

SKRIPSI

**OPTIMASI EFISIENSI DAYA PANEL SURYA
MENGUNAKAN SISTEM *MAXIMUM POWER POINT*
TRACKING DENGAN ALGORITMA *PERTURB AND*
OBSERVE PADA *BOOST CONVERTER***

Disusun dan diajukan oleh:

**SHALIH AL HASYIR
D041 20 1091**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

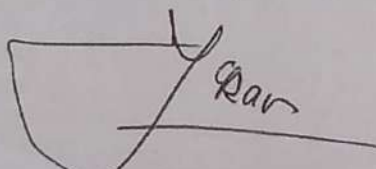
OPTIMASI EFISIENSI DAYA PANEL SURYA MENGUNAKAN SISTEM *MAXIMUM POWER POINT* *TRACKING* DENGAN ALGORITMA *PERTURB AND* *OBSERVE* PADA *BOOST CONVERTER*

Disusun dan diajukan oleh

Shalih Al Hasyir
D041201091

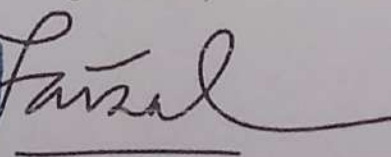
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 6 November 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.
NIP. 197504042000121001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ing. Arif Samman, ST, MT, IPU, AseanEng, ACPE
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Shalih Al Hasyir

NIM : D041201091

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**OPTIMASI EFISIENSI DAYA PANEL SURYA MENGGUNAKAN
SISTEM *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* DENGAN ALGORITMA
PERTURB AND OBSERVE PADA *BOOST CONVERTER***

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 6 November 2024

Yang Menyatakan



Shalih Al Hasyir

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-Nya program skripsi dan penyusunan laporan skripsi yang berjudul “Optimasi Efisiensi Daya Panel Surya Menggunakan Sistem *Maximum Power Point Tracking* Dengan Algoritma *Perturb and Observe* Pada *Boost Converter*” dapat terselesaikan dengan baik. Sholawat serta salam senantiasa penulis haturkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW beserta keluarga, sahabat, dan para pengikutnya yang telah berjuang dan membimbing umat manusia keluar dari jalan kegelapan menuju jalan yang terang benderang.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis senantiasa mendapatkan dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Keluarga tercinta (Bapak, Ibu, dan Adik-adik penulis) atas segala doa, dukungan moral, serta memberikan kesempatan dan sarana yang diperlukan selama menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan dorongan yang tak terhitung selama proses penulisan skripsi ini. Terima kasih atas kesabaran dan dedikasinya dalam membimbing setiap tahap penelitian ini.
3. Bapak Ir. Yusri Syam Akil, S.T., M.T., IPM., Ph.D. dan Ibu Ir. Hasniaty A, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan waktu dan tenaganya untuk membaca, memberikan masukan, serta mengevaluasi skripsi ini dengan seksama. Masukan dan saran sangat berarti bagi penulis untuk memperbaiki dan menyempurnakan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal Arya Samman, ST, MT, IPU, AseanEng, ACPE dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Seluruh dosen dan staf di Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin yang telah memberikan wawasan dan dukungan yang berharga dalam menjalani perjalanan akademik penulis.

6. Teman-teman Teknik Elektro Angkatan 2020 (PROCEZ20R, ISF CLUB, dan DODGE E-SPORT) yang telah memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
7. Teman-teman konsentrasi energi yang telah menemani dalam setiap perjalanan, melalui segala dinamika, kegembiraan, dan kesedihan selama proses perkuliahan dan praktikum hingga proses penulisan skripsi ini.
8. Teman-teman di Laboratorium Elektronika Daya yang saling mendukung dan bersama-sama berjuang dalam mengerjakan skripsi hingga selesai.
9. Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu, terima kasih atas segala dukungan, doa, dan bantuan yang telah diberikan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, segala kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi yang positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan juga masyarakat pada umumnya.

ABSTRAK

SHALIH AL HASYIR. *Optimasi Efisiensi Daya Panel Surya Menggunakan Sistem Maximum Power Point Tracking Dengan Algoritma Perturb and Observe Pada Boost Converter* (dibimbing oleh Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.)

Efek rumah kaca menjadi salah satu masalah yang muncul akibat tingginya ketergantungan pada bahan bakar fosil. Penggunaan bahan bakar fosil secara berlebihan tidak hanya mempercepat penipisan sumber daya tersebut, tetapi juga menuntut adanya peralihan menuju Energi Baru dan Terbarukan (EBT). Salah satu solusi energi terbarukan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), yang memanfaatkan energi matahari untuk diubah menjadi energi listrik menggunakan panel surya atau modul fotovoltaik (PV). Namun, sistem PLTS sering menghadapi kendala berupa daya listrik yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh intensitas iradiasi matahari dan suhu permukaan panel, sehingga daya yang dihasilkan cenderung tidak stabil dan memiliki efisiensi rendah, terutama dalam kondisi iradiasi matahari dan suhu yang rendah. Penelitian ini bertujuan merancang sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk meningkatkan efisiensi daya keluaran panel surya. Algoritma *Perturb and Observe* (P&O) diterapkan pada sistem MPPT yang terhubung dengan *Boost Converter* sebagai pengendali tegangan keluaran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem MPPT mampu mengoptimalkan daya keluaran panel surya secara efektif dalam berbagai kondisi intensitas iradiasi matahari dan suhu lingkungan. Rata-rata efisiensi daya keluaran panel surya tanpa sistem MPPT adalah 43,07%, sedangkan dengan sistem MPPT mencapai 46,79%. Dengan penerapan algoritma P&O pada sistem MPPT, daya keluaran panel surya mengalami peningkatan rata-rata sebesar 9,17% dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan MPPT.

Kata Kunci: PLTS, MPPT, P&O, *Boost Converter*

ABSTRACT

SHALIH AL HASYIR. *Optimization of Solar Panel Power Efficiency Using Maximum Power Point Tracking System with Perturb and Observe Algorithm on a Boost Converter* (supervised by Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.)

The greenhouse effect has become one of the issues arising from the high dependence on fossil fuels. Excessive use of fossil fuels not only accelerates the depletion of these resources but also demands a transition to New and Renewable Energy (EBT). One solution for renewable energy is Solar Power Plants (PLTS), which utilize solar energy to be converted into electricity using solar panels or photovoltaic (PV) modules. However, PLTS systems often face challenges in which the generated electrical power is highly influenced by the intensity of solar irradiation and the temperature of the panel surface, making the output power unstable and less efficient, particularly in low solar irradiation and temperature conditions. This study aims to design a Maximum Power Point Tracking (MPPT) system to improve the efficiency of the solar panel's output power. The Perturb and Observe (P&O) algorithm is applied to the MPPT system, which is connected to a Boost Converter as the voltage controller. The simulation results show that the MPPT system can effectively optimize the solar panel's output power under various solar irradiation intensities and ambient temperatures. The average output power efficiency of the solar panel without the MPPT system is 43.07%, while with the MPPT system, it reaches 46.79%. By applying the P&O algorithm to the MPPT system, the output power of the solar panel increased by an average of 9.17% compared to the system without MPPT.

Keywords: PLTS, MPPT, P&O, Boost Converter

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	6
2.1.1 Sel surya.....	6
2.1.2 Efek <i>photovoltaic</i>	7
2.1.3 Prinsip kerja sel surya	8
2.1.4 Persamaan ekuivalen sel surya.....	9
2.1.5 Karakteristik sel surya.....	10
2.1.6 Panel surya	11
2.2 <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT)	12
2.3 Algoritma <i>Perturb and Observe</i> (P&O).....	14
2.4 <i>Boost Converter</i>	16
2.5 <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM)	20
2.6 Matlab Simulink.....	21
2.7 Penelitian Terdahulu yang Terkait	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	24
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	24
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.3 Rancangan Sistem	24
3.4 Diagram Alir Penelitian	25
3.5 Teknik Pengumpulan Data	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Data Iradiasi Matahari dan Suhu Lingkungan	29
4.2 Pemodelan Panel Surya (PV).....	33
4.2.1 Pengujian panel surya (PV) tunggal.....	33
4.2.2 Pengujian panel surya (PV) terhubung seri dan paralel	35
4.3 Pemodelan Blok MPPT	36
4.4 Pemodelan Rangkaian <i>Boost Converter</i>	37
4.4.1 Pengujian rangkaian <i>boost converter</i>	39
4.5 Pemodelan Blok PWM.....	41

4.6 Pengujian Rangkaian.....	41
4.6.1 Pengujian rangkaian panel surya dengan sistem MPPT	41
4.6.2 Pengujian rangkaian panel surya tanpa sistem MPPT	42
4.7 Analisis Hasil Simulasi	43
4.7.1 Hasil simulasi dengan iradiasi matahari dan suhu yang bervariasi.....	43
4.7.2 Hasil simulasi dengan beban yang bervariasi	58
4.7.3 Hasil simulasi dengan beban dan iradiasi yang bervariasi.....	60
4.7.4 Hasil simulasi dengan beban, iradiasi, dan suhu yang bervariasi	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Proses perubahan energi matahari menjadi energi listrik.....	8
Gambar 2 Medan listrik di daerah pengosongan berarah dari kanan ke kiri	9
Gambar 3 Rangkaian equivalen sel PV.....	9
Gambar 4 Kurva karakteristik P-V terhadap perubahan suhu	10
Gambar 5 Kurva karakteristik P-V terhadap perubahan radiasi	11
Gambar 6 Panel surya tersusun dari 36 sel yang terhubung seri.....	11
Gambar 7 Kurva karakteristik MPPT	13
Gambar 8 <i>Flowchart</i> algoritma P&O.....	14
Gambar 9 Rangkaian <i>boost converter</i>	17
Gambar 10 Rangkaian <i>boost converter</i> (saklar <i>on</i>).....	17
Gambar 11 Bentuk gelombang arus induktor pada <i>boost converter</i>	18
Gambar 12 Rangkaian <i>boost converter</i> (saklar <i>off</i>)	18
Gambar 13 Sinyal <i>pulse width modulation</i>	21
Gambar 14 Rancangan sistem.....	25
Gambar 15 Diagram alir penelitian.....	27
Gambar 16 Diagram pembuatan program matlab.....	28
Gambar 17 Peta lokasi gedung departemen teknik elektro.....	29
Gambar 18 Grafik perubahan iradiasi matahari	32
Gambar 19 Grafik perubahan suhu	33
Gambar 20 Blok panel surya.....	34
Gambar 21 Blok parameter panel surya.....	35
Gambar 22 Kurva P-V dan I-V panel surya tunggal.....	35
Gambar 23 Konfigurasi panel surya 3 seri dan 2 paralel	36
Gambar 24 Kurva P-V dan I-V panel surya terhubung seri dan paralel	36
Gambar 25 Blok MPPT.....	37
Gambar 26 Pemodelan rangkaian <i>boost converter</i> dalam Matlab	40
Gambar 27 Gelombang tegangan dan arus keluaran <i>boost converter</i>	40
Gambar 28 Blok parameter PWM	42
Gambar 29 Rangkaian panel surya dengan menggunakan sistem MPPT.....	43
Gambar 30 Rangkaian panel surya tanpa menggunakan sistem MPPT.....	44
Gambar 31 Perbandingan efisiensi daya dengan sistem MPPT dan tanpa sistem MPPT tanggal 29 April 2024	46
Gambar 32 Perbandingan efisiensi daya dengan sistem MPPT dan tanpa sistem MPPT tanggal 30 April 2024	48
Gambar 33 Perbandingan efisiensi daya dengan sistem MPPT dan tanpa sistem MPPT tanggal 1 Mei 2024	50
Gambar 34 Perbandingan efisiensi daya dengan sistem MPPT dan tanpa sistem MPPT tanggal 2 Mei 2024	52
Gambar 35 Perbandingan efisiensi daya dengan sistem MPPT dan tanpa sistem MPPT tanggal 3 Mei 2024	54
Gambar 36 Perbandingan efisiensi daya dengan sistem MPPT dan tanpa sistem MPPT tanggal 4 Mei 2024	56
Gambar 37 Perbandingan efisiensi daya dengan sistem MPPT dan tanpa sistem MPPT tanggal 5 Mei 2024	58
Gambar 38 Efisiensi daya rata-rata dengan sistem MPPT dan tanpa sistem MPPT	

tanggal 29 April 2024 - 5 Mei 2024.....	59
Gambar 39 Perbandingan daya keluaran panel surya dengan beban dan iradiasi yang bervariasi	62
Gambar 40 Perbandingan daya keluaran panel surya dengan beban, iradiasi, dan suhu yang bervariasi.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan.....	23
Tabel 2. Spesifikasi panel surya 150 WP <i>polycrystalline</i> BCT150-12.....	28
Tabel 3. Hasil pengukuran	30
Tabel 4. Spesifikasi rangkaian <i>boost converter</i>	37
Tabel 5. Pengujian rangkaian <i>boost converter</i>	40
Tabel 6. Hasil simulasi tanggal 29 April 2024.....	44
Tabel 7. Hasil simulasi tanggal 30 April 2024.....	46
Tabel 8. Hasil simulasi tanggal 1 Mei 2024.....	48
Tabel 9. Hasil simulasi tanggal 2 Mei 2024.....	50
Tabel 10. Hasil simulasi tanggal 3 Mei 2024.....	52
Tabel 11. Hasil simulasi tanggal 4 Mei 2024.....	54
Tabel 12. Hasil simulasi tanggal 5 Mei 2024.....	56
Tabel 13. Hasil simulasi rata-rata mulai tanggal 29 April – 5 Mei 2024.....	58
Tabel 14. Hasil simulasi dengan beban yang bervariasi	59
Tabel 15. Hasil simulasi dengan beban dan iradiasi yang bervariasi.....	60
Tabel 16. Hasil simulasi dengan beban, iradiasi, dan suhu yang bervariasi	61

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Spesifikasi panel surya <i>polycrystalline</i> BCT15012.....	68
Lampiran 2 Algoritma <i>perturb and observe</i> pada <i>matlab function</i>	69

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu masalah utama yang memengaruhi lingkungan dan kehidupan manusia adalah efek rumah kaca. Diperlukan tindakan konkret untuk mengatasi masalah ini, khususnya mengurangi penggunaan bahan bakar fosil (Lajuardi dkk, 2023). Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama dapat mengakibatkan permasalahan yang sangat serius, terutama dalam hal ketahanan energi dan dampaknya bagi lingkungan (Alim dkk, 2023). Kementerian ESDM (2020) menyatakan bahwa penggunaan sumber energi fosil semakin besar seiring dengan meningkatnya kebutuhan membuat cadangan sumber energi fosil kian menipis. Untuk itu, peralihan penggunaan energi fosil menuju Energi Baru dan Terbarukan (EBT) merupakan hal yang harus dilakukan demi menjaga ketersediaan energi di masa yang akan datang. Tanpa penemuan cadangan yang baru, minyak bumi di Indonesia diperkirakan akan habis dalam sembilan tahun ke depan, gas bumi akan habis 22 tahun lagi, dan batubara akan habis 65 tahun mendatang.

Indonesia sangat kaya akan energi terbarukan dengan potensi lebih dari 400.000 Mega Watt (MW), 50% diantaranya atau sekitar 200.000 MW adalah potensi energi surya. Pemanfaatan energi surya sendiri saat ini baru sekitar 150 MW atau 0,08% dari potensinya. Untuk mengatasi hal tersebut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) telah menerbitkan Peraturan Nomor 26 Tahun 2021 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap sebagai upaya Pemerintah dalam mencapai target energi baru dan terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025 (Kementerian ESDM, 2022).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu pembangkit yang memanfaatkan modul fotovoltaik (PV) untuk menyerap energi matahari guna menghasilkan energi listrik. Permasalahan utama dalam sistem PLTS adalah daya listrik yang dihasilkan oleh PV dipengaruhi oleh intensitas penyinaran matahari dan suhu permukaan panel surya, sehingga daya yang dihasilkan oleh panel surya tidak konsisten dan memiliki efisiensi yang rendah yaitu sekitar 9-17% terutama pada kondisi intensitas iradiasi matahari dan suhu yang rendah (Nugraha dkk, 2021).

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan suatu teknik pelacakan titik daya keluaran maksimum dari suatu sistem PV. Prinsip kerja MPPT adalah dengan membaca setiap titik keluaran pada kurva karakteristik P–V pada panel surya. Sistem kendali MPPT akan mengubah titik kerja tersebut sehingga konverter memaksa panel surya untuk bekerja sesuai kemampuannya agar selalu mencapai titik daya optimal. MPPT bukanlah sistem mekanis yang membuat sistem panel surya bergerak sesuai arah datangnya intensitas sinar matahari, melainkan sistem elektronik yang bekerja untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya (Sitanggang dkk, 2021).

Algoritma MPPT merupakan bagian penting dari sistem MPPT. Algoritma ini nantinya akan mencari titik kerja optimal dari panel surya. Ada beberapa metode yang diterapkan dalam sistem MPPT oleh para peneliti untuk mengekstrak daya keluaran dari fotovoltaiik. Di antara algoritma tersebut, *Perturb and Observe* (P&O) merupakan algoritma yang paling sederhana dan efisien untuk digunakan dalam aplikasi MPPT. Kompleksitas waktunya pun sangat cepat dan kecil saat mendekati MPP (Putra dkk, 2023).

Algoritma *perturbation and Observation* (P&O) diimplementasikan dalam kendali MPPT dengan menggunakan perangkat Arduino dan untuk konverternya menggunakan *buck converter* (Filali & Zazi, 2021). Perangkat Arduino ditanam algoritma P&O dengan menerima data arus dan tegangan dari sensor yang mendeteksi keluaran fotovoltaiik. Keluaran arduino baik melalui simulasi proteus atau perangkat keras arduino yaitu *duty cycle* yang dikirim ke konverter. Hasil menunjukkan bahwa algoritma P&O mampu mencapai nilai daya yang diharapkan. Peneliti, (Mahendra dkk, 2021), mendesain MPPT dengan metode P&O dan *incremental conductance* (IC) pada fotovoltaiik berbasis topologi konverter SEPIC dengan menggunakan *software* MATLAB. Hasil simulasi membandingkan performa sistem MPPT antara algoritma P&O dengan IC. Hasil simulasi menunjukkan bahwa MPPT dengan algoritma P&O lebih baik performanya dibandingkan dengan MPPT berbasis algoritma IC dalam hal peningkatan daya atau efisiensi daya fotovoltaiik. Sistem MPPT juga membutuhkan konverter DC-DC untuk mengatur tegangan keluaran PV pada titik daya maksimum. Adapun yang

akan digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *Boost converter* dimana rangkaian ini sangat efisien untuk meningkatkan daya dari panel surya.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis akan melakukan penelitian mengenai sistem MPPT pada panel surya dengan menggunakan algoritma P&O sebagai algoritma MPPT dan rangkaian *Boost converter* sebagai rangkaian pengendali titik operasi panel surya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara merancang sistem MPPT untuk panel surya dengan menerapkan algoritma P&O pada *boost converter*?
2. Berapakah besar efisiensi daya yang dapat dicapai oleh panel surya yang menggunakan sistem MPPT dan tanpa menggunakan sistem MPPT?
3. Berapakah besar perubahan daya keluaran yang dihasilkan panel surya yang menggunakan sistem MPPT dengan menerapkan algoritma P&O?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Mengetahui cara merancang sistem MPPT untuk panel surya dengan menerapkan algoritma P&O pada *boost converter*.
2. Mengetahui besar efisiensi daya yang dapat dicapai panel surya yang menggunakan sistem MPPT dan tanpa menggunakan sistem MPPT.
3. Mengetahui besar perubahan daya keluaran yang dihasilkan panel surya yang menggunakan sistem MPPT dengan menerapkan algoritma P&O.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan tambahan dalam pengembangan teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), yang

dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan sistem MPPT yang lebih canggih di masa depan.

2. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi kontribusi dalam pengembangan teknologi energi terbarukan. Dengan meningkatkan efisiensi panel surya, kita dapat lebih bergantung pada sumber energi yang ramah lingkungan dan penggunaan energi berbasis fosil yang menghasilkan emisi gas rumah kaca dapat dikurangi.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini, yaitu:

1. Algoritma yang digunakan dalam sistem MPPT adalah *Perturb and Observe*.
2. Penelitian ini hanya berfokus pada sistem MPPT yang dibuat dalam bentuk blok-blok dan disimulasikan dengan menggunakan *software* Matlab Simulink.
3. Jenis panel surya yang akan digunakan adalah *Polycrystalline* BCT150-12.
4. Jenis *DC-DC converter* yang digunakan adalah *boost converter*.

1.6 Sistematika Penulisan

Berikut merupakan sistematika penulisan penelitian ini:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini membahas tentang latar belakang penelitian, rumusan masalah penelitian, tujuan penelitian dan manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan teori-teori yang digunakan dalam penelitian ini, yang meliputi: Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), *Maximum Power Point Tracking*, algoritma *Perturb and Observe*, *Boost converter*, sinyal *Pulse Width Modulation*, Matlab Simulink, serta penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian, rancangan sistem, diagram alir penelitian, serta teknik pengumpulan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas perancangan sistem yang meliputi berbagai tahapan, seperti: pemodelan panel surya, pemodelan blok MPPT, pemodelan *boost converter*, pemodelan PWM, pengujian rangkaian, dan analisis hasil simulasi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah diperoleh dan saran-saran yang dapat digunakan untuk mengembangkan penelitian yang telah dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS merupakan suatu pembangkit yang dapat mengubah energi foton dari matahari menjadi energi listrik. Foton merupakan partikel elementer dalam fenomena cahaya. Foton tidak memiliki massa dan dalam ruang hampa selalu bergerak dengan kecepatan cahaya (Samsurizal dkk, 2021). Energi foton cahaya yang sampai ke bumi dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

Keterangan:

- E : Energi foton (eV)
- h : Konstanta planck, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ (Js)
- ν : Frekuensi panjang gelombang cahaya (Hz)

Konversi ini dilakukan pada panel surya yang terdiri dari beberapa sel surya. Sel-sel ini merupakan lapisan tipis silikon murni (Si) atau bahan semikonduktor lainnya. Sehingga ketika bahan tersebut menerima energi foton, maka akan mengeksitasi elektron dari ikatan atomnya menjadi elektron yang bergerak bebas dan pada akhirnya akan menghasilkan tegangan arus searah (DC). Agar diperoleh besaran tegangan dan daya sesuai dengan kebutuhan, maka sel-sel PV tersebut harus dirangkai secara seri atau paralel sehingga akan diperoleh hasil yang diinginkan (Jamaaluddin, 2021).

2.1.1 Sel surya

Sel surya merupakan sekumpulan modul untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Fotovoltaik merupakan teknologi yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung. PV biasanya dikemas dalam satu unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang disusun secara seri atau paralel. Sedangkan yang dimaksud dengan surya adalah elemen semikonduktor yang dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik berdasarkan efek fotovoltaik. Sel

surya dapat memiliki rugi-rugi yang dapat mempengaruhi efisiensi energi listrik yang dihasilkan.

Berikut hal yang dapat menyebabkan terjadinya rugi-rugi dalam sel surya sehingga dapat mempengaruhi berkurangnya energi listrik yang dihasilkannya, antara lain:

1. Rugi-rugi Refleksi: Terjadi proses pemantulan atau refleksi oleh permukaan sel surya, sehingga penyerapan foton cahaya menjadi rendah dalam sel surya. Untuk mengurangi refleksi cahaya pada permukaan sel surya maka dilapisi dengan bahan anti refleksi.
2. Rugi-rugi Rekombinasi: Terjadi pada setiap tempat pada sel surya. Pembawa muatan yang dihasilkan (elektron-hole) bisa bergabung kembali satu sama lain dalam rangka mempertahankan kondisi ekuilibrium. Rugi-rugi jenis ini dapat terjadi di berbagai tempat, pada bulk, permukaan atas, batas logam dan semikonduktor, daerah kontak serta *junction*.
3. Rugi-rugi resistansi seri: Resistansi yang disumbangkan oleh jari-jari logam (sirip) pada permukaan sel surya. Logam kontak pada semikonduktor, bus bar, daerah emitor dan daerah bulk, disebut sebagai resistansi seri. Penurunan tegangan dan rugi-rugi daya karena tingginya nilai resistansi seri berpengaruh mengurangi efisiensi keluaran sel surya.
4. Rugi-rugi *thermal* (panas): Sejumlah cahaya yang diserap oleh sel digunakan untuk menaikkan suhu, sisa energi foton berubah dalam bentuk panas yang meningkatkan temperatur sel. Parameter sel seperti tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}) adalah fungsi dari temperatur. Naiknya temperatur sel surya berpengaruh pada turunnya efisiensi sel surya (Samsurizal dkk, 2021).

2.1.2 Efek *photovoltaic*

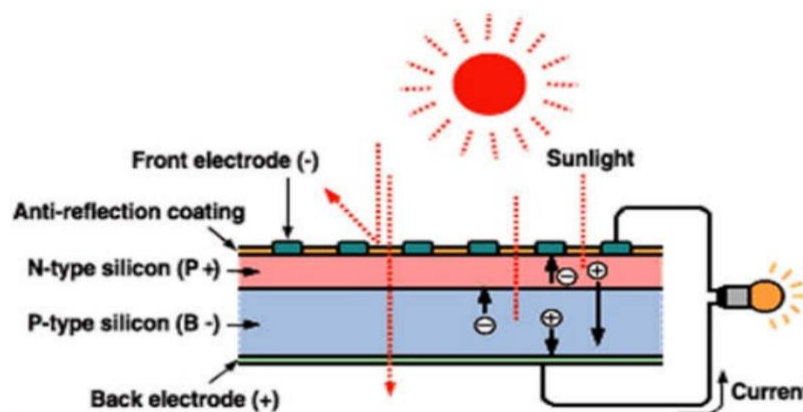
Photovoltaic adalah suatu proses pengubahan langsung dari foton cahaya menjadi energi listrik melalui sel surya. Mekanisme pengubahan ini bekerja berdasarkan efek *Photovoltaic*. Efek *Photovoltaic* ditemukan pertama kali oleh Hernri Beequerel pada tahun 1839. Efek Fotovoltaik merupakan fenomena dimana sel Fotovoltaik dapat menyerap energi cahaya dan mengubahnya menjadi energi

listrik. Efek Fotovoltaik didefinisikan sebagai fenomena munculnya tegangan listrik akibat adanya kontak 2 elektroda yang terhubung pada sistem padat atau cair ketika ditempatkan di bawah energi cahaya. Parameter fotovoltaik yang paling berpengaruh pada kurva daya adalah arus hubung singkat (I_{sc}) dan tegangan hubung singkat (V_{oc}) untuk parameter internal, sedangkan parameter eksternal meliputi suhu dan penyinaran matahari (Samsurizal dkk, 2021).

2.1.3 Prinsip kerja sel surya

Sel surya berfungsi untuk menyerap dan mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Peristiwa ini disebut sebagai peristiwa fotovoltaik atau fotolistrik. Sel surya dapat tereksitasi karena terbuat dari bahan semikonduktor yang mengandung unsur silikon. Silikon ini terdiri dari dua jenis lapisan yaitu lapisan positif (tipe-P) dan lapisan negatif (tipe-N) (Riskiono et al., 2021).

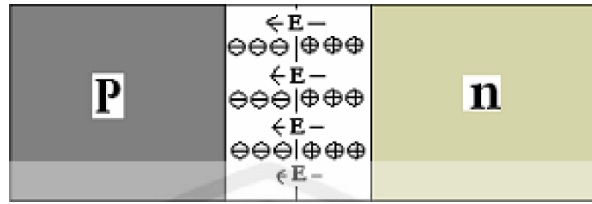
Semikonduktor tipe-P dan tipe-N tersebut diletakkan di atas satu sama lain untuk membentuk dua lapisan dengan dua jenis pembawa muatan yang berbeda. Pembawa positif disebut *hole* dan pembawa negatif disebut elektron. Di antara dua lapisan tersebut khususnya di persimpangan P-N (*P-N Junction*), daerah deplesi akan terbentuk dimana tidak ada *hole* maupun elektron (Majdi et al., 2020).



Gambar 1 Proses perubahan energi matahari menjadi energi listrik (Harahap, 2020)

Hole terus-menerus meninggalkan tipe-P dan menyebabkan ion negatif tetap berada di dekat *P-N Junction*. Demikian pula, elektron yang meninggalkan tipe-N akan menyebabkan beberapa ion positif tetap berada di dekat sambungan. Akibatnya, ruang muatan negatif terbentuk di wilayah tipe-P dan ruang muatan positif terbentuk di wilayah tipe-N dekat sambungan, hingga tepat pada sambungan

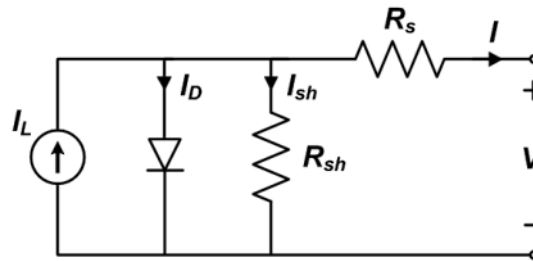
P-N terdapat wilayah tanpa muatan bebas yang dapat disebut dengan *depletion region* (Harahap, 2020).



Gambar 2 Medan listrik di daerah pengosongan berarah dari kanan ke kiri (Harahap, 2020)

2.1.4 Persamaan ekuivalen sel surya

Rangkaian ekuivalen sel PV dapat digambarkan sebagai sumber arus ideal, dioda, resistansi paralel, dan resistansi seri. Arus searah yang dihasilkan dari sumber arus ideal berbanding lurus dengan iradiasi matahari yang diterima oleh sel PV. Resistansi seri dan paralel menunjukkan nilai penurunan tegangan hingga kontak terminal luar dan arus bocor di sepanjang jalur sel PV (Fuad dkk, 2022).



Gambar 3 Rangkaian ekuivalen sel PV (Fuad dkk, 2022)

Arus keluaran yang disalurkan dari panel (PV) ke beban dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \frac{q(V + R_s I)}{N_s \cdot K \cdot T} - 1 \right) - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}} \quad (2)$$

Keterangan:

- I_{ph} : Arus sumber PV dari iradiasi cahaya (A)
- I_o : Arus saturasi diode (A)
- q : $1,6 \times 10^{-19}$ C (Konstanta muatan elektron)
- K : $1,38 \times 10^{-23}$ J/K (Konstanta Boltzman)
- R_s : Resistansi seri (ohm)
- R_{sh} : Resistansi paralel (ohm)

V : Tegangan *output* sel PV (V)

N_s : Jumlah sel terhubung seri

Arus I_{ph} adalah arus yang diperoleh dari konversi cahaya yang dirumuskan dengan persamaan:

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (3)$$

Keterangan:

I_{sc} : Arus hubung singkat (A)

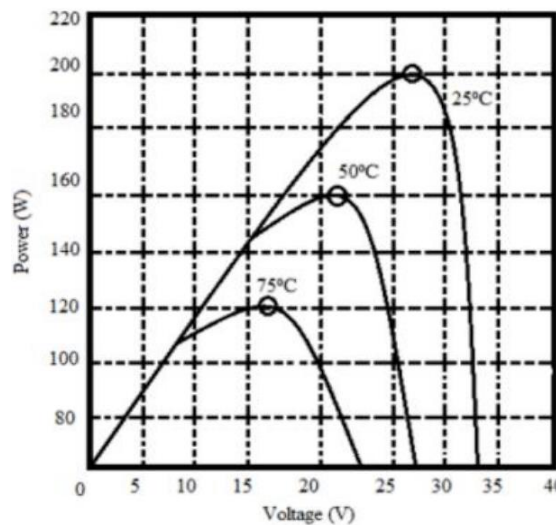
k_i : Koefisien suhu arus hubung singkat sel PV

T : Suhu sel PV

G : Iradiasi sinar matahari

2.1.5 Karakteristik sel surya

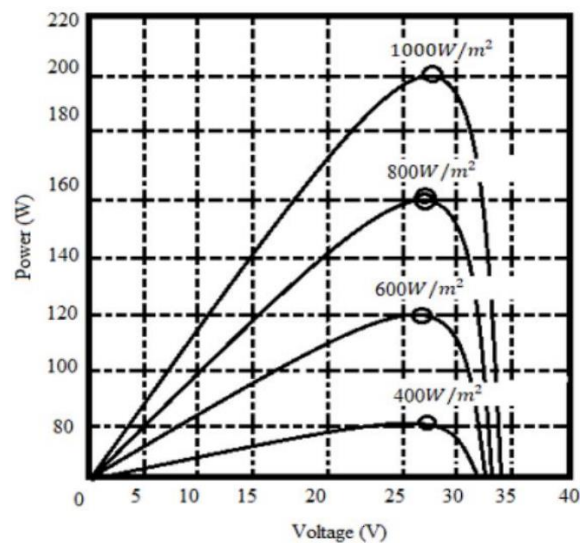
Dalam penerapannya, *output* yang dihasilkan oleh panel surya tidak selalu maksimum. Hal tersebut disebabkan karena suhu permukaan panel dan iradiasi matahari yang selalu berubah-ubah.



Gambar 4 Kurva karakteristik P-V terhadap perubahan suhu
(Putra dkk, 2023)

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara suhu terhadap daya *output* dari panel surya. Panel surya dapat bekerja secara optimal dengan daya yang maksimum apabila suhu normal pada 25 °C. Apabila melebihi dari suhu ideal, maka daya pada panel surya akan semakin menurun. Semakin meningkat suhu di sekitar panel surya

akan mempengaruhi tegangan *output* (V_{oc}), dan dapat melemahkan daya *output* pada panel surya.

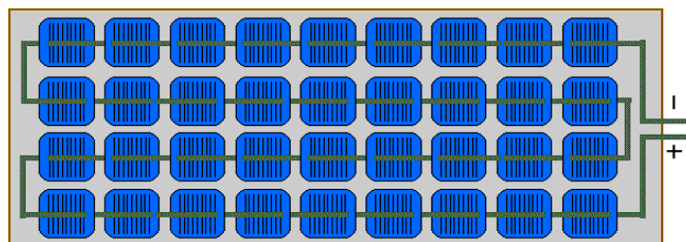


Gambar 5 Kurva karakteristik P-V terhadap perubahan iradiasi (Putra dkk, 2023)

Gambar di atas menunjukkan hubungan antara daya *output* panel surya terhadap perubahan iradiasi matahari. Panel surya dapat bekerja secara optimal dan menghasilkan daya maksimum, apabila iradiasi yang mengenai permukaan panel surya bernilai sekitar 1000 W/m². Semakin sedikit iradiasi mengenai panel surya, maka daya *output* juga semakin menurun (Putra dkk, 2023).

2.1.6 Panel surya

Sejumlah sel surya, yang dapat dikelompokkan secara paralel atau seri dapat membentuk panel surya. Sejumlah modul umumnya terdiri dari 32 sel surya atau 36 sel dan 72 sel. Modul-modul ini kemudian dirangkai menjadi panel Surya dan jika panel Surya ini dihubungkan secara baris dan kolom disebut dengan *array* (Samsurizal dkk, 2021).



Gambar 6 Panel surya tersusun dari 36 sel yang terhubung seri (Samsurizal dkk, 2021)

Secara umum terdapat beberapa jenis panel surya yang umum dan banyak digunakan di masyarakat yaitu:

1. Jenis Monokristal (*Mono-Crystalline*)

Panel surya jenis monokristal merupakan panel surya yang terbaik dan yang terpopuler digunakan oleh masyarakat saat ini. Panel ini memiliki tingkat efisiensi antara 12% sampai 14%.

2. Jenis Polikristal (*Poly-Crystalline*)

Panel surya jenis polikristal merupakan jenis panel surya yang terbuat dari kristal silikon dengan tingkat efisiensi antara 10 sampai 12%.

3. Jenis Silikon Amorphous

Panel surya jenis ini terbuat dari silicon amorphous, yang berbentuk film tipis (*Thin Film*). Efisiensi panel surya jenis ini sekitar 4-6%.

4. Jenis Gallium Arsenide

Panel surya ini adalah panel surya yang terbuat dari GaAs (Gallium Arsenide) yang lebih efisien pada temperatur tinggi (Samsurizal dkk, 2021).

2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) merupakan sebuah metode untuk memantau dan melihat titik keluaran daya maksimum sistem fotovoltaik. Membaca setiap titik keluaran pada kurva karakteristik P-V panel surya adalah dasar untuk pengoperasian MPPT. Konverter DC-DC akan memaksa panel surya untuk secara konsisten mencapai titik daya maksimumnya, sementara sistem kontrol MPPT akan menyesuaikan titik pengoperasian panel surya. MPPT adalah sistem kelistrikan yang memaksimalkan keluaran daya panel surya, bukan sistem mekanis yang menggerakkan panel surya sesuai dengan arah datangnya intensitas iradiasi matahari yang masuk. Kualitas sistem MPPT juga perlu diukur agar dapat menentukan kinerjanya. Proses pengembangan sistem MPPT juga mendapat manfaat dari pengukuran kualitas sistem (Winarno & Natasari, 2017).

Terdapat tiga parameter yang dapat menentukan kualitas sistem MPPT, yaitu:

a. Parametes dinamis

Merupakan waktu yang dibutuhkan oleh sistem MPPT untuk mencari titik daya maksimal ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan (suhu sel atau radiasi matahari berubah). Semakin cepat waktu yang dibutuhkan, semakin baik sistem MPPT tersebut.

b. Parameter statis

Merupakan fluktuasi nilai keluaran ketika titik daya maksimum sudah tercapai dan tidak terjadi perubahan kondisi lingkungan (suhu sel atau radiasi matahari tidak berubah). Semakin kecil fluktuasi yang terjadi, maka semakin baik algoritma MPPT tersebut.

c. Parameter daya aktual dan daya ideal

Merupakan perbandingan daya keluaran yang aktual dalam satu periode waktu dengan daya maksimum yang diukur pada kondisi kerja sel surya tersebut. Nilai parameter ini akan berkisar antara 0 sampai 100%.

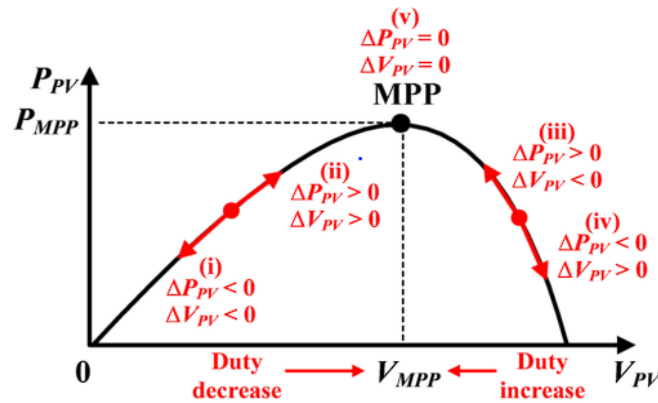
Rasio daya dari panel surya dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{\text{Daya Keluaran MPPT}}{\text{Daya Ideal}} \times 100\% \quad (4)$$

Untuk menghitung besar daya ideal dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{\text{Daya Ideal}}{\lambda} = \frac{\text{Daya saat } \lambda = 1000 \text{ W/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} \times 100\% \quad (5)$$

Apabila nilai rasio ini semakin besar, maka algoritma MPPT tersebut semakin baik (Dwidayanti dkk, 2017).

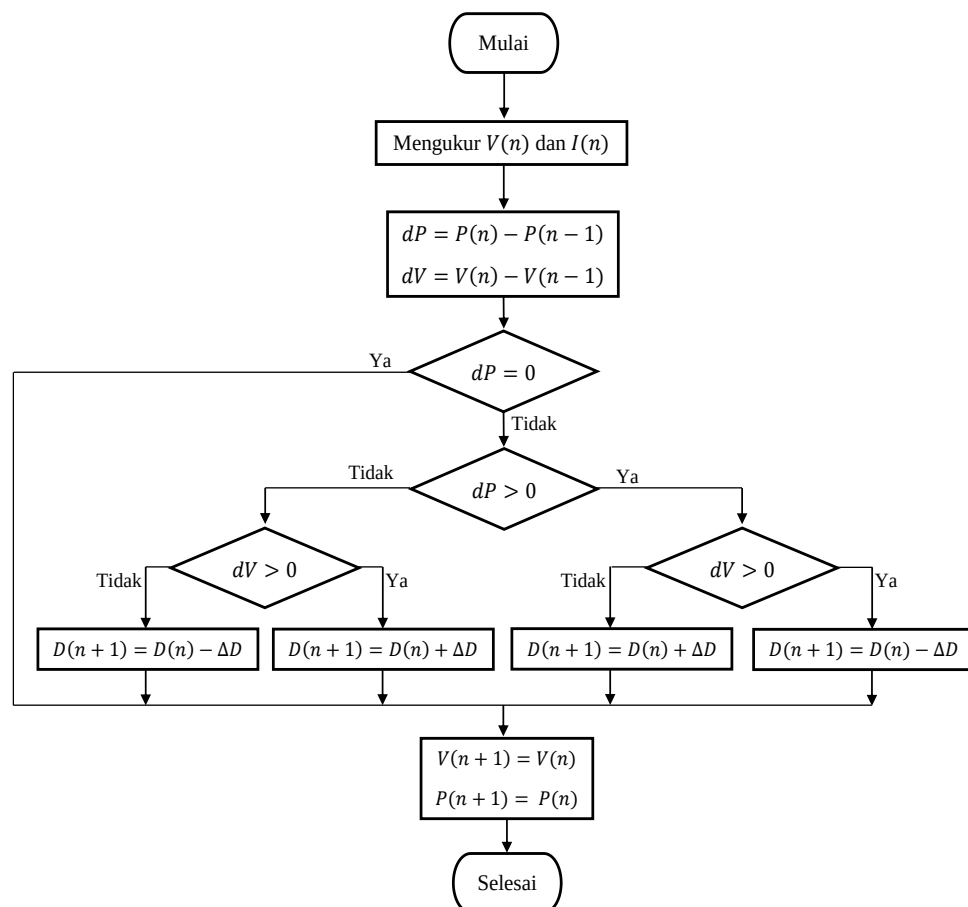


Gambar 7 Kurva karakteristik MPPT
(Devarakonda et al., 2022)

Pada Gambar 7, terlihat bahwa untuk mencari titik puncak daya maksimum MPPT adalah dengan cara menaikkan ataupun menurunkan *duty cycle* untuk dapat mengubah besar nilai tegangan. Metode MPPT ini diharapkan dapat mengatasi apabila terjadi perubahan suhu ataupun perubahan iradiasi matahari. Panel surya memiliki beberapa karakteristik titik yang terlihat pada Gambar 7.

2.3 Algoritma *Perturb and Observe* (P&O)

Metode MPPT konvensional adalah metode yang lebih mudah diimplementasikan dibandingkan dengan metode lain karena menggunakan pengukuran sederhana menggunakan sensor tegangan, arus, suhu, dan iradiasi untuk mencapai MPP. Metode *Perturb & Observe* dan *Incremental Conductance* adalah salah satu yang termasuk metode MPPT konvensional. Keunggulan metode konvensional terdapat pada waktu *tracking* yang cepat dibandingkan dengan metode lainnya (Wirsuyana dkk, 2022).



Gambar 8 Flowchart algoritma P&O
(Hajah, 2023)

Pada Gambar 8, terlihat bahwa algoritma ini bekerja dengan cara memvariasikan *duty cycle*-nya. Setiap kali perubahan *duty cycle* akan dilihat perubahan dayanya. Berikut adalah langkah-langkah umum dalam algoritma *Perturb and Observe*:

1. Baca tegangan dan arus: Baca tegangan dan arus keluaran dari panel surya.
2. Hitung daya: Kalikan tegangan dengan arus untuk mendapatkan daya keluaran saat ini.
3. Perubahan tegangan: Pada langkah awal, variasikan tegangan dengan jumlah langkah yang ditentukan sebelumnya. Misalnya, naikkan tegangan sebesar ΔV .
4. Baca tegangan dan arus baru: Baca tegangan dan arus keluaran baru setelah perubahan tegangan.
5. Hitung perubahan daya: Bandingkan daya baru dengan daya sebelumnya. Jika daya baru lebih besar, artinya langkah perubahan tegangan sebelumnya mengarah ke arah daya maksimum. Lanjutkan dengan langkah 6. Jika daya baru lebih kecil, artinya langkah perubahan tegangan sebelumnya bergerak menjauhi daya maksimum. Arahkan ke langkah 7.
6. Perturbasi yang sama: Lanjutkan dengan langkah perubahan tegangan sebelumnya. Ini berarti perubahan tegangan pada langkah sebelumnya mengarah ke arah daya maksimum.
7. Perubahan arah perturbasi: Ubah arah perubahan tegangan. Jika perubahan tegangan sebelumnya adalah peningkatan, ubah menjadi penurunan, dan sebaliknya.
8. Ulangi langkah 3-7: Lakukan langkah-langkah ini secara terus-menerus.

Dengan terus memantau perubahan daya dan memvariasikan tegangan berdasarkan perubahan tersebut, algoritma P&O secara bertahap mendekati titik daya maksimum pada kurva karakteristik V-I dari panel surya (Matalata dkk, 2024).

Prinsip kerja metode P&O adalah menaikkan atau menurunkan tegangan keluaran modul PV secara berkala, dan membandingkan daya siklus saat ini dengan daya siklus sebelumnya. Jika perubahan tegangan meningkatkan daya, MPPT akan terus bergerak ke arah tersebut. Jika tidak, arah perubahan tegangan akan dibalik. Setelah arah modifikasi ditentukan, arus akan berubah dengan nilai yang hampir konstan. Meskipun osilasi mungkin terjadi dalam kondisi stabil, nilai ini

menandakan titik yang harus dicapai, dan osilasi dapat dengan cepat menyesuaikan untuk mencapai kesetimbangan. Proses ini terus berlanjut hingga MPP tercapai (Nugraha dkk, 2021).

Ukuran variabel ΔD menentukan seberapa efisien algoritma ini. Sistem akan mencapai nilai maksimumnya dengan cepat jika nilai ΔD semakin tinggi, tetapi juga akan menghasilkan fluktuasi yang signifikan setelah mencapai nilai tersebut, yang menyebabkan terjadi osilasi pada daya yang dihasilkan dan efisiensi yang rendah. Sistem akan lebih efisien jika ΔD yang digunakan sederhana dan lebih kecil, tetapi akan memakan waktu yang sangat lama untuk mencapai titik nilai maksimum, sehingga sistem tersebut tidak responsif. Algoritme P&O memiliki sejumlah parameter, termasuk bagaimana nilai awal diinisialisasi dan seberapa banyak nilai *step size* berubah dengan setiap iterasi. Untuk mempertahankan fungsionalitas algoritma, pembatasan *duty cycle* juga diperlukan (Huda & Siraju, 2021).

2.4 Boost Converter

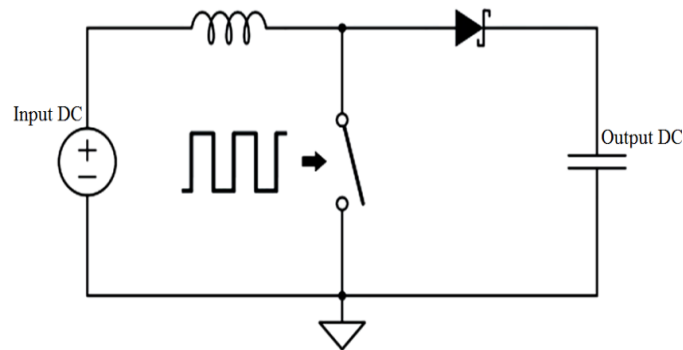
Perangkat elektronik yang dikenal sebagai konverter DC-DC dapat mengubah tegangan DC menjadi tegangan DC lain dengan level berbeda dan sering kali menghasilkan *output* yang lebih tinggi dan dapat diatur. Agar konverter DC-DC model *switch* dapat berfungsi, energi *input* harus disimpan sementara sebelum dilepaskan dalam berbagai jumlah tegangan atau arus (Utami, 2017).

Pada penelitian ini menggunakan konverter DC-DC tipe *boost converter*. *Boost converter* adalah suatu rangkaian yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan DC keluaran yang lebih tinggi dibanding tegangan DC sumber, atau biasa disebut dengan kata lain adalah konverter penaik tegangan DC. Untuk mendapatkan tegangan yang lebih tinggi dari pada masukannya, DC *chopper* tipe *boost* diberikan induktor yang akan menyimpan muatan pada saat diberikan tegangan *input* (Ali, 2018).

Rangkain konverter ini banyak dimanfaatkan untuk aplikasi PLTS. Komponen *boost converter* terdiri atas komponen *switching*, dioda, induktor, dan kapasitor. Jika saklar pada kondisi tertutup (*ON*), arus akan mengalir ke induktor sehingga menyebabkan energi yang tersimpan di induktor naik. Saat saklar terbuka (*OFF*),

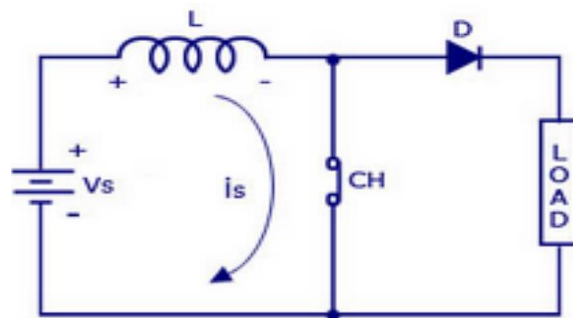
arus induktor ini akan mengalir menuju beban melewati dioda sehingga energi yang tersimpan di induktor akan turun (Sitanggang dkk, 2021).

Mengenai prinsip kerja secara lengkap rangkaian *boost converter* adalah sebagai berikut:



Gambar 9 Rangkaian *boost converter*
(Ali, 2018)

Mode *ON* (*switch close*): Pada mode ini menjelaskan tentang rangkaian dengan kondisi saklar tertutup dan dioda dengan kondisi bias mundur (*dioda off*), maka arus induktor (I_L) mengalir searah jarum jam dari sumber menuju ke induktor sehingga terjadi pengisian arus pada induktor dan menyebabkan energi yang tersimpan pada induktor naik.

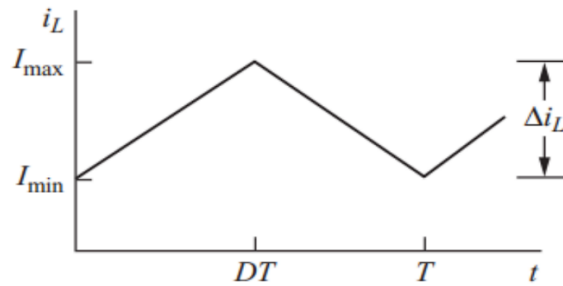


Gambar 10 Rangkaian *boost converter* (saklar on)
(Ali, 2018)

Ketika saklar tertutup, maka arus listrik dari sumber akan mengisi. Hukum kirchoff tegangan yang berlaku di sekitar sumber, induktor, dan saklar yang tertutup (terhubung) dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$V_L = V_s = L \frac{dI_L}{dt} = 0 \text{ atau } \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (6)$$

Ketika saklar tertutup (terhubung), arus akan meningkat secara linear karena perubahan arus bersifat konstan.



Gambar 11 Bentuk gelombang arus induktor pada *boost converter* (Hushaini dkk, 2019)

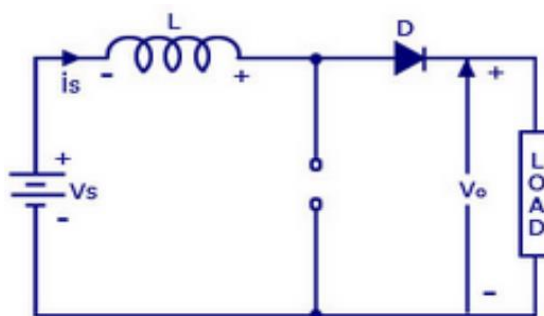
Perubahan yang terjadi pada arus induktor seperti yang terlihat pada Gambar 11 dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\Delta I_L}{D T} = \frac{V_s}{L} \quad (7)$$

Sehingga penyelesaian untuk ΔI_L untuk saklar tertutup (terhubung), dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$(\Delta I_L)_{Closed} = \frac{V_s D T}{L} \quad (8)$$

Mode *OFF* (*switch open*): Pada mode ini menjelaskan tentang rangkaian dengan kondisi saklar terbuka (terputus) dan dioda dengan kondisi bias maju (dioda *on*), maka Arus induktor (I_L) kemudian akan mengalir ke beban melalui diode dan mengurangi jumlah energi yang tersimpan dalam induktor karena tegangan induktor (V_L) melepaskan energinya dan membuat tegangan keluaran (V_O) lebih besar daripada tegangan masukan (V_{in}).



Gambar 12 Rangkaian *boost converter* (saklar *off*) (Ali, 2018)

Ketika saklar terbuka, arus pada induktor tidak berubah secara seketika, jadi dioda akan berfungsi menjadi bias maju untuk memberikan aliran pada arus induktor (I_L). Asumsikan bahwa tegangan *output* (V_O) selalu konstan, sehingga tegangan yang melewati induktor dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (10)$$

Ketika sakelar terbuka (terputus), arus akan berubah secara linear karena perubahan arus induktor (I_L) bersifat konstan. Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung perubahan arus induktor (I_L) saat sakelar terbuka:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{(1 - D) T} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (11)$$

Sehingga nilai untuk ΔI_L saat saklar terbuka, dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$(\Delta I_L)_{Open} = \frac{(V_s - V_o) (1 - D) T}{L} \quad (12)$$

Untuk mendapatkan kerja atau operasi *steady state* (keadaan stabil), selisih dari perubahan pada arus induktor harus nol, maka dengan menggunakan persamaan (8) dan (12) di atas diperoleh:

$$(\Delta I_L)_{Closed} + (\Delta I_L)_{Open} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{V_s D T}{L} = \frac{(V_s - V_o) (1 - D) T}{L} \quad (14)$$

Maka, diperoleh untuk tegangan *output* (V_o)

$$V_s (D + 1 - D) - V_o (1 - D) = 0 \quad (15)$$

$$V_o = \frac{V_s}{1 - D} \quad (16)$$

Keterangan:

- V_s : Tegangan sumber (V)
- V_o : Tegangan keluaran (V)
- V_L : Tegangan yang tersimpan di induktor (V)
- I_L : Arus induktor (A)
- D : *Duty cycle*

Untuk pemilihan nilai induktor yang dipakai pada rangkaian *boost* konverter dapat diperkirakan dengan memperhatikan *range* dari hasil perhitungan induktansi nilai minimum dan nilai maksimum dengan menyesuaikan pada ketersediaan komponen yang dijual di pasar (Hushaini dkk, 2019). Nilai minimum dan maksimum dari induktansi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 17 dan persamaan 18.

$$L_{min} = \frac{D (1 - D)^2 R}{2f} \quad (17)$$

$$L_{max} = \frac{D (1 - D) R}{2f} \quad (18)$$

Selanjutnya, pemilihan nilai kapasitor yang dipakai pada *boost* konverter dapat diperkirakan dengan memperhatikan hasil perhitungan kapasitansi nilai minimum dengan menyesuaikan pada ketersediaan komponen yang dijual di pasar (Hushaini dkk, 2019).

Nilai minimum dari kapasitansi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{D}{\Delta V_o R f} \quad (19)$$

Keterangan:

ΔV_o : Ripple tegangan *output* (V)

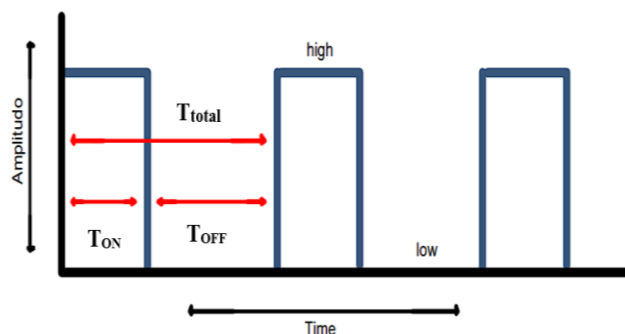
R : Beban (Ω)

F : Frekuensi *switching*

D : *Duty cycle*

2.5 Pulse Width Modulation (PWM)

PWM merupakan salah satu teknik modulasi yang digunakan untuk membentuk lebar sinyal pulsa dengan nilai periode waktu tertentu untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang memiliki nilai bervariasi. Lebar pulsa tersebut dapat diatur dengan *duty cycle*. *Duty cycle* merupakan presentase periode sinyal *high* dan periode sinyal *low*, presentase *duty cycle* akan berbanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan. Sinyal PWM memiliki lebar pulsa yang bervariasi sesuai *duty cycle* (0%-100%).



Gambar 13 Sinyal *pulse width modulation* (Akbar & Riyadi, 2018)

Berdasarkan Gambar 13, T_{ON} adalah waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi *high* atau berlogika 1, T_{OFF} adalah waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi *low* atau berlogika 0 dan T_{total} adalah waktu satu siklus atau penjumlahan antara T_{ON} dengan T_{OFF} , biasa dikenal dengan “periode satu gelombang” (Akbar & Riyadi, 2018).

$$T_{total} = T_{ON} + T_{OFF} \quad (20)$$

Siklus kerja atau *duty cycle* sebuah gelombang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \times 100\% \quad (21)$$

Tegangan keluaran dapat bervariasi dengan *duty cycle* dan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (22)$$

Keterangan:

D : *Duty Cycle*

T_{ON} : Waktu ketika tegangan keluaran berada pada posisi *high*

T_{OFF} : Waktu ketika tegangan keluaran berada pada posisi *low*

V_{out} : Tegangan keluaran (V)

V_{in} : Tegangan masukan (V)

2.6 Matlab Simulink

Matlab adalah sistem komputasi yang dirancang untuk memberikan solusi analitis dan numerik untuk berbagai masalah matematika dan mensimulasikan objek dan sistem teknis yang kompleks. Aplikasi Simulink adalah salah satu alat dalam paket Matlab yang memiliki kemampuan pemrograman terstruktur, berorientasi objek, dan visual yang utama. Sistem ini dapat menyelesaikan masalah aljabar linier, persamaan integral dan diferensial, serta melakukan transformasi Laplace dan Fourier. Matlab banyak digunakan oleh para insinyur, tidak seperti program serupa lainnya. Sistem ini terdiri dari inti aljabar terkomputerisasi Maple dan paket ekstensi Simulink, serta lusinan ekstensi lainnya. Saat ini, sistem simulasi matematika Simulink merupakan salah satu alat yang paling populer untuk perhitungan numerik di berbagai bidang ilmu.

Fitur utama Simulink meliputi berikut ini: editor grafis untuk membuat dan mengelola diagram blok hierarki; perpustakaan blok preset untuk pemodelan sistem waktu kontinu dan diskrit; mesin simulasi dengan langkah tetap dan variabel; area tampilan data untuk meninjau hasil simulasi; alat visualisasi proyek dan data untuk manajemen file model; alat analisis model untuk menentukan arsitekturnya dan meningkatkan kecepatan simulasi; unit fungsional untuk mengimpor algoritma MatLab ke dalam model; aplikasi Alat Kode Lama untuk mengimpor kode C dan C++ dalam model (Semenova et al., 2022).

2.7 Penelitian Terdahulu yang Terkait

Referensi yang digunakan pada penelitian ini memiliki relevansi pada penelitian-penelitian terdahulu, antara lain:

1. Implementasi Algoritma *Perturb and Observe* untuk Mengoptimasi Daya Keluaran *Solar Cell* Menggunakan MPPT oleh Sri Utami (2017)

Penelitian ini menggunakan *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) sebagai pengontrol untuk pembangkitan energi surya, dengan menerapkan algoritma *Perturb and Observe*. Arduino Uno R3 digunakan dalam konstruksi sistem untuk memaksimalkan daya panel surya. Mikrokontroler ini mengisi daya baterai 6 volt dengan menggunakan *buck converter*. Teknik ini membandingkan daya yang dihasilkan dengan *output* panel surya setelah memvariasikan tegangan atau arus terminal *array*. Kinerja yang lebih baik diperoleh saat panel surya divalidasi menggunakan pendekatan yang disarankan pada MPPT. Dibandingkan dengan pendekatan konvensional, yang menghasilkan daya output 15,37 W dengan beban yang sama dan nilai iradiasi 537 W/m², MPPT dapat mengoptimalkan daya output panel surya sebesar 24,49 W dengan beban 5 Ω dan nilai iradiasi 523 W/m².

2. Desain Perbandingan MPPT P&O dan IC pada Solar Sel 1500 WP Menggunakan Konverter SEPIC oleh Luki Septya Mahendra, Jauharotul Maknunah, dan Karimatun Nisa (2021)

Penelitian ini berfokus pada desain perbandingan MPPT P&O dan IC pada Solar Sel 1500 WP menggunakan Konverter SEPIC. Hasil simulasi menunjukkan bahwa MPPT dengan algoritma P&O lebih baik performanya

dibandingkan dengan MPPT berbasis algoritma IC dalam hal peningkatan daya atau efisiensi daya fotovoltaiik.

3. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan Kontrol PID untuk Optimasi Pengisian Daya Baterai pada Panel Surya oleh Muhammad Zainal Roisul A, Adi Mulyadi, dan Adi Pratama Putra (2022)

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai daya pada suhu 20°C - 40°C dengan kenaikan interval suhu sebesar 5°C tanpa menggunakan MPPT sebesar 417.13 Watt - 424.53 Watt sedangkan nilai daya pada suhu 20°C-40°C dengan kenaikan interval suhu sebesar 5°C menggunakan MPPT sebesar 984.80 Watt-1009.28 Watt. Efisiensi pengisian daya baterai menggunakan MPPT meningkat hingga 138% dibandingkan tidak menggunakan MPPT.

Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan

Penulis	Judul Penelitian	Persamaan	Perbedaan
Sri Utami (2017)	Implementasi Algoritma <i>Perturb and Observe</i> untuk Mengoptimasi Daya Keluaran <i>Solar Cell</i> Menggunakan MPPT	Algoritma yang digunakan adalah <i>Perturb and Observe</i> (P&O)	Pada penelitian ini menggunakan <i>Buck Converter</i> , sedangkan untuk penelitian yang diajukan menggunakan <i>Boost Converter</i>
Luki Septya Mahendra, Jauharotul Maknunah, dan Karimatun Nisa (2021)	Desain Perbandingan MPPT P&O dan IC pada Solar Sel 1500 WP Menggunakan Konverter SEPIC	Algoritma yang digunakan adalah <i>Perturb and Observe</i> (P&O)	Pada penelitian ini menggunakan <i>SEPIC Converter</i> , sedangkan untuk penelitian yang diajukan menggunakan <i>Boost Converter</i>
Muhammad Zainal Roisul A, Adi Mulyadi, dan Adi Pratama Putra (2022)	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT) dengan Kontrol PID untuk Optimasi Pengisian Daya Baterai pada Panel Surya	Algoritma yang digunakan adalah <i>Perturb and Observe</i> (P&O)	Pada penelitian ini menggunakan <i>Buck Converter</i> , sedangkan untuk penelitian yang diajukan menggunakan <i>Boost Converter</i>