

# PERANCANGAN KONVERTER ARUS SEARAH TIPE BOOST DENGAN TEGANGAN KELUARAN TERKONTROL BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO NANO

Ikbal Yuwandra<sup>\*)</sup>, Susatyo Handoko, dan Darjat

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: [ikbalyuwandra25@gmail.com](mailto:ikbalyuwandra25@gmail.com)

## Abstrak

Teknologi konverter elektronika daya telah banyak digunakan pada kehidupan sehari-hari, contoh pengaplikasiannya, DC-DC converter ini digunakan pada sumber energi terbarukan, seperti *fuel cell* dan *solar cell*. Pada penggunaannya, energi listrik yang dihasilkan oleh *solar cell* disimpan dalam baterai sebelum disalurkan ke beban. Masalah yang kemudian muncul adalah penyimpanan daya dalam baterai berada pada level tegangan DC rendah sedangkan beberapa beban yang ada membutuhkan tegangan AC, sehingga memerlukan *step-up converter* untuk menaikkan tegangan sebelum dikonversikan menjadi tegangan AC. Dalam tugas akhir ini, dilakukan perancangan dan implementasi *boost converter* dengan kontrol *proportional – Integral* menggunakan mikrokontroler Arduino nano. Sistem kontrol dapat membangkitkan sinyal PWM dengan umpan balik tegangan keluaran. *Boost converter yang dirancang menggunakan mikrokontroler arduino nano dengan metode kontrol proportional-integral telah berhasil direalisasikan dan dapat digunakan sebagai converter arus searah dengan nilai tegangan keluaran 30 volt.* Nilai efisiensi *boost converter* pada beban 45  $\Omega$  sebesar 83%, beban 100  $\Omega$  sebesar 84,16% dan pada beban 220  $\Omega$  sebesar 89,16%.

*Kata kunci : DC-DC converter, Baterai, Boost converter, Proportional-Integral*

## Abstract

Power electronic converter technology has been widely used in everyday life, an example of its application, DC-DC converters are used in renewable energy sources, such as fuel cells and solar cells. In its use, the electrical energy generated by the solar cell is stored in the battery before being distributed to the load. The problem that then arises is that the power storage in the battery is at a low DC voltage level while some existing loads require AC voltage, so it requires a step-up converter to increase the voltage before it is converted to AC voltage. In this final project, the design and implementation of Boost Converter with proportional - integral control using Arduino nano microcontroller is carried out. The control system can generate a PWM signal with output voltage feedback. The Boost Converter, which is designed using an Arduino nano microcontroller with the proportional-integral control method, has been successfully realized. *Boost converter is designed using Arduino nano microcontroller with proportional-integral control method has been successfully realized and can be used as a direct current converter with an output voltage of 30 volts.* The boost converter efficiency value at 45  $\Omega$  load is 83%, 100  $\Omega$  load is 84,16% and at 220  $\Omega$  load is 89,16%.

*Keywords : DC-DC converter, Battery, Boost converter, Proportional-Integral*

## 1. Pendahuluan

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. DC-DC converter adalah rangkaian elektronik daya yang paling sederhana, yang banyak digunakan dalam peralatan catu daya untuk sebagian besar instrumen elektronik dan juga dalam aplikasi daya tinggi

husus seperti pengisian baterai, pelapisan, dan pengelasan [1].

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. Berdasarkan level tegangan output, konverter DC / DC dapat dibagi menjadi Step-Up (*boost converter*), Set-Down (*buck converter*) dan *buck-boost converter* [2].

Hingga saat ini, berbagai konfigurasi DC–DC *converter* telah banyak dikembangkan, diantaranya adalah jenis DC–DC *converter* yang tidak memiliki isolasi dielektrik antara tegangan masukan dan keluaran, atau biasa disebut sebagai *non-isolated DC–DC converter* [3]. Teknologi konverter elektronika daya telah banyak digunakan pada kehidupan sehari-hari, contoh pengaplikasiannya, DC-DC *converter* ini digunakan pada sumber energi terbarukan, seperti *fuel cell* dan *solar cell*. Dalam aplikasi sumber energi terbarukan, *fuel cell* dan *solar cell* menghasilkan tegangan keluaran yang rendah dan ini membutuhkan alat untuk menaikkan tegangan [4]. Pada penggunaannya energi listrik yang dihasilkan oleh *solar cell* disimpan dalam baterai sebelum disalurkan ke beban [5].

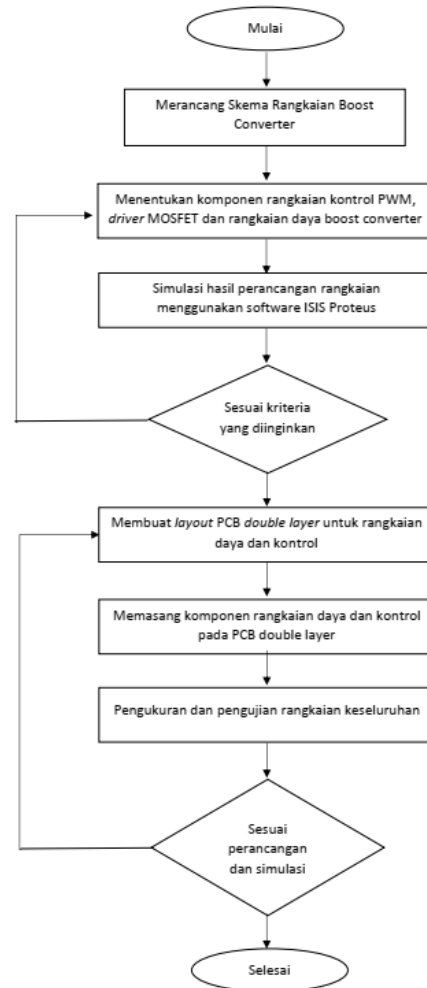
Masalah yang kemudian muncul adalah penyimpanan daya dalam baterai adalah pada level tegangan DC rendah sedangkan beberapa beban yang ada membutuhkan tegangan AC, sehingga memerlukan *step-up converter* untuk menaikkan tegangan sebelum dikonversikan menjadi tegangan AC. Alat yang umum digunakan sekarang ini adalah DC-DC *boost converter*. Konverter DC-DC ini banyak digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan tegangan yang lebih tinggi dari sumbernya. DC-DC *boost converter* merupakan konverter yang digunakan untuk memberikan tegangan keluaran yang lebih tinggi dari tegangan masukan yang rendah dengan dikendalikan oleh sinyal kontrol berupa sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) [6]. *Boost converter* adalah rangkaian elektronika daya dasar yang memiliki nilai tegangan keluaran selalu lebih besar dari nilai tegangan masukannya. Secara garis besar, tugas elektronika daya adalah mengolah dan mengontrol aliran energi listrik dengan memasok tegangan dan arus dalam bentuk yang secara optimal sesuai untuk beban berguna [7].

Penelitian membahas tentang *boost converter* yang digunakan untuk menaikkan tegangan DC dengan Teknik pemecuan PWM berbasis mikrokontroler Arduino Nano. Pengendalian tegangan dengan menggunakan metode kontrol *Proportional Integral*. Sinyal *carrier* dirancang pada frekuensi 20Khz. *Boost converter* yang dirancang diharapkan dapat memiliki performa handal dan tegangan keluaran *Boost converter* mencapai nilai  $\pm 30Vdc$ . Perancangan *Boost converter* ini menggunakan Teknik PCB *double layer* sehingga memiliki rangkaian desain yang lebih compact dan ukuran yang lebih kecil dari penelitian-penelitian sebelumnya.

## 2. Metodologi

### 2.1. Perancangan Perangkat Keras

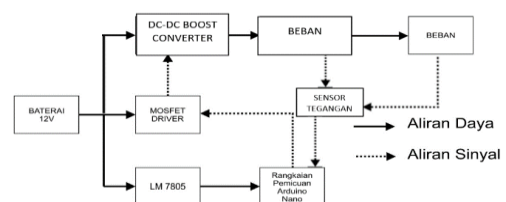
Perancangan Tugas Akhir ini terdiri dari rangkaian daya *boost converter*, rangkaian kontrol, rangkaian driver MOSFET dan rangkaian suplai. Diagram perancangan Tugas Akhir ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini



Gambar 1. Digram alir perancangan *boost converter*

### 2.2. Perancangan Rangkaian Daya

Rangkaian daya yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah konverter arus searah topologi *boost converter*. *Boost converter* digunakan untuk menaikkan nilai tegangan baterai aki dengan polaritas tegangan keluarannya sama dengan polaritas tegangan masukan [8]. *Boost converter* terdiri dari tegangan masukan ( $V_s$ ), komponen induktor (L), komponen pensaklaran (Q), dioda, kapasitor (C) dan beban (R) [9]. Spesifikasi rangkaian *boost converter* dapat dilihat pada Tabel 1.

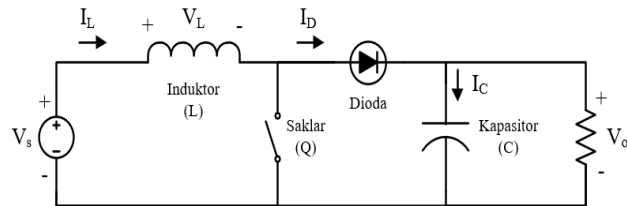


Gambar 2. Diagram blok perancangan perangkat keras

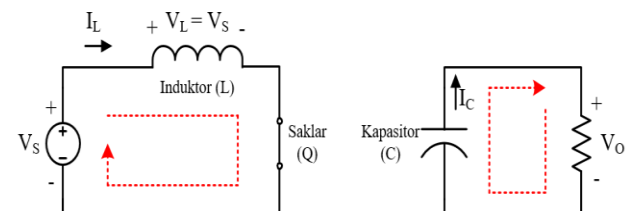
Tabel 1. Spesifikasi rangkaian boost converter

Spesifikasi	Nilai
Tegangan Masukan	12 V
Tegangan Keluaran	30 V
Arus Maksimum	4 A
Duty Cycle (D)	30% - 80%
Frekuensi Switching (fs)	20 kHz

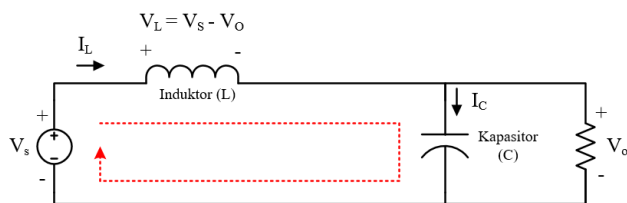
Skema rangkaian Boost converter dapat dilihat pada Gambar 3.



(a) Rangkaian ekuivalen



(b) Rangkaian ekuivalen saat Q aktif dan diode aktif



(c) Rangkaian ekuivalen saat Q tidak aktif dan dioda aktif

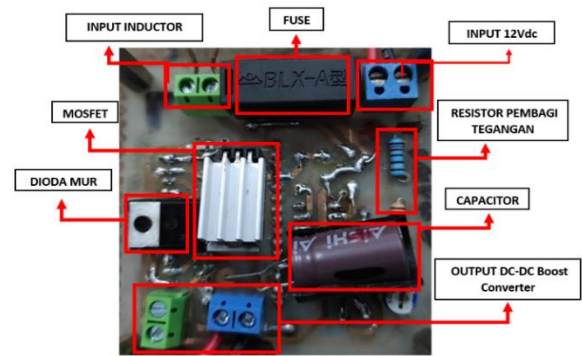
Gambar 3. Skema kerja boost converter [10]

Terdapat 5 komponen penyusun rangkaian boost converter, yaitu induktor, kapasitor, dioda, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET), dan resistor sebagai beban. Komponen penyusun boost converter yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komponen penyusun boost converter

Komponen	Tipe/Nilai
MOSFET	IRF510
Dioda	MUR1560
Induktor	1mH
Kapasitor	100 µF/160V
Resistor	45 Ω, 100 Ω, dan 220 Ω

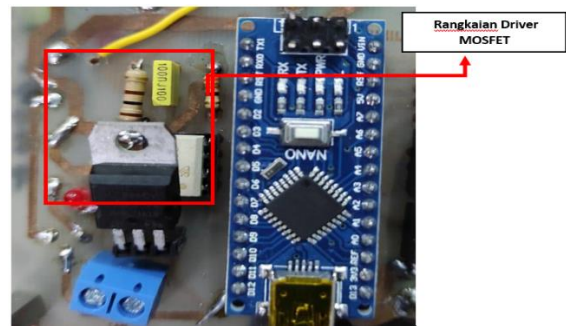
Realisasi rangkaian daya boost converter sesuai dengan komponen dari Tabel 2. dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Realisasi rangkaian boost converter

### 2.3. Perancangan Rangkaian Driver MOSFET

Rangkaian driver MOSFET yang digunakan pada perancangan Tugas Akhir ini adalah TLP250. Pemilihan TLP250 sebagai rangkaian driver MOSFET pada perancangan Tugas Akhir ini dikarenakan TLP250 memiliki fungsi isolasi yang memisahkan rangkaian kontrol dengan rangkaian daya. Selain itu, TLP250 juga dapat menguatkan sinyal PWM dengan nilai tegangan 5 V yang dibangkitkan oleh rangkaian kontrol menjadi sinyal PWM dengan nilai tegangan yang lebih tinggi sehingga dapat digunakan untuk memicu pensaklaran MOSFET IRF510. Tegangan masukan TLP250 memiliki range sebesar 10-35 V [11].



Gambar 5. Realisasi rangkaian TLP250

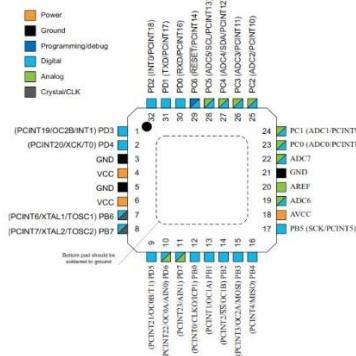
### 2.4. Perancangan Perangkat Lunak

Rangkaian boost converter yang dirancang pada penelitian Tugas Akhir ini membutuhkan suatu rangkaian kontrol yang berfungsi untuk membangkitkan sinyal PWM dan mengolah data tegangan keluaran untuk menjalankan rangkaian boost converter secara close loop. Hasil dari pengolahan data pada rangkaian kontrol berupa sinyal PWM yang digunakan untuk pensaklaran MOSFET. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu perancangan rangkaian kontrol pada penelitian Tugas Akhir ini. Perancangan rangkaian kontrol pada penelitian Tugas Akhir ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu, perancangan rangkaian pembangkit PWM yang menggunakan Arduino Nano dan perancangan sensor tegangan.

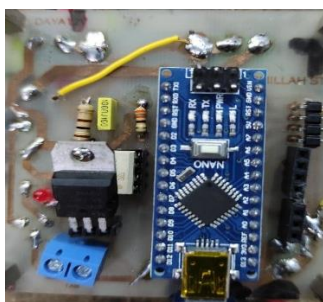
2.4.1. Sistem Minimum Arduino Nano

Arduino Nano digunakan sebagai rangkaian kontrol pada penelitian Tugas Akhir ini. Arduino Nano berfungsi untuk menerima data hasil pembacaan tegangan dari *boost converter*, pembacaan data tegangan tersebut kemudian diolah untuk menerapkan program *proportional integral* pada rangkaian *boost converter*. Arduino Nano diprogram untuk bekerja pada frekuensi sebesar 20 kHz. Pin 9 pada Arduino Nano digunakan sebagai pin keluaran PWM.

Arduino Nano terdiri dari 11 pin digital yang dapat dikonfigurasi sebagai masukan atau keluaran (6 pin digunakan sebagai keluaran PWM), 8 pin analog (A0-A7) yang digunakan untuk mengukur nilai tegangan analog dengan rentang 0V sampai 5V, 2 pin VCC 5V, 2 pin GND, 1 pin suplai Arduino (Vin), 1 pin TXD dan RXD yang digunakan untuk komunikasi serial dimana TXD merepresentasikan transmisi data dan RXD merepresentasikan penerima data, 2 pin RST, 1 pin VCC 3,3V, 1 pin AREF yang digunakan sebagai tegangan referensi untuk tegangan masukan, koneksi mini USB, dan tombol *reset* [13].



Gambar 6. Pin ATMEGA 328 [14].



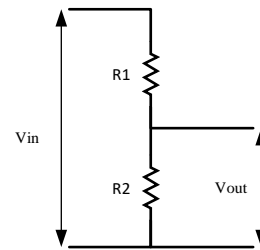
Gambar 7. Realisasi rangkaian sistem minimum Arduino nano

Pin-pin pada Arduino Nano yang digunakan penelitian Tugas Akhir ini adalah pin analog yang digunakan untuk mengakuisisi data sensor tegangan (A0). Pin digital (D9) yang digunakan untuk menghasilkan keluaran PWM. Pin VCC dan GND yang digunakan untuk suplai sensor

tegangan. Pin Vin dan GND yang dihubungkan dengan rangkaian suplai untuk Arduino Nano.

2.4.2. Sensor Tegangan

Sensor tegangan yang digunakan pada perancangan Tugas Akhir ini adalah rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan dibuat menggunakan resistor pembagi tegangan dan trimpot dengan nilai hambatan 10 kΩ, 1,5 kΩ, dan 50kΩ.



Gambar 8. Rangkaian pembagi tegangan [12]

2.4.3. IC 7805

IC 7805 adalah IC regulator tegangan linier tiga terminal dengan tegangan output tetap 5V yang berguna dalam berbagai aplikasi. Dalam tugas akhir ini IC 7805 digunakan untuk menyuplai Arduino nano.

Tabel 3. Spesifikasi IC 7805 [15]

Parameter	Spesifikasi
Tegangan input	7V-35V
Tegangan output	4,8V-5,2V
Peak output current	2,2A

2.4.4. Perancangan Program Kontroler Proportional-Integral

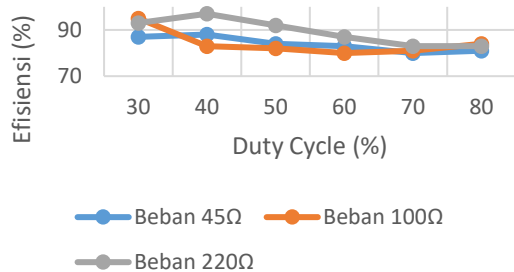
Dengan mempertimbangkan segala aspek dan pengaruh dari implementasi parameter PID terhadap kinerja proses sistem maka dipilih sistem kendali Proporsional-Integral. Hal ini dikarenakan parameter derivatif memiliki sifat mempengaruhi respon sistem untuk bekerja lebih lambat walaupun dapat meningkatkan kemampuan sistem dalam mencapai kestabilan. Tegangan keluaran di komparasikan dengan nilai tegangan referensi untuk memperoleh sinyal *error*, kemudian dengan PI kontrol dibangkitkan sinyal PWM untuk pensklaran MOSFET. Parameter untuk penguatan PI (Kp&Ki) didapatkan dengan *trial* dan *error*.

3. Hasil dan Analisis

3.1. Pengujian Rangkaian Daya

Pengujian rangkaian daya bertujuan untuk mengetahui kinerja *boost converter* yang telah dirancang. Pengujian dilakukan dengan mengukur nilai tegangan masukan, arus masukan, tegangan keluaran, dan arus keluaran. Dilakukan

variasi beban dan *duty cycle* untuk melihat perubahan nilai tegangan dan arus masukan maupun tegangan dan arus keluaran pada rangkaian *boost converter*.



Gambar 9. Efisiensi *boost converter* variasi *duty cycle*

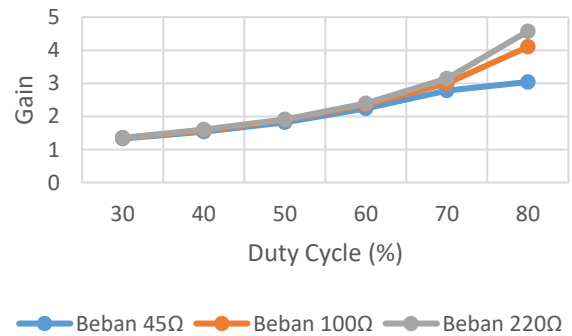
Berdasarkan grafik pada gambar 9, didapatkan nilai rata-rata efisiensi *boost converter* dengan beban 45 Ω, 100 Ω, dan 220 Ω secara berurutan adalah 83,8%, 84,16%, 89,16%. Nilai efisiensi *boost converter* tidak dapat mencapai 100% disebabkan karena adanya daya yang terbuang (daya disipasi) pada saat komponen penyusun rangkaian *boost converter* beroperasi. Nilai efisiensi akan mengalami penurunan dengan semakin besarnya nilai *duty cycle*. Penurunan nilai efisiensi tersebut disebabkan karena semakin besar nilai *duty cycle*, maka waktu pensaklaran MOSFET pada saat aktif akan semakin lama. Pada saat saklar MOSFET aktif, tegangan masukan *boost converter* akan mengalir menuju induktor sehingga induktor akan mengalami pengisian muatan. Semakin besar nilai *duty cycle*, maka pengisian muatan induktor akan semakin lama. Pengisian muatan induktor secara terus menerus sampai titik jenuhnya akan mengakibatkan jatuh tegangan pada sisi keluaran rangkaian *boost converter*. Hal ini mengakibatkan penurunan nilai efisiensi pada rangkaian *boost converter*.

Pada rangkaian *boost converter* dapat dihitung nilai penguatan (*gain*) dengan cara membandingkan tegangan keluaran dengan tegangan masukan seperti berikut

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (4.1)$$

Dengan menggunakan Persamaan 4.1 didapatkan data hasil perhitungan nilai *gain* seperti Gambar 10.

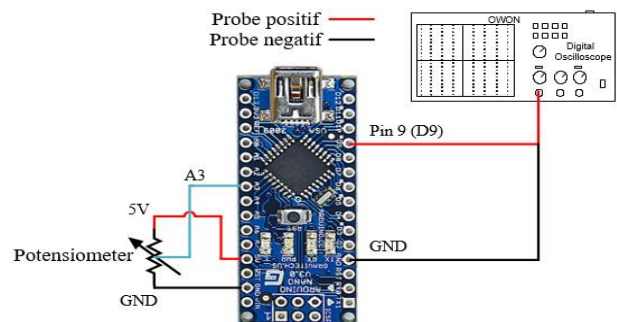
Berdasarkan pada grafik 10 dapat dilihat bahwa semakin besar nilai *duty cycle* maka penguatan (*gain*) akan semakin besar. Grafik pada Gambar 10 membentuk grafik eksponensial, hal ini menunjukkan bahwa nilai penguatan (*gain*) pada rangkaian *boost converter* bersifat non linier.



Gambar 10. Penguatan *boost converter*

### 3.2. Pengujian Rangkaian Pembangkit PWM

Rangkaian pembangkit PWM pada penelitian Tugas Akhir ini menggunakan Arduino Nano. Pengujian rangkaian pembangkit PWM bertujuan untuk mengamati dan menganalisis gelombang keluaran PWM yang dihasilkan Arduino Nano. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan nilai *duty cycle*.

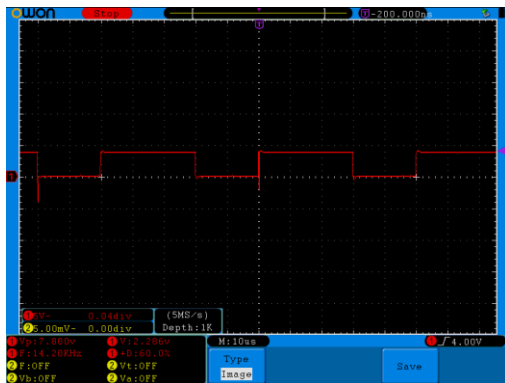


Gambar 11. Pengujian rangkaian pembangkit PWM

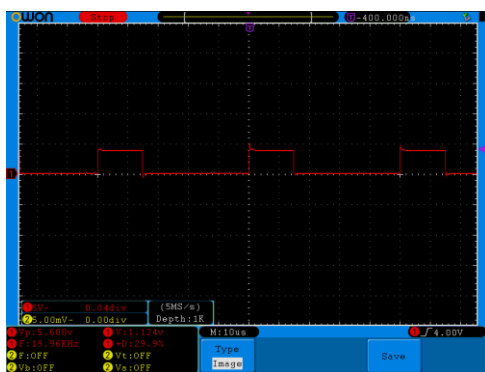
Gambar 11 merupakan pengujian rangkaian pembangkit PWM. Pengujian rangkaian pembangkit PWM dilakukan pada pin 9 (D9) Arduino Nano dimana sinyal PWM dibangkitkan. Senarai program dibuat sedemikian rupa agar frekuensi sinyal PWM yang dibangkitkan sebesar 20 kHz. Pin 9 (D9) Arduino Nano dihubungkan dengan probe osiloskop untuk diamati gelombang keluarannya.

Pengujian rangkaian pembangkit PWM bertujuan untuk mengamati dan menganalisis gelombang keluaran PWM yang dihasilkan Arduino Nano. Gambar 12 dan 13 adalah gelombang keluaran PWM dengan nilai *duty cycle* 30 % dan 60% dengan frekuensi 20 kHz.



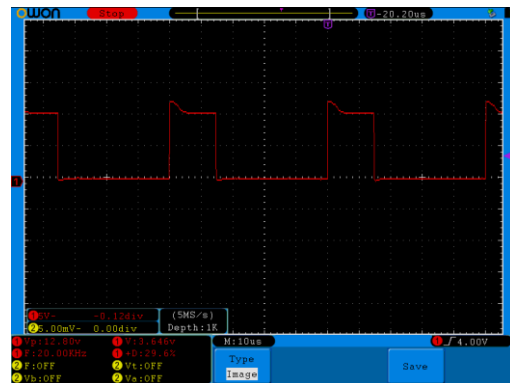


Gambar 12. Gelombang keluaran PWM 30%

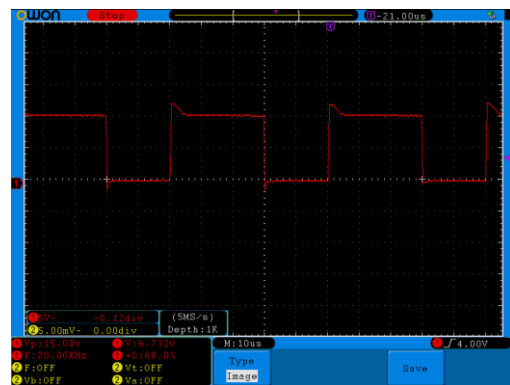


Gambar 13. Gelombang keluaran PWM 60%

MOSFET dengan nilai *duty cycle* 30 % dan 60% dengan frekuensi 20 kHz.



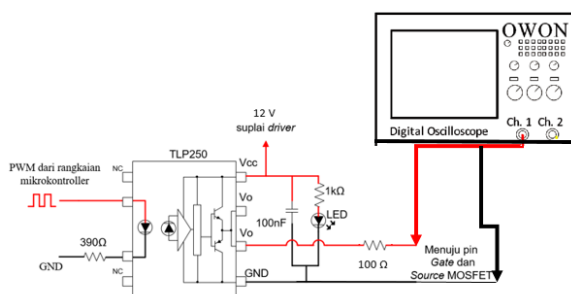
Gambar 15. Gelombang keluaran PWM TLP250 30%



Gambar 16. Gelombang keluaran PWM TLP250 60%

### 3.3. Pengujian Rangkaian Driver MOSFET

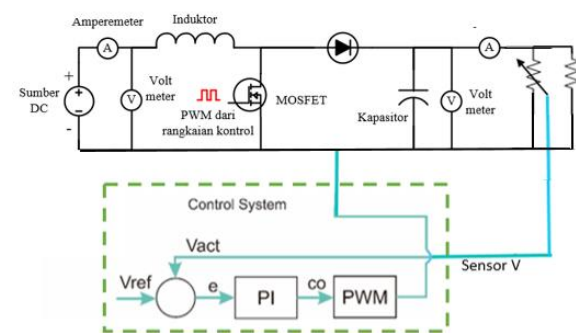
*Driver* MOSFET yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah TLP250. Pengujian rangkaian *driver* bertujuan untuk mengamati dan menganalisis gelombang keluaran PWM setelah mengalami penguatan. Gambar 14 merupakan gelombang keluaran PWM rangkaian *driver*.



Gambar 14. Rangkaian pengujian *driver* MOSFET

Gambar 14 merupakan rangkaian pengujian *driver* TLP250. Pin keluaran TLP250 dihubungkan ke *probe* osiloskop untuk menampilkan gelombang keluaran PWM yang telah mengalami penguatan. Pengujian rangkaian *driver* dilakukan dengan memvariasikan nilai *duty cycle*. Gambar 15 dan 16 adalah gelombang keluaran *driver*

### 3.4. Pengujian Kontrol *Proportional-Integral*



Gambar 17. Rangkaian pengujian *boost converter* terkontrol

Pengujian rangkaian secara *close loop* bertujuan untuk mengetahui kinerja rangkaian dan program pada *boost converter* yang telah dirancang. Pengujian dilakukan dengan mengukur nilai tegangan DC Bus, Arus DC Bus, Tegangan Output Beban, dan arus output beban. Gambar 17 adalah gambar rangkaian pengujian rangkaian secara *close loop boost converter*.

Pengujian dengan umpan balik tegangan keluaran dilakukan untuk mengetahui kinerja rangkaian dari program kontrol *proportional – Integral* dan untuk pengujianya dilakukan dengan memvariasikan tegangan input. Pengujian dilakukan dengan memberikan nilai set point tegangan keluaran sebesar 30 Vdc. Berikut merupakan data perhitungan nilai *error* hasil tegangan keluaran dengan nilai *set point*.

Berikut merupakan data hasil pengujian rangkaian terkontrol *boost converter*.

**Tabel 4. Data hasil perhitungan *error* kontrol *proportional – integral* dengan *Vset point* 30 Vdc dan beban 220  $\Omega$**

Vin	Vout (V)	Error Set Point (%)
10.4	30.51	1.7
11.3	30.49	1.63
12.3	30.52	1.73
13.5	30.56	1.86
14.5	30.55	1.83
15.4	30.53	1.76

Berdasarkan tabel 4 didapatkan hasil bahwa nilai *error* pada rangkaian *boost converter* adalah berkisar antara 1,63%-1,86% untuk nilai resistansi beban 220 $\Omega$  dengan variasi tegangan masukan. Nilai *error* antara tegangan keluaran pada *boost converter* dengan tegangan *set point* sangat kecil sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa kontrol *proportional-integral* menjaga agar tegangan keluaran sesuai dengan nilai *set point*.



**Gambar 18. Tegangan keluaran *boost converter***

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa konverter arus searah tipe *boost* telah berhasil direalisasikan. Nilai efisiensi *boost converter* pada beban 45  $\Omega$  sebesar 83%, beban 100  $\Omega$  sebesar 84.16% dan pada beban 220  $\Omega$  sebesar 89.16%. Hasil pengujian pada *boost converter* menunjukkan bahwa kontrol *proportional-integral* mampu menjaga nilai tegangan keluaran pada nilai *set point* 30 volt untuk beban 45  $\Omega$ , 100  $\Omega$  dan 220  $\Omega$  dengan variasi tegangan masukan dari 10 volt sampai 15 volt. Nilai *error* tegangan keluaran *boost converter* yang dihasilkan sebesar 1,75%.

## Referensi

- [1]. A. J. Forsyth & S. V. Mollov, “Modelling and Control of DC-DC Converters, Power engineering,” journal IEEE, 1998.
- [2]. Faizal Arya Samman & Yusri Syam Akil “Design and Testing of Boost Type DC/DC Converter for DC Motor Control Applications,” Departemen of Electrical Engineering, Universitas Hassanuddin, Makassar, Indonesia, 2015.
- [3]. Feri Yusivar & Suryo Mochamad Hidayat “Rancang Bangun Buck Boost Konverter,” Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Indonesia.
- [4]. Arga Tri Agung Hermawan, Aripriharta, Puger Honggowiyono,” Pengembangan Bahan Ajar Konverter Boost,” Jurusan Pendidikan Teknik Telekomunikasi, Universitas Negeri Malang, Indonesia, 2014.
- [5]. Bambang Hari Purwoto, Jatmiko, Muhamad Alimul F, Ilham Fahmi Huda, “Efisiensi Penggunaan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif,” Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [6]. Mohamed A. El-Sharkawi, Fundamentals of Electric Drives. United States: 2000.
- [7]. Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, Power Electronics: Conveerters, Applicayions, and Design. United States: 2007.
- [8]. Barry W. Williams, Principle and Elements of Power Electronics, 2006.
- [9]. M. H. Rashid, Power Electronic Handbook: Devices, Circuits, and Application. United States: Prentice-Hall International Inc, 2007.
- [10]. Daniel W. Hart, *Power Electronics*, 1997
- [11]. *TLP250*, Toshiba Corporation, Japan, 2007.
- [12]. Voltage Dividers and Sensor Calibration, 1997.
- [13]. Arduino nano specification, Radiospares.
- [14]. Atmel-42735\_Datasheet\_Complite, 2016.
- [15]. mA7800 Series Positive-Voltage Regulators, 2003.