengan penguatan yang terjadi.



Gambar 3.1. Hubungan *duty cycle* dan penguatan input *boost converter* [14]

Maka dalam perancangan konverter penaik tegangan ini, diperlukan penyesuaian besarnya *Duty Cycle* ini agar rasio perbandingan tegangan output semakin besar terhadap tegangan input. Sehingga dengan penyesuaian *duty cycle* ini nantinya akan didapat nilai tegangan keluaran yang diharapkan.

Pada perancangan ini digunakan simulasi dengan perangkat lunak Matlab Simulink. Dalam simulasi ini nantinya akan digunakan sistem kontrol *duty cycle* agar didapat tegangan keluaran sesuai dengan yang diharapkan meskipun input yang diberikan tidak konstan.

### 3.1.1 Penentuan Besarnya Induktansi Dan Kapasitansi

Untuk pemodelan konverter yang baik diperlukan perhitungan nilai komponen-komponen yang tepat. Karena nilai komponen yang tidak tepat, dapat menyebabkan hasil keluaran yang kurang baik, seperti keluarnya ripple tegangan dan arus yang terlalu besar. Untuk mendesain rangkaian konverter, perlu ditetapkan beberapa variable seperti frekuensi switching, tegangan output, tegangan input minimum, arus beban, ripple arus, dan ripple tegangan.

Untuk menentukan nilai komponen - komponen untuk konverter penaik tegangan, perlu dilakukan dengan perhitungan menggunakan persamaan – persamaan di berikut bawah ini: [15]

- Perhitungan *Duty Cycle*

$$D = \left( 1 - \frac{V_{in-min}}{V_{out}} \right) \dots\dots\dots(3.1)$$

- Perhitungan Nilai Induktor (L)

$$\Delta i_L = 0.4 \times i_{in} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$L = \frac{1}{f} \times (V_{out} + V_f - V_{in}) \times \left( \frac{V_{in}}{V_{out} + V_f} \right) \times \left( \frac{1}{\Delta i_L} \right) \dots\dots(3.3)$$

- Perhitungan Nilai Kapasitor (C)

$$i_{out} = i_{in} \times \left( \frac{V_{in}}{V_{out} + V_f} \right) \dots\dots\dots(3.4)$$

$$i_{Dpeak} = \frac{i_{out}}{D} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$i_{Drms} = i_{Dpeak} \times \sqrt{D} \dots\dots\dots(3.6)$$

$$i_{crms} = \sqrt{i_{Drms}^2 \times i_o^2} \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\Delta V_o = \text{ripple tegangan output} \times V_o \dots\dots\dots(3.8)$$

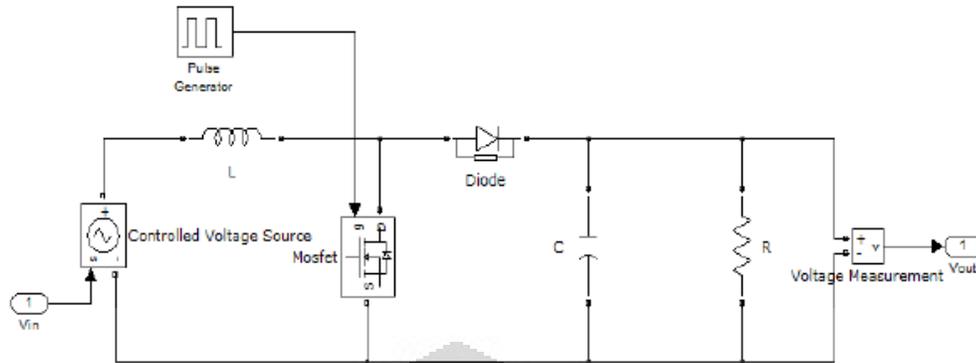
Maka:

$$C = \frac{i_{crms} \times D \times T}{\Delta V_o} \dots\dots\dots(3.9)$$

### 3.1.2 Simulasi Konverter Peningkat Tegangan

Pada skripsi ini, perhitungan yang sudah dijabarkan dalam sub-bab sebelumnya akan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink. *Boost converter* dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibanding tegangan masukannya. Dalam simulasi ini komponen utama penyusun dari *boost converter* ialah induktor, kapasitor, dioda dan MOSFET.

Pada matlab, komponen-komponen penyusun *boost converter* sudah tersedia seperti induktor, kapasitor, dioda, mosfet dan resistor. Sehingga dapat dirangkai modelnya seperti gambar 3.2 di bawah ini.



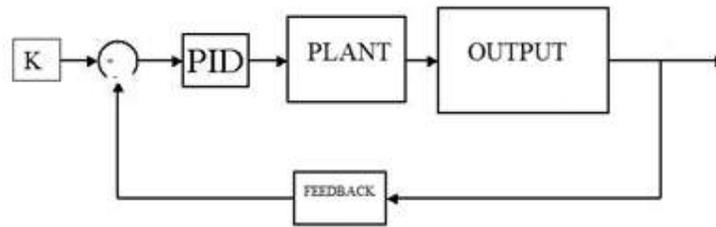
Gambar 3.2. Rangkaian dalam sub-sistem konverter penaik tegangan

### 3.1.3 Sistem Kendali PID

Pada implementasinya, konverter penaik tegangan sangat mungkin untuk menaikkan nilai tegangan dari nilai input yang berubah-ubah. Misalnya saja jika konverter ini digunakan untuk menaikkan tegangan keluaran dari modul surya, jelas tegangan keluaran modul surya akan berubah-ubah berdasarkan intensitas cahaya yang dipancarkan matahari yang juga berubah-ubah karena pengaruh sudut dari matahari itu sendiri. Oleh karena itu, pada simulasi ini, diperlukan sebuah sistem kendali agar konverter penaik tegangan ini dapat dengan andal menghasilkan tegangan yang diinginkan secara konstan.

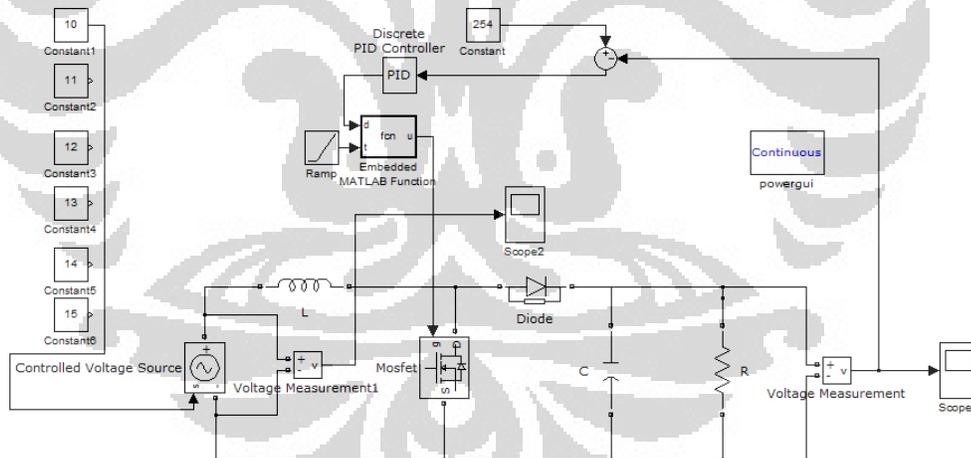
Pada prinsipnya, kendali yang digunakan adalah kendali yang dapat mengatur *duty cycle* dari switch yang ada dalam rangkaian konverter penaik tegangan ini. Karena tegangan keluaran yang ingin dijaga konstan ini adalah fungsi dari *duty cycle* dan tegangan input. Maka jika tegangan input pada konverter ini berubah-ubah, nilai *duty cycle* harus menyesuaikan agar tegangan output yang diharapkan dapat tetap terjaga.

Pada simulasi ini, untuk mengontrol besarnya *duty cycle*, digunakan sistem kendali PID yang merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Komponen kontrol PID ini terdiri dari tiga jenis yaitu Proportional, Integratif dan Derivatif. Ketiganya dapat dipakai bersamaan maupun sendiri-sendiri tergantung dari respon yang diinginkan terhadap suatu plant.



Gambar 3.3. Blok Diagram PID

Namun pada simulasi ini hanya digunakan pengendali PI saja karena sudah cukup untuk menghasilkan simulasi yang baik. Proses ini dapat dilakukan dengan cara trial and error. Keunggulan cara ini adalah tidak perlu mengidentifikasi plant, membuat model matematis plant, menentukan parameter yang tepat dengan grafis ataupun analitis. Cukup dengan cara coba-coba memberikan konstanta PID pada formula PID hingga diperoleh hasil yang diinginkan, dengan mengacu pada karakteristik masing-masing kontrol PID. Sehingga setelah sistem kendali ini diterapkan, rangkaian simulasi akan menjadi seperti gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4. Simulasi Konverter Peningkat Tegangan dengan PID untuk Output 254 V

### 3.1.4 Hasil Simulasi

Setelah rangkaian simulasi ini selesai dibuat, maka konverter peningkat tegangan hasil perancangan ini siap untuk disimulasikan. Sehingga dalam merancang sebuah konverter peningkat tegangan, perlu dicek terlebih dahulu

keandalan konvertornya dengan simulasi ini agar dapat diketahui karakteristik tegangan keluarannya.

### 3.1.4.1 Konverter dengan input 10-15 V menjadi 254 V

Jika ingin membuat sebuah konverter penaik tegangan yang mengubah tegangan dari 10-15 Vdc menjadi 254 Vdc, maka terlebih dahulu dilakukan perhitungan.

Tegangan masukan ( $V_i$ )	:	10-15 volt
Tegangan keluaran ( $V_o$ )	:	254 volt
Periode Switching (T)	:	20 $\mu$ s
Frekuensi (fs)	:	50 kHz
Ripple Tegangan Keluaran	:	0,1 %

- Perhitungan nilai *duty cycle* (D):

$$D = 1 - \frac{10}{254} = 0,961$$

- Perhitungan nilai induktansi:

$$\Delta i_L = 0,4 \times 2,362 \times \left( \frac{254+0,7}{10} \right) = 24,064$$

$$L = \frac{1}{50000} \times (254 + 0,7 - 10) \times \left( \frac{10}{254 + 0,7} \right) \times \left( \frac{1}{24,064} \right) \\ = 0,0799 \mu\text{H}$$

- Perhitungan nilai kapasitansi:

$$i_{out} = 5 \times \left( \frac{10}{254 + 0,7} \right) = 0,1963 \text{ A}$$

$$i_{Dpeak} = \frac{0,1963}{0,961} = 0,2043 \text{ A}$$

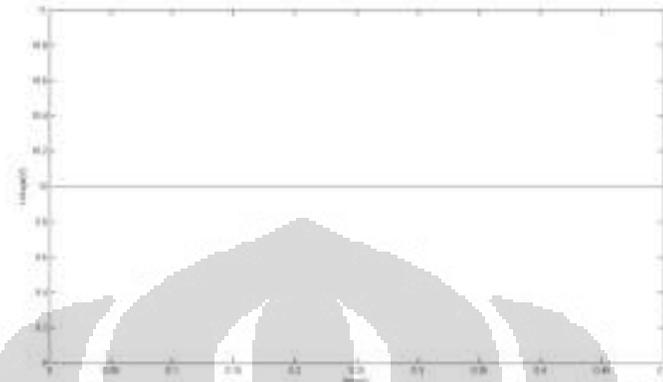
$$i_{Drms} = 0,2043 \times \sqrt{0,961} = 0,2003 \text{ A}$$

$$i_{crms} = \sqrt{0,2003^2 - 0,1963^2} = 0,039$$

$$\Delta V_o = 0,1\% \times 254 = 0,254$$

$$\text{Maka } C = \frac{0,039 \times 0,961 \times 0,00002}{0,254} = 2,95 \mu\text{F}$$

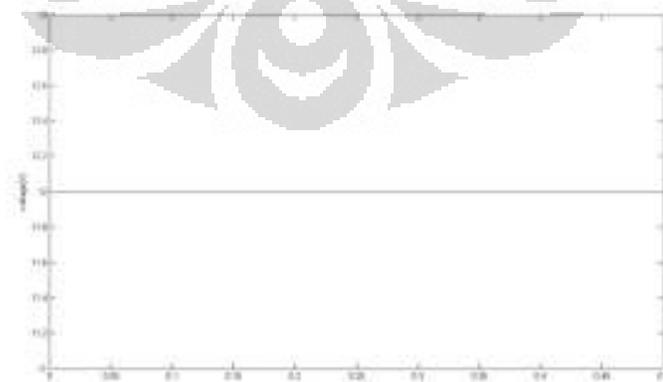
Maka setelah nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam simulasi, akan terlihat bentuk gelombang tegangan inputnya sebagai berikut.



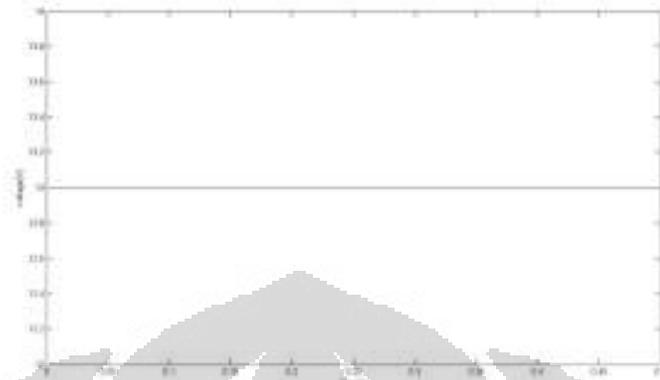
Gambar 3.5. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 10 V



Gambar 3.6. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 11 V



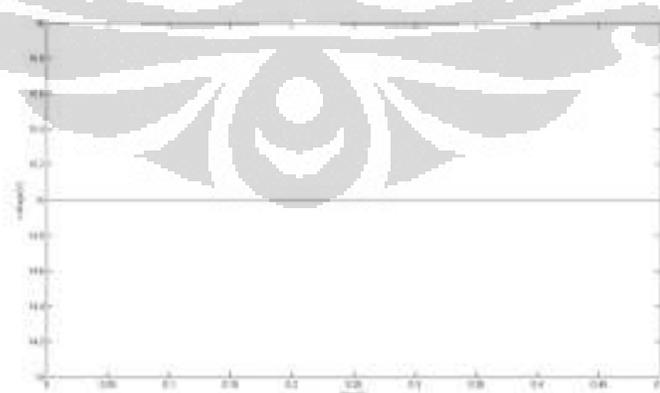
Gambar 3.7. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 12 V



Gambar 3.8. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 13 V

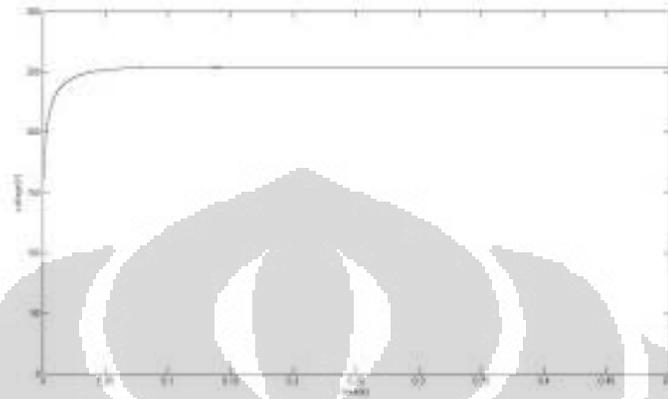


Gambar 3.9. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 14 V



Gambar 3.10. Gelombang Tegangan input Konverter Penaik Tegangan Bernilai 15 V

Dengan tegangan input seperti pada gambar di atas, maka tegangan keluaran yang dihasilkan akan berbentuk seperti gambar berikut.



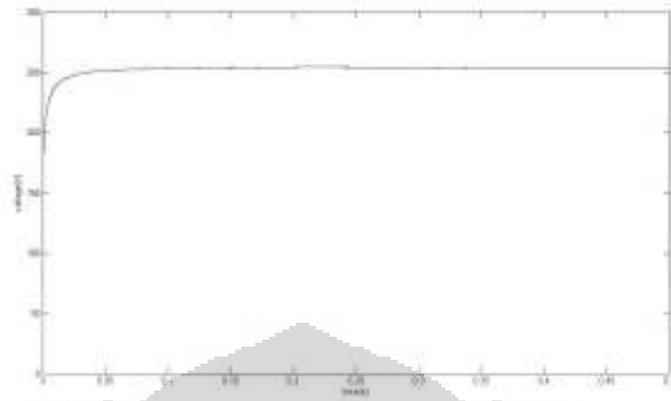
Gambar 3.11. Gelombang Tegangan Output Konvertor Saat diberi input 10 V



Gambar 3.12. Gelombang Tegangan Output Konvertor Saat diberi input 11 V



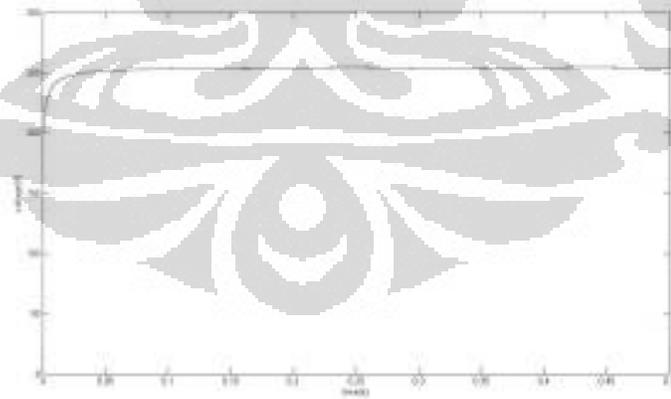
Gambar 3.13. Gelombang Tegangan Output Konvertor Saat diberi input 12 V



Gambar 3.14. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 13 V



Gambar 3.15. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 14 V



Gambar 3.16. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 15 V

### 3.1.4.2 Konverter dengan input 10-15 V menjadi 48 V

Jika ingin membuat sebuah konverter penaik tegangan yang mengubah tegangan dari 10-15 Vdc menjadi 48 Vdc, maka terlebih dahulu dilakukan perhitungan.

Tegangan masukan ( $V_i$ )	:	10-15 volt
Tegangan keluaran ( $V_o$ )	:	48 volt
Periode Switching ( $T$ )	:	20 $\mu$ s
Frekuensi ( $f_s$ )	:	50 kHz
Ripple Tegangan Keluaran	:	0,1 %

- Perhitungan nilai *duty cycle* ( $D$ ):

$$D = 1 - \frac{10}{48} = 0,792$$

- Perhitungan nilai induktansi:

$$\Delta i_L = 0,4 \times 12,5 \times \left( \frac{48+0,7}{10} \right) = 24,35$$

$$L = \frac{1}{50000} \times (48 + 0,7 - 10) \times \left( \frac{10}{48 + 0,7} \right) \times \left( \frac{1}{24,35} \right) = 6,527 \mu\text{H}$$

- Perhitungan nilai kapasitansi:

$$i_{\text{out}} = 60,875 \times \left( \frac{10}{48 + 0,7} \right) = 12,5 \text{ A}$$

$$i_{D\text{peak}} = \frac{12,5}{0,792} = 15,789 \text{ A}$$

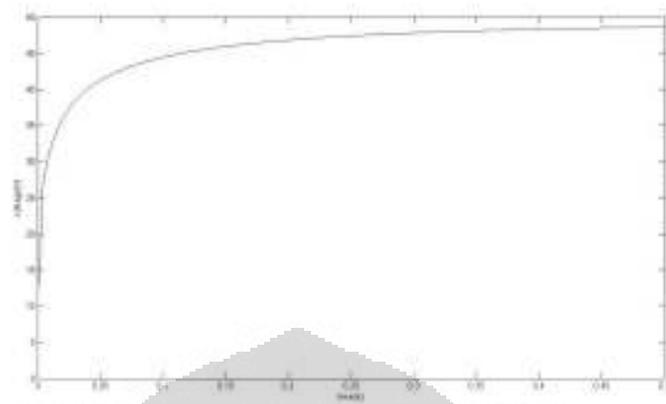
$$i_{D\text{rms}} = 15,789 \times \sqrt{0,792} = 14,049 \text{ A}$$

$$i_{\text{crms}} = \sqrt{14,049^2 - 12,5^2} = 6,412$$

$$\Delta V_o = 0,1\% \times 48 = 0,048$$

$$\text{Maka } C = \frac{6,412 \times 0,792 \times 0,00002}{0,048} = 2,115 \text{ mF}$$

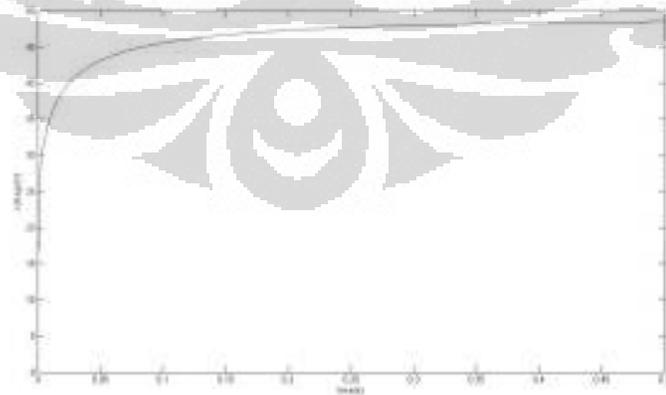
Maka setelah nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam simulasi, akan terlihat bentuk gelombang tegangan inputnya sama seperti gambar 3.5 hingga 3.10. Lalu tegangan keluaran yang dihasilkan akan seperti gambar berikut.



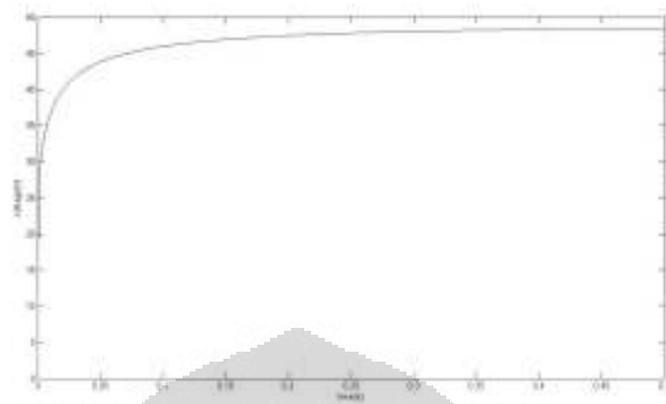
Gambar 3.17. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 10 V



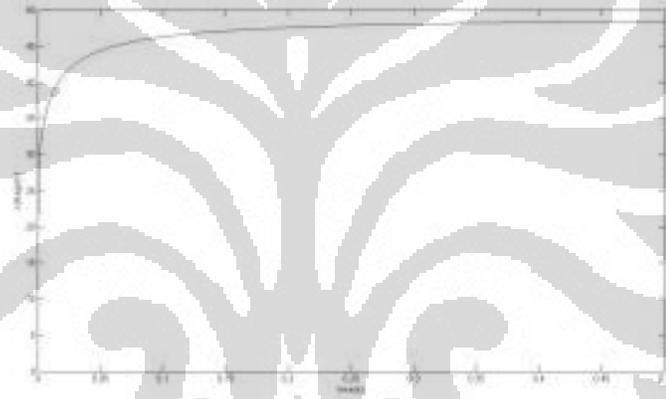
Gambar 3.18. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 11 V



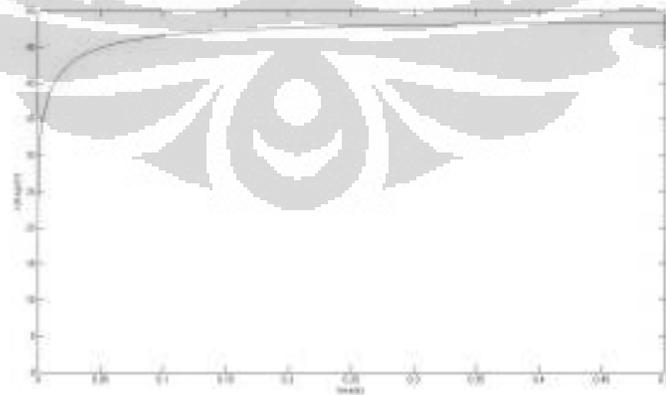
Gambar 3.19. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 12 V



Gambar 3.20. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 13 V



Gambar 3.21. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 14 V



Gambar 3.22. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 15 V

### 3.1.4.3 Konverter dengan input 10-15 V menjadi 24 V

Jika ingin membuat sebuah konverter penaik tegangan yang mengubah tegangan dari 10-15 Vdc menjadi 24 Vdc, maka terlebih dahulu dilakukan perhitungan.

Tegangan masukan ( $V_i$ )	:	10-15 volt
Tegangan keluaran ( $V_o$ )	:	24 volt
Periode Switching ( $T$ )	:	20 $\mu$ s
Frekuensi ( $f_s$ )	:	50 kHz
Ripple Tegangan Keluaran	:	0,1 %

- Perhitungan nilai *duty cycle* ( $D$ ):

$$D = 1 - \frac{10}{24} = 0,583$$

- Perhitungan nilai induktansi:

$$\Delta i_L = 0,4 \times 25 \times \left( \frac{24+0,7}{10} \right) = 24,7$$

$$L = \frac{1}{50000} \times (24 + 0,7 - 10) \times \left( \frac{10}{24 + 0,7} \right) \times \left( \frac{1}{24,7} \right) = 4,819 \mu\text{H}$$

- Perhitungan nilai kapasitansi:

$$i_{out} = 61,75 \times \left( \frac{10}{24 + 0,7} \right) = 25 \text{ A}$$

$$i_{Dpeak} = \frac{25}{0,961} = 42,86 \text{ A}$$

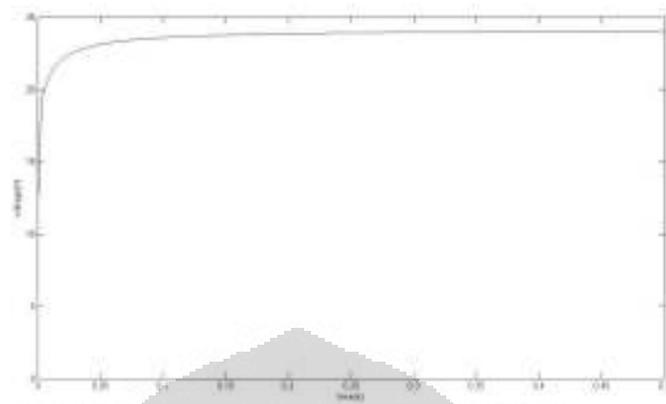
$$i_{Drms} = 42,86 \times \sqrt{0,583} = 32,734 \text{ A}$$

$$i_{crms} = \sqrt{32,734^2 - 25^2} = 21,13$$

$$\Delta V_o = 0,1\% \times 24 = 0,024$$

$$\text{Maka } C = \frac{21,13 \times 0,583 \times 0,00002}{0,024} = 0,0103 \text{ F}$$

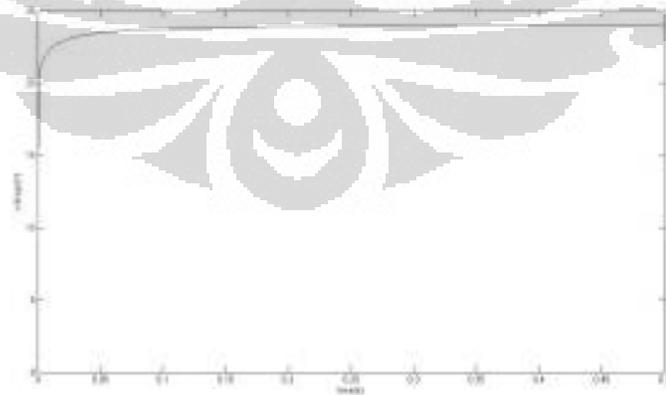
Maka setelah nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam simulasi, akan terlihat bentuk gelombang tegangan inputnya sama seperti gambar 3.5 hingga 3.10. Lalu tegangan keluaran yang dihasilkan akan seperti gambar berikut.



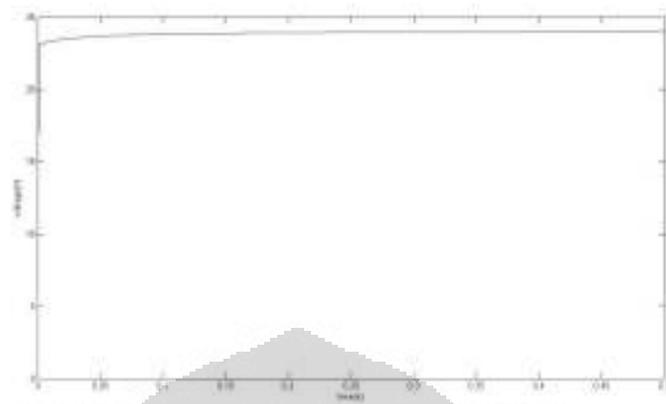
Gambar 3.23. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 10 V



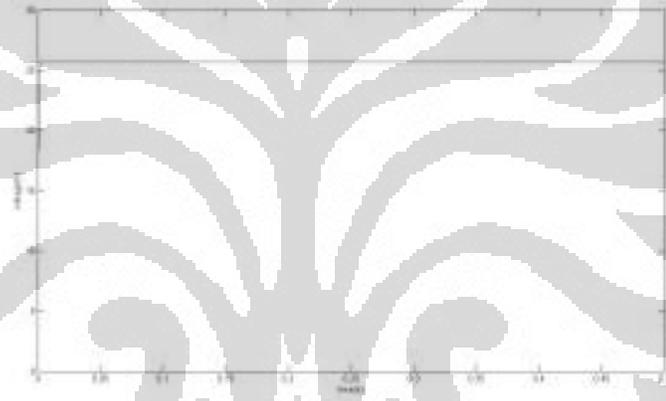
Gambar 3.24. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 11 V



Gambar 3.25. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 12 V



Gambar 3.26. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 13 V



Gambar 3.27. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 14 V



Gambar 3.28. Gelombang Tegangan Output Konverter Saat diberi input 15 V

Dari hasil percobaan simulasi yang dilakukan pada sub-bab 3.1.4.1, 3.1.4.2, dan 3.1.4.3, dapat dilihat hasil simulasi tersebut dapat dirangkum dalam tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1. Data hasil simulasi konverter penaik tegangan

Tegangan Input (Volt)	Tegangan Output (Volt)		
	Simulasi 1	Simulasi 2	Simulasi 3
10	254	48	24
11	254	48	24
12	254	48	24
13	254	48	24
14	254	48	24
15	254	48	24

Pada percobaan 3.1.4.1, dilakukan simulasi menaikkan tegangan 10-15 V dengan konverter hingga menjadi 254 V. Dari grafik hasil simulasi, dapat terlihat bahwa saat diberi tegangan 10-15, konverter ini menghasilkan tegangan keluaran yang konstan. Hanya saja nilainya akan lebih cepat *steady-state* dengan semakin tingginya tegangan input. Dari sini dapat disimpulkan bahwa parameter-parameter hasil perhitungan tersebut cukup baik.

Pada percobaan 3.1.4.2, dilakukan simulasi menaikkan tegangan 10-15 V dengan konverter hingga menjadi 48 V. Dari grafik hasil simulasi, dapat terlihat bahwa saat diberi tegangan 10-15, konverter ini menghasilkan tegangan keluaran yang konstan. Hanya saja nilainya akan lebih cepat *steady-state* dengan semakin tingginya tegangan input. Dari sini dapat disimpulkan bahwa parameter-parameter hasil perhitungan tersebut cukup baik.

Pada percobaan 3.1.4.3, dilakukan simulasi menaikkan tegangan 10-15 V dengan konverter hingga menjadi 24 V. Namun pada simulasi ini, dari grafik hasil simulasi dapat terlihat bahwa saat diberi tegangan 10-13, konverter ini menghasilkan tegangan keluaran yang konstan, namun saat diberi tegangan input 14 dan 15 V maka outputnya akan meningkat. Hal ini terjadi disebabkan sistem kendali PI yang dirancang masih terdapat kekurangan, namun keakuratannya cukup dekat dengan hasil yang diharapkan. Dari sini dapat disimpulkan bahwa parameter-parameter hasil perhitungan tersebut cukup baik.

### 3.2 Memodifikasi Inverter Menjadi Konverter Penaik Tegangan

Peralatan-peralatan rumah tangga yang berbasis *switching* pada umumnya dapat bekerja dengan baik pada tegangan 100 – 240 Vac. Sebuah konverter arus searah dapat bekerja dengan baik apabila bekerja pada skala  $V_{line} \pm 10 - 20 \%$ . Maka dapat dituliskan sebagai berikut: [13]

$$V_{in} (\text{min}) : 0,8 \times 100 \times \sqrt{2} = 113 \text{ V}$$

$$V_{in} (\text{max}) : 1,2 \times 240 \times \sqrt{2} = 405,6 \text{ V}$$

Maka dalam perancangan sebuah konverter penaik tegangan, perlu diperhatikan agar output tegangannya ada pada kisaran 113 – 405,6 V agar beban-beban rumah tangga yang berbasis *switching* ini pun dapat bekerja dengan baik. Pada perancangan ini dipakai output tegangan konverter bernilai 253 V. Hal ini disebabkan karena tegangan ini masuk pada kisaran tegangan yang sesuai dengan perhitungan tersebut, ditambah nilai keluaran konverter bernilai ini mudah didapat, hanya perlu sedikit memodifikasi inverter yang sudah ada di pasaran.

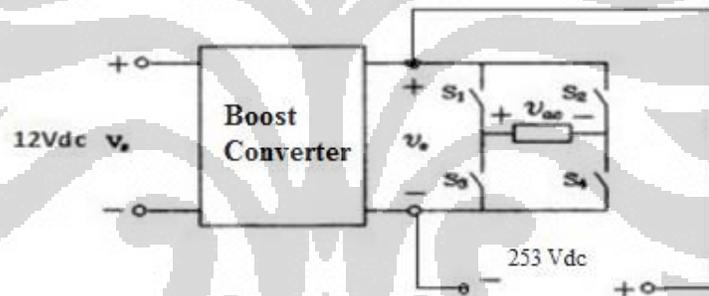
Pada pembuatannya, inverter tentunya tidak selalu memiliki nilai tegangan keluaran bernilai 253 V, karena nilai ini hanya penyesuaian antara nilai yang dibutuhkan dengan ketersediaan alat yang ada di pasaran. Jika ingin mengubah hasil output tegangan dari konverter, maka perlu diperhitungkan nilai induktor, kapasitor, dan terutama *Duty Cycle* dalam konverter tersebut. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar dari konverter penaik tegangan (sudah dijelaskan pada bab sebelumnya), dimana pada konverter penaik tegangan ini tegangan meningkat karena ada berbagai faktor di dalamnya.

Perkembangan jenis beban dalam rumah tangga seperti TV, komputer, lampu hemat energi, dan peralatan elektronika lain membuat jaringan listrik mikro arus searah (JLMAS) lebih mudah diterapkan karena beban-beban tersebut memerlukan arus searah (DC). Konverter merupakan komponen yang sangat penting dalam jaringan listrik mikro arus searah, karena konverter mampu mengubah nilai input tegangan menjadi nilai tegangan lain sesuai kebutuhan, termasuk menaikkan tegangan.

Konverter dalam jaringan listrik mikro arus searah biasanya dibuat khusus sesuai dengan karakteristik jaringan, yang meliputi parameter tegangan dan daya yang dibutuhkan, sehingga desain peralatan ini membutuhkan waktu

yang panjang dan biaya yang mahal. Maka dalam praktiknya perlu dirancang konverter penaik tegangan yang lebih sederhana dan mudah serta murah untuk didapatkan. Dalam skripsi ini, digunakan inverter untuk dimodifikasi menjadi konverter penaik tegangan.

Untuk mengetahui kemampuan inverter untuk digunakan sebagai konverter penaik tegangan dalam jaringan listrik mikro arus searah, maka perlu dilakukan sedikit modifikasi dalam rangkaian dalam inverter. Penggunaan inverter sebagai konverter ini dapat dilakukan dengan mengambil rangkaian pada sisi pembangkitan frekuensi tinggi dari tegangan tinggi DC ke AC sebelum di rubah dalam rangkaian AC ke AC. Untuk dapat menentukan rangkaian ini biasanya ditandai dengan rangkaian penyearah yang dilengkapi dengan dioda dan kapasitor yang berkapasitas besar dan tegangan tinggi. Skema uji dari konverter dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Gambar 3.29. Skema modifikasi inverter sebagai konverter [12]

### 3.3 Peralatan dan Rangkaian Pengujian

Dalam pengujian penggunaan inverter sebagai konverter penaik tegangan, digunakan inverter merk Augen yang memiliki kondisi fisik sebagai berikut.

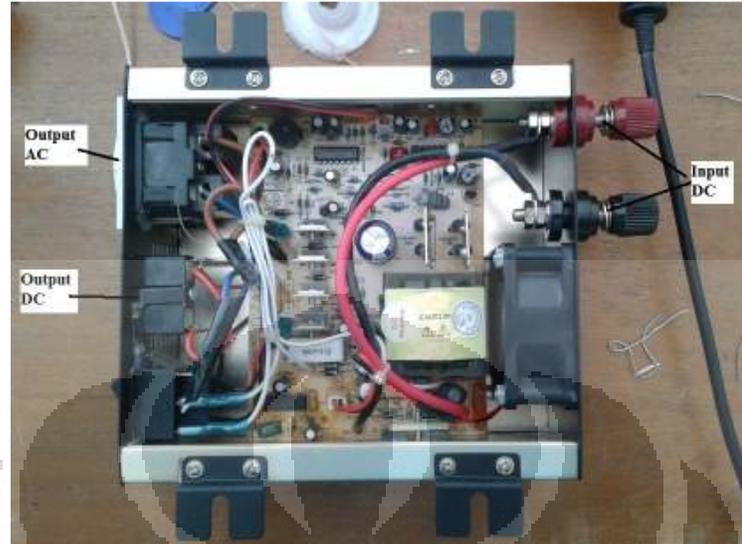


Gambar 3.30. Inverter merk Augen



Gambar 3.31. Rangkaian dalam inverter

Dalam percobaan ini, inverter dimodifikasi dengan menambahkan sambungan tepat sebelum keluaran DC dikonversi menjadi AC dengan menggunakan empat switch seperti yang telah dijelaskan dalam dasar teori. Karena pada prinsipnya, cara kerja inverter adalah meningkatkan tegangan input DC menjadi tegangan yang lebih tinggi, lalu kemudian dengan prinsip empat switch tersebut diubah menjadi output AC.

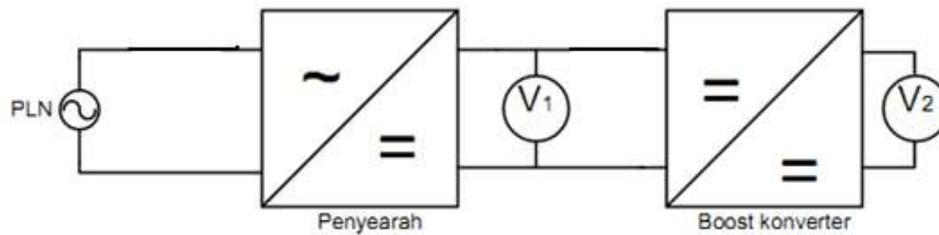


Gambar 3.32. Inverter yang telah dimodifikasi menjadi konverter

Pada gambar 3.32 di atas dapat dilihat bahwa ada dua buah output, yakni DC dan AC. Output AC dapat tetap dipergunakan jika ingin menggunakan inverter biasa, dan output DC jika ingin menggunakan Konverter Penaik Tegangan (*Boost Converter*). Konverter penaik tegangan yang telah jadi inipun perlu diuji untuk melihat karakteristiknya. Maka dalam pengujian ini akan digunakan beberapa model percobaan yang melibatkan konverter penaik tegangan ini.

### 3.3.1 Pengujian Tanpa Beban

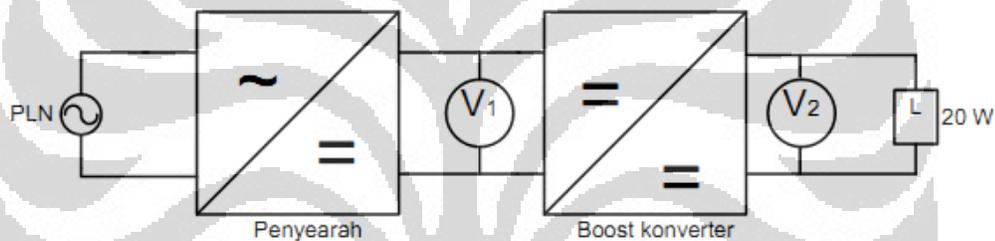
Pengujian ini dilakukan untuk mengecek seberapa besar keluaran dari konverter penaik tegangan jika tidak diberi beban. Sumber tegangan yang digunakan pada pengujian ini adalah dari PLN. Mula-mula, tegangan dari PLN diubah terlebih dahulu agar menghasilkan arus searah yang kemudian nilai keluaran dari penyearah ini dapat diatur untuk dihubungkan ke konverter penaik tegangan. Nantinya akan dilihat seberapa besar pengaruh tegangan input terhadap tegangan output dari konverter penaik tegangan.



Gambar 3.33. Rangkaian pengujian tanpa beban

### 3.3.2 Pengujian dengan Tegangan Variabel dan Beban Tetap 20 W

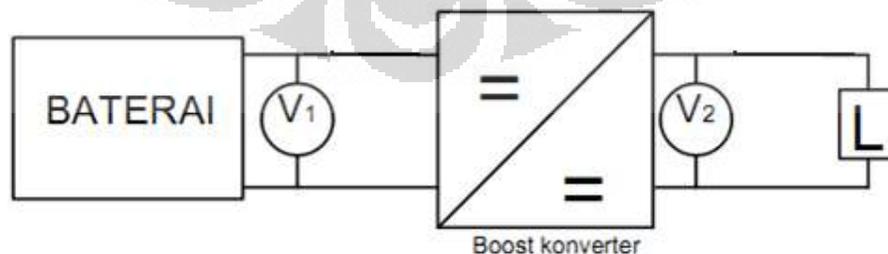
Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui seperti apa karakter tegangan keluaran dari konverter saat diberi beban yang tetap. Rangkaian pengujian ini mirip dengan tanpa beban, hanya saja bedanya pada keluaran konverter diberi beban tetap sebesar 20 W.



Gambar 3.34. Rangkaian pengujian dengan beban tetap

### 3.3.3 Pengujian Karakteristik Maksimum Konverter Penaik Tegangan

Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik maksimum dari konverter ini dalam menaikkan tegangan DC. Nantinya dalam percobaan ini digunakan beban dengan karakteristik berbeda, yakni beban berupa lampu pijar ataupun lampu hemat energi.



Gambar 3.35. Rangkaian pengujian karakteristik maksimum konverter

## BAB 4 PENGUKURAN

### 4.1 Pengujian Tanpa Beban

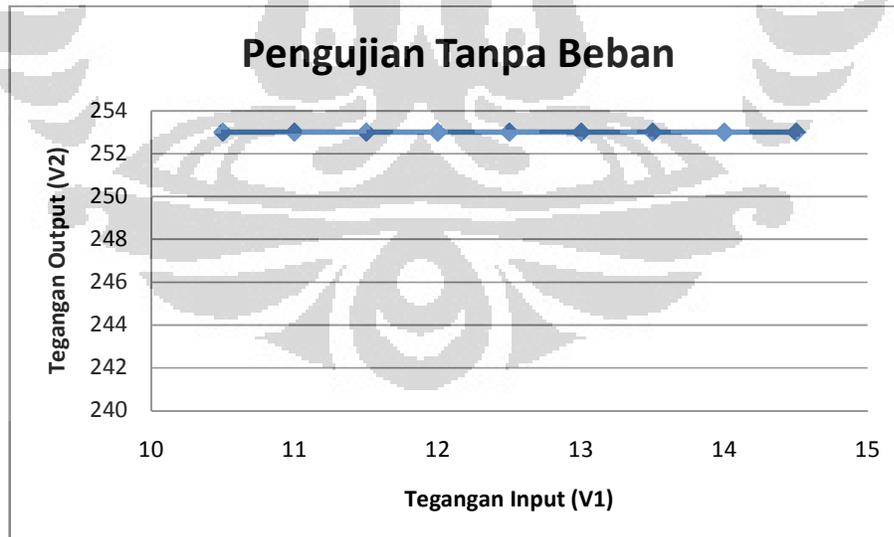
$$V_{PLN} = 218 V_{AC}$$

V1 = Tegangan keluaran penyearah / tegangan masukan konverter

V2 = Tegangan output konverter

Tabel 4.1. Data hasil pengujian tanpa beban

V1 (Volt)	V2 (Volt)
10.5	253
11	253
11.5	253
12	253
12.5	253
13	253
13.5	253
14	253
14.5	253



Gambar 4.1. Grafik Hasil Pengujian Tanpa Beban

## 4.2 Pengujian dengan Tegangan Variabel dan Beban Tetap 20 W

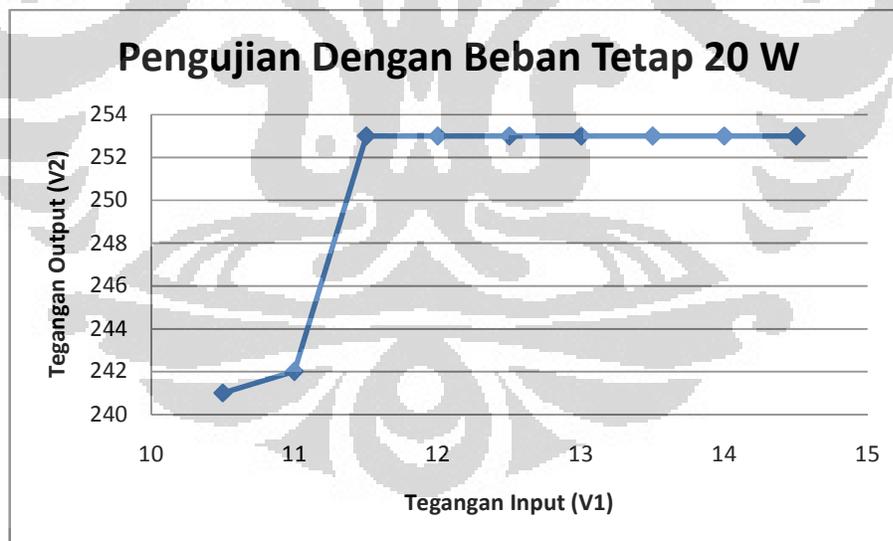
$$V_{PLN} = 218 V_{AC}$$

V1 = Tegangan keluaran penyearah / tegangan masukan konverter

V2 = Tegangan output konverter

Tabel 4.2. Data hasil pengujian dengan beban tetap 20 W

V1 (Volt)	V2 (Volt)
10.5	241
11	242
11.5	253
12	253
12.5	253
13	253
13.5	253
14	253
14.5	253



Gambar 4.2. Grafik Hasil Pengujian Dengan Beban 20 W

### 4.3 Pengujian Karakteristik Maksimum Konverter Penaik Tegangan

Pada percobaan ini digunakan baterai 12 V<sub>DC</sub> sebagai sumber tegangan.

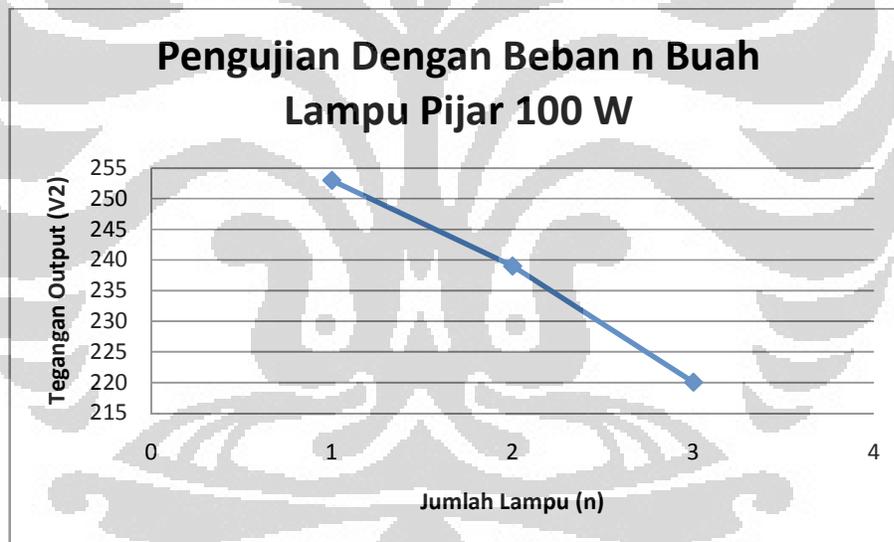
V1 = Tegangan output baterai / tegangan masukan konverter

V2 = Tegangan output konverter

#### 4.3.1 Beban n Buah Lampu Pijar 100 W

Tabel 4.3. Data hasil pengujian dengan beban lampu pijar 100 W

Jumlah Lampu (n)	L (Watt)	V1 (Volt)	V2 (Volt)
1	100	12,2	253
2	200	12,04	239
3	300	11,94	220

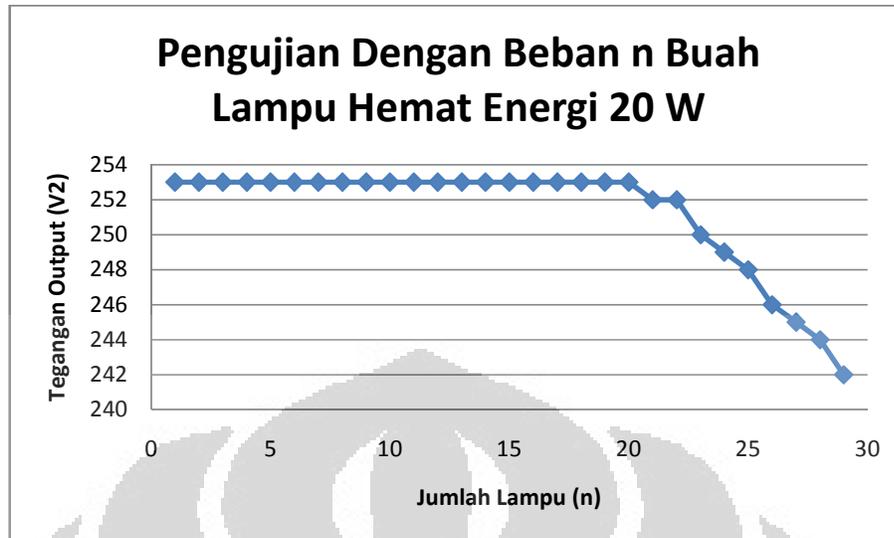


Gambar 4.3. Grafik Hasil Pengujian Dengan n Buah Lampu Pijar 100 W

### 4.3.2 Beban n Buah Lampu Hemat Energi 20 W

Tabel 4.4. Data hasil pengujian dengan beban n buah lampu hemat energi 20 W

Jumlah Lampu (n)	L (Watt)	V1 (Volt)	V2 (Volt)
1	20	12.5	253
2	40	12.4	253
3	60	12.4	253
4	80	12.4	253
5	100	12.3	253
6	120	12.3	253
7	140	12.3	253
8	160	12.3	253
9	180	12.2	253
10	200	12.2	253
11	220	12.2	253
12	240	12.2	253
13	260	12.2	253
14	280	12.2	253
15	300	12.1	253
16	320	12.1	253
17	340	12.1	253
18	360	12.1	253
19	380	12.1	253
20	400	12.1	253
21	420	12	252
22	440	12	252
23	460	12	250
24	480	12	249
25	500	12	248
26	520	12	246
27	540	12	245
28	560	12	244
29	580	11.9	242

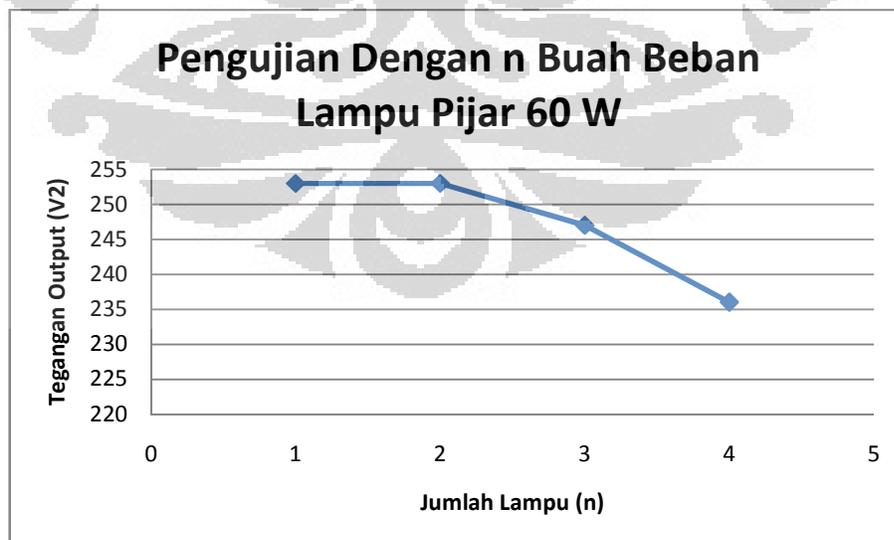


Gambar 4.4. Grafik Hasil Pengujian Dengan Beban Lampu Hemat Energi 20 W

#### 4.3.3 Beban n Buah Lampu Pijar 60 W

Tabel 4.5. Data hasil pengujian dengan beban n buah lampu pijar 60 W

Jumlah Lampu (n)	L (Watt)	V1 (Volt)	V2 (Volt)
1	60	12.5	253
2	120	12.3	253
3	180	12.1	247
4	240	12	236



Gambar 4.5. Grafik Hasil Pengujian Dengan Beban n Buah Lampu Pijar 60 W

#### 4.4 Analisis Data

Inverter yang digunakan pada percobaan ini akan bekerja secara optimal saat diberi tegangan masukan senilai 12,5 Vdc, karena saat diberi masukan tersebut outputnya akan bernilai 220 Vac. Dari berbagai percobaan yang telah dilakukan pada inverter yang dimodifikasi menjadi konverter penaik tegangan ini, dapat dilihat seperti apa karakteristik dari konverter penaik tegangan yang merupakan hasil modifikasi dari inverter ini.

##### 4.4.1 Pengujian Tanpa Beban

Pada pengujian tanpa beban ini, dapat dilihat bahwa untuk tegangan konstan dari PLN sebesar 218 V AC, arus yang mengalir pada *rectifier* (penyearah) adalah sebesar 0,05 A. Lalu pada output penyearah ini, dapat dilihat akan konstan sebesar 0,7 A.

Pada percobaan ini diberikan tegangan masukan dari konverter yang berubah-ubah sesuai dengan kapasitas dari konverter tersebut, yakni dari tegangan 10,5 V DC hingga 14,5 V DC. Ternyata setelah inputan tersebut diubah-ubah, maka yang terjadi adalah output dari konverter tersebut adalah konstan sebesar 253 V DC. Ini menunjukkan bahwa tingkat keandalan dari konverter penaik tegangan yang merupakan hasil modifikasi dari inverter ini cukup baik dan andal.

##### 4.4.2 Pengujian dengan Tegangan Variabel dan Beban Tetap 20 W

Pada pengujian ini, dapat dilihat bahwa kondisi rangkaian tidak jauh berbeda dengan pengujian tanpa beban. Namun pada percobaan kali ini digunakan lampu dengan nilai 20 Watt untuk melihat pengaruh input tegangan terhadap outputnya saat diberi beban konstan.

Pada percobaan ini diberikan tegangan masukan dari konverter yang berubah-ubah sesuai dengan kapasitas dari konverter tersebut, yakni dari tegangan 10,5 V DC hingga 14,5 V DC. Ternyata setelah inputan tersebut diubah-ubah, maka yang terjadi adalah output dari konverter tersebut adalah hampir konstan. Output dari konverter tersebut sempat bernilai 241 V DC dan 242 V DC saat diberi tegangan masukan sebesar 10,5 V DC dan 11 V DC. Namun saat tegangan

inputan tersebut sebesar 11,5 V DC hingga 14,5 V DC, output dari konverter tersebut adalah konstan sebesar 253 V DC. Hal ini menunjukkan bahwa sebenarnya saat beban konstan, konverter ini memiliki keandalan yang cukup baik hanya saja tegangan inputnya harus di atas 11 V DC.

#### 4.4.3 Pengujian Karakteristik Maksimum Konverter Penaik Tegangan

Pada pengujian ini, digunakan baterai untuk pengujian karena memiliki tegangan input yang baik serta mampu untuk menghidupkan beban yang digunakan pada percobaan ini.

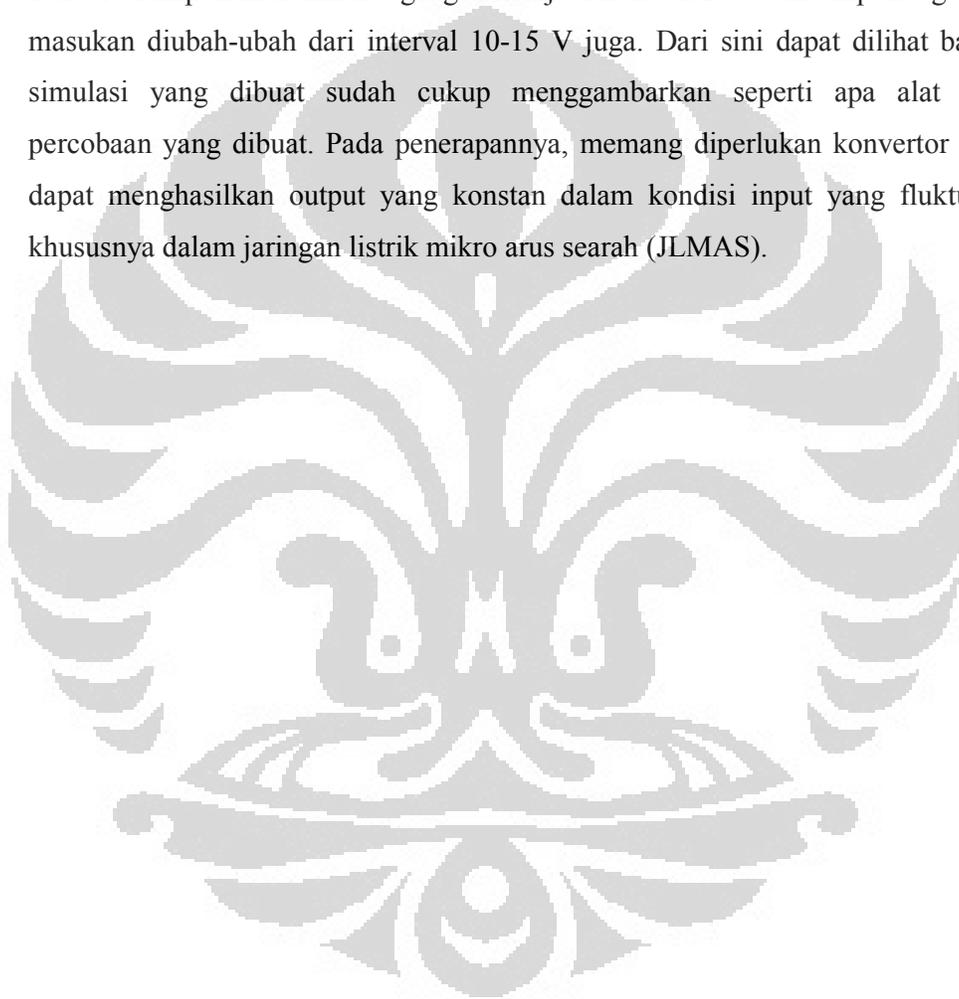
Pada percobaan pertama dengan beban berupa lampu pijar, digunakan beban sebesar 100, 200, dan 300 Watt. Ternyata dapat dilihat bahwa output dari konverter ialah sebesar 253, 239, dan 220 V DC. Hasil ini menunjukkan bahwa konverter sanggup bekerja dengan baik hingga kisaran beban senilai 100 Watt, namun setelah mendekati dan di atas 200 Watt, maka kemampuan konverter dalam meningkatkan tegangan tersebut akan berkurang.

Pada percobaan kedua dengan beban berupa lampu hemat energi, digunakan banyak beban sebesar kelipatan dari 20 Watt. Ternyata dapat dilihat bahwa konverter ini akan menghasilkan tegangan output sebesar 253 V DC saat diberi beban sebesar 20 Watt hingga 400 Watt. Lalu pada beban di atas nilai 400 Watt, output dari konverter ini akan perlahan-lahan menurun. Hasil ini menunjukkan bahwa konverter ini cukup andal saat menangani beban lampu pijar ini hingga beban senilai 400 Watt.

Pada percobaan ketiga dengan beban berupa lampu pijar, digunakan beberapa beban sebesar kelipatan dari 60 Watt. Ternyata dapat dilihat bahwa konverter ini akan menghasilkan tegangan output sebesar 253 V DC saat diberi beban senilai 60 Watt hingga 120 Watt. Lalu pada beban di atas nilai tersebut, output dari konverter ini akan perlahan-lahan menurun. Hasil ini menunjukkan bahwa konverter ini cukup andal saat menangani beban lampu pijar ini hingga beban senilai 120 Watt.

#### 4.4.4 Analisis Terhadap Hasil Simulasi

Dari hasil percobaan pada subbab 4.1, dapat dibandingkan hasilnya dengan simulasi pada subbab 3.1.4.1. Pada percobaan 4.1, konverter yang merupakan modifikasi dari inverter ini dapat menaikkan tegangan menjadi konstan 253 V meskipun tegangan masukan diubah-ubah, yakni pada interval 10-15 V sesuai kapasitas dari inverter tersebut. Begitupula dengan simulasi 3.1.4.1, konverter inipun menaikkan tegangan menjadi konstan 254 V meskipun tegangan masukan diubah-ubah dari interval 10-15 V juga. Dari sini dapat dilihat bahwa simulasi yang dibuat sudah cukup menggambarkan seperti apa alat hasil percobaan yang dibuat. Pada penerapannya, memang diperlukan konverter yang dapat menghasilkan output yang konstan dalam kondisi input yang fluktuatif, khususnya dalam jaringan listrik mikro arus searah (JLMAS).



## BAB 5

### KESIMPULAN

Dari hasil penulisan skripsi ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Dalam sistem jaringan listrik mikro arus searah, konverter memiliki peranan yang sangat penting, terutama dalam menaikkan tegangan hasil keluaran dari sumber-sumber energi terbarukan yang akan ditransmisikan ke beban.
- Dalam perancangan sebuah konverter penaik tegangan, perlu mempertimbangkan beberapa faktor khususnya *Duty Cycle*, Induktansi, serta kapasitansi agar hasil konverter yang dirancang sesuai dengan yang diharapkan dan memiliki keandalan yang tinggi. Dalam hal ini, perancangan yang dibuat dapat disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink.
- Konverter DC yang baik memerlukan output pada kisaran 113 – 405,6 agar dapat dipakai pada beban rumah tangga berbasis switching, dan ini dipenuhi jika inverter yang ada di pasaran dimodifikasi sebagai konverter karena konverter hasil modifikasi ini memiliki tegangan output sebesar 253 V.
- Penggunaan inverter sebagai konverter ini dapat dilakukan dengan mengambil rangkaian pada sisi pembangkitan frekuensi tinggi dari tegangan tinggi DC ke AC. Untuk dapat menentukan rangkaian ini biasanya ditandai dengan rangkaian penyearah yang dilengkapi dengan dioda dan kapasitor yang berkapasitas besar dan tegangan tinggi.
- Dari percobaan terhadap penggunaan inverter sebagai konverter ini dapat dilihat bahwa konverter ini dapat bekerja secara andal saat tanpa beban dari tegangan input 10,5 hingga 14,5 V DC. Lalu saat diberi beban kostan senilai 20 Watt dapat bekerja dengan baik saat tegangan input sebesar 11,5 hingga 14,5 Volt. Lalu saat diberi catu baterai dapat bekerja dengan baik hingga beban lampu pijar kelipatan 100 W berkisar hingga 100 Watt, pada beban lampu hemat energi kelipatan 20 W hingga sebesar 400 Watt, dan pada beban lampu pijar kelipatan 60 W hingga sebesar 120 Watt.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] <http://konversi.wordpress.com/2009/03/04/mikrogrid-wacana-solusi-daerah-mandiri-energi/>
- [2] Ito, Y., Zhongqing, Y., and Akagi, H., "DC Micro-grid Based Distribution Power Generation System", Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004. The 4th International Page(s): 1740 - 1745 Vol.3, IEEE Conferences.
- [3] Ian A. Hiskens, Eric M. Fleming, "Control of Inverter-Connected sources in Autonomous Microgrids", American Control Conference, Juni 2008.
- [4] Budiyanto, Rudy Setiabudy, Eko Adhi Setiawan, Uno Bintang Sudibyo, "Development of Direct Current Microgrid Control for Ensuring Power Supply From Renewable Energy Sources", IJTECH journal, Volume 2 Issue 3, July 2011
- [5] Budiyanto, "Studi Perbandingan Jaringan Listrik Mikro DC dan AC", jurnal umum
- [6] D. Salomonsson and A. Sannino, "Low-voltage dc distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 3, pp. 1620–1627, Jul. 2007.
- [7] IEEE Recommended Practice for the Design of DC Auxiliary Power Systems for Generating Stations, IEEE Std. 946-2004, 2004.
- [8] Rashid, Muhammad H. Power Electronics : Circuits, Devices, and Applications (2nd ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 1993.
- [9] <http://konversi.wordpress.com/2009/01/07/topologi-konverter-dc-dc/>
- [10] Piotr Biczal Proceedings of the 5th International IEEE Conference – Workshop – CPE (2007), p.1
- [11] Silva, F.S.F.; Freitas, A.A.A.; Daher, S.; Ximenes, S.C.; Sousa, S.K.A.; Edilson, M.S.; Antunes, F.L.M.; Cruz, C.M.T, Proceedings of the power electronic conference CBEP 09 Brazilian, (2009), p. 486
- [12] Budiyanto, Rudy Setiabudy, Eko Adhi Setiawan, "Pengembangan Inverter Sebagai Konverter Penaik Tegangan Dalam Jaringan Listrik Mikro Arus Searah (Dc Microgrid )", jurnal Makara

- [13] Basu and Bollen, J. IEEE Transactions on power delivery, 20/3, (2005)  
p.2257
- [14] Herisajani, Nasrul Harun, Dasrul Yunus, “Perencanaan Inverter PWM Satu Fasa Untuk Pengaturan Tegangan Output Pembangkit Tenaga Angin”, Jurnal Teknik Elektro Politeknik Negeri Padang
- [15] Sutedjo ,et al. “Rancang Bangun Modul DC – DC Converter Dengan Pengendali PI“. Politeknik Elektronika Negeri Surabaya – ITS, Surabaya

