

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Diperlukan berbagai referensi untuk membantu menyelesaikan proses penelitian ini. Maka, diperlukan referensi dari penelitian terdahulu, seperti penelitian-penelitian dibawah ini antara lain :

1. Penelitian yang dilakukan oleh Hamzah Maulana Azhar pada tahun 2021 berjudul “Optimasi *Battery Charging* pada Pendingin Minuman dengan Sumber *Solar Cell* untuk Beban Peltier Menggunakan *Buckboost Converter*” membahas perancangan sistem pengisian baterai berbasis *solar cell* menggunakan *buck-boost converter* untuk menjaga kestabilan tegangan saat intensitas cahaya matahari berubah. Sistem dirancang dengan ATtiny85 sebagai pengendali, sensor tegangan dan arus, serta baterai 12V/5Ah sebagai penyimpan energi yang digunakan untuk pendingin Peltier. Hasil pengujian menunjukkan tegangan keluaran stabil pada 14 V DC dengan waktu pengisian sekitar 4 jam dan kesalahan pengukuran sensor kurang dari 3%. Penelitian ini membuktikan efektivitas *buck-boost converter* dalam pengisian baterai berbasis energi surya serta menyarankan pengembangan lebih lanjut melalui analisis efisiensi dan penerapan MPPT untuk peningkatan kinerja sistem (Azhar, 2021).
2. Penelitian oleh Imam Setyawan dan Bambang Suprianto (2019) berjudul “Rancang Bangun Prototype *Solar Cell Buck-Boost Converter* Menggunakan Kontrol *Fuzzy* Diimplementasikan pada Aerator Tambak Udang” membahas perancangan *buck-boost converter* berbasis kontrol logika *fuzzy* untuk menstabilkan tegangan panel surya 100 Wp pada sistem aerator tambak udang. Dengan Arduino Uno sebagai pengendali, sistem mampu menjaga keluaran konstan 14 volt dengan *error* sensor tegangan dan arus di bawah 3%. Hasil menunjukkan kontrol *fuzzy* lebih stabil dibanding tanpa kontrol, meski terjadi sedikit penurunan tegangan hingga 13 volt. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kontrol *fuzzy* efektif untuk menjaga kestabilan pengisian baterai dan menyarankan peningkatan kapasitas arus *converter* (Setyawan & Suprianto, 2019).

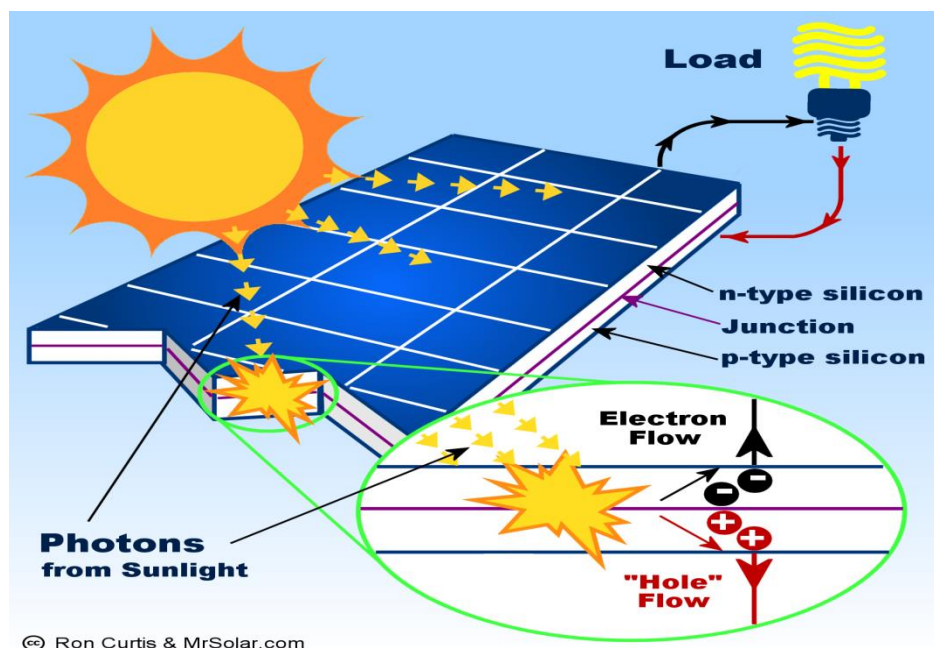
3. Penelitian oleh Benekdiktus Angger Wahyu Widhiawan, Susatyo Handoko, dan Darjat (2021) berjudul “Perancangan Sistem *Charging Baterai* Menggunakan *Buck-Boost Converter* dengan Sumber Panel Surya Berbasis Mikrokontroler Arduino Nano” membahas perancangan sistem pengisian baterai 12V berbasis panel surya menggunakan *buck-boost converter* dengan kontrol *Proportional-Integral* (PI) pada Arduino Nano. Hasil menunjukkan tegangan keluaran stabil di 13,58 V, arus pengisian rata-rata 0,44 A, dan efisiensi mencapai 90,06% dengan waktu pengisian sekitar 120 menit. Sistem ini terbukti efektif menjaga kestabilan pengisian baterai dari sumber energi surya (Widhiawan, Handoko, & Darjat, 2021).
4. Penelitian yang dilakukan oleh Regiantoro Kunigar, Adnan Rafi Al Tahtawi, dan Sofyan Muhammad Ilman (2023) berjudul “Desain dan Implementasi Modul Konverter DC-DC Jenis *Buck-Boost* dengan Pengendali PID” membahas secara mendalam perancangan dan implementasi modul konverter DC-DC tipe *buck-boost* dengan sistem kendali tertutup (*closed-loop*) menggunakan pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Tujuan penelitian ini adalah untuk menghasilkan konverter yang mampu mempertahankan tegangan keluaran tetap stabil meskipun terjadi perubahan pada tegangan *input* maupun beban. Dalam proses perancangan, metode tuning Ziegler-Nichols tipe I digunakan untuk menentukan parameter PID yang optimal sehingga sistem dapat merespons secara cepat terhadap gangguan atau perubahan beban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi dengan baik pada kedua mode, yaitu *buck* (penurunan tegangan) dan *boost* (penaikan tegangan). Pada tahap simulasi, sistem memperoleh *error steady-state* sebesar 0,4% dan *settling time* selama 2 detik, menunjukkan performa yang responsif dan stabil. Sementara itu, pada pengujian eksperimental diperoleh *error* antara 17,4% hingga 20,8% dengan *settling time* sekitar 2 detik, yang menandakan masih adanya deviasi akibat faktor nonideal seperti kehilangan daya pada komponen dan ketidakstabilan sinyal *input*. Meskipun terdapat sedikit osilasi pada kondisi *steady-state*, secara keseluruhan pengendali PID terbukti efektif dalam meningkatkan performa dan kestabilan tegangan keluaran konverter dibandingkan sistem tanpa pengendali. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan pengendali PID berbasis metode Ziegler-Nichols mampu menjaga kestabilan dan efisiensi sistem konverter DC-DC tipe *buck-boost*, serta

menyarankan pengembangan lebih lanjut melalui optimasi parameter PID adaptif dan penggunaan komponen dengan efisiensi lebih tinggi untuk mengurangi *error* pada pengujian nyata (Kunigar, Al Tahtawi, & Ilman, 2023).

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Solar cell

Solar cell adalah komponen atau perangkat yang dapat mengubah energy cahaya matahari menjadi energy listrik dengan menggunakan prinsip *photovoltaic*. Pada saat *solar cell* menyerap foton (partikel cahaya) dari sinar matahari energy mereka membangkitkan electron-electron dalam material semikonduktor, kemudian menciptakan arus listrik. *Solar cell* mampu menerima energy cahaya matahari secara terus menerus dalam intensitas tertentu. Ini merupakan salah satu bentuk energy terbarukan yang paling bersih dan berkelanjutan. Kemampuan *solar cell* dalam menangkap energi cahaya matahari berlangsung secara kontinu selama terdapat penyinaran dengan intensitas tertentu, sehingga menjadikannya sebagai salah satu teknologi energi terbarukan yang dapat diandalkan. Dibandingkan dengan sumber energi konvensional, *solar cell* lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas buang atau polutan berbahaya. Selain itu, teknologi ini juga berkelanjutan mengingat sinar matahari tersedia secara melimpah di hampir seluruh wilayah di dunia (Rafiud, Yusri dan Yusran, 2022). Gambar pelepasan electron di solar cell dapat dilihat pada Gambar 2.1.

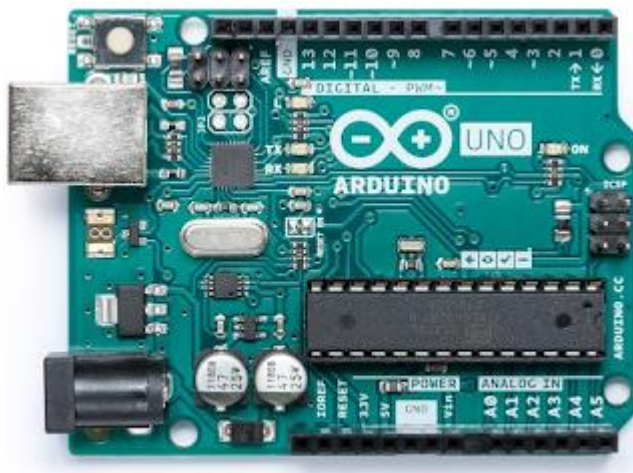


Gambar 2.1 *Photovoltaic effect*

Dari Gambar 2.1 Merupakan prinsip kerja panel surya didasarkan pada kemampuan sel surya dalam mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Proses ini berlangsung ketika sel-sel *photovoltaic* yang tersusun di dalam panel menangkap radiasi sinar matahari. Energi dari foton cahaya tersebut kemudian diserap oleh material semikonduktor pada sel surya, sehingga elektron di dalam material memperoleh energi tambahan dan bergerak bebas. Pergerakan elektron inilah yang menghasilkan aliran arus listrik dalam bentuk arus searah (direct current atau DC).

Energi listrik DC yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara langsung untuk mengoperasikan peralatan listrik bertegangan searah, atau diubah terlebih dahulu menjadi arus bolak-balik (alternating current atau AC) melalui inverter agar dapat digunakan oleh peralatan rumah tangga pada umumnya (Dedy, Ali, dan Ridho, 2021).

2.2.2 Arduino Uno



Gambar 2.2 Arduino Uno

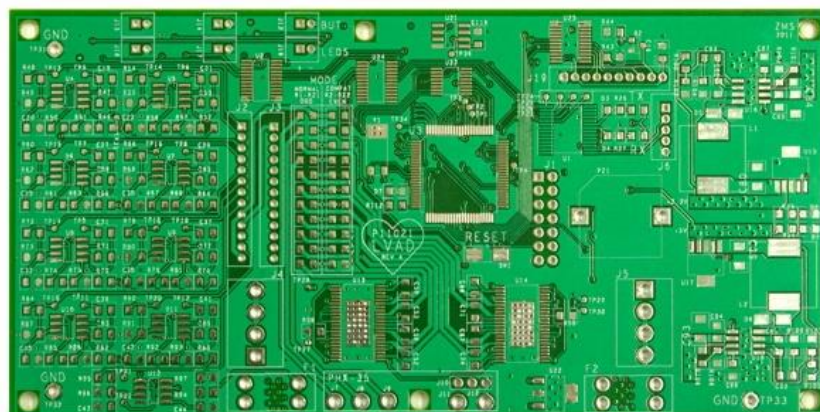
Arduino Uno adalah sebuah mikrokontroler berbasis ATmega328P yang banyak digunakan dalam bidang elektronika dan otomasi karena kemudahan penggunaannya. *Board* ini dilengkapi dengan 14 pin digital *input/output*, di mana 6 di antaranya dapat digunakan sebagai *output* PWM, serta 6 pin analog *input* untuk membaca sinyal dari sensor. Arduino Uno beroperasi pada tegangan 5 volt dengan sumber daya yang dapat berasal dari *port* USB komputer atau adaptor eksternal 7–12 volt. Mikrokontroler ini memiliki memori *flash* sebesar 32 KB, SRAM 2 KB, dan EEPROM 1 KB, yang memungkinkan penyimpanan program sederhana hingga menengah. Kelebihan utama

Arduino Uno terletak pada kemampuannya untuk diprogram menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman berbasis C/C++, serta dukungan komunitas yang luas, sehingga sangat cocok digunakan dalam proyek-proyek seperti sistem kendali otomatis, konverter daya, robotika, dan *Internet of Things* (IoT) (Tomi, Yosi, Muhar, 2020).

Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino Uno

Spesifikasi	Keterangan
Mikrokontroler	ATmega328P
Tegangan Operasi	5 Volt DC
Tegangan Input	7 – 12 Volt DC
Tegangan Input (batas)	6 – 20 Volt DC
Pin Digital I/O	14 pin (6 di antaranya dapat digunakan sebagai <i>output</i> PWM)
Pin Input Analog	6 pin
Arus DC per Pin I/O	20 mA
Arus DC untuk Pin 3.3V	50 mA
Memori Flash	32 KB (0.5 KB digunakan oleh <i>bootloader</i>)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frekuensi Clock	16 MHz
Port Komunikasi	USB Type-B, UART (serial), I2C, dan SPI
Regulator Tegangan	Tersedia (<i>on-board</i>)
LED Indikator	1 buah (terhubung ke pin digital 13)
Dimensi Fisik	68.6 mm x 53.4 mm

2.2.3 Papan PCB



Gambar 2.3 Papan PCB

Papan PCB (Printed Circuit Board) adalah media dasar yang digunakan untuk menyusun dan menghubungkan komponen elektronik dalam suatu rangkaian secara

teratur dan permanen. PCB terbuat dari bahan isolator seperti *fiberglass* (FR-4) atau epoksi yang dilapisi oleh lapisan tipis tembaga sebagai jalur konduktor untuk mengalirkan arus listrik antar komponen. Jalur tembaga ini berfungsi menggantikan sambungan kabel konvensional, sehingga rangkaian menjadi lebih rapi, kuat, dan mudah direproduksi. PCB umumnya terdiri dari satu lapisan (*single layer*), dua lapisan (*double layer*), atau bahkan lebih (*multi-layer*) tergantung pada kompleksitas rangkaian yang dirancang. Dalam sistem seperti *buck-boost converter* berbasis Arduino, papan PCB digunakan untuk menempatkan komponen seperti MOSFET, dioda, kapasitor, dan sensor secara efisien serta memastikan koneksi listrik antar komponen berjalan stabil dan minim gangguan sinyal (Subur, Antonius, Jhonson, Joslen, Piala Mutiara, Rasmi, 2025).

2.2.4 Dioda (Penyearah)



Gambar 2.4 Dioda (Penyearah)

Dioda adalah komponen elektronika semikonduktor yang berfungsi utama untuk mengalirkan arus listrik hanya dalam satu arah, yaitu dari anoda ke katoda, dan menghambat aliran arus ke arah sebaliknya. Komponen ini dibuat dari bahan semikonduktor seperti silikon atau germanium dengan dua terminal utama, anoda (+) dan katoda (-). Prinsip kerja dioda didasarkan pada pertemuan antara lapisan P dan N (PN junction), di mana arus hanya dapat mengalir ketika dioda dalam kondisi forward bias (anoda diberi tegangan positif terhadap katoda), sedangkan pada kondisi reverse bias dioda akan menahan arus. Dalam aplikasi sistem *buck-boost converter*, dioda berperan penting sebagai penyearah dan pengarah arus, terutama untuk mencegah arus balik dari beban menuju sumber daya, sehingga membantu menjaga kestabilan tegangan serta efisiensi sistem konversi daya (Abdul, Rizal, Pratika, Wiki, Nur, 2020).

Tabel 2.2 Spesifikasi Dioda

Parameter	Makna / Fungsi	Nilai tipikal / catatan
Tegangan balik maks. (VRRM / VR)	Tegangan maksimum yang boleh diterapkan pada dioda saat reverse tanpa rusak.	40 V, 60 V, 1000 V tergantung tipe; untuk PLTS 12–24 V biasanya pilih $\geq 2 \times V_{input}$ (mis. 40–60 V).
Arus maju kontinu (IF)	Arus DC maksimum yang dapat dilewatkan dioda secara berkelanjutan.	0.5 A — 30 A; untuk konverter kecil sering 1 A–10 A.
Arus puncak surge (IFSM)	Arus impuls singkat yang dapat ditangani (mis. saat start).	Biasanya beberapa puluh ampere (mis. 30–200 A tergantung paket).
Tegangan jatuh maju (VF)	Penurunan tegangan antara anoda-katoda saat dioda menghantarkan (mempengaruhi rugi daya).	Schottky: 0.15–0.5 V; Silicon fast: 0.6–1.1 V; 1N400x: ~ 0.7 V pada arus kecil.
Waktu pemulihan terbalik (trr)	Waktu yang diperlukan agar dioda berhenti menghantarkan saat beralih ke reverse — penting di switching converter.	Schottky: $\sim$ ns (sangat cepat, hampir tidak ada trr); fast/ultrafast: beberapa ns–100 ns; dioda biasa (1N400x): beberapa μ s (tidak cocok untuk switching cepat).
Daya disipasi maks. (Pd)	Daya maksimum yang dapat dibuang oleh paket dioda tanpa overheating.	Nilai bergantung paket (TO-220 lebih besar dari SOD-123).
Thermal resistance (RθJA)	Seberapa cepat panas mengalir dari junction ke ambient — memengaruhi kebutuhan heatsink.	Nilai spesifik paket; semakin kecil semakin bagus.
Suhu kerja (Tj)	Rentang suhu junction yang diizinkan.	Biasanya $-65 \dots +150$ °C (variasi tipe).

2.2.5 Induktor



Gambar 2.5 Induktor

Induktor adalah komponen pasif dalam rangkaian elektronik yang berfungsi untuk menyimpan energi dalam bentuk medan magnet ketika arus listrik mengalir

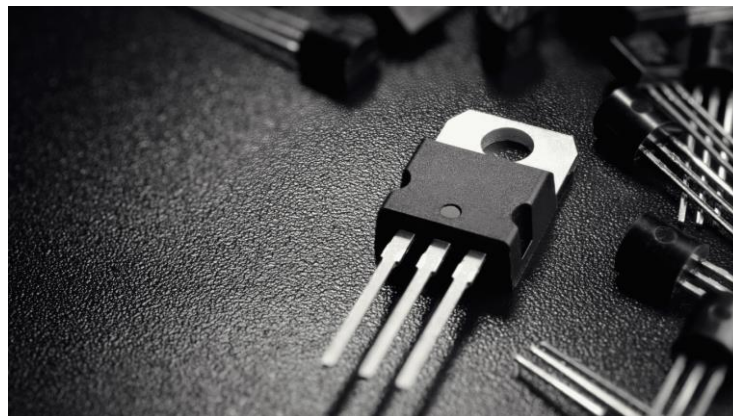
melaluinya. Komponen ini biasanya berupa lilitan kawat tembaga yang dililitkan pada inti ferit atau udara. Ketika arus melalui induktor berubah, medan magnet yang dihasilkan juga berubah, sehingga induktor cenderung menolak perubahan arus yang tiba-tiba — sifat ini dikenal sebagai *inductive reactance*. Dalam sistem *buck-boost converter*, induktor berperan sangat penting sebagai penyimpan dan penyalur energi sementara, di mana saat saklar (MOSFET) *ON*, energi disimpan dalam medan magnet induktor, dan saat saklar *OFF*, energi tersebut dilepaskan ke beban melalui dioda. Proses pengisian dan pelepasan energi yang berulang dengan cepat ini memungkinkan konverter untuk menaikkan (*boost*) atau menurunkan (*buck*) tegangan DC secara efisien dan stabil (Eko, 2022).

Tabel 2.3 Spesifikasi Induktor

Parameter	Keterangan / Fungsi	Nilai atau Contoh Umum
Induktansi (L)	Besarnya kemampuan induktor untuk menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Nilai induktansi memengaruhi kecepatan perubahan arus dan kestabilan tegangan keluaran.	100 μH – 330 μH (contoh: 320 mH digunakan dalam skripsi)
Toleransi Induktansi	Batas penyimpangan nilai induktansi dari nilai nominalnya.	$\pm 10\%$ atau $\pm 20\%$
Arus Maksimum (I_{max})	Arus maksimum yang dapat mengalir tanpa menyebabkan induktor jenuh (saturasi) atau panas berlebih.	1 A – 5 A (tergantung desain konverter)
Resistansi DC (DCR)	Hambatan listrik kawat lilitan; semakin kecil DCR, semakin efisien induktor karena rugi daya lebih rendah.	$< 0,5 \Omega$ untuk arus kecil; $< 0,1 \Omega$ untuk arus besar
Frekuensi Kerja	Frekuensi di mana induktor dapat bekerja efektif tanpa kehilangan efisiensi akibat efek inti atau histeresis.	10 kHz – 100 kHz (sesuai frekuensi switching konverter)
Tipe Inti (Core Type)	Jenis material inti memengaruhi efisiensi dan ukuran induktor.	Ferrite core (paling umum untuk konverter DC-DC)
Daya Tersimpan (Energy Storage)	Energi maksimum yang dapat disimpan dalam induktor saat arus maksimum mengalir.	Ditentukan oleh rumus ($E = V \cdot t$)
Ukuran Fisik / Dimensi	Bergantung pada arus dan nilai induktansi; semakin besar arus, semakin besar ukuran fisiknya.	Bervariasi, contoh 15–25 mm diameter luar
Suhu Operasi	Rentang suhu kerja aman agar induktor tidak	-40°C hingga $+125^\circ\text{C}$

Parameter	Keterangan / Fungsi	Nilai atau Contoh Umum
	kehilangan sifat magnetiknya.	°C
Jenis Lilitan	Tipe lilitan kawat tembaga yang digunakan.	Kawat email (enameled copper wire)

2.2.6 MOSFET



Gambar 2.6 MOSFET

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) adalah komponen semikonduktor yang berfungsi sebagai saklar elektronik atau penguat sinyal dalam rangkaian elektronika, terutama pada sistem daya dan konverter DC-DC. MOSFET bekerja dengan prinsip pengendalian arus melalui tegangan pada terminal *gate* (gerbang), yang mengatur aliran arus antara terminal *drain* dan *source*. Keunggulan utama MOSFET dibandingkan transistor konvensional adalah kecepatan *switching* yang tinggi, efisiensi daya yang baik, dan resistansi rendah saat konduksi, sehingga sangat ideal untuk aplikasi *switching* seperti pada *buck-boost converter*. Dalam konverter ini, MOSFET berperan penting untuk mengatur siklus kerja (*duty cycle*), yaitu waktu ON dan OFF saklar, yang menentukan apakah tegangan keluaran akan ditingkatkan (*boost*) atau diturunkan (*buck*). Dengan kemampuan *switching* cepat dan daya rugi rendah, MOSFET memastikan proses konversi energi berjalan efisien, stabil, dan responsif terhadap perubahan beban atau tegangan masukan (Afidah, Irwan, Alfina, 2024).

Tabel 2.4 Spesifikasi MOSFET

Parameter	Keterangan / Fungsi	Nilai atau Contoh Umum
Tipe MOSFET	Jenis MOSFET yang digunakan; umumnya tipe N-channel karena memiliki efisiensi dan kecepatan switching yang lebih baik.	N-channel MOSFET
Contoh Komponen	Model MOSFET yang sering digunakan pada konverter daya kecil hingga menengah.	IRFZ44N, IRF540N, IRLZ44N
Tegangan Drain-Source Maksimum (VDS)	Tegangan maksimum yang dapat ditahan antara terminal drain dan source sebelum terjadi kerusakan.	55 V (IRFZ44N)
Tegangan Gate-Source Maksimum (VGS)	Tegangan maksimum yang dapat diberikan antara gate dan source tanpa merusak lapisan oksida.	± 20 V
Arus Drain Maksimum (ID)	Arus maksimum yang dapat mengalir dari drain ke source dalam kondisi operasi normal.	49 A (pada 25°C untuk IRFZ44N)
Resistansi Saat ON (RDS(on))	Hambatan internal antara drain dan source ketika MOSFET dalam kondisi ON; semakin kecil nilainya semakin efisien.	0,032 Ω (IRFZ44N)
Daya Disipasi Maksimum (PD)	Daya maksimum yang dapat dibuang tanpa merusak perangkat.	94 W
Tegangan Threshold Gate (VGS(th))	Tegangan minimum yang dibutuhkan untuk mulai mengaktifkan MOSFET.	2,0 – 4,0 V
Frekuensi Switching	Frekuensi operasi maksimum agar MOSFET dapat beralih ON dan OFF secara stabil.	Hingga 100 kHz atau lebih (tergantung tipe)
Suhu Operasi (Tj)	Rentang suhu kerja aman perangkat.	-55°C hingga +175°C
Tipe Paket (Package Type)	Bentuk fisik MOSFET untuk pemasangan di PCB.	TO-220 (umum pada aplikasi daya)

2.2.7 Kapasitor



Gambar 2.7 Kapasitor

Kapasitor adalah komponen elektronika pasif yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk medan listrik dan melepaskannya kembali saat dibutuhkan. Komponen ini terdiri dari dua pelat konduktor yang dipisahkan oleh bahan dielektrik (isolator), seperti keramik, elektrolit, atau film plastik. Ketika tegangan diberikan pada kedua pelatnya, muatan positif dan negatif tersimpan secara terpisah, sehingga kapasitor dapat menahan perubahan tegangan sementara. Dalam sistem *buck-boost converter*, kapasitor berperan penting untuk menyaring dan menstabilkan tegangan keluaran (*output*) agar bebas dari riak (*ripple*) akibat proses *switching* MOSFET yang sangat cepat. Kapasitor juga membantu menjaga kontinuitas arus pada beban dan meningkatkan efisiensi sistem konversi daya. Dengan memilih nilai kapasitansi yang sesuai, kapasitor mampu menjaga kestabilan tegangan pada sistem PLTS sehingga menghasilkan *output* yang lebih halus dan konstan (Setyadi, Isdawimah, Ikhsan, 2022)

Tabel 2.5 Spesifikasi Kapasitor

Parameter	Keterangan / Fungsi	Nilai atau Contoh Umum
Jenis Kapasitor	Jenis bahan dan konstruksi kapasitor yang memengaruhi karakteristik kelistrikan dan aplikasinya.	Elektrolit (Electrolytic), Keramik (Ceramic), atau Film Polyester
Nilai Kapasitansi (C)	Besarnya kemampuan kapasitor menyimpan muatan listrik. Nilai ini menentukan kemampuan dalam menyaring dan menstabilkan tegangan.	100 μF – 470 μF (contoh: 222 μF digunakan dalam skripsi)
Toleransi Kapasitansi	Penyimpangan maksimum nilai kapasitansi dari nilai nominalnya.	$\pm 10\%$ hingga $\pm 20\%$
Tegangan Kerja Maksimum (Vrated)	Tegangan maksimum yang dapat diterapkan tanpa merusak kapasitor.	16 V – 50 V (disarankan 1,5–2 kali tegangan sistem, misalnya untuk PLTS 12 V $\rightarrow$ pilih ≥ 25 V)
Tipe Polaritas	Menunjukkan apakah kapasitor memiliki kutub (+) dan (–).	Polar (elektrolit) dan Non-polar (keramik/film)
Frekuensi Kerja	Frekuensi maksimum di mana kapasitor dapat bekerja efektif tanpa kehilangan kapasitansi yang signifikan.	10 kHz – 100 kHz (sesuai frekuensi <i>switching converter</i>)
Equivalent Series Resistance (ESR)	Hambatan internal kapasitor yang memengaruhi kemampuan dalam meredam riak (<i>ripple</i>). Semakin kecil ESR, semakin baik performanya.	$< 0,1 \Omega$ (untuk kapasitor low ESR)
Temperatur Operasi (Top)	Batas suhu di mana kapasitor dapat bekerja dengan aman.	-40°C hingga $+105^{\circ}\text{C}$ (atau hingga $+125^{\circ}\text{C}$ untuk tipe

Parameter	Keterangan / Fungsi	Nilai atau Contoh Umum premium)
Ukuran Fisik	Diameter dan tinggi kapasitor bergantung pada nilai kapasitansi dan tegangan kerja.	Contoh: Ø10 mm × 20 mm (untuk 220 µF/25 V)
Tipe Pemasangan	Jenis kaki kapasitor untuk pemasangan di papan PCB.	Radial (dua kaki tegak lurus) atau SMD (permukaan datar)

2.2.8 Multimeter



Gambar 2.8 Multimeter

Multimeter adalah alat ukur elektronik serbaguna yang digunakan untuk mengukur besaran listrik seperti tegangan (volt), arus (ampere), dan resistansi (ohm) dalam suatu rangkaian. Alat ini menjadi instrumen penting dalam kegiatan perancangan dan pengujian rangkaian elektronika karena dapat membantu mendeteksi adanya kesalahan sambungan, kebocoran arus, atau komponen yang rusak. Multimeter tersedia dalam dua jenis, yaitu analog (dengan jarum penunjuk) dan digital (DMM – Digital Multimeter) yang menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk angka di layar. Dalam penelitian atau sistem seperti *buck-boost converter* pada PLTS, multimeter berperan penting untuk memantau nilai tegangan *input* dan *output*, arus beban, serta resistansi komponen guna memastikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan perancangan. Dengan tingkat akurasi yang tinggi dan kemudahan penggunaan, multimeter menjadi alat dasar yang wajib dimiliki oleh setiap teknisi dan peneliti di bidang elektronika (Deni, 2022).

Tabel 2.6 Spesifikasi Multimeter

Parameter	Keterangan / Fungsi	Nilai atau Contoh Umum
Jenis Multimeter	Jenis alat ukur berdasarkan tampilan hasil pengukuran.	Digital Multimeter (DMM)
Fungsi Utama	Mengukur tegangan (V), arus (A), dan resistansi (Ω).	<i>DC Voltage</i>
Rentang Pengukuran Tegangan DC (DCV Range)	Rentang maksimum tegangan DC yang dapat diukur.	10 V – 12 V
Rentang Pengukuran Arus DC (DCA Range)	Kemampuan alat dalam mengukur arus DC.	200 μ A – 10 A DC
Rentang Pengukuran Resistansi (Ω Range)	Kemampuan alat dalam mengukur resistansi komponen.	200 Ω – 20 M Ω
Fungsi Tambahan	Fitur tambahan untuk pengukuran dan pengujian komponen.	Pengujian dioda, kontinuitas (buzzer), kapasitansi, frekuensi, transistor hFE
Akurasi Pengukuran Tegangan DC	Ketepatan alat dalam membaca nilai tegangan.	$\pm(0.5\% - 1.0\%)$ dari nilai bacaan
Display	Tipe layar untuk menampilkan hasil pengukuran.	LCD digital 3½ digit (1999 count)
Input Impedance	Hambatan masukan multimeter yang memengaruhi akurasi pembacaan.	≥ 10 M Ω untuk pengukuran tegangan

2.2.9 Sensor Tegangan



Gambar 2.9 Sensor Tegangan

Sensor tegangan adalah komponen elektronika yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur besarnya tegangan listrik pada suatu rangkaian, kemudian mengubahnya menjadi sinyal yang dapat dibaca oleh mikrokontroler seperti Arduino. Sensor ini bekerja dengan cara membagi tegangan *input* menggunakan rangkaian pembagi

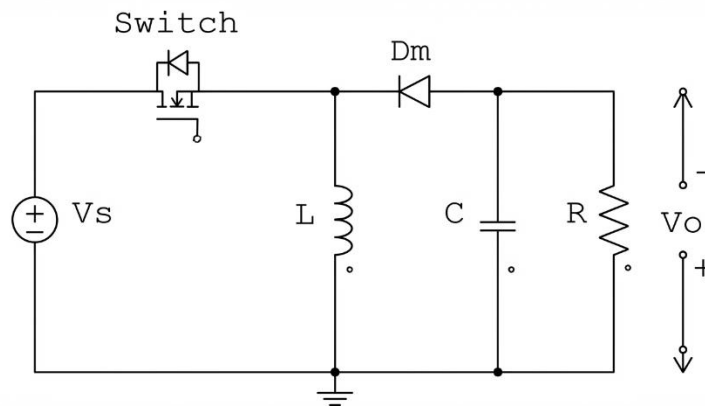
tegangan *voltage divider*, sehingga tegangan tinggi dari sumber dapat diturunkan ke level aman yang dapat dikenali oleh sistem kontrol. Dalam sistem *buck-boost converter* pada PLTS, sensor tegangan berperan penting untuk memantau tegangan *input* dari panel surya dan *output* dari konverter, sehingga pengendali PID dapat menyesuaikan *duty cycle* MOSFET guna menjaga kestabilan tegangan. Dengan adanya sensor tegangan, sistem dapat melakukan pengukuran otomatis secara *real time*, meningkatkan akurasi, serta melindungi mikrokontroler dari kelebihan tegangan (Deni, 2022).

Tabel 2.7 Spesifikasi Sensor Tegangan

Parameter	Keterangan / Nilai Umum
Jenis Sensor	Sensor Tegangan DC (<i>Voltage Sensor Module</i>)
Tegangan <i>Input</i> Maksimum	25 V DC (bisa ditingkatkan dengan pembagi tegangan)
Tegangan <i>Output</i> ke Arduino	0 – 5 V DC (aman untuk pin analog Arduino)
Tipe Sinyal Keluaran	Analog (proporsional terhadap tegangan <i>input</i>)
Tegangan Operasi Modul	3,3 – 5 V DC
Rasio Pembagi Tegangan	5:1 (umum untuk modul standar)
Akurasi Pengukuran	$\pm 0,5\%$ – $\pm 1\%$
Konektor <i>Output</i>	Pin analog (A0), VCC, dan GND
Dimensi Modul	$\pm 28 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$
Kompatibilitas	Arduino Uno, Mega, Nano, ESP32, dan mikrokontroler lainnya

2.2.10 Buck-Boost Converter

Buck-Boost converter merupakan salah satu jenis konverter DC-DC yang dirancang untuk mengatur serta menstabilkan tegangan keluaran sesuai kebutuhan sistem. Keunggulan utama dari konverter ini adalah kemampuannya menghasilkan tegangan keluaran yang dapat diatur lebih tinggi *step-up* ataupun lebih rendah *step-down* dibandingkan dengan tegangan masukan yang tersedia. Dengan karakteristik tersebut, *buck-boost converter* banyak digunakan pada sistem yang membutuhkan fleksibilitas pengaturan tegangan, khususnya ketika sumber energi yang digunakan, seperti panel surya, memiliki tegangan yang bersifat fluktuatif (Shereen, Aswadi, 2020). Gambar rangkaian *buck boost converter* dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Rangkaian *Buck Boost Converter*

Buck-Boost Converter tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu transistor sebagai saklar, induktor (L), dioda (D), dan kapasitor (C). Prinsip kerja rangkaian ini didasarkan pada pengaturan siklus kerja (duty cycle) dari saklar untuk mengubah tegangan DC masukan menjadi tegangan DC keluaran sesuai yang diinginkan. Dalam implementasinya, *Buck-Boost Converter* menggunakan MOSFET sebagai saklar elektronik yang dikendalikan secara berulang (switching). Ketika MOSFET berada pada kondisi *on*, sumber *input* dihubungkan dengan induktor sehingga energi tersimpan dalam medan magnet induktor. Sebaliknya, ketika MOSFET dalam kondisi *off*, hubungan antara sumber *input* dan induktor terputus, sehingga energi yang tersimpan dalam induktor dilepaskan melalui dioda menuju kapasitor dan beban. Proses pengisian dan pelepasan energi ini terjadi secara bergantian dan cepat, sehingga memungkinkan terbentuknya tegangan keluaran yang dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan masukan dengan tetap menjaga kestabilannya (Ahmad, Tole, Luthfiyyatun, 2023).

Pada pengaturan tegangan keluaran *buck boost converter* yaitu dengan cara mengatur *duty cycle* (D) nya. Diperoleh dalam persamaan 2.1 untuk mencari nilai *duty cycle* (D) (Jasim, Linfeng, 2015).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \quad 2.1$$

Dimana :

V_o = Tegangan output

V_i = Tegangan input

D = Duty cycle

Spesifikasi *buck boost converter* yang menggunakan control PID melibatkan beberapa elemen baik dari sisi perangkat keras itu sendiri maupun dari sisi pengontrol PID. Dapat dilihat tabel 2.9 spesifikasi *buck boost converter* sebagai perancangan referensi.

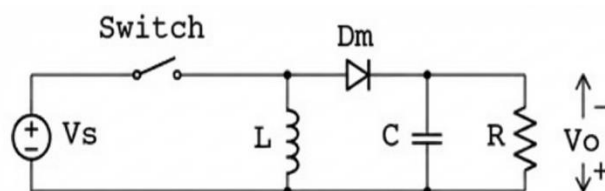
Tabel 2.8 Spesifikasi *Buck Boost Converter*

Tegangan <i>input</i>	10 – 24 V
Tegangan <i>output</i>	12 V
Mosfet	IRFZ44N
Induktor	320 Mh
Capasitor	222 uF
Resistor	100 Ω
Arus	2 A
Frekuensi	15 Khz

Prinsip kerja rangkaian *buck boost converter* dibagi menjadi 2 mode operasi pada saat *switch on* dan *switch off* yaitu:

a. Mode *switch ON*

Selama *switch ON*, diode dalam keadaan *reverse bias*. Pada kondisi tersebut tidak terdapat arus yang mengalir menuju dioda, sehingga tegangan pada dioda (V_D) bernilai $-(V_S + V_O)$. Ketika saklar dalam keadaan tertutup (*ON*), saklar menerima tegangan sebesar V_S , sehingga induktor memperoleh suplai tegangan dari sumber *input*. Pada saat yang sama, arus mengalir melalui induktor sementara kapasitor berada dalam keadaan *discharge*, yaitu melepaskan tegangan dan arusnya untuk dialirkan ke beban (M.Z. Zulkifli, Azri, Talib, dkk, 2019). Gambar rangkaian ekivalen *buck boost converter* saat *switch ON* dapat dilihat pada Gambar 2.12.

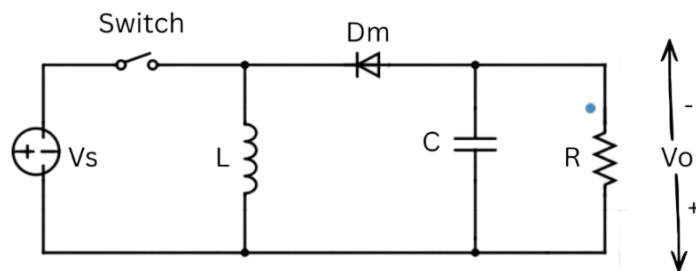


Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen *buck boost converter* saat *switch ON*

b. Mode switch OFF

Ketika saklar berada pada kondisi *OFF*, sumber tegangan *input* terputus sehingga arus tidak lagi mengalir langsung dari sumber. Pada saat yang sama, dioda berada dalam keadaan *forward bias* sehingga arus yang tersimpan di induktor dialirkan menuju kapasitor. Dalam kondisi ini, kapasitor berfungsi untuk menyimpan energi (*charging*) yang diterimanya dari induktor.

Energi yang tersimpan di induktor kemudian disalurkan ke beban melalui dioda dan kapasitor, sehingga beban tetap mendapatkan suplai daya meskipun saklar dalam keadaan *OFF*. Proses ini mengakibatkan arus pada induktor secara bertahap menurun hingga saklar kembali diaktifkan (*ON*). Dengan cara kerja tersebut, *buck-boost converter* mampu menjaga kontinuitas suplai energi pada beban dengan memanfaatkan proses penyimpanan dan pelepasan energi induktor serta kapasitor secara bergantian (Farah, Wahidin, Alif, 2017). Gambar rangkaian ekivalen pada saat *switch OFF* dapat dilihat pada Gambar 2.13.

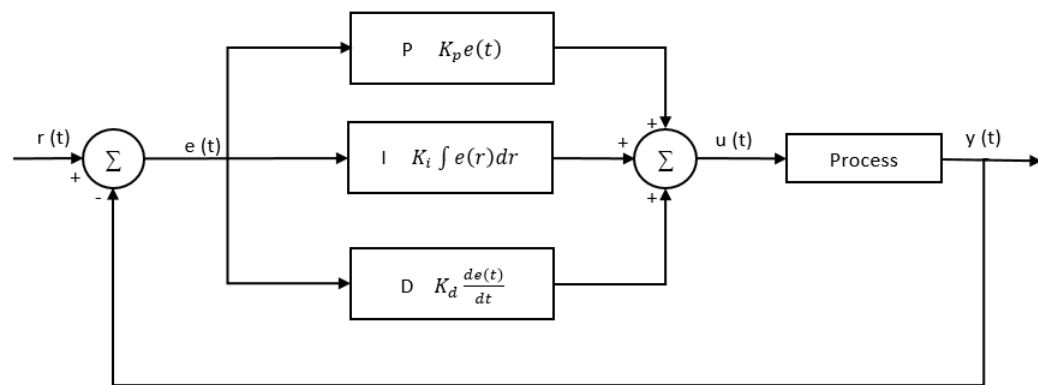


Gambar 2.12 Rangkaian ekivalen *buck boost converter* saat *switch OFF*

2.2.11 Pengendali *Proporsional Integral Deratif* (PID)

Kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative) merupakan salah satu metode pengendalian yang paling banyak digunakan dalam berbagai sistem kontrol industri modern. Sesuai dengan namanya, kontroler ini merupakan kombinasi dari tiga jenis pengendali yang masing-masing memiliki karakteristik dan fungsi tersendiri. Bagian *proportional* berperan dalam merespons kesalahan secara langsung sesuai besarnya, bagian *integral* berfungsi untuk menghilangkan *error* jangka panjang dengan menjumlahkan kesalahan dari waktu ke waktu, sedangkan bagian *derivative* memberikan prediksi terhadap perubahan kesalahan untuk meningkatkan stabilitas sistem dengan mengatur konstanta PID secara tepat, sistem dapat merespons perubahan secara lebih cepat, mengurangi atau bahkan menghilangkan *overshoot*, serta menekan

steady-state error hingga mendekati nol. Hal ini menjadikan kontroler PID sangat andal dan fleksibel untuk diterapkan pada berbagai aplikasi, mulai dari sistem kelistrikan, pengaturan suhu, proses manufaktur, hingga sistem tenaga terbarukan. Keunggulannya terletak pada kesederhanaan implementasi namun tetap mampu menghasilkan kinerja sistem yang stabil, presisi, dan efisien (Shereen, Aswadi, 2020). Gambar blok diagram pengendali PID dapat dilihat pada Gambar 2.14



Gambar 2.13 Blok diagram pengendali PID

Gambar 2.14 memperlihatkan diagram blok dari pengendali PID, di mana ketiga parameter penguatan yaitu K_p (proportional), K_i (integral), dan K_d (derivative) dihubungkan secara paralel untuk membentuk suatu sistem kendali terpadu. Fungsi utama dari kontroler PID ini adalah mengatur nilai *duty cycle* (D) sehingga tegangan keluaran yang dihasilkan sesuai dengan nilai yang diinginkan. Dengan demikian, PID berperan penting dalam menjaga kestabilan tegangan dan memastikan sistem bekerja secara optimal meskipun terjadi perubahan pada kondisi masukan atau beban.

Penggunaan pengendali PID sangat relevan dalam penelitian ini karena dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler, salah satunya Arduino Uno. Melalui Arduino Uno, sinyal kendali dari PID dapat diimplementasikan secara langsung untuk mengoperasikan rangkaian konverter dengan lebih praktis dan efisien. Perlu dicatat bahwa konsep kontrol PID sendiri bukanlah hal baru, melainkan sudah mulai digunakan secara luas sejak tahun 1980-an. Hingga saat ini, PID tetap menjadi salah satu metode kendali paling populer berkat kesederhanaannya dalam implementasi dan efektivitasnya dalam meningkatkan performa sistem. Jika $e(t)$ sebagai *input* ke alat control PID, maka *output* $m(t)$ dari alat control ini diberikan oleh persamaan 2.2 (Jasim, Linfeng, 2015).

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad 2.2$$

keterangan :

$m(t)$ = *Output* pengontrolan PID

e = *error*

K_p = Konstanta *Proposional*

K_i = Konstanta *Integratif*

K_d = Konstanta *derivative*