

SKRIPSI

SISTEM *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* MENGUNAKAN *INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD* PADA *BOOST CONVERTER* SEBAGAI SOLUSI PENINGKATAN EFISIENSI PANEL SURYA

Disusun dan diajukan oleh:

**NUR ISNUN NADIYAH
D041191030**

**Telah disidangkan dan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

SISTEM MAXIMUM POWER POINT TRACKING MENGUNAKAN INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD PADA BOOST CONVERTER SEBAGAI SOLUSI PENINGKATAN EFISIENSI PANEL SURYA

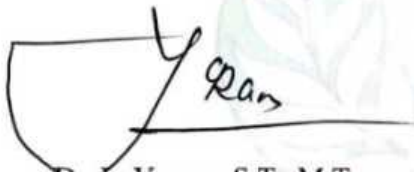
Disusun dan diajukan oleh

Nur Isnun Nadiyah
D041191030

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 15 Desember 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



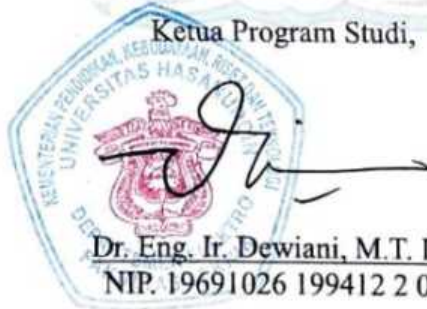
Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.
NIP. 19750404 200012 1 001

Pembimbing Pendamping,



Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T.
NIP. 19601106 198601 2 001

Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. IPM
NIP. 19691026 199412 2 001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Nur Isnun Nadiyah

NIM : D041191030

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**SISTEM MAXIMUM POWER POINT TRACKING MENGGUNAKAN
INCREMENTAL CONDUCTANCE METHOD PADA BOOST CONVERTER
SEBAGAI SOLUSI PENINGKATAN EFISIENSI PANEL SURYA**

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, 15 Desember 2023

Yang Menyatakan


Nur Isnun Nadiyah



KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpah rahmat dan karunia-Nya. Sholawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada baginda Nabi Muhammad sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Sistem *Maximum Power Point Tracking* Menggunakan *Incremental Conductance Method* pada *Boost converter* sebagai Solusi Peningkatan Efisiensi Panel Surya”.

Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Sarjana Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini terwujud berkat bantuan arahan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, saudara dan saudari penulis, serta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan doa dan dukungan dalam bentuk apapun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Yusran, S.T., M.T. selaku pembimbing utama serta ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T. selaku pembimbing pedamping yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan terhadap penelitian yang dilakukan.
3. Bapak Dr. Ir. Yustinus Upa Sombolayuk, M.T. dan bapak Ir. Gassing, M.T. selaku dosen penguji yang memberikan sarah, koreksi, dan arahan dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. dan Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Seluruh dosen pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan, kemudahan, dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan.



teman-teman seperjuangan di Laboratorium Elektronika Daya, yang telah memberi bantuan serta kerja sama dalam menghadapi setiap dinamika

yang terjadi selama berjuang di laboratorium. Teman-teman di Laboratorium Telematika dan Laboratorium Sistem Kendali dan Instrumentasi yang telah menjadi tempat persinggahan penulis selama melakukan pengambilan data dan penulisan skripsi.

7. Seluruh teman-teman TR19GER yang telah menjadi teman seperjuangan, memberikan banyak pengalaman, cerita dan motivasi kepada penulis selama masa-masa perkuliahan.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan skripsi ini.

Semoga Allah SWT membalas semua pihak yang telah membantu penulis menyelesaikan skripsi ini. Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima kritikan dan saran yang membangun untuk memperbaiki skripsi dan penelitian ini ke depannya.

Gowa, 15 Desember 2023

Penulis



ABSTRAK

NUR ISNUN NADIYAH. *Sistem Maximum Power Point Tracking Menggunakan Incremental Conductance Method pada Boost converter Sebagai Solusi Peningkatan Efisiensi Panel Surya* (dibimbing oleh Yusran dan Sri Mawar Said)

Salah satu jenis Energi Baru dan Terbarukan adalah panel surya yang mampu mengkonversi energi dari sinar matahari menjadi energi listrik, tetapi salah satu permasalahan yang terdapat pada panel surya adalah efisiensinya yang cukup rendah sehingga dibutuhkan MPPT untuk mencari titik daya maksimumnya dan membuat panel surya tetap bekerja pada titik tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk (a) merancang sistem MPPT pada panel surya menggunakan algoritma ICM pada *boost converter* untuk mendapatkan daya maksimum dari keluaran panel surya (b) mengetahui efisiensi maksimal yang bisa diperoleh pada panel surya yang menggunakan sistem MPPT dengan algoritma ICM (c) mengetahui perbandingan keluaran panel surya dengan menggunakan sistem MPPT dan tanpa menggunakan sistem MPPT. Dalam penelitian ini, sistem MPPT menggunakan algoritma ICM dengan *boost converter*. Perancangan dimulai dengan memodelkan panel surya, pemodelan blok MPPT dengan algoritma ICM, penentuan spesifikasi boost converter, parameter PID, serta PWM. Pengumpulan data berupa iradiasi matahari dan suhu lingkungan dilakukan menggunakan digital lux meter kemudian disimulasikan dengan *software* Matlab Simulink. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rata-rata efisiensi maksimal yang dapat dicapai oleh panel surya yang menggunakan sistem MPPT dengan algoritma ICM adalah 76,49% sedangkan untuk panel surya yang tidak menggunakan sistem MPPT hanya memperoleh efisiensi rata-rata sebesar 69,86%. Sistem MPPT dengan algoritma ICM ini juga mampu meningkatkan daya keluaran panel surya dengan rata-rata sebesar 8,54% dibandingkan dengan panel surya yang tidak menggunakan sistem MPPT.

Kata Kunci: PLTS, *Boost converter*, MPPT, *Incremental Conductance Method*



ABSTRACT

NUR ISNUN NADIYAH. *Maximum Power Point Tracking System Using Incremental Conductance Method in Boost converter as a Solution for Improving Solar Panel Efficiency* (supervised by Yusran dan Sri Mawar Said)

One type of New and Renewable Energy is solar panels that are able to convert energy from sunlight into electrical energy, but one of the problems found in solar panels is that the efficiency is low enough so MPPT is needed to find its maximum power point and keep solar panels working at that point. This study aims to (a) design an MPPT system on solar panels using the ICM algorithm on the boost converter to get maximum power from the output of solar panels (b) find out the maximum efficiency that can be obtained on solar panels that use the MPPT system with the ICM algorithm (c) find out the comparison of solar panel output using the MPPT system and without using the MPPT system. In this study, the MPPT system used the ICM algorithm with a boost converter. The design began with modeling solar panels, modeling MPPT blocks with ICM algorithms, determining boost converter specifications, PID parameters, and PWM. Data collection in the form of solar irradiation and environmental temperature was carried out using a digital lux meter and then simulated with Matlab Simulink software. The simulation results show that the average maximum efficiency that can be achieved by solar panels using the MPPT system with the ICM algorithm is 76.49%, while for solar panels that do not use the MPPT system, they only obtain an average efficiency of 69,86%. The MPPT system with the ICM algorithm is also able to increase the output power of solar panels by an average of 8,54% compared to solar panels that do not use the MPPT system.

Keywords: Solar PV, *Boost converter*, MPPT, Incremental Conductance Method.



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Panel Surya	6
2.1.1 Prinsip dasar panel surya.....	6
2.1.2 Persamaan karakteristik sel surya.....	7
2.1.3 Pengaruh iradiasi terhadap sel surya	10
2.1.4 Pengaruh suhu terhadap sel surya	11
2.2 <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT)	12
2.3 <i>Algoritma Incremental Conductance Method</i> (ICM)	14
2.4 <i>Boost converter</i>	16
2.5 <i>Pengendali Proportional Integral Derivative</i> (PID)	19
2.5.1 <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM)	21
2.5.2 Simulasi.....	22
2.5.3 Penelitian Terkait yang Terdahulu.....	22



BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	28
3.2 Alat dan Bahan.....	28
3.3 Rancangan Sistem.....	28
3.4 Diagram Alir Penelitian	29
3.5 Teknik Pengumpulan Data.....	32
3.6 Hubungan Variabel Sebab, Variabel Antara, dan Variabel Akibat	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Data Iradiasi Matahari dan Suhu Lingkungan	34
4.2 Pemodelan Panel Surya.....	38
4.3 MPPT dengan Algoritma ICM.....	41
4.4 Pemodelan <i>Boost Converter</i>	42
4.5 Pemodelan Pengendali PID pada <i>Boost Converter</i>	44
4.6 Pemodelan PWM	47
4.7 Sistem Panel Surya Menggunakan MPPT	48
4.8 Sistem Panel Surya tanpa Menggunakan MPPT	48
4.9 Hasil Pengujian	49
4.10 Skematik Perangkat Keras	62
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	63
5.1 Simpulan	63
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN	72



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Struktur dasar panel surya	6
Gambar 2 Rangkaian ekivalen sel surya	7
Gambar 3 Karakteristik kurva V terhadap I dengan perubahan iradiasi	11
Gambar 4 Kurva karakteristik V terhadap I dengan perubahan suhu	11
Gambar 5 Kurva karakteristik V terhadap P pada sel surya.....	14
Gambar 6 Flowchart algoritma ICM.....	15
Gambar 7 Rangkaian <i>boost converter</i>	16
Gambar 8 Rangkaian <i>boost converter</i> saat keadaan saklar On	16
Gambar 9 Rangkaian <i>boost converter</i> saat keadaan saklar off	17
Gambar 10 Blok diagram pengendali PID	19
Gambar 11 Rancangan sistem	28
Gambar 12 Diagram alir penelitian.....	30
Gambar 13 Diagram pembuatan program matlab simulink.....	31
Gambar 14 Hubungan variabel penelitian.....	33
Gambar 15 Grafik perubahan iradiasi matahari	36
Gambar 16 Grafik perubahan suhu	37
Gambar 17 Karakteristik pada panel surya 150 WP <i>Greentek Policrystalline</i>	38
Gambar 18 Diagram blok pemodelan panel surya	38
Gambar 19 Kurva V terhadap I pada panel surya 150 WP <i>Greentek Policrystalline</i> pada kondisi pengukuran standar	39
Gambar 20 Kurva V terhadap P pada panel 150 WP <i>Greentek Policrystalline</i> pada kondisi pengukuran standar.....	39
Gambar 21 Kurva karakteristik V terhadap I dan V terhadap P dengan susunan 4 panel surya pada kondisi standar.....	40
Gambar 22 Blok MPPT dengan algoritma ICM	42
Gambar 23 Rangkaian <i>boost converter</i> pada Matlab Simulink	44
24 Grafik tegangan keluaran <i>boost converter</i>	44
25 Rangkaian simulasi tuning PID dengan menggunakan Matlab Simulink	45



Gambar 26 Gelombang keluaran ketika nilai $K_p = 0,0016$	46
Gambar 27 Simulasi <i>boost converter</i> dengan pengendali PID pada Matlab Simulink	47
Gambar 28 Spesifikasi PWM generator	47
Gambar 29 Rangkaian pengujian panel surya menggunakan MPPT	48
Gambar 30 Rangkaian pengujian panel surya tanpa menggunakan MPPT	49
Gambar 31 Grafik Efisiensi penggunaan MPPT dan tanpa MPPT tanggal 11 Oktober 2023.....	50
Gambar 32 Perbandingan daya tanpa MPPT, daya dengan MPPT, dan daya ideal tanggal 11 Oktober 2023	51
Gambar 33 Grafik efisiensi penggunaan MPPT dan tanpa MPPT tanggal 12 Oktober 2023.....	52
Gambar 34 Perbandingan daya tanpa MPPT, daya dengan MPPT, dan daya ideal tanggal 12 Oktober 2023	52
Gambar 35 Grafik efisiensi penggunaan MPPT dan tanpa MPPT tanggal 13 Oktober 2023.....	54
Gambar 36 Perbandingan daya tanpa MPPT, daya dengan MPPT, dan daya ideal tanggal 13 Oktober 2023	54
Gambar 37 Grafik efisiensi penggunaan MPPT dan tanpa MPPT tanggal 14 Oktober 2023.....	55
Gambar 38 Perbandingan daya tanpa MPPT, daya dengan MPPT, dan daya ideal tanggal 14 Oktober 2023	56
Gambar 39 Grafik penggunaan MPPT dan tanpa MPPT tanggal 15 Oktober 2023	57
Gambar 40 Perbandingan daya tanpa MPPT, daya dengan MPPT, dan daya ideal tanggal 15 Oktober 2023	57
Gambar 41 Grafik efisiensi penggunaan MPPT dan tanpa MPPT tanggal 16 Oktober 2023.....	59
Gambar 42 Perbandingan daya tanpa MPPT, daya dengan MPPT, dan daya ideal tanggal 16 Oktober 2023	59
13 Grafik efisiensi penggunaan MPPT dan tanpa MPPT tanggal 17 Oktober 2023.....	60



Gambar 44 Perbandingan daya tanpa MPPT, daya dengan MPPT, dan daya ideal tanggal 17 Oktober 2023	61
Gambar 45 Skematik perangkat keras.....	62



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Faktor ideal dioda A dan teknologi PV	9
Tabel 2 Persamaan <i>tuning</i> Ziegler-Nichols dengan metode osilasi.....	21
Tabel 3 Perbandingan penelitian terkait yang terdahulu dengan penelitian yang diajukan	25
Tabel 4 Spesifikasi panel surya 150 WP <i>Greentek polycrystalline</i>	32
Tabel 5 Hasil pengukuran iradiasi matahari dan suhu lingkungan	35
Tabel 6 Spesifikasi <i>boost converter</i>	42
Tabel 7 Nilai K_p , K_i , dan K_d dengan metode <i>tuning</i> Ziegler-Nichols.....	46
Tabel 8 Hasil pengujian tanggal 11 Oktober 2023	50
Tabel 9 Hasil pengujian tanggal 12 Oktober 2023	51
Tabel 10 Hasil pengujian tanggal 13 Oktober 2023	53
Tabel 11 Hasil pengujian tanggal 14 Oktober 2023	55
Tabel 12 Hasil pengujian tanggal 15 Oktober 2023	56
Tabel 13 Hasil pengujian tanggal 16 Oktober 2023	58
Tabel 14 Hasil pengujian tanggal 17 Oktober 2023	60
Tabel 15 Hasil pengujian rata-rata dari tanggal 11 – 17 Oktober 2023	61



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Program MPPT pada Matlab <i>function</i> dengan algoritma ICM.....	72
Lampiran 2 Spesifikasi panel surya 150 WP <i>Greentek Polycrystalline</i>	74



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
ICM	<i>Incremental Conductance Method</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
EBT	Energi Baru dan Terbarukan
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
CVC	<i>Constant Voltage Controller</i>
P&O	<i>Perturb & Observe</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
STC	<i>Standar Test Condition</i>
η	Efisiensi
R	Resistansi
C	Kapasitor
L	Induktor
D	<i>Duty cyle</i>
K_{cr}	<i>Critical gain</i>
P_{cr}	<i>Critical period</i>
K_p	<i>Proportional gain</i>
K_i	<i>Integral gain</i>
K_d	<i>Derivative gain</i>
T_i	<i>Integral time</i>
T_d	<i>Integral derivate</i>



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Cadangan minyak Indonesia setiap tahunnya selalu mengalami penurunan. Menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral (ESDM) dari tahun 2011 hingga tahun 2021 terjadi penurunan cadangan minyak sebesar 3,78 miliar barel, dimana pada tahun 2021 cadangan minyak Indonesia sebesar 3,95 miliar barel yang terdiri dari 2,25 miliar cadangan terbukti dan 1,7 miliar cadangan potensial. Cadangan tersebut jauh lebih rendah dibandingkan dengan tahun 2011 yang tercatat sebesar 7,73 miliar barel yang terdiri atas 4,04 miliar barel cadangan terbukti dan 3,69 barel cadangan potensial. Diperkirakan cadangan minyak tersebut hanya akan bertahan sekitar 8 tahun sehingga diperlukan transisi energi dari energi konvensional ke Energi Baru dan Terbarukan (EBT) (Pahlevi, 2022).

Dalam rangka percepatan pembangunan EBT dan mengingat waktu pembangunan yang cepat serta biaya perawatan yang murah, Kementerian ESDM mendorong pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baik berupa PLTS Atap skala kecil, PLTS Terapung, maupun PLTS dengan skala besar yang tersebar di seluruh Indonesia (Pribadi, 2021). PLTS didasarkan pada efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi ketika cahaya matahari yang menyinari permukaan logam menyebabkan elektron keluar dari logam dan menghasilkan arus listrik jika disambung ke rangkaian tertutup. PLTS terdiri dari kumpulan sel surya yang membentuk panel surya. Panel surya pertama kali dipublikasikan pada tahun 1959 oleh Bell Laboratory, panel surya pertama tersebut dibuat dari silikon yang memiliki efisiensi 6% dan berkembang hingga memiliki efisiensi 10%.

Salah satu permasalahan yang terdapat pada panel surya adalah efisiensi panel surya yang cukup rendah yang tentu saja akan berpengaruh terhadap keluaran panel surya. Efisiensi panel surya biasanya hanya sekitar 12-19%, tentu

ini masih jauh dari efisiensi ideal (Hasrul, 2021). Tegangan dan arus panel surya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari (*iradiasi*) dan λ kungan (Verma et al., 2016). Besarnya pengaruh intensitas radiasi



matahari yang ditangkap oleh panel surya bersifat proporsional terhadap tegangan dan arus keluaran panel surya. Sedangkan untuk pengaruh suhu lingkungan, ketika suhu lingkungan lebih tinggi dengan intensitas penyinaran matahari yang konstan, tegangan keluaran akan berkurang tetapi arus keluaran yang dihasilkan meningkat (Suryana, 2016).

Panel surya memiliki kurva karakteristik P-V dan I-V yang tidak linear dan bervariasi terhadap iradiasi matahari dan suhu lingkungan (Huynh, 2014). Pada kurva ini terdapat titik maksimum yang disebut dengan *Maximum Power Point* (MPP). Di titik MPP ini panel surya bekerja dalam keadaan maksimal baik dari tegangan maupun arus yang dihasilkan. Ketika tegangan dan arus maksimum dihasilkan, maka daya yang dihasilkan juga maksimum, dengan begitu efisiensi dari panel surya juga dapat ditingkatkan. Lokasi titik MPP ini tidak diketahui namun dapat ditemukan menggunakan sistem pencari daya maksimum atau *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) (Huynh, 2014). Tujuan utama dari sistem MPPT adalah untuk menemukan titik operasi pada panel surya dimana panel surya dapat menghasilkan daya maksimal dan membuat panel surya agar tetap beroperasi pada titik tersebut. Yang perlu diperhatikan bahwa MPPT bukanlah sistem pelacakan mekanis yang bekerja dengan mengubah posisi modul relatif terhadap posisi matahari melainkan sistem elektronik yang dapat melacak daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya (Dwidayanti et al., 2017).

Untuk menentukan sistem MPPT dibutuhkan algoritma MPPT. Terdapat 2 metode yang bisa digunakan untuk menentukan algoritma MPPT yaitu metode tradisional dan metode kendali cerdas. Yang termasuk metode tradisional diantaranya *Constant Voltage Controller* (CVC), *Perturb & Observe* (P&O), dan *Incremental Conductance Method* (ICM). Sedangkan yang termasuk metode kendali cerdas di antaranya *fuzzy-logic*, *artificial neural networks*, *Flower Pollination Algorithm* (FPA), dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Shang et al., 2020). Meskipun efektivitas dari metode kendali cerdas telah dibuktikan melalui banyak kasus, metode ini masih memiliki kekurangan di antaranya

kasuannya yang rumit dan kompleks hingga rendahnya kecepatan untuk tingkat konvergen, oleh karena itu metode tradisional masih banyak digunakan (Shang et al., 2020).



Di antara ketiga metode tradisional tersebut, ICM memiliki keunggulan dalam hal kecepatan mencapai titik MPP dan juga beradaptasi dengan perubahan lingkungan misalkan terhadap iradiasi dan suhu, namun implementasinya lebih rumit dibandingkan dengan metode lainnya (Azmi et al., 2019); (Shang et al., 2020). Algoritma MPPT ini nantinya akan diimplementasikan dalam rangkaian konverter DC-DC yang mengontrol panel surya agar beroperasi pada titik operasi yang ditentukan oleh algoritma MPPT. Terdapat beberapa jenis konverter DC-DC yaitu *buck converter*, *boost converter*, dan *buck-boost converter*. Adapun jenis konverter yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah konverter DC-DC jenis *boost converter* karena tegangan yang dihasilkan akan dinaikkan.

Berdasarkan uraian yang telah dijelaskan di atas, akan dilakukan penelitian mengenai sistem MPPT pada panel surya dengan menggunakan algoritma ICM sebagai algoritma MPPT dengan rangkaian *boost converter* sebagai rangkaian pengendali titik operasi panel surya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang sebuah sistem MPPT panel surya dengan menggunakan algoritma ICM pada *boost converter*
2. Berapa efisiensi maksimal yang bisa diperoleh pada panel surya yang menggunakan sistem MPPT dengan algoritma ICM?
3. Bagaimana perbandingan keluaran panel surya dengan menggunakan sistem MPPT dan tanpa menggunakan sistem MPPT?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui proses dalam memodelkan sistem MPPT pada panel surya menggunakan algoritma ICM pada *boost converter* untuk mendapatkan daya maksimum dari keluaran panel surya.



2. Mengetahui efisiensi maksimal yang bisa diperoleh pada panel surya yang menggunakan sistem MPPT dengan algoritma ICM.
3. Mengetahui perbandingan keluaran panel surya yang menggunakan sistem MPPT dan tanpa menggunakan sistem MPPT.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai bahan acuan dalam pengembangan sistem MPPT serta pengaplikasiannya dalam panel surya sehingga dapat meningkatkan efisiensi panel surya.

1.5 Batasan Masalah

Pada penelitian ini melingkupi hal-hal sebagai berikut:

1. Sistem MPPT akan dibuat dalam blok-blok dan disimulasikan melalui *software* Matlab Simulink.
2. Algoritma yang digunakan dalam pelacakan MPPT adalah *Incremental Conductance Method* (ICM).
3. Model panel surya yang digunakan panel surya 150 WP *Greentek Polycrystalline*.
4. Konverter DC-DC yang digunakan adalah jenis *boost converter*.
5. Penelitian dilakukan selama 7 hari.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan teori-teori relevan yang mendukung penelitian yang meliputi sel surya, *Maximum Power Point Tracking*, algoritma *Incremental Conductance Method*, *Boost converter*, pengendali *Proportional Integral*



Derivatif, sinyal *Pulse Width Modulation*, Simulink, serta penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

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

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai pemodelan sistem menggunakan Matlab Simulink serta pengujian dan analisa data.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat simpulan dari penelitian yang dilakukan dan saran-saran yang dapat digunakan sebagai tindak lanjut dari penelitian yang telah dilakukan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

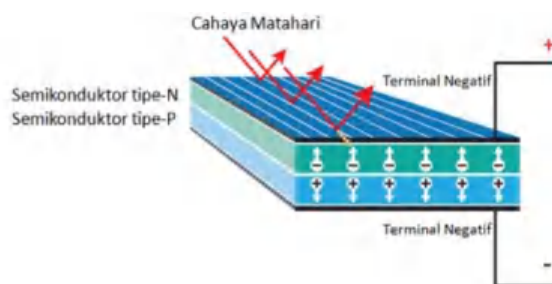
2.1 Panel Surya

Panel surya merupakan perangkat yang bisa mengkonversi energi sinar matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip efek fotovoltaiik. Fenomena fotovoltaiik mengacu pada fenomena di mana tegangan listrik dihasilkan ketika bahan semikonduktor yang saling terhubung menerima energi cahaya. Efek fotovoltaiik ini pertama kali ditemukan oleh Henri Becquerel pada tahun 1839 (Kho, 2021)

Panel surya ini merupakan salah satu teknologi pembangkit listrik yang sangat menjanjikan bukan hanya bagi para peneliti, tetapi juga untuk masyarakat umum. panel surya memiliki beberapa keunggulan misalnya merupakan konversi langsung energi cahaya matahari menjadi energi listrik, bebas polusi dan tidak menghasilkan emisi karbon, bersifat tahan lama, biaya perawatan yang murah, serta sumber energi tersedia secara gratis dan mudah didapat (Hidayanti, 2020). Akan tetapi panel surya juga memiliki kelemahan antara lain biaya pemasangan yang tinggi, kurangnya keandalan sistem pendukung, kurang tersedianya sistem yang terintegrasi secara komersial dengan panel surya saat ini, dan efisiensinya yang rendah.

2.1.1 Prinsip dasar panel surya

Pada dasarnya panel surya terdiri dari sekumpulan sel surya. Sel surya terdiri dari bahan semikonduktor yang memiliki elektron yang terikat lemah dalam pita energi yang dikenal sebagai pita valensi. Adapun struktur dasar pada panel surya seperti Gambar 1.



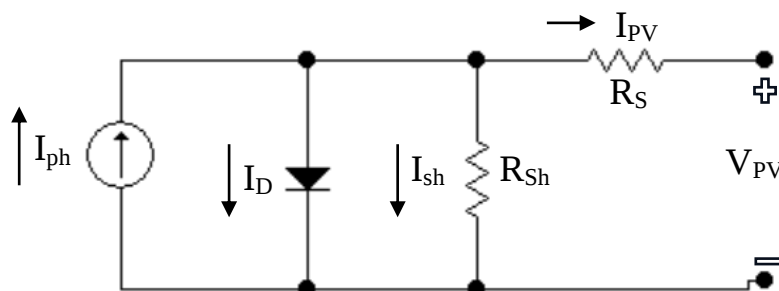
Gambar 1 Struktur dasar panel surya
Sumber: (Kho, 2021)



Sinar matahari terdiri atas partikel yang sangat kecil yang disebut foton. Ketika terkena sinar matahari, foton akan mengenai bagian semikonduktor pada sel surya sehingga menghasilkan energi yang cukup besar untuk mengeluarkan elektron dari struktur atomnya. Elektron yang bermuatan negatif (-) yang terpisah dan bermuatan negatif dapat bergerak bebas di area konduktif bahan semikonduktor. Sebuah atom yang kehilangan elektron memiliki kekosongan dalam strukturnya yang disebut *hole* yang memiliki muatan positif (+). Daerah semikonduktor dengan elektron bebas akan bertindak sebagai donor elektron yang disebut semikonduktor tipe-N, sedangkan daerah semikonduktor dengan *hole* akan bertindak sebagai akseptor elektron yang disebut semikonduktor tipe-P. Di persimpangan daerah positif dan negatif (*PN Junction*) ada energi yang menyebabkan elektron dan *hole* bergerak berlawanan arah. Elektron menjauh dari daerah negatif sementara *hole* menjauh dari positif. Ketika diberi beban pada *PN Junction* tersebut akan menyebabkan arus listrik (Kho, 2021).

2.1.2 Persamaan karakteristik sel surya

Berbagai penelitian yang meneliti panel surya dan aplikasinya menggunakan model rangkaian listrik yang sesuai dengan panel surya untuk menggambarkan hubungan antara arus keluaran dan tegangan keluaran panel surya. Rangkaian ekuivalen ini terutama digunakan dalam teknologi MPPT. Rangkaian ini terdiri dari *photo current*, dioda, resistor paralel untuk mendeteksi arus bocor, dan resistor seri yang mewakili resistansi internal agar arus mengalir seperti ditunjukkan Gambar 2 (Singh et al., 2014).



Gambar 2 Rangkaian ekuivalen sel surya
Sumber: (Singh et al., 2014)



Dengan menganalisa menggunakan Hukum Kirchoff Arus pada rangkaian ekuivalen tersebut, maka rangkaian tersebut dapat direpresentasikan menjadi persamaan berikut:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_D - I_{Sh} \quad (1)$$

Karena arus I_{Ph} adalah arus yang dihasilkan dari proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik maka nilainya berubah ubah yang dipengaruhi oleh perubahan *iradiasi* (λ) dan suhu kerja sel surya (T_C). Iradiasi adalah turunan radiasi elektromagnetik cahaya pada suatu permukaan. Berikut ini adalah persamaan yang merepresentasikan hubungan I_{Ph} dengan λ dan T_C (Motahhir et al., 2018).

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_i(T_C - T_{ref})]\lambda/\lambda_{ref} \quad (2)$$

dengan

I_{SC} : arus hubung singkat sel surya

K_i : koefisien temperatur arus hubung singkat sel surya

T_{ref} : temperatur referensi sel

λ : sel surya *insolation* (kW/m^2)

I_D adalah arus yang mengalir pada dioda yang memiliki persamaan yaitu:

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_S)}{KT_C A} \right) - 1 \right) \quad (3)$$

I_{Sh} adalah arus yang mengalir pada resistansi shunt yang memiliki persamaan:

$$I_{Sh} = \frac{V_{PV} + I_{PV}R_S}{R_{Sh}} \quad (4)$$

I_S adalah arus saturasi dari sel surya dan memiliki hubungan dengan suhu sel surya sesuai dengan persamaan berikut (Salmi, 2016):

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{qE_G \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_C} \right)}{AK} \right) \quad (5)$$

Sementara itu, arus I_{RS} yang merupakan arus *reverse saturation* dapat diperoleh berdasarkan persamaan:



$$\frac{I_{SC}}{\left(\exp \left(\frac{qV_{OC}}{AKT_C} \right) - 1 \right)} \quad (6)$$

dengan

I_{RS} : arus saturasi balik sel pada suhu referensi dan radiasi matahari

E_G : celah energi (*energy gap*) dari semikonduktor yang digunakan dalam sel.

Persamaan karakteristik arus keluaran panel surya (Chafle & Vaidya, 2013) dari persamaan (1) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I = I_{ph} - I_S \left[\exp \left(q \left(\frac{V_{PV} + I_{PV} R_S}{K T_C A} \right) \right) - 1 \right] - \frac{(V_{PV} + I_{PV} R_S)}{R_{Sh}} \quad (7)$$

dengan

I_{ph} : arus dari cahaya yang dihasilkan atau *photocurrent*

I_S : arus saturasi sel saat gelap

q : $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (muatan elektron)

K : $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (konstanta Boltzmann)

T_C : suhu kerja sel

A : faktor yang ideal

R_{Sh} : resistansi shunt

R_S : resistansi seri

Daya yang dihasilkan dari sebuah panel surya tidak selalu konstan tergantung waktu dan lingkungan. Efisiensi panel surya dirumuskan dengan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{out}}{\lambda \ell} \times 100\% \quad (8)$$

Dengan ℓ adalah luas penampang panel surya dalam m^2 .

Faktor ideal A tergantung teknologi PV seperti Tabel 1

Tabel 1 Faktor ideal dioda A dan teknologi PV

Teknologi PV	A
Si-mono	1,2
Si-poly	1,3
a-Si:H	1,8
a-Si:H Tadem	3,3
a-Si:H Triple	5
CdTe	1,5
CIS	1,5
GaAs	1,3

Sumber: Singh et al (2014)



Deskripsi matematis sel surya yang lebih akurat, yang disebut model eksponensial ganda, dapat diturunkan dari karakteristik sel surya yang terbuat dari silikon polikristal. Desain ini terdiri dari sumber *photocurrent* yang dihasilkan dua dioda, resistor seri, dan resistor paralel. Namun ada beberapa keterbatasan dalam mengembangkan ekspresi parameter kurva V-I implisit dan non-linier. Oleh karena itu, model ini jarang digunakan dalam literatur selanjutnya dan tidak dipertimbangkan dalam model PV umum. Resistansi *shunt* R_{SH} berbanding terbalik dengan arus bocor *shunt* ke *ground*. Secara umum, efisiensi PV tidak sensitif terhadap fluktuasi R_{SH} dan resistansi kebocoran *shunt* dapat diperkirakan hampir tak terbatas tanpa arus bocor ke tanah. Di sisi lain, fluktuasi R_s yang kecil memiliki pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi sel surya. Persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$I = I_{PH} - I_S \left[\exp \left(q \frac{(V_{PV} + I_{PV} R_S)}{K T_C A} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

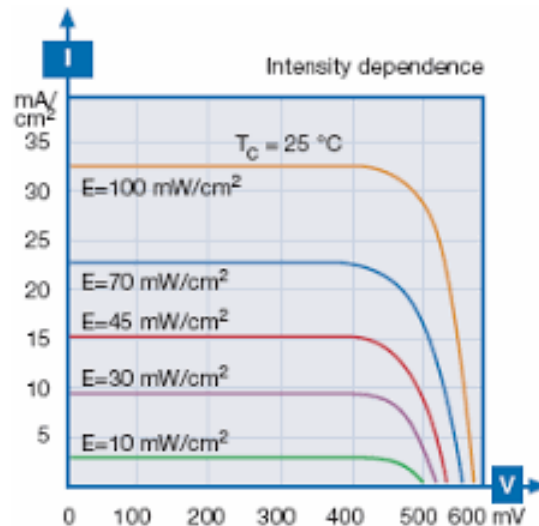
Untuk sel PV yang ideal, tidak ada kerugian seri dan tidak ada kebocoran ke tanah, yaitu $R_S = 0$ dan $R_{SH} = \infty$.

Kinerja sel surya dipengaruhi oleh suatu kondisi lingkungan sekitar. Arus hubung singkat I_{SC} linear bergantung pada tingkatan besarnya radiasi matahari sedangkan tegangan rangkaian terbuka V_{OC} menunjukkan ketergantungan dari temperatur yang ada pada sel surya. I_{SC} dan V_{OC} diukur pada kondisi $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$ dan $\lambda_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$. T_{ref} dan λ_{ref} merupakan kondisi pengukuran standar yang terdefinisi dalam standar internasional IEC 61215. Sedangkan nilai I_{SC} dan V_{OC} dapat diketahui melalui *datasheet* sel surya tersebut (Iskandar et al., 2017).

2.1.3 Pengaruh iradiasi terhadap sel surya

Radiasi matahari yang diterima bumi dibagi menjadi beberapa rentang panjang gelombang. Sebagian radiasi dipantulkan ke atmosfer (radiasi difusi) dan sebagian mencapai tanah (radiasi langsung). Kedua radiasi ini digunakan untuk mengukur jumlah radiasi yang diterima oleh sel surya.



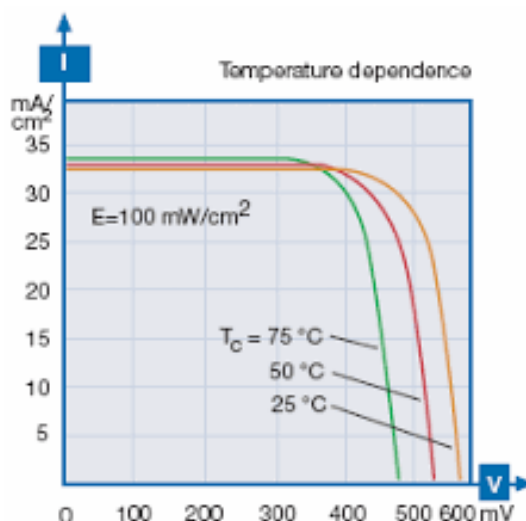


Gambar 3 Karakteristik kurva V terhadap I dengan perubahan iradiasi
Sumber: (Diputra, 2008)

Gambar 3 menunjukkan bahwa daya berbanding lurus dengan jumlah *iradiasi*. Dengan intensitas iradiasi yang tinggi berupa jumlah foton yang tinggi, arus yang dihasilkan juga tinggi.

2.1.4 Pengaruh suhu terhadap sel surya

Parameter lain yang mempengaruhi kurva I-V adalah suhu. Suhu memainkan peran penting dalam menentukan sifat I-V. Sel surya akan bereaksi terhadap perubahan suhu. Suhu mempengaruhi besarnya tegangan *open circuit* daripada arus *short circuit*. Peningkatan suhu akan mengurangi tegangan *open circuit* sel surya karena peningkatan suhu menurunkan *band gap* semikonduktor.



Gambar 4 Kurva karakteristik V terhadap I dengan perubahan suhu
Sumber: (Diputra, 2008)



2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT merupakan teknik yang digunakan untuk mencapai titik daya maksimum (MPP) yang bisa dicapai oleh sel surya. Keluaran panel surya dipengaruhi oleh radiasi matahari dan suhu permukaan panel sehingga menghasilkan karakteristik tegangan dan arus keluaran yang berubah-ubah atau *non-linear* (Rahman et al., 2016).

MPPT adalah sistem elektronik yang digunakan dalam panel surya untuk memungkinkan panel surya menghasilkan daya maksimum. Hal yang perlu diketahui bahwa MPPT tidak seperti sistem pelacakan mekanis yang digunakan untuk mengubah posisi modul relatif terhadap posisi matahari untuk mendapatkan energi matahari yang maksimal. MPPT hanyalah sebuah sistem elektronik yang dapat melacak daya maksimum yang dapat dikeluarkan oleh panel surya dan mempertahankan panel surya untuk tetap bekerja pada titik tersebut (Dwidayanti et al., 2017).

Kualitas sistem MPPT harus diukur untuk mengetahui kinerja sistem MPPT. Pengukuran kualitas MPPT juga berguna dalam proses pengembangan sistem MPPT. Ada tiga parameter yang dapat menentukan kualitas suatu sistem MPPT (Dwidayanti et al., 2017) yaitu:

a. Parameter statis

Parameter statis pada MPPT didefinisikan sebagai perubahan nilai keluaran ketika mencapai titik daya maksimum dan kondisi sekitar tidak berubah artinya suhu sel atau radiasi matahari bersifat konstan. Semakin kecil perubahan, maka semakin baik algoritma MPPT.

b. Parameter dinamis

Parameter dinamis pada sistem MPPT didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan MPPT untuk menemukan titik daya maksimum ketika kondisi lingkungan berubah atau terjadi fluktuasi terhadap suhu sel atau radiasi matahari. Semakin cepat waktu yang dibutuhkan, maka semakin baik sistem MPPT tersebut.



c. Parameter daya aktual dan daya ideal

Parameter ini merupakan rasio keluaran daya aktual selama periode terhadap daya maksimum yang diukur pada kondisi operasi sel surya. Nilai parameter ini berkisar antara 0 sampai 100%.

Rasio daya dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{\text{Daya keluaran MPPT}}{\text{Daya ideal}} \times 100\% \quad (10)$$

Daya ideal dapat dihitung dengan:

$$\frac{\text{Daya ideal}}{\lambda} = \frac{\text{Daya ketika } \lambda \text{ } 1000 \text{ W/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} \times 100\% \quad (11)$$

Semakin besar nilai rasio ini, maka algoritma MPPT semakin baik.

Algoritma MPPT dapat dikelompokkan menjadi 2 (Schmid & Schmidt, 2003) yaitu:

1. MPPT tak langsung

MPPT jenis ini memiliki algoritma untuk memperkirakan nilai tegangan MPP menggunakan pengukuran dan asumsi sederhana. Contohnya:

- a. Tegangan kerja sel surya diubah secara manual setiap musim. Misalkan di musim dingin, tegangan MPP diatur ke nilai yang lebih tinggi karena suhu sel surya yang menurun.
- b. Tegangan kerja sel surya diperoleh dengan menghitung tegangan pada rangkaian terbuka yang diukur secara periodik dan mengalikannya dengan suatu konstanta.

Metode pada MPPT ini sangat sederhana, namun nilai tegangan kerja optimal yang diperoleh hanya merupakan nilai perkiraan saja, metode ini tidak dapat beradaptasi ketika kinerja sel surya menurun karena usia sel surya.

2. MPPT langsung

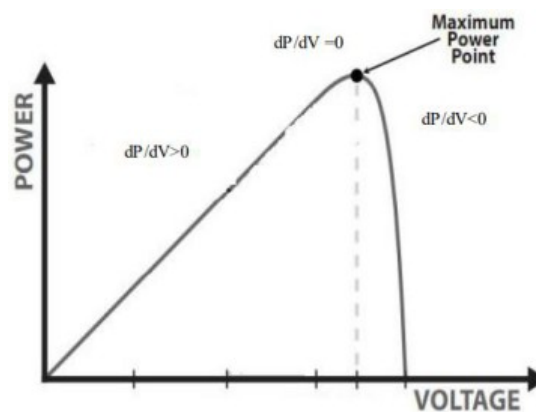
MPPT jenis ini menentukan tegangan kerja optimal berdasarkan pengukuran langsung arus keluaran, tegangan keluaran, atau daya keluaran. Hal ini memungkinkan MPPT ini untuk menyesuaikan saat kinerja modul sel surya berubah. Yang termasuk algoritma dari MPPT ini adalah *Constant Voltage Controller (CVC)*, *Perturbation &*



Observation Method (P&O) dan *Incremental Conductance Method (ICM)*. Tentunya dengan karakteristik dari jenis MPPT ini akan menghasilkan nilai tegangan operasi optimal yang lebih akurat dibandingkan dengan jenis MPPT tidak langsung.

2.3 Algoritma *Incremental Conductance Method (ICM)*

Algoritma ICM didasarkan pada kemiringan kurva karakteristik P-V sel surya. Algoritma ICM memiliki kecepatan *tracking* yang lebih cepat dibandingkan dengan metode CVC dan P&O (Shang et al., 2020)



Gambar 5 Kurva karakteristik V terhadap P pada sel surya
Sumber: (Gomathy, 2012)

Pada kurva karakteristik P-V sel surya terlihat bahwa titik kerja maksimum sel surya berada pada nilai tegangan yang berbeda untuk setiap kondisi lingkungan yang berbeda untuk setiap kondisi lingkungan yang berbeda yang disebut V_{MPP} (Khadidja et al., 2017). MPPT menyediakan V_{ref} agar titik operasi sel surya berada pada nilai V_{MPP} . Karakteristik P-V sel surya adalah fungsi dari daya dan tegangan yang mencapai titik maksimum (MPP) ketika gradiennya nol (Huynh & Dunnigan, 2016) yang dirumuskan dengan:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \rightarrow \frac{d(V \cdot I)}{dV} = 0 \quad (12)$$

$$I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (13)$$

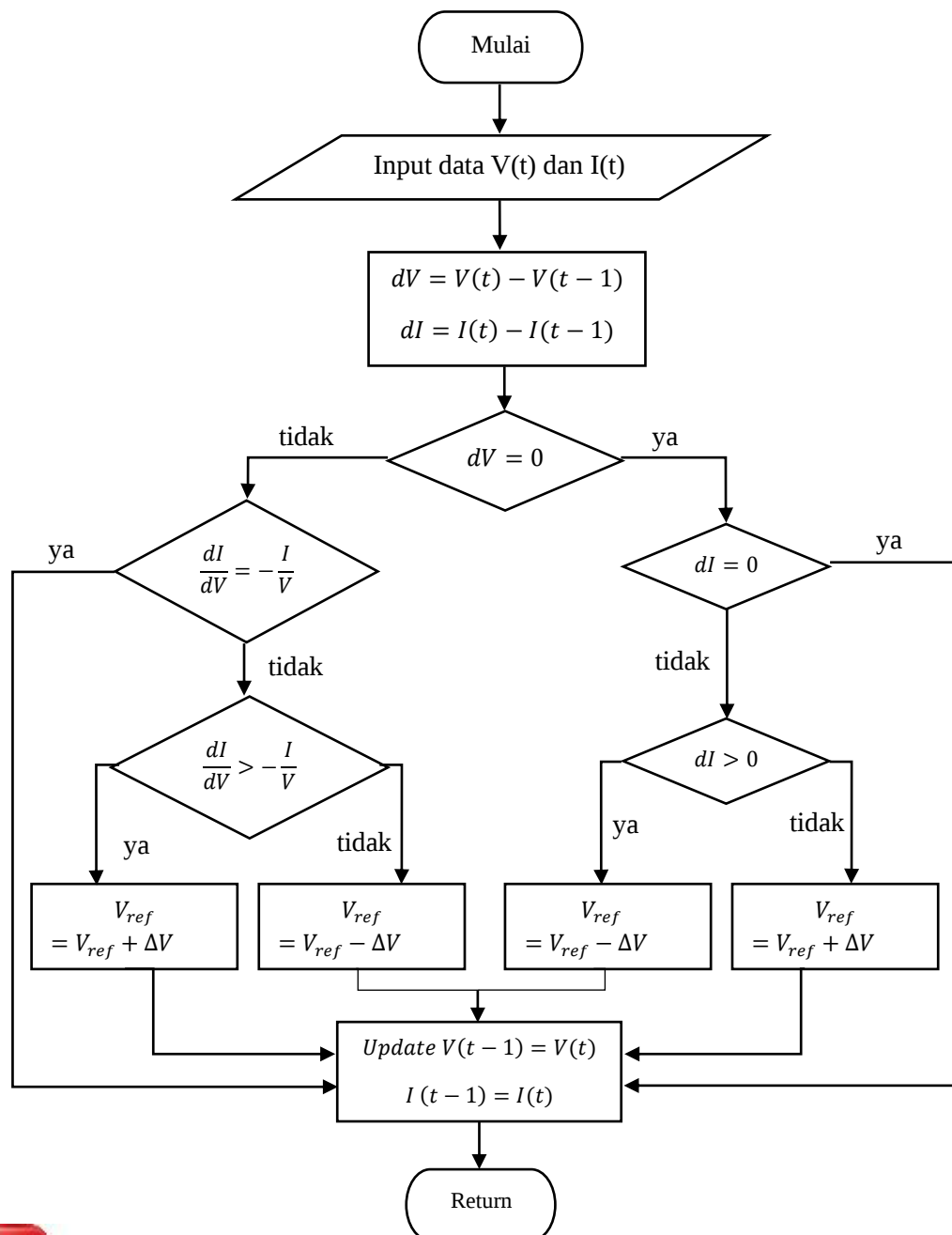
$$V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (14)$$

$$= -\frac{I}{V} \quad (15)$$



Nilai kemiringan kurva karakteristik P-V sel surya adalah nol ketika mencapai titik MPP, nilai kemiringan akan menurun ketika berada di sebelah kanan titik MPP dan akan meningkat ketika berada di sebelah kiri titik MPP (Prakoso et al., 2020)

Algoritma ICM ini dapat dijelaskan seperti gambar berikut:

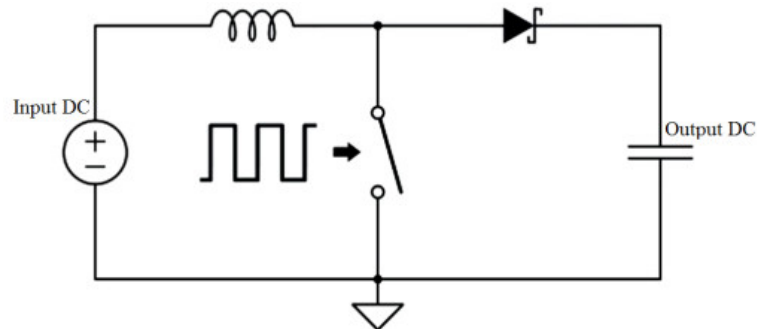


Gambar 6 Flowchart algoritma ICM
Sumber: (Utami, Saodah, and Pudim, 2018)



2.4 Boost converter

Boost converter atau yang juga dikenal dengan *Chopper Step-up* merupakan rangkaian elektronika daya yang mengubah listrik searah (DC) menjadi listrik searah (DC) pada tegangan yang lebih tinggi dari tegangan sumber. Untuk meningkatkan tegangan sumber, rangkaian catu daya memiliki induktor yang menyimpan muatan saat tegangan input diberikan (Ali, 2018).

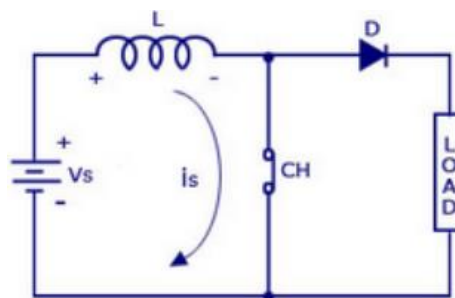


Gambar 7 Rangkaian *boost converter*

Prinsip kerja rangkaian *boost converter* dapat dianalisis ketika saklar dalam keadaan terbuka dan tertutup. Pada analisa yang dilakukan diasumsikan bahwa:

- Rangkaian ini dapat mencapai kondisi tunak (*steady-state*)
- Perioda dari *switching* adalah T dimana saklar tertutup selama waktu DT dan terbuka selama waktu $(1-D)T$ dimana D adalah *duty cycle*.
- Arus yang melalui induktor adalah arus kontinu
- Kapasitas kapasitor dianggap sangat besar sehingga tegangan keluaran terjaga konstan pada nilai tegangan V_O .
- Seluruh komponen ideal

Pada saat saklar dalam keadaan tertutup seperti Gambar 8, sumber akan mengisi induktor dan dioda berada pada keadaan reverse bias.



Gambar 8 Rangkaian *boost converter* saat keadaan saklar On



Berdasarkan Hukum Tegangan Kirchoff pada loop tertutup diperoleh persamaan sebagai berikut (Adnan et al., 2017):

$$-V_S + L \frac{dI_L}{dt} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (16)$$

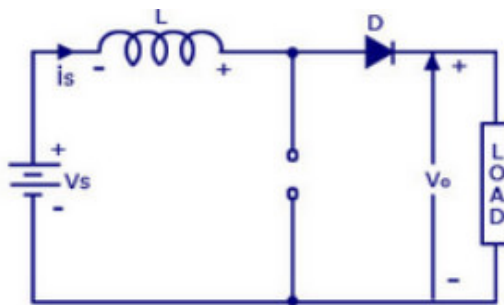
Karena arus yang mengalir pada induktor bersifat kontinu, maka terjadi peningkatan arus secara linear ketika saklar ditutup sehingga besarnya laju perubahan arus pada induktor menjadi:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{V_S}{L} \quad (17)$$

Maka diperoleh nilai ΔI_L pada saat saklar tertutup adalah:

$$(\Delta I_L)_{closed} = \frac{V_S DT}{L} \quad (18)$$

Pada saat saklar dalam keadaan OFF, arus mengalir dari sumber melalui induktor kemudian melalui dioda dan menuju ke beban. Menurut *Kirchoff Voltage Law* (hukum Kirchoff tegangan), tegangan keluaran yang dirasakan beban adalah penjumlahan tegangan sumber dan tegangan pada induktor, sehingga tegangan keluarannya lebih besar dari tegangan sumber.



Gambar 9 Rangkaian *boost converter* saat keadaan saklar off

Besar tegangan keluaran dari rangkaian *boost converter* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_S = V_L + V_o \quad (19)$$

$$V_L = V_S - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (20)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_S - V_o}{L} \quad (21)$$



aju perubahan arus pada induktor konstan, maka arus berubah secara jika saklar terbuka. Perubahan arus induktor dirumuskan:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{(1-D)T} = \frac{V_S - V_o}{L} \quad (22)$$

Maka diperoleh nilai ΔI_L pada saat saklar tertutup adalah:

$$(\Delta I_L)_{open} = \frac{(V_S - V_o)(1-D)T}{L} \quad (23)$$

Pada kondisi tunak (steady state), total perubahan arus induksi harus bernilai nol, maka dari Persamaan (16) dan (21) diperoleh (Adnan et al., 2017):

$$(\Delta I_L)_{closed} + (\Delta I_L)_{open} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{V_S DT}{L} + \frac{(V_S - V_o)(1-D)T}{L} = 0 \quad (25)$$

Maka dapat diperoleh V_o

$$V_o = \frac{1}{(1-D)} V_S \quad (26)$$

dengan

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (27)$$

dengan,

V_S = Tegangan sumber atau input (V)

V_L = Tegangan yang tersimpan pada induktor (V)

D = *duty cycle* pada saklar

Pada rangkaian *boost converter* juga terdapat induktor yang berfungsi untuk penguat tegangan setelah proses *switching* (Fathurachman et al., 2018). Besar nilai induktansi minimal yang digunakan dalam rangkaian *boost converter* dapat dihitung dengan persamaan berikut (Hasaneen & Mohammed, 2008) :

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (28)$$

dengan D menyatakan *duty cycle*, R adalah tahanan beban sistem, serta f merupakan besar frekuensi PWM. Selain induktor, pada *boost converter* juga dipasangkan sebuah kapasitor yang berfungsi sebagai filter untuk mengurangi riak pada tegangan keluaran (Fathurachman et al., 2018). Nilai kapasitansi ini dapat

dengan menggunakan persamaan:

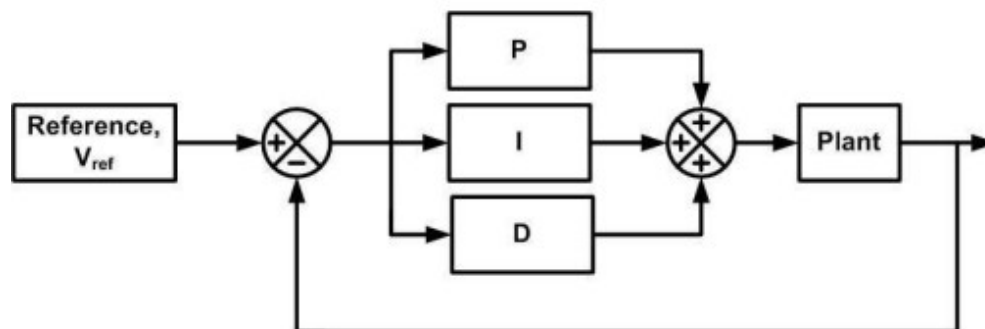
$$C = \frac{D}{\Delta V_o f R} \quad (29)$$

V_o menyatakan rentang tegangan keluaran yang diperbolehkan.



2.5 Pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID)

Pengendali PID merupakan pengendali yang digunakan untuk menentukan ketepatan suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Pengendali PID merupakan penggabungan dari pengendali proporsional, pengendali integral, dan pengendali derivatif serta menggabungkan karakteristik dari masing-masing pengendali tersebut (Saputra, 2011). Parameter proporsional (KP) berfungsi untuk mengurangi *rise time* dan *steady error* pada suatu plant. Jika kedua pengendali di atas P dan I digabung maka akan menghasilkan pengendali PI tetapi mengakibatkan *respon transient* akan bertambah buruk. Untuk memperbaiki kekurangan dari pengendali PI maka ditambah pengendali *derivative* (D) yang berfungsi untuk menyempurnakan kekurangan dari pengendali PI. Gabungan dari P, I, dan D disebut pengendali PID yang mampu meningkatkan kestabilan suatu sistem dengan mengurangi overshoot dan setting time. Pemilihan pengendali PID sebagai pembangkit sinyal PWM karena pengendali PID memiliki beberapa keunggulan seperti mampu meningkatkan kecepatan respon sistem yang berhubungan dengan *rise time* dan *setting time* serta mampu memperbaiki respon transien sistem. Adapun blok dari pengendali PID seperti Gambar 10.



Gambar 10 Blok diagram pengendali PID
Sumber: (Adnan et al., 2017)

Sinyal keluaran pengendali PID pada waktu kontinyu dirumuskan dengan (Husnaini & Krismadinata, 2017) :



$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (30)$$

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (31)$$

Pengendali PID memiliki fungsi alih sebagai berikut (Adnan et al., 2017):

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d(s) \right) \quad (32)$$

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (33)$$

dengan

$u(t)$ = Sinyal keluaran pengendali PID

K = konstanta pengendali

T_i = waktu integral

T_d = waktu turunan (derivatif)

$e(t)$ = sinyal kesalahan (error)

sehingga untuk besar nilai untuk penguatan integral (Anto et al., 2016) dirumuskan:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (34)$$

sedangkan nilai untuk penguatan derivatif (Anto et al., 2016) dirumuskan:

$$K_d = K_p \times T_d \quad (35)$$

dengan

K_p = penguatan proporsional,

K_i = penguatan integral,

K_d = penguatan derivatif

Untuk menghasilkan sistem kendali yang diinginkan maka perlu ditentukan besar parameter-parameter dari pengendali PID yang dapat dilakukan dengan *tuning* PID. Terdapat beberapa jenis metode *tuning* yaitu metode *trial and error*, metode Ziegler-Nichols dan metode Cohen-coon. Pada penelitian ini digunakan metode Ziegler-Nichols. Metode ini dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols pada tahun 1942. Metode Ziegler-Nichols melakukan *tuning* pengendali dengan dua cara, untuk kendali dengan sistem loop terbuka menggunakan metode kurva reaksi sedangkan untuk kendali dengan sistem loop tertutup metode osilasi (Lestari & Hadi, 2012).



penelitian ini pengendali PID akan dihubungkan dengan *boost converter* merupakan sistem dengan loop tertutup sehingga dalam menentukan

parameter-parameter PID dilakukan *tuning* pengendali dengan metode osilasi. Terdapat beberapa tahapan dalam metode ini (Abbas et al., 2016) yaitu:

1. *Plant* disusun secara seri dengan pengendali PID
2. Parameter integrator diatur nol ($T_i = 0$) dan parameter derivatif diatur nol ($T_d = 0$).
3. Parameter proporsional dinaikkan secara bertahap, mulai dari nol sampai mengakibatkan respon sistem berosilasi. Respon sistem harus berosilasi dengan magnitudo tetap (*sustain osilation*).

Tuning pengendali PID menggunakan metode osilasi menurut metode Ziegler-Nichols yaitu berdasarkan K_{cr} (*critical gain*) dan P_{cr} (*critical period*). Jadi untuk pemberian parameternya ditetapkan rumus Tabel 2.

Tabel 2 Persamaan *tuning* Ziegler-Nichols dengan metode osilasi

Jenis Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Sumber : (Lestari & Hadi, 2012)

2.6 Sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM)

PWM merupakan sebuah cara yang dilakukan untuk memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu perioda, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. PWM juga merupakan teknik modulasi sinyal listrik dengan memvariasikan lebar pulsa (*duty cycle*) pada amplitudo dan frekuensi yang tetap (Li et al., 2018). Satu siklus lebar pulsa terdiri dari kondisi *high* dan *low*.

Besarnya lebar pulsa dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \quad (36)$$



= *Duty cycle*

t_m = Waktu On atau waktu saat tegangan keluaran maksimal

T_{off} = Waktu Off atau waktu saat tegangan keluaran pada posisi terendah

2.7 Matlab Simulink

Simulink merupakan perangkat lunak yang interaksinya dalam lingkungan *block diagram* untuk simulasi multi domain dan *model-based design*. Simulink dapat digunakan untuk *system level design*, simulasi, *Automatic code generation*, dan *continuous test and verification embedded systems*. Simulink menyajikan editor dalam bentuk grafik.

Simulink juga terintegrasi dengan Matlab sehingga memungkinkan untuk saling bertukar informasi maupun data antara simulink dan Matlab secara bersamaan, dengan kata lain mengkombinasikan antara *Textual Programming* dan *Graphical Programming* dalam melakukan simulasi dari suatu desain sistem. Ribuan algoritma yang tersedia di Matlab dapat dengan mudah dimasukkan dalam blok simulink (Ningrum, 2020).

2.8 Penelitian Terkait yang Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terkait yang terdahulu yang relevan dengan penelitian ini. Meskipun terdapat keterkaitan dalam pembahasan, penelitian yang diajukan ini masih sangat berbeda dengan penelitian terdahulu. Adapun beberapa penelitian terdahulu tersebut adalah:

1. Desain Kontrol *Maximum Power Point Tracker (MPPT)* Menggunakan *Incremental Conductance (INC)* Pada DC/DC Tipe *SEPIC*. Oleh Azmi Saleh, Widyono Hadi, dan Mohammad Choirul Anwar (2017)

Penelitian ini terfokus untuk memaksimalkan daya keluaran yang dihasilkan oleh generator termoelektrik dengan menggunakan MPPT dengan metode *Incremental Conductance* yang dihubungkan dengan DC/DC tipe *SEPIC*. Hasil penelitian yang didapatkan adalah MPPT dapat meningkatkan daya yang ditransfer ke beban dimana besar kenaikannya dipengaruhi oleh besar beban sehingga besarnya efisiensi daya yang ditransfer ke beban sebanding lurus dengan besarnya beban yang digunakan. Efisiensi terbesar didapatkan adalah 48% pada beban 61Ω.



2. Penggunaan Algoritma *Incremental Conductance* pada MPPT dengan *Buck Converter* untuk Pengujian *Indoor* dan *Outdoor*. Oleh Sri Utami, Siti Saodah, dan Apip Pudir (2018)

Pada penelitian ini dibangun sistem kontroler MPPT yang mengimplementasikan algoritma *Incremental Conductance* yang menggunakan Arduino Uno R3 pada *off grid photovoltaic system* dimana kontroler tersebut bertujuan untuk menaikkan nilai daya keluarannya. Sistem ini diuji performansinya di dalam dan di luar ruangan. Untuk pengujian yang dilakukan di dalam ruangan menggunakan artificial light sedangkan untuk pengujian di luar ruangan adalah pengujian terhadap iradiasi matahari. Hasilnya adalah untuk pengujian di dalam ruangan pada sistem MPPT yang menggunakan algoritma *Incremental Conductance* terjadi kenaikan keluaran daya sebesar 17,01 W dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT dengan iradiasi yang sama. Sedangkan untuk pengujian yang dilakukan di luar ruangan, daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh iradiasi yang diterima panel surya. Untuk sistem yang menggunakan MPPT terjadi kenaikan sebesar 4,77 W dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT dengan beban yang sama.

3. Maximum Power Point Tracker (MPPT) Berdasarkan Metode *Perturb And Observe* dengan Sistem *Tracking Panel Surya Single Axis*. Oleh Istiyo Winarno dan Lia Natasari (2017)

Pada penelitian ini dilakukan perancangan sebuah sistem pelacak Photovoltaik (PV) dengan dua derajat kebebasan yang menggunakan MPPT berdasarkan metode *Perturb And Observe* dan penggerak motor DC yang membuat sistem dapat mengikuti pergerakan matahari sehingga dapat menghasilkan nilai daya yang lebih optimal. Pada sistem ini efisiensi daya yang mampu dicapai adalah 86,5%.

4. Optimasi Pengisian Daya Baterai pada Panel Surya Menggunakan Maximum Power Point Tracking (MPPT). Oleh Ranny Dwidayanti, Herri Gusmedi, dan Sri Ratna S. (2017)



Pada penelitian ini bertujuan untuk mencari nilai maksimal efisiensi yang dicapai pada pengisian baterai menggunakan sel surya menggunakan T. Sistem MPPT dihubungkan dengan *Buck-Boost converter* sebagai

pengontrol tegangan sebagai input pada baterai. Hasilnya adalah sistem ini mampu meningkatkan efisiensi pengisian daya pada baterai sebesar 18%.

5. Maximum Power Point Tracker Sel Surya Menggunakan Algoritma Perturb And Observe. Oleh Rusminto Tjatur Widodo, Rugianto, Asmuniv, dan Purnomo Sejati (2009)

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan *prototype* MPPT dengan menggunakan metode Perturb And Observe dan *boost converter* untuk menaikkan tegangan dari sel surya ke tegangan pengisian baterai. Efisiensi alat yang bisa dicapai adalah 87,5%.

Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan disajikan dalam Tabel 3.



Tabel 3 Perbandingan penelitian terkait yang terdahulu dengan penelitian yang diajukan

No	Penelitian Terkait Terdahulu	Perbedaan	Kelebihan	Kekurangan	Persentase Kemiripan
1.	Desain Kontrol <i>Maximum Power Point Tracker (MPPT)</i> Menggunakan <i>Incremental Conductance (INC)</i> Pada DC/DC Tipe <i>SEPIC</i> (Saleh et al., 2017)	Pada penelitian ini menggunakan Konverter DC/DC tipe <i>SEPIC</i> sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan <i>Boost converter</i>	• Sudah diimplementasikan dalam bentuk <i>hardware</i> • Performa konverter dipengaruhi oleh <i>duty cycle</i>. Semakin besar <i>duty cycle</i> maka akan semakin besar daya yang dapat ditransfer. • Penambahan kontrol MPPT pada konverter meningkatkan daya yang ditransfer ke beban	Besarnya efisiensi dipengaruhi oleh beban, semakin besar beban, maka efisiensi juga semakin besar.	Algoritma MPPT yang digunakan sama dengan penelitian yang diajukan yaitu algoritma ICM, sehingga kemiripannya sekitar 30%
2.	Penggunaan Algoritma <i>Incremental Conductance</i> pada MPPT dengan <i>Buck Converter</i> untuk Pengujian <i>Indoor</i> dan <i>Outdoor</i> (Utami et al., 2018)	• Pada penelitian ini menggunakan <i>Buck Converter</i> sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan <i>Boost converter</i> • Pada penelitian ini pengujian dilakukan pada <i>Indoor</i> dan <i>Outdoor</i>, sedangkan pada penelitian yang diajukan pengujian hanya dilakukan melalui <i>software Matlab</i>	• Sudah diimplementasikan dalam bentuk <i>hardware</i> • Untuk pengujian di dalam ruangan menggunakan <i>artificial light</i> dengan besar iradiasi yang konstan, sehingga bisa dilihat perbedaan hasil pengujian ketika menggunakan MPPT dan tanpa menggunakan MPPT.	Keluaran dari panel surya hanya dipengaruhi oleh iradiasi matahari dan tanpa dipengaruhi oleh suhu lingkungan	Penelitian ini dengan penelitian yang diajukan menggunakan jenis algoritma MPPT yang sama yaitu ICM sehingga persentase kemiripannya 30%.



No	Penelitian Terkait Terdahulu	Perbedaan	Kelebihan	Kekurangan	Persentase Kemiripan
3	Maximum Power Point Tracker (MPPT) Berdasarkan Metode <i>Perturb And Observe</i> dengan Sistem Tracking Panel Surya <i>Single Axis</i> (Winarno & Natasari, 2017)	- Pada penelitian ini metode MPPT yang digunakan adalah <i>Perturb And Observe</i>, sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan ICM - Pada penelitian ini menggunakan Buck-Boost converter sedangkan penelitian yang diajukan menggunakan Boost converter.	- Sudah diimplementasikan dalam bentuk <i>hardware</i> - Selain <i>tracking</i> menggunakan MPPT, pada penelitian ini juga ditambahkan <i>tracking</i> mekanik <i>single axis</i> menggunakan gearbox. - Efisiensi daya yang mampu dicapai adalah 86,5%.	- Kecepatan waktu <i>tracking</i> untuk bisa mencapai titik maksimum membutuhkan waktu yang lebih lama. - Besarnya keluaran dari panel surya hanya dipengaruhi oleh besar iradiasi matahari	Pada penelitian ini, jenis algoritma MPPT dan konverter berbeda dengan penelitian yang diajukan sehingga persentase kemiripannya hanya 5%.
4.	Optimasi Pengisian Daya Baterai pada Panel Surya Menggunakan Maximum Power Point Tracking (MPPT) (Dwidayanti et al., 2017)	- Pada penelitian ini metode MPPT yang digunakan adalah <i>Perturb And Observe</i>, sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan ICM - Pada penelitian ini menggunakan Buck-Boost converter sedangkan penelitian yang diajukan	Jenis konverter yang digunakan adalah buck-boost converter sehingga bisa dikendalikan apabila keluaran dari panel surya akan dibuat lebih tinggi atau lebih rendah	- Berdasarkan hasil pengujian, keluaran dari panel surya hanya dipengaruhi oleh suhu lingkungan, tanpa dipengaruhi oleh iradiasi matahari - Belum diimplementasikan dalam bentuk <i>hardware</i>	Pada penelitian ini, jenis algoritma MPPT dan konverter berbeda dengan penelitian yang diajukan sehingga persentase kemiripannya hanya 5%.



No	Penelitian Terkait Terdahulu	Perbedaan	Kelebihan	Kekurangan	Persentase Kemiripan
		menggunakan <i>Boost converter</i> .			
5.	Maximum Power Point Tracker Sel Surya Menggunakan Algoritma Perturb And Observe (Widodo et al., 2009)	Pada penelitian ini metode MPPT yang digunakan adalah Perturb And Observe, sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan ICM.	Efisiensi alat yang mampu dicapai pada penelitian ini adalah 87,5%	Pada pengujian, keluaran dari panel surya didapatkan dari perubahan frekuensi pensaklarn pada <i>boost converter</i> tanpa dipengaruhi faktor lain.	Jenis konverter yang digunakan pada penelitian ini sama dengan pada penelitian yang diajukan yaitu <i>boost converter</i> sehingga persentase kemiripannya sekitar 30%

