

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”, penelitian 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 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

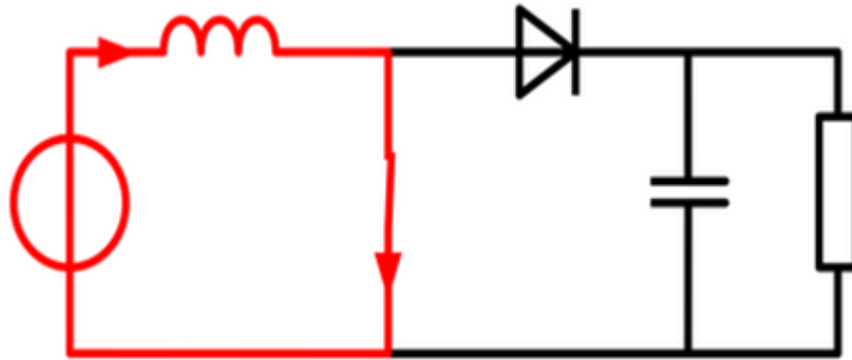
Prinsip kerja konverter DC-DC pensaklaran bertumpu pada proses penyaluran dan penyimpanan energi secara berkala antara komponen semikonduktor sakelar (*MOSFET*) dan komponen penyimpan energi pasif (*induktor* serta *kapasitor*). Pengaturan level tegangan keluaran dilakukan secara presisi dengan memodifikasi 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:

- Fase Konduksi / *ON State* (t_{on}):

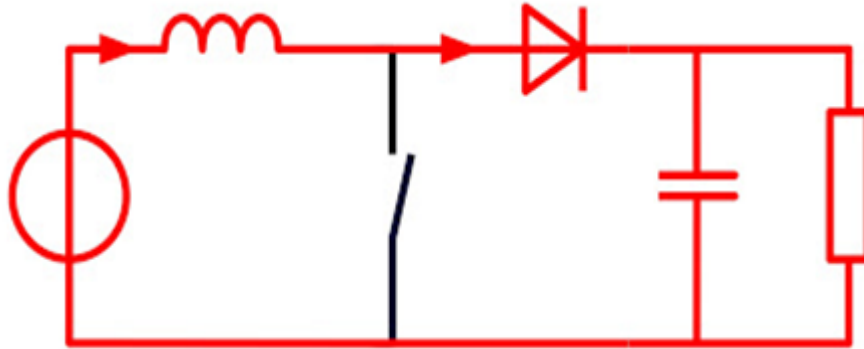


Gambar 2. 1 Fase konduksi

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 $330\ \mu\text{H}$, menyimpan energi listrik dalam bentuk medan magnetik pada inti toroid. Pada saat yang sama, kapasitor filter $47\ \mu\text{F}$ menyuplai daya secara mandiri ke beban.

- 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

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).

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 :

- V_{out} = tegangan output
- V_{in} = tegangan input
- D = duty cycle

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 pemunculan 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 μ H) tanpa risiko kejenuhan inti magnetik.
2. Reduksi Riak Tegangan: Meratakan gelombang tegangan keluaran pada kapasitor filter 47 μ 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 lingkaran 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 ($K = 101$):

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

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 $K_p = 1$, $K_i = 3$, dan $K_d = 0,01$. 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 lingkaran 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.

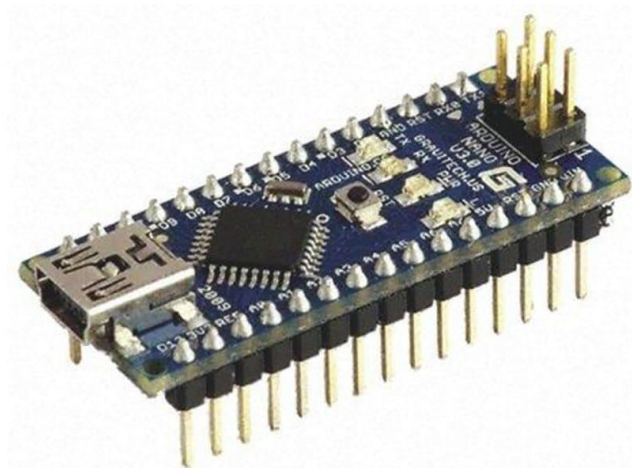
2.2.7 Sistem Kendali Lingkar Tertutup (Closed Loop)

Sistem kendali lingkaran 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.

2.2.8 Rangkaian Umpan Balik (Feedback)

Komponen kritis yang membedakan dan menjembatani peralihan dari sistem *open loop* menjadi *closed loop* adalah jalur umpan balik (*feedback*). *Feedback* bertindak sebagai instrumen sensorik yang membaca variabel fisik keluaran, lalu mentransformasikannya menjadi sinyal informasi yang dapat diproses oleh unit pengendali. Dalam sirkuit konverter daya, diterapkan mekanisme umpan balik negatif (*negative feedback*), di mana sinyal tegangan tinggi keluaran dikondisikan oleh sirkuit pembagi tegangan menjadi skala aman (0 – 5 V) untuk dibandingkan dengan nilai *setpoint* pada mikrokontroler. Tanpa adanya jalur *feedback* ini, sistem kendali tertutup tidak dapat berfungsi karena unit pemroses kehilangan informasi *real-time* mengenai kondisi aktual pada terminal beban.

2.2.9 Arduino Nano



Gambar 2. 3 Arduino Nano

Pusat komputasi dan kendali dari modul pembelajaran *Dual-Mode Boost Converter* ini bertumpu pada mikrokontroler Arduino Nano yang mengintegrasikan chip silikon ATmega328P. Perangkat pemrosesan mikro ini beroperasi pada tegangan kerja 5 Volt DC dengan dukungan osilator eksternal berkecepatan 16 MHz, serta memiliki memori kilat (*Flash Memory*) sebesar 32 KB untuk menyimpan seluruh baris kode program algoritma. Arduino Nano dipilih karena dimensinya yang kompak namun memiliki densitas fitur yang tinggi, mencakup 14 pin *Digital Input/Output* yang mendukung modulasi lebar pulsa (*Pulse Width*

Modulation / PWM) serta 8 pin *Analog Input* dengan resolusi *Analog-to-Digital Converter* (ADC) sebesar 10-bit. Di dalam arsitektur sirkuit ini, Arduino Nano mengemban tugas multifungsi yang berjalan secara simultan dalam sebuah siklus komputasi tertutup (*execution loop*). Mikrokontroler secara kontinu membaca level tegangan analog dari potensiometer penyetel dan mendeteksi kondisi logika digital dari sakelar pemilih mode. Bersamaan dengan itu, pin analog A1 memproses umpan balik berupa penurunan tegangan dari sirkuit pembagi tegangan untuk mengetahui nilai tegangan luaran aktual. Data-data numerik tersebut kemudian diolah melalui perhitungan algoritma *Proportional-Integral-Derivative* (PID) untuk memproduksi pulsa PWM berfrekuensi tinggi sebesar 62.5 kHz melalui modifikasi internal pada register *Timer0*. Sinyal inilah yang menjadi instruksi utama bagi pengemudian waktu buka-tutup komponen pensaklaran daya.

Tabel 2. 1 Pin Arduino Nano

No	Nama Pin	Kategori	Fungsi Utama	Keterangan
1	D0 (RX)	Digital	UART RX	Penerima data komunikasi serial
2	D1 (TX)	Digital	UART TX	Pengirim data komunikasi serial
3	D2	Digital	Digital I/O, Interrupt	Mendukung interupsi eksternal
4	D3	Digital	Digital I/O, PWM	Output PWM
5	D4	Digital	Digital I/O	Input/output digital
6	D5	Digital	Digital I/O, PWM	Output PWM
7	D6	Digital	Digital I/O, PWM	Output PWM
8	D7	Digital	Digital I/O	Input/output digital
9	D8	Digital	Digital I/O	Input/output digital
10	D9	Digital	Digital I/O, PWM	Output PWM
11	D10	Digital	Digital I/O, PWM, SPI	Slave Select (SS)
12	D11	Digital	Digital I/O, PWM, SPI	MOSI (SPI)
13	D12	Digital	Digital I/O, SPI	MISO (SPI)

14	D13	Digital	Digital I/O, SPI	SCK dan LED internal
15	A0	Analog	Input Analog	ADC 10-bit
16	A1	Analog	Input Analog	ADC 10-bit
17	A2	Analog	Input Analog	ADC 10-bit
18	A3	Analog	Input Analog	ADC 10-bit
19	A4	Analog	Input Analog, I ² C	SDA (Data I ² C)
20	A5	Analog	Input Analog, I ² C	SCL (Clock I ² C)
21	VIN	Power	Tegangan Masuk	Input tegangan eksternal (7–12 V)
22	5V	Power	Tegangan Keluaran	Tegangan 5 V
23	3.3V	Power	Tegangan Keluaran	Tegangan 3.3 V
24	GND	Power	Ground	Ground sistem
25	RESET	Kontrol	Reset Sistem	Mengatur ulang Arduino
26	AREF	Referensi	Referensi ADC	Tegangan referensi ADC
27	IOREF	Referensi	Referensi Logika	Referensi tegangan I/O

2.2.10 MOSFET IRLZ44N



Gambar 2. 4 MOSFET

Konversi dan kenaikan level tegangan pada sistem ini dikerjakan secara fisik oleh komponen semikonduktor daya utama berupa MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) tipe IRLZ44N dengan kemasan standar TO-220. Komponen ini merupakan jenis *Logic-Level* N-Channel Power MOSFET yang memiliki ketahanan tegangan balik mutlak (*Maximum Drain-to-Source*

V_{DS}) sebesar 55 Volt dan kemampuan mengalirkan arus kontinu (I_D) hingga mencapai 47 Ampere pada suhu cangkang 25°C.

Karakteristik unggulan dari IRLZ44N terletak pada ambang tegangan gerbang (*Gate Threshold Voltage* / $V_{GS(th)}$) yang sangat rendah (1,0 V – 2,0 V) serta nilai hambatan internal saat kondisi aktif jenuh (*Drain-to-Source On-Resistance* / $R_{DS(on)}$) yang kecil, yaitu sebesar 0,025 Ω (25 m Ω) pada tegangan pemicu $V_{GS} = 5,0$ Volt. Fitur *logic-level* ini sangat krusial karena memungkinkan kaki *Gate* dipicu secara langsung menggunakan tegangan logika 5,0 V dari pin D9 Arduino Nano tanpa memerlukan sirkuit *IC gate driver* tambahan.

Tabel 2. 2 Pin MOSFET

No	Nama Pin	Fungsi Utama
1	Gate	Bertindak sebagai pintu gerbang kontrol yang menerima sinyal pemicu <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM) dari mikrokontroler.
2	Drain	Bertindak sebagai saluran utama masuknya arus listrik frekuensi tinggi dari sirkuit konversi.
3	Source	Bertindak sebagai muara tempat mengalirnya arus listrik dari <i>Drain</i> kembali menuju kutub negatif catu daya (<i>Ground</i>).

2.2.11 Induktor



Gambar 2. 5 Induktor

Proses penyimpanan energi kinetik listrik dipikul oleh komponen induktor toroid berspesifikasi 330 μH . Induktor yang digunakan memanfaatkan inti serbuk besi melingkar (*Iron Powder Toroid Core*) yang dililit kawat tembaga enamel berkualitas tinggi dengan rating arus minimal 5 Ampere. Inti toroid dipilih karena memiliki medan magnet eksternal yang sangat rendah (*low electromagnetic interference*) dan efisiensi yang baik pada sirkuit berfrekuensi tinggi. Nilai induktansi sebesar 330 μH ini telah disesuaikan secara matematis agar selaras dengan frekuensi pensaklaran 62.5 kHz guna mencegah terjadinya fenomena kejenuhan inti magnetik (*magnetic saturation*) saat menyerap arus masukan. Fungsi utama dari induktor ini adalah sebagai media penyimpanan energi listrik jangka pendek dalam bentuk medan magnet selama fase MOSFET berada dalam kondisi aktif (*ON state*). Ketika MOSFET tiba-tiba beralih ke kondisi tidak aktif (*OFF state*), medan magnet pada induktor akan runtuh seketika, menginduksi gaya gerak listrik balik yang melahirkan lonjakan tegangan tinggi searah searah yang siap diteruskan ke sirkuit filter.

2.2.12 Dioda Schottky



Gambar 2. 6 Dioda Schottky

Tegangan tinggi hasil induksi dari induktor dialirkan melewati komponen penyearah berkecepatan tinggi berupa Dioda Schottky tipe SR3150 (*GoodWork Original*). Dioda ini memiliki spesifikasi tegangan balik puncak (*Maximum*

Repetitive Reverse Voltage / V_{RRM}) sebesar 150 Volt dan kemampuan mengalirkan arus maju rata-rata (*Average Forward Rectified Current / I_F*) nominal sebesar 3 Ampere.

Penggunaan Dioda Schottky SR3150 sangat ideal untuk sirkuit konverter peningkat tegangan frekuensi tinggi (62,5 kHz) karena memiliki jatuh tegangan maju (*Forward Voltage Drop / V_F*) yang sangat rendah ($\approx 0,9$ V) serta kecepatan pensaklaran yang sangat kilat (*ultra-fast switching*) tanpa masalah *reverse recovery time* yang signifikan. Dioda ini bertindak sebagai katup satu arah yang melewatkan arus bertegangan tinggi dari induktor menuju terminal keluaran, sekaligus mencegah muatan kapasitor filter mengalir balik (*backfeed*) menuju *ground* saat MOSFET berada pada siklus *ON*.

2.2.13 Kapasitor

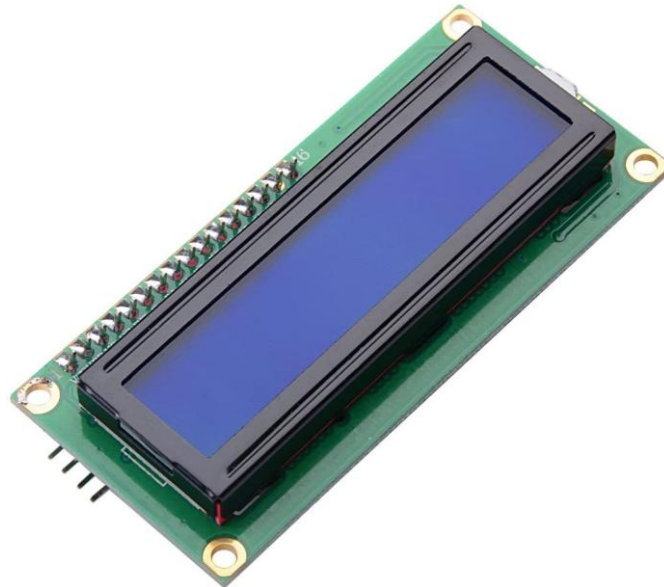


Gambar 2. 7 Kapasitor

Terminal keluaran akhir dari sistem ini dikondisikan oleh penyaring riak komponen pasif kapasitor elektrolit bernilai kapasitas 47 μ F dengan rating tegangan kerja maksimal mencapai 160 Volt DC. Pilihan rating 160V diaplikasikan sebagai langkah preventif (*overvoltage protection*) demi menjamin struktur fisik kapasitor tidak akan mendidih atau meledak ketika sistem dipaksa mengalirkan tegangan tinggi dalam eksperimen *Open Loop* menuju batas 80 Volt. Kapasitor filter ini mengemban fungsi krusial untuk menyerap denyut-denyut arus berkecepatan tinggi

dari dioda dan meratakan riak tegangan (*voltage ripple*) hasil pensaklaran, sehingga mengubah bentuk gelombang getar menjadi tegangan DC murni yang halus, stabil, dan aman sebelum disalurkan ke beban nyata atau dibaca oleh sensor pembagi tegangan.

2.2.14 LCD I2C 16x2



Gambar 2. 8 LCD I2C 16x2

Monitoring parameter data kelistrikan menggunakan layar karakter LCD 16 kolom x 2 baris yang telah dilengkapi dengan modul *driver* komunikasi serial I2C PCF8574 pada bagian belakangnya. Integrasi modul I2C ini mereduksi kebutuhan pengkabelan mikrokontroler secara signifikan, dari yang semula membutuhkan 6 pin data digital menjadi hanya menggunakan 2 pin serial analog, yaitu pin A4 sebagai *Serial Data* (SDA) dan pin A5 sebagai *Serial Clock* (SCL). Layar monitor ini bertugas menampilkan parameter esensial sistem secara mandiri (*stand-alone*) tanpa ketergantungan komputer, mencakup indikator teks mode yang sedang aktif, visualisasi nilai target voltase (*Setpoint*), pembacaan tegangan aktual hasil konversi data sensor, serta persentase nilai tugas (*Duty Cycle*) pensaklaran.

Tabel 2. 3 Pin LCD I2C 16x2

No	Nama Pin	Fungsi	Keterangan
1	GND	Ground	Terhubung ke ground sistem mikrokontroler
2	VCC	Catu Daya	Tegangan suplai LCD, umumnya +5 V
3	SDA	Serial Data	Jalur data komunikasi I ² C antara mikrokontroler dan LCD
4	SCL	Serial Clock	Jalur clock komunikasi I ² C antara mikrokontroler dan LCD

2.2.15 Potensiometer



Gambar 2. 9 Potensiometer

Alat input kendali manual pada sirkuit menggunakan komponen potensiometer linier rotasi berspesifikasi resistansi total 10 k Ω . Potensiometer dihubungkan ke pin analog A1 untuk memberikan variasi tegangan input analog dari 0 hingga 5 Volt yang akan diterjemahkan oleh program mikrokontroler menjadi nilai data digital (0 hingga 1023) melalui unit ADC internal Arduino Nano. Komponen ini memiliki fungsi ganda dinamis yang diatur oleh logika program; pada mode *Open Loop*, putaran potensiometer bertindak menyetir langsung persentase lebar pulsa PWM secara manual, sedangkan pada mode *Closed Loop*,

funksinya bergeser sebagai instrumen pengubah nilai batas target tegangan (*Setpoint*) konverter.

2.2.16 Saklar Toggle



Gambar 2. 10 Saklar Toggle

Peralihan sistem kendali dijumpatani oleh komponen sakelar toggle jenis SPDT (*Single Pole Double Throw*). Sakelar mekanis ini dipasang pada jalur input pin digital D2 Arduino Nano. Fungsi utama dari sakelar toggle ini adalah bertindak sebagai selektor mode fisik dengan memutuskan atau menghubungkan jalur pin digital D2 ke potensial tanah (*ground*). Ketika posisi sakelar merubah nilai logika dari *HIGH* menjadi *LOW*, program mikrokontroler akan menangkap perubahan status tersebut untuk mengeksekusi perpindahan rute algoritma kendali dari operasi manual jerat terbuka (*Open Loop*) menuju operasi otomatis jerat tertutup (*Closed Loop*) berbasis PID.

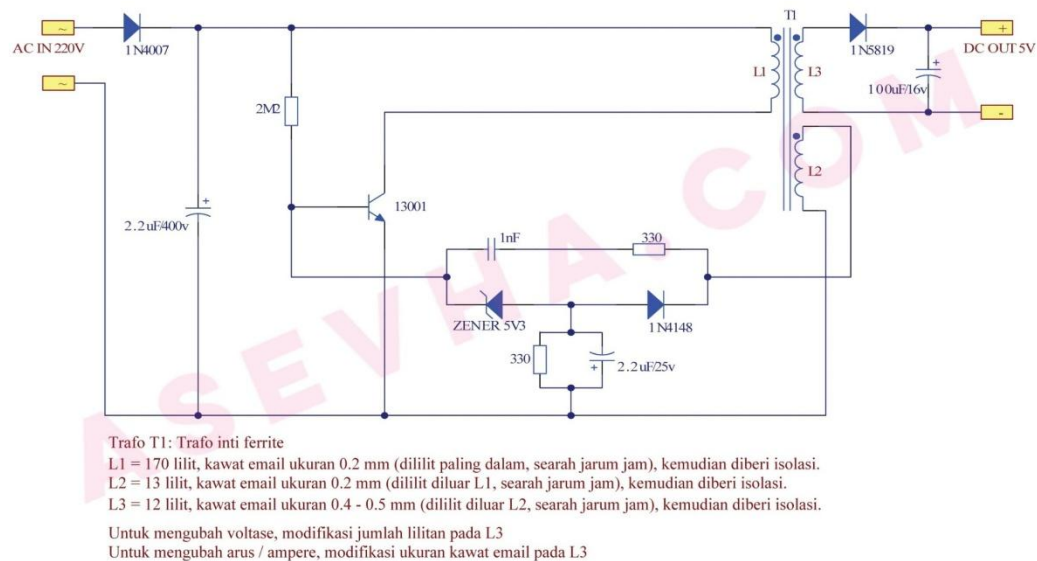
2.2.17 Charger HP



Gambar 2. 11 Charger HP

Perangkat *charger* HP (5 V DC) difungsikan sebagai penyedia catu daya eksternal yang mengonversi tegangan bolak-balik AC 220 V dari jaringan listrik utama menjadi tegangan searah DC 5 V yang terisolasi. Penggunaan *charger* HP berbasis antarmuka USB ini sangat praktis dan memberikan tingkat isolasi listrik yang andal. Catu daya ini dihubungkan secara langsung ke port USB mikrokontroler Arduino Nano menggunakan kabel USB.

Pada rancang bangun modul *Boost Converter* ini, pasokan daya 5 V dari *charger* HP bertugas memberikan suplai listrik mandiri khusus untuk sirkuit kontrol utama, meliputi mikrokontroler Arduino Nano, layar LCD 16x2 I2C, potensiometer, dan sakelar pemilih mode. Sebagian besar *charger* HP saat ini telah mengadopsi teknologi *Switched-Mode Power Supply* (SMPS) yang sanggup menghasilkan tegangan keluaran 5 V DC yang stabil. Keunggulan regulasi dan isolasi listrik tersebut sangat ideal untuk menghindarkan unit mikrokontroler dan jalur referensi *Analog-to-Digital Converter* (ADC) Arduino Nano dari efek gangguan *noise* akibat pensaklaran berfrekuensi tinggi 62,5 kHz pada sirkuit daya utama.



Gambar 2. 12 Skema Charger HP 5V

Rangkaian internal di dalam kepala *charger* HP yang mengonversi tegangan bolak-balik AC 220 V menjadi tegangan searah 5 V DC mengadopsi sirkuit *Switched-Mode Power Supply* (SMPS) bertopologi *Flyback Converter*. Penggunaan teknologi pensaklaran frekuensi tinggi ini menggantikan peran transformator besi 50 Hz konvensional yang berukuran besar dan berat, sehingga sirkuit di dalam kepala *charger* dapat dibuat sangat ringkas, efisien, serta memiliki tingkat isolasi listrik yang aman bagi pengguna.

Proses konversi di dalam kepala *charger* diawali pada sisi penyearah masukan tegangan tinggi, di mana tegangan AC 220 V dari jala-jala listrik disearahkan secara langsung oleh dioda penyearah jembatan (*bridge rectifier*) dan diratakan oleh kapasitor elektrolit bertegangan tinggi dengan rating 400 V. Proses perataan ini menghasilkan tegangan searah konstan sebesar kurang lebih 310 V DC pada sisi primer. Tegangan DC tinggi tersebut kemudian dialirkan menuju sakelar semikonduktor berkecepatan tinggi, berupa BJT daya atau Power MOSFET, yang dikendalikan oleh IC pengontrol PWM internal untuk diputus dan dihubungkan secara cepat pada frekuensi tinggi berkisar antara 40 kHz hingga 100 kHz.

Sinyal DC berfrekuensi tinggi ini kemudian melewati kumparan primer transformator ferit berukuran mikro yang berfungsi mentransfer energi listrik

menjadi medan magnetik dan menginduksikannya ke kumparan sekunder. Selain menurunkan level tegangan (*step-down*) menjadi skala tegangan rendah, transformator ferit ini bertindak sebagai sekat isolasi galvanis (*galvanic isolation*) yang memisahkan secara fisik antara area tegangan tinggi bahaya di sisi primer AC 220 V dan area tegangan rendah aman di sisi sekunder 5 V DC. Selanjutnya, tegangan AC frekuensi tinggi pada kumparan sekunder disearahkan kembali oleh Dioda Schottky berkecepatan tinggi (*Ultra-Fast Rectifier*) yang memiliki jatuh tegangan maju amat rendah ($\approx 0,3$ V), lalu diratakan oleh kapasitor elektrolit *Low-ESR* untuk menghasilkan tegangan DC yang halus dan bebas dari riak (*ripple*).

Untuk menjaga agar tegangan keluaran terminal USB tetap terkunci presisi pada 5,0 V DC meskipun terjadi fluktuasi penarikan arus beban, sirkuit internal dilengkapi dengan IC referensi presisi TL431 dan komponen umpan balik optik (*Optocoupler* PC817). IC TL431 secara kontinu memantau tegangan keluaran 5 V dan mentransmisikan sinyal koreksi dalam bentuk sinyal cahaya inframerah melewati *Optocoupler* menuju IC pengontrol di sisi primer tegangan tinggi. Mekanisme umpan balik optik ini secara otomatis menyesuaikan lebar pulsa PWM pensaklaran tanpa mengompromikan isolasi listrik, sehingga kestabilan tegangan 5 V pada port USB tetap terjaga dengan aman. Seluruh proses konversi dan regulasi tertutup di dalam kepala *charger* ini menghasilkan pasokan daya 5 V DC yang murni dan terisolasi, yang disalurkan melalui kabel USB menuju port USB Arduino Nano untuk menyuplai mikrokontroler, layar LCD 16x2 I2C, serta instrumen masukan potensiometer secara stabil.

2.2.18 Analisis Perhitungan

Analisis perhitungan merupakan bagian penting dalam landasan teori yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja dan ketepatan suatu sistem secara kuantitatif. Melalui analisis ini, perbedaan antara nilai hasil perancangan atau pengukuran dengan nilai acuan dapat dinyatakan dalam bentuk parameter numerik yang terukur. Pendekatan kuantitatif diperlukan untuk memberikan gambaran objektif mengenai tingkat kesalahan, ketelitian, dan konsistensi sistem yang dirancang.

Dalam konteks modul praktikum *Dual-Mode DC-DC Boost Converter* berbasis Arduino Nano, analisis perhitungan digunakan untuk menilai akurasi regulasi tegangan keluaran (V_{out}), kestabilan proses konversi daya, serta keandalan aksi kendali PID dalam mengunci tegangan target (*setpoint*) saat terjadi variasi pembebanan. Parameter statistik dan metrik kesalahan digunakan sebagai alat bantu untuk mengevaluasi seberapa besar penyimpangan tegangan yang terjadi selama operasi mode *Open Loop* maupun *Closed Loop*.

Beberapa metode analisis yang umum digunakan dalam evaluasi sistem kendali dan daya meliputi *Mean Square Error* (MSE), persentase kesalahan (*percentage error*), serta standar deviasi. Masing-masing metode memiliki karakteristik dan fungsi yang berbeda dalam menggambarkan tingkat kesalahan dan variasi data. Oleh karena itu, pada subbab selanjutnya akan dibahas secara rinci mengenai konsep dan perhitungan dari masing-masing metode analisis tersebut sebagai dasar evaluasi kinerja sistem.

a) MSE

Mean Square Error (MSE) merupakan salah satu metrik statistik yang digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan antara nilai hasil pengukuran aktual dengan nilai acuan atau target yang diharapkan. MSE dihitung dengan cara merata-ratakan kuadrat selisih antara nilai acuan dan nilai hasil pengukuran sistem. Dengan melakukan pengkuadratan pada selisih nilai, MSE memberikan bobot yang lebih besar terhadap kesalahan dengan deviasi tinggi, sehingga sangat sensitif terhadap lonjakan tegangan (*overshoot*) atau penurunan tegangan (*voltage drop*) yang signifikan. Secara matematis, *Mean Square Error* (MSE) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

dengan:

n = jumlah data pengamatan pengujian,

y_i = nilai tegangan acuan atau target *setpoint* pada data ke- i ($V_{setpoint}$),

$\hat{y}_i$ = nilai tegangan hasil pengukuran aktual pada data ke- i (V_{out}).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa MSE diperoleh dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai tegangan acuan dan nilai tegangan aktual hasil konversi. Semakin kecil nilai MSE, maka semakin kecil pula rata-rata kesalahan yang terjadi, yang menandakan bahwa sistem konverter memiliki tingkat ketelitian dan regulasi tegangan yang lebih baik. Sebaliknya, nilai MSE yang besar menunjukkan adanya penyimpangan yang signifikan antara tegangan keluaran konverter dan nilai *setpoint* yang diharapkan.

Dalam analisis kinerja sistem kendali, MSE banyak digunakan sebagai metrik dasar untuk mengevaluasi akurasi suatu algoritma kontrol. Pada modul *Dual-Mode DC-DC Boost Converter*, MSE digunakan untuk mengevaluasi akumulasi selisih antara target tegangan *setpoint* (12,0 V – 50,0 V DC) dengan tegangan keluaran fisik yang terukur pada terminal beban. Dengan menggunakan MSE, kinerja algoritma PID dalam merespons perubahan beban dapat dianalisis secara kuantitatif.

b) Persentase Error (Percentage Error)

Persentase *error* (*percentage error*) merupakan metode evaluasi yang digunakan untuk menyatakan besarnya kesalahan antara nilai hasil pengukuran sistem dan nilai acuan dalam bentuk persentase. Metode ini memberikan gambaran relatif mengenai seberapa besar penyimpangan tegangan yang terjadi dibandingkan dengan nilai sebenarnya, sehingga memudahkan dalam menilai tingkat akurasi regulasi konverter secara umum. Secara matematis, persentase *error* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\text{Percentage Error} = \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\%$$

dengan:

y_i = nilai tegangan acuan atau target *setpoint* ($V_{setpoint}$),

$\hat{y}_i$ = nilai tegangan hasil pengukuran aktual (V_{out}).

Untuk analisis terhadap sejumlah data pengujian, persentase *error* dihitung pada setiap titik pengamatan (misalnya pada variasi *Duty Cycle* atau variasi beban), kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh nilai kesalahan rata-rata dalam bentuk persentase. Nilai persentase *error* yang kecil menunjukkan bahwa tegangan keluaran konverter mendekati target *setpoint*, sedangkan nilai persentase *error* yang besar mengindikasikan adanya *drop* tegangan atau ketidakstabilan sistem yang signifikan.

Dalam evaluasi kinerja konverter daya, persentase *error* sering digunakan karena bersifat intuitif dan mudah dipahami, terutama ketika membandingkan kinerja antara mode *Open Loop* (manual) dan mode *Closed Loop* (PID). Metrik ini memberikan sudut pandang relatif terhadap ketahanan regulasi beban (*load regulation*).

Pada modul *DC-DC Boost Converter*, persentase *error* digunakan untuk mengevaluasi ketepatan tegangan keluaran aktual dibandingkan dengan *setpoint* yang ditetapkan melalui potensiometer. Pada mode *Closed Loop*, persentase *error* yang bernilai di bawah 1% menandakan bahwa kendali PID bekerja secara presisi dalam mengompensasi fluktuasi beban.

c) Rumus Arus Keluaran (Hukum Ohm)

Hukum Ohm menyatakan bahwa arus listrik yang mengalir melalui suatu penghantar atau beban berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan dan berbanding terbalik dengan hambatan beban tersebut.

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

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).

d) Rumus Disipasi Daya pada Beban

Disipasi daya adalah besarnya daya listrik yang diubah menjadi energi lain (umumnya berupa panas) pada elemen beban saat dialiri arus listrik.

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

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)