



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN *BI-DIRECTIONAL INVERTER* UNTUK DC  
MIKROGRID**

SKRIPSI

LEONARDO S

0806331001

FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN *BI-DIRECTIONAL INVERTER* UNTUK DC  
MIKROGRID**

**SKRIPSI**

Skripsi ini diajukan untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi  
Sarjana Teknik

**LEONARDO S**

**0806331001**

**FAKULTAS TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**JUNI 2012**

i

**Universitas Indonesia**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Leonardo S

NPM : 0806331001

Tanda Tangan : 

Tanggal : 25 Juni 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

SKRIPSI INI DIAJUKAN OLEH :

NAMA : Leonardo S  
NPM : 0806331001  
PROGRAM STUDI : Teknik Elektro  
JUDUL SKRIPSI : Perancangan *bi-directional inverter* untuk DC  
Mikrogrid

**TELAH DIPRESENTASIKAN DAN DITERIMA SEBAGAI BAGIAN  
PERSYARATAN YANG DIPERLUKAN UNTUK MEMPEROLEH GELAR  
SARJANA TEKNIK PADA PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO,  
FAKULTAS TEKNIK, UNIVERSITAS INDONESIA**

Pembimbing : Prof.Dr. Ir. Rudy Setiabudy DEA (.....)

Penguji I : Dr.-Ing. Eko Adhi Setiawan,ST.,MT (.....)

Penguji II : Ir. Soepranyoto M.Sc (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2012

## UCAPAN TERIMA KASIH

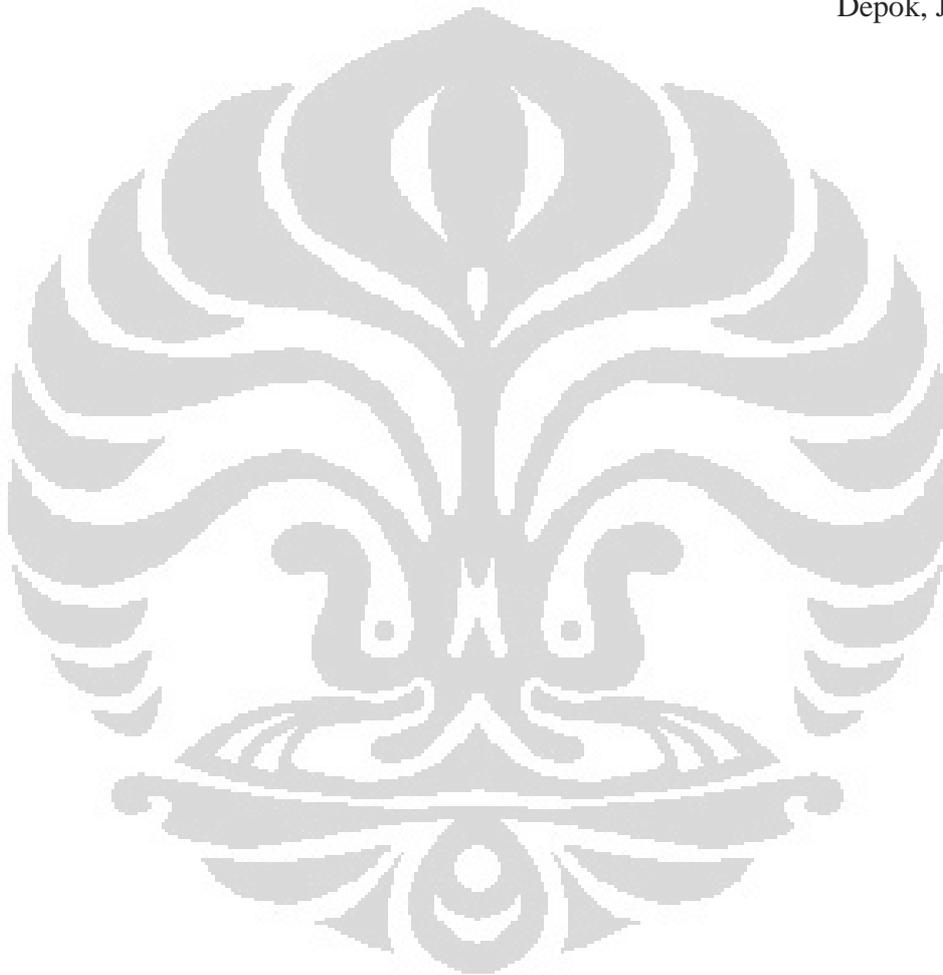
Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkah dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “PERANCANGAN BI-DIRECTIONAL INVERTER UNTUK DC MICROGRID” ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan hingga saat penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Rudy Setiabudy, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan masukan bagi terselesaikannya skripsi ini.
2. Bapak Budiyanto dan Bapak Eko yang telah memberikan banyak masukan dan informasi yang bermanfaat bagi penyelesaian skripsi ini
3. Orang tua penulis yang selalu memberi dukungan moral dan material dalam penyusunan skripsi ini.
4. Adik-adik saya Gunawan, Melva, Lenny, Wenny, Cindy dan Karina yang selalu memberi dukungan dan semangat kepada penulis serta menjadi sumber inspirasi bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Sepupu penulis Renova Hutapea yang selalu memberikan dukungan moral kepada penulis agar secepatnya menyelesaikan skripsi ini.
6. Saut, Gilbert, Saeful, Aenul, Kalmin, Deco dan Paulus yang menjadi teman berdiskusi penulis dan menjadi teman menginap di EC 306.
7. Bapak Muhammad Ali Berawi yang memberikan kunci ruangnya sehingga penulis bersama rekan-rekan diatas bisa melakukan acara nonton bareng EURO 2012 pada saat menginap di EC 306.
8. Semua pihak yang telah banyak membantu dan memberi dukungan terhadap penulisan skripsi ini.

Penulis juga meminta maaf atas segala kekurangan yang ada pada skripsi ini dan menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu penulis berharap adanya kritik dan saran dari pembaca demi kesempurnaan laporan ini dan semoga dapat bermanfaat bagi semuanya.

Depok, Juni 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI  
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Leonardo S  
NPM : 0806331001  
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 Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PERANCANGAN BI-DIRECTIONAL INVERTER UNTUK DC  
MIKROGRID**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok,

Pada tanggal : 12 Juni 2012,

Yang menyatakan,

  
(Leonardo S)

## ABSTRAK

Nama : Leonardo Situmorang

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : Perancangan *bi-directional inverter* untuk DC Mikrogrid

Sumber-sumber energi terbarukan yang menghasilkan energi listrik disatukan dalam sistem DC Mikrogrid. Sebenarnya energi listrik yang dihasilkan masih bersifat fluktuatif sehingga belum sepenuhnya bisa diandalkan agar sistem DC Mikrogrid dapat berjalan secara kontinu. Untuk menjamin keandalannya, maka DC Mikrogrid akan dihubungkan ke jaringan utilitas (PLN) sehingga ketika DC Mikrogrid kekurangan daya listrik dapat menerima dari PLN sebaliknya jika DC Mikrogrid memiliki daya listrik yang lebih, DC Mikrogrid dapat mensuplai ke PLN, dengan demikian dapat terjadi transfer daya listrik antara kedua sistem tersebut. Untuk itu diperlukan alat yang dapat menghubungkan kedua sistem tersebut yaitu *bi-directional inverter*.

*Bi-directional inverter* adalah konverter yang dapat mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC ataupun sebaliknya. Dalam skripsi ini akan dibuat konfigurasi yang terdiri dari alat-alat *rectifier*, *boost* konverter, *buck* konverter dan *grid tie inverter* menjadi sebuah *bi-directional inverter*. Untuk pengujian kapasitas dan efisiensi alat ini, digunakan beban lampu dengan daya masing masing sekitar 7W. Pengukuran daya diambil pada keluaran dari *boost* konverter dan *grid tie inverter*.

Kata kunci: *bi-directional inverter*, *rectifier*, *boost* konverter, *buck* konverter, *grid tie inverter*, transfer daya listrik.

## ABSTRACT

Name : Leonardo Situmorang

Study program: Electrical Engineering

Title : Design of Bi-directional inverter for DC Microgrid

Renewable energy sources that generate electricity are incorporated in the DC system Microgrid. Actual electrical energy generated is still fluctuating so that is not fully reliable for the system DC Microgrid can run continuously. To ensure reliability, the DC Microgrid will be connected to a network utility (PLN) so that when the DC power shortage Microgrid can receive from PLN vice versa if the DC Microgrid have more power, DC Microgrid can supply to PLN, thus the power transfer can occur between the two systems. It required a tool that can connect the two systems is bi-directional inverter.

Bi-directional inverter is a converter that can convert DC voltage into AC voltage or otherwise. In this thesis will be the configuration consisting of tools rectifier, boost converter, buck converter and grid tie inverter into a bi-directional inverter. To test the capacity and efficiency of this tool, used to power the lamp load each about 7W. Power measurement is taken at the output of the boost converter and grid tie inverter.

Keyword: bi-directional inverter, rectifier, boost konverter, buck konverter, grid tie inverter, power transfer.

## DAFTAR ISI

|  | Halaman |
|--|---------|
| HALAMAN JUDUL.....                           | i       |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....         | ii      |
| HALAMAN PENGESAHAN.....                      | iii     |
| UCAPAN TERIMA KASIH.....                     | iv      |
| HALAMAN PERNYATAAN.....                      | vi      |
| ABSTRAK.....                                 | vii     |
| DAFTAR ISI.....                              | ix      |
| DAFTAR GAMBAR.....                           | xi      |
| DAFTAR TABEL.....                            | xiv     |
| DAFTAR LAMPIRAN.....                         | xv      |
| <b>1. PENDAHULUAN</b>                        |         |
| 1.1 Latar Belakang.....                      | 1       |
| 1.2 Tujuan Penulisan.....                    | 1       |
| 1.3 Batasan Masalah.....                     | 2       |
| 1.4 Metodologi Penelitian.....               | 2       |
| 1.5 Sistematika Penulisan.....               | 3       |
| <b>2. DASAR TEORI</b>                        |         |
| 2.1 Penyearah ( <i>Rectifier</i> ).....      | 4       |
| 2.1.1 Penyearah setengah gelombang.....      | 4       |
| 2.1.2 Penyearah gelombang penuh.....         | 5       |
| 2.1.3 Penyearah dengan filter kapasitor..... | 7       |
| 2.2 DC-DC Konverter.....                     | 10      |

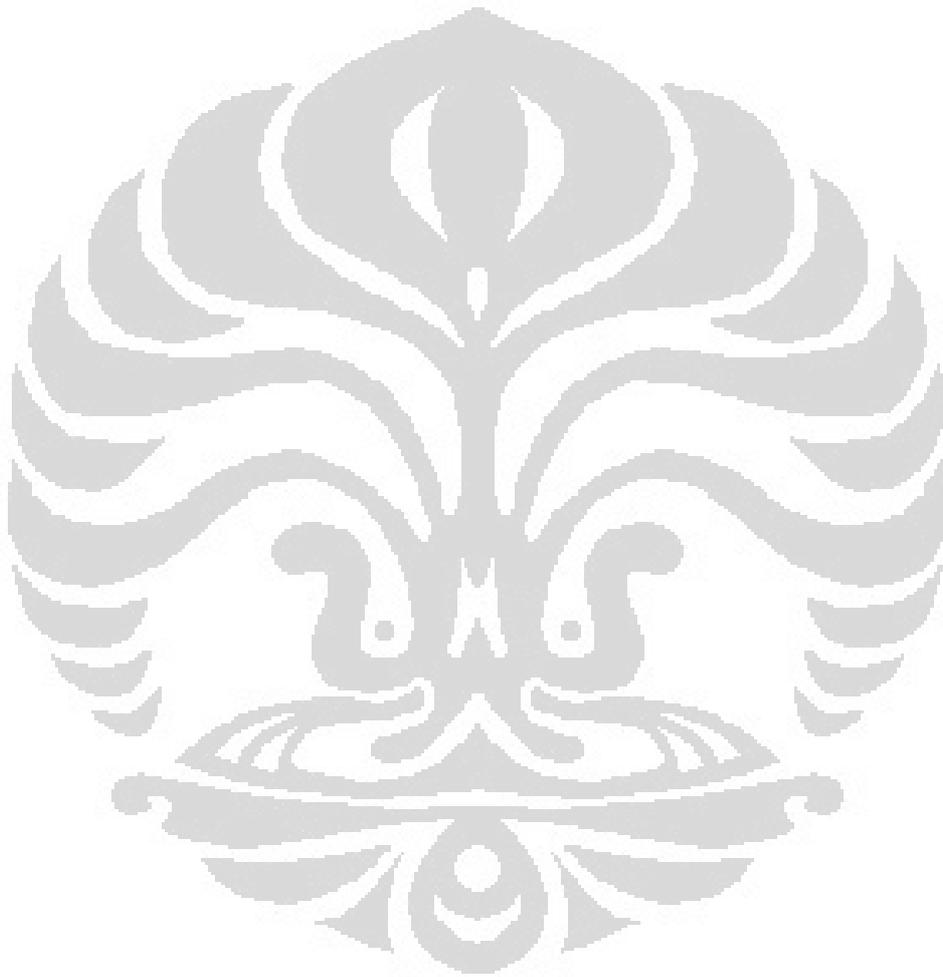
|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 2.2.1     | <i>Buck</i> konverter .....  | 10 |
| 2.2.2     | <i>Boost</i> konverter .....                                       | 14 |
| 2.2.3     | <i>Buck-Boost</i> konverter .....                                  | 15 |
| 2.3       | Inverter .....   | 17 |
| 2.3.1     | Jenis Inverter Berdasarkan Gelombang yang Dihasilkan .....         | 19 |
| 2.3.2     | <i>Inverter Grid Tie</i> .....                                     | 21 |
| 2.3.3     | Karakteristik <i>Inverter Grid Tie</i> .....                       | 22 |
| 2.4       | Bi-directional Inverter .....                                      | 23 |
| 2.4.1     | Mode <i>Inverter</i> .....   | 24 |
| 2.4.2     | Mode <i>Rectifier</i> .....  | 25 |
| <b>3.</b> | <b>PERANCANGAN SISTEM</b>  |    |
| 3.1       | Blok Diagram Sistem bi-directional inverter pada DC Mikrogrid..... | 27 |
| 3.1.1     | <i>Grid Tie Inverter</i> .....                                     | 28 |
| 3.1.2     | Penyearah dan <i>Buck</i> Konverter .....                          | 29 |
| 3.1.3     | <i>Boost</i> Konverter .....                                       | 30 |
| 3.2       | Kontaktor .....  | 31 |
| 3.3       | Deskripsi Kerja Sistem.....  | 31 |
| <b>4.</b> | <b>ANALISA PERANCANGAN BI-DIRECTIONAL INVERTER</b>                 |    |
| 4.1       | Simulasi transfer daya dari DC Mikrogrid ke PLN .....              | 33 |
| 4.2       | Simulasi transfer daya dari PLN ke DC Mikrogrid .....              | 42 |
| <b>5.</b> | <b>KESIMPULAN</b> .....  | 50 |
|           | <b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....  | 51 |
|           | <b>LAMPIRAN</b> .....  | 52 |

## DAFTAR GAMBAR

|  | Halaman |
|--|---------|
| Gambar 2.1 Tegangan masukan.....   | 4       |
| Gambar 2.2 Penyearah setengah gelombang .....  | 5       |
| Gambar 2.3 Proses penyearahan pada penyearah setengah gelombang .....  | 5       |
| Gambar 2.4 Penyearah gelombang penuh dengan <i>Center Tap</i> (CT) .....   | 6       |
| Gambar 2.5 Penyearah gelombang penuh dengan dioda rangkaian jembatan ( <i>diode bridge</i> ) .....   | 6       |
| Gambar 2.6 (a) Arah aliran arus pada siklus positif pertama dan keluarannya<br>(b) Arah aliran arus pada siklus negatif pertama dan keluarannya.....                               | 7       |
| Gambar 2.7 Rangkaian penyearah setengah gelombang dengan penapis kapasitor .....   | 7       |
| Gambar 2.8 (a) Proses pengisian ( <i>charge</i> ) dan (b) proses pelepasan ( <i>discharge</i> ) pada kapasitor (c) Proses pengisian kembali pada setengah periode berikutnya ..... | 9       |
| Gambar 2.9 Penyearah gelombang penuh dengan diode bridge yang menggunakan penapis kapasitor .....  | 9       |
| Gambar 2.10 Hasil keluaran penyearah gelombang penuh dengan penapis kapasitor .....  | 9       |
| Gambar 2.11 Rangkaian <i>Buck</i> konverter .....  | 11      |
| Gambar 2.12 Keadaan ON ( <i>ON state</i> ) .....   | 11      |
| Gambar 2.13 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada <i>buck</i> konverter .....  | 12      |
| Gambar 2.14 Rangkaian <i>Boost</i> konverter .....   | 14      |
| Gambar 2.15 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada <i>boost</i> konverter .....   | 15      |
| Gambar 2.16 Rangkaian <i>buck-boost</i> konverter .....  | 16      |
| Gambar 2.17 Bentuk gelombang keluaran dari <i>buck-boost</i> konverter.....  | 16      |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2.18 Skematik Inverter sederhana .....                                   | 18 |
| Gambar 2.19 Bentuk gelombang tegangan pada beban .....                          | 18 |
| Gambar 2.20 Bentuk gelombang tegangan AC dengan frekuensi 1 Hz .....            | 19 |
| Gambar 2.21 Keluaran inverter jenis gelombang kotak.....                        | 20 |
| Gambar 2.22 Keluaran inverter jenis gelombang kotak yang dimodifikasi.....      | 21 |
| Gambar 2.23 PWM untuk menyempurnakan sinusoidal .....                           | 21 |
| Gambar 2.24 Rangkaian skematis <i>bi-directional inverter full bridge</i> ..... | 24 |
| Gambar 2.25 <i>bi-directional inverter</i> dalam mode <i>inverter</i> .....     | 25 |
| Gambar 2.26 <i>bi-directional inverter</i> dalam mode <i>rectifier</i> .....    | 26 |
| Gambar 3.1 Skema rancangan <i>bi-directional inverter</i> .....                 | 27 |
| Gambar 3.2 Mode Inverter .....  | 32 |
| Gambar 3.3 Mode Penyearah ( <i>Rectifier</i> ) .....                            | 32 |
| Gambar 4.1 Rangkaian pengujian transfer daya dari DC Mikrogrid ke PLN.....      | 33 |
| Gambar 4.2 Grafik arus masukan <i>boost</i> konverter vs beban .....            | 36 |
| Gambar 4.3 Grafik tegangan masukan <i>boost</i> konverter vs beban.....         | 37 |
| Gambar 4.4 Grafik tegangan keluaran <i>boost</i> konverter vs beban .....       | 38 |
| Gambar 4.5 Grafik arus A2, A3 ,A4 vs beban .....                                | 38 |
| Gambar 4.6 Grafik arus keluaran <i>buck</i> konverter vs beban .....            | 39 |
| Gambar 4.7 Grafik arus keluaran GTI vs beban .....                              | 40 |
| Gambar 4.8 Grafik Daya vs beban.....  | 40 |
| Gambar 4.9 Grafik efisiensi sitem vs beban .....                                | 41 |
| Gambar 4.10 Rangkaian pengujian transfer daya dari PLN ke DC Mikrogrid.....     | 42 |
| Gambar 4.11 Grafik arus masukan penyearah vs beban .....                        | 45 |
| Gambar 4.12 Grafik arus keluaran penyearah vs beban .....                       | 46 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 4.13 Grafik tegangan keluaran rectifier vs beban .....              | 46 |
| Gambar 4.14 Grafik arus keluaran <i>boost</i> konverter vs beban .....     | 47 |
| Gambar 4.15 Grafik tegangan keluaran <i>boost</i> konverter vs beban ..... | 47 |
| Gambar 4.16 Grafik efisiensi total vs beban.....                           | 48 |
| Gambar 4.17 Grafik daya vs beban.....                                      | 48 |



## DAFTAR TABEL

|   | Halaman |
|---|---------|
| Tabel 3.1 Spesifikasi <i>Inverter Grid Tie</i> .....                        | 29      |
| Tabel 3.2 Spesifikasi <i>Switching Power Supply</i> .....                   | 30      |
| Tabel 3.3 Spesifikasi <i>Boost</i> konverter.....                           | 30      |
| Tabel 4.1 Karakteristik transfer daya DC Mikrogrid ke PLN.....              | 34      |
| Tabel 4.2 Perhitungan daya pada simulasi transfer daya DC Mikrogrid ke PLN. | 34      |
| Tabel 4.3 Efisiensi transfer daya DC Mikrogrid ke PLN.....                  | 42      |
| Table 4.4 Karakteristik transfer daya dari PLN ke DC Mikrogrid .....        | 43      |
| Table 4.5 Pehitungan daya dan efisiensi .....                               | 44      |

## DAFTAR LAMPIRAN

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 1. Pengujian Rectifier .....         | 52 |
| 2. Pengujian Buck konverter .....    | 52 |
| 3. Pengujian Boost konverter.....    | 53 |
| 4. Pengujian Grid Tie Inverter ..... | 58 |



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Ketersediaan sumber energi yang terbatas dalam memenuhi kebutuhan energi listrik membutuhkan manajemen aliran daya. Keandalan dari sistem sangat dibutuhkan agar penyaluran daya listrik tetap kontinu.

*DC Microgrid* yang ada saat ini memiliki keunggulan dan kelemahan tersendiri. Alasan mengapa *DC Microgrid* dipilih karena sumber energi terbarukan sebagian besar merupakan tegangan DC sehingga rugi-rugi daya pada sistem akan kecil akan semakin kecil. Selain itu, peralatan-peralatan rumah tangga umumnya adalah menggunakan DC sehingga lebih praktis. Namun, jika kebutuhan akan energi listrik tergantung pada energi terbarukan, hal ini masih sangat riskan karena energi listrik yang dihasilkan masih sangat kecil dan berfluktuasi. Untuk itu DC Mikrogrid perlu dihubungkan ke jaringan yang lebih besar yang telah tersedia yaitu jaringan utilitas (PLN). Karena PLN masih menggunakan AC, sementara yang dibutuhkan adalah tegangan DC, maka untuk menghubungkan DC Mikrogrid dengan PLN diperlukan *bi-directional inverter* dengan maksud ketika daya yang dihasilkan oleh DC Mikrogrid lebih besar dari beban yang dipikulnya dan baterai penyimpanan kapasitasnya penuh, maka DC Mikrogrid akan menyuplai daya ke PLN, sebaliknya ketika DC Mikrogrid mengalami kekurangan daya listrik maka dapat dipenuhi dengan mengambil dari jaringan PLN.

*Bi-directional inverter* ini merupakan konfigurasi dari *rectifier*, *inverter* dan DC-DC konverter.

### 1.2 Maksud dan Tujuan

Adapun tujuan utama dari skripsi ini adalah pemenuhan mata kuliah yang menjadi prasyarat di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas

Indonesia untuk mendapat gelar kesarjanaan. Harapan penulis dalam skripsi kali ini adalah:

1. Merancang *inverter* dua arah (*bi-directional inverter*) yang digunakan untuk menghubungkan DC Mikrogrid dengan jaringan utilitas (PLN).
2. Mengetahui kontribusi energi listrik yang dihasilkan DC Mikrogrid terhadap PLN dan sebaliknya.
3. Menjamin kehandalan sistem DC Mikrogrid agar kebutuhan daya listrik beban dapat dipenuhi secara kontinu.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Dalam penelitian ini dibatasi pada :

1. Perancangan *bi-directional inverter* yang terdiri dari 1 buah *inverter*, 1 buah *rectifier*, 1 buah *boost* konverter dan 1 buah *buck* konverter.
2. Kinerja dari *bi-directional inverter* yang dirancang terutama yang berhubungan dengan kapasitas dan efisiensi daya.

### 1.4 Metode Penulisan

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan dalam skripsi ini adalah :

1. Studi literatur untuk mempelajari, mengembangkan dan menerapkan ilmu pengetahuan dan teknologi yang telah dikembangkan dan diterapkan sebelumnya.
2. Mempelajari prinsip kerja dari *rectifier*, *boost converter*, *buck converter*, *inverter* dan *bi-directional inverter*.
3. Mengumpulkan data hasil kinerja dari *inverter* dua arah (*bi-directional inverter*) yang dirakit dan menganalisisnya.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini dibagi menjadi 5 (lima) bab. Pada bab 1 akan dijelaskan mengenai latar belakang, tujuan, pembatasan masalah, metodologi penulisan, serta sistematika penulisan. Kemudian pada bab 2 akan dijelaskan mengenai dasar teori yang digunakan untuk menganalisa masalah yang ada pada skripsi ini. Rancangan sistem yang dibahas dalam skripsi ini akan dibahas pada bab 3. Pada bab 4 berisi mengenai analisa perancangan *bi-directional inverter*. Kemudian pada bab 5 akan dibahas mengenai hasil penelitian dari skripsi ini beserta kesimpulan yang dapat diambil.

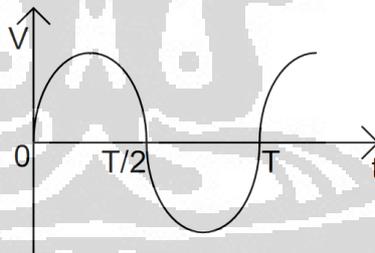


## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 Penyearah ( *Rectifier* )

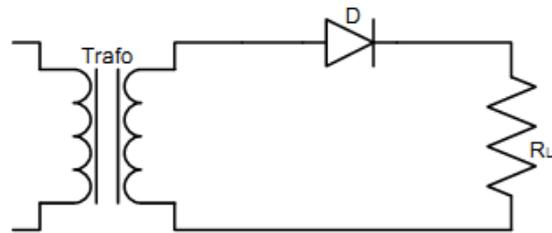
Sebuah penyearah (*rectifier*) adalah suatu alat yang digunakan untuk mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Tujuan dari suatu penyearahan adalah menghasilkan suatu keluaran yang mendekati searah atau menghasilkan bentuk gelombang tegangan dan arus yang mengandung komponen DC dengan spesifikasi tertentu. Dalam rangkaian penyearah digunakan transformator step-down untuk menurunkan tegangan masukan. Berdasarkan bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan, penyearah dibedakan menjadi 2 jenis, penyearah setengah gelombang dan penyearah gelombang penuh, sedangkan untuk penyearah gelombang penuh dibedakan menjadi penyearah gelombang penuh dengan *center tap* (CT), dan penyearah gelombang penuh dengan menggunakan dioda *bridge*. Bentuk gelombang dari tegangan masukan adalah sebagai berikut :



Gambar 2.1 Tegangan masukan

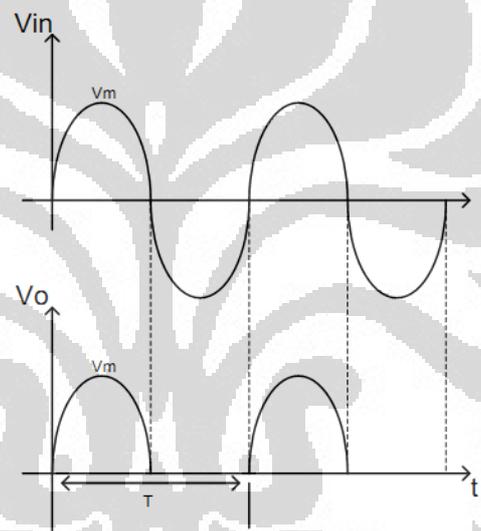
##### 2.1.1 Penyearah setengah gelombang

Penyearah setengah gelombang merupakan rangkaian penyearah yang paling sederhana, yaitu yang terdiri dari satu dioda. Rangkaian penyearah setengah gelombang memperoleh masukan dari kumparan sekunder trafo yang berupa tegangan berbentuk sinus. Dalam penyearah setengah gelombang, bagian yang disearahkan adalah salah satu fasa dari tegangan atau arus masukan.



Gambar 2.2 Penyearah setengah Gelombang

Berikut adalah proses penyearahan dalam penyearah setengah gelombang. Keluaran dari penyearah setengah gelombang :



Gambar 2.3 Proses penyearahan pada penyearah setengah gelombang

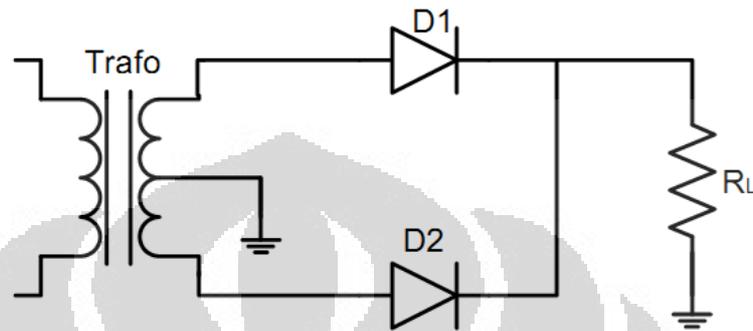
### 2.1.2 Penyearah Gelombang Penuh

Penyearah gelombang penuh adalah penyearah yang menyearahkan semua fasa gelombang masukan arus bolak-balik (AC). Berdasarkan penggunaan jumlah diode, penyearah gelombang penuh dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

#### 1. Penyearah Gelombang Penuh *Center Tap* (CT)

Penyearah jenis ini menggunakan 2 buah diode. Pada bagian sekunder, terdapat *center tap* (CT) yang berfungsi untuk membagi tegangan. Pada siklus

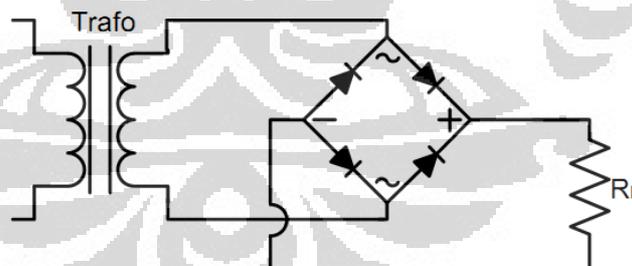
positif, D1 akan ON, D2 akan OFF sehingga arus akan mengalir melalui D1 yaitu  $i_1$  menuju ke beban, untuk siklus negatif, D1 akan OFF dan D2 akan ON sehingga arus akan mengalir melalui D2 yaitu  $i_2$  menuju ke beban.



Gambar 2.4 Penyearah gelombang penuh dengan *Center Tap* (CT)

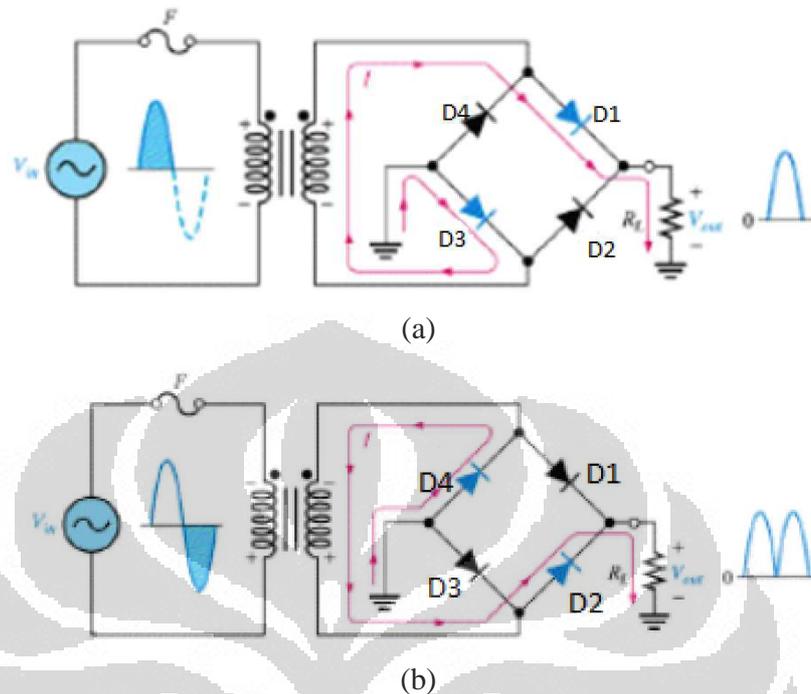
## 2. Penyearah Gelombang Penuh *Diode Bridge*

Penyearah jenis ini menggunakan 4 buah dioda. Pada  $\frac{1}{2}$  siklus pertama, D1 dan D3 akan ON, D2 dan D4 akan OFF, maka arus akan mengalir melalui D1, beban dan D3. Pada  $\frac{1}{2}$  siklus berikutnya, D2 dan D4 akan ON, D1 dan D3 akan OFF, maka arus akan mengalir melalui D2, beban dan D4.



Gambar 2.5 Penyearah gelombang penuh dengan dioda rangkaian jembatan (*diode bridge*)

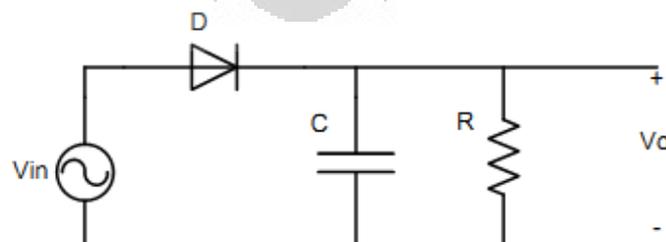
Berikut adalah proses penyearahan pada penyearah gelombang penuh dengan menggunakan *diode bridge* :



Gambar 2.6 (a) Arah aliran arus pada siklus positif pertama dan keluarannya  
 (b) Arah aliran arus pada siklus negatif pertama dan keluarannya <sup>[3]</sup>

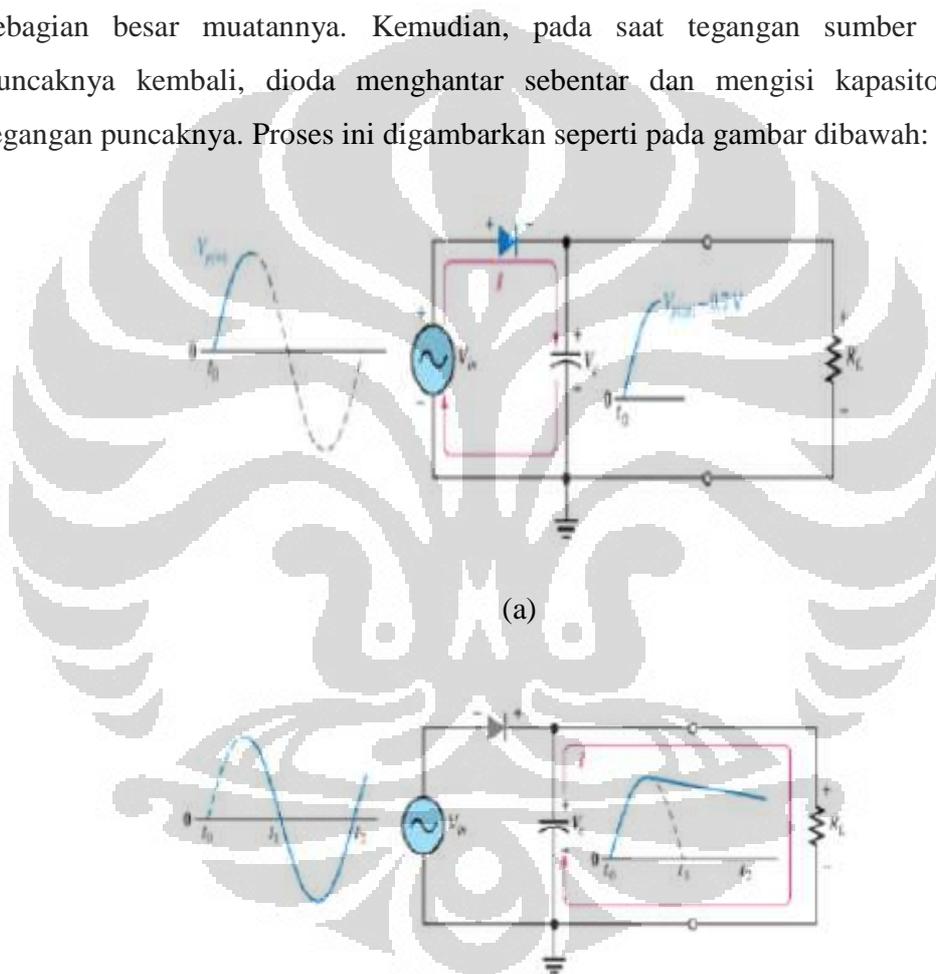
### 2.1.3 Penyearah dengan Filter Kapasitor

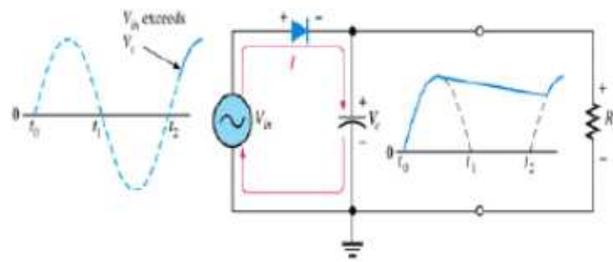
Dari keluaran yang dihasilkan oleh penyearah sederhana diatas, dapat dilihat bahwa masih memiliki kekurangan yaitu keluaran yang dihasilkan memiliki banyak denyut (*ripple*). Untuk mengubah denyut ini ke tegangan DC yang lebih konstan, dibutuhkan sebuah penapis (*filter*). Berikut adalah gambar yang menunjukkan rangkaian penyearah setengah gelombang dengan penapis yang menggunakan kapasitor.



Gambar 2.7 Rangkaian penyearah setengah gelombang dengan penapis kapasitor

Selama  $\frac{1}{4}$  siklus pertama dari tegangan sumber, dioda di *forward biased*. Pada saat itu, dioda menghubungkan sumber secara langsung melintas kapasitor, sehingga kapasitor diisi sampai tegangan puncak. Namun setelah melewati puncak positif, dioda berhenti konduksi. Pada keadaan ini, kapasitor melepas muatannya ke beban. Dengan rancangan yang baik, tetapan waktu pembuangan ( $t_{RC}$ ) dapat dibuat lebih besar daripada perioda sinyal  $T$  masuk. Oleh karena itu, kapasitor hanya kehilangan sebagian besar muatannya. Kemudian, pada saat tegangan sumber mencapai puncaknya kembali, dioda menghantar sebentar dan mengisi kapasitor sampai tegangan puncaknya. Proses ini digambarkan seperti pada gambar dibawah:

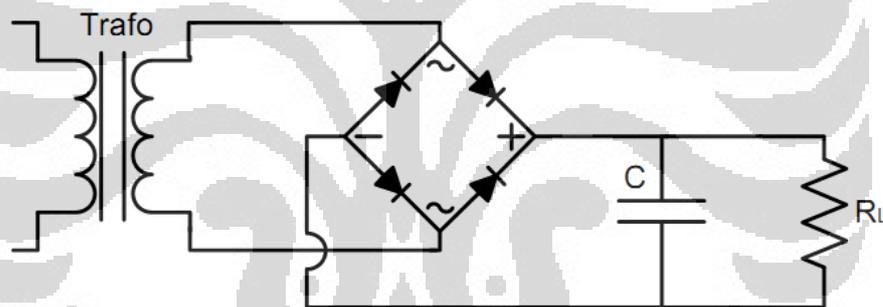




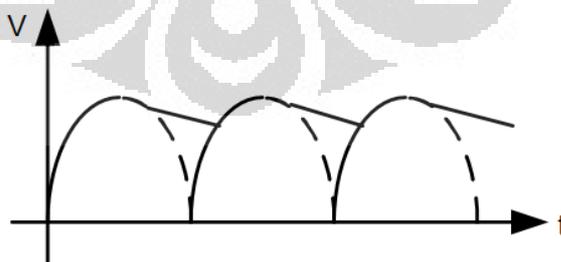
(c)

Gambar 2.8 (a) Proses pengisian (*charge*) dan (b) proses pelepasan (*discharge*) pada kapasitor (c) Proses pengisian kembali pada setengah periode berikutnya<sup>[3]</sup>

Untuk rangkaian penyearah gelombang penuh dengan *diode bridge*, berikut adalah tampilannya :



Gambar 2.9 Penyearah gelombang penuh dengan *diode bridge* yang menggunakan penapis kapasitor



Gambar 2.10 Hasil keluaran penyearah gelombang penuh dengan penapis kapasitor

Proses pengisian dan pelepasan muatan (*charging* and *discharging*) pada rangkaian kapasitor diatas, sangat bergantung pada harga-harga dari resistor dan kapasitor. Tegangan pada kapasitor pada saat pengisian adalah sebagai berikut :

$$V_c(t) = V_{in}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2.1)$$

sedangkan persamaan arus untuk proses pelepasan adalah sebagai berikut :

$$V_c(t) = V_{in}e^{-t/RC} \quad (2.2)$$

Dimana konstanta waktu peluruhan biasa dikenal dengan istilah konstanta waktu  $\tau$  dimana:

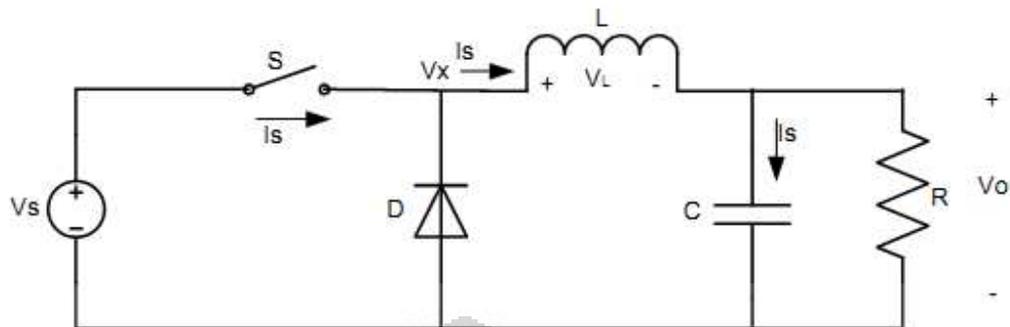
$$\tau = RC \quad (2.3)$$

## 2.2 DC-DC Konverter

DC-DC konverter adalah peralatan yang dapat mengubah tegangan arus searah pada nilai tertentu ke nilai yang lain. Nilai yang diubah bisa menjadi lebih besar ataupun menjadi lebih kecil dari nilai sebelumnya. DC-DC konverter biasanya digunakan untuk aplikasi baterai dan mesin-mesin yang membutuhkan tegangan arus searah yang variabel. Dengan penggunaan DC-DC konverter memungkinkan untuk menghemat jumlah penggunaan baterai jika ingin membutuhkan nilai tegangan tertentu. Berdasarkan tegangan keluarannya, DC-DC konverter terdiri dari tiga jenis yaitu :

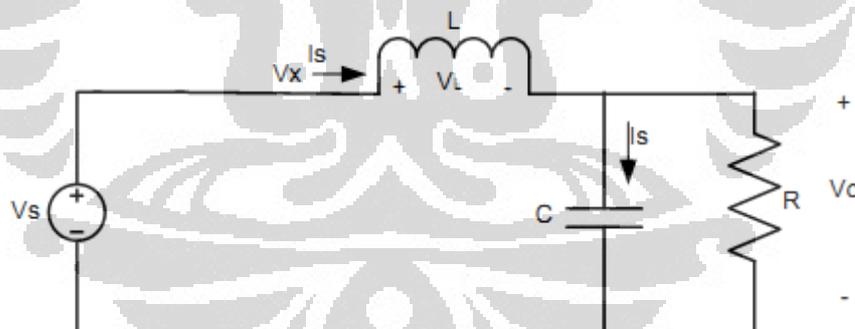
### 2.2.1 Buck Konverter

*Buck konverter* adalah salah satu topologi DC-DC konverter yang digunakan untuk menurunkan tegangan DC. Prinsip kerja rangkaian ini adalah kendali pensaklaran dengan menggunakan transistor. Komponen utama pada topologi *buck* adalah saklar (*switch*), *diode freewheel*, induktor dan kapasitor. *Switch* yang biasanya digunakan adalah MOSFET dan IGBT.

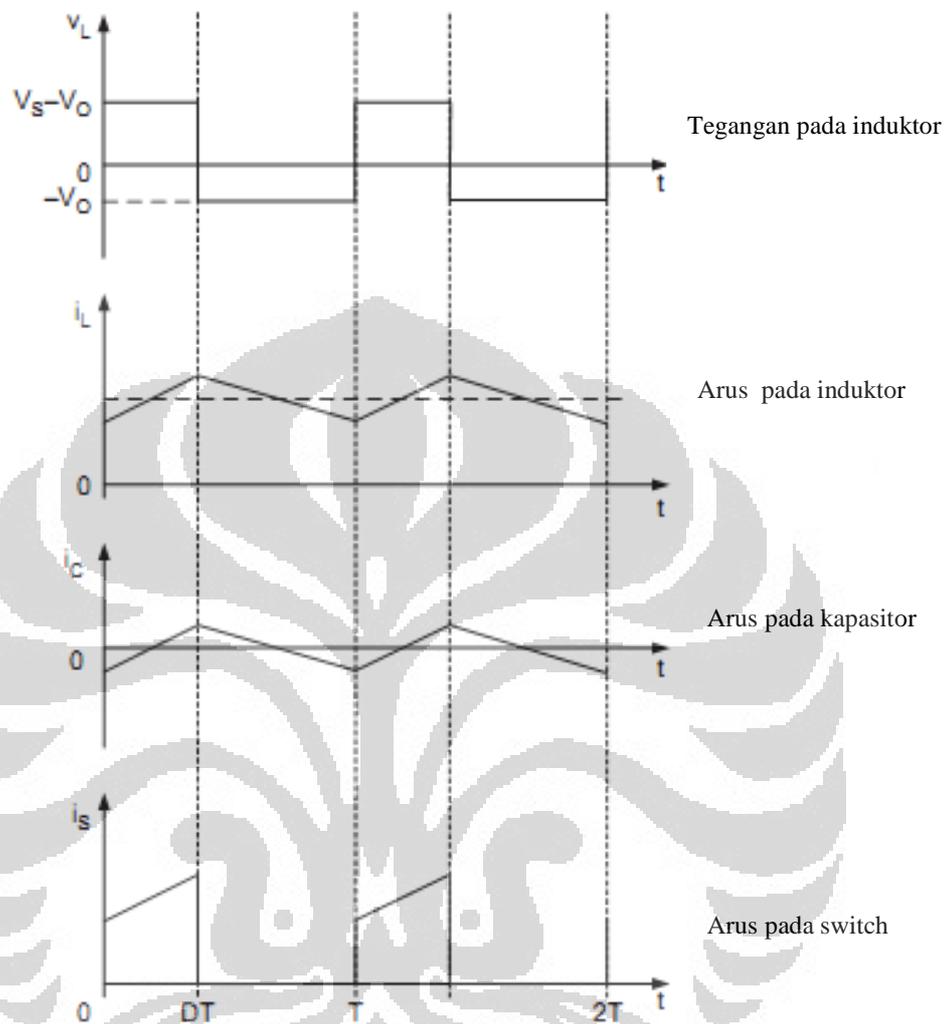


Gambar 2.11 Rangkaian *Buck konverter*

Pada saat transistor ON, maka induktor dan kapasitor terhubung ke sumber tegangan. Kondisi ON disebut ON state. Saat ON maka dioda akan mengalami *reverse bias*. Saat saklar terbuka (OFF) komponen induktor dan kapasitor akan terisolasi dari sumber tegangan. Saat kondisi OFF ini dioda menyediakan jalur untuk arus induktor. *Buck konverter* disebut juga *down konverter* karena nilai tegangan keluaran selalu lebih kecil dari tegangan inputnya. Berikut adalah penjelasan mengenai kedua kondisi pada *buck konverter*.



Gambar 2.12 Keadaan ON (*ON state*)



Gambar 2.13 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada *buck* konverter <sup>[1]</sup>

Pada saat saklar kondisi ON, maka rangkaian *buck konverter* akan tampak seperti gambar 2.12 Dioda akan *reverse bias*. Dengan demikian tegangan pada induktor adalah

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{dI}{dt} \quad (2.4)$$

sehingga diperoleh :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{(V_s - V_o)}{L} \quad (2.5)$$

maka perubahan arus dapat disimpulkan :

$$dI = \int_{ON} \frac{(V_s - V_o)}{L} dt + \int_{OFF} \frac{(V_s - V_o)}{L} dt \quad (2.6)$$

Dalam keadaan tunak (*steady state*), perioda arus awal dan akhir tidak akan berubah, sehingga dapat diasumsikan bahwa tidak ada tegangan *drop* yang melewati *switch* dan *diode* ketika pergantian mode. Dengan demikian ketika *switch* ON maka  $V_s = V_x$ , dan ketika OFF maka  $V_x = 0$ , maka

$$0 = dI = \int_0^{t_{on}} (V_s - V_o) dt + \int_{t_{on}}^{t_{on} + t_{off}} (-V_o) dt \quad (2.7)$$

yang dapat disederhanakan menjadi :

$$(V_s - V_o)t_{on} - V_o t_{off} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.9)$$

dan didefinisikan sebagai *duty ratio* yaitu :

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.10)$$

Maka hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran dapat ditulis  $V_o = D \cdot V_s$ . Dengan asumsi bahwa rangkaian tidak memiliki rugi-rugi maka daya masukan akan sama dengan daya keluaran sehingga;

$$V_s \cdot I_s = V_o \cdot I_o \quad (2.11)$$

sehingga dapat diperoleh hubungan :

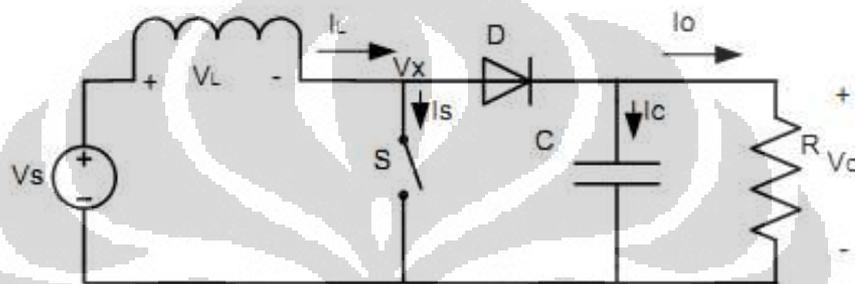
$$I_s = D \cdot I_o \quad (2.12)$$

hubungan ini berlaku dengan asumsi arus yang mengalir pada induktor L tidak mencapai 0. Pada saat transisi arus akan mencapai nilai 0 seperti pada gambar 2.13. Selama waktu ON  $V_s - V_o$  melewati induktor sehingga :

$$I_{L(peak)} = (V_{in} - V_o) \frac{t_{on}}{L} \quad (2.13)$$

### 2.2.2 Boost konverter

*Boost konverter* adalah salah satu topologi DC-DC konverter yang digunakan untuk menaikkan tegangan DC. Rangkaian ini digunakan ketika dibutuhkan tegangan keluaran yang lebih besar daripada tegangan masukannya.



Gambar 2.14 Rangkaian *Boost konverter*

Ketika saklar dalam keadaan ON, maka  $V_x = V_s$  dan ketika dalam keadaan OFF maka arus yang melalui induktor akan mengalir melalui dioda sehingga dapat diperoleh bahwa  $V_x = V_o$ . Dengan asumsi bahwa arus induktor selalu mengalami konduksi, maka tegangan yang melewati induktor ditunjukkan di gambar 2.15 Dan perubahan arus akan 0 pada keadaan tunak (*steady state*).

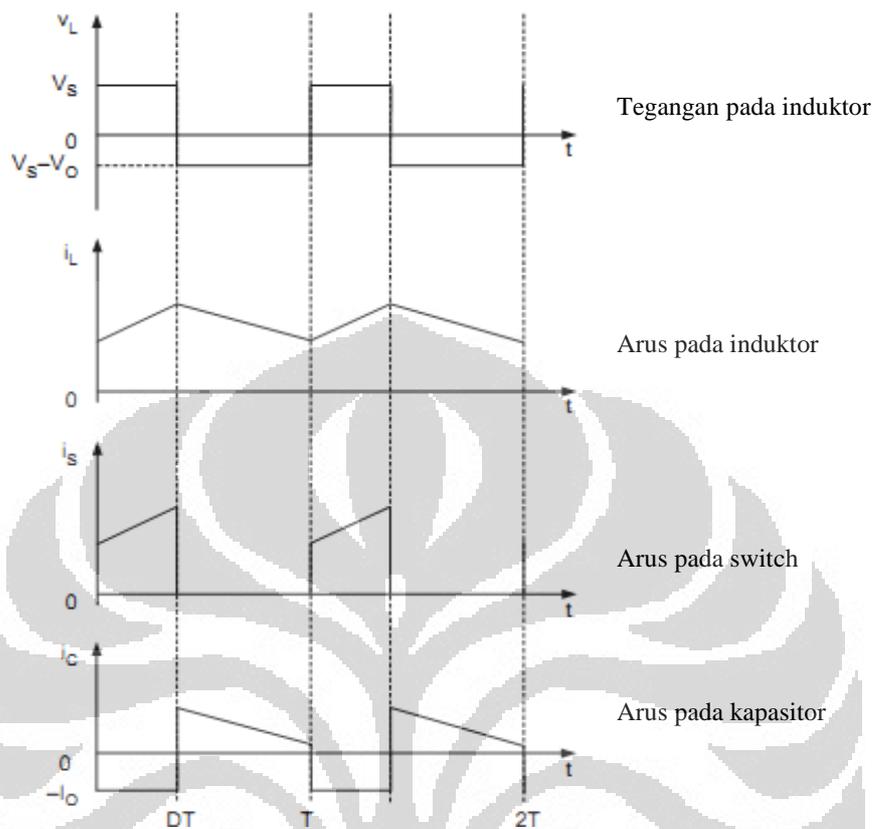
$$V_s t_{on} + (V_s - V_o) t_{off} = 0 \quad (2.14)$$

yang dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{T}{I_{off}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2.15)$$

dan untuk persamaan arus dengan asumsi rangkaian tidak memiliki rugi-rugi maka :

$$\frac{I_o}{I_s} = (1 - D) \quad (2.16)$$

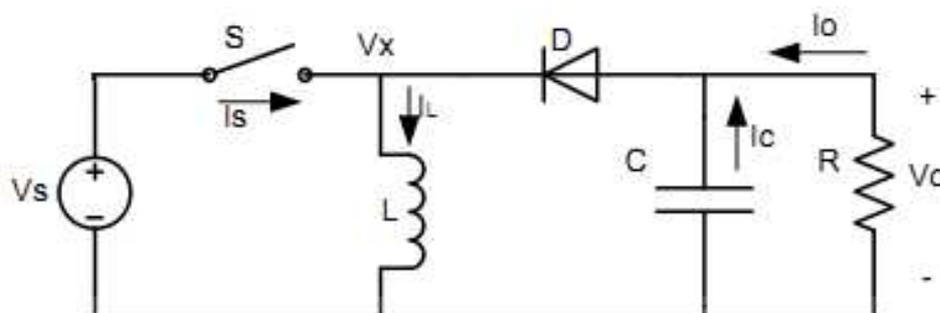


Gambar 2.15 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada *boost konverter*<sup>[1]</sup>

Dimana *duty ratio*  $D$  bernilai antara 0 dan 1. Magnitud tegangan keluaran harus selalu lebih tinggi daripada tegangan masukan. Tanda negatif menandakan kebalikan dari tegangan keluaran.

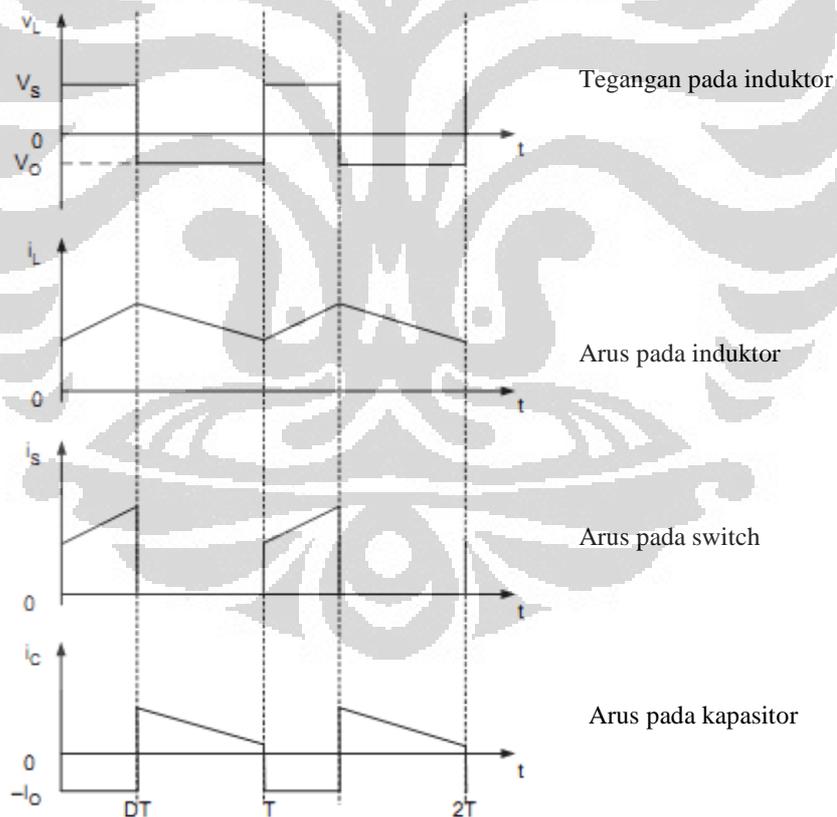
### 2.2.3 *Buck-boost konverter*

*Buck-boost konverter* merupakan kombinasi dari kedua konverter sebelumnya. Berikut adalah gambar rangkaian skematisnya:



Gambar 2.16 Rangkaian *buck-boost* konverter

Dari gambar 2.16 dapat diperoleh bahwa ketika saklar dalam keadaan ON maka  $V_x = V_s$ , ketika saklar OFF maka  $V_x = V_o$ . Berikut adalah bentuk gelombang tegangan dan arus keluarannya:



Gambar 2.17 Bentuk gelombang keluaran dari *buck-boost* konverter <sup>[1]</sup>

dimana:

$$V_s t_{on} + V_o t_{off} = 0 \quad (2.17)$$

sehingga dapat diperoleh hubungan :

$$\frac{V_o}{V_s} = - \frac{D}{(1-D)} \quad (2.18)$$

dengan asumsi tanpa rugi-rugi maka:

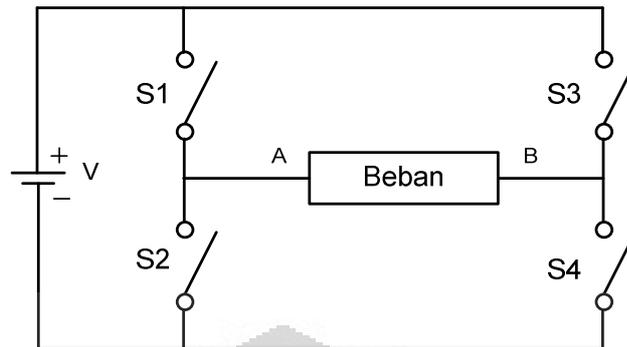
$$\frac{I_o}{I_s} = - \frac{(1-D)}{D} \quad (2.19)$$

Dimana *duty ratio* D bernilai antara 0 dan 1. Magnitud tegangan keluaran dapat bervariasi, lebih tinggi maupun lebih rendah dari tegangan masukan. Tanda negatif menandakan kebalikan dari tegangan keluaran.

### 2.3 Inverter

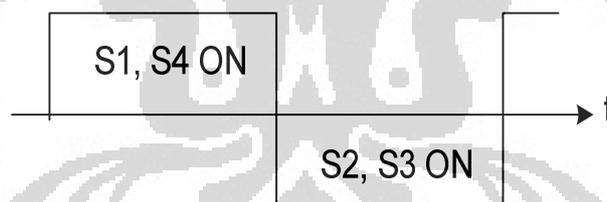
Inverter merupakan alat yang digunakan untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak balik (AC). Sumber tegangan inverter dapat berupa baterai, *solar panel*, *wind turbine* dan sumber tegangan DC lainnya dengan tegangan 120 V atau 220 V, atau 440 V dan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz.

Pada dasarnya inverter merupakan sebuah alat yang membuat tegangan bolak balik dari tegangan searah dengan cara pembentukan gelombang tegangan. Namun gelombang tegangan yang terbentuk dari inverter tidak berbentuk sinusoida melainkan berbentuk gelombang tegangan persegi. Pembentukan tegangan AC tersebut dilakukan dengan menggunakan dua pasang saklar. Berikut ini merupakan gambar yang akan menerangkan prinsip kerja inverter dalam pembentukan gelombang tegangan persegi.



Gambar 2.18 Skematik Inverter sederhana

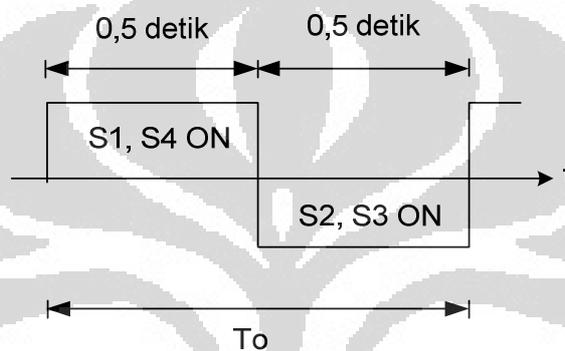
Dari gambar 2.18 di atas dapat dilihat bahwa untuk menghasilkan arus bolak balik maka kerja saklar S1 sampai S4 yang disuplai oleh tegangan DC harus bergantian. Ketika saklar S1 dan S4 hidup maka arus akan mengalir dari titik A ke titik B sehingga terbentuklah tegangan positif. Setelah itu gantian saklar S2 dan S3 yang hidup dan saklar S1 dan S4 off sehingga arus akan mengalir dari titik B ke titik A sehingga terbentuklah tegangan negatif. Pembentukan gelombang yang merupakan hasil ON-OFF keempat saklar tersebut dapat dilihat dari gambar 2.19 berikut :



Gambar 2.19 Bentuk gelombang tegangan pada beban

Pembentukan tegangan bolak-balik pada tegangan tersebut dapat dilakukan dengan cara mengubah arah arus yang mengalir pada beban. Pada  $\frac{1}{2}$  periode pertama, ketika saklar S1 dan S4 ON, maka arus akan mengalir melalui A ke B pada beban, sehingga dihasilkan tegangan positif dan pada  $\frac{1}{2}$  periode kedua, ketika saklar S2 dan S4 OFF, maka arus akan mengalir melalui B ke A pada beban, sehingga dihasilkan tegangan negatif.

Untuk mengatur frekuensi output, maka inverter dapat mengatur waktu ON-OFF saklar-saklarnya. Misalnya apabila S1 dan S4 ON selama 0,5 detik begitu juga dengan S2 dan S3 secara bergantian maka akan dihasilkan gelombang bolak-balik dengan frekuensi 1 Hz. Pada dasarnya saklar S1 – S4 dan S2 – S3 dihidupkan dengan jangka waktu yang sama. Jadi apabila dalam satu periode  $T_o = 1$  detik, maka S1 – S4 ON selama 0,5 detik dan S2 – S3 ON selama 0,5 detik dan didapatkan frekuensi sebesar 1 Hz.



Gambar 2.20 Bentuk gelombang tegangan AC dengan frekuensi 1 Hz

Jika dalam satu periode tersebut dinyatakan pada  $T$  maka nilai frekuensi yang dihasilkan adalah ( $f$ ):

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.20)$$

dimana:  $f$  = Frekuensi (Hertz)

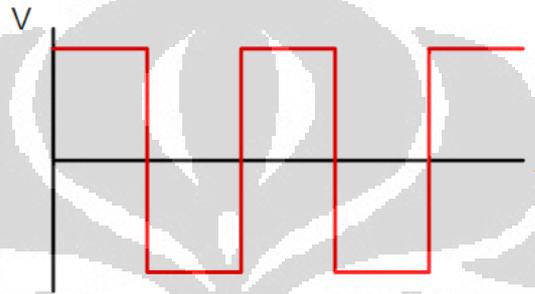
$T$  = Periode (detik)

### 2.3.1 Jenis Inverter Berdasarkan Gelombang yang Dihasilkan

Berdasarkan gelombang keluaran yang dihasilkan, inverter dapat dibagi menjadi tiga macam yakni gelombang kotak, gelombang kotak yang dimodifikasi, gelombang sinus murni.

## 1. Gelombang Kotak

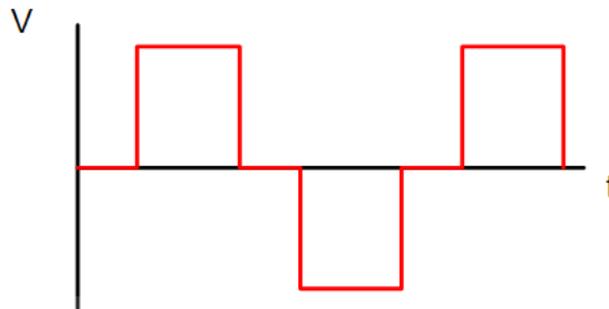
Inverter jenis ini dapat menghasilkan tegangan  $220\text{ V}_{AC}$ ,  $50\text{ Hz}$  namun kualitasnya sangat buruk sehingga hanya dapat digunakan pada beberapa alat listrik. Hal ini disebabkan karakteristik output yang dimiliki inverter jenis ini yang memiliki level gangguan harmonik (*harmonic distortion*) yang tinggi sehingga inverter ini biasa disebut *dirty power supply*.



Gambar 2.21 Keluaran inverter jenis gelombang kotak

## 2. Gelombang Kotak yang dimodifikasi

Inverter jenis ini disebut *Modifie Square Wave* atau *Quasy Sine Wave* karena gelombang kotak yang dimodifikasi ini hampir mirip dengan bentuk gelombang kotak, namun pada gelombang kotak yang dimodifikasi keluarannya menyentuh titik nol selama beberapa saat sebelum pindah ke positif atau negatif. Selain itu karena gelombang kotak yang dimodifikasi ini memiliki gangguan harmonik yang lebih sedikit dibanding gelombang kotak maka dapat dipakai untuk mengoperasikan beberapa peralatan listrik seperti komputer, TV, lampu. Namun tidak bisa untuk beban-beban yang lebih sensitif seperti printer laser dan beberapa peralatan listrik dirumah sakit.



Gambar 2.22 Keluaran inverter jenis gelombang kotak yang dimodifikasi

### 3. Gelombang Sinus Murni

Gelombang sinus murni atau *true sine wave* merupakan gelombang inverter yang menghasilkan gelombang sinus murni. 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 2.23 PWM untuk menyempurnakan bentuk sinusoidal <sup>[7]</sup>

#### 2.3.2 Inverter Grid Tie

*Inverter grid tie* merupakan sebuah tipe khusus dari inverter yang mampu mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak balik (AC) dan menyalurkannya ke jaringan listrik utilitas (PLN di Indonesia). Inverter tipe ini disebut juga dengan *synchronous inverter* atau *grid-interactive inverter*. Inverter ini memiliki dua fitur yang handal dan penting, yakni kemampuannya dalam mencocokkan atau

mensinkronisasi tegangan AC atau disebut juga *phase matching* serta proteksi terhadap gangguan pada grid atau *reaction to power outage*. Selain itu harga inverter jenis ini jauh lebih mahal dibandingkan dengan inverter biasa.

Desain inverter jenis inipun sedikit berbeda dengan inverter jenis *stand alone*. Tegangan keluaran dari inverter GTI harus memenuhi beberapa persyaratan agar inverter dapat terhubung dengan jaringan listrik PLN (tersinkronisasi) dan mengirimkan daya ke jaringan listrik tersebut.

Beberapa persyaratan tersebut antara lain adalah:

- Tegangan inverter harus sedikit lebih besar dari tegangan jaringan listrik PLN.
- Phasa inverter harus sama dengan yang dimiliki jaringan listrik PLN.
- Frekuensi dari tegangan yang dihasilkan haruslah sama dengan frekuensi jaringan listrik PLN, (50 Hz untuk Indonesia).

### 2.3.3 Karakteristik *Inverter Grid Tie*

Inverter yang dikeluarkan pabrik *manufacturer* umumnya memiliki lembar spesifikasi mengenai produknya tersebut. Data – data yang terkandung didalam lembar spesifikasi atau *manual book* tersebut mengandung spesifikasi , fitur dan karakteristik seperti yang disebutkan dibawah ini :

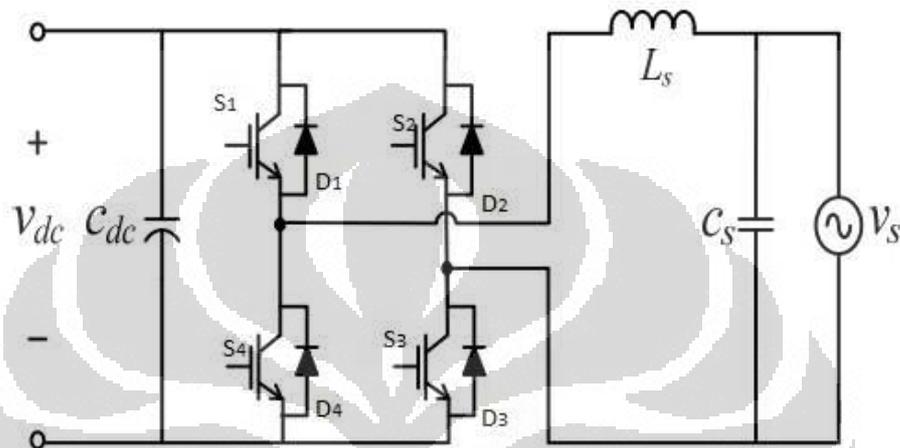
- *Rated output power*. Nilai ini merupakan daya nominal yang mampu dihasilkan oleh inverter. Pada beberapa inverter daya yang dikeluarkan berbeda tergantung pada tegangan outputnya. Sebagai contoh suatu inverter dapat diset tegangan keluarannya pada 200 V<sub>AC</sub> dan 240 V<sub>AC</sub>. Maka daya yang dihasilkan tiap tegangan yang diset tersebut akan berbeda.
- *Output voltage*. Nilai ini mengindikasikan untuk tegangan listrik di suatu tempat inverter tersebut dapat digunakan. Sebagai contoh pada tegangan keuaran untuk Negara US adalah 120 V<sub>AC</sub> sedangkan di Indonesia tegangan utilitasnya adalah 220 V<sub>AC</sub>.

- *Peak efficiency*. Efisiensi puncak atau efisiensi puncak menyatakan efisiensi tertinggi yang dapat diraih inverter. Kebanyakan *inverter grid tie* yang dijual dipasaran saat ini dapat menghasilkan efisiensi 94% sampai 96%. Energi yang hilang selama proses konversi tersebut kebanyakan diubah menjadi panas yang dihasilkan inverter. Itu artinya untuk menghasilkan daya yang sesuai dengan *rated output power*-nya maka daya inputnya haruslah lebih besar dari daya keluaran yang diinginkan. Sebagai contoh, sebuah inverter 5000 W dapat menghasilkan daya penuh 5000 W jika diberikan input sebesar 5263 W.
- *Maximum input current*. Menyatakan jumlah maksimal arus masukan yang dapat diterima inverter. Jika suplai DC, seperti modul PV menghasilkan arus yang lebih besar dari maksimum arus masukan, arus tersebut tidak dapat digunakan inverter.
- *Maximum output current*. Merupakan maksimum arus AC yang akan disuplai inverter. Nilai ini dapat dijadikan acuan untuk menentukan rating arus pengaman arus lebih untuk inverter untuk *disconnect* inverter dari rangkaian. Inverter yang mampu menghasilkan tegangan output AC yang bervariasi akan memiliki maksimum arus keluaran yang berbeda-beda untuk tiap tegangannya.
- *Peak power tracking voltage*. Parameter ini merupakan *range* tegangan DC dimana *maximum power point* inverter akan bekerja. Hal ini cukup rumit karena tegangan karena pengaruh temperatur.
- *Start voltage*. Nilai ini tidak tercantum pada semua *data sheet* inverter. Nilai ini menunjukkan tegangan DC input yang dibutuhkan agar inverter dapat bekerja.

#### 2.4 Bi-directional inverter

*Bi-directional inverter* merupakan peralatan yang dapat mengubah tegangan arus AC ke DC dalam 2 (dua) arah. Dengan kata lain, alat ini dapat mengubah tegangan arus AC ke DC dan sebaliknya dari DC ke AC. *Bi-directional inverter* memiliki 2 buah komponen utama yaitu *inverter* dan *rectifier*. Dimana *inverter*

berfungsi untuk mengubah tegangan DC ke AC, sedangkan *rectifier* berfungsi untuk mengubah tegangan AC ke DC. Prinsip kerja dari *bi-directional inverter* ini mengadopsi kedua peralatan diatas. Berikut adalah gambar skematis untuk *bi-directional inverter* dengan konfigurasi jembatan penuh (*full bridge*).



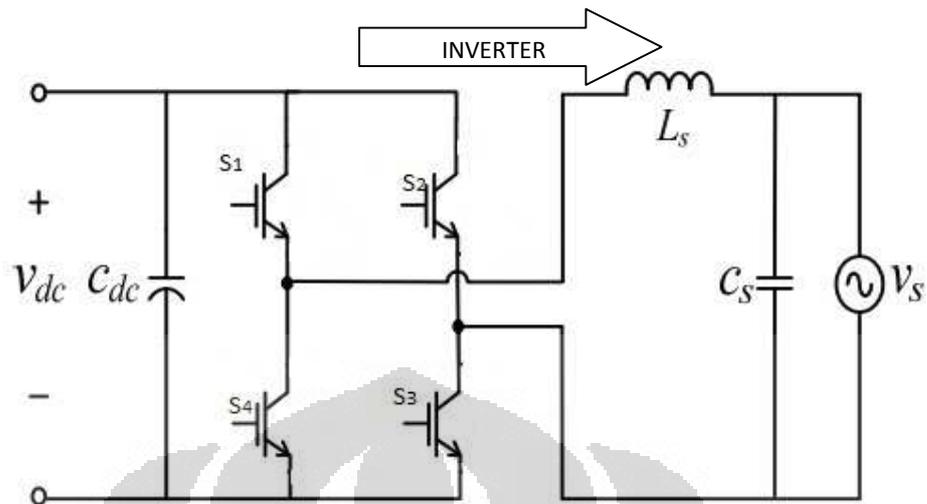
Gambar 2.24 Rangkaian skematis *bi-directional inverter full bridge* <sup>[2]</sup>

Pada gambar skematis diatas dapat dilihat bahwa komponen *transistor switch* dan *diode* dipasang secara paralel namun dengan arah yang berlawanan sehingga dapat beroperasi dalam 2 (dua) arah. Berikut adalah prinsip kerja dari *bi-directional inverter* yang bekerja dalam 2 (dua) mode yaitu :

1. Mode *inverter* dimana DC Mikrogrid memberikan daya ke jaringan PLN (*Utility Grid*).
2. Mode *rectifier* yaitu DC Mikrogrid mengalami kekurangan daya sehingga menerima suplai dari PLN.

#### 2.4.1 Mode *Inverter*

Pada mode ini, maka akan diubah tegangan DC ke AC. Semua *diode rectifier* yang dipasang paralel dengan transistor akan mengalami *reverse bias*, sehingga dalam keadaan *open*, sehingga *bi-directional inverter* memiliki gambar skematis yang sama seperti *inverter*. Berikut gambar skematisnya:

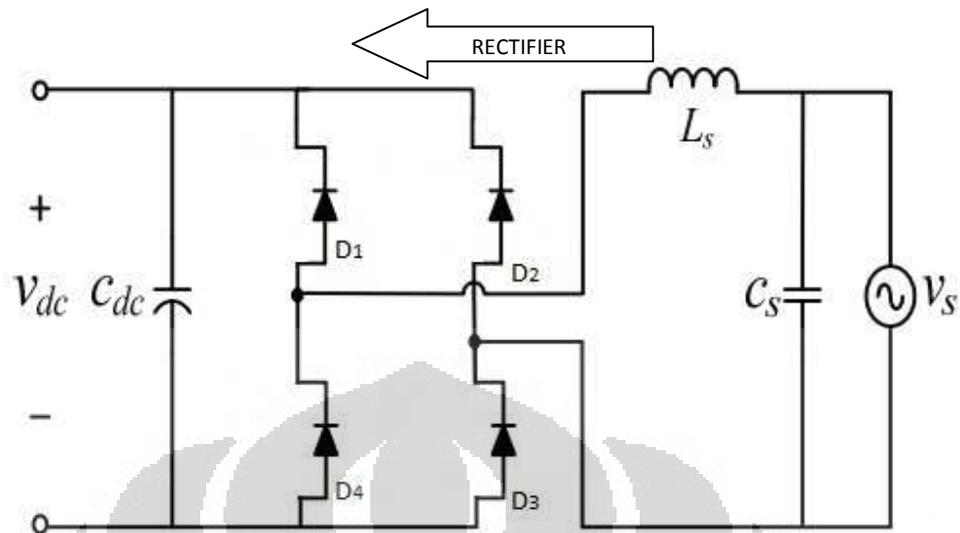


Gambar 2.25 *bi-directional inverter* dalam mode *inverter* [2]

Pada kondisi seperti gambar, maka proses perubahan dari DC ke AC tergantung pada pengaturan *switch*. Proses perubahan tegangan DC ke AC sama dengan yang dijelaskan pada penjelasan tentang *inverter*. *Bi-directional inverter* ini akan bekerja sebagai *inverter* ketika *DC Mikrogrid* akan menyuplai daya listrik ke PLN. *DC Mikrogrid* menyuplai ke PLN ketika daya yang dihasilkan oleh pembangkit energi terbarukan melebihi kebutuhan beban. PLN yang menggunakan tegangan arus bolak-balik sedangkan *DC Mikrogrid* yang menggunakan tegangan arus searah sehingga perlu menggunakan *inverter* untuk mengubah ke tegangan arus bolak-balik.

#### 2.4.2 Mode *Rectifier*

Pada mode ini, maka akan diubah tegangan AC ke DC. Semua transistor *switch* yang dipasang paralel dengan *diode rectifier* akan mengalami *reverse bias*, sehingga dalam keadaan *open*, sehingga *bi-directional inverter* memiliki gambar skematis yang sama dengan *rectifier* seperti gambar dibawah ini:



Gambar 2.26 *bi-directional inverter* dalam mode *rectifier* <sup>[2]</sup>

Pada kondisi ini maka akan diubah tegangan AC ke DC. Dengan menggunakan penyearah gelombang penuh dan filter  $C_{dc}$  maka akan dihasilkan keluaran DC yang mendekati DC ideal. Proses pengubahan tegangan AC ke DC sama dengan penjelasan tentang penjelasan *rectifier full bridge* (jembatan penuh). *Bi-directional inverter* ini akan bekerja sebagai *rectifier* ketika *Utility grid* akan menyuplai daya listrik ke *DC Mikrogrid Grid*. DC Mikrogrid menerima suplai dari *Utility grid* ketika daya yang dihasilkan oleh pembangkit energi terbarukan kekurangan daya untuk memenuhi kebutuhan beban. *Utility Grid* yang menggunakan tegangan arus bolak-balik sedangkan DC Mikrogrid yang menggunakan tegangan arus searah sehingga perlu menggunakan *rectifier* untuk mengubah ke tegangan arus searah.

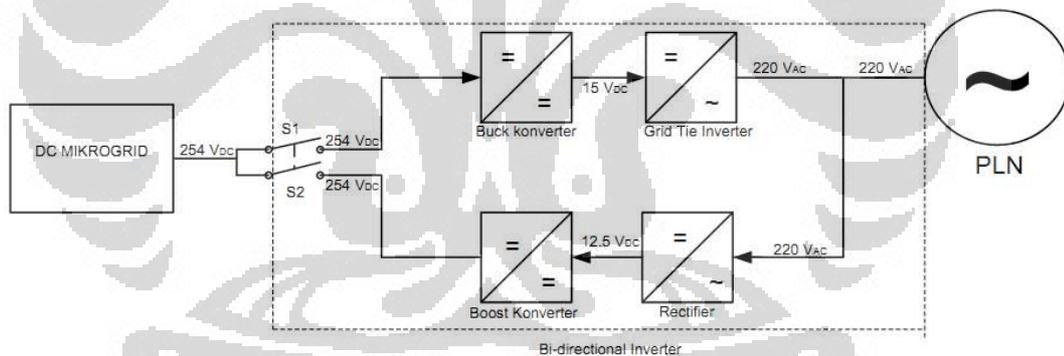
### BAB 3

## PERANCANGAN SISTEM

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai rancangan sistem *bi-directional inverter* yang akan dibuat. DC Mikrogrid yang membutuhkan tegangan  $254\text{ V}_{\text{DC}}$  sedangkan PLN menggunakan tegangan  $220\text{ V}_{\text{AC}}$  sehingga dibutuhkan peralatan yang mampu menghubungkan kedua sistem tersebut yaitu *bi-directional inverter*. Penggunaan inverter dua arah (*bi-directional inverter*) terdiri dari kombinasi *inverter*, *rectifier*, *buck converter* dan *boost converter*.

### 3.1 Blok Diagram sistem *bi-directional inverter* pada DC Mikrogrid

Blok diagram dari *bi-directional inverter* yang dirancang pada tugas akhir ini dapat dilihat dari gambar di bawah :



Gambar 3.1 Skema Rancangan *bi-directional converter*

Berikut adalah peralatan-peralatan yang digunakan pada rancangan *bi-directional inverter* :

- *Inverter Grid Tie*
- *Penyearah (Rectifier)*
- *Buck konverter*
- *Boost konverter*

### 3.1.1 Grid Tie Inverter

GTI inverter mempunyai peranan penting dalam sistem *bi-directional inverter* dimana selain berfungsi untuk mengubah tegangan arus searah menjadi tegangan arus bolak-balik, GTI juga mampu membangkitkan gelombang sinus murni untuk disinkronisasikan ke tegangan PLN, jenis inverter ini juga memiliki beberapa fitur yang cukup handal baik dalam proteksi maupun dalam menjaga kualitas daya keluarannya. Berikut ini beberapa fitur yang umumnya ada pada GTI <sup>[4]</sup>:

#### 1. Padam secara otomatis jika terjadi kegagalan pada keluaran

Ketika listrik dari sumber PLN tiba-tiba padam maka inverter secara otomatis akan langsung mematikan daya outputnya.

#### 2. Proteksi kegagalan (*Failure Protection*)

Inverter ini umumnya telah dilengkapi dengan pengamanan terhadap gangguan seperti:

- Proteksi tegangan rendah, ketika input tegangan DC kurang dari  $10.5 V_{DC}$ . Proteksi tegangan lebih, ketika input tegangan DC inverter lebih besar dari  $28 V_{DC}$
- Proteksi temperatur, ketika temperatur diatas suhu kerja inverter, biasanya diatas  $75^{\circ}C$  inverter akan otomatis padam dan hidup kembali setelah 2-10 menit untuk pendinginan.
- Proteksi arus, inverter ini mengeluarkan arus dan daya yang tetap tanpa dapat menyebabkan tegangan lebih maupun arus lebih.

#### 3. Paralel inverter

Untuk mendapatkan daya output yang lebih besar inverter ini dapat dipasang secara paralel bersama inverter GTI lain.

Berikut ini merupakan spesifikasi yang terdapat pada inverter GTI yang digunakan dalam perancangan Sistem bi-directional inverter ini:

Tabel 3.1 Spesifikasi *Inverter Grid Tie* <sup>[4]</sup>

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| DC Maximum Input Power                            | PDC.max=600W                         |
| DC Maximum Voltage                                | VpvDC28VDC                           |
| PV MPPT DC Voltage Range                          | Vpv 10.5V~28DC                       |
| Peak Inverter Efficiency                          | $\eta_{max}>94\%$                    |
| Power Factor                                      | 0.93-0.99                            |
| PV Maximum Input Current                          | Ipv.max65A                           |
| Reverse Polarity Protection                       | Fuse                                 |
| AC Rating Output Power                            | 500W AC                              |
| AC Maximum Output Power                           | 500W AC                              |
| AC Normal Voltage Range                           | 80V-130;160~260VAC                   |
| AC Frequency                                      | 45-65Hz                              |
| Inverter Output Current Total Harmonic Distortion | THDIAC <5%                           |
| Phase shift                                       | <1%                                  |
| Island Effect Protection                          | inverter shuts down during black out |
| Output waveform                                   | Pure Sine Wave                       |
| Inverter Output Shorting Protection               | Current Limiting                     |
| Standby Power Consumption                         | <8W                                  |
| Nighttime Power Consumption                       | <1W                                  |
| Ambient Temperature Range                         | -20 °C~65°C                          |
| Cooling   | Convection cooled with fan           |
| Ambient Humidity                                  | 0~100% (Indoor Type Design)          |

### 3.1.2 Penyearah (*Rectifier*) dan *Buck* konverter

Pada perancangan sistem bi-directional inverter ini penyearah (*Rectifier*) merupakan peralatan yang dapat bekerja sekaligus sebagai *buck* konverter. Hal ini bisa terjadi karena pada prinsipnya peralatan yang berbasis *switching* bisa menggunakan masukan arus searah. Berikut adalah spesifikasi dari penyearah yang biasa disebut sebagai *switching power supply*.

Tabel 3.2 Spesifikasi *Switching Power Supply* <sup>[5]</sup>

| <b>Type</b>   | <b>S-145-12</b> |             |
|---------------|-----------------|-------------|
| <b>Input</b>  | <b>Tegangan</b> | <b>Arus</b> |
|               | 100-120 VAC     | 3.2 Ampere  |
|               | 200-240 VAC     | 1.6 Ampere  |
|               | 240-340 VDC     | 1.6 Ampere  |
| <b>output</b> | 10-15 VDC       | 12 Ampere   |

### 3.1.3 *Boost* konverter

*Boost* konverter merupakan DC-DC konverter yang dapat menaikkan tegangan keluarannya. *Boost* konverter yang digunakan merupakan modifikasi dari sebuah inverter. Berikut adalah spesifikasi dari *boost* konverter yang digunakan :

Tabel 3.3 Spesifikasi *Boost* konverter <sup>[6]</sup>

|                    | <b>Model</b>   | <b>IPS-600</b>    |
|--------------------|----------------|-------------------|
| <b>Input</b>       | kapasitas      | 600VA/350W        |
|                    | nilai tegangan | DC 12V            |
|                    | range tegangan | DC 10,5V-14,5 V   |
| <b>Output</b>      | tegangan       | AC 253 ± 5%       |
|                    | Daya Maksimum  | 400 W             |
|                    | Optimal        | 350 W             |
| <b>Environment</b> | Temperatur     | 0-40 °C           |
|                    | kelembapan     | 10% RH-90% RH     |
|                    | Noise          | <45dB(A)          |
| <b>Figur</b>       | dimensi        | 210 x 152 x 71 mm |
|                    | Netto          | 1.5 kg            |

Untuk proteksi, *boost* konverter memiliki beberapa fitur yaitu <sup>[6]</sup> :

#### 1. Proteksi beban lebih (*Overload protection*)

*Boost* konverter mampu memikul beban sampai 120% kapasitas daya maksimumnya. Ketika beban yang dipikulnya melebihi 120% kapasitas daya maksimumnya maka *boost* konverter akan padam secara otomatis.

## 2. Proteksi hubung singkat pada keluaran (*Output short-circuit protection*)

Ketika terjadi hubung singkat pada bagian masukan *boost* konverter, maka alat ini akan otomatis padam.

## 3. Proteksi tegangan rendah (*Low DC voltage protection*)

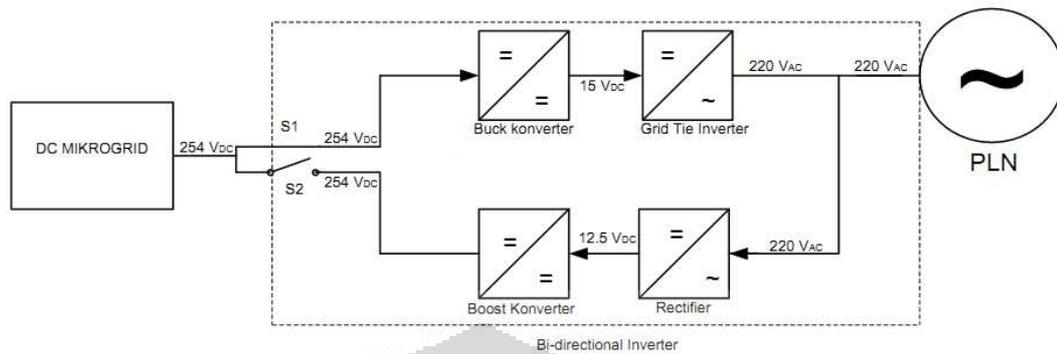
Ketika tegangan masukan berada dibawah  $10 V_{DC}$ , maka alat ini akan membunyikan alarm dan akan padam secara otomatis.

### 3.2 Kontaktor

Kontaktor berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan saluran antara DC Mikrogrid dengan PLN. Kontaktor akan bekerja berdasarkan kontrol dari DC Mikrogrid.

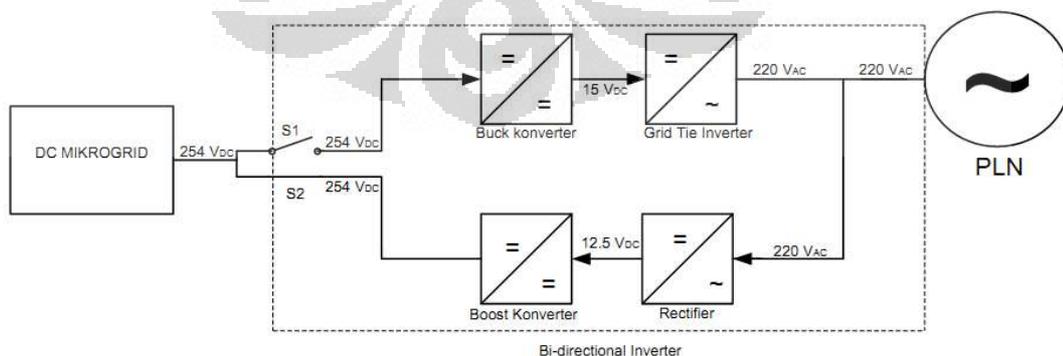
### 3.3 Deskripsi kerja Sistem

Rangkaian *bi-directional inverter* ini dibagi menjadi 2 (dua) mode yaitu sebagai inverter dan sebagai penyearah. Pada mode inverter, DC mikrogrid akan mensuplai daya ke PLN. Mode inverter akan bekerja ketika daya yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan (*renewable energy*) melebihi kebutuhan beban yang sedang dipikul oleh DC mikrogrid. Dalam keadaan ini maka S1 akan ON, sedangkan S2 akan OFF. Dalam mode inverter ini, DC Mikrogrid akan mensuplai jika PLN dalam keadaan ON. Dari DC Mikrogrid maka tegangan DC akan diturunkan menjadi  $14,5 V_{DC}$ . Tegangan masukan inverter diberikan sebesar  $14,5 V_{DC}$  karena pada tegangan itu inverter akan mulai bekerja dengan baik. Mengapa tegangan tidak dinaikkan pada titik yang lebih tinggi? Hal ini dilakukan karena keterbatasan dari alat yaitu *buck* konverter yang hanya dapat menurunkan tegangan antara  $10-15 V_{DC}$  selain itu transfer daya yang dilakukan oleh DC mikrogrid ke PLN dibatasi pada nilai tertentu.



Gambar 3.2 Mode Inverter

Pada mode penyearah, DC mikrogrid akan menerima daya dari PLN. Mode penyearah ini akan bekerja ketika DC mikrogrid mengalami kekurangan daya, dimana daya yang sumber energi terbarukan lebih kecil dibandingkan kebutuhan beban yang sedang dipikul oleh DC mikrogrid. Dalam keadaan ini maka S2 akan ON, sedangkan S1 akan OFF. Dari PLN tegangan akan diturunkan dari 220 V<sub>AC</sub> menjadi 12,5 V<sub>DC</sub>. Tegangan masukan pada *boost* konverter adalah 12,5 V<sub>DC</sub>. Hal ini dikarenakan tegangan masukan yang optimal dari *boost* konverter adalah 12,5 V<sub>DC</sub> dengan tegangan keluaran 254 V<sub>DC</sub>. Hal ini dilakukan berdasarkan pengujian dimana *boost* konverter yang digunakan adalah hasil modifikasi dari sebuah inverter yang memiliki 2 buah keluaran AC. Pada saat dimodifikasi, maka salah satu *port* diubah keluarannya menjadi DC. Dengan tegangan masukan 12,5 V<sub>DC</sub> maka akan dihasilkan tegangan keluaran 220 V<sub>AC</sub> dan 254 V<sub>DC</sub>.

Gambar 3.3 Mode Penyearah (*rectifier*)

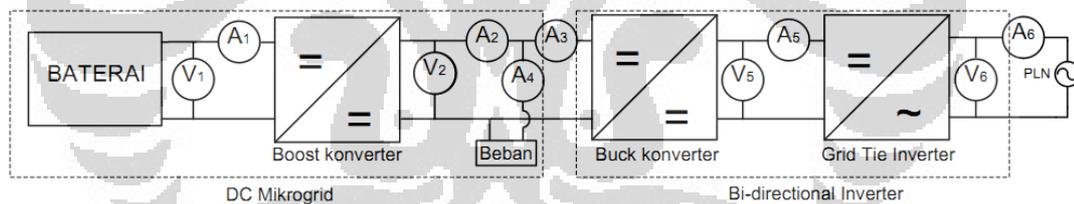
## BAB 4

### ANALISA PERANCANGAN BI-DIRECTIONAL INVERTER

Pengujian karakteristik *bi-directional inverter* ini dilakukan untuk mengetahui kapasitas dan efisiensi dari *bi-directional inverter* itu sendiri. Pengujian ini dilakukan dengan dua skenario kerja yaitu, ketika DC Mikrogrid bekerja mensuplai daya ke PLN dan DC Mikrogrid mengambil daya dari PLN, berikut penjelasannya:

#### 4.1 Simulasi transfer daya dari DC Mikrogrid ke PLN

Dalam pengujian ini, DC Mikrogrid disimulasikan oleh baterai, *boost* konverter dan beban. DC Mikrogrid memiliki tegangan bus sebesar 254 V<sub>DC</sub> yang direpresentasikan oleh tegangan keluaran dari *boost* konverter. Dalam pengujian ini akan disimulasikan kondisi ketika ketika DC Mikrogrid mentransfer daya listrik ke PLN dalam keadaan tanpa beban dan dengan beban. Berikut adalah rangkaian pengujiannya:



Gambar 4.1 Rangkaian pengujian transfer daya dari DC Mikrogrid ke PLN

Pada saat DC Mikrogrid tidak berbeban, maka DC Mikrogrid akan mentransfer daya secara maksimum ke PLN. Hal inilah yang akan menunjukkan kapasitas maksimum dari *bi-directional inverter* saat bekerja sebagai inverter. Pada saat DC Mikrogrid sedang berbeban, maka akan dilihat karakteristik dan kemampuan dari DC Mikrogrid dalam mensuplai daya listrik ke PLN. Berikut adalah data hasil pengujian :

Tabel 4.1 Karakteristik transfer daya DC Mikrogrid ke PLN

| Beban(W) | A1(A) | V1(V) | A2(A) | A3(A) | A4(A) | V2(V) | A5(A) | V5(V) | A6(A) | V6(V) |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0        | 13.7  | 12.02 | 0.57  | 0.57  | 0     | 253   | 8.45  | 14.86 | 0.55  | 226   |
| 6.7      | 14.35 | 11.98 | 0.6   | 0.57  | 0.03  | 251   | 8.42  | 14.86 | 0.54  | 226   |
| 13.9     | 15.05 | 11.95 | 0.63  | 0.57  | 0.06  | 250   | 8.38  | 14.86 | 0.53  | 226   |
| 21.4     | 15.8  | 11.92 | 0.66  | 0.57  | 0.09  | 250   | 8.33  | 14.86 | 0.53  | 226   |
| 28.7     | 15.77 | 11.89 | 0.66  | 0.54  | 0.12  | 248   | 7.95  | 14.85 | 0.51  | 226   |
| 36.1     | 16.28 | 11.86 | 0.69  | 0.54  | 0.15  | 247   | 7.8   | 14.85 | 0.49  | 226   |
| 43.2     | 16.35 | 11.81 | 0.7   | 0.52  | 0.18  | 246   | 7.64  | 14.84 | 0.47  | 226   |
| 50.1     | 16.56 | 11.78 | 0.7   | 0.49  | 0.21  | 245   | 7.23  | 14.8  | 0.44  | 227   |
| 57.5     | 16.57 | 11.7  | 0.7   | 0.46  | 0.24  | 244   | 6.9   | 14.77 | 0.42  | 226   |
| 64.2     | 16.57 | 11.65 | 0.7   | 0.43  | 0.27  | 243   | 6.61  | 14.71 | 0.4   | 226   |

Pada saat DC Mikrogrid tidak berbeban, maka DC Mikrogrid akan mensuplai penuh ke PLN. Dengan perhitungan sebagai berikut:

$$P1 = A1 \times V1 = 13.7A \times 12.02V = 164.67 VA$$

$$P2 = A2 \times V2 = 0.57A \times 253V = 144.21 VA$$

$$P3 = A3 \times V2 = 0.57A \times 253V = 144.21 VA$$

$$P4 = A4 \times V2 = 0A \times 253V = 0 VA$$

$$P5 = A5 \times V5 = 8.45A \times 14.86V = 125.57 VA$$

$$P6 = A6 \times V6 = 0.55A \times 226V = 124.3 VA$$

Dengan proses perhitungan diatas, berikut adalah hasil perhitungan secara keseluruhan :

Tabel 4.2 Perhitungan daya pada simulasi transfer daya DC Mikrogrid ke PLN

| P1 (VA) | P2 (VA) | P3 (VA) | P4 (VA) | P5 (VA) | P6 (VA) |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 164.67  | 144.21  | 144.21  | 0       | 125.57  | 124.3   |
| 171.91  | 150.60  | 143.07  | 7.53    | 125.12  | 122.04  |
| 179.85  | 157.50  | 142.50  | 15      | 124.53  | 119.78  |
| 188.34  | 165.00  | 142.50  | 22.5    | 123.78  | 119.78  |
| 187.51  | 163.68  | 133.92  | 29.76   | 118.06  | 115.26  |

|        |        |        |       |        |        |
|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 193.08 | 170.43 | 133.38 | 37.05 | 115.83 | 110.74 |
| 193.09 | 172.20 | 127.92 | 44.28 | 113.38 | 106.22 |
| 195.08 | 171.50 | 120.05 | 51.45 | 107.00 | 99.88  |
| 193.87 | 170.80 | 112.24 | 58.56 | 101.91 | 94.92  |
| 193.04 | 170.10 | 104.49 | 65.61 | 97.23  | 90.4   |

Sesuai dengan skenario diatas bahwa DC Mikorogrid direpresentasikan oleh baterai, *boost* konverter dan beban, maka untuk daya masukan dari *bi-directional inverter* adalah P3 (daya masukan pada *buck* konverter) dan daya keluarannya adalah P6 (daya yang diterima PLN). Dari proses perhitungan tersebut maka dapat dilihat kapasitas maksimum dari *bi-directional inverter* pada saat bekerja sebagai inverter yaitu 124.3 VA. Kemampuan maksimum tersebut terjadi karena keterbatasan dari alat yang digunakan dalam konfigurasi *bi-directional inverter* ini. Secara matematis kemampuan maksimumnya adalah sebagai berikut :

1. *Buck* konverter

*Buck* konverter memiliki spesifikasi seperti pada tabel 3.2. Dengan perhitungan daya keluaran maksimum sebagai berikut:

$$P_{out} = 15 V \times 12 A = 180 VA$$

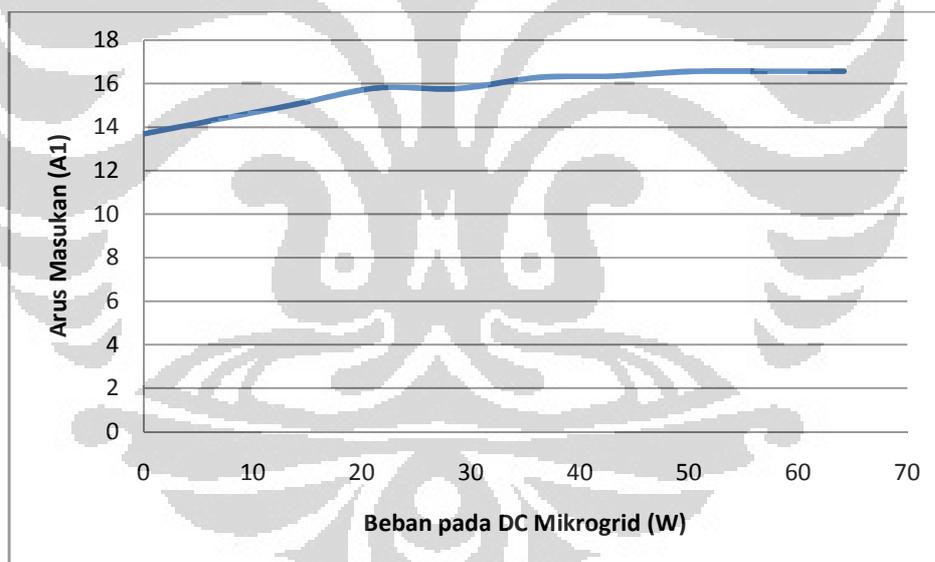
Sementara untuk keluaran maksimum dari *buck* konverter yaitu P5 yaitu 125.57 VA. Hal ini terjadi karena beberapa kemungkinan yaitu :

- Daya masukan pada *buck* konverter yang tidak melebihi 180 VA sehingga tidak mungkin menghasilkan daya keluaran yang mendekati 180 VA.
- Pada keluaran *buck* konverter dihubungkan dengan GTI (*Grid Tie Inverter*), dimana GTI memiliki karakteristik MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). GTI akan menarik arus yang besar pada tegangan yang optimal, namun pada pengujian ini kemampuan GTI tidak mencapai pada titik maksimum karena keterbatasan dari tegangan keluaran dari *buck* konverter.

## 2. Grid Tie Inverter (GTI)

Untuk kapasitas dari GTI yang dipakai adalah 500W. Namun karena keterbatasan dari tegangan masukan dari *buck* konverter dan karakteristik MPPT sehingga GTI tidak mampu menarik arus pada titik yang optimal.

Ketika DC Mikrogrid diberikan beban, maka dari data pada tabel 4.1 dapat dilihat bahwa kontribusi arus dari DC Mikrogrid ke PLN semakin menurun sehingga daya yang diterima PLN juga semakin menurun. Penurunan ini terjadi karena sudah adanya beban yang dipikul oleh DC Mikrogrid. Hal ini juga dibuktikan dengan semakin menurunnya arus yang masuk pada *buck* konverter (A3) dan pada GTI (A5) sehingga secara tidak langsung akan menjadi indikasi menurunnya arus yang diterima oleh PLN (A6).

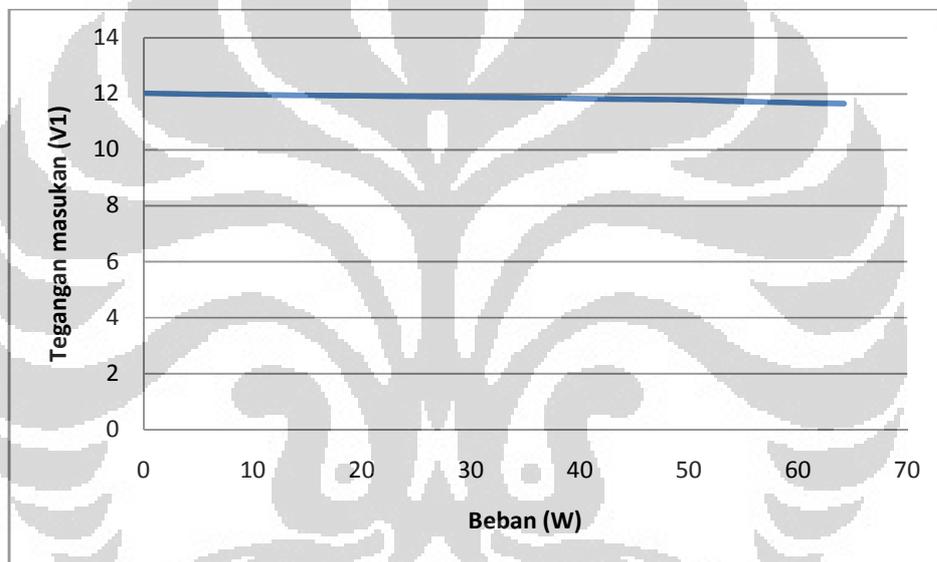


Gambar 4.2 Grafik arus masukan (A1) *boost* konverter vs beban

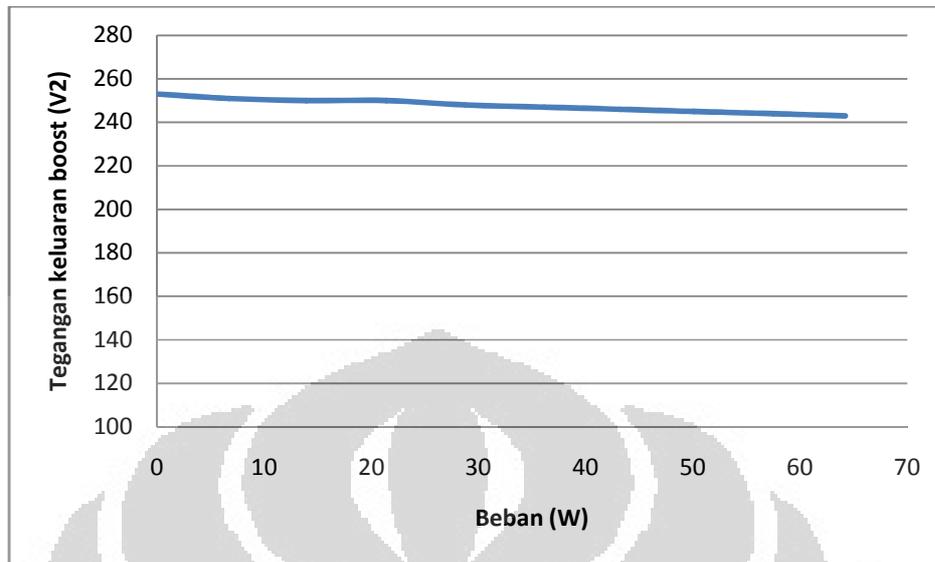
Grafik diatas menunjukkan karakteristik arus masukan pada *boost* konverter ketika diberi beban variabel. Terdapat peningkatan arus yang hampir linear ketika diberi beban variabel. Hal ini sesuai dengan rumus perhitungan daya, dengan asumsi tegangan konstan, berikut penjelasannya :

$$P = V \times I$$

Ketika  $P$  pada beban naik, maka  $I$  juga akan naik. Pada grafik diatas, laju pertambahan nilai  $I$  tidak linear, hal ini terjadi karena adanya *drop* tegangan pada bagian masukan ( $V_1$ ) maupun bagian keluaran ( $V_2$ ) dari *boost* konverter. Selain itu, sifat masukan ataupun keluaran pada *boost* konverter dipengaruhi oleh karakteristik MPPT dari GTI. Hubungan antara tegangan masukan ( $V_1$ ) dan tegangan keluaran ( $V_2$ ) *boost* konverter terhadap perubahan beban, dapat dilihat pada gambar 4.3 dan gambar 4.4 dibawah ini :

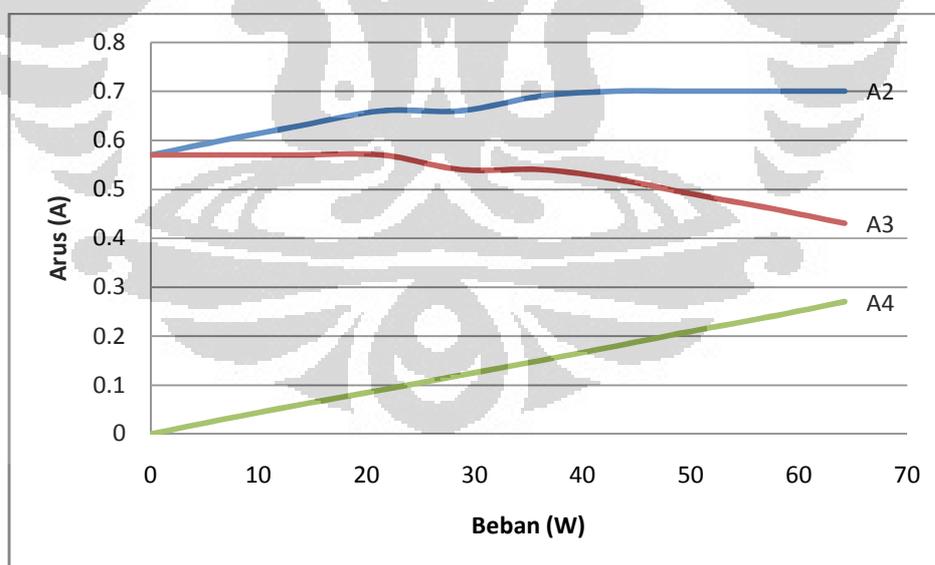


Gambar 4.3 Grafik tegangan masukan ( $V_1$ ) *boost* konverter vs beban



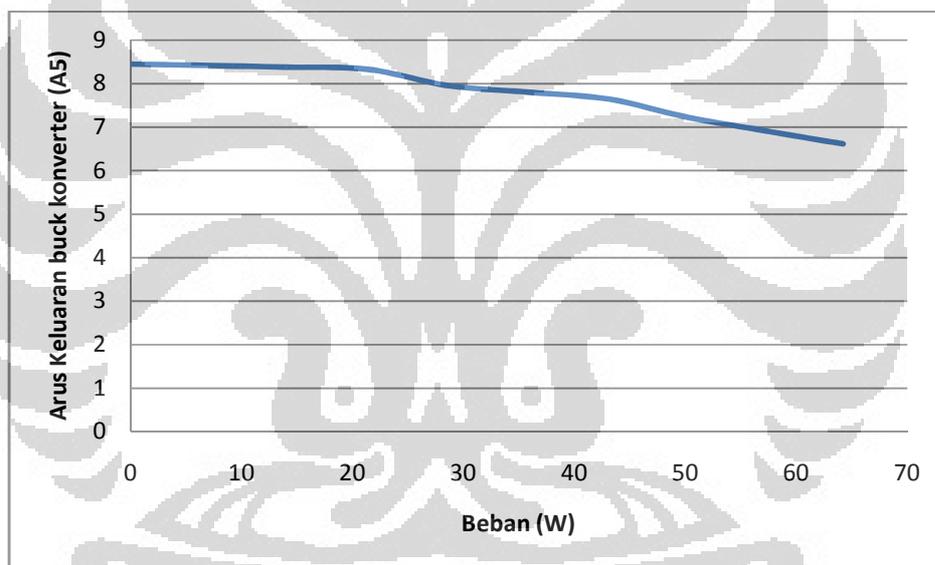
Gambar 4.4 Grafik tegangan keluaran (V2) *boost* konverter vs beban

Pada bagian keluaran dari *boost* konverter terdapat percabangan, dimana salah satu cabang akan terhubung ke *buck* konverter dan satu cabang lagi terhubung ke beban. Perubahan arus yang melalui cabang tersebut, dapat dilihat pada gambar 4.5 ini :

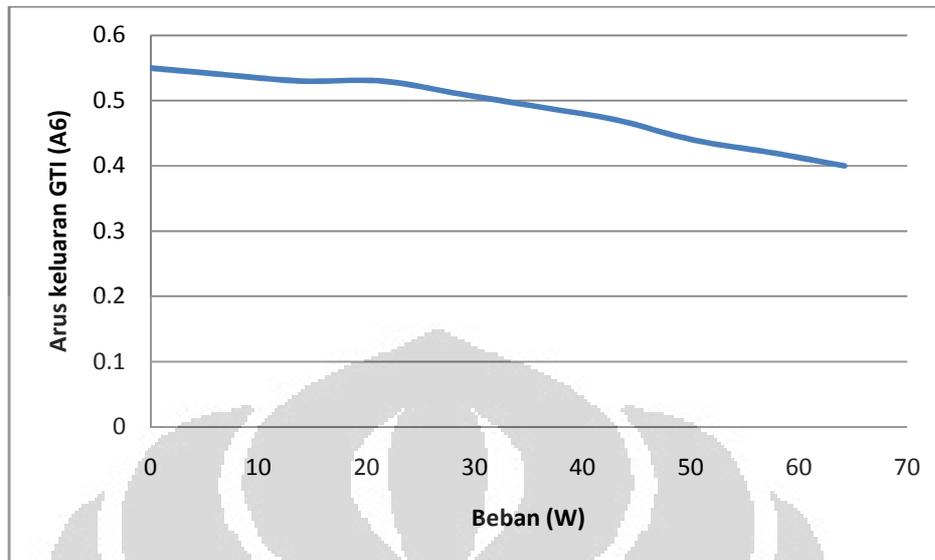


Gambar 4.5 Grafik arus A2, A3,A4 vs beban

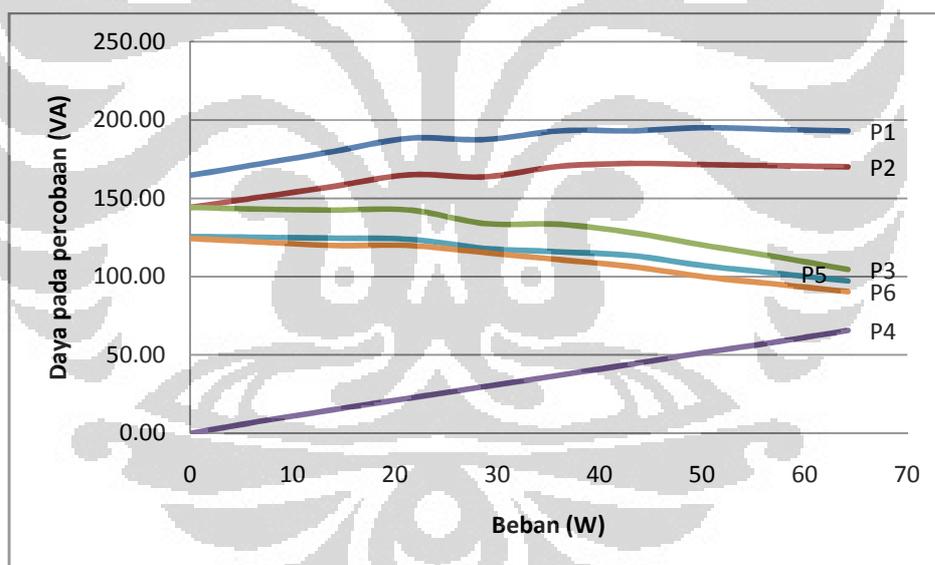
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa, A2 adalah arus keluaran dari *boost* konverter, A3 adalah arus masukan untuk *buck* konverter dan A4 adalah arus masukan untuk beban. Grafik A2 cenderung naik dan menjadi konstan pada beban sekitar 45W sampai 65W. Grafik A3 terus menurun dengan semakin naiknya nilai dari A4. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar beban yang dipikul oleh DC Mikrogrid maka daya yang di transfer ke PLN akan semakin kecil. Besarnya transfer daya ke PLN yang semakin kecil, juga dapat dilihat dari gambar 4.6 dan gambar 4.7 , dimana grafik pada gambar 4.6 adalah grafik arus keluaran dari *buck* konverter (A5) dan gambar 4.7 adalah grafik arus keluaran dari GTI (A6) yang berubah semakin menurun ketika beban yang dipikul oleh DC Mikrogrid.



Gambar 4.6 Grafik arus keluaran (A5) buck konverter vs beban



Gambar 4.7 Grafik arus keluaran GTI (A6) vs beban

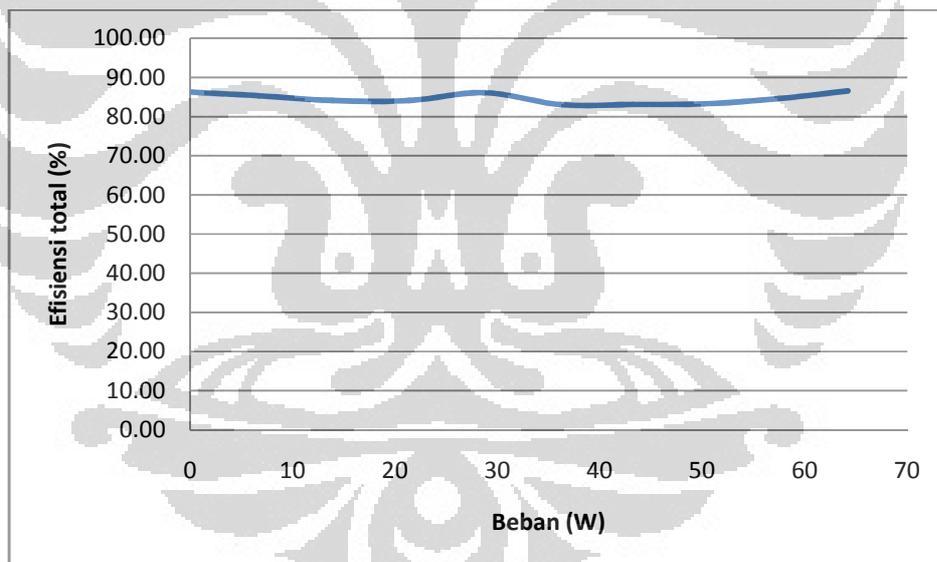


Gambar 4.8 Grafik daya vs beban pada DC Mikrogrid

- Ket : P1 = Daya masukan pada *boost* konverter  
 P2 = Daya keluaran dari *boost* konverter  
 P3 = Daya yang masuk ke dalam *buck* konverter

- P4 = Daya untuk beban yang dipikul oleh DC Mikrogrid
- P5 = Daya yang masuk ke dalam GTI (Grid Tie Inverter)
- P6 = Daya yang diterima oleh PLN

Gambar grafik diatas menunjukkan perubahan daya (VA) pada setiap titik pengukuran dengan variabel perubahan beban yang dipikul oleh DC Mikrogrid. P1 dan P2 terlihat memiliki karakteristik yang hampir sama. Adanya rugi-rugi yang terdapat pada *boost* konverter mengakibatkan  $P1 > P2$ . P3, P5 dan P6 adalah yang berhubungan dengan kemampuan dari *bi-directional inverter* yang dibuat untuk mensuplai ke PLN. Ketiga grafik daya tersebut terlihat memiliki karakteristik yang hampir sama yaitu nilainya akan semakin menurun dengan pertambahan beban yang dipikul oleh DC Mikrogrid.



Gambar 4.9 Grafik efisiensi sistem vs beban

Pada gambar 4.9 diatas menunjukkan karakteristik efisiensi dari sistem *bi-directional inverter* ketika bekerja dalam mode inverter. Efisiensi yang ditunjukkan adalah berfluktuasi antara 83-86 %. Perhitungan efisiensi itu dilakukan dengan melihat daya

masukan dan daya keluaran yang masuk ke dalam sistem. Berikut adalah contoh dari proses perhitungannya :

$$Efisiensi = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Berikut adalah tabel efisiensi dari masing-masing alat pada pengujian tersebut:

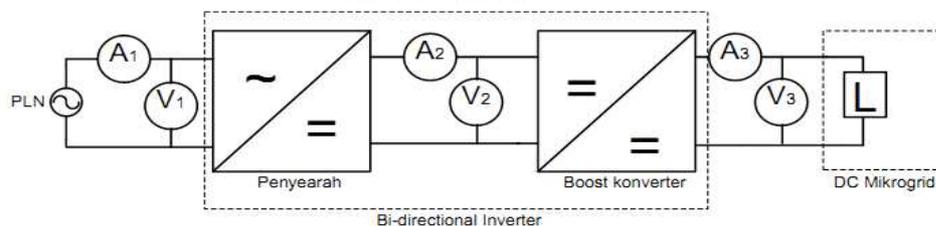
Tabel 4.3 Efisiensi transfer daya DC Mikrogrid ke PLN

| L (W) | Ef. Boost (%) | Ef. Buck (%) | Ef. GTI (%) | Ef. Total (%) |
|-------|---------------|--------------|-------------|---------------|
| 0     | 87.57         | 87.07        | 98.99       | 86.19         |
| 6.7   | 87.60         | 87.45        | 97.54       | 85.30         |
| 13.9  | 87.57         | 87.39        | 96.19       | 84.06         |
| 21.4  | 87.61         | 86.87        | 96.77       | 84.06         |
| 28.7  | 87.29         | 88.16        | 97.63       | 86.07         |
| 36.1  | 88.27         | 86.84        | 95.61       | 83.03         |
| 43.2  | 89.18         | 88.63        | 93.69       | 83.04         |
| 50.1  | 87.91         | 89.13        | 93.34       | 83.20         |
| 57.5  | 88.10         | 90.80        | 93.14       | 84.57         |
| 64.2  | 88.12         | 93.05        | 92.97       | 86.52         |

Dimana P3 adalah daya masukan dari sistem dan P6 adalah daya keluaran dari sistem. Efisiensi dari sistem tidak berawal dari nilai yang kecil karena memang sistem sudah bekerja pada kondisi yang maksimal pada kondisi tanpa beban.

#### 4.2 Simulasi transfer daya dari PLN ke DC Mikrogrid

Dalam pengujian ini, DC Mikrogrid akan menerima transfer daya dari PLN. Berikut adalah rangkaian pengujiannya:



Gambar 4.10 Rangkaian pengujian transfer daya dari PLN ke DC Mikrogrid

Dalam pengujian ini akan diketahui kemampuan maksimum dari *bi-directional inverter* dalam mengalirkan arus dari PLN ke DC Mikrogrid. Beban dipasang di bagian keluaran dari *boost konverter* untuk merepresentasikan beban yang ada di DC Mikrogrid. Berikut adalah data pengujian :

Tabel 4.4 Karakteristik transfer daya dari PLN ke DC Mikrogrid

| Load  | A1   | V1  | A2    | V2    | A3   | V3  |
|-------|------|-----|-------|-------|------|-----|
| 0     | 0.05 | 226 | 0.5   | 12.55 | 0    | 253 |
| 6.7   | 0.09 | 225 | 1.19  | 12.55 | 0.03 | 253 |
| 13.9  | 0.13 | 225 | 1.88  | 12.55 | 0.06 | 253 |
| 21.4  | 0.16 | 225 | 2.53  | 12.55 | 0.09 | 253 |
| 28.7  | 0.2  | 225 | 3.18  | 12.55 | 0.12 | 253 |
| 36.1  | 0.23 | 225 | 3.69  | 12.54 | 0.15 | 253 |
| 43.2  | 0.27 | 225 | 4.37  | 12.54 | 0.18 | 253 |
| 50.1  | 0.3  | 225 | 4.99  | 12.54 | 0.21 | 253 |
| 57.5  | 0.33 | 225 | 5.58  | 12.54 | 0.23 | 253 |
| 64.2  | 0.37 | 225 | 6.28  | 12.53 | 0.26 | 253 |
| 71.2  | 0.4  | 225 | 6.81  | 12.53 | 0.29 | 253 |
| 77.6  | 0.44 | 225 | 7.51  | 12.53 | 0.32 | 253 |
| 84.7  | 0.48 | 225 | 8.2   | 12.53 | 0.35 | 253 |
| 92.1  | 0.51 | 225 | 8.79  | 12.53 | 0.38 | 253 |
| 98.8  | 0.55 | 225 | 9.49  | 12.53 | 0.4  | 253 |
| 105.4 | 0.58 | 225 | 10.05 | 12.52 | 0.43 | 253 |
| 112.5 | 0.62 | 224 | 10.68 | 12.52 | 0.45 | 253 |
| 120.5 | 0.65 | 224 | 11.23 | 12.52 | 0.48 | 253 |
| 127.1 | 0.7  | 224 | 12.05 | 12.52 | 0.51 | 253 |

Dengan perhitungan daya seperti pada pembahasan sebelumnya, dimana P1 adalah daya masukan ke sistem *bi-directional inverter*, P2 adalah daya keluaran penyearah dan P3 adalah daya keluaran boost konverter yang juga merupakan daya yang berhasil di transfer oleh sistem *bi-directional inverter* ke DC Mikrogrid. Berikut adalah contoh perhitungannya ketika DC Mikrogrid belum diberikan beban :

$$P1 = A1 \times V1 = 0.05A \times 226V = 11.30VA$$

$$P2 = A2 \times V2 = 0.5A \times 12.55V = 6.28 VA$$

$$P3 = A3 \times V2 = 0A \times 253V = 0VA$$

Untuk menghitung besar dari efisiensi dapat diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut :

$$Efisiensi = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

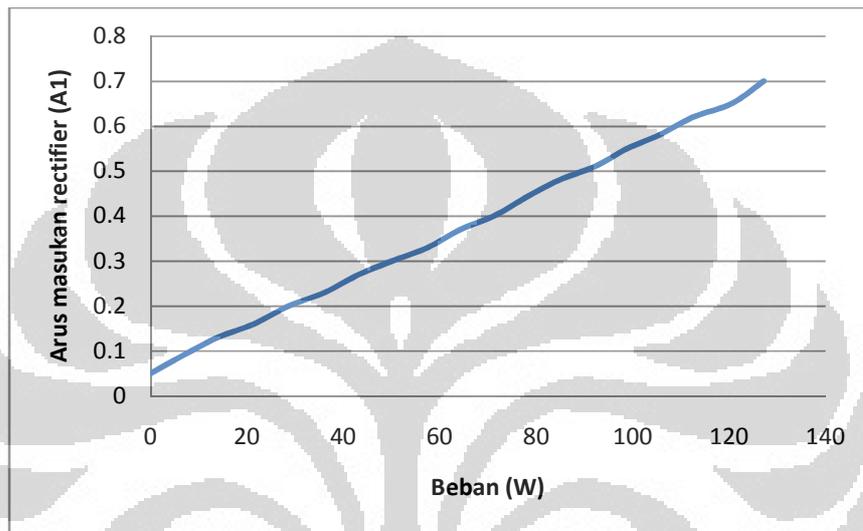
Dengan proses perhitungan diatas, berikut adalah hasil perhitungan secara keseluruhan :

Tabel 4.5 Pehitungan daya dan efisiensi

| Beban (W) | P1(VA) | P2 (VA) | P3 (VA) | Ef. Rect(%) | Ef.Boost (%) | Ef. Total (%) |
|-----------|--------|---------|---------|-------------|--------------|---------------|
| 0         | 11.30  | 6.28    | 0.00    | 55.53       | 0.00         | 0.00          |
| 6.7       | 20.25  | 14.93   | 7.59    | 73.75       | 50.82        | 37.48         |
| 13.9      | 29.25  | 23.59   | 15.18   | 80.66       | 64.34        | 51.90         |
| 21.4      | 36.00  | 31.75   | 22.77   | 88.20       | 71.71        | 63.25         |
| 28.7      | 45.00  | 39.91   | 30.36   | 88.69       | 76.07        | 67.47         |
| 36.1      | 51.75  | 46.27   | 37.95   | 89.42       | 82.01        | 73.33         |
| 43.2      | 60.75  | 54.80   | 45.54   | 90.21       | 83.10        | 74.96         |
| 50.1      | 67.50  | 62.57   | 53.13   | 92.70       | 84.91        | 78.71         |
| 57.5      | 74.25  | 69.97   | 58.19   | 94.24       | 83.16        | 78.37         |
| 64.2      | 83.25  | 78.69   | 65.78   | 94.52       | 83.60        | 79.02         |
| 71.2      | 90.00  | 85.33   | 73.37   | 94.81       | 85.98        | 81.52         |
| 77.6      | 99.00  | 94.10   | 80.96   | 95.05       | 86.04        | 81.78         |
| 84.7      | 108.00 | 102.75  | 88.55   | 95.14       | 86.18        | 81.99         |
| 92.1      | 114.75 | 110.14  | 96.14   | 95.98       | 87.29        | 83.78         |
| 98.8      | 123.75 | 118.91  | 101.20  | 96.09       | 85.11        | 81.78         |
| 105.4     | 130.50 | 125.83  | 108.79  | 96.42       | 86.46        | 83.36         |
| 112.5     | 138.88 | 133.71  | 113.85  | 96.28       | 85.14        | 81.98         |
| 120.5     | 145.60 | 140.60  | 121.44  | 96.57       | 86.37        | 83.41         |
| 127.1     | 156.80 | 150.87  | 129.03  | 96.22       | 85.53        | 82.29         |

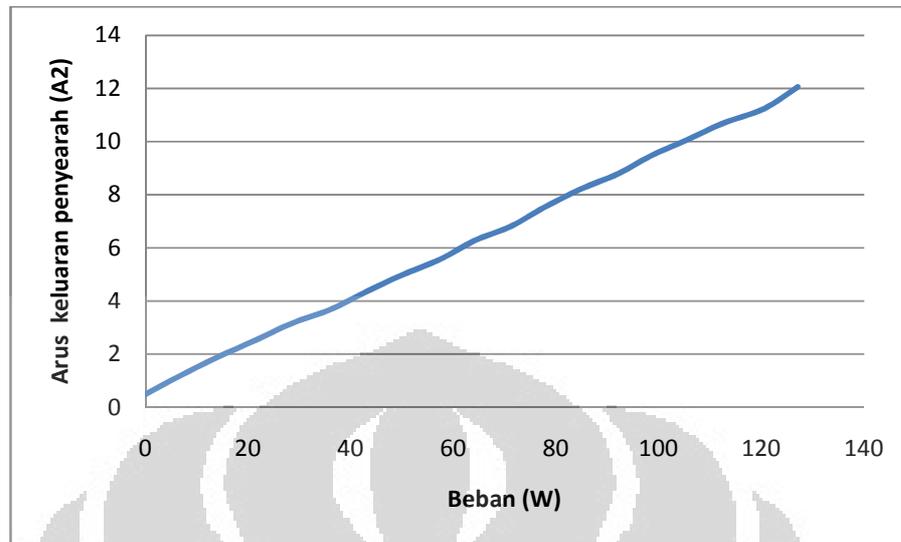
Dimana P1 adalah daya masukan dan P3 adalah daya keluaran dari sistem *bi-directional inverter*. Dari data yang dihitung dengan cara tersebut, maka akan diperoleh kapasitas maksimum dari sistem *bi-directional inverter* ini ketika bekerja

sebagai penyearah yaitu 129.03 VA. Hal ini menjadi kelemahan dari sistem ini karena adanya keterbatasan dari peralatan yang digunakan sama seperti kondisi ketika DC Mikrogrid mentransfer daya listrik ke PLN. Berikut adalah gambar grafik setiap parameter yang diukur dan dilihat pengaruhnya terhadap perubahan beban yang terdapat pada DC Mikrogrid:

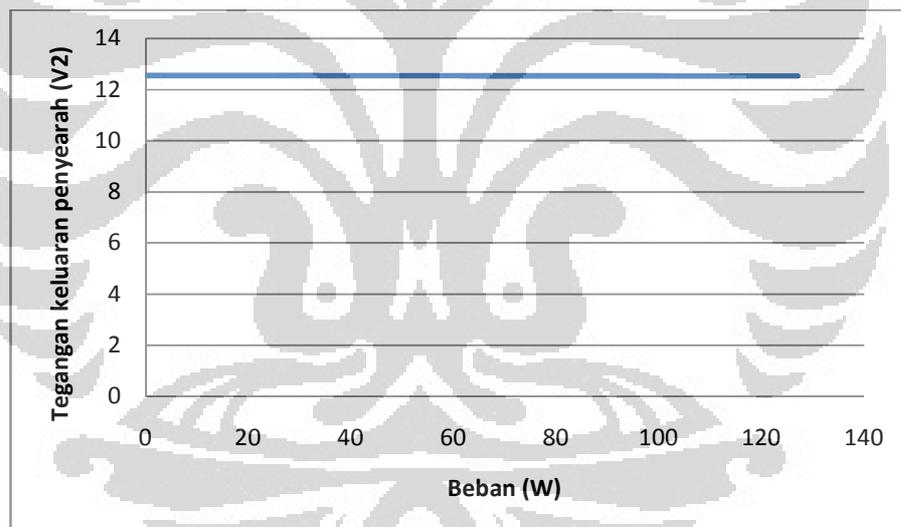


Gambar 4.11 Grafik arus masukan penyearah (A1) vs beban

Grafik diatas menunjukkan perubahan arus masukan pada penyearah (A1) ketika terjadi perubahan beban pada DC Mikrogrid. Grafik memiliki karakteristik yang linear seiring dengan bertambahnya beban pada DC Mikrogrid. Begitu juga dengan karakteristik arus keluaran dari penyearah (A2) dapat dilihat pada gambar 4.12, arus keluaran dari penyearah akan bertambah secara linear.

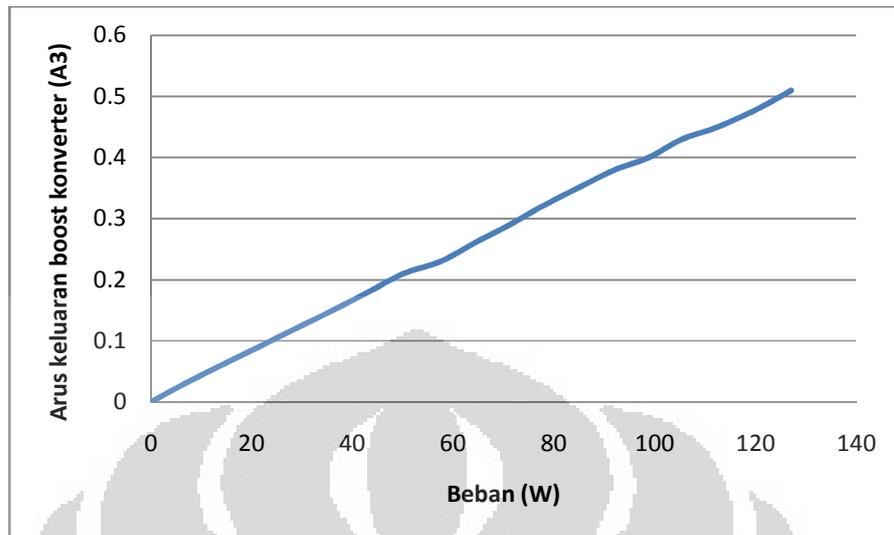


Gambar 4.12 Grafik arus keluaran penyearah (A2) vs beban



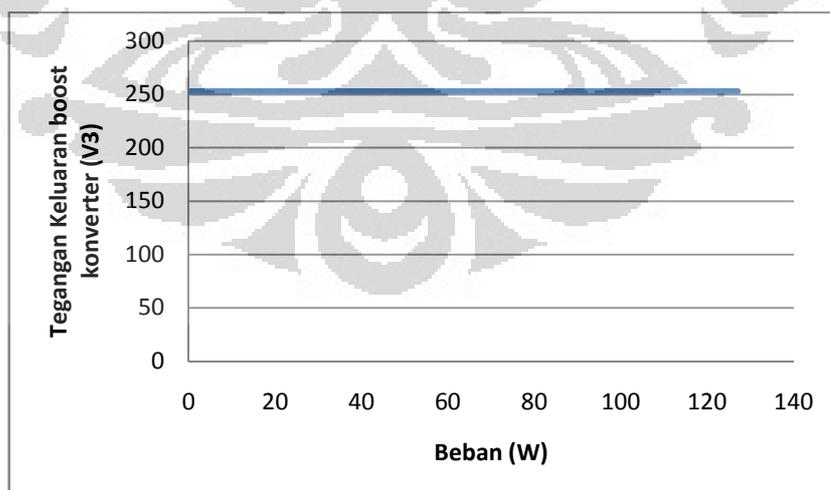
Gambar 4.13 Grafik tegangan keluaran penyearah (V2) vs beban

Grafik diatas adalah karakteristik tegangan keluaran dari penyearah ketika terjadi perubahan beban pada DC Mikrogrid. Tegangan keluaran dari penyearah akan cenderung konstan ketika beban yang dipikul oleh DC Mikrogrid semakin besar.

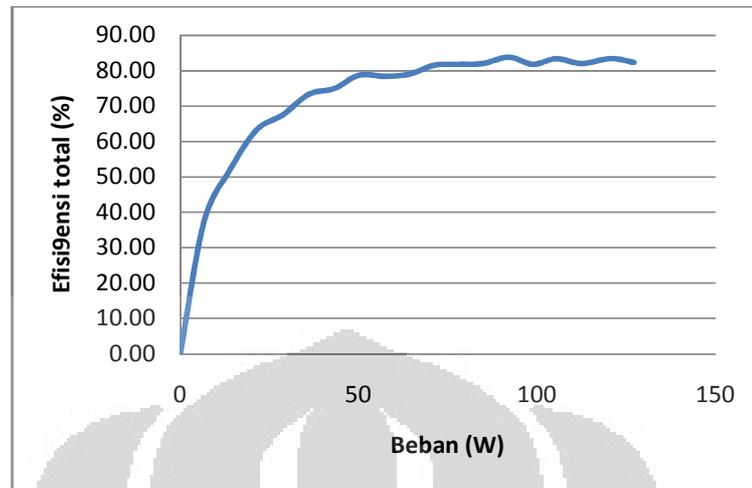


Gambar 4.14 Grafik arus keluaran *boost* konverter (V3) vs beban

Grafik diatas menunjukkan karakteristik arus keluaran dari *boost* konverter (V3). Arus keluaran ini juga memiliki karakteristik yang hampir sama dengan arus masukan dan arus keluaran dari penyearah (*rectifier*). Arus keluarannya akan naik seiring dengan bertambahnya beban. Pada gambar 4.15 dapat dilihat karakteristik tegangan keluaran dari *boost* konverter yang tetap konstan sampai pada keadaan maksimum sistem *bi-directional inverter* bekerja sebagai penyearah.

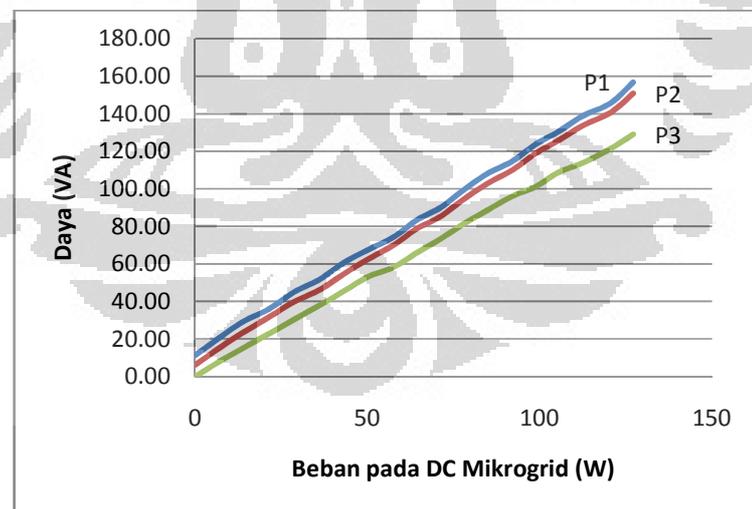


Gambar 4.15 Grafik tegangan keluaran *boost* konverter vs beban



Gambar 4.16 Grafik efisiensi total vs beban

Dengan melakukan perhitungan efisiensi, maka diperoleh grafik efisiensi total dari sistem ini ketika bekerja sebagai penyearah yaitu mencapai 83%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem ini sudah dapat bekerja dengan baik. Dari segi transisi daya pada setiap titik pengukuran, dapat dilihat bahwa P1 lebih identik dengan P2 hal ini menunjukkan bahwa efisiensi dari penyearah sangat baik.

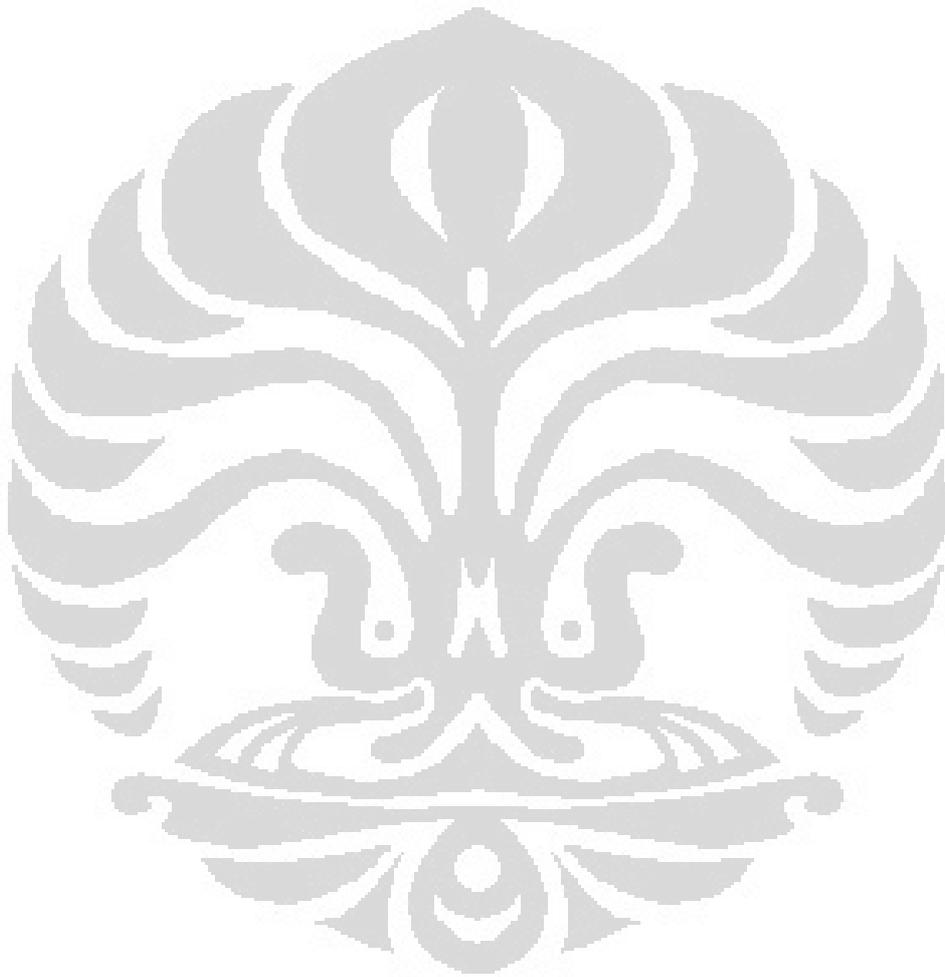


Gambar 4.17 Grafik daya vs beban pada DC Mikrogrid

Ket : P1 = Daya masukan pada penyearah

P2 = Daya masukan dari *boost* konverter

P3 = Daya yang diterima DC Mikrogrid dari PLN



## BAB 5

### KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan pengukuran pada sistem *bi-directional inverter* dapat disimpulkan

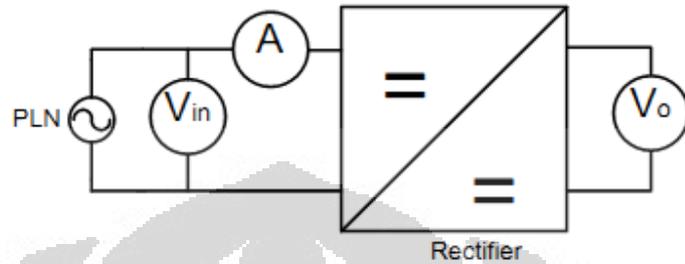
1. *Bi-directional inverter* yang digunakan untuk menghubungkan DC Mikrogrid dengan PLN dapat dirancang dari konfigurasi *inverter grid tie*, *boost* konverter, *rectifier* dan *buck* konverter. Hal ini bisa dibuktikan ketika DC Mikrogrid mengalami kelebihan daya listrik, maka kelebihan daya tersebut dapat disuplai ke PLN melalui *buck* konverter dan GTI, sebaliknya ketika DC Mikrogrid mengalami kekurangan daya maka dapat diambil dari PLN dengan menggunakan penyearah (*rectifier*) dan *boost* konverter. Dengan demikian kehandalan sistem DC Mikrogrid dapat terjamin.
2. Kelebihan dari *bi-directional inverter* ini adalah alat ini bisa terhubung ke jaringan PLN, hal ini karena menggunakan GTI dan *rectifier* sehingga DC Mikrogrid bisa memberi suplai listrik ke PLN dengan efisiensi mencapai 86% dan DC Mikrogrid bisa menerima suplai listrik dari PLN dengan efisiensi mencapai 83%.
3. Kemampuan dari *bi-directional inverter* masih dalam skala kecil, sehingga perlu dikembangkan dengan menambah kapasitas *rectifier* dan *buck* konverter.
4. Kapasitas maksimum *bi-directional inverter* ini ketika bekerja sebagai inverter adalah 124.3 VA dan kapasitas maksimum ketika bekerja sebagai penyearah adalah 129.03 VA.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rashid, Muhammad H.: *Power Electronics Handbook*, 2<sup>nd</sup> ed., AP, Budington, 2007
- [2] Wei, Jing-Siou dan Yu, Gwo-Ruey : *Modeling and Control of a Bi-directional Inverter for DC Microgrids*. International Conference on System Science and Engineering, pp. 425-430, Macau, China - June 2011
- [3] Boylestad, Robert dan Nashelsky, Louis : *Electronic devices and circuit theory*. New Jersey, Prentice Hall, 2007
- [4] Manual book *Inverter Grid Tie*
- [5] Manual book *Switching Power Supply*
- [6] Manual book *Augen Inverter*
- [7] <http://solar.smps.us/grid-tie-inverter-schematic.html>, Mei 2012

## LAMPIRAN

### 1. Pengujian *Rectifier*

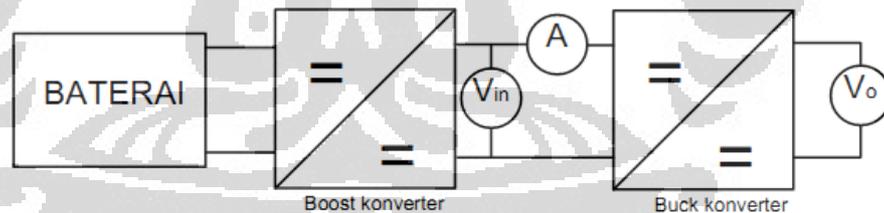


Gambar rangkaian pengujian *rectifier*

Tabel data Pengujian

| I (A) | $V_i = V_{AC}$ (Volt) | $V_o = V_{DC}$ (Volt) |
|-------|-----------------------|-----------------------|
| 0.02  | 225                   | 10-14.5               |

### 2. Pengujian *Buck* konverter



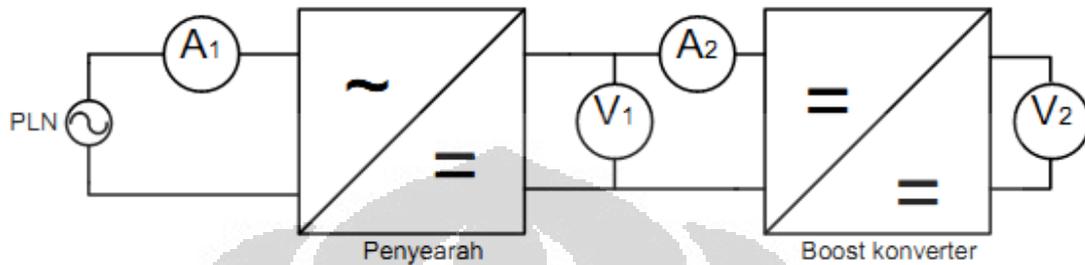
Gambar rangkaian pengujian *buck* konverter

Tabel data Pengujian

| I (A) | $V_i = V_{DC}$ (Volt) | $V_o = V_{DC}$ (Volt) |
|-------|-----------------------|-----------------------|
| 0.02  | 254                   | 10-14.5               |

### 3. Pengujian *Boost* konverter

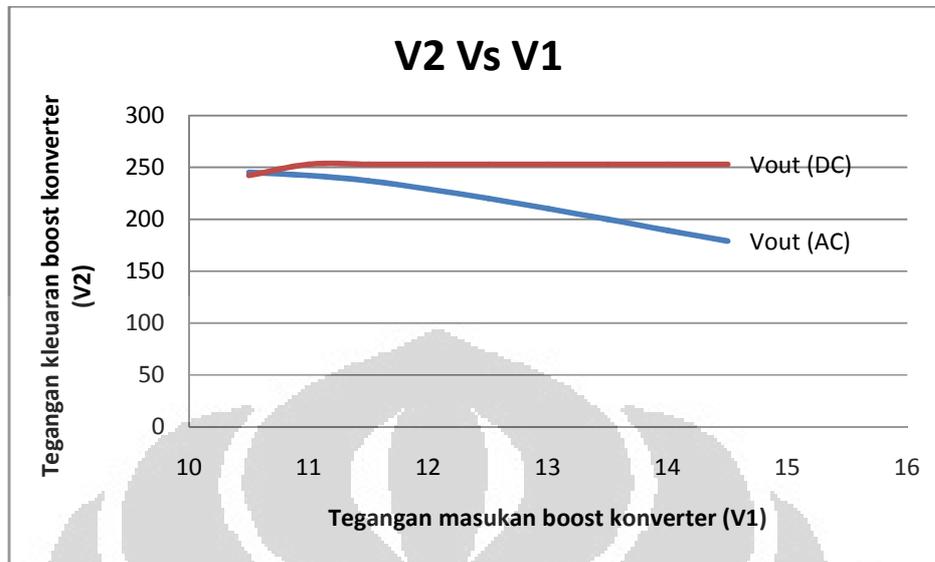
#### 3.1 Pengujian karakteristik tanpa beban



Gambar Rangkaian percobaan boost konverter

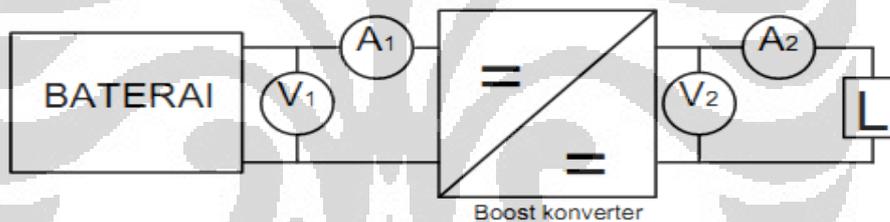
Tabel Data Pengujian

| $A1_{AC}$ (A) | $A2_{DC}$ (A) | $V1_{DC}$ (V) | $V2$   |        |
|---------------|---------------|---------------|--------|--------|
|               |               |               | AC (V) | DC (V) |
| 0.05          | 0.7           | 10.5          | 245    | 242    |
| 0.05          | 0.7           | 11            | 242    | 253    |
| 0.05          | 0.7           | 11.5          | 237    | 253    |
| 0.05          | 0.7           | 12            | 229    | 253    |
| 0.05          | 0.7           | 12.5          | 220    | 253    |
| 0.05          | 0.7           | 13            | 210    | 253    |
| 0.05          | 0.7           | 13.5          | 200    | 253    |
| 0.05          | 0.7           | 14            | 189    | 253    |
| 0.05          | 0.7           | 14.5          | 179    | 253    |



Grafik tegangan keluaran boost konverter vs tegangan masukan boost konverter

### 3.2 Pengujian karakteristik dengan beban

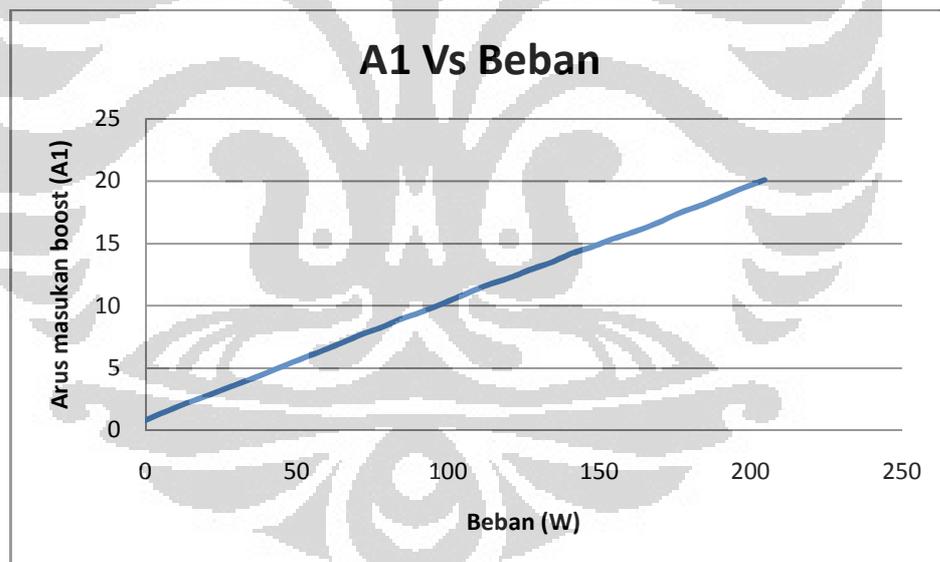


Gambar Rangkaian percobaan boost konverter

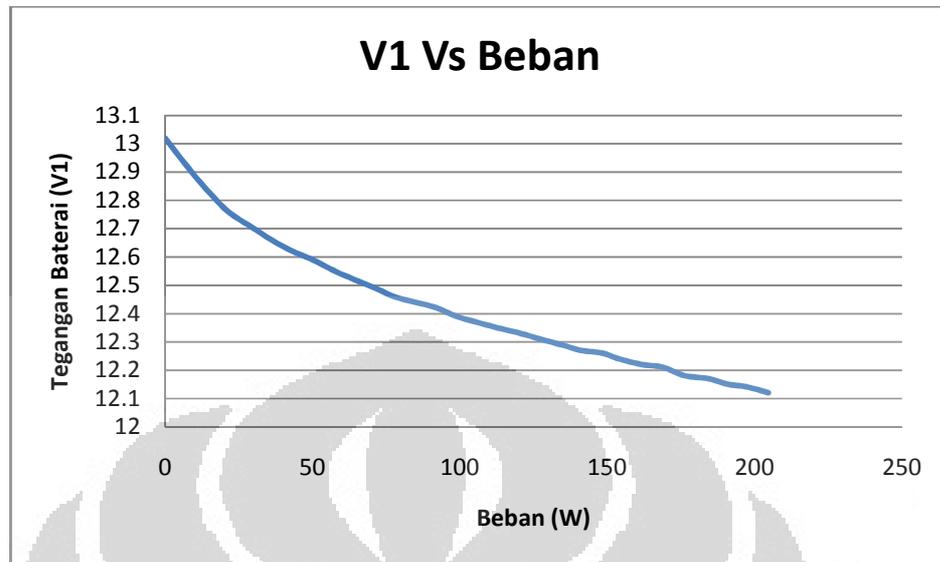
Tabel Data Pengujian

| L    | A1   | V1    | A2   | V2  | P1     | P2    | Ef    |
|------|------|-------|------|-----|--------|-------|-------|
| 0    | 0.82 | 13.02 | 0    | 253 | 10.68  | 0.00  | 0.00  |
| 6.7  | 1.51 | 12.93 | 0.03 | 253 | 19.52  | 7.59  | 38.87 |
| 13.9 | 2.21 | 12.84 | 0.06 | 253 | 28.38  | 15.18 | 53.50 |
| 21.4 | 2.87 | 12.76 | 0.09 | 253 | 36.62  | 22.77 | 62.18 |
| 28.7 | 3.56 | 12.71 | 0.12 | 253 | 45.25  | 30.36 | 67.10 |
| 36.1 | 4.23 | 12.66 | 0.15 | 253 | 53.55  | 37.95 | 70.87 |
| 43.2 | 4.93 | 12.62 | 0.18 | 253 | 62.22  | 45.54 | 73.20 |
| 50.1 | 5.61 | 12.59 | 0.21 | 253 | 70.63  | 53.13 | 75.22 |
| 57.5 | 6.3  | 12.55 | 0.24 | 253 | 79.07  | 60.72 | 76.80 |
| 64.2 | 6.96 | 12.52 | 0.27 | 253 | 87.14  | 68.31 | 78.39 |
| 71.2 | 7.68 | 12.49 | 0.3  | 253 | 95.92  | 75.90 | 79.13 |
| 77.6 | 8.23 | 12.46 | 0.33 | 253 | 102.55 | 83.49 | 81.42 |

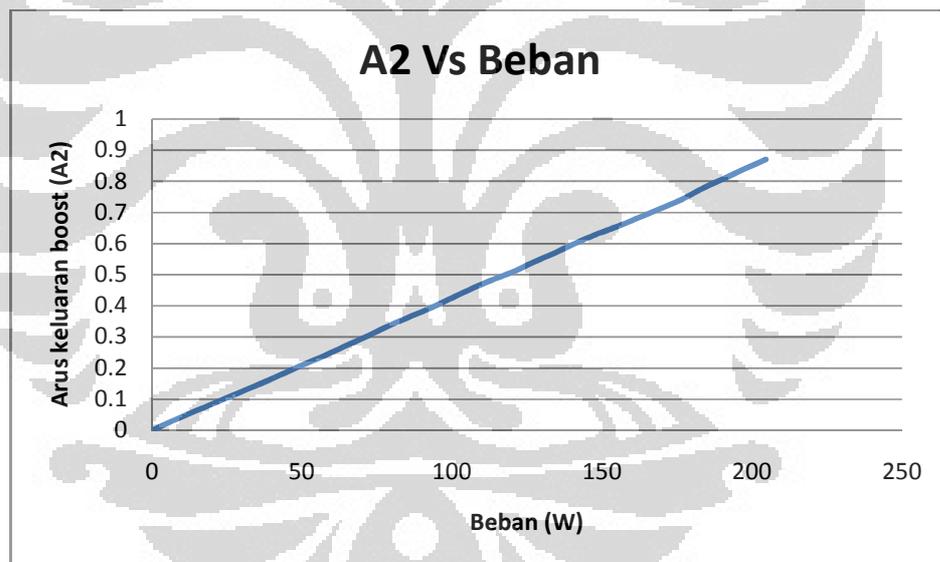
|       |       |       |      |     |        |        |       |
|-------|-------|-------|------|-----|--------|--------|-------|
| 84.7  | 8.95  | 12.44 | 0.36 | 253 | 111.34 | 91.08  | 81.80 |
| 92.1  | 9.58  | 12.42 | 0.39 | 253 | 118.98 | 98.67  | 82.93 |
| 98.8  | 10.24 | 12.39 | 0.42 | 253 | 126.87 | 106.26 | 83.75 |
| 105.4 | 10.91 | 12.37 | 0.45 | 253 | 134.96 | 113.85 | 84.36 |
| 112.5 | 11.62 | 12.35 | 0.48 | 253 | 143.51 | 121.44 | 84.62 |
| 120.5 | 12.26 | 12.33 | 0.51 | 253 | 151.17 | 129.03 | 85.36 |
| 127.1 | 12.89 | 12.31 | 0.54 | 253 | 158.68 | 136.62 | 86.10 |
| 134.3 | 13.5  | 12.29 | 0.57 | 253 | 165.92 | 144.21 | 86.92 |
| 140.9 | 14.2  | 12.27 | 0.6  | 253 | 174.23 | 151.80 | 87.12 |
| 148.2 | 14.78 | 12.26 | 0.63 | 253 | 181.20 | 159.39 | 87.96 |
| 153.8 | 15.31 | 12.24 | 0.65 | 253 | 187.39 | 164.45 | 87.76 |
| 161.5 | 15.94 | 12.22 | 0.68 | 253 | 194.79 | 172.04 | 88.32 |
| 168.9 | 16.61 | 12.21 | 0.71 | 253 | 202.81 | 179.63 | 88.57 |
| 176.2 | 17.42 | 12.18 | 0.74 | 252 | 212.18 | 186.48 | 87.89 |
| 184.1 | 18.11 | 12.17 | 0.78 | 250 | 220.40 | 195.00 | 88.48 |
| 190.9 | 18.8  | 12.15 | 0.81 | 249 | 228.42 | 201.69 | 88.30 |
| 197.6 | 19.47 | 12.14 | 0.84 | 247 | 236.37 | 207.48 | 87.78 |
| 204.6 | 20.1  | 12.12 | 0.87 | 246 | 243.61 | 214.02 | 87.85 |

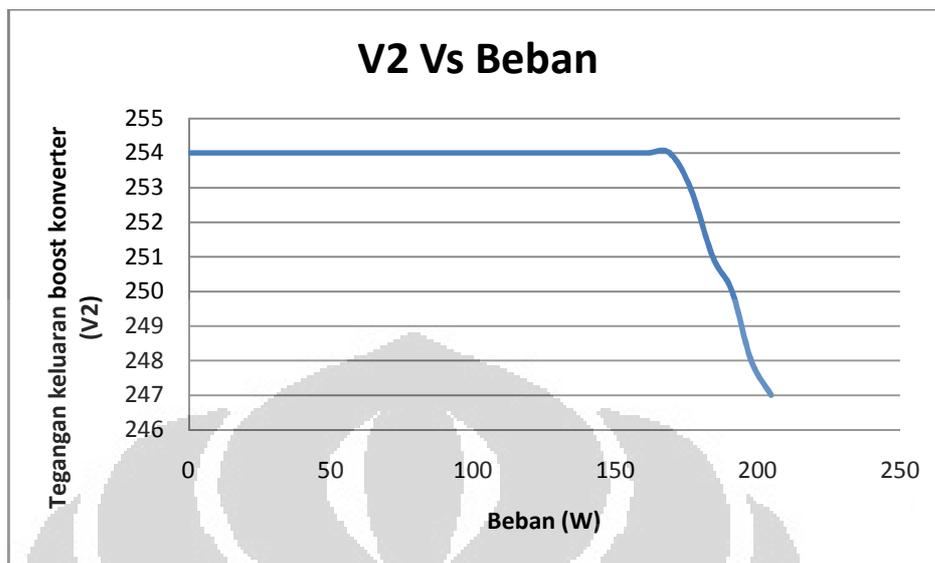
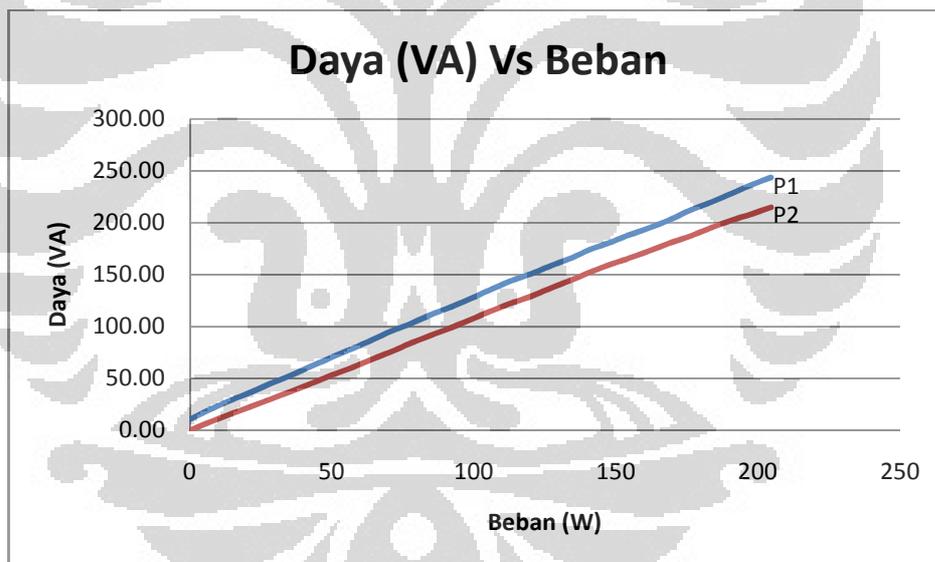


Grafik arus masukan *boost konverter* vs beban

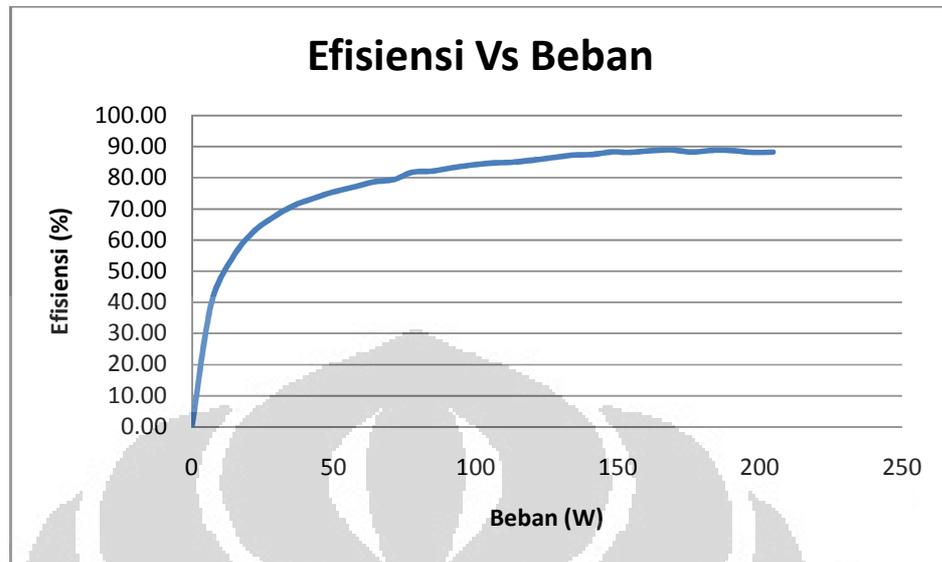


Grafik tegangan baterai vs beban

Grafik arus keluaran *boost konverter* vs beban

Grafik tegangan keluaran *boost konverter* vs beban

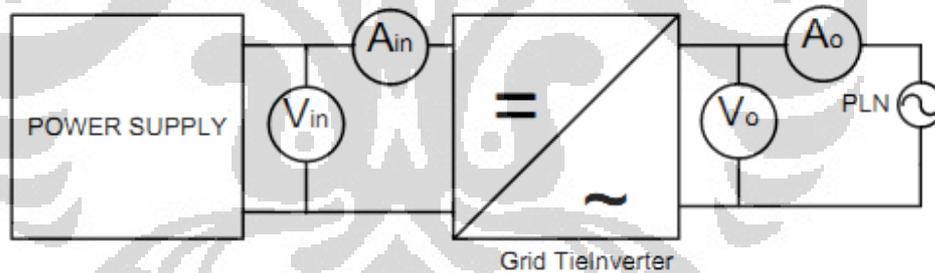
Grafik Daya (VA) vs beban



Grafik Efisiensi boost konverter vs beban

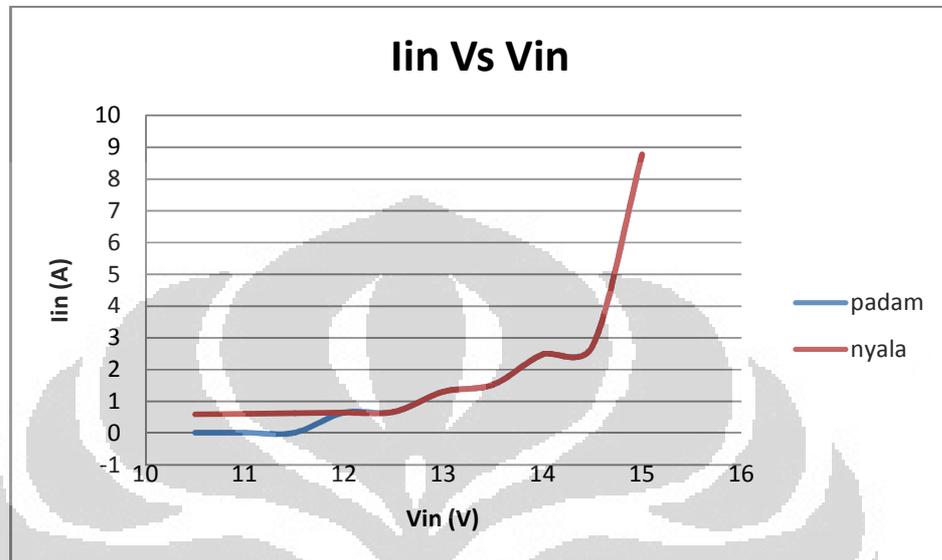
#### 4. Pengujian *Grid Tie Inverter*

Pengujian dengan tegangan masukan variable

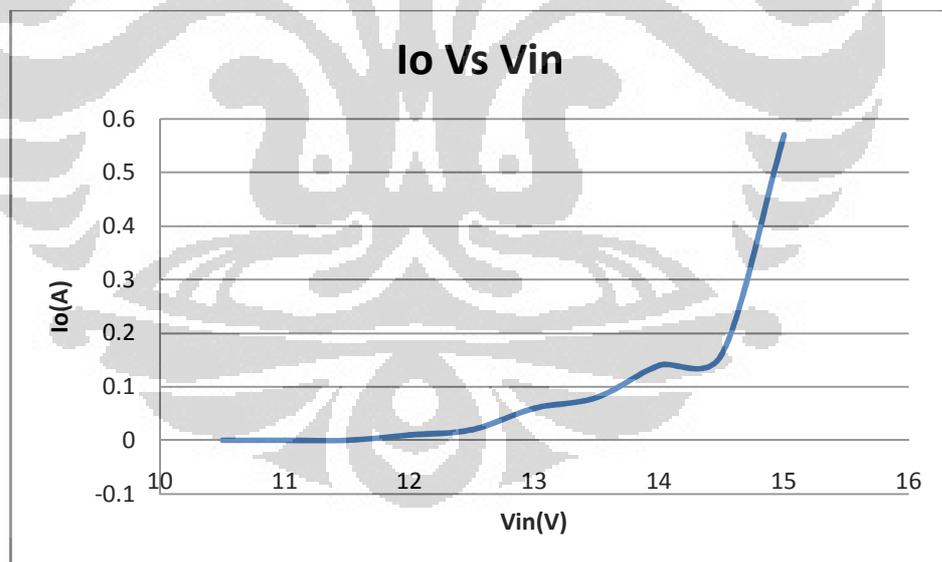
Gambar Rangkaian pengujian *Grid Tie Inverter*Tabel Data Pengujian *Grid Tie Inverter*

| Vin(V) | Iin (A) |       | Lampu Indikator |             | Io(A) | Vo(V) | Pin(VA) |        | Po(V) |
|--------|---------|-------|-----------------|-------------|-------|-------|---------|--------|-------|
|        | padam   | nyala | Merah           | Hijau       |       |       | Merah   | Hijau  |       |
| 10.5   | 0.01    | 0.59  | nyala           | padam/nyala | 0     | 226   | 0.105   | 6.195  | 0     |
| 11     | 0.01    | 0.61  | nyala           | padam/nyala | 0     | 226   | 0.11    | 6.71   | 0     |
| 11.5   | 0.01    | 0.63  | nyala           | padam/nyala | 0     | 226   | 0.115   | 7.245  | 0     |
| 12     | 0.65    | 0.65  | nyala           | nyala       | 0.01  | 226   | 7.8     | 7.8    | 2.26  |
| 12.5   | 0.67    | 0.67  | nyala           | nyala       | 0.02  | 227   | 8.375   | 8.375  | 4.54  |
| 13     | 1.3     | 1.3   | nyala           | nyala       | 0.06  | 227   | 16.9    | 16.9   | 13.62 |
| 13.5   | 1.53    | 1.53  | nyala           | nyala       | 0.08  | 227   | 20.655  | 20.655 | 18.16 |
| 14     | 2.48    | 2.48  | padam           | nyala       | 0.14  | 227   | 34.72   | 34.72  | 31.78 |

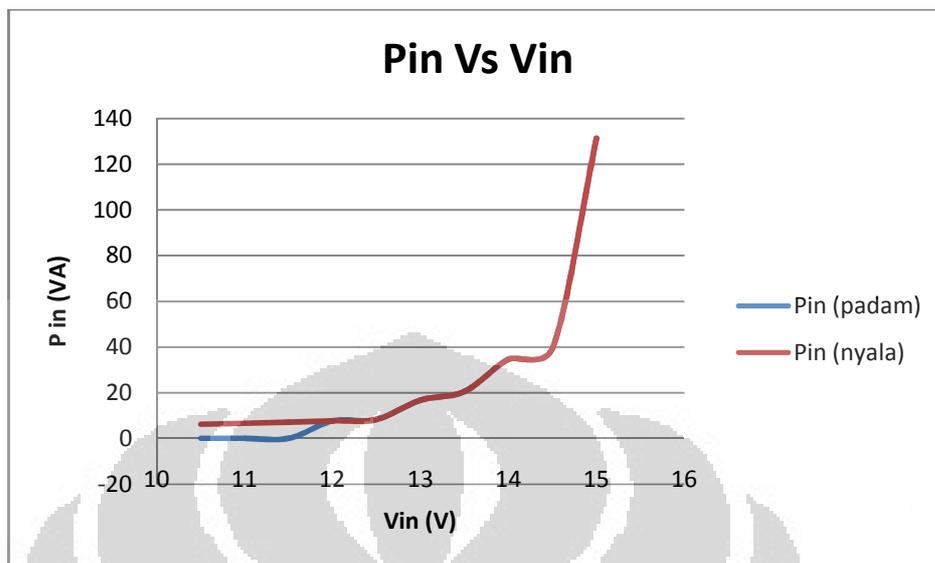
|      |      |      |       |       |      |     |       |       |        |
|------|------|------|-------|-------|------|-----|-------|-------|--------|
| 14.5 | 2.74 | 2.74 | padam | nyala | 0.16 | 227 | 39.73 | 39.73 | 36.32  |
| 15   | 8.76 | 8.76 | padam | nyala | 0.57 | 227 | 131.4 | 131.4 | 129.39 |



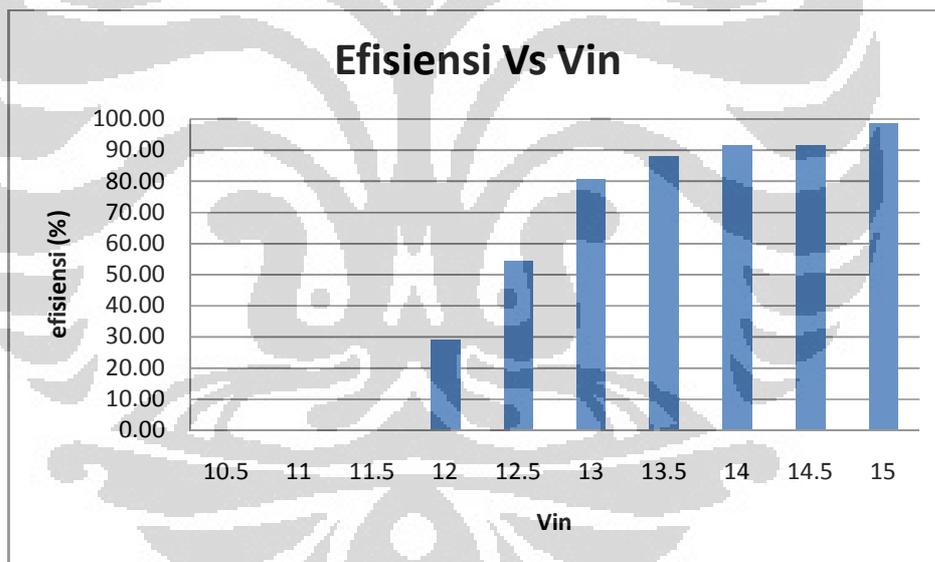
Grafik arus masukan GTI (A) vs tegangan masukan GTI (V)



Grafik arus keluaran GTI (A) vs tegangan masukan (V)



Grafik daya keluaran GTI (VA) vs tegangan masukan (V)



Grafik efisiensi GTI vs tegangan masukan (V)



Gambar Konfigurasi Bi-directional inverter