

SKRIPSI

KONVERTER DC DC PENAIK TEGANGAN 230 VDC DALAM SISTEM

LISTRIK HIBRID ENERGI TERBARUKAN



Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan Untuk Menyelesaikan
Program Strata-1 Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar

DISUSUN OLEH:

NASSRI MAULANA

D411 16 004

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2020

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK

Tugas akhir ini bertujuan untuk merancang alat pengganti *transformator* dengan menggunakan konverter DC-DC dengan jenis *multilevel boost converter* dengan merancang pengendali konverter menggunakan kontrol PI adaptif.

Dalam penelitian ini disajikan data hasil simulasi dan hasil pengukuran dari alat *multilevel boost converter*. Penelitian dilakukan dengan menggunakan jenis beban yang berbeda yang dikendalikan dengan kontrol PI adaptif. Tegangan masukan yang digunakan adalah 24 VDC yang suplainya berasal dari sumber tegangan (*power supply*) yang memiliki kondisi cukup ideal. Adapun tegangan keluaran yang dihasilkan yaitu berkisar di 230 VDC. Penentuan nilai kontrol PI adaptif disesuaikan dengan jenis beban uji yang digunakan dan pengendali menghasilkan satu sinyal PWM dalam pengontrolan konverter.

Hasil penelitian menunjukkan tegangan keluaran pada hasil pengukuran alat mendekati hasil simulasi dengan tegangan *ripple* yang rendah dengan menggunakan kontrol PI adaptif. Efisiensi alat masih berada di bawah 40%, yang disebabkan oleh faktor beban uji yang rendah. Penelitian ini akan dikembangkan sebagai sistem listrik hibrid energi terbarukan.

Kata Kunci : *Multilevel Boost Converter*, Tegangan Keluaran, Kontrol PI Adaptif, Tegangan *Ripple*, Efisiensi

KATA PENGANTAR

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB 1 PENDAHULUAN	11
1.1. Latar Belakang.....	11
1.2. Deskripsi dan Rumusan Masalah.....	12
1.3. Batasan Masalah	13
1.4. Tujuan Penelitian	13
1.5. Metode Penelitian	14
1.6. Sistematika Penulisan	14
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	16
2.1. <i>DC-DC Converter</i>	16
2.1.1. Jenis-Jenis DC-DC Converter [5]	16
2.2. <i>Metode Switching</i>	19
2.2.1. <i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	19
2.3. <i>Multilevel Boost Converter (MBC)</i>	20
2.3.1. Prinsip Kerja dari Rangkaian <i>Multilevel Boost Converter (MBC)</i>	21
2.3.2. Efek dari Resistansi Seri (Resrl) pada Rangkaian <i>MBC</i>	24
2.3.3. Tegangan <i>Output</i> dari <i>Multilevel Boost Converter</i>	24
2.3.1. <i>Voltage Balancing</i>	25
2.4. Arduino	27
2.5. Konsep Dasar Pengontrolan PID	29

2.5.1. Kontrol Proporsional	30
2.5.2. Kontrol Integratif	30
2.5.3. Karakteristik Kontroler PI	31
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1. Jenis Penelitian	34
3.2. Tahapan Penelitian.....	34
3.3. Alat dan Bahan Penelitian.....	36
3.4. Waktu dan Tempat Penelitian.....	37
3.4.1. Waktu.....	37
3.4.2. Tempat Penelitian	37
3.5. Desain <i>Multilevel Boost Converter</i>	38
3.5.1. Rangkaian <i>Multilevel Boost Converter</i>	38
3.5.2. Penentuan Parameter Rangkaian	38
3.5.3. Desain Kontrol <i>Duty Cycle</i>	40
3.6. Skenario Pengujian	41
3.6.1. Perbandingan Kontrol PI <i>Non-Adaptif</i> dan Kontrol PI Adaptif	42
3.6.2. Perbandingan antara Simulasi Pspice dengan Pengukuran Alat.....	42
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN PENGUKURAN	44
4.1. Bentuk Fisik dari <i>Multilevel Boost Converter</i>	44
4.2. Penentuan Jumlah Tingkat (N) dari <i>Multilevel Boost Converter</i>	45
4.3. Penentuan Parameter Kontrol	46
4.4. Grafik Tegangan Ripple <i>Multilevel Boost Converter</i>	50
4.5. Perbandingan antara Hasil Simulasi Pspice dengan Hasil Pengukuran Alat dengan Kontrol PI <i>Non Adaptif</i>	51
4.6. Perbandingan antara Hasil Simulasi Pspice dengan Hasil Pengukuran Alat dengan Kontrol PI Adaptif	53

4.7. Perbandingan Kontrol PI <i>Non</i> Adaptif dan Kontrol PI Adaptif pada Pengujian Alat	56
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	62
5.1. Kesimpulan	62
5.2. Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	64
LAMPIRAN	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Buck Converter</i> . (a) Diagram rangkaian, (b) sakelar <i>on</i> dan (c) sakelar <i>off</i>	17
Gambar 2.2 <i>Boost Converter</i> . (a) Diagram rangkaian, (b) sakelar- <i>on</i> dan (c) sakelar- <i>off</i>	18
Gambar 2.3 <i>Buck-boost Converter</i> . (a) Diagram rangkaian, (b) sakelar- <i>on</i> dan (c) sakelar- <i>off</i>	18
Gambar 2.4 <i>Pulse Width Modulation</i>	19
Gambar 2.5 Rangkaian <i>Multilevel Boost Converter</i>	20
Gambar 2.6 Kondisi Switch On	22
Gambar 2.7 Kondisi Switch Off	23
Gambar 2.8 Diagram Rangkaian dari 3x <i>MBC</i>	26
Gambar 2.9 Jalur Transien	27
Gambar 2.10 <i>Board Arduino Uno</i>	27
Gambar 2.11 <i>Interface Arduino IDE</i>	28
Gambar 2.12 Model Kontrol PI[19].....	32
Gambar 2.13 Model Kontrol PI	33
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	35
Gambar 3.2 Rangkaian <i>Multilevel Boost Converter</i> dengan Pengendali	38
Gambar 3.3 Kontrol <i>Duty Cycle Multilevel Boost Converter</i>	41
Gambar 4.1 Tampilan Fisik <i>Multilevel Boost Converter</i>	44
Gambar 4.2 <i>Coding Kontrol Timer 2 Mikrokontroler Arduino UNO R3</i>	47
Gambar 4.3 Diagram Alir Algoritma Kontrol PI Adaptif.....	49
Gambar 4.4 Tegangan <i>Ripple</i> Hasil Pengukuran Osiloskop.....	50
Gambar 4.5 Grafik Daya <i>Output</i> dan Efisiensi Kontrol PI Adaptif pada <i>Multilevel Boost Converter</i>	55
Gambar 4.6 Grafik Tegangan <i>Output</i> dan Arus <i>Output</i> Hasil Pengukuran <i>Multilevel Boost Converter</i>	57
Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengukuran <i>Multilevel Boost Converter</i>	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Respon Kontroler	33
Tabel 3.1 Alat dan Bahan Penelitian.....	36
Tabel 3.2 Parameter Rangkaian Multilevel Boost Converter	40
Tabel 4.1 Parameter Penyusun <i>Multilevel Boost Converter</i>	44
Tabel 4.2 Parameter Penyusun <i>Multilevel Boost Converter</i>	45
Tabel 4.3 Nilai Konstanta PI Adaptif pada Beban.....	48
Tabel 4.4 Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan <i>Ripple</i> Simulasi dan Alat dengan Kontrol PI <i>Non</i> Adaptif	51
Tabel 4.5 Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan <i>Ripple</i> Simulasi dan Alat dengan Kontrol PI Adaptif	53
Tabel 4.6 Data Perbandingan Kontrol PI <i>Non</i> Adaptif dan Adaptif pada Pengujian Alat.....	56
Tabel 4.7 Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan <i>Ripple</i> Kontrol PI <i>Non</i> Adaptif dan Adaptif pada Pengujian Alat	58

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi fosil adalah energi yang paling banyak digunakan, namun ketersediaannya semakin menipis. Untuk mengantisipasinya, digunakan energi terbarukan. Energi matahari merupakan salah satu sumber energi baru dan terbarukan yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik [1]. Pemanfaatan panel surya sebagai pembangkit biasanya dihubungkan langsung dengan beban pada level tegangan yang rendah, mengakibatkan tidak sesuai dengan tegangan yang diperlukan. Dengan adanya perkembangan teknologi komponen dan rangkaian elektronika telah mampu menghasilkan sistem penyedia daya tegangan searah (*Direct Current/DC*), yang dihasilkan melalui konversi tegangan DC masukan ke bentuk tegangan DC keluaran yang lebih tinggi atau lebih rendah. Konversi tegangan DC ini biasa disebut sebagai DC-DC converter [2]. Penerapan DC-DC converter dalam perkembangannya telah memungkinkan suatu perangkat elektronika dapat berfungsi dengan menggunakan sumber energi baterai yang bertegangan kecil di mana tegangan keluarannya dapat diubah-ubah sesuai kebutuhan pemakaian [3]. Teknologi konverter elektronika daya ini telah diaplikasikan pada sumber energi terbarukan, fuel cell dan solar cell menghasilkan tegangan keluaran yang rendah dan ini membutuhkan alat untuk menaikkan tegangan. Salah satu converter yang digunakan untuk menaikkan tegangan arus searah adalah *boost converter*. *Boost converter* dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dari tegangan masukan dengan mengatur sinyal PWM untuk mengatur penyaklaran MOSFET. Dalam pemanfaatan panel surya, tegangan yang dihasilkan cukup kecil sehingga diperlukan suatu alat yang dapat menaikkan tegangan. Alat yang dapat digunakan merupakan DC-DC *boost converter*. Pemanfaatan panel surya sudah menjadi perhatian di Indonesia. Namun ada kendala dalam hal pemanfaatannya yaitu ketidaksinkronan antara keluaran tegangan dari panel surya dengan sistem kelistrikan yang berlaku di Indonesia. Di Indonesia,

sistem kelistrikan yang digunakan merupakan sistem AC (*Alternating Current*) dengan tegangan berkisar 220 volt hingga 230 volt. Untuk mengatasi masalah tersebut, dibutuhkan alat yang dapat menaikkan tegangan keluaran DC pada panel surya menjadi 220 volt dan akan dikonversi menjadi tegangan AC (*Alternating Current*). Oleh karena itu, dilakukan penelitian mengenai alat yang dapat menaikkan tegangan keluaran DC.

Dari permasalahan tersebut maka dilakukan penelitian tugas akhir dengan judul “ **KONVERTER DC DC PENAİK TEGANGAN 230 VDC DALAM SISTEM LISTRIK HIBRID ENERGI TERBARUKAN** ”.

1.2. Deskripsi dan Rumusan Masalah

Dalam suatu perancangan alat *inverter*, keluaran dari *inverter* menggunakan transformator untuk menaikkan tegangan keluarannya yaitu tegangan AC. Sehingga tegangan AC yang telah dinaikkan sudah sesuai dengan yang dibutuhkan. Dalam perancangan *inverter* ini, dibutuhkan suatu alat yang dapat menggantikan fungsi dari transformator tersebut. Alat ini dapat menaikkan tegangan dari 24 volt DC menjadi 220/230 volt DC. Dan juga dapat mengatur tegangan keluaran dengan kondisi beban yang berubah – ubah. Oleh karena itu solusi yang ditawarkan untuk menggantikan fungsi dari transformator tersebut yaitu dengan alat bernama *boost converter*.

Boost converter adalah suatu konverter daya yang dapat menaikkan tegangan input menjadi tegangan keluaran yang diinginkan. *Boost converter* tersusun atas beberapa komponen diantaranya adalah induktor, kapasitor, dioda dan mosfet. Pada mosfet, terminal *gate* dikendalikan menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*). PWM dapat diatur melalui berbagai mikrokontroler salah satunya yaitu *Arduino*. Penggunaan PWM ini berguna dalam pengaturan tegangan output pada *boost converter*. Dalam perancangan *boost converter* dilakukan dalam bentuk simulasi dan juga dalam bentuk implementasi.

Berdasarkan deskripsi tersebut peneliti merumuskan pokok permasalahan, yaitu sebagai berikut :

1. Rancang bangun alat penaik tegangan (*boost converter*) pada suatu modul *inverter* dengan menghasilkan tegangan output 220/230 volt DC dengan kondisi beban yang berubah-ubah serta pengontrolan berbasis mikrokontroler.

1.3. Batasan Masalah

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, perancangan yang akan dibuat dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Desain dan implentasi difokuskan untuk memperoleh kondisi tegangan keluaran minimal bernilai 230 VDC.
2. Implementasi difokuskan dalam kondisi beban berubah-ubah dengan *ripple* keluaran yang rendah
3. Implementasi diuji dengan menggunakan sumber tegangan 24VDC yang terdapat pada laboratorium elektronika dan divais.
4. Penggunaan aplikasi *PSpice* sebagai mekanisme dalam menguji desain konverter.
5. Semua pengujian dilakukan dalam kondisi tunak dan semua komponen dianggap ideal.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mendesain rancangan dari alat pengganti transformator pada suatu *inverter*
2. Mengetahui pengaruh dari penggunaan kontrol PI adaptif terhadap *multilevel boost converter*
3. Menganalisa kondisi efisiensi *boost converter* terhadap kondisi beban yang berubah-ubah
4. Menganalisa kondisi tegangan *ripple boost converter* terhadap kondisi beban yang berubah-ubah
5. Mengimplementasikan pengontrolan PWM untuk mengatur tegangan keluaran dengan memanfaatkan mikrokontroler Arduino UNO R3

1.5. Metode Penelitian

Dalam penyusunan tugas akhir ini metode penelitian yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan kajian penulis atas referensi-referensi yang ada baik berupa buku, karya-karya ilmiah, internet maupun melalui media massa yang berhubungan dengan penulisan laporan penelitian ini.

2. Simulasi dan Pengujian

Kegiatan simulasi dan pengujian dimaksudkan untuk memperoleh data-data yang aktual yang berasal dari aplikasi ataupun hasil pengukuran secara langsung.

3. Analisa Data

Melakukan perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil pengujian alat sehingga dapat memperoleh kesimpulan yang dapat diolah lebih lanjut.

4. Simpulan

Pada tahap ini, diperoleh hasil yang dapat menyelesaikan masalah yang diteliti, sehingga hasil ini ditetapkan sebagai simpulan dari penelitian ini. Pada simpulan ini tujuannya untuk membuat laporan hasil akhir yang telah didapatkan

1.6. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas tentang metode penelitian yang di gunakan dalam tugas akhir ini

BAB IV HASIL SIMULASI DAN PENGUKURAN

Bab ini hasil penelitian yang dilakukan, dengan menampilkan data-data yang asli.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang didapatkan berdasarkan penelitian dan saran untuk pengembangan dan kelanjutan penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. DC-DC Converter

Dc-dc converter adalah rangkaian elektronika daya yang mengkonversi sebuah tegangan dc menjadi tegangan dc dengan level yang berbeda, dengan menyediakan keluaran yang diatur. Alternatif yang efisien untuk menghasilkan *regulator linear* adalah *switching converter*. Dalam sebuah rangkaian *switching converter*, transistor beroperasi sebagai sebuah sakelar elektronik dengan sepenuhnya aktif atau sepenuhnya tidak aktif (*saturasi* atau *cutoff* untuk sebuah *BJT* atau *triode* dan daerah *cutoff* dari MOSFET. Rangkaian ini juga dikenal sebagai *dc chopper* [4]. *Dc-dc converter* memiliki banyak bentuk antara lain :

- 1) konverter dasar seperti *buck*, *boost* dan *buck-boost converters*;
- 2) *voltage-lift converters*;
- 3) *super-lift converters*;
- 4) *transformer-type converters*;
- 5) konverter lainnya.

Perangkat dari semua jenis *DC/DC converters* dapat berupa transistor, BT, GTO dan MOSFET. Perangkat tersebut di kendalikan dengan pulsa *PWM* dengan siklus tertentu *duty cycle*. Dalam sebuah interval *sampling*/periode *T*, siklus konduksi *duty cycle* dapat diubah hanya sekali saat tegangan keluaran dari *DC/DC converter* diubah dari periode ke periode. Karena itu, semua jenis dari *DC/DC converter* bekerja dalam kondisi *diskrit* [5].

2.1.1. Jenis-Jenis DC-DC Converter [5]

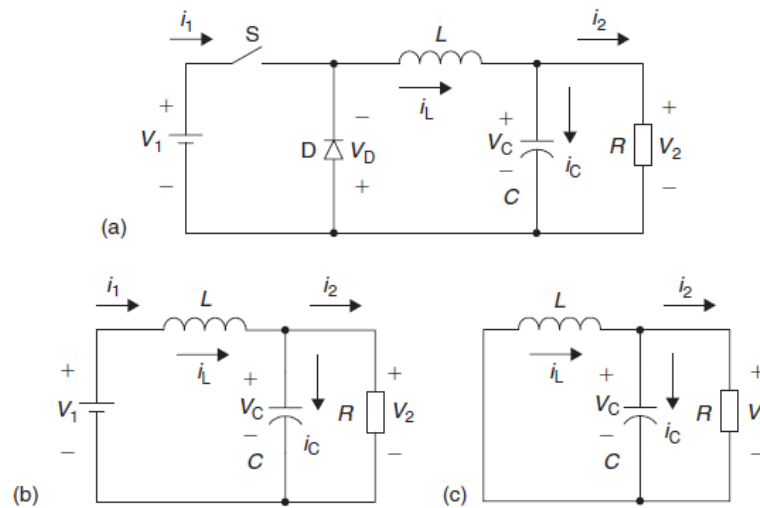
Tiga jenis topologi *DC/DC* yang disusun, yaitu *Buck converter*, *Boost converter* dan *Buck-Boost converter*. Jenis konverter ini berasal dari operasi kuadran pertama pada *choppers*. Contohnya, *buck converter* asalnya dari *Chopper* tipe A. Konverter ini mempunyai dua masalah utama : hubungan antara masukan dan keluaran, dan *riak* tegangan keluaran yang sangat besar. Adapun jenis-jenis dari *DC/DC converter* antara lain :

a. *Buck Converter*

Buck converter adalah *DC/DC converter* penurun tegangan. Konverter ini bekerja dalam operasi kuadran pertama. Ini berasal dari *chopper* kuadran pertama. Diagram rangkaian dan rangkaian *ekuivalen* sakelar *on* dan sakelar *off* ditunjukkan pada gambar 2.1. Tegangan keluaran dihitung dengan persamaan :

$$V_o = \frac{t_{on}}{T} V_{in} = k V_{in} \quad (2.1)$$

dimana T adalah periode berulang ($T=1/f$), dimana f adalah frekuensi pemotongan; t_{on} adalah waktu sakelar *on* dan k adalah konduksi *duty cycle* ($k= t_{on}/T$).



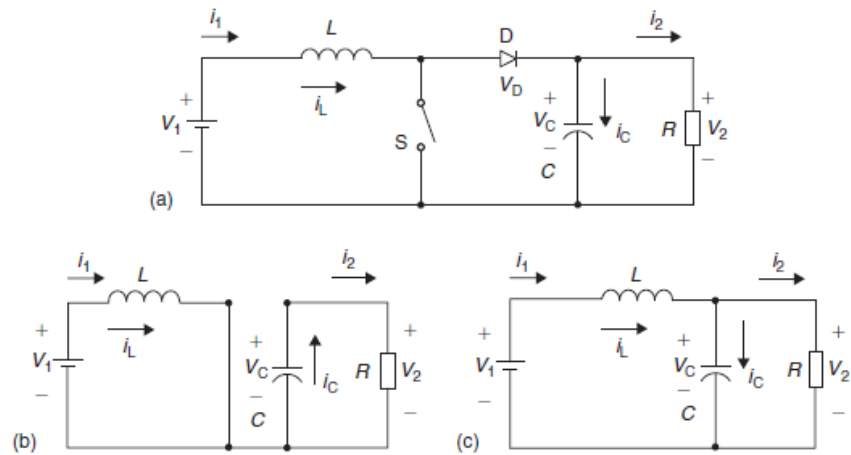
Gambar 2.1 *Buck Converter*. (a) Diagram rangkaian, (b) sakelar *on* dan (c) sakelar *off*

b. *Boost Converter*

Boost converter adalah *DC/DC converter* penaik tegangan. Konverter ini bekerja dalam operasi kuadran kedua. Ini berasal dari *chopper* kuadran kedua. Diagram rangkaian dan rangkaian *ekuivalen* sakelar *on* dan sakelar *off* ditunjukkan pada gambar 2.2. Tegangan keluaran dihitung dengan persamaan :

$$V_o = \frac{T}{T-t_{on}} V_{in} = \frac{1}{1-k} V_{in} \quad (2.2)$$

dimana T adalah periode berulang ($T=1/f$), dimana f adalah frekuensi pemotongan; t_{on} adalah waktu sakelar *on* dan k adalah konduksi *duty cycle* ($k= t_{on}/T$).



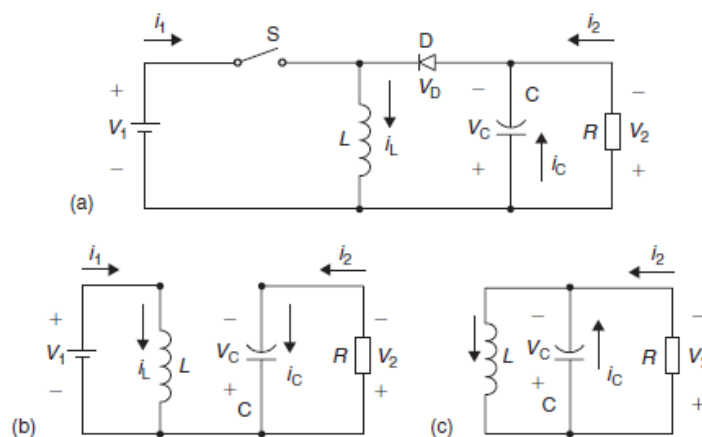
Gambar 2.2 Boost Converter. (a) Diagram rangkaian, (b) sakelar-on dan (c) sakelar-off

c. Buck-Boost Converter

Buck-boost converter adalah DC/DC converter penurun dan penaik tegangan. Konverter ini bekerja dalam operasi kuadran ketiga. Diagram rangkaian dan rangkaian ekuivalen sakelar on dan sakelar off, dan bentuk gelombang ditunjukkan pada gambar 2.3. Tegangan keluaran dihitung dengan persamaan :

$$V_o = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} V_{in} = \frac{k}{1-k} V_{in} \quad (2.3)$$

dimana T adalah periode berulang ($T=1/f$), dimana f adalah frekuensi pemotongan; t_{on} adalah waktu sakelar on dan k adalah konduksi duty cycle ($k= t_{on}/T$).



Gambar 2.3 Buck-boost Converter. (a) Diagram rangkaian, (b) sakelar-on dan (c) sakelar-off

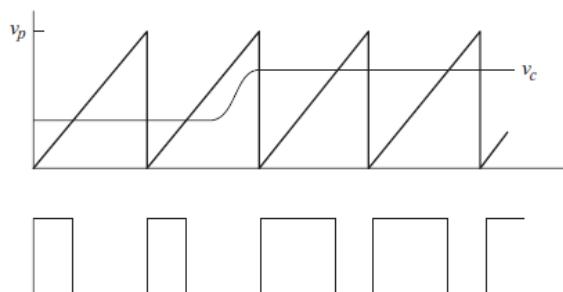
Penggunaan konverter ini sangat mudah untuk menghasilkan tegangan output yang diinginkan, yang bisa menggunakan tegangan masukan yang tinggi atau rendah. Hal ini memberikan manfaat yang sangat besar dalam pengaplikasian di industri.

2.2. Metode Switching

Pada sistem penyaklaran DC/DC *boost converter* terdapat beberapa jenis teknik modulasi yang digunakan. Pada penelitian kali ini digunakan teknik modulasi pulse width modulation (PWM).

2.2.1. Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse width modulation (PWM) secara umum adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam satu periode, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Modulasi PWM ini dilakukan dengan cara mengubah perbandingan lebar pulsa positif terhadap lebar pulsa negative ataupun sebaliknya dalam frekuensi sinyal yang tetap. Artinya, total 1 periode (T) pulsa dalam PWM tetap. Sinyal PWM pada umumnya memiliki *amplitude* dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan *amplitude* sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* yang bervariasi antara 0% hingga 100%. Berikut ini merupakan contoh dari PWM.



Gambar 2.4 *Pulse Width Modulation*

Duty cycle pada sebuah PWM dapat dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (2.4)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{total}} \quad (2.5)$$

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (2.6)$$

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \times V_{in} \quad (2.7)$$

dengan,

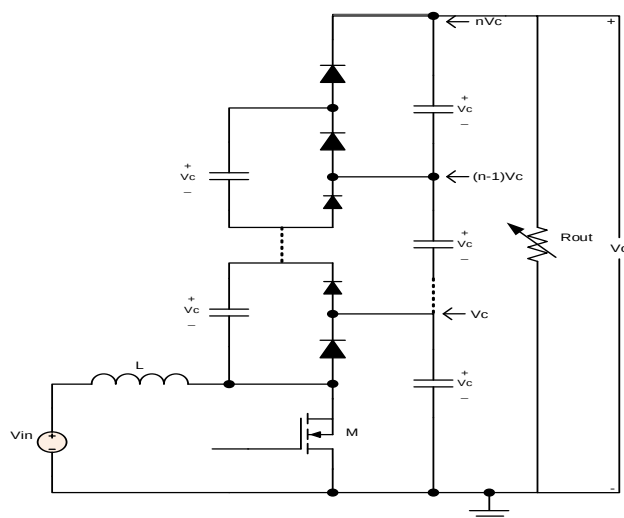
D = *duty cycle* adalah lamanya pulsa high dalam satu perioda

Ton = waktu pulsa “HIGH”

Toff = waktu pulsa “LOW”

2.3. Multilevel Boost Converter (MBC)

Multilevel boost converter (MBC) adalah sebuah konverter DC-DC berbasis PWM yang mengkombinasikan antara konverter *boost* konvensional dan fungsi *switched capacitor* untuk menghasilkan tegangan *output* yang berbeda dan stabil dengan hanya menggunakan 1 *driven switch*, 1 induktor, 2N-1 dioda dan 2N-1 kapasitor [6]. N yang dimaksud adalah jumlah tingkat pada konverter *boost multilevel*. Kelebihan dari topologi ini adalah arus inputnya kontinyu, rasio konversinya besar walaupun tanpa menggunakan *duty cycle* yang besar dan tanpa menggunakan transformator tambahan, dan dapat menggunakan frekuensi *switching* yang tinggi. Pada gambar 2.5 terlihat bentuk rangkaian konverter *boost multilevel*.



Gambar 2.5 Rangkaian *Multilevel Boost Converter*

2.3.1. Prinsip Kerja dari Rangkaian *Multilevel Boost Converter (MBC)*

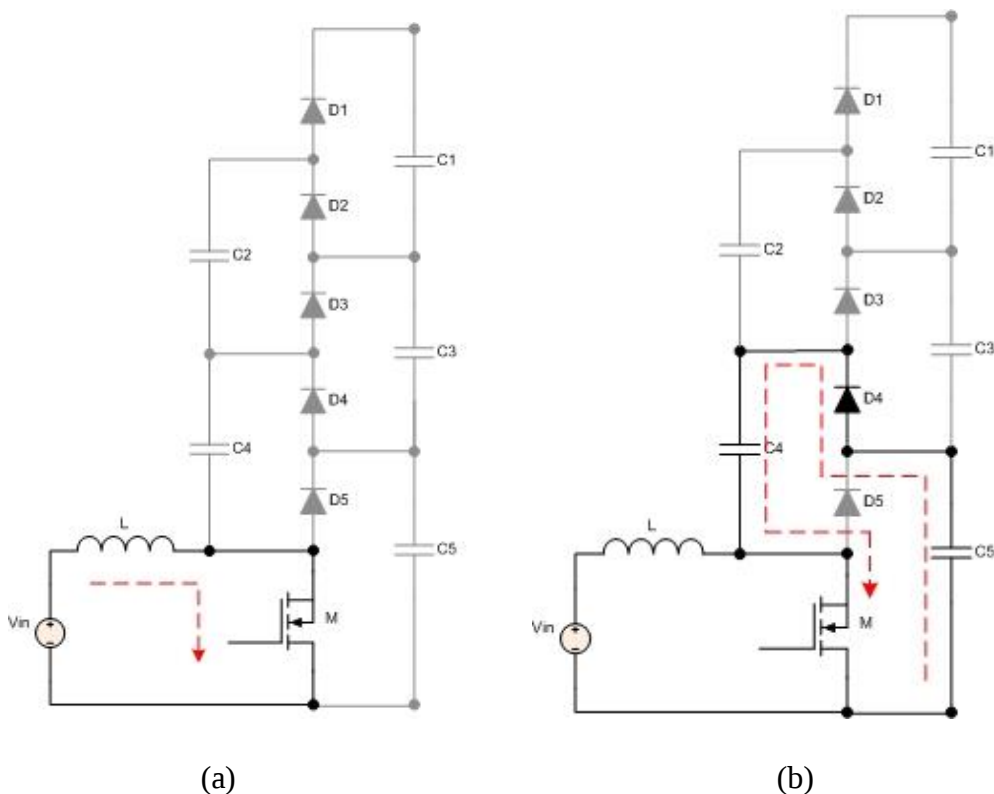
Pada *boost converter* konvensional, tegangan *output* bernilai sama dengan tegangan kapasitor. Berbeda pada konverter *boost multilevel*, nilai dari tegangan *output* berdasarkan N kali dari tegangan kapasitor dengan persamaan :

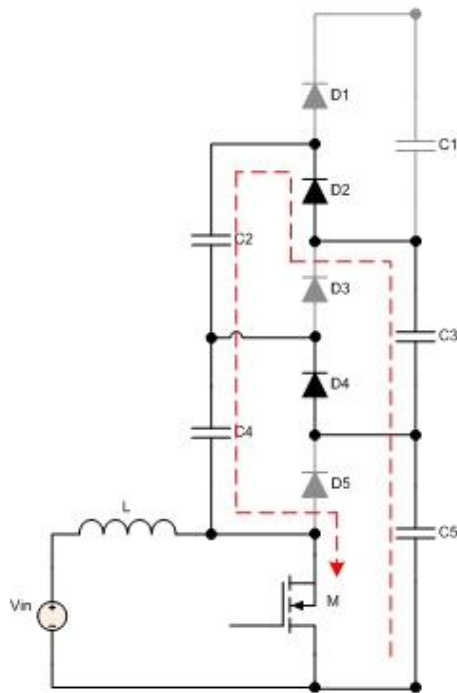
$$V_o = N \times V_c \quad (2.8)$$

Ada dua kondisi operasi pada rangkaian *multilevel boost converter*. Mode 1 merupakan kondisi saat *switch on* ($T_1 = DT_s$), mode lainnya merupakan kondisi saat *switch off* ($T_2 = (1 - D)T_s$).

2.3.1.1. Kondisi Switch On

Keadaan saat switch on ditunjukkan pada gambar 2.6. Saat switch keadaan on, induktor akan terhubung ke tegangan masukan (V_{in}), (gambar 2.6a). Jika tegangan di C_5 lebih besar dari tegangan di C_4 , maka C_5 menjepit tegangan di C_4 melalui D_4 dan M (gambar 2.6b). Bersamaan dengan itu, jika jumlah nilai tegangan dari C_3 dan C_5 lebih besar dari jumlah tegangan C_2 dan C_4 maka C_3 dan C_5 menjepit tegangan di C_2 dan C_4 melalui D_2 dan M (gambar 2.6c) [7].



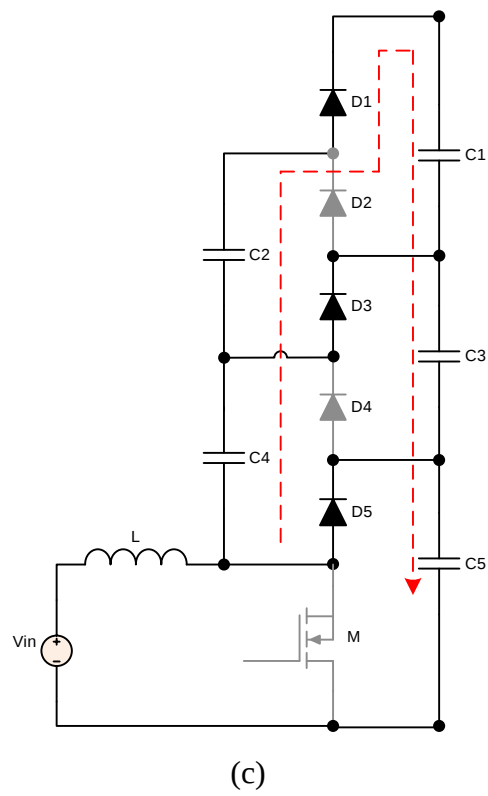
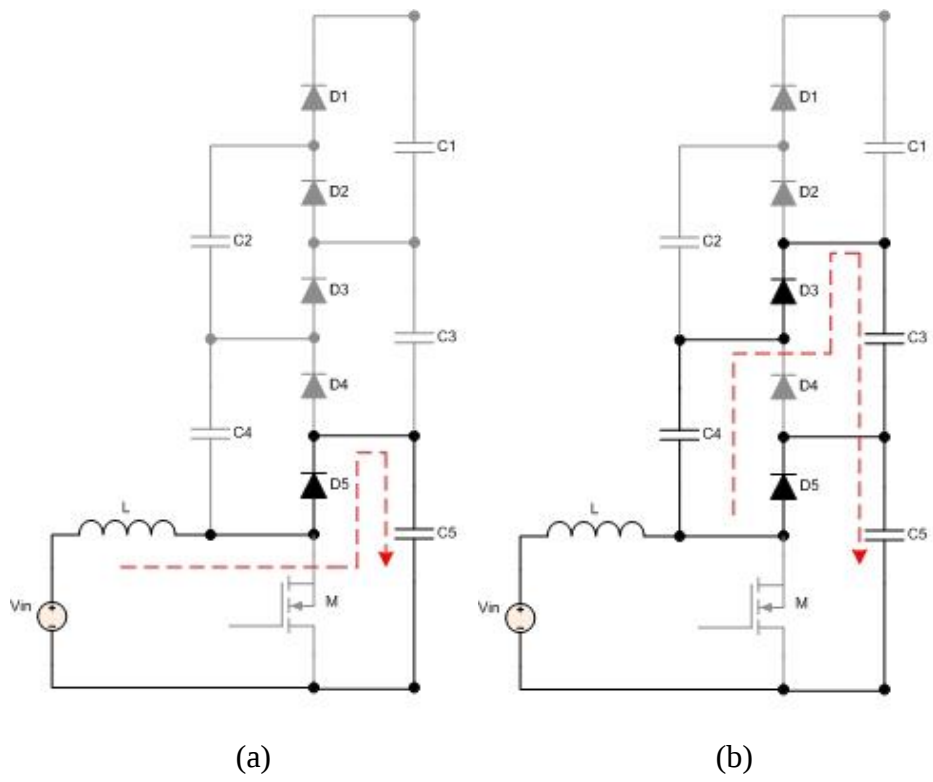


(c)

Gambar 2.6 Kondisi Switch On

2.3.1.2. Kondisi Switch Off

Keadaan pada saat *switch off* ditunjukkan pada gambar 2.7. Ketika *switch off*, arus induktor menyalakan D_5 dan itu hal tersebut mengakibatkan semua dioda menyala. Selama keadaan *off*, arus induktor menyalakan D_5 untuk men-charge C_5 (gambar 2.7a). Ketika tegangan yang melalui C_4 lebih besar daripada tegangan yang melalui C_3 , D_3 dalam kondisi konduksi membuat kapasitor C_3 dan C_5 dalam kondisi mengisi muatan (gambar 2.7b). Dengan cara yang sama, tegangan induktor ditambah dengan tegangan masukan (V_{in}), C_4 , dan C_2 menjepit tegangan di C_1 , C_3 , dan C_5 melalui D_1 (gambar 2.7c) [6].



Gambar 2.7 Kondisi Switch Off

2.3.2. Efek dari Resistansi Seri (Resrl) pada Rangkaian MBC

Multilevel boost converter dalam kondisi ideal memiliki rasio *boost* maksimum, namun dalam kondisi nyata berbeda dalam praktiknya. Resistansi induktor, yang biasa disebut sebagai *parasitic resistance* adalah solusi untuk membatasi faktor *boost*. Konverter DC-DC beroperasi pada frekuensi tinggi. Pada frekuensi tinggi, ukuran induktor dan resistansi dikurangi. Pada *parasitic resistance* yang berbeda, penguatan konverter berbeda dengan *duty cycle* yang bervariasi [7].

2.3.3. Tegangan Output dari Multilevel Boost Converter

2.3.3.1. Analisis Persamaan untuk Tegangan Output MBC tanpa Resrl

Tegangan keluaran dari konverter sama dengan jumlah dari tegangan kapasitor. Untuk N jumlah dari *output* kapasitor,

$$V_o = N \times V_c \times I_L = I_s \quad (2.9)$$

Dalam kondisi *on*

$$V_L = V_S \quad (2.10)$$

Dalam kondisi *off*

$$V_L = V_S - V_C \quad (2.11)$$

Rata-rata tegangan yang melalui induktor

$$V_L|_{on} + V_L|_{off} = 0 \quad (2.12)$$

Gunakan persamaan (2.10, 2.11, 2.12) sehingga persamaan menjadi

$$DV_S|_{on} + (1 - D)(V_S - V_C)|_{off} = 0 \quad (2.13)$$

$$V_S = V_C(1 - D) \quad (2.14)$$

Dari persamaan (2.14) dan (2.9) didapatkan

$$V_o = \frac{N \times V_S}{(1 - D)} \quad (2.15)$$

Persamaan (2.15) menunjukkan persamaan tegangan dari N tingkat konverter *boost*.

Mempertimbangkan rugi pada sistem,

$$V_S \times I_S = V_o \times I_o \quad (2.16)$$

Dari persamaan (2.15) dan (2.16) didapatkan

$$V_S \times I_S = \frac{N \times V_S}{(1 - D)} \times I_o \quad (2.17)$$

$$I_S = \frac{N x I_O}{(1-D)} \quad (2.18)$$

Persamaan (2.18) menunjukkan persamaan sumber arus untuk N tingkat konverter *boost* [8]. Persamaan (2.17) menunjukkan tegangan keluaran dari *multilevel boost converter*. Untuk N=1, tegangan keluaran mewakili tegangan keluaran dari *boost converter* konvensional. Jadi persamaannya dapat menjadi :

$$\text{Tegangan Output Multilevel Boost Converter} = N * \text{Tegangan Output Boost Converter Konvensional}$$

2.3.3.2. Analisis Persamaan untuk Tegangan Output MBC dengan Resrl

Dengan penurunan tegangan yang melalui Resrl merupakan pertimbangan untuk melakukan analisis.

Dalam kondisi on ,tegangan pada induktor,

$$V_L = (V_S - I_L x R_{esrl}) \quad (2.19)$$

Dalam kondisi off, tegangan pada induktor,

$$V_L = (V_S - V_C - I_L x R_{esrl}) \quad (2.20)$$

$$V_L|_{on} + V_L|_{off} = 0$$

$$D(V_S - I_L x R_{esrl}) + (1 - D)(V_S - V_C - I_L x R_{esrl}) = 0 \quad (2.21)$$

Dari persamaan (2.21)

$$V_S = V_C x (1 - D) + I_L x R_{esrl} = 0 \quad (2.22)$$

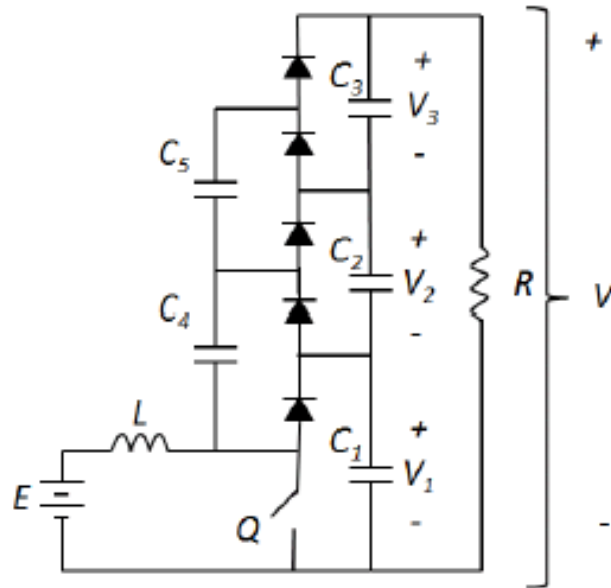
Substitusi persamaan (2.9), (2.18) pada persamaan (2.22)

$$V_S = \frac{V_O x (1-D)}{N} + \frac{V_O x N x R_{esrl}}{(1-D) x R_O} \quad (2.23)$$

Persamaan (2.23) mewakili tegangan *output* dari N*MBC dengan Resrl [7].

2.3.1. Voltage Balancing

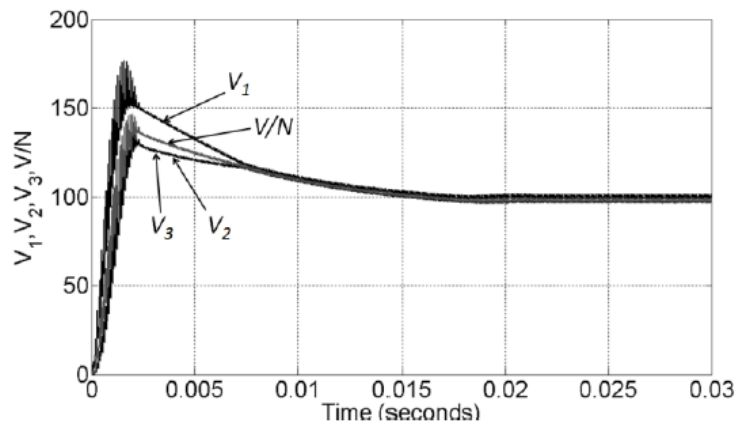
Salah satu fitur dari *multilevel boost converter* yaitu *voltage balancing* (penyeimbang tegangan) [9]. Dalam kata lain, tegangan yang melalui pada setiap kapasitor cenderung sama dengan *output* dari *multilevel boost converter*. Bahkan selama kondisi transien tegangannya serupa. Dalam menggambarkan fitur ini 3x MBC akan di pertimbangkan. Jelas bahwa diagram rangkaian dari 3x MBC terlihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram Rangkaian dari 3x MBC

Tegangan rata-rata pada C_2 dan C_3 (masing-masing V_2 dan V_3) adalah identik, sementara tegangan rata-rata pada $C_1(V_1)$ sama, lihat pada gambar 2.9. Sifat ini masih terdapat pada MBC yang memiliki sejumlah level (sejumlah kapasitor) pada *output*. Di samping itu, hal itu sangat penting dicatat bahwa MBC dirancang untuk meningkatkan penguatan dari tegangan dengan menambahkan kapasitor pada *output*[10].

Tegangan *output*, selama transien dan kondisi tunak, didefinisikan sebagai jumlah tegangan yang melalui kapasitor pada *output multilevel boost converter*. Gambar 2.9 menggambarkan sifat transien dari tegangan *output* dibagi dengan jumlah level yang ada di *output* (V/N). Notasi jumlah dari kapasitor pada *output* dari *multilevel boost converter* adalah N . Jelas bahwa V/N serupa dengan tegangan yang melalui setiap kapasitor pada *output*.



Gambar 2.9 Jalur Transien

2.4. Arduino

Mikrokontroller adalah komputer yang berukuran mikro dalam satu chip IC (*integrated circuit*) yang terdiri dari prosesor, memori, dan antarmuka yang bisa diprogram. Jadi disebut komputer mikro karena dalam IC atau chip mikrokontroller terdiri dari CPU, memori dan I/O yang bisa kita kontrol dengan memprogramnya. I/O juga sering disebut dengan GPIO (*General Purpose Input Output Pins*) yang berarti : pin yang bisa kita program sebagai input atau output sesuai kebutuhan [11].

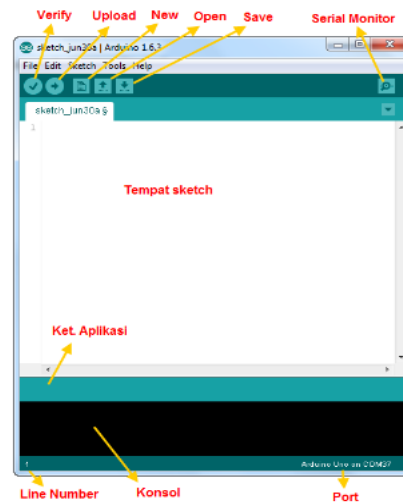


Gambar 2.10 Board Arduino Uno

Board Arduino terdiri dari *hardware* atau modul mikrokontroller yang siap pakai dan *software* IDE yang digunakan untuk memprogram sehingga kita bisa belajar dengan mudah. Kelebihan dari Arduino yaitu kita tidak direpotkan dengan rangkaian minimum sistem dan *programmer* karena sudah *built in* dalam satu *board*. Oleh sebab itu kita bisa fokus ke pengembangan sistem.

Untuk memprogram *board* Arduino, dibutuhkan aplikasi IDE (*Integrated Development Environment*) bawaan dari Arduino. Aplikasi ini berguna untuk

membuat, membuka, dan mengedit *source code* Arduino (*Sketches*, para *programmer* menyebut *source code* arduino dengan istilah “*sketches*”). Sketch merupakan *source code* yang berisi logika dan algoritma yang akan diupload ke dalam IC mikrokontroller (Arduino).



Gambar 2.11 Interface Arduino IDE

Arduino adalah sebuah board mikrokontroller yang berbasis Atmega328. Arduino memiliki 14 pin *input/output* yang mana 6 pin dapat digunakan sebagai *output* PWM, 6 *analog input*, *crystal* osilator 16 MHz, koneksi USB, *jack power*, kepala ICSP, dan tombol *reset*.

a. 14 pin *input/output digital* (0-13)

14 pin *input/output digital* (0-13) berfungsi sebagai *input* atau *output*, dapat diatur oleh program. Khusus untuk 6 buah pin 3, 5, 6, 9, 10 dan 11, dapat juga berfungsi sebagai pin *analog output* dimana tegangan keluaran dapat diatur. Nilai sebuah pin *output analog* dapat diprogram antara 0-255, dimana hal itu mewakili nilai tegangan 0-5V.

b. USB

USB berfungsi untuk memuat program dari computer ke dalam papan, komunikasi serial antara papan dan computer, memberi daya listrik kepada papan.

c. Q1- Kristal (*Quartz Crystal Oscillator*)

Jika mikrokontroler dianggap sebagai otak, maka kristal adalah jantungnya karena komponen ini menghasilkan detak-detak yang dikirim kepada mikrokontroler agar melakukan sebuah operasi untuk setiap detaknya. Kristal ini dipilih yang berdetak 16 juta kali per detik (16MHz).

d. Tombol reset S1

Untuk mereset papan sehingga program akan mulai lagi dari awal. Perhatikan bahwa tombol reset ini bukan untuk menghapus program atau mengosongkan mikrokontroler.

e. *In-Circuit Serial Programing* (ICSP)

Port ICSP memungkinkan pengguna untuk memprogram mikrokontroler secara langsung, tanpa melalui bootloader. Umumnya pengguna Arduino tidak melakukan ini sehingga ICSP tidak terlalu dipakai walaupun disediakan.

f. IC 1 – Mikrokontroler Atmega

Komponen utama dari papan Arduino di dalamnya terdapat CPU, ROM dan RAM.

g. X1 – Sumber Daya Eksternal

Papan arduino dapat diberikan tegangan DC antara 9-12V.

h. 6 pin input *analog* (0-5)

Pin ini sangat berguna untuk membaca tegangan yang dihasilkan oleh sensor analog. Program dapat membaca nilai sebuah pin *input* antara 0-1023, dimana hal itu mewakili nilai tegangan 0-5V.

2.5. Konsep Dasar Pengontrolan PID

PID (*Proportional-Integral-Derivative Controller*) merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Pengontrol PID digunakan dalam berbagai kondisi karena kemudahannya. Efisiensi pengontrol PID dapat mencapai 95% [12]. Komponen kontrol PID ini terdiri dari tiga jenis yaitu Proportional, Integratif dan

Derivatif [13]. Ketiganya dapat dipakai bersamaan maupun sendiri-sendiri tergantung dari respon yang kita inginkan terhadap suatu *plant* [14].

2.5.1. Kontrol Proporsional

Kontrol P jika $G(s) = kp$, dengan k adalah konstanta. Jika $u = G(s) * e$ maka $u = Kp * e$ dengan Kp adalah konstanta proporsional. Kp berlaku sebagai *gain* (penguat) saja tanpa memberikan efek dinamik kepada kinerja kontroler. Penggunaan kontrol P memiliki berbagai keterbatasan karena sifat kontrol yang tidak dinamik ini. Pengontrol proporsional memiliki keluaran yang sebanding atau proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya).

Ciri – ciri pengontrol proporsional [15] :

- a. Jika nilai Kp kecil, pengontrol proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat (menambah *rise time*)
- b. Jika nilai Kp dinaikkan, respon sistem akan semakin cepat mencapai keadaan mantapnya (mengurangi *rise time*)
- c. Namun jika nilai Kp diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil atau respon sistem akan berosilasi
- d. Nilai Kp dapat diset sedemikian sehingga mengurangi *steady state error*, tetapi tidak menghilangkannya.

2.5.2. Kontrol Integratif

Pengontrol integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol (*Error Steady State = 0*). Jika sebuah pengontrol tidak memiliki unsur integrator, pengontrol proporsional tidak mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol.

Jika $G(s)$ adalah kontrol I maka u dapat dinyatakan sebagai $u(t) = [\int e(t)dt] K_i$ dengan K_i adalah konstanta integral dan dari persamaan diatas, $G(s)$ dapat dinyatakan sebagai $u = Kd$ [16].

Keluaran pengontrol ini merupakan hasil penjumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, maka keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan. Sinyal keluaran pengontrol integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan (*error*).

Ciri – ciri pengontrol integral :

- a. Keluaran pengontrol integral membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga pengontrol integral cenderung memperlambat respon.
- b. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengontrol akan bertahan pada nilai sebelumnya.
- c. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i
- d. Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Tetapi semakin besar nilai konstanta K_i akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengontrol.

2.5.3. Karakteristik Kontroler PI

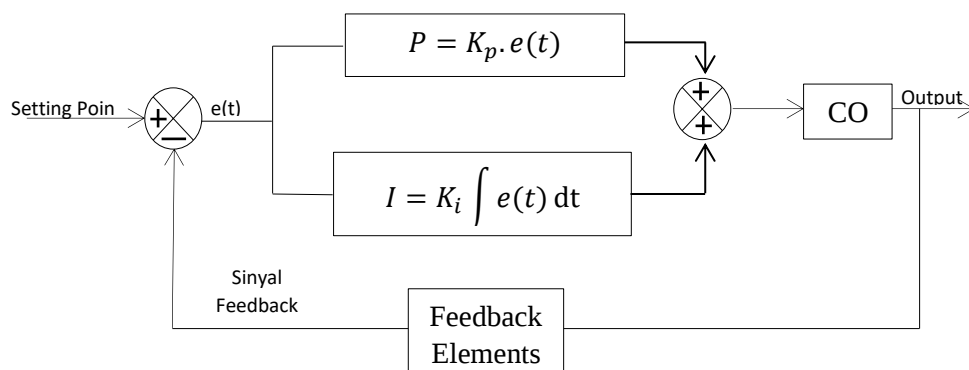
Tujuan utama pemakaian pengendali adalah untuk menghasilkan *output* yang akan membawa sinyal masukan ke dalam besaran yang diinginkan dengan cepat dan teliti serta terhindar dari osilasi. Kinerja sistem pengendalian ideal akan mampu bereaksi dengan cepat terhadap adanya perubahan sinyal *input* tanpa mengalami penundaan serta tidak terpengaruh oleh adanya gangguan.

Pengontrolan PI merupakan pengontrolan berdasarkan umpan balik dengan menggunakan nilai referensi (*set poin*) untuk meningkatkan kinerja sistem.

Pengontrolan PI meminimalisir nilai kesalahan dengan melakukan pengaturan pada sinyal input kedalam sistem [17].

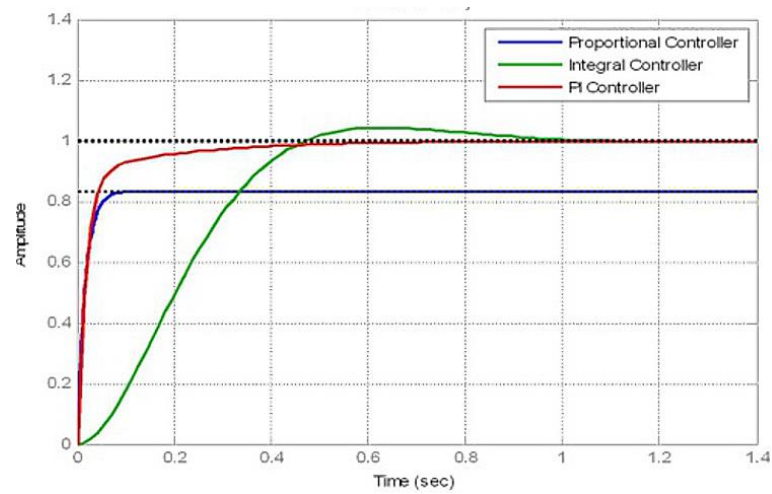
Sinyal kontrol yang terkirim kedalam sistem akan meminimalisir perhitungan kesalahan secara terpisah dengan dua komponen pengontrolan PI. Secara umum, model pengontrolan PID digunakan, tetapi dalam beberapa kasus, pengontrolan PI sudah cukup sanggup untuk meminimalkan kesalahan dengan baik [18]. Berdasarkan pengontrolan PI, maka didapatkan persamaan sebagai berikut.

Dari persamaan di atas, nilai K_p meningkatkan sensitivitas dari sistem kontrol dan mempercepat transport transien. K_i menghilangkan sinyal kesalahan dalam kondisi tunak. Pada gambar di bawah ini dapat dilihat model pengontrolan menggunakan umpan balik.



Gambar 2.12 Model Kontrol PI[19]

Adapun grafik dari model kontrol PI dapat dilihat pada gambar 2.13. Pada gambar tersebut terlihat, kondisi dengan pengontrolan tegangan (amplitudo) dalam rentang waktu tertentu.



Gambar 2.13 Model Kontrol PI

Untuk memperoleh nilai K_p dan K_i harus dilakukan *Tunning*, supaya sistem kendali dapat optimum. Adapun karakteristik respon kontroler berdasarkan perubahan nilai penguatannya (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Karakteristik Respon Kontroler

Respon Kontroler	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Error Steady State</i>
K_p	Menurun	Meningkat	Sedikit Berubah	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Berubah	Tereliminasi

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan implementasi dari penelitian sebelumnya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini merupakan perbandingan antara metode simulasi dan metode hasil pengukuran langsung. Metode simulasi menggunakan *software* pemrograman *Pspice*. Penelitian ini menampilkan hasil simulasi dan hasil pengukuran langsung dari rangkaian *Multilevel Boost Converter 23VDC-230VDC* dengan nilai beban yang berbeda. Pada metode simulasi *Pspice*, rangkaian dimodelkan dengan memberikan titik (node) pada setiap komponen. Simulasi dilakukan dengan menggunakan nilai *input* tegangan, *duty cyle*, *frekuensi* yang tetap dengan nilai beban yang diubah-ubah dengan menggunakan pengontrolan PI. Pada metode pengukuran langsung, dilakukan pengujian pada alat dengan mikrokontroler sebagai pengendalinya dengan *input* tegangan, *duty cycle*, *frekuensi* yang tetap dengan nilai beban yang diubah-ubah.

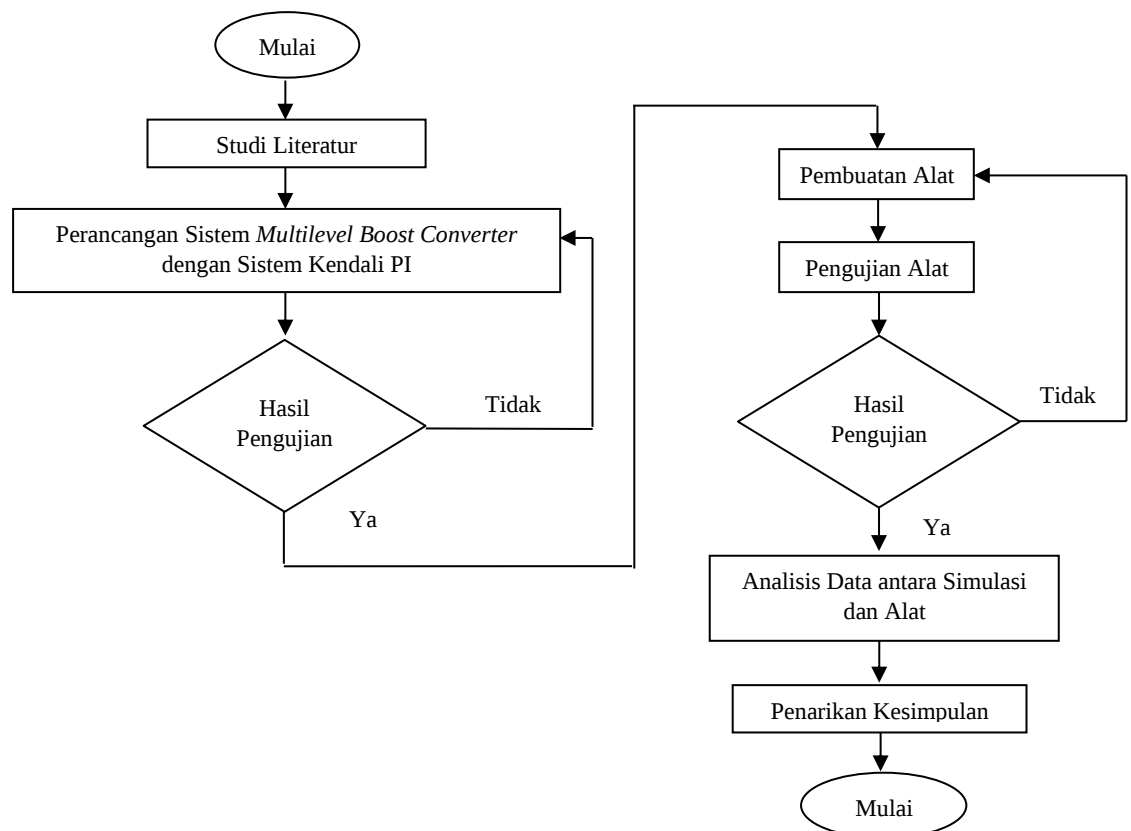
3.2. Tahapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian berdasarkan tujuan penelitian yang telah dipaparkan, dilakukan dengan beberapa tahap, yaitu:

- a. Studi literatur, mengumpulkan bahan-bahan yang berhubungan dengan penelitian dan mempelajari teori dasar yang berkaitan dan menunjang penelitian.
- b. Perancangan sistem , melakukan perencanaan awal dengan menentukan jenis rangkaian, pemilihan komponen yang akan digunakan, menentukan parameter kendali pada penelitian yang dilakukan.
- c. Pengujian simulasi, untuk memastikan bahwa rangkaian yang disimulasikan telah bekerja sesuai dengan teori dan fungsinya sehingga dapat memberikan kelancaran proses dalam pengambilan data.

- d. Pembuatan alat, melakukan pembuatan alat sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan pada simulasi yang dilakukan
- e. Pengujian alat, melakukan proses pengukuran pada kinerja alat yang telah dibuat guna untuk mengumpulkan data penelitian dan akan digunakan sebagai data verifikasi antara simulasi dan alat.
- f. Analisis data simulasi dan alat, melakukan verifikasi data atau perbandingan antara simulasi dan alat sesuai dengan scenario pengujian yang telah ditentukan. Apabila telah sesuai dengan yang ditentukan, maka dilanjutkan dengan penarikan kesimpulan.

Berikut ini adalah diagram alir dari tahapan penelitian yang dilakukan, yang dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

3.3. Alat dan Bahan Penelitian

Dalam penelitian yang dilakukan, diperlukan baik perangkat keras maupun perangkat lunak yang mendukung proses jalannya penelitian.

Tabel 3.1 Alat dan Bahan Penelitian

NO	JENIS	JUMLAH	KETERANGAN
1.	Laptop ASUS X450J RAM 4GB	1	Sebagai perangkat yang digunakan untuk menjalankan aplikasi desain maupun simulasi
2.	<i>Software Pspice A/D Lite version 17.2</i>	1	Sebagai perangkat lunak yang digunakan dalam melakukan simulasi rangkaian <i>boost converter</i>
3.	<i>Software Altium Designer version 16.0.5</i>	1	Sebagai perangkat lunak yang digunakan dalam melakukan <i>design</i> komponen dan rangkaian <i>boost converter</i>
4.	<i>Software Arduino IDE</i>	1	Sebagai perangkat lunak yang digunakan untuk memprogram modul Arduino dalam membangkitkan sinyal PWM
5.	<i>Arduino Uno R3</i>	1	Sebagai perangkat keras (mikrokontroler) yang digunakan sebagai pengendali <i>PWM</i> untuk <i>MOSFET</i>
6.	<i>Power Supply</i>	1	Sebagai tegangan masukan yang digunakan dalam rangkaian <i>boost converter</i> dengan nilai 24 volt DC
7.	MOSFET IRFP460	1	Sebagai komponen utama yang digunakan sebagai sakelar elektronik pada <i>boost converter</i>
8.	L7805CV	1	Sebagai regulator tegangan masukan dari mikrokontroler

9.	TLP 250	1	Sebagai <i>driver</i> mosfet
10.	<i>Capasitor</i> 90uF	5	Sebagai komponen penyusun pada <i>boost converter</i>
11.	Dioda IN 5404	5	Sebagai komponen penyusun pada <i>boost converter</i>
12.	Induktor 124uH	1	Sebagai komponen penyusun pada <i>boost converter</i>
13.	<i>Resistor</i>	5	Sebagai komponen penyusun pada <i>boost converter</i>
14.	<i>DC Voltage Sensor</i>	1	Sebagai alat yang mendeteksi tegangan keluaran yang digunakan sebagai <i>feedback</i> dari pengontrolan tegangan
15.	Multimeter Digital	1	Sebagai alat ukur tegangan dan arus
16.	LCR Meter	1	Sebagai alat ukur resistansi, kapasitansi dan induktansi
17.	Resistansi Beban	7	Sebagai beban uji

3.4. Waktu dan Tempat Penelitian

3.4.1. Waktu

Waktu penelitian dilaksanakan selama 7 bulan dimulai pada bulan November 2019 sampai Mei 2020.

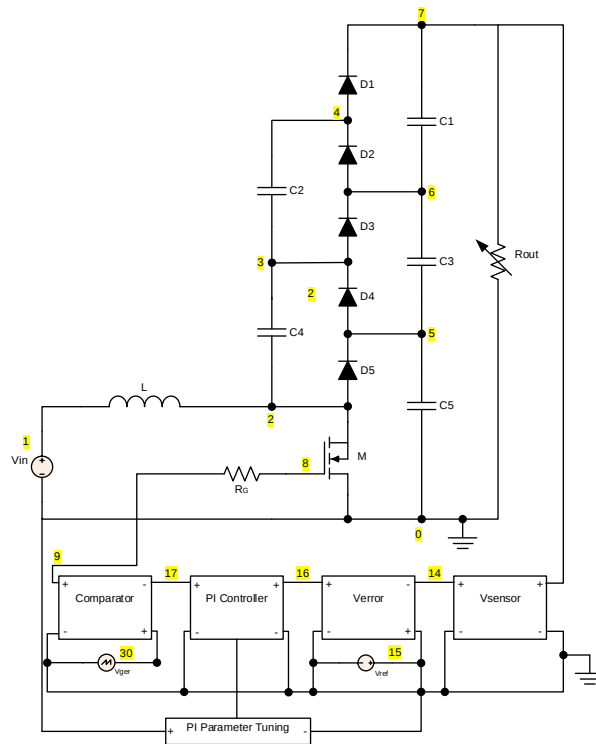
3.4.2. Tempat Penelitian

Lokasi penelitian bertempat di ruang Laboratorium Elektronika dan Divais Departemen Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin.

3.5. Desain Multilevel Boost Converter

3.5.1. Rangkaian Multilevel Boost Converter

Pada penelitian ini, jenis *boost converter* yang digunakan merupakan *multilevel boost converter* tiga tingkat, topologi terdiri dari satu *induktor* (L), satu *MOSFET* (M), kapasitor yang berjumlah lima buah ($C1-C5$), dioda yang berjumlah lima buah ($D1-D5$), resistansi variable sebagai beban (R) dan rangkaian *feedback* untuk mikrokontroler.



Gambar 3.2 Rangkaian *Multilevel Boost Converter* dengan Pengendali

3.5.2. Penentuan Parameter Rangkaian

Pada penelitian di metode simulasi akan diuji dengan daya keluaran sebesar 1.500 W. Selanjutnya yaitu menentukan resistansi beban berdasarkan daya keluaran dan tegangan keluaran. Dengan menggunakan persamaan (3.1), maka didapatkan :

$$R_o = \frac{V_o^2}{P} = \frac{230^2}{1500} = 35 \, \Omega \quad (3.1)$$

Dimana,

R_o = Resistansi beban (Ω)

V_o = Tegangan *output* (V)

P = Daya (W)

Namun pada pengujian alat, hanya menggunakan resistansi beban sebesar 22 k Ω dikarenakan keterbatasan alat yang tersedia di pasaran.

Langkah selanjutnya yaitu menentukan besar *duty cycle* yang dibutuhkan untuk menaikkan tegangan masukan konverter. Dapat terlihat pada persamaan (3.2) besar *duty cycle* yang dibutuhkan[20].

$$D = \frac{(N \times V_i) - V_o}{-V_o} = \frac{(3 \times 24) - 230}{-230} = 0.7 \quad (3.2)$$

Dimana,

V_i = Tegangan input (V);

N = Jumlah/tingkat dari *multilevel boost converter*

D = *Duty cycle*

Dengan demikian nilai *duty cycle* yang disarankan digunakan yaitu 0.68. Setelah mengetahui nilai resistansi beban dan nilai *duty cycle*, maka selanjutnya menentukan nilai induktor.

Dalam melakukan penentuan nilai induktor, dilakukan dengan menerapkan persamaan (3.3)[21].

$$L = \frac{5(1-D)^2 R_o}{N^2} DT = \frac{5(1-0.7)^2 \times 35}{3^2 \times 10000} \times 0.7 = 122,5 \mu H \quad (3.3)$$

Dimana,

L = Induktansi Induktor Minimal (H)

T = Periode switching (detik)

Berdasarkan persamaan diatas, maka nilai induktor yang disarankan yaitu $122,5\mu H$. Untuk nilai kapasitor, nilai kapasitor yang digunakan yaitu $90\mu F$. Nilai tersebut digunakan berdasarkan proses simulasi yang dilakukan pada aplikasi *PSpice*.

Adapun parameter-parameter yang akan digunakan pada rangkaian *multilevel boost converter* ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Rangkaian Multilevel Boost Converter

Parameter	Nilai
Tegangan <i>Input</i>	24 V
Tegangan <i>Output</i>	230 V
Frekuensi	10 kHz
<i>Duty Cycle</i>	0,21
Resistansi Beban	21,7k Ω ; 22,7k Ω ; 23,7k Ω ; 24,65 k Ω ; 44,3 k Ω ; 45,3 k Ω ; 46,2 k Ω ;
Induktor	124 μH
Kapasitor	90 μF

Pada tabel diatas, parameter resistansi beban, *duty cycle* dan induktor tidak sesuai dengan yang disarankan. Hal itu disebabkan oleh ketersediaan alat. Namun hal tersebut tidak berpengaruh besar terhadap penelitian yang dilakukan.

3.5.3. Desain Kontrol *Duty Cycle*

Cara kerja dari kontroler ini yaitu dengan membandingkan tegangan *feedback* yang dihasilkan oleh alat *multilevel boost converter* dengan *setpoint* yang telah ditentukan dalam pemrograman pada mikrokontroler. Perbandingan dari hal tersebut akan menghasilkan sinyal *error* dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_{error}(t) = V_{setpoint} - V_{feedback}(t) \quad (3.4)$$

Sinyal *error* tersebut akan diolah oleh kontroler PI dan dihasilkan sinyal referensi sebagai *feedback* dengan persamaan :

$$V_{Dref}(t) = Kp \times Verror(t) + Ki \int_0^t Verror(t)dt \quad (3.5)$$

Dimana,

$Verror$ = Sinyal tegangan error alat (V)

$Vsetpoint$ = Tegangan referensi (V)

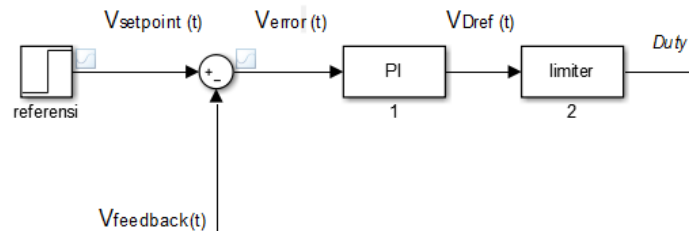
$Vfeedback$ = Tegangan *feedback* yang terukur pada alat (V)

V_{Dref} = Sinyal output PI yang akan dimodulasi (V)

Kp = Konstanta proportional

Ki = Konstanta integral

Desain kontroler *duty cyle* yang akan digunakan dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Kontrol *Duty Cycle Multilevel Boost Converter*

3.6. Skenario Pengujian

Pengujian yang dilakukan memperhatikan parameter diantaranya yaitu tegangan *input*, arus *input*, tegangan *output* dan arus *output*. Kondisi pengujian dilakukan dengan menggunakan kontrol PI dalam mengatur *duty cycle* dari proses *switching*. Proses pengujian terbagi atas beberapa tahap, antara lain:

- a. Perbandingan Kontrol PI Non Adaptif dan Kontrol PI Adaptif pada Simulasi
- b. Perbandingan Kontrol PI Non Adaptif dan Kontrol PI Adaptif pada Pengukuran Alat

- c. Perbandingan antara Hasil Simulasi Pspice dengan Pengukuran Alat dengan Kontrol PI *Non* Adaptif
- d. Perbandingan antara Hasil Simulasi Pspice dengan Pengukuran Alat dengan Kontrol PI Adaptif

3.6.1. Perbandingan Kontrol PI *Non*-Adaptif dan Kontrol PI Adaptif

Pada tahap ini, dilakukan simulasi dan pengujian pada alat dengan menggunakan kontrol PI *non*-adaptif dan menggunakan kontrol PI adaptif. Untuk melihat perbedaan antara penggunaan kontrol PI *non*-adaptif dan kontrol PI adaptif, maka dilakukan perbandingan. Perbandingan dilakukan dengan memperhatikan beberapa parameter antara lain tegangan *output* dan arus *output*.

3.6.2. Perbandingan antara Simulasi Pspice dengan Pengukuran Alat

Pada tahap ini, dilakukan verifikasi data dengan membandingkan hasil dari pengujian pada *software PSpice* dan hasil dari pengukuran alat yang telah dibuat. Verifikasi dilakukan pada dua kondisi yaitu dengan kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif. Perbandingan berfungsi untuk melihat kesesuaian kerja dari alat implementasi terhadap simulasi yang dilakukan. Data yang akan dibandingkan yaitu *duty cycle*, *frekuensi*, tegangan *output*, daya *input*, daya *output*, *efisiensi* dan tegangan *ripple*.

Untuk memperoleh daya *input* pada rangkaian *multilevel boost converter*, maka digunakan rumus:

$$P_{input} = V_{input} \times I_{input} \quad (3.6)$$

Dimana,

P_{input} = Daya masuk (VA)

V_{input} = Tegangan masuk (V)

I_{input} = Arus yang masuk ke Induktor (A)

Untuk memperoleh daya *output* pada rangkaian *multilevel boost converter*, maka digunakan rumus :

$$P_{output} = V_{output} \times I_{output} \quad (3.7)$$

Dimana,

P_{output} = Daya keluar (VA)

V_{output} = Tegangan keluar (V)

I_{output} = Arus yang masuk ke Beban (A)

Untuk memperoleh nilai efisiensi maka digunakan rumus perbandingan antara daya *input* dan daya *output*, yaitu :

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% \quad (3.8)$$

Dimana,

η = Efisiensi

Untuk memperoleh nilai tegangan *ripple* digunakan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta V_o = \frac{D \times V_o}{C \times f \times R_{out}} \quad (3.9)$$

Dimana,

ΔV_o = *Ripple* tegangan

D = *Duty cycle* (%)

V_o = Tegangan keluaran (V)

C = Kapasitor (C)

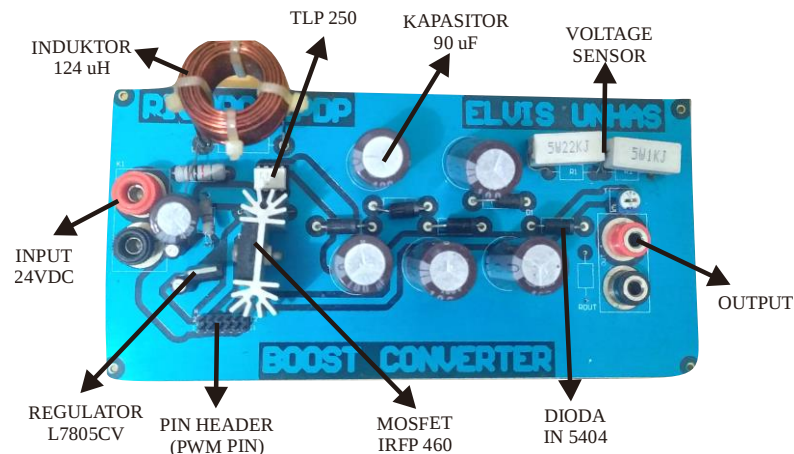
f = Frekuensi (Hz)

R_{out} = Resistansi Beban (Ω)

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN PENGUKURAN

4.1. Bentuk Fisik dari *Multilevel Boost Converter*



Gambar 4.1 Tampilan Fisik *Multilevel Boost Converter*

Pada gambar 4.1, terlihat bentuk fisik dari *multilevel boost converter*. Induktor yang digunakan merupakan induktor jenis inti udara. Untuk komponen kapasitor, menggunakan kapasitor jenis elektrolit. Papan sirkuit untuk rangkaian *multilevel boost converter* di desain di aplikasi *Altium Designer*. Alasan papan sirkuit cukup luas disebabkan oleh lebar jalur dari tiap-tiap komponen yang di desain yaitu sebesar 10 mm. . Adapun komponen yang digunakan, sebagai berikut.

Tabel 4.1 Parameter Penyusun *Multilevel Boost Converter*

Nama Komponen	Nilai	Jumlah
MOSFET IRFP460	-	1 buah
Induktor	124 μH	1 buah
Kapasitor	90 μF	5 buah
Dioda IN 5404	-	5 buah
TLP 250	-	1 buah
Regulator L7805CV	24V menjadi 5V	1 buah
<i>Voltage Sensor</i>	Resistor 22 $k\Omega$ dan 1 $k\Omega$	2 buah
	Trimmer 10 $k\Omega$	1 buah

4.2. Penentuan Jumlah Tingkat (N) dari *Multilevel Boost Converter*

Dalam penentuan jumlah tingkat (N) dari *multilevel boost converter*, dibutuhkan parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Parameter Penyusun *Multilevel Boost Converter*

Parameter	Nilai
Tegangan <i>Input</i>	24 V
Tegangan <i>Output</i>	230 V
<i>Duty Cycle</i>	0,7

Berdasarkan parameter diatas maka dapat ditentukan jumlah tingkat (N) *multilevel boost converter* dengan persamaan[8] :

$$V_o = V_i \frac{N}{(1-D)} \quad (4.1)$$

dimana,

V_o = tegangan *output* (V)

V_i = tegangan *input* (V)

N = jumlah tingkat *multilevel boost converter*

D = *duty cycle*

Untuk N = 1,

$$V_o = V_i \frac{N}{(1-D)} = 24 \times \frac{1}{(1-0,7)} = 80 \text{ V} \quad (4.2)$$

Untuk N = 2,

$$V_o = V_i \frac{N}{(1-D)} = 24 \times \frac{2}{(1-0,7)} = 160 \text{ V} \quad (4.3)$$

Untuk N = 3,

$$V_o = V_i \frac{N}{(1-D)} = 24 \times \frac{3}{(1-0,7)} = 240 \text{ V} \quad (4.4)$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka *multilevel boost converter* dengan tingkat level $N = 3$ yang menjadi pilihan. Hal tersebut didasarkan atas kesesuaian antara tegangan *output* yang diharapkan dengan tegangan *output* hasil perhitungan. Saat $N = 3$, tegangan *output* yang dapat dihasilkan oleh konverter yaitu 240 V dan hasil tersebut mendekati nilai tegangan *output* yang diharapkan pada penelitian ini.

4.3. Penentuan Parameter Kontrol

Dalam proses penentuan parameter kontrol, nilai frekuensi dan *duty cycle* ditentukan melalui persamaan. Pada mikrokontroler *Arduino UNO R3*, digunakan pin *PWM* timer 2 yaitu pin 3 dengan menonaktifkan pin 11. Pada mekanisme kontrol ini, pin 3 pada *Arduino UNO R3*, akan membangkitkan sinyal pulsa dengan frekuensi 10kHz dan *duty cycle* sebesar 21 % dalam mengontrol beban yang diuji. Dalam menentukan nilai digital yang akan digunakan untuk membangkitkan frekuensi 10kHz, dapat dilihat pada persamaan 4.5 .

$$\text{nilai digital timer} = \frac{f_{clk}}{N \times f_{pin}} \quad (4.5)$$

dimana,

nilai digital timer = rentang nilai dari 0-256 untuk timer 2

f_{clk} = frekuensi mikrokontroler (Hz)

N = *prescale* timer 2

f_{pin} = frekuensi keluaran pin PWM

Berdasarkan persamaan diatas, jika $N = 8$ dan $f_{clk} = 16\text{MHz}$, maka nilai digital dari pin 3 dengan frekuensi 10 kHz yaitu bernilai 199. Maka nilai tersebut akan digunakan pada mikrokontroler sehingga sinyal pulsa yang dihasilkan memiliki frekuensi $\pm 10 \text{ kHz}$..Untuk menentukan nilai digital dari *duty cycle*, dapat menggunakan persamaan 4.6.

$$\text{digital duty cycle} = D \times \text{nilai digital timer} \quad (4.6)$$

dimana,

$$\text{digital } duty \text{ cycle} = \text{nilai digital dari } duty \text{ cycle}$$
$$D = duty \text{ cycle}$$

Berdasarkan persamaan 4.6, maka didapatkan nilai *digital* untuk membangkitkan sinyal pulsa dengan *duty cycle* sebesar 21% yaitu bernilai 42. Maka bentuk pemrograman untuk mikrokontroler *Arduino UNO R3*, akan terlihat seperti gambar 4.2.

```
TCCR2A=0;// timer 2 arduino  
  
TCCR2B=0;  
  
TCCR2A = 0b00100011; // mengaktifkan pin 3 PWM  
  
TCCR2B = 0b00001010;  
  
OCR2A = 198; // nilai digital untuk frekuensi 10kHz  
  
TCNT2=0;  
  
bataskeluaran(40,42);// nilai digital untuk duty cycle 21%
```

Gambar 4.2 Coding Kontrol Timer 2 Mikrokontroler *Arduino UNO R3*

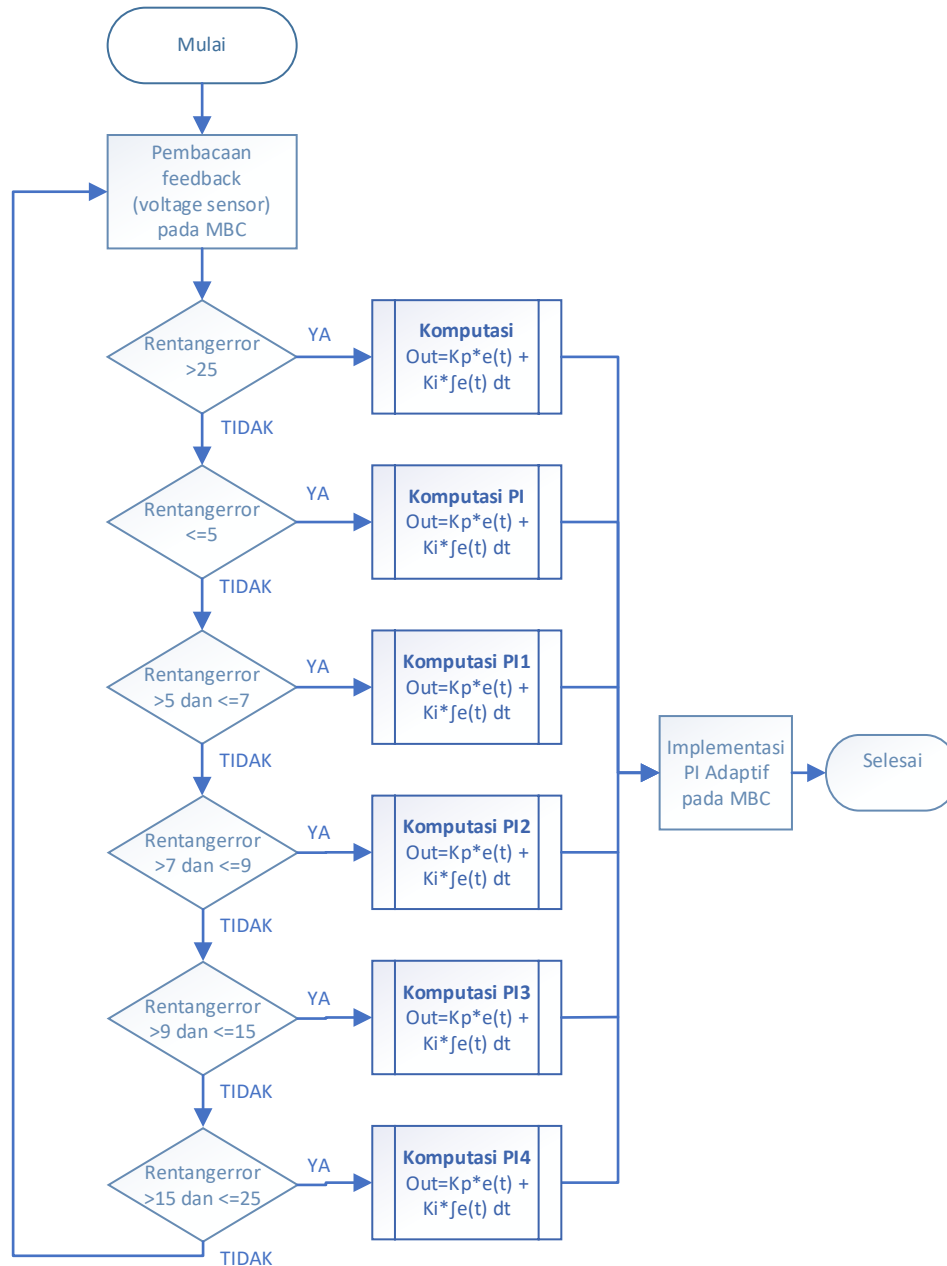
Perbedaan nilai digital frekuensi pada gambar 4.1 dengan nilai digital frekuensi telah dihitung dikarenakan nilai digital saat pemrograman disesuaikan dengan kondisi alat.

Dalam pemrograman M, nilai dari K_p dan K_i ditentukan dengan menggunakan teknik *trial and error*. Adapun nilai K_p dan K_i dari setiap resistansi beban dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai Konstanta PI Adaptif pada Beban

Resistansi Beban ($K\Omega$)	Konstanta	
	P	I
2,597	7	10
2,960		
10,87	0,5	3
11,05		
11,34		
21,7	20	5
22,7		
23,7	20	4
24,65		
44,3	18,5	5
45,3		
46,2		

Adapun algoritma pengontrolan PI adaptif yang dilakukan digambarkan pada diagram alir dibawah ini :



Gambar 4.3 Diagram Alir Algoritma Kontrol PI Adaptif

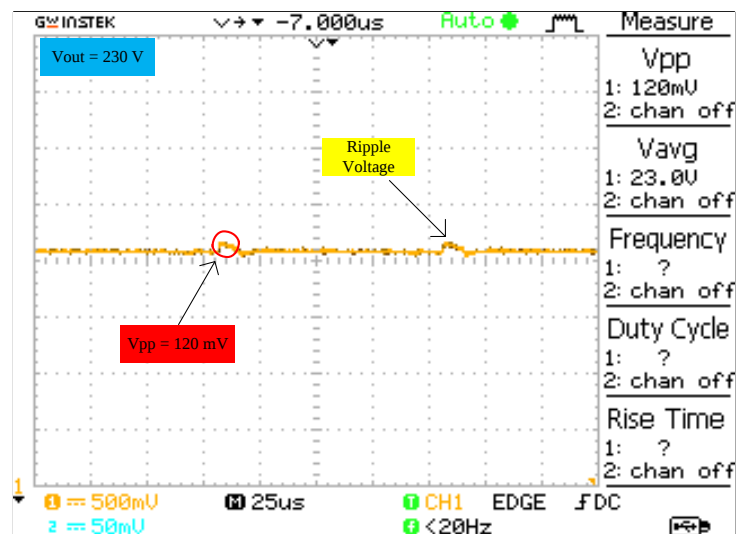
Pada diagram diatas, merupakan algoritma kontrol dari PI adaptif[12]. Adapun alurnya yaitu :

- Pembacaan data *feedback* berguna sebagai data yang akan di olah oleh mikrokontroler dari data *analog* menjadi data *digital*. Data *feedback* yang

terbaca sesuai dengan beban uji yang terpasang pada *multilevel boost converter*.

- Data *feedback* digunakan untuk menentukan rentang *error* yang terbaca. Rentang *error* merupakan nilai *error* yang didapatkan dari selisih antara *setpoint* dengan *feedback*. Setiap beban uji memiliki rentang *error* yang berbeda-beda. Setiap rentang *error* memiliki ketentuan tersendiri. Jika telah memenuhi syarat yang ditentukan, maka akan dilakukan komputasi PI.
- Setiap komputasi PI memiliki nilai K_p dan K_i yang berbeda-beda disesuaikan dengan kondisi rentang *error*.
- Setelah melakukan komputasi PI, data hasil komputasi diimplementasikan sebagai kontrol PI pada *multilevel boost converter*.

4.4. Tegangan Ripple *Multilevel Boost Converter*



Gambar 4.4 Tegangan *Ripple* Hasil Pengukuran Osiloskop

Pada gambar diatas, tegangan *ripple* yang dihasilkan dari alat cukup kecil dalam kondisi tegangan *output* bernilai 230 V. Pada osiloskop, nilai *volt/div* yang digunakan yaitu 500mV dengan *time/div* sebesar 25us. Adapun tegangan *peak to peak* (V_{pp}) yang dimiliki oleh *ripple* yaitu berikisar 120 mV. Dari grafik diatas terlihat bahwa *ripple* yang dihasilkan dari tegangan *output multilevel boost converter* sangat kecil.

4.5. Perbandingan antara Hasil Simulasi *Pspice* dengan Hasil Pengukuran Alat dengan Kontrol PI *Non* Adaptif

Pada proses simulasi dan pengukuran alat yang dilakukan, penggunaan kontrol PI *non* adaptif menggunakan konstanta P bernilai 20 dan konstanta I bernilai 5. Proses simulasi dilakukan pada *software PSpice* dengan kondisi ideal. Sedangkan untuk proses pengukuran alat, dilakukan dengan menggunakan *power supply* sebagai sumber tegangannya dengan melakukan pengukuran menggunakan multimeter digital dan osiloskop digital untuk mengukur parameter yang dibutuhkan sebagai data penelitian. Terlihat pada tabel 4.4 data perbandingan antara hasil simulasi dan pengukuran alat dengan menggunakan kontrol PI *non* adaptif.

Tabel 4.4 Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan *Ripple* Simulasi dan Alat dengan Kontrol PI *Non* Adaptif

Resistansi Beban ($k\Omega$)		Daya <i>Input</i> (VA)	Daya <i>Output</i> (VA)	Efisiensi (%)	Tegangan <i>Ripple</i> (%)
21,7	Simulasi	6,456	2,303	35,67	0,254
	Alat	15,024	5,326	35,44	0,253
22,7	Simulasi	6,336	2,202	34,75	0,242
	Alat	14,52	5,319	36,63	0,244
23,7	Simulasi	6,24	2,111	33,83	0,232
	Alat	14,376	5,241	36,45	0,231
24,65	Simulasi	6,144	2,031	33,05	0,223
	Alat	14,04	5,293	37,69	0,226
44,3	Simulasi	5,04	1,132	22,46	0,124
	Alat	11,136	4,834	43,40	0,128
45,3	Simulasi	4,8	1,108	23,08	0,121
	Alat	10,968	4,710	42,94	0,122
46,2	Simulasi	4,8	1,086	22,62	0,119

	Alat	10,68	4,710	44,10	0,121
--	------	-------	-------	-------	-------

Berdasarkan tabel 4.4, daya *input* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Pada hasil simulasi, daya input tertinggi bernilai 6,456 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya input terendah terdapat pada resistansi beban bernilai 45,3 k Ω dan 46,2 k Ω dengan nilai sebesar 4,8 VA. Pada hasil pengukuran, daya input tertinggi bernilai 15,024 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya input terendah bernilai 10,68 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω . Perbedaan utama dari hasil simulasi dan hasil pengukuran alat yaitu, nilai daya *input* yang digunakan pada pengukuran alat cenderung lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi.

Kondisi daya *output* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Kondisi ini berlaku pada hasil simulasi dan hasil pengukuran. Pada hasil simulasi, daya output tertinggi bernilai 2,303 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya output terendah bernilai 1,086 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω . Pada hasil pengukuran, daya output tertinggi bernilai 5,326 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya output terendah berada di resistansi beban 45,3 k Ω dan 46,2 k Ω dengan nilai sebesar 4,710 VA.

Pada hasil simulasi, nilai efisiensi cenderung menurun seiring nilai resistansi beban yang meningkat sedangkan pada hasil pengukuran, nilai efisiensi cenderung meningkat dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Efisiensi tertinggi pada hasil simulasi bernilai 35,67 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 Ω . Pada hasil pengukuran, efisiensi tertinggi berada pada resistansi beban 46,2 k Ω bernilai 44,10 %.

Kondisi tegangan *ripple* cenderung menurun seiring meningkatnya resistansi beban. Hal ini terjadi pada hasil simulasi maupun hasil pengukuran yang menggunakan kontrol PI non adaptif. Pada hasil simulasi, nilai tegangan ripple terendah yaitu 0,119 % dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω sedangkan nilai tegangan ripple tertinggi yaitu 0,254 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω .

Pada hasil pengukuran, nilai tegangan ripple terendah yaitu 0,121 % dengan resistansi beban 46,2 k Ω sedangkan nilai tegangan ripple tertinggi yaitu 0,253 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω . Dari tabel diatas, nilai tegangan *ripple* pada hasil simulasi dan hasil pengukuran alat berada pada nilai di bawah 5 %.

Berdasarkan kondisi daya *input* dan daya *output*, terdapat perbedaan nilai hasil simulasi dan hasil pengukuran. Hal ini disebabkan oleh kondisi ideal. Pada proses simulasi, kondisi komponen dibuat seideal mungkin sehingga menghasilkan nilai yang optimal(minimum). Sedangkan pada proses pengukuran, banyak hal yang mempengaruhi kondisi komponen sehingga menyebabkan kondisinya kurang ideal dibandingkan dengan simulasi yang dilakukan, sehingga hasil pengukuran yang didapatkan memiliki perbedaan nilai dengan hasil simulasi.

4.6. Perbandingan antara Hasil Simulasi Pspice dengan Hasil Pengukuran Alat dengan Kontrol PI Adaptif

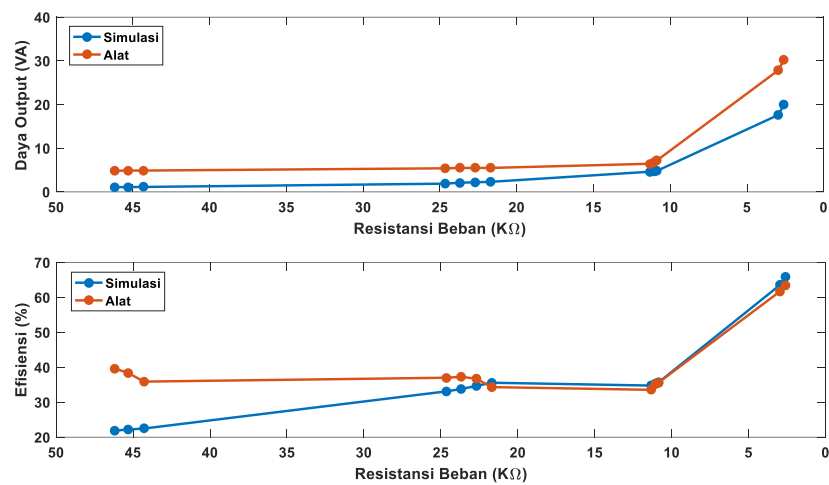
Pada simulasi yang dilakukan pada pemrograman Pspice, beberapa jenis resistansi beban. Simulasi yang dilakukan menggunakan kontrol PI adaptif dalam mengatur *duty cycle* dan begitu pula pada pengukuran alat.. Khusus pada kontrol PI Adaptif, pengujian dilakukan dengan menggunakan dua belas jenis resistansi beban. Adapun data yang didapatkan sebagai berikut.

Tabel 4.5 Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan *Ripple* Simulasi dan Alat dengan Kontrol PI Adaptif

Resistansi Beban (k Ω)		Daya <i>Input</i> (VA)	Daya <i>Output</i> (VA)	Efisiensi (%)	Tegangan <i>Ripple</i> (%)
2,597	Simulasi	30,358	20,024	65,96	3,4
	Alat	47,25	30,176	63,50	3,4
2,960	Simulasi	27,718	17,62	63,57	3,37
	Alat	45,12	27,853	61,73	3,375
10,87	Simulasi	13,522	4,8178	35,63	2,98
	Alat	20,232	7,199	35,58	2,982

11,05	Simulasi	13,43	4,7395	35,29	2,98
	Alat	19,248	6,785	35,25	2,81
11,34	Simulasi	13,287	4,6186	34,76	2,98
	Alat	19,2	6,44	33,54	2,981
21,7	Simulasi	6,46	2,298	35,57	0,254
	Alat	15,096	5,484	34,32	0,257
22,7	Simulasi	6,35	2,20	34,64	0,243
	Alat	14,904	5,475	36,73	0,246
23,7	Simulasi	6,22	2,10	33,76	0,233
	Alat	14,712	5,482	37,26	0,237
24,65	Simulasi	6,12	1,886	33,10	0,223
	Alat	14,592	5,4	37	0,227
44,3	Simulasi	5,04	1,132	22,46	0,124
	Alat	13,608	4,884	35,89	0,125
45,3	Simulasi	4,992	1,108	22,19	0,121
	Alat	12,72	4,879	38,35	0,123
46,2	Simulasi	4,968	1,086	21,85	0,119
	Alat	12,192	4,834	39,64	0,120

Pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa daya *input* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Hal ini terjadi pada hasil simulasi dan hasil pengukuran yang menggunakan kontrol PI adaptif.



Gambar 4.5 Grafik Daya Output dan Efisiensi Kontrol PI Adaptif pada *Multilevel Boost Converter*

Terlihat pada gambar 4.5 bahwa kondisi daya *output* cenderung meningkat seiring dengan menurunnya nilai resistansi beban. Kondisi ini berlaku pada hasil simulasi dan hasil pengukuran. Yang membedakan antara daya *output* pada hasil simulasi dan hasil pengukuran yaitu *range* yang cukup besar antara hasil simulasi dan pengukuran. Hasil pengukuran memiliki nilai daya *output* yang lebih besar dibandingkan hasil simulasi pada setiap beban uji.

Pada hasil simulasi, kondisi efisiensi cenderung meningkat seiring menurunnya nilai resistansi beban. Sedangkan pada hasil pengukuran, kondisi efisiensi berubah-ubah pada setiap beban. Hal tersebut dapat dilihat pada tabel 4.5. Pada hasil simulasi efisiensi tertinggi bernilai 65,96 % dengan resistansi beban sebesar 2,597 kΩ, sedangkan pada hasil pengukuran memiliki efisiensi tertinggi sebesar 63,50 % dengan resistansi beban sebesar 2,597 kΩ.

Kondisi tegangan *ripple* cenderung menurun seiring meningkatnya resistansi beban. Hal ini terjadi pada hasil simulasi maupun hasil pengukuran yang menggunakan kontrol PI adaptif. Pada hasil simulasi, nilai tegangan *ripple* terendah yaitu 0,119 % dengan resistansi beban sebesar 46,2 kΩ sedangkan pada hasil pengukuran, nilai tegangan *ripple* terendah yaitu 0,120 %. Dengan kondisi tersebut, nilai tegangan *ripple* pada hasil simulasi dan pengukuran berada di bawah 5 %.

Kondisi ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran telah sesuai dengan kondisi hasil simulasi, namun yang membedakan yaitu perbedaan nilai yang cukup besar antara hasil simulasi dan tegangan. Penyebab utamanya yaitu tidak tercapainya kondisi ideal pada alat sehingga nilai yang didapatkan berbeda dengan nilai hasil simulasi. Pada simulasi, kondisi komponen penyusun *multilevel boost converter* diatur dengan ideal sehingga menyebabkan perbedaan saat diimplementasikan pada alat secara langsung.

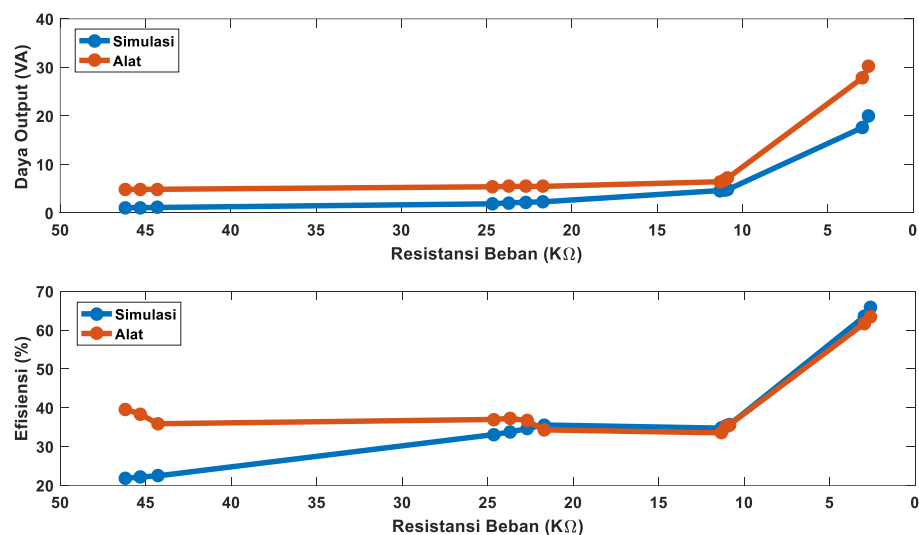
4.7. Perbandingan Kontrol PI Non Adaptif dan Kontrol PI Adaptif pada Pengujian Alat

Dalam melakukan pengujian alat, mekanisme kontrol PI *non* adaptif berbeda dengan kontrol PI adaptif. Perbedaannya terdapat pada program mikrokontroller yang telah dibuat. Pada kontrol PI *non* adaptif, nilai konstanta P dan konstanta I diinisiasikan untuk seluruh jenis beban. Sedangkan pada kontrol PI adaptif, untuk setiap beban memiliki nilai konstanta P dan konstanta I yang berbeda sehingga pada program diinisiasikan seluruh nilai konstanta dari jenis beban yang di uji. Sehingga dapat dikatakan adaptif dikarenakan program yang berjalan akan menyesuaikan penggunaan nilai konstanta P dan nilai konstanta I sesuai dengan beban yang sedang di ujikan.

Tabel 4.6 Data Perbandingan Kontrol PI *Non* Adaptif dan Adaptif pada Pengujian Alat

Resistansi Beban (k Ω)		Duty Cycle (%)	Frekuensi (kHz)	Tegangan Input (V)	Arus Input (A)	Tegangan Output (V)	Arus Output (mA)
21,7	Non Adaptif	21,65	10,03	24	0,626	229,7	23,19
	Adaptif	21,65	10,03	24	0,629	232,6	23,58
22,7	Non Adaptif	21,65	10,03	24	0,605	231,2	23,01
	Adaptif	21,65	10,03	24	0,621	233	23,50

23,7	Non Adaptif	21,65	10,03	24	0,599	228,6	22,93
	Adaptif	21,65	10,03	24	0,613	235	23,33
24,65	Non Adaptif	21,65	10,03	24	0,585	232,6	22,76
	Adaptif	21,65	10,03	24	0,608	234	23,08
44,3	Non Adaptif	21,65	10,03	24	0,464	237,8	20,33
	Adaptif	21,65	10,03	24	0,567	231,6	21,09
45,3	Non Adaptif	21,65	10,03	24	0,457	230,7	20,42
	Adaptif	21,65	10,03	24	0,530	232,6	20,98
46,2	Non Adaptif	21,65	10,03	24	0,445	234,6	20,08
	Adaptif	21,65	10,03	24	0,508	232,3	20,81



Gambar 4.6 Grafik Tegangan Output dan Arus Output Hasil Pengukuran *Multilevel Boost Converter*

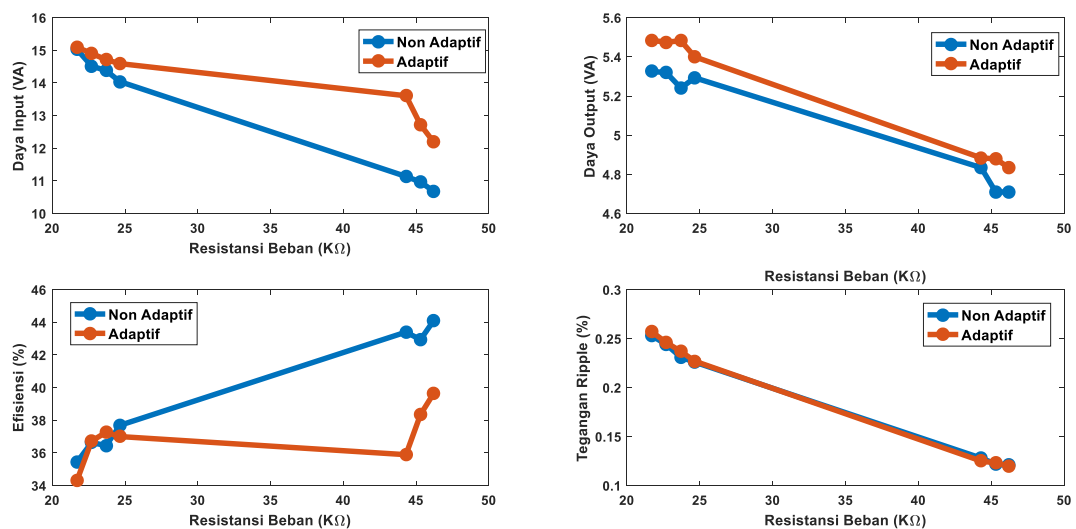
Pada gambar 4.6 terlihat kondisi tegangan *output* dari hasil pengukuran. Pada kondisi *non* adaptif tegangan terendah berada di nilai 228,6 V dengan resistansi beban sebesar 23,7 k Ω sedangkan tegangan *output* tertinggi berada di nilai 237,8 V dengan resistansi beban sebesar 44,3 k Ω . Pada kondisi adaptif, tegangan tertinggi berada di nilai 235 V dengan resistansi beban sebesar 23,7 k Ω . Sedangkan tegangan terendah berada di nilai 231,6 V dengan resistansi beban sebesar 44,3 k Ω . Kondisi kontrol PI adaptif cenderung stabil dibandingkan dengan kontrol PI *non* adaptif yaitu dengan melihat kondisi tegangan *output* pada gambar 4.6.

Gambar 4.6 pula menunjukkan hasil pengukuran arus *output*. Arus output cenderung menurun seiring meningkatnya nilai resistansi beban. Hal ini berlaku untuk kondisi kontrol PI adaptif dan *non* adaptif. Untuk kondisi adaptif, arus tertinggi berada di nilai 23,58 mA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω . Sedangkan arus terendah berada di nilai 20,81 mA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω .

Tabel 4.7 Data Perbandingan Daya, Efisiensi dan Tegangan *Ripple* Kontrol PI *Non* Adaptif dan Adaptif pada Pengujian Alat

Resistansi Beban (k Ω)		Daya <i>Input</i> (VA)	Daya <i>Output</i> (VA)	Efisiensi (%)	Tegangan <i>Ripple</i> (%)
21,7	<i>Non</i> Adaptif	15,024	5,326	35,44	0,253
	Adaptif	15,096	5,484	34,32	0,257
22,7	<i>Non</i> Adaptif	14,52	5,319	36,63	0,244
	Adaptif	14,904	5,475	36,73	0,246
23,7	<i>Non</i> Adaptif	14,376	5,241	36,45	0,231
	Adaptif	14,712	5,482	37,26	0,237
24,65	<i>Non</i> Adaptif	14,04	5,293	37,69	0,226

	Adaptif	14,592	5,4	37	0,227
44,3	<i>Non</i> Adaptif	11,136	4,834	43,40	0,128
	Adaptif	13,608	4,884	35,89	0,125
45,3	<i>Non</i> Adaptif	10,968	4,710	42,94	0,122
	Adaptif	12,72	4,879	38,35	0,123
46,2	<i>Non</i> Adaptif	10,68	4,710	44,10	0,121
	Adaptif	12,192	4,834	39,64	0,120



Gambar 4.7 Grafik Hasil Pengukuran *Multilevel Boost Converter*

Terlihat pada gambar 4.7 bahwa daya input cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Hal ini terjadi pada kondisi kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif. Pada saat kondisi kontrol *non* adaptif, daya *input* tertinggi bernilai 15,024 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 kΩ sedangkan daya *input* terendah bernilai 10,68 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 kΩ. Pada kondisi kontrol PI adaptif, daya *input* tertinggi bernilai 15,096 VA dengan

resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya *input* terendah bernilai 12,192 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω .

Kondisi daya *output* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya nilai resistansi beban. Kondisi ini berlaku pada kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif. Pada kontrol PI *non* adaptif, daya *output* tertinggi bernilai 5,326 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya *output* terendah berada di resistansi beban 45,3 k Ω dan 46,2 k Ω dengan nilai sebesar 4,710 VA. Pada kontrol PI adaptif, daya *output* tertinggi bernilai 5,484 VA dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω sedangkan daya *output* terendah bernilai 4,834 VA dengan resistansi beban sebesar 46,2 k Ω .

Kondisi efisiensi pada kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif cukup berbeda. Pada kondisi kontrol PI *non* adaptif efisiensi cenderung meningkat seiring meningkatnya resistansi beban sedangkan pada kontrol PI adaptif, saat beban bernilai 44,3 k Ω efisiensi mengalami penurunan. Namun saat beban meningkat dari 44,3 k Ω , efisiensi kembali meningkat. Pada kontrol PI *non* adaptif, efisiensi tertinggi berada pada resistansi beban 46,2 k Ω bernilai 44,10 % sedangkan efisiensi terendah bernilai 35,44 % pada resistansi beban 21,7 k Ω . Pada kontrol PI adaptif, untuk resistansi beban 21,7 k Ω memiliki efisiensi sebesar 34,32 %. Saat resistansi beban 22,7 k Ω memiliki efisiensi sebesar 36,73 %. Saat resistansi beban 23,7 k Ω memiliki efisiensi sebesar 37,26 %. Namun saat resistansi beban 24,65 k Ω nilai efisiensi menurun dengan nilai 37 %. Begitu pula saat resistansi beban 44,3 k Ω efisiensinya bernilai 35,89 %. Dan kembali meningkat pada resistansi beban 45,3 k Ω dengan nilai efisiensi sebesar 38,35 % dan saat resistansi beban 46,2 k Ω memiliki efisiensi sebesar 39,64 % yang merupakan efisiensi tertinggi dari hasil kontrol PI adaptif.

Pada gambar 4.7, kondisi tegangan *ripple* cenderung menurun seiring meningkatnya resistansi beban. Hal ini terjadi pada kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif. Pada kontrol PI *non* adaptif, nilai tegangan *ripple* terendah yaitu 0,121 % dengan resistansi beban 46,2 k Ω sedangkan nilai tegangan *ripple* tertinggi yaitu 0,253 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω .

Pada kontrol PI adaptif, nilai tegangan *ripple* terendah yaitu 0,20 % dengan resistansi beban 46,2 k Ω sedangkan nilai tegangan *ripple* tertinggi yaitu 0,257 % dengan resistansi beban sebesar 21,7 k Ω .

Dari hasil yang didapatkan terlihat bahwa kondisi tegangan *output* saat menggunakan kontrol PI adaptif mengalami kestabilan yang cukup baik dibandingkan menggunakan kontrol PI *non* adaptif. Namun untuk kondisi efisiensi, kontrol PI adaptif memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan kontrol PI *non* adaptif. Untuk kondisi tegangan *ripple* saat menggunakan kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif hasil pengukuran berada di bawah 5%.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari keseluruhan penelitian yang dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan serta saran yang berguna untuk pengembangan dan penyempurnaan riset kedepannya.

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan, antara lain yaitu :

1. *Multilevel boost converter* merupakan salah satu *boost converter* yang dapat mengubah tegangan *input* 24 VDC menjadi 230 VDC sehingga konverter ini dapat berfungsi pengganti transformator pada suatu *inverter*.
2. Penggunaan kontrol PI *non* adaptif dan kontrol PI adaptif berpengaruh pada kondisi tegangan *output* dari *multilevel boost converter*. Kontrol PI adaptif menunjukkan kestabilan yang lebih baik dibandingkan kontrol PI *non* adaptif saat kondisi beban berubah.
3. Dalam pengujian *multilevel boost converter*, efisiensi alat yang dicapai pada kontrol PI adaptif bernilai 63,50 %.
4. Dari hasil pengujian yang dilakukan, tegangan *ripple* cenderung menurun seiring meningkatnya resistansi beban pada penggunaan kontrol PI *non* adaptif maupun kontrol PI adaptif. Tegangan *ripple* terendah yang dicapai pada kondisi *non* adaptif yaitu bernilai 0,121 % dan pada kondisi adaptif yaitu bernilai 0,120 % .
5. Tegangan *ripple* yang didapatkan berada di bawah 5%, yang menandakan bahwa *multilevel boost converter* ini memiliki tegangan *ripple* yang rendah.
6. Kontrol PWM pada *multilevel boost converter* menggunakan kontrol PI adaptif dengan teknik *trial* dan *error*. Kontrol PI adaptif dilakukan dengan memanfaatkan *feedback* dari *multilevel boost converter* sebagai data untuk melakukan komputasi PI pada program mikrokontroler.

5.2. Saran

Adapun saran yang diharapkan dapat menunjang penyempurnaan penelitian terkait adalah sebagai berikut:

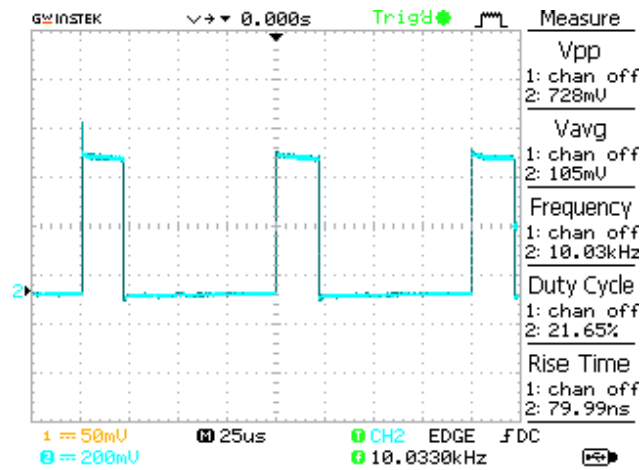
1. Menganalisis mengenai nilai komponen disesuaikan dengan kondisi yang ada di pasaran.
2. Rangkaian *multilevel boost converter* dapat diubah dengan tingkat level boost yang lebih tinggi dari penelitian yang dilakukan.
3. Kontrol PI adaptif dapat dikembangkan dengan menggunakan kontrol kontrol PID maupun kontrol PID adaptif.
4. Melakukan pengujian alat selain beban resistif.
5. Menggunakan jenis komponen yang mendekati kondisi ideal.
6. Mencari mikrokontroler yang lebih sederhana dalam melakukan pengontrolan alat.

DAFTAR PUSTAKA

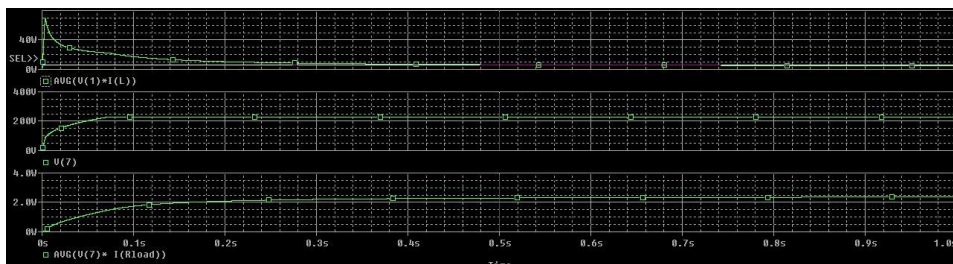
- [1] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. West Sussex: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] A. J. Forsyth and S. V. Mollov, "Modelling and control of DC-DC converters," *Power Engineering Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 229–236, 1998.
- [3] M. R. A. Siddique, M. J. Ferdous, and I. Islam, "Charge pump capacitor based high voltage gain DC-DC step-up converter," *2014 International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2014*, pp. 3–6, 2014.
- [4] W. Hart Daniai, *Power Electronics*. New York: The McGraw-Hill Companies, 2010.
- [5] F. Lin Luo, H. Ye, and M. Rashid, *Digital Power Electronics and Application*. USA: Elsevier Academic Press, 2005.
- [6] A. Alateeq, Y. Almalaq, and M. Matin, "A switched-inductor model for a non-isolated multilevel boost converter," *2017 North American Power Symposium, NAPS 2017*, 2017, doi: 10.1109/NAPS.2017.8107406.
- [7] J. S. Reddy, *Performance Analysis of A DC-DC Multilevel Boost Converter*. Patiala: Thapar University, 2017.
- [8] J. S. Reddy and S. Sonar, "Closed Loop Control of Multilevel Dc-Dc Boost Converter," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 4512–4518, 2019.
- [9] J. C. Rosas-Caro, J. M. Ramirez, and A. Valderrabano, "Voltage balancing in DC/DC Multilevel Boost Converters," *40th North American Power Symposium, NAPS2008*, pp. 1–7, 2008.
- [10] J. C. Rosas-Caro, J. M. Ramirez, F. Z. Peng, and A. Valderrabano, "A DC-DC multilevel boost converter," *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 129–137, 2010.
- [11] H. Santoso, *Panduan Praktis Arduino untuk Pemula*. Elang Sakti, 2015.
- [12] R. Shenbagalakshmi and S. D. Shelar, "Design PID Controller for Positive Output Voltage Converter," *2018 International Conference On Advances in Communication and Computing Technology, ICACCT 2018*, pp. 455–458, 2018, doi: 10.1109/ICACCT.2018.8529655.
- [13] M. Karuppiah, K. Karthikumar, and A. Arunbalj, "A transformerless buck-boost converter with PID controller (closed loop controller)," *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing, INCOS 2017*, vol. 2018-Febru, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1109/ITCOSP.2017.8303145.

- [14] J. A. Karl, *Advanced PID Control*. New York: Instrument Society of America, 2004.
- [15] K. Y. Ahmed, N. Z. Bin Yahaya, V. S. Asirvadam, N. Saad, R. Kannan, and O. Ibrahim, "Development of power electronic distribution transformer based on adaptive PI controller," *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 44970–44980, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2861420.
- [16] A. Alganidi, "Converter with an Energy Regenerative Snubber," *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 1–4, 2018.
- [17] R. S. Vadivoo, S. Vijayalakshmi, and K. R. Vairamarri, "Design of ZVS resonant SEPIC converter for high frequency applications," *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2014*, vol. 3, no. 3, pp. 873–880, 2014.
- [18] R. Madhumitha and R. Vinothkumar, "Voltage regulation in microgrid using adaptive controller," *International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, pp. 1–5, 2014.
- [19] O. Djamel, G. Dhaouadi, S. Youcef, and M. Mahmoud, "Hardware Implementation of Digital PID Controller for DC-DC Boost Converter," *Proceedings - 2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications, ICPEA 2019*, vol. 1, no. September, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/ICPEA1.2019.8911129.
- [20] C. A. Villarreal-Hernandez, J. C. Mayo-Maldonado, J. E. Valdez-Resendiz, and J. C. Rosas-Caro, "Modeling and control of an interleaved DC-DC multilevel boost converter," in *2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Jul. 2017, pp. 1–6.
- [21] V. A. Kumar and M. Arounassalame, "PV-FC hybrid system with multilevel boost converter fed multilevel inverter with enhanced performance," *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy: Exploring Energy Solutions for an Intelligent Power Grid, TAP Energy 2017*, pp. 1–6, 2018.

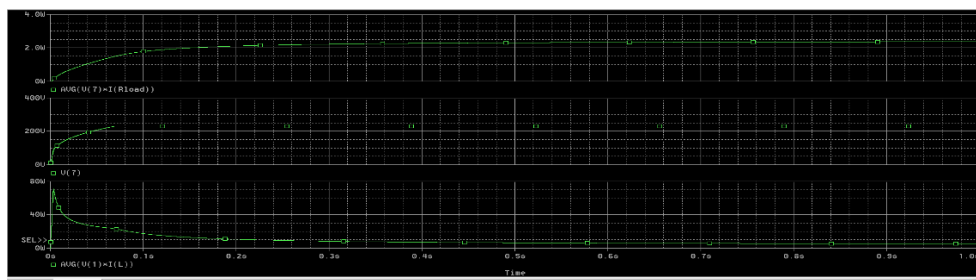
LAMPIRAN



Frekuensi dan *duty cycle* yang digunakan pada pengujian alat

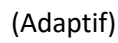


(Adaptif)



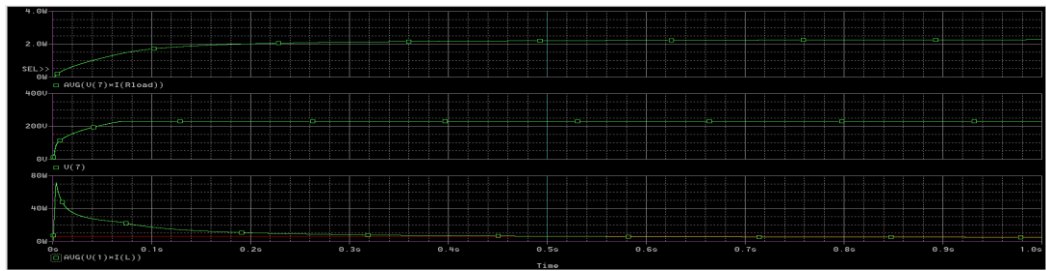
(Non Adaptif)

Tegangan *output* simulasi *PSpice multilevel boost converter* pada beban 21,7 k Ω



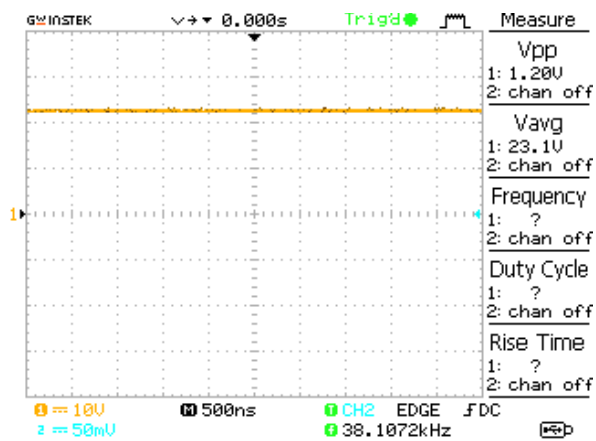
The figure consists of three vertically stacked plots sharing a common x-axis representing time from 0s to 1.0s. The top plot shows the evolution of SEL (blue line) starting at 4000 and decreasing to 0. The middle plot shows the evolution of $AUG(u(t)+I(L))$ (red line) starting at 0 and increasing to 4000. The bottom plot shows the evolution of $U(z)$ (green line) starting at 0 and increasing to 2000. All plots have a y-axis scale from 0 to 4000.

(Adaptif)

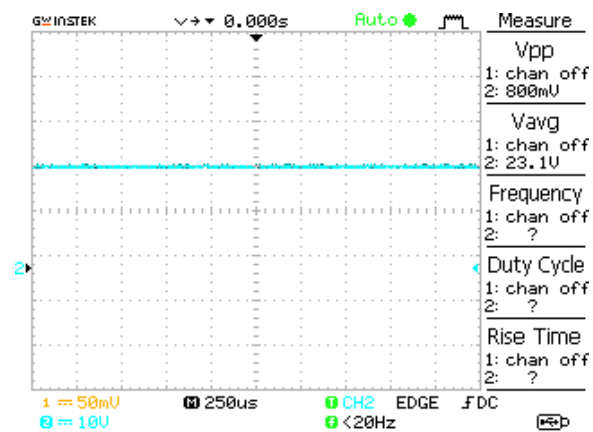


(Non Adaptif)

Tegangan output simulasi PSpice multilevel boost converter pada beban $22,7\text{ k}\Omega$

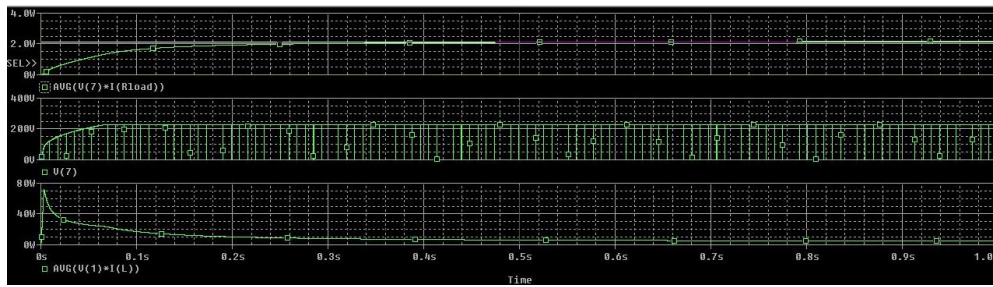


(Adaptif)

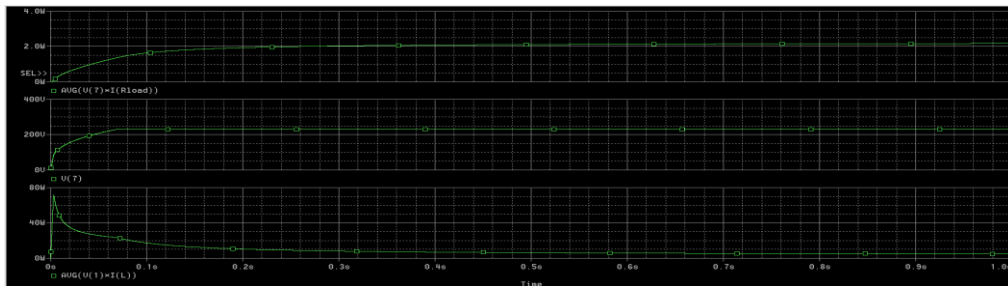


(Non Adaptif)

Tegangan output pengujian alat multilevel boost converter pada beban $22,7\text{ k}\Omega$

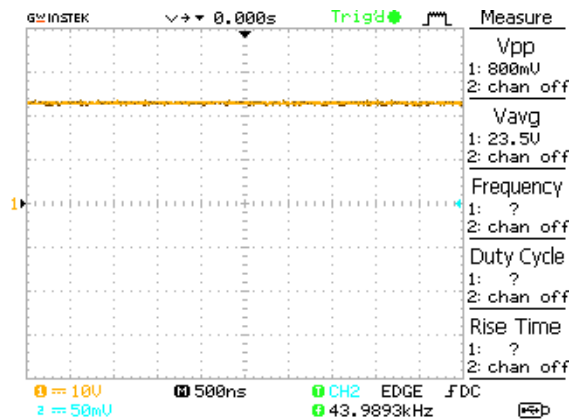


(Adaptif)

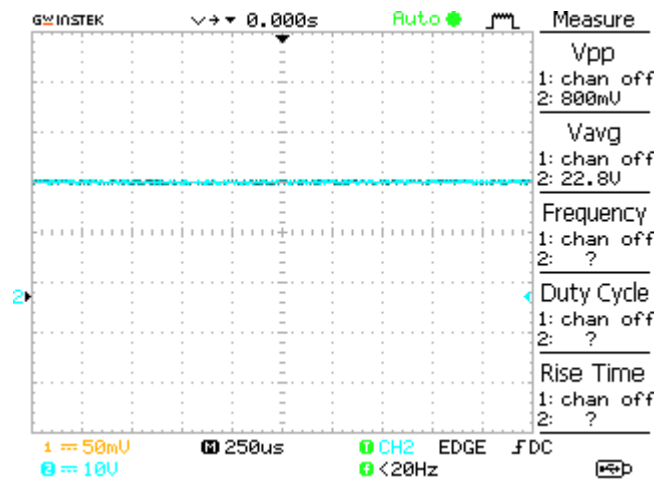


(Non Adaptif)

Tegangan *output* simulasi *PSpice multilevel boost converter* pada beban $23,7\text{ k}\Omega$

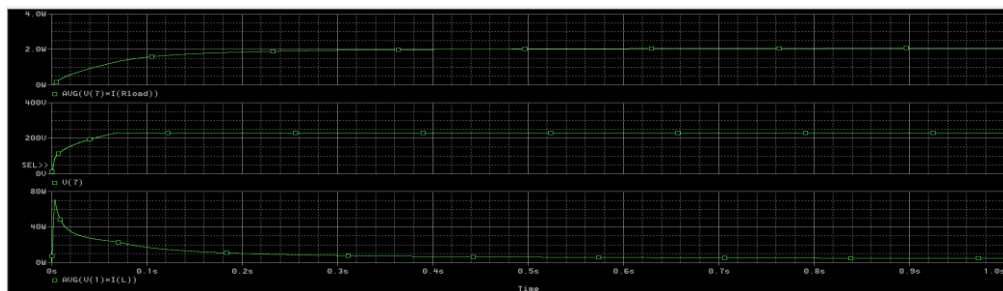


(Adaptif)

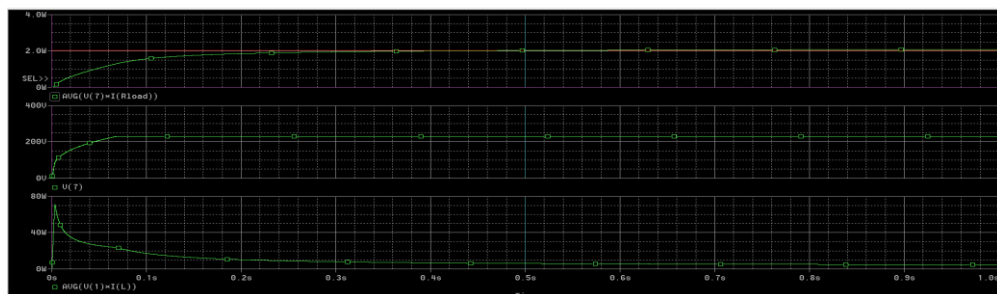


(Non Adaptif)

Tegangan output pengujian alat *multilevel boost converter* pada beban $23,7\text{ k}\Omega$

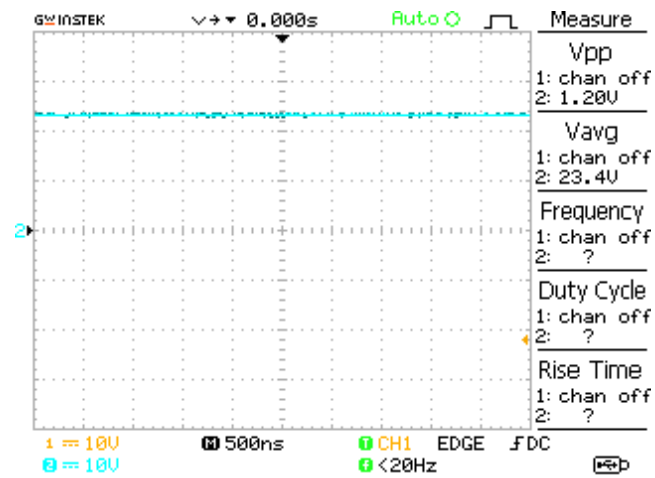


(Adaptif)

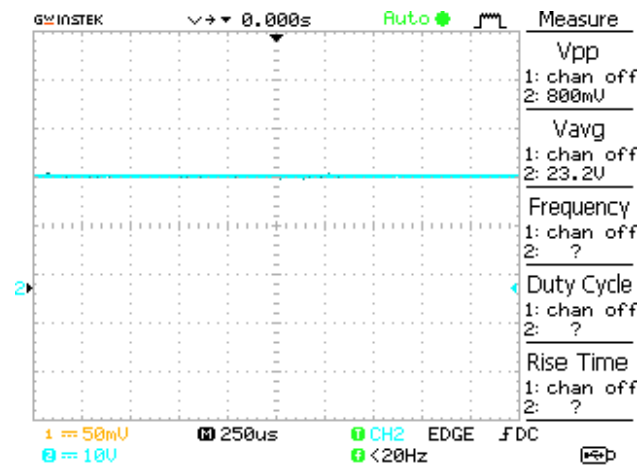


(Non Adaptif)

Tegangan output simulasi *PSpice multilevel boost converter* pada beban $24,65\text{ k}\Omega$

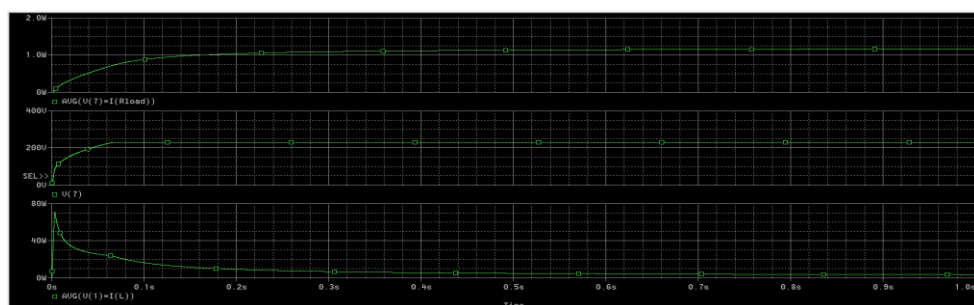


(Adaptif)

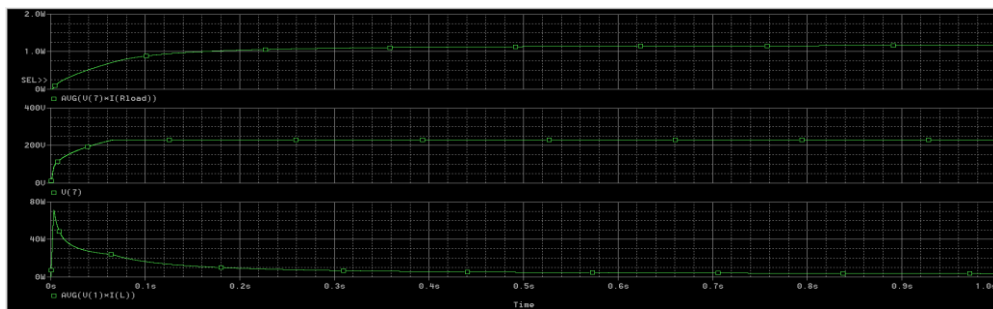


(Non Adaptif)

Tegangan output pengujian alat *multilevel boost converter* pada beban 24,65 k Ω

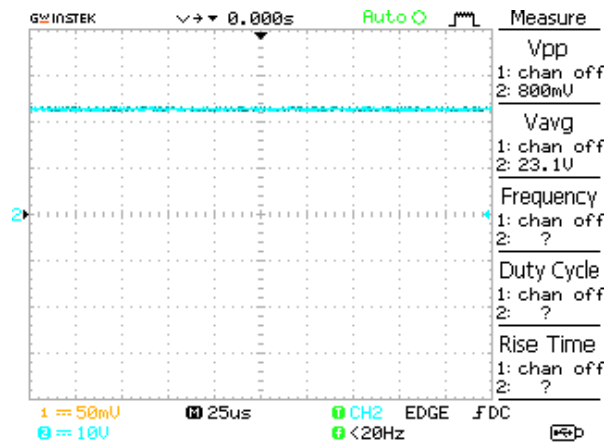


(Adaptif)

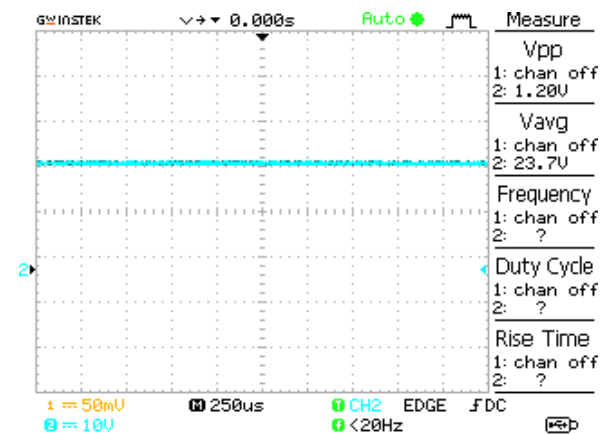


(Non Adaptif)

Tegangan *output* simulasi *PSpice multilevel boost converter* pada beban $44,3\text{ k}\Omega$

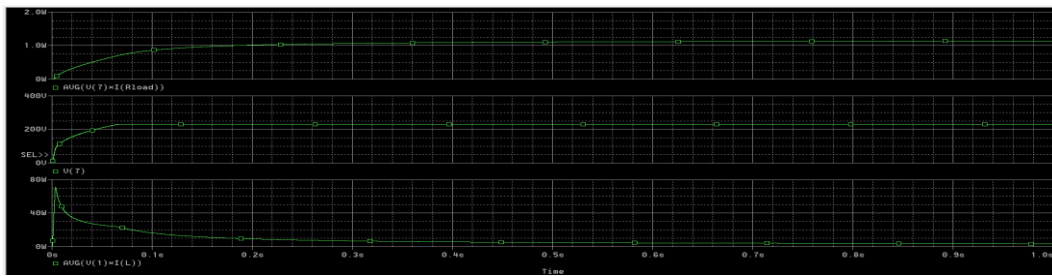


(Adaptif)

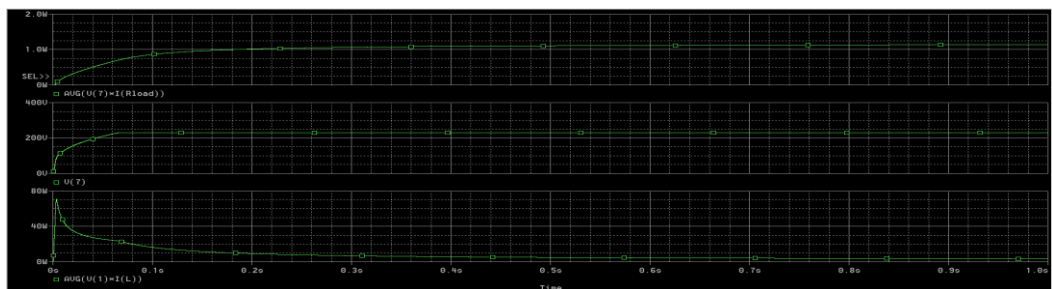


(Non Adaptif)

Tegangan *output* pengujian alat *multilevel boost converter* pada beban $44,3\text{ k}\Omega$

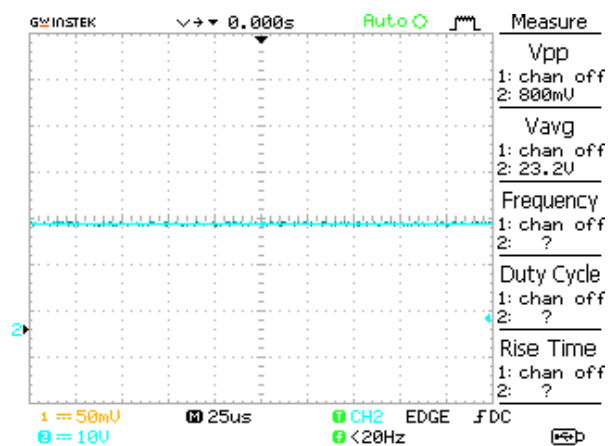


(Adaptif)

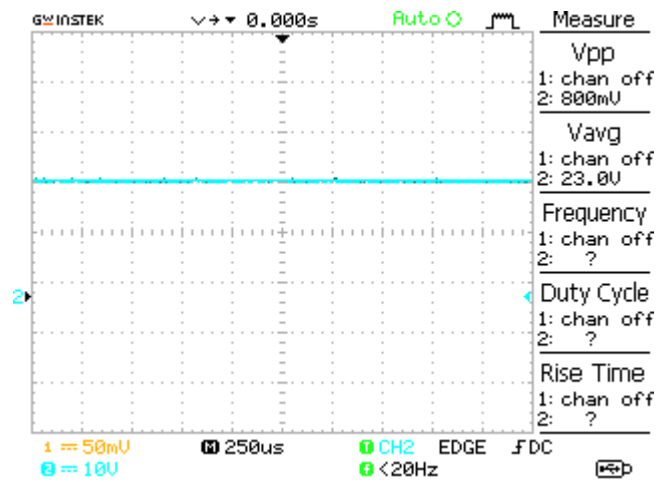


(Non Adaptif)

Tegangan output simulasi PSpice multilevel boost converter pada beban 45,3 k Ω

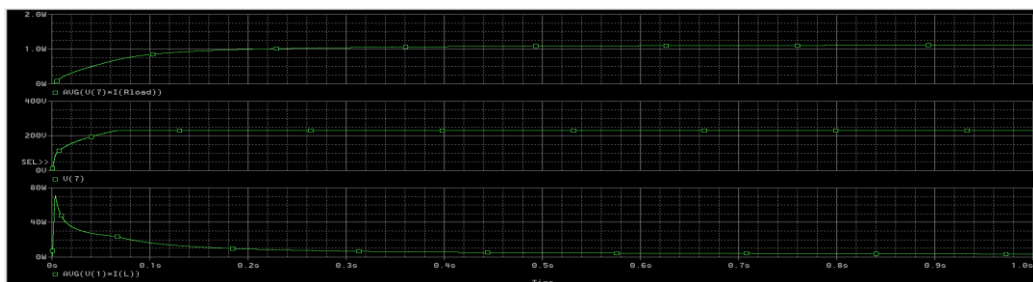


(Adaptif)

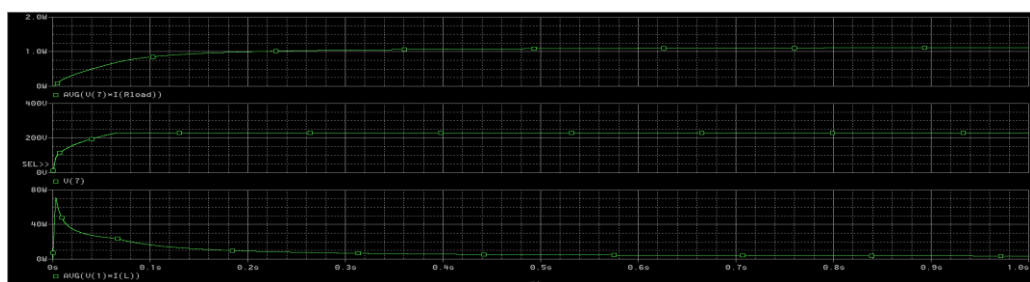


(Non Adaptif)

Tegangan output pengujian alat *multilevel boost converter* pada beban $45,3\text{ k}\Omega$

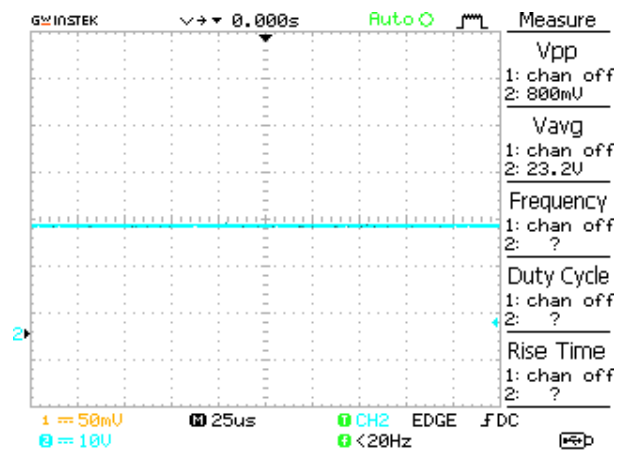


(Adaptif)

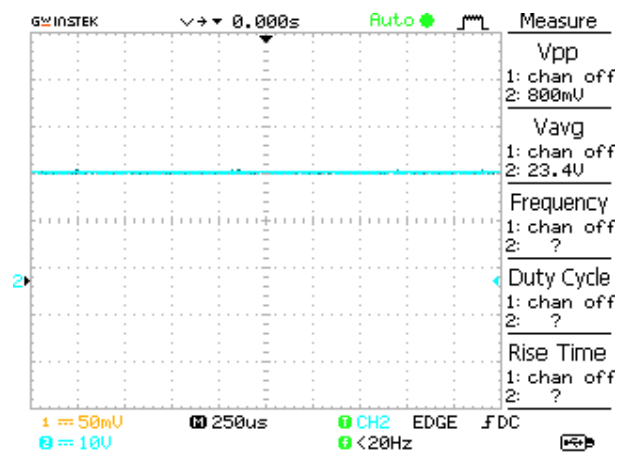


(Non Adaptif)

Tegangan output simulasi *PSpice multilevel boost converter* pada beban $46,2\text{ k}\Omega$

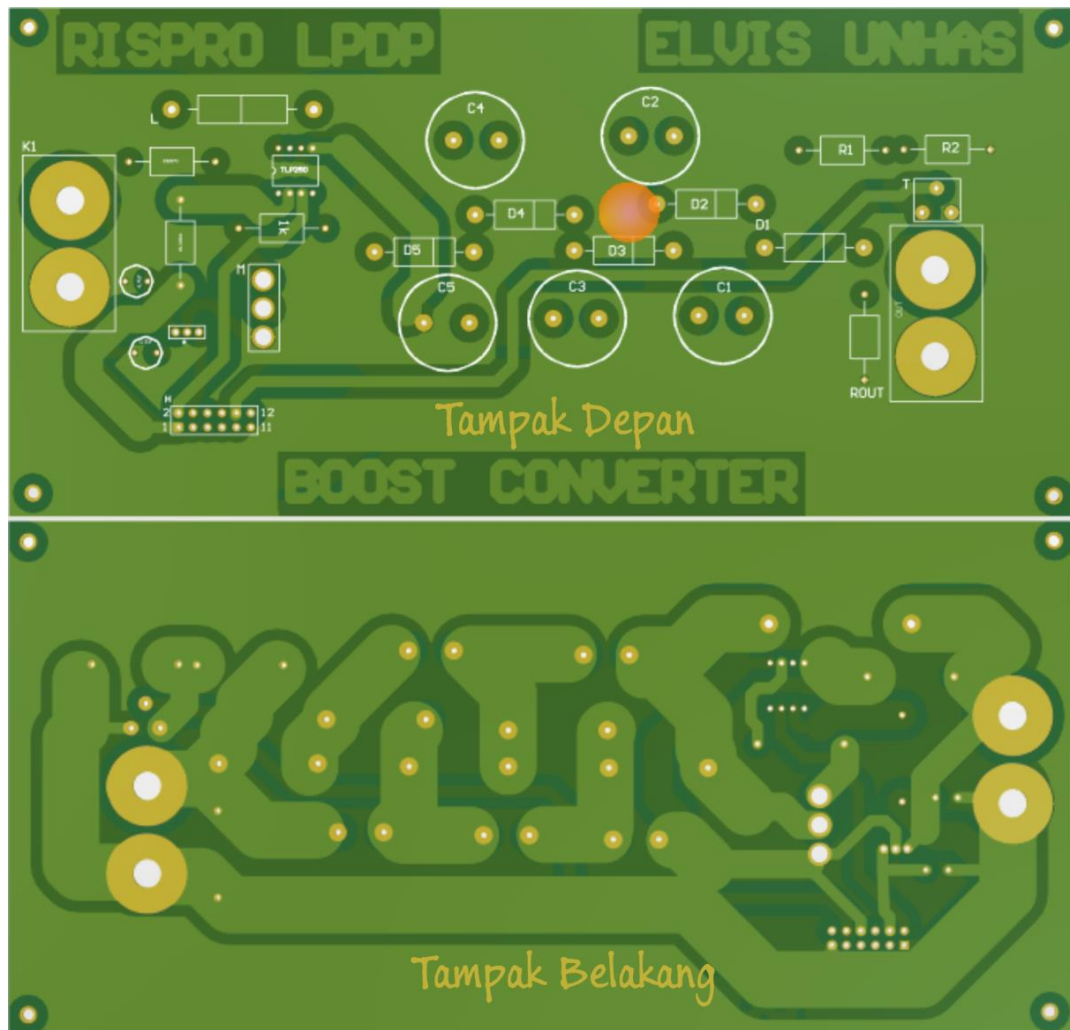


(Adaptif)

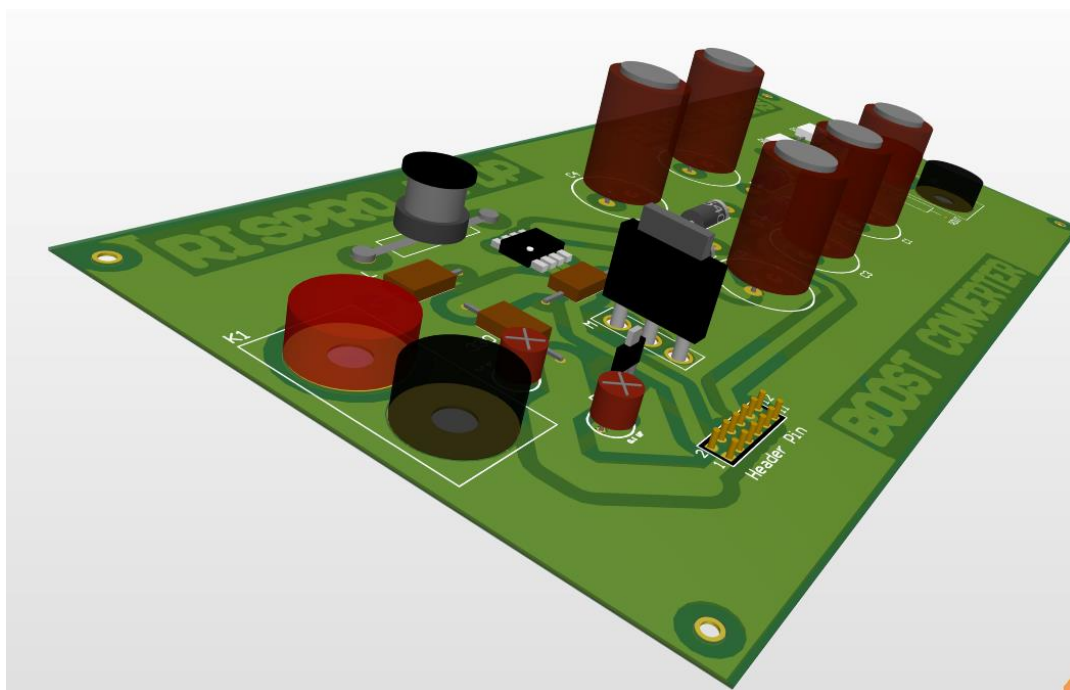
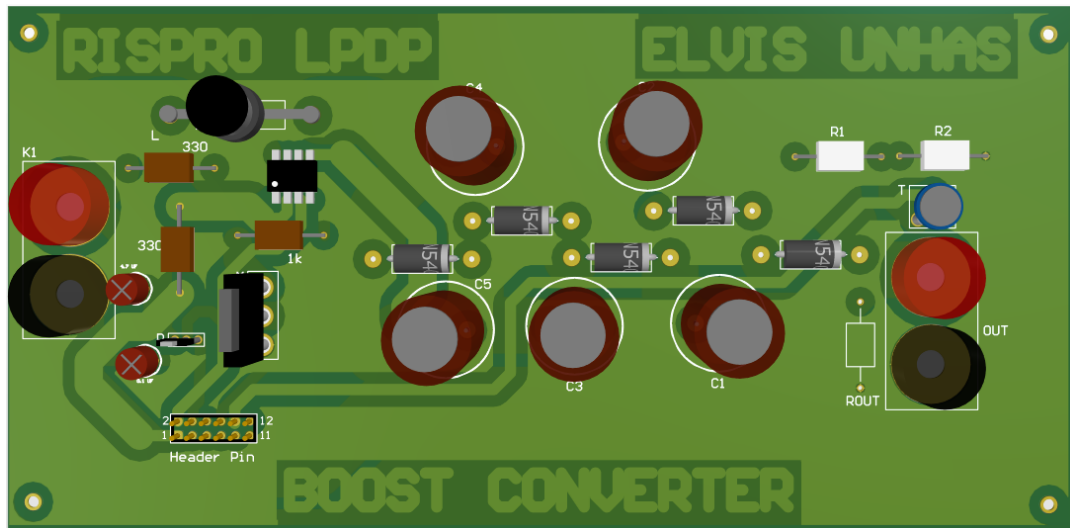


(Non Adaptif)

Tegangan output pengujian alat *multilevel boost converter* pada beban 46,2 k Ω



Layout PCB Multilevel Boost Converter



Tampilan 3D *PCB Multilevel Boost Converter*

```

double p=0;
double i=0;
double Kp = 30;//untuk 21,7k-22,7k
double Ki = 5;
double KP = 20;//untuk 22,7k-24,65k
double KI = 4;
double kP = 18.5;//untuk 44,3;45,3 dan 46,2;
double kI = 5;
double kp = 0.5;
double ki = 3;
double kpp = 7;
double kii = 10;

unsigned long currentTime;
unsigned long elapsedTime;
unsigned long previousTime;
double cumError, outMax, outMin, SampleTime, error;
double output, outputSum, lastInput, inp;
double input, setPoint;
#define feedback A0
#define pinpwm 3

void setup() {
  TCCR2A=0;// timer pin 3 arduino
  TCCR2B=0;
  TCCR2A = 0b00100011; // _BV(COM2B1) | _BV(WGM21) | _BV(WGM20);
  TCCR2B = 0b00001010;//8-100KHZ
  OCR2A = 198;
  TCNT2=0;

```

```

SampleTime = 100;
previousTime = millis()-SampleTime;
//bataskeluaran(25,29);
bataskeluaran(36,40); //bataskeluaran(36,60); //bataskeluaran(36,70);
setPoint=920;
Serial.begin(9600);
}
void bataskeluaran(double Min, double Max)
{
    Min >=0;
    Max <=255;
    if(Min >= Max) return;
    outMin = Min;
    outMax = Max;
}
void loop() {
    input = analogRead(feedback);
    double rentangerror = abs(setPoint-input);
    if (rentangerror >25)
    {
        output = komputasi(input);
    }
    else if (rentangerror <= 5)
    {
        output = komputasiPI(input);
    }
    else if (rentangerror >5 && rentangerror <=7)
    {
        output = komputasiPI1(input);
    }
}

```

```

    }
    else if (rentangerror >7 && rentangerror <=9)
    {
        output = komputasiPI2(input);
    }
    else if (rentangerror >9 && rentangerror <=15)
    {
        output = komputasiPI3(input);
    }
    else if (rentangerror >15 && rentangerror <=25)
    {
        output = komputasiPI4(input);
    }
    analogWrite(pinpwm, output);
    Serial.println(input);
    Serial.println(setPoint);
    Serial.println(rentangerror);
}

```

```

double komputasi(double inp){
    currentTime=millis();
    elapsedTime=(currentTime - previousTime);
    if(elapsedTime>=SampleTime){
        error=setPoint-inp;
        outputSum += error*elapsedTime;
        if(outputSum > outMax)
            outputSum= outMax;
        else if(outputSum < outMin)
            outputSum= outMin;
    }
}

```

```

    double out = p* error + i*outputSum ;
    if(out > outMax)
        out= outMax;
    else if(out < outMin)
        out= outMin;
    previousTime=currentTime;
    return out;
}
}

double komputasiPI(double inp){
    currentTime=millis();
    elapsedTime=(currentTime - previousTime);
    if(elapsedTime>=SampleTime){
        error=setPoint-inp;
        outputSum += error*elapsedTime;
        if(outputSum > outMax) outputSum= outMax;
        else if(outputSum < outMin) outputSum= outMin;
        double out = Kp* error + Ki*outputSum ;
        if(out > outMax) out= outMax;
        else if(out < outMin) out= outMin;
        previousTime=currentTime;
        return out;
    }
}

double komputasiPI1(double inp){
    currentTime=millis();

```

```

elapsedTime=(currentTime - previousTime);
if(elapsedTime>=SampleTime){
    error=setPoint-inp;
    outputSum += error*elapsedTime;
    if(outputSum > outMax) outputSum= outMax;
    else if(outputSum < outMin) outputSum= outMin;
    double out = KP* error + KI*outputSum ;
    if(out > outMax) out= outMax;
    else if(out < outMin) out= outMin;
    previousTime=currentTime;
    return out;
}

}

double komputasiPI2(double inp){
currentTime=millis();
elapsedTime=(currentTime - previousTime);
if(elapsedTime>=SampleTime){
    error=setPoint-inp;
    outputSum += error*elapsedTime;
    if(outputSum > outMax) outputSum= outMax;
    else if(outputSum < outMin) outputSum= outMin;
    double out = kP* error + kI*outputSum ;
    if(out > outMax) out= outMax;
    else if(out < outMin) out= outMin;
    previousTime=currentTime;
    return out;
}
}

```

```

double komputasiPI3(double inp){
    currentTime=millis();
    elapsedTime=(currentTime - previousTime);
    if(elapsedTime>=SampleTime){
        error=setPoint-inp;
        outputSum += error*elapsedTime;
        if(outputSum > outMax)
            outputSum= outMax;
        else if(outputSum < outMin)
            outputSum= outMin;
        double out = kp* error + ki*outputSum ;
        if(out > outMax)
            out= outMax;
        else if(out < outMin)
            out= outMin;
        previousTime=currentTime;
        return out;
    }
}

```

```

double komputasiPI4(double inp){
    currentTime=millis();
    elapsedTime=(currentTime - previousTime);
    if(elapsedTime>=SampleTime){
        error=setPoint-inp;
        outputSum += error*elapsedTime;
        if(outputSum > outMax)
            outputSum= outMax;
        else if(outputSum < outMin)

```

```
outputSum= outMin;
double out = kpp* error + kii*outputSum ;
if(out > outMax)
out= outMax;
else if(out < outMin)
out= outMin;
previousTime=currentTime;
return out;
}
}
```

Coding program kontrol multilevel boost converter

```

.param Rload=23.7k ;22.7k , 21.7k, 24.65k, 44.3k, 45.3k, 46.2k
.param rgate=1k
.param vref=230V
.param VGATE =20V
.param Freq = 10.03k ; frequency
.param T = {1/Freq} ; periode
.param _HIGH =5V ; high voltage
.param _LOW = 0V ; low voltage
.param Td = 0us ; time delay
.param Tr = 0.1us ; time rise
.param Tf = 0.1us ; time fall
.param kp=20
.param ki=5
Vin 1 0 PWL REPEAT FOREVER (0ms 0)(3ms 24)(5ms 24)(5ms 24)(10ms
24)(15ms 24)(20ms 24)(20ms 24)(30ms 24)(40ms 24) ENDREPEAT
L 1 2 124uh
C6 1 0 21.6uF TC=0,0
C4 3 2 90.2uf TC=0,0
C2 4 3 91.2uf TC=0,0
D5 2 5 DMOD
D4 5 3 DMOD
D3 3 6 DMOD
D2 6 4 DMOD
D1 4 7 DMOD
C5 5 0 90.9uf TC=0,0
C3 6 5 90.8uf TC=0,0
C1 7 6 90.7uf TC=0,0
Rload 7 0 {Rload}
M 2 8 0 0 IRFP460

```

```

RG 9 8 {rgate}

.model DMOD D(IS=10.000000E-15 N =1.000000E-03 RS =.1 CJO
=100.000000E-15)

.MODEL IRFP460 NMOS (VTO=2.831 KP=31.2u L=1u W=30m
CGDO=3.358N CGSO=18.054N)

*Vsensor
Esensor 14 0 7 0 0.0217391304      ; comparision sensor 5:230V

*VRef
Vref 15 0 DC {Vref*0.0217391304}

*Verror
Error 16 0 VALUE {(V(15)- V(14))}
EdeltaV 17 0 VALUE {V(1) - Vref}

* when input 24V
E24 51 0 VALUE={if({V(1)}==24, V(58),0)}
EKp52 52 0 VALUE={V(16)*kp}

*control Integral
EKp55 55 0 LAPLACE {V(16)} = {(ki)/(s)}
Econtrol 58 0 VALUE {(V(52)+V(55))}
Ebatas 28 0 VALUE {LIMIT(V(58),0.01*_HIGH,0.2165*_HIGH)}
;Ebatas 28 0 VALUE {LIMIT(V(58),0.01*_HIGH,0.71*_HIGH)}

*signal sawtooths
Vger 30 0 PULSE ({_LOW} {_HIGH} {Td} {T-(2*Tf)} {Tf} {Tf} {T})

*PWM out
Epwm 9 0 VALUE ={IF(V(28)-V(30)>0, {VGATE},0)}

*.step param Rload 100 1k 200

.TRAN 1ms 1000ms 0 0.1us UIC

.PROBE V(7) V(1) V(16) V(17) V(16) V(58) V(2) I(L) I(Rload)

.END

```

Coding program PSpice multilevel boost converter