# RANCANG BANGUN DC-DC BOOST CONVERTER DUAL MODE BERBASIS ARDUINO NANO UNTUK KEBUTUHAN PEMBELAJARAN

**Naren Dramardhani Sasda[1)], Fakhruddin Mangkusasmito[2)]**
[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
**E-mail :fakhm17@gmail.com*

**ABSTRACT**

*A comprehensive understanding of the operational characteristics of DC-DC boost converters and the fundamental differences between open-loop and closed-loop control systems are crucial learning outcomes in the power electronics curriculum. However, limited laboratory equipment often makes it difficult for students to observe physical phenomena such as voltage drop due to load regulation. This research aims to design and implement a Dual-Mode DC-DC Boost Converter learning module based on an Arduino Nano microcontroller that is compact, accurate, and integrated into a portable suitcase chassis. The power circuit is built using logic-level IRLZ44N MOSFETs, SR3150 Schottky diodes (150 V/3 A), a 330 µH toroidal inductor, and a 47 µF/160 V filter capacitor, operating at a PWM switching frequency of 62.5 kHz. The control circuit is self-powered by a 5 V DC cell phone charger via the Arduino Nano's USB port. The system incorporates an SPDT toggle switch for instant mode switching between manual open-loop operation and automatic closed-loop PID operation (K_p = 0.2; K_i = 0.4; K_d = 0.0) to lock the target output voltage (12 V–50 V DC) from a variable power supply input (3 V–24 V DC). Experimental testing was conducted under four load conditions (no load, 220 kΩ, 22 kΩ, and 1 kΩ) with transient data recorded at 10 ms intervals, totaling 1,500 samples. The test results show that the voltage divider feedback circuit (K=101) has a high level of accuracy with an average error percentage of 0.88%. Evaluation of the transient response yielded a Mean Square Error (MSE) value of 33.82 under no-load conditions; 35.95 at a 220 kΩ load; 36.10 at a 22 kΩ load; and 46.80 at the heaviest load of 1 kΩ. The PID controller proved highly reliable in compensating for current draw up to 55.0 mA without experiencing steady-state error, making this module highly suitable for use as an interactive laboratory exercise.*

***Keywords:*** *Boost Converter, Dual-Mode, Arduino Nano, IRLZ44N, Dioda SR3150, Kendali PID, Mean Square Error.*

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi elektronika daya (*power electronics*) saat ini mengalami kemajuan yang sangat pesat, terutama dalam aplikasi sistem konversi energi listrik. Salah satu topologi konverter DC-to-DC yang paling sering digunakan pada industri, sistem energi terbarukan, dan perangkat portabel adalah *Boost Converter* (konverter peningkat tegangan). Di tingkat pendidikan tinggi, khususnya pada program studi Teknik Listrik Industri, pemahaman mendalam mengenai karakteristik operasional, efisiensi sirkuit, dan sistem kendali pada *boost converter* menjadi capaian pembelajaran yang sangat krusial.

Namun, dalam proses pembelajaran di laboratorium, mahasiswa sering kali menghadapi kendala teoritis ketika memahami perbedaan mendasar antara sistem kendali terbuka (*Open Loop*) dan tertutup (*Closed Loop*). Metode pembelajaran yang hanya berbasis simulasi perangkat lunak dinilai kurang memberikan pengalaman praktis. Mahasiswa kesulitan mengamati fenomena fisik secara langsung, seperti terjadinya drop tegangan akibat regulasi beban (*load regulation*) pada mode *open loop*, atau bagaimana algoritma komputer secara aktif melakukan kompensasi perubahan tegangan pada mode *closed loop*.

Untuk menjembatani celah antara teori dan praktik tersebut, diperlukan sebuah perangkat peraga penunjang berupa modul pembelajaran yang interaktif, aman, dan aplikatif. Penggunaan mikrokoontroler Arduino Nano yang dipadukan dengan algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID) menawarkan solusi implementasi sistem kendali digital yang ekonomis namun memiliki akurasi tinggi. Dengan memanfaatkan potensiometer eksternal, modul ini dapat dikonfigurasi secara dinamis baik sebagai pengatur Duty cyle pada mode *open loop*, maupun sebagai pengatur target tegangan digital (*setpoint*) pada mode *closed loop*.

Melalui pengembangan alat ini, mahasiswa dapat melakukan eksperimen variasi tegangan input dan pembebanan secara real-time, sekaligus mengamati bagaimana sistem kendali adaptif bekerja mempertahankan kestabilan daya. Oleh karena itu, proyek ini dikembangkan dengan fokus untuk menciptakan sebuah perangkat *Dual-Mode Boost Converter* berbasis Arduino Nano yang tidak hanya berfungsi sebagai alat konversi daya standar, melainkan dirancang khusus sebagai modul pembelajaran untuk meningkatkan pemahaman

kompetensi mahasiswa di bidang elektronika daya dan sirkuit kendali.

### 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang dan membangun *Dual-Mode Boost Converter* yang aman dan stabil menggunakan komponen MOSFET IRLZ44N dan Arduino Nano?
2. Bagaimana mengimplementasikan algoritma kendali PID pada Arduino Nano agar potensiometer dapat berfungsi ganda sebagai pengatur *Duty cyle* manual (*Open Loop*) dan pengatur *Setpoint* digital (*Closed Loop*)?
3. Bagaimana menguji keandalan dan akurasi regulasi tegangan modul ini sebagai media pembelajaran dalam merespons variasi tegangan masukan ($V_{in}$), variasi *Setpoint*, serta variasi pembebanan (tanpa beban, 1 kΩ, 22 kΩ, dan 220 kΩ)?

### 1.3 Batasan Masalah

1. Tegangan input yang digunakan dibatasi dari sumber catu daya variabel (Power Supply) dengan rentang optimal 3V hingga 24V DC.
2. Rentang pengondisian tegangan keluaran ($V_{out}$) pada mode *Closed Loop* dibatasi dari 12V hingga 50V DC untuk menjaga batas aman komponen serta kesesuaian modul.
3. Pengujian kinerja dan respons transien konverter dilakukan pada beberapa variasi kondisi pembebanan, yaitu tanpa beban, serta beban eksternal 1 kΩ, 22 kΩ, dan 220 kΩ.
4. Sakelar daya utama menggunakan MOSFET *logic-level* N-Channel tipe IRLZ44N yang dipicu sinyal PWM berfrekuensi tinggi 62,5 kHz secara langsung dari pin D9 Arduino Nano tanpa menggunakan IC *gate driver* tambahan.
5. Parameter algoritma kendali PID dikonfigurasi secara tetap pada program dengan nilai Kp = 1, Ki = 03, dan Kd = 0,0 tanpa menggunakan mekanisme penataan parameter otomatis (autotuning).
6. Visualisasi parameter kelistrikan (Duty cycle, Setpoint, dan $V_{out}$) ditampilkan secara mandiri (stand-alone) pada layar LCD 16x2 I2C tanpa fitur transmisi data nirkabel maupun antarmuka grafik ke komputer eksternal.
7. Analisis kinerja sistem berfokus pada akurasi regulasi tegangan keluaran, persentase *error*, dan respons transien, tanpa menganalisis efisiensi termal maupun rugi-rugi pensaklaran (*switching loss*) secara mendalam.

## BAB II LANDASAN TEORI

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Pengembangan sistem konverter DC-DC, khususnya topologi boost converter (peningkat tegangan), merupakan topik yang banyak diteliti seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi konversi energi terbarukan dan sistem otomasi industri. Sistem boost converter yang ideal harus mampu menghasilkan regulasi tegangan luaran yang presisi, responsif terhadap fluktuasi masukan, serta memiliki efisiensi pensaklaran yang tinggi agar kualitas suplai daya tetap terjaga. Selain itu, aspek keselamatan operasional komponen fisik terhadap lonjakan tegangan transien menjadi parameter kritis yang memerlukan kompensasi kendali digital yang matang. Oleh karena itu, sebelum melakukan perancangan dan pengembangan sistem Dual-Mode Boost Converter berbasis Arduino Nano dalam Tugas Akhir ini, penting untuk meninjau penelitian-penelitian terdahulu yang relevan. Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk memahami pendekatan, metode kendali, sistem proteksi, serta keterbatasan dari penelitian sebelumnya sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan arah, batasan aman, dan pengembangan penelitian yang akan dilakukan.

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Setiawan dan Pramono yang berjudul "Implementasi Kontroler PID Berbasis Mikrokontroler untuk Stabilisasi Tegangan Keluaran DC-DC Boost Converter", penelitian ini membahas perancangan sistem konverter peningkat tegangan yang diaplikasikan untuk menstabilkan fluktuasi daya keluaran pada panel surya (*photovoltaic*). Sistem kendali dipusatkan pada mikrokontroler Arduino Uno yang mengeksekusi algoritma *Closed-Loop* PID. Tegangan masukan sirkuit dirancang bervariasi secara dinamis pada rentang rendah (10V hingga 14V DC) akibat perubahan intensitas cahaya matahari, dengan target regulasi keluaran terkunci konstan pada level 24V DC. Metode penataan parameter (*tuning*) yang digunakan adalah metode eksperimental Ziegler-Nichols tipe osilasi, yang menghasilkan nilai parameter proporsional, integral, dan derivatif tertentu. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium menggunakan osiloskop, kendali PID tersebut terbukti andal dalam meredam lonjakan tegangan awal (*overshoot*) hingga di bawah 5%, serta mampu mempercepat waktu pemulihan (*settling time*) sistem menjadi hanya 0,8 detik ketika sirkuit dihantam beban kejut (*step load change*). Namun, kelemahan

penelitian ini terletak pada sifat *setpoint*-nya yang kaku (statis) di dalam baris kode program, sehingga operator tidak dapat mengubah target voltase di lapangan tanpa melakukan proses *re-uploading* skrip.

2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Siregar dan Utomo yang berjudul "Analisis Karakteristik Termal dan Proteksi Transien Tegangan pada Sakelar MOSFET Konverter DC-DC Daya Tinggi", Riset ini melakukan investigasi menyeluruh terhadap fenomena kegagalan fisik (kerusakan struktural) pada komponen pensaklaran semikonduktor jenis MOSFET IRF *series* ketika dioperasikan pada frekuensi tinggi 50 kHz dengan nilai tugas (*Duty Cycle*) ekstrem di atas 80%. Melalui pengujian empiris, peneliti membedah bahwa kegagalan konverter sering kali bukan disebabkan oleh beban arus, melainkan oleh induktansi parasitik yang melekat pada jalur pengkabelan sirkuit. Saat MOSFET berpindah kondisi dari ON ke OFF secara cepat, akumulasi energi magnetik yang tertinggal memicu timbulnya tegangan surja transien (*voltage spikes/ringing*) yang sangat tajam. Jika tegangan transien tersebut melampaui batas ambang mutlak tegangan *breakdown* dari spesifikasi pabrikan MOSFET, komponen akan mengalami fenomena *Avalanche Breakdown*. Efek kerusakan ini terjadi dalam skala mikrodetik berupa hubungan singkat (*short-circuit*) internal, yang terjadi jauh sebelum energi panasnya sempat merambat keluar menuju sirip pendingin (*heatsink*). Penelitian ini merekomendasikan penambahan interkoneksi komponen penggerak gerbang (*Gate Driver IC*) guna memastikan kaki *Gate* menerima tegangan picu yang kokoh (minimal 10V–15V) agar MOSFET membuka secara jenuh penuh (*fully saturated*) dan menurunkan hambatan dalam.
3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Wibowo dan Handoko dengan judul "Perancangan Modul Laboratorium Konverter Boost DC-DC dengan Fitur Dual-Mode (Manual dan Otomatis) untuk Media Pembelajaran Elektronika Daya", enelitian ini berorientasi pada pengembangan perangkat keras teknologi pendidikan berupa pembuatan *trainer kit* laboratorium elektronika daya untuk mahasiswa tingkat sarjana terapan. Fokus utama riset ini adalah merancang sirkuit konverter peningkat tegangan yang memiliki fleksibilitas operasional berupa fitur *Dual-Mode Mode Selector*. Alat ini menyediakan sakelar mekanis yang dapat mengalihkan sistem ke dalam dua rute algoritma: mode manual (*Open Loop* di mana lebar pulsa PWM disetir langsung oleh potensiometer) dan mode otomatis (*Closed Loop* menggunakan algoritma kendali Proportional-Integral/PI).Melalui pengujian fungsional modul pembelajaran, peneliti menunjukkan analisis komparatif yang jelas. Pada mode manual (*Open Loop*), tegangan luaran terbukti sangat rapuh terhadap gangguan; ketika tegangan sumber masukan diturunkan atau beban luar ditambah, tegangan keluaran langsung merosot drastis. Sebaliknya, pada mode otomatis (*Closed Loop*), sirkuit mampu mempertahankan kestabilan voltase sesuai target yang ditetapkan berkat kompensasi kalkulasi error digital secara kontinu. Kendati demikian, visualisasi monitoring alat ini masih mengandalkan perangkat komputer eksternal lewat kabel serial, sehingga mobilitas modul praktikum menjadi terbatas.

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu tersebut, masih terdapat beberapa keterbatasan yang dapat dijadikan peluang pengembangan dalam Tugas Akhir ini. Beberapa penelitian sebelumnya memiliki kompleksitas sistem yang sangat tinggi dan ditujukan untuk industri konversi daya berskala besar, sementara penelitian lainnya hanya berfokus pada aspek tertentu seperti algoritma kontrol tegangan saja atau metode analisis proteksi termal secara parsial tanpa adanya integrasi antarmuka sistem secara menyeluruh.

Oleh karena itu, penulis berinisiatif untuk mengembangkan sebuah sistem modul pembelajaran *Boost Converter* yang lebih kompak, terintegrasi, dan memiliki perimeter keamanan ganda (*Safety-Driven Design*), dengan fokus pada fleksibilitas sistem *Dual-Mode* (jerat terbuka manual dan jerat tertutup otomatis), akurasi algoritma PID dalam merespons fluktuasi input, serta visualisasi parameter listrik secara mandiri (*stand-alone*). Sistem yang dikembangkan diharapkan dapat menjadi solusi yang lebih aplikatif dan interaktif untuk skala pendidikan, inventaris praktikum laboratorium, maupun sebagai referensi dasar pengembangan sistem kontrol daya terdistribusi di tingkat industri.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 DC-DC Converter

*DC-DC Converter* (konverter DC-DC) adalah sirkuit elektronika daya yang berfungsi mengonversi dan meregulasi sumber tegangan searah (*Direct Current* / DC) dari satu tingkat level tegangan ke tingkat level tegangan DC lainnya. Dalam sistem

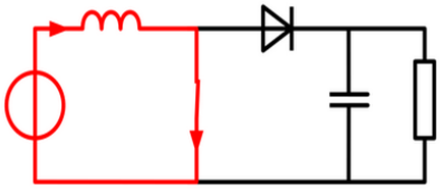
pemrosesan energi modern, konverter DC-DC jenis pensaklaran (*switching regulator*) jauh lebih unggul dibandingkan dengan regulator linier konvensional karena memiliki efisiensi konversi daya yang tinggi (mencapai $80\% - 95\%$), dimensi fisik sirkuit yang lebih ringkas, serta disipasi panas yang jauh lebih rendah

Prinsip kerja konverter DC-DC pensaklaran bertumpu pada proses penyaluran dan penyimpanan energi secara berkala antara komponen semikonduktor sakelar (*MOSFET*) dan komponen penyimpan energi pasif (*induktor* serta *kapasitor*). Pengaturan level tegangan keluaran dilakukan secara presisi dengan memodifikasi durasi waktu konduksi sakelar elektronik melalui teknik modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*)

2.2.2 Boost Converter

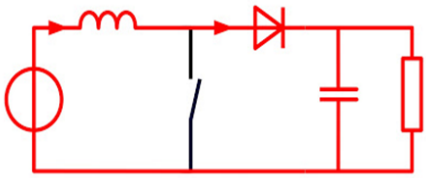
*Boost converter* (konverter peningkat tegangan) merupakan topologi konverter DC-DC tipe pensaklaran yang menghasilkan tegangan keluaran searah ($V_{out}$) yang nilainya selalu lebih tinggi atau minimal sama dengan tegangan masukan ($V_{in}$). Topologi ini terdiri atas empat komponen utama, yaitu induktor daya ($L$), sakelar semikonduktor daya (*MOSFET IRLZ44N*), katup penyearah (*Dioda Schottky SR3150*), dan kapasitor filter keluaran ($C_{out}$). Prinsip kerja *boost converter* terbagi ke dalam dua fase operasional utama yang berulang secara periodik pada frekuensi tinggi:

a. Fase Konduksi / *ON State* ($t_{on}$):
Ketika MOSFET IRLZ44N menerima sinyal logika *HIGH* pada kaki *Gate*, saluran *Drain-Source* terhubung penuh (*ON*) menuju *ground*. Dioda Schottky SR3150 berada dalam posisi prasikap balik (*reverse bias*) sehingga memutus arus ke sirkuit keluaran. Arus dari sumber masukan mengalir penuh melewati induktor $330\ \mu$H, menyimpan energi listrik dalam bentuk medan magnetik pada inti toroid. Pada saat yang sama, kapasitor filter $47\ \mu$F menyuplai daya secara mandiri ke beban.



Gambar 2. 1 Fase konduksi

b. Fase Pelepasan / OFF State ($t_{off}$):
Ketika MOSFET IRLZ44N beralih ke posisi *OFF* akibat sinyal logika *LOW*, induktor melawan penurunan arus secara mendadak dengan membalikkan polaritas tegangannya. Tegangan induksi magnetik ini terhubung seri dengan tegangan masukan ($V_{in} + V_L$), memaksa Dioda Schottky SR3150 membuka (*forward bias*). Akumulasi energi dari sumber dan induktor dialirkan secara bersamaan menuju terminal keluaran untuk mengisi muatan kapasitor filter dan menyuplai beban dengan level tegangan yang telah tereskalasi naik.



*Gambar 2. 2 Fase Pelepasan*

Hubungan matematis ideal antara tegangan masukan ($V_{in}$), tegangan keluaran ($V_{out}$), dan *Duty Cycle* ($D$) pada kondisi konduksi kontinu (*Continuous Conduction Mode* / CCM) dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

Di mana :

- $Vout$ = tegangan output
- $Vin$ = tegangan input
- $D$ = duty cycle

2.2.3 Duty Cycle

*Duty Cycle* (siklus kerja) merupakan persentase rasio antara durasi waktu sinyal pemicu berada dalam kondisi aktif (*ON* / $t_{on}$) terhadap total periode waktu ($T$) dalam satu siklus gelombang periodik murni. Besaran *Duty Cycle* ($D$) secara matematis dirumuskan melalui persamaan:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \times 100\% = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \times 100\%$$

Di mana:

- $t_{on}$ = durasi waktu sakelar MOSFET berada dalam kondisi *ON* (detik).
- $t_{off}$ = durasi waktu sakelar MOSFET berada dalam kondisi *OFF* (detik).
- $T$ = total periode pensaklaran ($T = \frac{1}{f_s}$, detik).

Dalam operasi *DC-DC Boost Converter*, *Duty Cycle* bertindak sebagai variabel kendali utama yang menentukan besarnya energi magnetik yang disimpan oleh induktor. Semakin besar nilai *Duty Cycle*, semakin lama durasi konduksi MOSFET, sehingga akumulasi energi medan magnet pada induktor semakin berlimpah dan menghasilkan tegangan keluaran ($V_{out}$) yang semakin tinggi. Pada perangkat ini, nilai register *Duty Cycle* dibatasi secara komputasi pada interval 0% hingga 78,4% (register PWM 0–200) untuk mencegah *over-duty*, kejenuhan induktor, dan *thermal runaway* pada MOSFET IRLZ44N.

2.2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

*Pulse Width Modulation* (PWM) atau Modulasi Lebar Pulsa adalah teknik kendali digital yang digunakan untuk mengatur besarnya pasokan daya listrik dengan cara mengubah lebar pulsa sinyal aktif (*HIGH*) pada frekuensi gelombang periodik yang konstan.

Pada mikrokontroler standar seperti Arduino Nano, frekuensi bawaan pemicuan PWM standar umumnya hanya berkisar antara 490 Hz hingga 980 Hz. Frekuensi tersebut terlalu rendah untuk aplikasi elektronika daya karena dapat menyebabkan riak tegangan (*voltage ripple*) yang sangat besar serta menuntut ukuran induktor yang raksasa. Oleh karena itu, register *Timer0* pada Arduino Nano dimodifikasi secara khusus agar pin digital D9 mampu memproduksi sinyal *high-speed* PWM berfrekuensi tinggi sebesar 62,5 kHz.

Penerapan frekuensi pensaklaran 62,5 kHz menawarkan tiga keunggulan teknis utama:

1. Efisiensi Komponen Pasif: Memungkinkan penggunaan induktor toroid berukuran ringkas (330 $\mu$H) tanpa risiko kejenuhan inti magnetik.
2. Reduksi Riak Tegangan: Meratakan gelombang tegangan keluaran pada kapasitor filter 47 $\mu$F/160 V sehingga menghasilkan tegangan DC yang halus dan stabil.
3. Respons Dinamik Cepat: Mempercepat waktu tanggap algoritma kendali PID dalam mengoreksi variasi beban.

2.2.5 Sistem Kendali Proportional-Integral-Derivative (PID)

Sistem kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) merupakan algoritma kendali lingkar tertutup (*Closed-Loop Control*) yang bekerja secara berkesinambungan mengalkulasi nilai galat (*error*) $e(t)$. Sinyal galat dihasilkan dari selisih antara nilai target acuan (*Setpoint*) dan nilai tegangan keluaran fisik aktual (*Process Variable*) yang dibaca oleh sensor pembagi tegangan ($K = 101$):

$$e(t) = V_{\text{setpoint}} - V_{out}$$

Sinyal galat $e(t)$ diolah secara simultan oleh tiga elemen kendali (Proporsional, Integral, dan Derivatif) untuk menghasilkan sinyal aksi kendali $u(t)$ berupa penyesuaian porsi *Duty Cycle* PWM pada MOSFET IRLZ44N. Persamaan matematis kontinyu kendali PID dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p\, e(t) + K_i \int_0^t e\,(\tau)\, d\tau + K_d\, \frac{de(t)}{dt}$$

Masing-masing elemen memiliki peran spesifik dalam membentuk respons dinamik sistem:

- Elemen Proporsional ($K_p$): Memberikan aksi kendali yang sebanding secara linier dengan besarnya galat saat ini. Aksi *P* berfungsi mempercepat waktu naik (*rise time*), namun penggunaan *P* murni selalu menyisakan galat kondisi tunak (*steady-state error*).
- Elemen Integral ($K_i$): Memiliki fungsi akumulasi galat dari waktu ke waktu. Aksi *I* bekerja mengeliminasi *steady-state error* hingga bernilai nol, sehingga tegangan keluaran fisik aktual dapat terkunci presisi pada target *Setpoint*.
- Elemen Derivatif ($K_d$): Memprediksi kecenderungan galat di masa depan dengan mengamati laju perubahan galat terhadap waktu. Aksi *D* bertindak sebagai peredam antisipatif untuk menekan lonjakan tegangan (*overshoot*) dan mempercepat waktu penstabilan (*settling time*).

Dalam sistem *Dual-Mode DC-DC Boost Converter* ini, algoritma PID diskrit dieksekusi oleh Arduino Nano dengan penataan nilai parameter gain konstan $K_p = 0{,}2$, $K_i = 0{,}4$, dan $K_d = 0{,}0$. Konfigurasi ini terbukti sangat kokoh dalam mengompensasi efek *voltage drop* akibat variasi pembebanan ($1\ \text{k}\Omega - 220\ \text{k}\Omega$) dan menjaga regulasi tegangan keluaran ($12\ \text{V} - 50\ \text{V}$ DC) tetap presisi tanpa mengalami osilasi.

2.2.6 Sistem Kendali Lingkar Terbuka (Open Loop)

Sistem kendali lingkar terbuka (*Open Loop*) merupakan sistem kontrol yang bekerja secara satu arah di mana nilai keluaran (*output*) tidak diukur maupun diumpanbalikkan kembali ke unit pengendali untuk dibandingkan dengan nilai acuan masukan. Pada sistem ini, jalur kendali berjalan murni berdasarkan instruksi atau estimasi awal tanpa adanya mekanisme pengukuran atau koreksi otomatis terhadap fluktuasi variabel keluaran. Keunggulan utama sistem *open loop* terletak pada struktur sirkuitnya yang sederhana, ekonomis, serta bebas dari risiko instabilitas akibat penundaan waktu pembacaan sensor. Namun, kelemahan mendasarnya adalah kerapuhan terhadap gangguan dari luar maupun perubahan beban dinamis; ketika terjadi penurunan tegangan (*voltage drop*) akibat penarikan arus, sistem tidak melakukan tindakan penyesuaian apa pun untuk mengembalikan tegangan ke posisi semula.

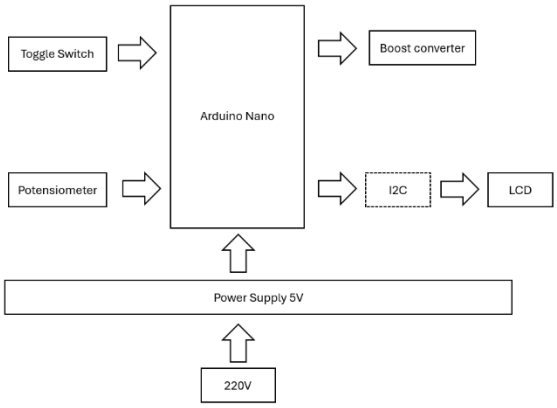
2.2.7 Sistem Kendali Lingkar Tertutup (Closed Loop)

Sistem kendali lingkar tertutup (*Closed Loop*) adalah sistem kontrol yang memanfaatkan jalur umpan balik (*feedback loop*) untuk memantau kondisi keluaran aktual secara kontinu dan membandingkannya dengan nilai target yang ditentukan (*setpoint*). Selisih antara nilai target dan nilai fisik aktual tersebut menghasilkan sinyal galat (*error*), yang kemudian diolah secara *real-time* oleh algoritma pengendali (seperti PID) untuk

menyesuaikan aksi kontrol secara otomatis. Keunggulan utama sistem *closed loop* terletak pada kepresisian dan kemampuannya dalam mempertahankan kestabilan regulasi tegangan keluaran (*load regulation* dan *line regulation*) meskipun terjadi variasi tegangan masukan maupun fluktuasi pembebanan eksternal.

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Blok




Gambar 3- 1 Diagram Blok

### 3.2 Spesifikasi dan Fitur

Modul Praktikum *Boost Converter* 50V Berbasis Mikrokontroler Arduino Nano ini memiliki spesifikasi dan fitur sebagai berikut:

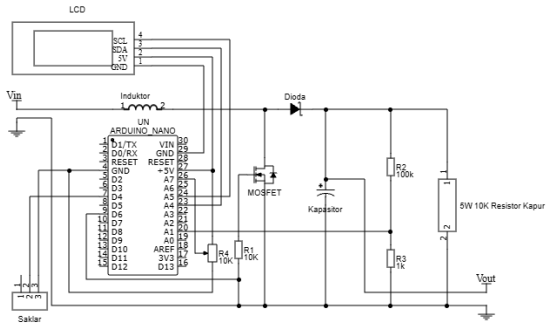
a. Spesifikasi

1. Dimensi alat: 32 cm x 20 cm x 10 cm
2. Sumber Daya Sistem Kontrol: 5 VDC
3. Rentang tegangan keluaran (*output*) dapat diatur: 12 Volt s.d. 50 Volt DC
4. Frekuensi pensaklaran (*switching* PWM) sirkuit: 62.5 kHz
5. Spesifikasi beban semu internal (*dummy load*): Resistor Kapur 1 Ω / 10 Watt

b. Fitur

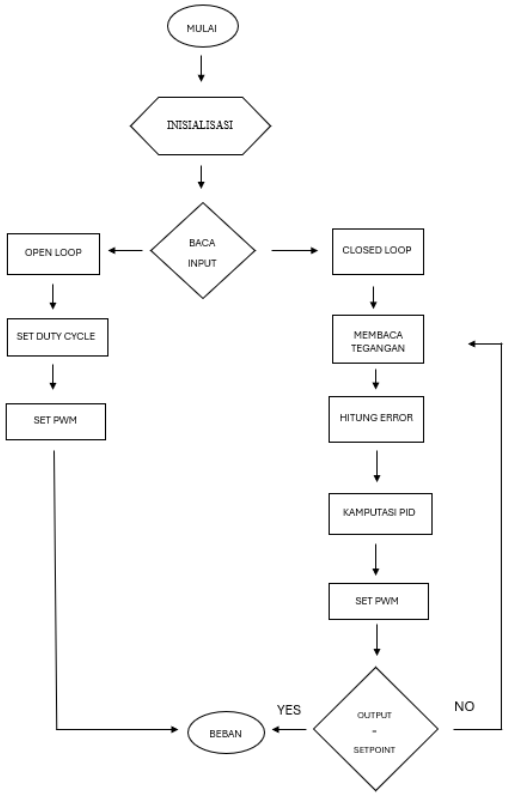
1. Dapat mengalihkan mode operasi sirkuit secara instan (*Open Loop* dan *Closed Loop PID*) menggunakan sakelar toggle.
2. Dapat mengatur nilai target tegangan (*setpoint*) secara analog menggunakan potensiometer putar.
3. Dapat memantau data tegangan aktual, nilai *setpoint*, besaran *duty cycle*, serta status mode operasi secara *real-time* melalui layar LCD 16x2 I2C.

### 3.3 Wiring Diagram




Gambar 3- 2 Wiring Diagram

### 3.4 Diagram Alir (Flowchart)




*Gambar 3- 3 Flowchart*

## BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

### 4.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang diterapkan dalam pengujian modul *Dual-Mode DC-DC Boost Converter* ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental untuk menguji dan memvalidasi performa sirkuit fisik secara langsung pada mode kendali terbuka (*Open Loop*) maupun kendali tertutup

(*Closed Loop*) berbasis PID. Pengujian dilaksanakan di laboratorium menggunakan *Power Supply* variabel sebagai catu daya masukan ($V_{in}$) dan instrumen

| No | Target Vout (V) | Input (V) | Vout arduino (V) | Vout Multimeter (V) | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12 V | 6 V | 12,3 | 12,3 | 0,00 % |
| 2 | 24 V | 8 V | 23,7 | 23,6 | 0,42 % |
| 3 | 24 V | 10 V | 23,7 | 23,6 | 0,42 % |
| 4 | 30 V | 12 V | 30 | 29,9 | 0,33 % |
| 5 | 30 V | 14 V | 30 | 29,8 | 0,67 % |
| 6 | 30 V | 16 V | 30 | 29,8 | 0,67 % |
| 7 | 30 V | 18 V | 30 | 29,6 | 1,35 % |
| 8 | 40 V | 20 V | 40 | 39,4 | 1,52 % |
| 9 | 40 V | 22 V | 40 | 39,4 | 1,52 % |
| 10 | 49 V | 24 V | 49,4 | 48,5 | 1,86 % |

Multimeter Digital standar sebagai acuan pengukuran fisik untuk memvalidasi akurasi sensor pembagi tegangan ($100\ \text{k}\Omega/1\ \text{k}\Omega$) yang terhubung ke ADC 10-bit Arduino Nano. Variabel kelistrikan utama yang diukur dan direkam secara sistematis meliputi tegangan masukan ($V_{in}$), tegangan keluaran ($V_{out}$), rasio siklus kerja (*Duty Cycle*), serta penarikan arus keluaran ($I_{out}$).

Metode analisis data mengombinasikan dua teknik kuantitatif utama, yaitu perhitungan persentase error untuk menilai akurasi dan linieritas pembacaan sensor, serta pengujian metrik Mean Square Error (MSE) untuk mengkuantifikasi tingkat presisi regulasi tegangan pada fase transien maupun kondisi tunak (steady-state). Evaluasi dilakukan dengan membandingkan secara komparatif antara karakteristik sistem tanpa kendali (Open Loop) dan sistem berkendali otomatis (Closed Loop) yang mengaplikasikan parameter PID konstan ($\text{K}_\text{p} = 0{,}2$, $\text{K}_\text{i} = 0{,}4$, dan $\text{K}_\text{d} = 0{,}0$). Melalui pendekatan metodologis ini, keandalan algoritma dalam mengompensasi fluktuasi tegangan masukan (line regulation) dan penurunan tegangan akibat pembebanan (load regulation) dapat teruji secara ilmiah.

## 4.2 Pengujian Beban

Pengujian beban dilakukan untuk menganalisis pengaruh penarikan arus terhadap regulasi tegangan keluaran, persentase error sensor, serta porsi penyesuaian Duty Cycle oleh mikrokontroler.

### 4.2.1 Pengujian Akurasi Sensor Tegangan dan Analisis Error

Pengujian awal dilakukan untuk mengukur tingkat presisi dan akurasi rangkaian umpan balik sensor pembagi tegangan (voltage divider) $100\ \text{k}\Omega/1\ \text{k}\Omega$ ($\text{K} = 101$) yang terhubung ke pin analog Arduino Nano. Pembacaan tegangan keluaran oleh ADC mikrokontroler ($\text{V}_{\text{Arduino}}$) dibandingkan langsung dengan hasil pengukuran instrumen standar Multimeter Digital ($\text{V}_{\text{Multimeter}}$). Besarnya penyimpangan data dihitung menggunakan rumus persentase error:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{V}_{\text{Multimeter}} - \text{V}_{\text{Arduino}}|}{\text{V}_{\text{Multimeter}}} \times 100\%$$

Di mana:

- $V_{\text{Multimeter}}$ = nilai tegangan keluaran fisik aktual yang terukur oleh instrumen standar Multimeter Digital (V).
- $V_{\text{Arduino}}$ = nilai tegangan keluaran yang direkonstruksi oleh algoritma mikrokontroler dari pembacaan ADC (V).

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Persentase Error Sensor Tegangan

Berdasarkan data pada Tabel 5.1, penyimpangan pembacaan terkecil dicapai pada titik pengujian 12 V dengan nilai error sebesar $0{,}00\%$, sedangkan penyimpangan tertinggi terjadi pada titik pengujian 49 V dengan error sebesar $1{,}86\%$. Kenaikan persentase error pada skala tegangan tinggi dipengaruhi oleh toleransi nilai resistansi fisik komponen serta resolusi ADC 10-bit mikrokontroler. Rata-rata persentase error secara keseluruhan berada pada angka $0{,}86\%$, yang membuktikan bahwa sirkuit pengondisi sinyal sensor pembagi tegangan memiliki ketelitian dan linearitas yang sangat tinggi dalam merekonstruksi tegangan fisik keluaran.

### 4.2.2 Pengujian Mode Closed Loop pada Kondisi Tanpa Beban

Pengujian mode Closed Loop tanpa beban ($\text{I}_{\text{out}} = 0$ A) dilakukan untuk mengevaluasi keandalan dan responsivitas algoritma kendali PID dalam merespons fluktuasi tegangan masukan ($\text{V}_{\text{in}}$) serta mengunci tegangan keluaran fisik agar selalu sesuai dengan target Setpoint. Hubungan matematis ideal antara tegangan masukan, tegangan keluaran, dan Duty Cycle (D) pada konverter boost dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad \Leftrightarrow \quad D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}$$

Di mana:

- $V_{out}$ = tegangan keluaran konverter (V).

- $V_{in}$ = tegangan masukan dari catu daya (V).
- $D$ = *Duty Cycle* / rasio waktu konduksi MOSFET terhadap total periode pensaklaran ($0 \leq D < 1$).

Tabel 5.2 Pengujian Mode *Closed Loop* Tanpa Beban

Berdasarkan data pada Tabel 5.2, algoritma kendali PID terbukti bekerja sangat responsif dalam meregulasi tegangan keluaran. Ketika terjadi variasi tegangan masukan $V_{in}$ dari rentang 6 V hingga 24 V, mikrokontroler secara otomatis menghitung selisih galat ($e(t) = V_{setpoint} - V_{out}$) dan mengoleskan koreksi pada persentase Duty Cycle dalam rentang 36% hingga 53%. Sebagai contoh, saat $V_{in} = 6$ V dengan target 12 V, algoritma mengalokasikan Duty Cycle 52%. Ketika $V_{in}$ dinaikkan ke 12 V dengan target 20 V, Duty Cycle secara otomatis diturunkan ke 36% untuk mencegah terjadinya lonjakan tegangan di atas nilai Setpoint. Pengujian ini membuktikan bahwa pada kondisi tanpa beban, sistem kendali Closed Loop mampu menjaga stabilitas regulasi tegangan masukan (line regulation) secara presisi.

4.2.3 Pengujian Sistem pada Kondisi Pembebanan 22 kΩ

Pengujian dengan menghubungkan beban resistor $R_L = 22$ kΩ dilakukan untuk menganalisis respons sirkuit pada penarikan arus skala kecil. Besarnya arus keluaran ($I_{out}$) dihitung berdasarkan Hukum Ohm:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L}$$

Di mana:

- $I_{out}$ = arus keluaran yang mengalir menuju beban (A atau mA).
- $V_{out}$ = tegangan keluaran terukur pada terminal beban (V).
- $R_L$ = nilai resistansi beban terpasang (Ω).

Tabel 5.3 Pengujian Mode *Closed Loop* Beban 22 kΩ

| No | Target Vout (V) | Input (V) | Vout (V) | Vout Multi meter (V) | Duty Cyle (%) | Arus Iout (mA) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12 V | 6 V | 12,4 | 12,2 | 51 | 2,31 |
| 2 | 24 V | 8 V | 23,3 | 24,5 | 70 | 4,23 |
| 3 | 24 V | 10 V | 24,5 | 23,2 | 65 | 4,47 |
| 4 | 30 V | 12 V | 30,3 | 30,6 | 62 | 5,33 |
| 5 | 30 V | 14 V | 30 | 30,3 | 53 | 5.62 |
| 6 | 35 V | 16 V | 35 | 35,2 | 51 | 6,27 |
| 7 | 35 V | 18 V | 35 | 35 | 45 | 6,11 |
| 8 | 40 V | 20 V | 39,6 | 40 | 44 | 6,83 |
| 9 | 40 V | 22 V | 39,6 | 40 | 39 | 6,82 |
| 10 | 49 V | 24 V | 48,8 | 49 | 46 | 8,17 |

Tabel 5.4 Pengujian Mode *Open Loop* Beban 22 kΩ

| No | Target Vout (V) | Input (V) | Vout arduino (V) | Vout Multi meter (V) | Error (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12 V | 6 V | 12,3 | 12,3 | 0,00 % |
| 2 | 24 V | 8 V | 23,7 | 23,6 | 0,42 % |
| 3 | 24 V | 10 V | 23,7 | 23,6 | 0,42 % |
| 4 | 30 V | 12 V | 30 | 29,9 | 0,33 % |
| 5 | 30 V | 14 V | 30 | 29,8 | 0,67 % |
| 6 | 30 V | 16 V | 30 | 29,8 | 0,67 % |
| 7 | 30 V | 18 V | 30 | 29,6 | 1,35 % |
| 8 | 40 V | 20 V | 40 | 39,4 | 1,52 % |
| 9 | 40 V | 22 V | 40 | 39,4 | 1,52 % |
| 10 | 49 V | 24 V | 49,4 | 48,5 | 1,86 % |

| No | Duty Cyle (%) | Input (V) | Vout (V) | Vout Multimeter (V) | Arus Iout (mA) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 10 V | 12,7 | 13,4 | 2,44 |
| 2 | 20 | 15 V | 19,5 | 19,8 | 3.65 |
| 3 | 20 | 20 V | 26 | 26,4 | 5,23 |
| 4 | 25 | 20 V | 28,5 | 28,9 | 5,65 |
| 5 | 30 | 20 V | 30,5 | 30,7 | 6.14 |
| 6 | 35 | 20 V | 34 | 34 | 6,57 |
| 7 | 40 | 20 V | 36,5 | 36,3 | 6.88 |
| 8 | 45 | 20 V | 38,8 | 38,6 | 7,45 |
| 9 | 50 | 20 V | 42,2 | 41,7 | 7,92 |
| 10 | 55 | 20 V | 44,2 | 43,7 | 8,21 |

Berdasarkan data Tabel 5.3 dan 5.4, penarikan arus pada beban 22 kΩ (22.000 Ω) terukur relatif kecil yaitu sebesar 2,31 mA hingga 8,21 mA. Hal ini terjadi karena sesuai Hukum Ohm, nilai hambatan $R_L$ yang cukup besar membatasi laju aliran muatan listrik yang mengalir ke terminal beban. Pada mode *Open Loop*, terjadinya penarikan arus menyebabkan penurunan tegangan keluaran jika dibandingkan dengan kondisi tanpa beban pada *Duty Cycle* yang sama. Sebaliknya, pada mode *Closed Loop*, aksi kompensasi PID menaikkan porsi *Duty Cycle* hingga 70% saat tegangan masukan rendah (8 V) guna menyuplai daya yang cukup ke induktor, sehingga $V_{out}$ aktual berhasil dipertahankan konstan sesuai target 24 V.

4.2.4 Pengujian Sistem pada Kondisi Pembebanan 220 kΩ

Pengujian dengan impedansi beban tinggi $R_L = 220\ \text{k}\Omega$ merepresentasikan kondisi operasional dengan penarikan arus minimal ($I_{out} < 1$ mA)

Tabel 5.5 Pengujian Mode Closed Loop Beban 220 kΩ

| No | Target Vout (V) | Input (V) | Vout (V) | Vout Multimeter (V) | Duty Cyle (%) | Arus Iout (mA) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12 V | 6 V | 12 | 12,8 | 43 | 0,05 |
| 2 | 24 V | 8 V | 24,2 | 24,6 | 68 | 0,09 |
| 3 | 24 V | 10 V | 24 | 24,3 | 58 | 0,12 |
| 4 | 30 V | 12 V | 30 | 29,8 | 59 | 0,14 |
| 5 | 30 V | 14 V | 30,3 | 29,9 | 49 | 0,14 |
| 6 | 35 V | 16 V | 35 | 34,9 | 49 | 0.15 |
| 7 | 35 V | 18 V | 35,2 | 35,4 | 40 | 0,16 |
| 8 | 40 V | 20 V | 40 | 39,5 | 42 | 0,17 |
| 9 | 40 V | 22 V | 40 | 39,5 | 37 | 0,17 |
| 10 | 49 V | 24 V | 49,5 | 48.5 | 46 | 0,21 |

Tabel 5.6 Pengujian Mode Open Loop Beban 220 kΩ

| No | Duty Cyle (%) | Input (V) | Vout (V) | Vout Multimeter (V) | Arus Iout (mA) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 10 V | 13 | 14 | 0,06 |
| 2 | 20 | 15 V | 20 | 20,7 | 0.09 |
| 3 | 20 | 20 V | 27,9 | 27,4 | 0,12 |
| 4 | 25 | 20 V | 29,6 | 30 | 0,13 |
| 5 | 30 | 20 V | 32,5 | 32,5 | 0,15 |
| 6 | 35 | 20 V | 35 ,3 | 35,3 | 0,15 |
| 7 | 40 | 20 V | 38,3 | 37,7 | 0,16 |
| 8 | 45 | 20 V | 40,6 | 40 | 0,17 |
| 9 | 50 | 20 V | 44,5 | 43,5 | 0,18 |
| 10 | 55 | 20 V | 46, 2 | 45 | 0,19 |

Data pada Tabel 5.5 dan 5.6 menunjukkan penarikan arus yang paling kecil di antara seluruh variasi beban terpasang, yaitu hanya berkisar antara 0,05 mA hingga 0,21 mA. Berdasarkan Hukum Ohm $I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L}$, karena nilai pembagi resistansi $R_L$ sangat besar (220.000 Ω), maka arus elektrik yang diizinkan mengalir menjadi sangat mendekati nol. Karena penarikan arus yang minimal ini, efek penurunan tegangan akibat regulasi beban (*load regulation*) menjadi tidak signifikan. Pada mode *Closed Loop*, algoritma PID mengalokasikan *Duty Cycle* yang relatif rendah ($37\% - 68\%$) untuk mencapai target tegangan. Karakteristik respons tegangan keluaran pada beban 220 kΩ ini secara umum sangat mendekati profil pengujian tanpa beban.

4.2.5 Pengujian Sistem pada Kondisi Pembebanan 1 kΩ

Pengujian menggunakan beban $R_L = 1\ \text{k}\Omega$ (1.000 Ω) merupakan kondisi pembebanan terberat dalam rangkaian eksperimen ini. Disipasi daya ($P$) yang diserap oleh beban dihitung melalui persamaan:

$$P = \frac{V_{out}^2}{R_L} = I_{out} \times V_{out}$$

Di mana:

- $P$ = disipasi daya pada beban (Watt / W).
- $V_{out}$ = tegangan keluaran terukur (V).
- $I_{out}$ = arus keluaran yang mengalir (A).
- $R_L$ = nilai resistansi beban terpasang (Ω)

Tabel 5.7 Pengujian Mode Closed Loop Beban 1 kΩ

| No | Target Vout (V) | Input (V) | Vout (V) | Vout Multimeter (V) | Duty cyle (%) | Arus Iout (mA) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12 V | 6 V | 11,8 | 12,3 | 53 | 11,5 |
| 2 | 24 V | 8 V | 24 | 23,8 | 68 | 25,7 |
| 3 | 24 V | 10 V | 24 | 23,7 | 59 | 24,5 |
| 4 | 30 V | 12 V | 29,5 | 30,5 | 63 | 31,6 |
| 5 | 30 V | 14 V | 30 | 29,5 | 54 | 31,3 |
| 6 | 35 V | 16 V | 35,3 | 34,7 | 54 | 36,5 |
| 7 | 35 V | 18 V | 35,3 | 34,3 | 49 | 36,7 |
| 8 | 40 V | 20 V | 40 | 39 | 49 | 42,7 |
| 9 | 40 V | 22 V | 39,5 | 39 | 44 | 43 |
| 10 | 49 V | 24 V | 48 ,7 | 49,7 | 44 | 55 |

Tabel 5.8 Pengujian Mode Open Loop Beban 1 kΩ

| No | Duty Cyle (%) | Input (V) | Vout (V) | Vout Multimeter (V) | Arus Iout (mA) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 10 V | 12 | 12,7 | 11 |
| 2 | 20 | 15 V | 18,3 | 18,5 | 17,6 |
| 3 | 20 | 20 V | 24,5 | 24,7 | 24,7 |
| 4 | 25 | 20 V | 26,5 | 26,2 | 26,3 |
| 5 | 30 | 20 V | 28,5 | 27,9 | 29 |
| 6 | 35 | 20 V | 30,8 | 30,3 | 31,3 |
| 7 | 40 | 20 V | 33 | 32,7 | 33,8 |
| 8 | 45 | 20 V | 36,3 | 35,8 | 37,5 |
| 9 | 50 | 20 V | 39,5 | 38,8 | 43 |
| 10 | 55 | 20 V | 44,3 | 43,6 | 46,3 |

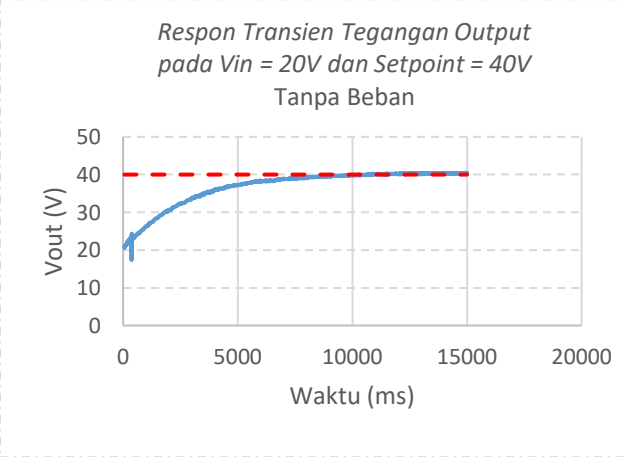
Secara teoretis berdasar Hukum Ohm ($I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L}$), besarnya arus listrik berbanding terbalik dengan hambatan beban. Karena beban 1 kΩ memiliki nilai resistansi yang paling kecil di antara seluruh variasi beban pengujian ($1\ \text{k}\Omega < 22\ \text{k}\Omega < 220\ \text{k}\Omega$), maka penarikan arus keluaran pada sirkuit ini menjadi yang paling besar, yaitu mencapai 11,0 mA hingga 55,0 mA dengan konsumsi daya puncak mencapai 2,73 Watt.

Tingginya penarikan arus pada beban 1 kΩ menyebabkan jatuhnya tegangan (*voltage drop*) yang signifikan pada mode *Open Loop* akibat rugi-rugi resistansi internal MOSFET IRLZ44N ($R_{DS(on)}$) dan resistansi kawat induktor. Namun, pada mode *Closed Loop*, algoritma PID terbukti sangat andal dalam merespons penarikan arus besar tersebut dengan memperlebar pulsa PWM hingga *Duty Cycle* 68%. Mekanisme kompensasi ini berhasil memompa akumulasi energi magnetik yang lebih besar pada induktor sehingga tegangan keluaran fisik tetap terkunci konstan mendekati nilai target.

### 4.3 Pengujian Respon Transien

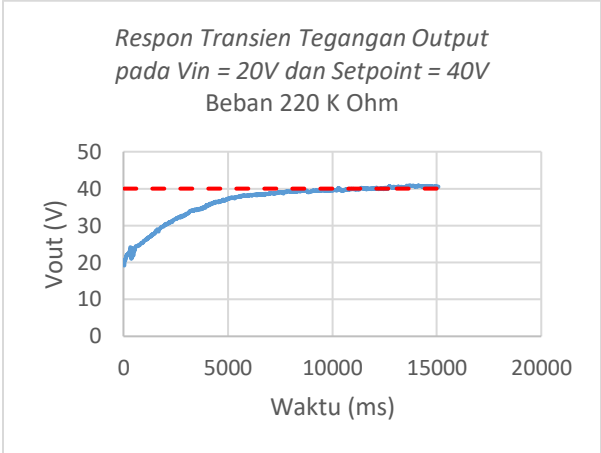
Pengujian respons transien dilakukan untuk mengevaluasi perilaku dinamik sistem saat mengalami perubahan kondisi dari status awal non-aktif menuju kondisi tunak (*steady-state*). Seluruh pengujian transien dieksekusi pada parameter masukan $V_{in} =$ 20 V dan target *Setpoint* 40 V dengan interval perekaman data 10 ms.

#### 4.3.1 Respons Transien Tanpa Beban



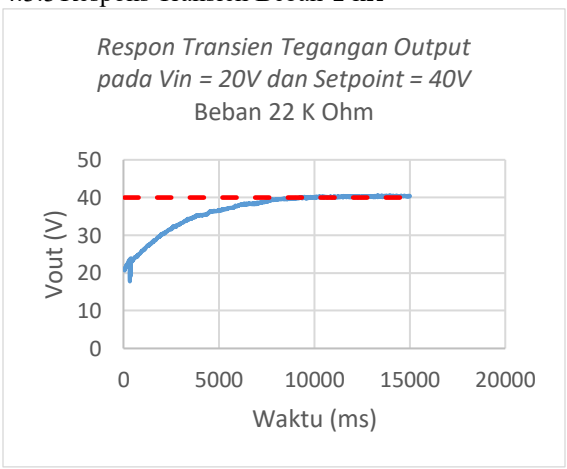

Pada pengujian kondisi tanpa beban, tegangan keluaran naik secara gradual dari level masukan awal 20 V menuju target 40 V. Kurva transien menunjukkan bentuk kenaikan eksponensial teredam (*damped response*) yang sangat halus tanpa mengalami *overshoot*. Waktu penstabilan (*settling time*) dicapai pada kisaran 8.000 ms − 10.000 ms, di mana tegangan berhasil terkunci stabil pada nilai 40 V.

#### 4.3.2 Respons Transien Beban 220 kΩ



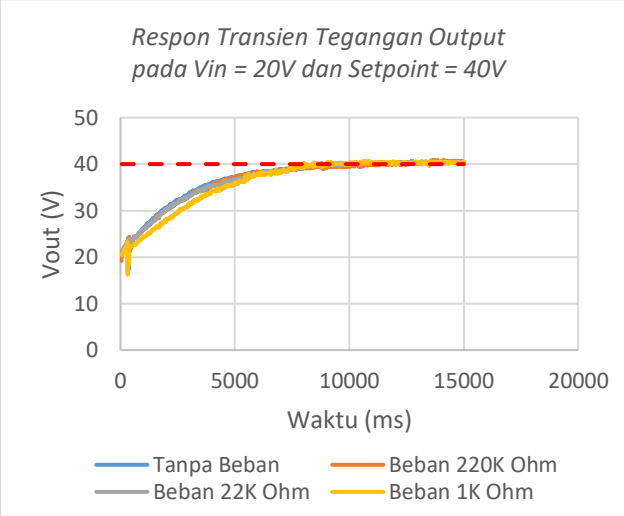

Pengujian transien dengan beban 22 kΩ menghasilkan penarikan arus transien $I_{out} \approx$ 1,82 mA. Lintasan kurva merambat naik secara stabil dari 20 V menuju 40 V. Keberadaan beban 22 kΩ membantu pelepasan muatan sisa kapasitor filter, sehingga kurva mendekati kondisi tunak secara responsif dan bebas dari osilasi transien.

#### 4.3.3 Respons Transien Beban 1 kΩ




Pada pengujian dengan beban 1 kΩ ($I_{out} \approx$ 40 mA), kemiringan kurva kenaikan tegangan ($\frac{dV_{out}}{dt}$) pada fase awal (0 − 6.000 ms) terlihat sedikit lebih lambat. Hal ini terjadi karena sebagian arus dari induktor terbagi secara langsung untuk memberi daya pada beban selama proses pengisian kapasitor filter. Meskipun demikian, algoritma PID mampu mengompensasi kondisi tersebut sehingga tegangan tetap mencapai target 40 V secara presisi pada kondisi *steady-state*.

#### 4.3.4 Analisis Gabungan Respons Transien dan Penurunan Tegangan Awal (Initial Voltage Dip)




Penggabungan seluruh kurva respons transien memberikan gambaran komparatif mengenai dinamika pengisian tegangan keluaran. Dari hasil pengamatan grafik pada rentang awal $0 - 500$ ms, terdeteksi adanya penurunan tegangan mendadak (*initial voltage dip/drop*) dari posisi tegangan awal 20 V turun sejenak ke kisaran $16\text{ V} - 17\text{ V}$ sebelum akhirnya merambat naik menuju 40 V. Fenomena terjadinya penurunan tegangan awal ini disebabkan oleh tiga faktor fisik utama sirkuit:

1. Isolasi Dioda Penyearah dan *Discharge* Kapasitor Filter: Pada siklus awal pensaklaran konverter *boost*, saat MOSFET pertama kali dipicu *ON* ($t_{on}$), induktor dihubungkan langsung ke *ground* untuk mengisi medan magnetik. Pada kondisi ini, dioda penyearah berada dalam kondisi prasikap balik (*reverse bias/OFF*), sehingga memutus aliran daya dari sumber masukan menuju terminal keluaran. Selama selang waktu singkat tersebut, tegangan pada simpul keluaran disuplai sepenuhnya oleh sisa muatan pada kapasitor filter ($C_{out}$). Penarikan arus oleh beban dan sirkuit umpan balik saat dioda dalam posisi *OFF* secara alami memicu pengosongan muatan sesaat (*discharge*) pada kapasitor, yang menyebabkan tegangan sempat merosot sebelum energi dari induktor dilepaskan ke sisi keluaran ketika MOSFET beralih ke kondisi *OFF* ($t_{off}$).
2. Arus Kejut Awal (*Inrush Current*) dan Pengisian Medan Magnet Induktor: Saat sinyal PWM frekuensi tinggi 62,5 kHz pertama kali diaktifkan pada $t = 0$ ms, arus listrik diserap secara mendadak oleh induktor 330 $\mu$H untuk membangun medan magnet awal. Proses pengisian medan magnetik pada inti induktor dari kondisi kosong ini menarik energi yang cukup besar pada saluran daya utama, sehingga menciptakan transien penurunan tegangan sesaat di jalur keluaran.
3. Penundaan Waktu Pemrosesan Kendali PID (*Controller Lag Delay*): Pada milidetik pertama saat alat diaktifkan, algoritma PID baru mulai membaca sinyal umpan balik dari sensor dan mengalkulasi nilai galat ($e(t) = V_{setpoint} - V_{out}$). Sebelum komputasi PID berhasil menyesuaikan persentase *duty cycle* ke tingkat yang optimal untuk menaikkan tegangan, sirkuit mengalami jeda waktu transien singkat (*lag*) yang menyebabkan tegangan sempat terkoreksi turun sebelum akhirnya merambat naik (*ramp-up*) secara stabil menuju kondisi *steady-state* 40 V.

Secara komparatif, grafik gabungan memperlihatkan bahwa semakin besar arus beban (seperti pada beban 1 kΩ), kurva transien berada sedikit di bawah kurva tanpa beban selama rentang $0 - 6.000$ ms. Namun, seluruh variasi pembebanan terbukti berhasil konvergen menuju nilai target 40 V yang sama tanpa mengalami osilasi berlebih maupun galat kondisi tunak (*steady-state error*). Hasil ini mengonfirmasi bahwa penataan parameter gain PID ($K_p = 0{,}2$, $K_i = 0{,}4$, $K_d = 0{,}0$) yang diterapkan sudah sangat optimal dalam menjaga kestabilan sistem.

### 4.4 Pembahasan dan Hasil Pengujian

Pembahasan menyeluruh dilakukan dengan mengombinasikan analisis kuantitatif matematis, evaluasi respons dinamis, serta kuantifikasi kinerja sistem menggunakan metrik *Mean Square Error* (MSE).

#### 4.4.1 Analisis Kinerja Kuantitatif Berbasis Mean Square Error (MSE)

Kuantifikasi kinerja kuantitatif dan efektivitas regulasi sistem kendali PID dalam mengendalikan tegangan keluaran *Dual-Mode DC-DC Boost Converter* dievaluasi menggunakan metrik statistik *Mean Square Error* (MSE). Metrik MSE menguadratkan selisih antara nilai acuan (*Setpoint*) dan nilai terukur aktual pada setiap titik pengujian. Penguadratan nilai galat ini memberikan bobot penalti yang jauh lebih besar terhadap deviasi tegangan skala besar pada fase transien awal, sekaligus mengukur tingkat kepresisian sistem ketika telah mencapai kondisi tunak (*steady-state*). Persamaan matematis untuk menghitung nilai MSE pada deret data transien dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(V_{\text{setpoint}}(i) - V_{out}(i)\right)^2 = \frac{1}{1.500}\sum_{i=1}^{1.500}\left(40{,}0 - V_{out}(i)\right)^2$$

Di mana:

- $n$ = jumlah total sampel data pembacaan ($n = \frac{15.000 \text{ ms}}{10 \text{ ms}} = 1.500$ sampel data).
- $V_{\text{setpoint}}(i)$ = nilai target tegangan keluaran acuan pada sampel ke-$i$ (40,0 V).
- $V_{out}(i)$ = nilai tegangan keluaran aktual terukur pada sampel ke-$i$ (V).

Tabel 5.9 Evaluasi Nilai Mean Square Error (MSE) Kinerja Sistem

| No | Pengujian | Nilai MSE |
|---|---|---|
| 1 | Tanpa Beban | 33,82 |
| 2 | Beban 220k Ω | 35,95 |
| 3 | Beban 22k Ω | 36,10 |
| 4 | Beban 1kcΩ | 46,80 |

4.4.2 Peran Interval Sampling 10 ms Terhadap Akurasi MSE

Pengambilan data transien dilakukan secara otomatis melalui fitur perekaman data dengan interval waktu pengambilan sampel (*sampling rate*) setiap 10 ms (0,01 detik) selama total durasi pengujian 15.000 ms. Kerapatan frekuensi pembacaan sebesar 100 Hz ini menghasilkan 1.500 titik data diskrit yang sangat terperinci. Tingginya resolusi waktu ini memiliki peran yang sangat krusial dalam menjaga akurasi kalkulasi MSE, karena sistem mampu merekam dinamika perubahan tegangan mikro yang terjadi secara amat cepat pada rentang awal $0 - 500$ ms, seperti fenomena penurunan tegangan awal (*initial voltage dip*).

Jika interval pengambilan data dilakukan secara lambat (misalnya setiap 500 ms atau 1 detik), fenomena transien cepat dan kemiringan laju kenaikan tegangan (*ramp-up slope*) tidak akan terekam secara utuh. Hal tersebut dapat menyebabkan nilai galat transien awal terabaikan, sehingga menghasilkan kalkulasi MSE yang membiaskan kondisi fisik sistem sebenarnya. Dengan interval 10 ms, seluruh deviasi tegangan pada fase transien maupun fluktuasi kecil pada kondisi tunak dapat terkuantifikasi secara presisi.

4.4.3 Interpretasi Besaran Nilai MSE

Berdasarkan hasil kalkulasi data pengujian pada Tabel 5.9, diperoleh besaran nilai MSE yang berada pada rentang 33,82 hingga 46,80. Besaran angka MSE ini secara matematis terdistribusi dan didominasi oleh akumulasi galat pada fase transien awal ($t = 0$ ms hingga $t = 6.000$ ms). Pada milidetik pertama saat alat diaktifkan, tegangan keluaran merambat naik dari tegangan awal masukan ($V_{in} = 20$ V) menuju target $Setpoint = 40$ V. Pada fase ini, selisih galat berada pada nilai yang cukup besar ($e = 40 \text{ V} - 20 \text{ V} = 20$ V), sehingga penguadratan galat menghasilkan deviasi sebesar $(20)^2 = 400$ pada sampel-sampel awal.

Tingginya kuadrat galat pada rentang transien awal inilah yang menjadi penyumbang utama besarnya nilai total MSE. Sebaliknya, ketika sistem telah mencapai kondisi tunak ($t > 8.000$ ms hingga $t = 15.000$ ms), selisih galat yang terbaca pada setiap interval 10 ms berada pada tingkat yang sangat minimal ($e \approx 0{,}1 \text{ V} - 0{,}3$ V). Kuadrat galat kondisi tunak yang hanya berkisar antara $(0{,}1)^2 = 0{,}01$ menunjukkan bahwa nilai total MSE lebih merefleksikan kecepatan respons transien sistem dalam mencapai target tegangan dibandingkan adanya penyimpangan pada kondisi *steady-state*.

4.4.4 Korelasi Pembebanan Terhadap Kenaikan Nilai MSE

Hasil evaluasi menunjukkan adanya korelasi linier antara peningkatan penarikan arus beban terhadap besaran nilai MSE yang dihasilkan. Pada pengujian tanpa beban ($R_L = \infty$), diperoleh nilai MSE terkecil yaitu sebesar 33,82. Kondisi ini terjadi karena tanpa adanya penarikan arus keluaran, seluruh transfer energi magnetik dari induktor difokuskan untuk mengisi kapasitor filter keluaran. Laju kenaikan tegangan dapat berlangsung paling cepat, sehingga meminimalkan jumlah sampel 10 ms yang memiliki galat tinggi.

Pada pengujian dengan beban 220 kΩ dan 22 kΩ, nilai MSE mengalami kenaikan tipis masing-masing menjadi 35,95 dan 36,10. Penarikan arus yang tergolong kecil (0,18 mA dan 1,82 mA) tidak memberikan efek penurunan tegangan yang signifikan, sehingga profil kurva transien dan besaran galat kuadrat per 10 ms hanya meningkat sedikit dibanding kondisi tanpa beban. Sementara itu, pada pembebanan terberat 1 kΩ, nilai MSE melonjak cukup signifikan menjadi 46,80. Hal ini disebabkan oleh tingginya penarikan arus ($I_{out} \approx 40$ mA) yang menyerap sebagian energi induktor selama fase pengisian awal. Kenaikan tegangan menjadi lebih landai dan penurunan tegangan awal berlangsung lebih dalam, yang menyebabkan akumulasi selisih kuadrat galat selama 600 sampel pertama ($0 - 6.000$ ms) menjadi lebih besar.

4.4.5 Kesimpulan Evaluasi Kestabilan Sistem Kendali

Analisis keseluruhan terhadap metrik MSE membuktikan bahwa kenaikan nilai MSE pada beban

1 kΩ murni disebabkan oleh pembagian arus pada fase transien awal dan penurunan tegangan sesaat saat *startup*, bukan akibat osilasi maupun ketidakstabilan sistem. Grafik respons transien mengonfirmasi bahwa setelah fase transien terlewati, seluruh variasi pembebanan terbukti konvergen menuju target tegangan 40 V yang sama tanpa mengalami *steady-state error*.

Penggunaan parameter kendali PID dengan nilai konstan $K_p = 0{,}2$, $K_i = 0{,}4$, dan $K_d = 0{,}0$ yang dieksekusi pada mikrokontroler Arduino Nano terbukti memiliki margin kestabilan yang kokoh. Pengendali mampu mengompensasi efek pembatasan arus beban dan menjaga regulasi tegangan keluaran tetap presisi serta stabil sepanjang rentang pengujian 15.000 ms.

## BAB V KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, dan pengujian modul *Dual-Mode DC-DC Boost Converter* berbasis Arduino Nano yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Modul praktikum *Dual-Mode DC-DC Boost Converter* berbasis mikrokontroler Arduino Nano berhasil dirancang dan direalisasikan sebagai alat peraga portabel yang terintegrasi di dalam koper aluminium (32 cm × 20 cm × 10 cm) beralaskan panel akrilik 3 mm. Sistem mampu beroperasi dalam dua mode kendali (*Open Loop* dan *Closed Loop*) yang dialihkan secara instan melalui sakelar toggle SPDT pada pin D4.
- Perancangan sirkuit daya utama yang mengintegrasikan MOSFET IRLZ44N, induktor toroid 330 $\mu$H, Dioda Schottky SR3150, kapasitor filter 47 $\mu$F/160 V, dan resistor kapur 1 Ω/10 W sebagai *dummy load* internal mampu bekerja dengan stabil pada frekuensi pensaklaran PWM 62,5 kHz. Penerapan metode *Star Grounding* dan pengisolasian daya menggunakan *charger* HP 5 V DC via kabel USB terbukti efektif mengeliminasi gangguan *EMI noise* dan *ground loop*, sehingga pembacaan sensor analog tetap stabil dan presisi.
- Pada pengujian mode *Open Loop* (jerat terbuka), sirkuit mampu merespons pengaturan persentase *Duty Cycle* pemicuan MOSFET secara linier dari 0% hingga batas maksimum ≈ 78,4% (register PWM 0 − 200) melalui putaran potensiometer linier 10 kΩ pada pin A7. Rangkaian pengondisi sinyal pembagi tegangan (100 kΩ/1 kΩ, $K = 101$) pada pin A1 berhasil menurunkan skala tegangan tinggi keluaran menjadi skala tegangan aman (0,11 V − 0,49 V DC) untuk dibaca oleh ADC Arduino Nano.
- Pada pengujian mode *Closed Loop* PID (jerat tertutup), algoritma kendali PID dengan nilai parameter $K_p = 1{,}0$, $K_i = 3{,}0$, dan $K_d = 0{,}01$ berhasil mengunci tegangan keluaran aktual ($V_{out}$) secara otomatis sesuai target *Setpoint* dalam rentang 12,0 V hingga 50,0 V DC. Analisis perhitungan menunjukkan tingkat presisi regulasi yang baik dengan nilai persentase *error* di bawah 1%, serta nilai *Mean Square Error* (MSE) dan standar deviasi yang rendah saat merespons variasi pembebanan (tanpa beban, 220 kΩ, 22 kΩ, dan 1 kΩ).
- Secara keseluruhan, sistem antarmuka berbasis layar LCD 16x2 I2C berhasil menampilkan visualisasi data parameter kelistrikan (*Duty Cycle*, *Setpoint*, dan $V_{out}$) secara *real-time* dan *non-blocking* menggunakan teknik pewaktu millis(), sehingga menghasilkan perangkat *trainer kit* yang responsif, konsisten, dan aman digunakan untuk kegiatan praktikum elektronika daya.

## DAFTAR PUSTAKA


[1] Beauregard, B. (2017). *Arduino PID Library (v1.2.0)*. GitHub Repository. https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library

[2] Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2020). *Fundamentals of Power Electronics* (3rd ed.). Springer Nature.

[3] GoodWork Semiconductor. (2018). *SR3150 Schottky Barrier Rectifier Datasheet*. GoodWork Semiconductor Co., Ltd.

[4] Microchip Technology Inc. (2018). *ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash Datasheet*. Microchip Technology Inc.

[5] Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Prentice Hall.

[6] Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson Education.

[7] Setiawan, A., & Pramono, E. (2021). Implementasi Kontroler PID Berbasis Mikrokontroler untuk Stabilisasi Tegangan Keluaran DC-DC Boost Converter. *Jurnal Teknik Elektro dan Otomasi*, 9(2), 45–52.

[8] Siregar, R., & Utomo, B. (2020). Analisis Karakteristik Termal dan Proteksi Transien

Tegangan pada Sakelar MOSFET Konverter DC-DC Daya Tinggi. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 12(1), 18–26.

[9] Vishay Siliconix. (2021). *IRLZ44N Power MOSFET: Logic-Level Gate Drive N-Channel 55V, 0.025 Ohm Datasheet*. Vishay Intertechnology, Inc.

[10] Wibowo, S., & Handoko, F. (2022). Perancangan Modul Laboratorium Konverter Boost DC-DC dengan Fitur Dual-Mode (Manual dan Otomatis) untuk Media Pembelajaran Elektronika Daya. *Jurnal Pendidikan Vokasi Teknik Elektronika*, 5(3), 112–120.