



TESIS - TE142599

RANCANG BANGUN *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* (MPPT) MENGGUNAKAN ALGORITMA *FREE SEARCH KRILL HERD* (FSKH) PADA SISTEM POMPA AIR TENAGA MATAHARI

QUOTA ALIEF SIAS
2214201203

DOSEN PEMBIMBING
PROF. DR. ENG. IR. IMAM ROBANDI, MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

Rancang Bangun *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) Menggunakan Algoritma *Free Search Krill Herd* (FSKH) pada Sistem Pompa Air Tenaga Matahari

QUOTA ALIEF SIAS

2214201203

DOSEN PEMBIMBING

PROF. DR. ENG. IR. IMAM ROBANDI, MT

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017

LEMBAR PENGESAHAN

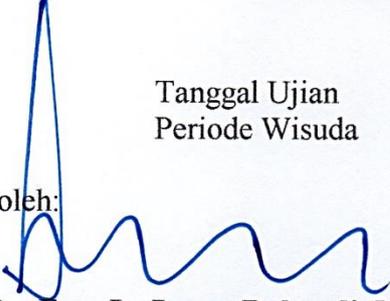
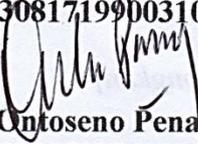
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Quota Alief Sias
NRP. 2214201203

Tanggal Ujian : 7 April 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

- 
1. **Prof. Dr. Eng. Ir. Imam Robandi, M.T (Pembimbing I)**
NIP: 196308171990031001
- 
2. **Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D (Penguji)**
NIP: 194907151974121001
- 
3. **Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc (Penguji)**
NIP: 197007121998021001
- 
4. **Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D (Penguji)**
NIP: 197311192000031001
- 
5. **Heri Suryoatmojo, S.T., M.T, Ph.D (Penguji)**
NIP: 198006032006041003



Dekan, Fakultas Teknologi Elektro


Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**Rancang Bangun *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) Menggunakan Algoritma *Free Search Krill Herd* (FSKH) pada Sistem Pompa Air Tenaga Matahari**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 6 April 2017

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Quota Alief Sias', written over a horizontal line.

Quota Alief Sias

NRP. 2214201203

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**RANCANG BANGUN *MAXIMUM POWER POINT TRACKING*
(MPPT) MENGGUNAKAN ALGORITMA *FREE SEARCH*
KRILL HERD (FSKH) PADA SISTEM POMPA
AIR TENAGA MATAHARI**

Nama Mahasiswa : Quota Alief Sias
NRP : 2214201203
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

ABSTRAK

Penelitian ini mengusulkan algoritma modifikasi *Perturb and Observed* (P&O) yang disebut *Recurrence* P&O (RP&O) dan modifikasi algoritma *Krill Herd* (KH) yang dicampur dengan pencarian bebas menjadi *Free Search Krill Herd* (FSKH) sebagai *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) sistem panel surya. Panel surya telah dimodelkan dan diuji untuk menghasilkan kurva karakteristik panel surya. Beberapa pola penutupan sel panel surya telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh letak dan luas bayangan pada panel surya. Sebuah prototipe sistem pompa air tenaga matahari juga telah dibangun dan diuji pada kondisi normal dan kondisi berbayang atau *Partial Shading Condition* (PSC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa RP&O dapat melacak daya optimum pada beberapa pola PSC dan lebih cepat 35% dibandingkan P&O pada kondisi normal. P&O selalu terjebak pada solusi lokal dan tidak dapat melacak daya optimal pada kondisi berbayang. Algoritma FSKH selalu dapat melacak daya optimum pada kondisi normal dan berbayang. Perolehan debit air selalu berbanding lurus dengan daya panel surya.

Kata kunci: MPPT, P&O, RP&O, FSKH, PSC.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DESIGN AND IMPLEMENTATION MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) USING FREE SEARCH KRILL HERD (FSKH) ALGORITHM FOR SOLAR WATER PUMPING SYSTEM

By : Quota Alief Sias
Student Identity Number : 2214201203
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT

ABSTRACT

This research proposes a modified algorithm of Perturb and Observed (P&O) called Recurrence P&O (RP&O) and modification algorithm KH mixed with a Free Search into Free Search Krill Herd (FSKH) as Maximum Power Point Tracking (MPPT). The solar panel has been modeled and tested to obtain the characteristic curve of photovoltaic. Some patterns of cell solar panel closure have been tested to determine the effect of the location and the extent of the shadow on the solar panel characteristic curve. A prototype solar water pumps have also been built and tested in normal conditions and the Partial Shading Condition (PSC). The results showed that the RP&O can track the optimal power in some patterns PSC and 35% faster than P&O in normal conditions. P&O is always stuck on a local solution and can not track optimum power in shaded conditions. FSKH can track the optimum power at normal and shaded conditions. The water obtained is also proportional to the power output from PV array.

Key words: MPPT, P&O, RP&O, FSKH, PSC.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul **“Rancang Bangun *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) Menggunakan Algoritma *Free Search Krill Herd* (FSKH) pada Sistem Pompa Air Tenaga Matahari”** dengan baik. Penyusunan Tesis ini merupakan syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik dan menyelesaikan pendidikan Strata II (S2) pada bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dengan terselesaikannya Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan ridho dan berkah-Nya sehingga tesis ini dapat terselesaikan.
2. Kedua orang tua saya, istri, anak dan keluarga yang tiada henti memanjatkan doa dan turut menyemangati serta menemani penulis dikala melewati masa-masa perjuangan dalam mencapai impian.
3. Prof. Dr. Eng. Ir. Imam Robandi, M.T. selaku pembimbing yang bersedia meluangkan waktu, pikiran dan pengalamannya untuk membantu memperkaya pengetahuan penulis dan memperlancar menyelesaikan tesis ini.
4. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D, Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc., Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D, Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D, Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng., Dr.Eng, Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T. selaku anggota majelis dewan penguji yang telah memberikan saran dalam penyelesaian tesis ini.
5. Seluruh dosen pengajar beserta staf dalam lingkungan Fakultas Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, khususnya dalam lingkup bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga yang telah memberikan ilmu kepada penulis sebagai bekal di masa yang akan datang.

6. Keluarga Besar Laboratorium PSOC, Bapak Ibu sebagai mahasiswa S3, rekan-rekan mahasiswa S2 dan teman-teman junior yang telah menemani penulis menyelesaikan tesis ini.
7. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) selaku pemberi Beasiswa Tesis dan Desertasi sehingga penulisan tesis ini dapat berjalan lancar dan selesai tepat pada waktunya.
8. Para senior dan seluruh rekan-rekan angkatan 2014 serta 2015 yang telah banyak memberikan dukungan dan bantuannya selama menjalani perkuliahan hingga terselesaikannya tesis ini.
9. Pegawai kebersihan, tata usaha, kantin dan petugas parkir khususnya pada lingkungan Program Studi Teknik Sistem Tenaga, Fakultas Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang turut mendukung penulis dalam segala urusan birokrasi dan telah menjaga lingkungan senantiasa bersih, sehat serta nyaman untuk kegiatan belajar.
10. dan pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, segala kritik dan saran kepada penulis akan diterima dengan terbuka untuk perbaikan dan penambah kanzah intelektual di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini dapat menjadi referensi bagi yang membutuhkan dan memberi kontribusi dan manfaat sebesar-besarnya.

Surabaya, April 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Penelitian	3
1.5 Kontribusi Penelitian.....	3
1.6 Sistematisan Pembahasan	4
BAB II TEORI DASAR.....	5
2.1 Teknologi Panel Surya	5
2.1.1 <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT)	6
2.1.2 <i>Partial Shading Condition</i> (PSC).....	7
2.2 Konverter Penguat Tegangan (<i>Boost Converter</i>)	8
2.3 Pompa Air <i>Direct Current</i> (DC)	9
2.4 Teknik <i>Perturb and Observed</i> (P&O).....	10
2.5 Algoritma <i>Free Search Krill Herd</i> (FSKH)	11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Perancangan Sistem pada Simulasi	13
3.1.1 Perancangan Model Panel Surya Satu Dioda.....	15

3.1.2	Perhitungan Parameter Pengendali Daya	19
3.1.3	Pemilihan Beban Sistem MPPT	20
3.2	Perancangan Perangkat Keras	21
3.2.1	Pengaturan Mikrokontroler sebagai Pengendali Daya	22
3.2.2	Pemilihan Alat Pengukuran Prototipe	23
3.3	Desain Algoritma MPPT	24
3.2.1	Algoritma <i>Pertub and Observed</i> (P&O)	25
3.2.2	Algoritma <i>Recurrence Pertub and Observed</i> (RP&O)	25
3.2.3	Algoritma <i>Free Search Krill Herd</i> (FSKH)	27
3.4	Metode Pengujian Secara Simulasi	28
3.4.1	Pembangunan Kurva Karakteristik Panel Surya	28
3.4.2	Metode Pengujian MPPT pada Beberapa Kondisi	28
3.5	Metode Pengujian Perangkat Keras	29
3.5.1	Pembangunan Kurva Karakteristik Panel Surya	29
3.5.2	Metode Pengujian MPPT pada Beberapa Kondisi	29
BAB IV	HASIL PENELITIAN	33
4.1	Hasil Pembangunan Prototipe	33
4.2	Kalibrasi Alat Ukur	34
4.3	Pengaruh Dioda Bypass pada Panel Surya	35
4.4	Pengujian Secara Simulasi	38
4.4.1	Kurva Karakteristik Panel Surya Kondisi Normal	38
4.4.2	Kurva Karakteristik Panel Surya Kondisi Berbayang	40
4.4.3	Pengujian MPPT pada Kondisi Normal	41
4.4.4	Pengujian MPPT pada PSC Pola I	43
4.4.5	Pengujian MPPT pada PSC Pola II	45
4.4.6	Pengujian MPPT pada PSC Pola III dn IV	47
4.4.7	Rangkuman Hasil Pengujian Secara Simulasi	49
4.5	Pengujian Perangkat Keras	50
4.5.1	Kurva Karakteristik Panel Surya Kondisi Normal	50
4.5.2	Kurva Karakteristik Panel Surya Kondisi Berbayang	51
4.5.2.1	Panel Surya Tertutup 2 Sel dan 4 Sel Sel Atas atau Bawah ..	52

4.5.2.1 Panel Surya Tertutup 8 Sel Vertikal	54
4.5.2.1 Panel Surya Tertutup 4 Sel Horisontal	55
4.5.2.1 Panel Surya Tertutup 8 Sel Horisontal	56
4.5.3 Pengujian MPPT pada Kondisi Normal	57
4.5.4 Pengujian MPPT pada Panel Surya Tertutup 8 Sel Vertikal.....	58
4.5.5 Pengujian MPPT pada Panel Surya Tertutup 4 Sel Horisontal	59
4.5.6 Pengujian MPPT pada Panel Surya Tertutup 8 Sel Horisontal	60
4.5.7 Rangkuman Hasil Pengujian Perangkat Keras	61
BAB V PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN.....	L.1
L.1 Data Teknis Panel Surya	L.1
L.2 Data Teknis Pompa Air.....	L.2
L.3 Data Penelitian	L.3
BIOGRAFI PENULIS	

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem pompa air tenaga matahari	5
Gambar 2.2 Kurva I-V dan P-V (kurva karakteristik) suatu panel surya.....	6
Gambar 2.3 Kurva karakteristik panel surya pada nilai radiasi dan suhu yang berbeda-beda	7
Gambar 2.4 Kurva I-V dan P-V pada kondisi normal dan tertutup sebagian	8
Gambar 2.5 Rangkaian Boost Converter	8
Gambar 2.6 Gradien pada kurva P-V karakteristik panel surya.....	11
Gambar 2.7 Alur diagram P&O secara umum	11
Gambar 2.8 Diagram alur algoritma Krill Herd	12
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian.....	13
Gambar 3.2 Desain keseluruhan sistem untuk pengujian MPPT	15
Gambar 3.3. Rangkaian pengganti panel surya satu dioda	16
Gambar 3.4. Rangkaian pengganti panel surya satu dioda ideal.....	16
Gambar 3.5 Gambar teknis panel surya dengan dua dioda <i>bypass</i>	18
Gambar 3.6 Model panel surya dengan dua dioda <i>bypass</i>	18
Gambar 3.7 Model panel surya satu dioda ideal	19
Gambar 3.8 Rangkaian <i>boost converter</i> sebagai pengendali daya.....	20
Gambar 3.9 Desain MPPT secara detail beserta sinyal PWM generator.....	22
Gambar 3.10 Sinyal PWM output pada (a) frekuensi default arduino 976,5 Hz (b) frekuensi disesuaikan 7,812 kHz (arduino dan TLP250).....	23
Gambar 3.11 Diagram alur algoritma P&O sebagai MPPT.....	25
Gambar 3.12 Diagram alur algoritma RP&O sebagai MPPT	26
Gambar 3.13 Diagram alur algoritma FSKH sebagai MPPT.....	27
Gambar 3.14 Panel surya tertutup 2 sel dan 4 sel	30
Gambar 3.15 Panel surya tertutup 8 sel vertikal	31
Gambar 3.16 Panel surya tertutup 4 sel horisontal	32
Gambar 3.17 Panel surya tertutup 8 sel horisontal	32

Gambar 4.1 Prototipe konverter <i>boost</i> sebagai pengendali daya.....	33
Gambar 4.2 Prototipe pengendali daya sistem pompa air tenaga matahari.....	34
Gambar 4.3 Dua model PV satu dioda terhubung seri dilengkapi dioda <i>bypass</i> ...	36
Gambar 4.4 Hasil simulasi nilai arus listrik pada masing-masing cabang	36
Gambar 4.5 Hasil simulasi nilai tegangan pada masing-masing cabang.....	37
Gambar 4.6 Kurva karakteristik I-V dan P-V panel surya hasil simulasi terhadap perubahan : (a) radiasi dan (b) suhu	39
Gambar 4.7 Pengaruh nilai parameter A terhadap kurva karakteristik panel surya.....	39
Gambar 4.8 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi berbagai pola tertutup sebagian (PSC) dibandingkan dengan kondisi normal	40
Gambar 4.9 Kurva daya dan duty cycle algoritma P&O dan RP&O pada kondisi normal.....	41
Gambar 4.10 Kurva daya dan duty cycle algoritma FSKH pada kondisi normal .	42
Gambar 4.11 Kurva daya dan duty cycle pada kondisi normal.....	42
Gambar 4.12 Kurva daya dan duty cycle algoritma P&O dan RP&O pada pola kondisi PSC I.....	43
Gambar 4.13 Kurva daya dan duty cycle algoritma FSKH pada PSC I.....	44
Gambar 4.14 Kurva daya dan duty cycle pada PSC I	44
Gambar 4.15 Kurva daya dan duty cycle algoritma P&O dan RP&O pada pola kondisi PSC II.....	45
Gambar 4.16 Kurva daya dan duty cycle algoritma FSKH pada PSC II.....	46
Gambar 4.17 Kurva daya dan duty cycle pada PSC II	46
Gambar 4.18 Kurva daya dan duty cycle algoritma P&O dan RP&O pada pola kondisi PSC III dan IV	47
Gambar 4.19 Kurva daya dan duty cycle algoritma FSKH pada PSC I III dan IV	48
Gambar 4.20 Kurva daya dan duty cycle pada PSC III dan IV	48
Gambar 4.21 Hasil Pengujian perangkat keras kondisi normal.....	51
Gambar 4.22 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi tertutup 2 sel.....	52
Gambar 4.23 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi tertutup 4 sel.....	53
Gambar 4.24 Kurva karakteristik panel surya tertutup 8 sel vertikal.....	54

Gambar 4.25 Kurva karakteristik panel surya tertutup 4 sel horisontal.....	55
Gambar 4.26 Kurva karakteristik panel surya tertutup 8 sel horisontal.....	56
Gambar 4.27 Kurva karakteristik pengujian perangkat keras kondisi normal.....	57
Gambar 4.28 Pola tertutup vertikal dan kurva karakteristik panel surya.....	58
Gambar 4.29 Pola tertutup 4 sel horisontal dan kurva karakteristik panel surya...	59
Gambar 4.30 Pola tertutup 8 sel horisontal dan kurva karakteristik panel surya...	60

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data teknis panel surya	17
Tabel 3.2 Spesifikasi <i>boost converter</i> sebagai Pengendali Daya.....	19
Tabel 4.1 Hasil uji simulasi keseluruhan sistem pada seluruh kondisi	49
Tabel 4.2 Hasil uji perangkat keras keseluruhan sistem	61

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

SINGKATAN

IEA	<i>International Energy Agency</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&O	<i>Perturb and Observe</i>
RP&O	<i>Recurrence P&O</i>
FSKH	<i>Free Search Krill Herd</i>
STC	<i>Standard Test Condition</i>
PSC	<i>Partial Shading Condition</i>
PMDC	<i>Permanent Magnet Direct Current</i>

SIMBOL

G	Radiasi Sinar Maahari
I	Arus listrik
Isc	<i>Arus Sort Circuit</i>
Iph	<i>Arus photovoltaic</i>
Is	Arus saturasi dioda
Irs	Arus saturasi dioda pada STC
K	Konstanta Boltzmann
Ns	Jumlah sel surya terpasang seri
P	Daya listrik
q	Muatan Elektron
Q	Debit air
T	Temperatur
V	Tegangan
Voc	<i>Tegangan Open Circuit</i>

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sekarang ini, ratusan juta orang yang tinggal di daerah terpencil dari berbagai negara tidak memiliki ketersediaan air minum untuk dikonsumsi. Pasokan air di lingkungan mereka hanya berasal dari hujan atau sungai yang letaknya jauh [1]. Selain sebagai konsumsi, sumber daya air juga sangat diperlukan untuk kepentingan sosial, ekonomi masyarakat dan dapat menjaga ekosistem. Salah satu solusi yang sering digunakan untuk memenuhi kebutuhan sumber daya air adalah mengimplementasikan pompa air elektrik.

Penggunaan pompa air elektrik di daerah terpencil sering kali terkendala karena sebagian besar daerah tersebut masih sulit mendapatkan pasokan energi listrik. Sumber energi listrik dari fosil semakin mengalami kelangkaan sehingga memacu dunia untuk berlomba-lomba memanfaatkan energi terbarukan. Pada tahun 2035, *International Energy Agency* (IEA) memprediksi energi terbarukan menyumbang hampir sepertiga dari total kebutuhan listrik dan energi matahari tumbuh lebih cepat dibandingkan teknologi terbarukan lainnya [2].

Teknologi panel surya sebagai sumber energi bukanlah suatu hal yang baru dan sudah digunakan selama lebih dari tiga dekade [1]. Teknologi panel surya ini sudah terbukti dapat beroperasi selama beberapa tahun tanpa perlu perawatan. Teknologi panel surya membutuhkan suatu algoritma penjejak supaya daya output yang dihasilkan menjadi optimal. Sekarang ini berbagai algoritma pemrograman metaheuristik telah terbukti digunakan sebagai algoritma penjejak untuk dapat memperoleh daya paling optimum. Mereka bervariasi dalam kompleksitas, beban perhitungan, efektivitas, implementasi perangkat keras, popularitas, kecepatan konvergensi, dan dalam hal lain [3].

Berbagai macam algoritma metaheuristik modern telah mengalami perkembangan dan perbaikan untuk meningkatkan kemudahan dalam menemukan nilai solusi optimal global. Nilai solusi optimal global sering kali terjebak pada nilai optimal lokal. Algoritma *Free Search Krill Herd* (FSKH) adalah salah satu contoh

perkembangan algoritma *Krill Herd* (KH) yang memanfaatkan strategi pencarian bebas (*free search*). FSKH dapat mencapai keseimbangan yang lebih baik antara pencarian lokal dan pencarian global. Hasil simulasi dan pengujian pada hampir seluruh fungsi baku menunjukkan bahwa FSKH memiliki performansi yang sangat unggul dalam ketelitian optimasi, ketahanan dan kecepatan konvergensi [4].

Salah satu implementasi teknologi panel surya sebagai solusi pemenuhan kebutuhan sumber daya air terutama pada daerah terpencil yang masih sulit mendapat pasokan energi listrik adalah sistem pompa air menggunakan energi matahari [5]. Sistem pompa air tenaga matahari adalah teknologi yang sangat menjanjikan sudah diteliti lebih dari 50 tahun [6]. Implementasi yang sudah banyak dilakukan adalah untuk pemenuhan kebutuhan air minum dan irigasi. Implementasi sederhana sistem pompa air tenaga matahari adalah tanpa menggunakan baterai. Kelebihannya tanpa baterai adalah harga sangat terjangkau, sistem sangat sederhana dan kelebihan air dapat disimpan pada penampung air untuk kebutuhan beberapa hari selanjutnya. Penggunaan pompa air dengan yang menggunakan jenis motor AC membutuhkan inverter yang menyebabkan efisiensi turun drastis. Dengan demikian, pompa air motor DC adalah pilihan yang lebih baik karena tanpa brush, efisiensi tinggi, suara halus, ukuran kecil, reliabilitas tinggi dan *low maintenance* [6].

Implementasi sistem pompa air tenaga matahari membutuhkan suatu teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) supaya efisiensi menjadi optimal. Hasil penelitian membuktikan bahwa penerapan MPPT mampu menyerap energi sebesar 99% kapasitas panel surya dan menghasilkan 87% kapasitas air lebih banyak [6]. Teknik MPPT yang umum digunakan adalah *Perturb and Observe* (P&O) karena memiliki efisiensi yang tinggi dan tidak membutuhkan *tuning* parameter secara periodik [7]. P&O adalah suatu teknik yang sangat sederhana karena tidak membutuhkan pengetahuan tentang kurva karakteristik panel surya [8]. Teknik ini juga dapat diimplementasikan pada mikrokontroler arduino sehingga harga cukup terjangkau [9]. Meskipun sederhana, teknik ini tidak dapat diterapkan pada kondisi tertutup sebagian atau *Partial Shading Condition* (PSC) [10] karena tidak dapat melacak daya optimum panel surya [11]. Ketika PSC terjadi, pengendali daya komersial terbukti memperoleh kehilangan daya sebesar 70% [12].

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan yang ingin diselesaikan pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah membangun kurva karakteristik panel surya secara simulasi maupun pengujian perangkat keras pada kondisi normal dan berbayang?
2. Bagaimanakah modifikasi teknik P&O supaya lebih cepat konvergen dan mampu menghadapi kondisi berbayang?
3. Bagaimanakah cara mengimplementasi algoritma FSKH sebagai MPPT?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang telah dilakukan adalah mampu membangun kurva karakteristik panel surya baik secara simulasi maupun pengujian perangkat keras pada keadaan normal maupun berbayang atau *Partial Shading Condition* (PSC). Selain itu, tujuan penelitian ini adalah memodifikasi teknik P&O dan menerapkan FSKH sebagai MPPT.

1.4. Batasan Penelitian

Beberapa batasan dari penelitian yang telah dilakukan adalah:

1. Pengujian dilakukan secara simulasi dan perangkat keras diaplikasikan pada skala laboratorium yaitu menggunakan satu modul panel surya.
2. Pembahasan mendetail mengenai performa *boost converter* sebagai pengendali daya tidak dibahas pada penelitian ini.
3. Nilai variable pada pompa air yang diamati dan dibahas pada penelitian ini adalah hanya pada hubungan debit air yang dihasilkan pompa air dengan nilai daya listrik dari panel surya.

1.5. Kontribusi Penelitian

Penelitian ini menyajikan pengetahuan tentang penggunaan metode cerdas untuk menyelesaikan masalah optimasi system terutama berkaitan dengan sistem panel surya. Pemodelan, simulasi dan prototipe dari sistem yang telah dibangun dapat memberikan kontribusi kepada masyarakat, industri, peneliti atau akademisi dan pemerintah yang ingin mengaplikasikan sistem pompa air tenaga matahari.

Penelitian ini menyajikan pembangunan kurva karakteristik panel surya pada kondisi normal dan beberapa kondisi pola berbayang. Kondisi berbayang menggunakan beberapa pola penutupan sel panel surya yang berbeda untuk mengetahui pengaruh luas dan letak penutupan sel panel surya terhadap kurva karakteristiknya. Selain itu penelitian ini juga membahas pengaruh dioda *bypass* terhadap model panel surya. Metode cerdas sebagai optimasi sistem yang diusulkan pada penelitian ini adalah RP&O yang merupakan modifikasi dari P&O dan FSKH yang merupakan modifikasi dari KH. Debit air juga diamati dan dijelaskan hubungannya dengan daya yang diperoleh dari panel surya hasil optimasi.

1.6. Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi pemaparan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, kontribusi penelitian dan sistematika pembahasan.

Bab II Teori Dasar

Bab ini memaparkan teori-teori terkait penelitian yang bersumber dari berbagai literatur. Teori yang dibahas antara lain mengenai teknologi panel surya (MPPT dan PSC), *boost converter* sebagai pengendali daya, pompa air DC, teknik P&O dan algoritma KH.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan langkah-langkah pemodelan dan perancangan prototipe sistem pompa air otomatis tenaga matahari, pembangunan perangkat keras, desain beberapa algoritma MPPT yang diusulkan, metode simulasi dan pengujian sistem pompa air otomatis tenaga matahari.

Bab IV Hasil Penelitian

Bab ini menjelaskan hasil pembangunan prototipe, kalibrasi alat pengukuran, kurva karakteristik panel surya secara simulasi maupun perangkat keras pada kondisi normal dan berbayang. Performa algoritma MPPT pada kondisi normal dan beberapa kondisi berbayang.

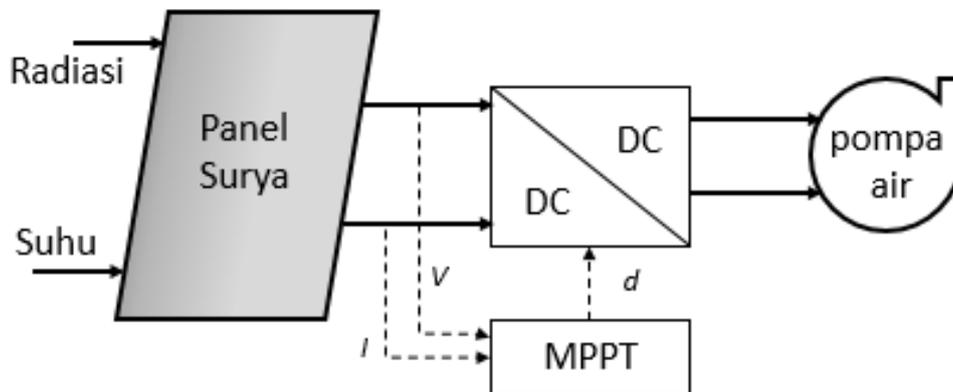
Bab V Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TEORI DASAR

Sistem pompa air tenaga matahari yang paling sederhana menggunakan pompa air DC secara umum memiliki 4 komponen utama yaitu panel surya sebagai sumber energi, konverter sebagai pengendali daya, MPPT sebagai pengendali konverter, dan pompa air. Gambar sistem pompa air secara utuh ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pengendali daya berisikan minimal satu konverter yang digunakan untuk menyesuaikan daya kebutuhan beban dengan kemampuan daya panel surya sebagai sumber energi.



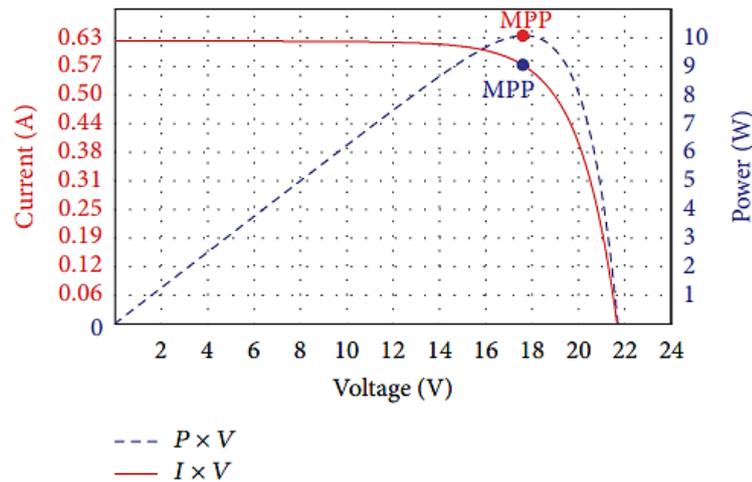
Gambar 2.1 Sistem pompa air tenaga matahari

2.1 Teknologi Panel Surya

Salah satu sumber energi terbarukan yang bersih [13] dan sekarang sedang banyak diterapkan adalah teknologi panel surya. Teknologi ini bisa hampir diterapkan diseluruh penjuru dunia selama ada cahaya matahari. Energi yang mampu dihasilkan oleh matahari bernilai 63 TW perhari [14]. Kendala yang sering muncul adalah biaya yang mahal dan nilai efisiensi konversi panel surya yang kecil senilai rata-rata 13% sampai dengan 18% [14]. Dengan demikian, berbagai teknik untuk mengekstrak daya maksimal yang mampu dihasilkan oleh panel surya adalah topik bahasan yang sangat penting.

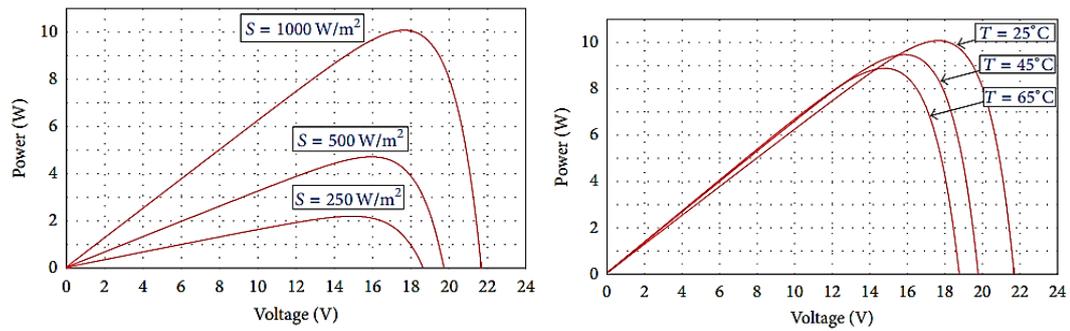
2.2.1 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Nilai daya yang dihasilkan oleh panel surya merupakan fungsi dari suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari. Kurva arus I terhadap tegangan V dan daya P terhadap tegangan V pada satu nilai radiasi dan suhu tertentu ditunjukkan pada Gambar 2.2. Nilai arus I pada saat tegangan 0 volt disebut arus *short circuit* I_{sc} dan nilai tegangan pada arus 0 ampere disebut tegangan *open circuit* V_{oc} . Kedua nilai tersebut akan ditemukan pada data teknis panel surya.



Gambar 2.2 Kurva I-V dan P-V (kurva karakteristik) suatu panel surya [14]

Nilai parameter lain yang ditampilkan pada *datasheet* panel surya adalah daya maksimum dalam satuan Watt peak. Daya Maksimum ini bisa dijelaskan pada Gambar 2.2 tidak lain adalah titik *Maximum Power Poin* (MPP). Daya tersebut adalah daya maksimum elektrik yang merupakan hasil perkalian nilai arus maksimum I_m dan tegangan maksimum V_m . Nilai V_m dan I_m adalah hanya ada satu nilai diperoleh dari kurva I-V pada titik MPP yang menunjukkan nilai daya paling optimal pada panel surya. Pada implementasinya, tegangan kerja dan nilai arus tidak akan selalu pada nilai V_m dan I_m . Untuk menjamin peralatan selalu bekerja pada nilai optimal daya panel surya, diperlukan piranti pengendali daya yang menjaga peralatan beroperasi pada nilai V_m dan I_m . Piranti tersebut menerapkan *Maximum Power Poin Tracking* (MPPT) yaitu pelacakan nilai MPP sehingga panel surya bekerja optimal. Teknik MPPT yang sekarang digunakan ada sangat banyak dan beberapa akan dibahas pada sub bab selanjutnya.



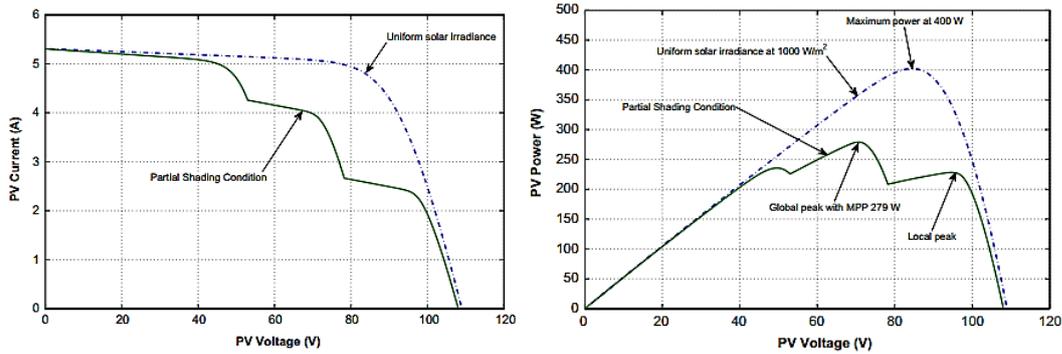
Gambar 2.3 Kurva karakteristik panel surya pada nilai radiasi dan suhu yang berbeda-beda [13]

Pengaruh nilai radiasi dan suhu pada kurva karakteristik panel surya ditunjukkan pada Gambar 2.3. Semakin besar nilai radiasi matahari yang diterima panel surya menyebabkan nilai arus akan semakin besar sehingga daya menjadi semakin besar. Pengaruh suhu berbanding terbalik dengan pengaruh radiasi. Jika suhu semakin naik maka daya yang dikeluarkan justru semakin kecil. Hal ini disebabkan karena batas kemampuan komponen elektronik yang menurun yaitu jika suhu semakin meningkat.

2.2.2 Partial Shading Condition (PSC)

Kondisi tertutup sebagian akan menghasilkan kurva karakteristik yang berbeda dengan kondisi normal ditunjukkan pada Gambar 2.4. Konfigurasi dari beberapa unit panel surya atau beberapa *cell* di dalam satu panel surya sering menggunakan *bypass diode* sebagai pengaman. Tujuan penggunaan *bypass diode* adalah memastikan panel surya selalu sebagai sumber energi ketika beberapa bagian panel surya menghasilkan daya yang tidak sama. Jika tidak ada *bypass diode* maka bagian yang memiliki daya lebih rendah akan berperan sebagai beban dan timbul panas yang dapat merusak panel surya.

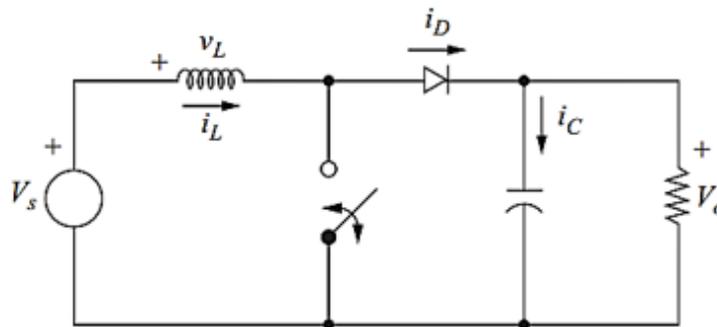
Penggunaan dioda pada panel surya menyebabkan kurva I-V menjadi berlekuk-lekuk dan menyebabkan kurva P-V memiliki beberapa puncak seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. Puncak yang paling tinggi disebut sebagai solusi global dan merupakan daya maksimal yang sesungguhnya. Sedangkan puncak-puncak yang lain disebut solusi lokal. Teknik MPPT ketika PSC perlu disesuaikan sehingga tidak terjebak hanya menemukan solusi lokal.



Gambar 2.4 Kurva karakteristik pada kondisi normal dan tertutup sebagian (PSC) [11]

2.2 Konverter Penguat Tegangan (*Boost Converter*) [15]

Topologi konverter DC-DC tanpa transformator yang dapat menaikkan tegangan adalah *boost converter* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Konverter ini terdiri dari tegangan sumber V_s , saklar elektrik yang terkontrol, induktor L , dioda, filter kapasitor C dan beban resistif R yang menunjukkan tegangan output. Ketika kondisi *switch on* maka arus induktor meningkat dan dioda terjaga pada posisi *off*. Ketika kondisi *switch off* dioda mengalirkan energi dari induktor ke beban.



Gambar 2.5 Rangkaian *Boost Converter*

Nilai total perubahan arus induktor dalam satu periode (kondisi saklar *on* dan saklar *off*) atau saat *steady state* bernilai nol menghasilkan hubungan tegangan output dan input sebagai berikut:

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

Nilai arus yang mengalir pada induktor adalah:

$$I_L = \frac{V_o \cdot I_o}{V_s} \quad (2.2)$$

Nilai kombinasi induktansi minimum dengan frekuensi penyaklaran pada saat mode kontinyu adalah:

$$L_{\min} = \frac{D \cdot (1 - D^2) \cdot R}{2 \cdot f} \quad (2.3)$$

Untuk keperluan desain, nilai induktansi sering dihubungkan dengan *ripple* arus:

$$L = \frac{V_s \cdot D}{\Delta i_L \cdot f} \quad (2.4)$$

Nilai kapasitansi jika dihubungkan dengan *ripple* tegangan sebagai berikut:

$$C = \frac{D}{R \cdot (\Delta V_o / V_o) \cdot f} \quad (2.5)$$

Nilai resistansi pada kapasitor akan mengakibatkan nilai ripple menjadi besar. Nilai induktansi atau kapasitansi untuk keperluan desain pada umumnya bernilai lebih besar daripada yang sudah dihitung. Hal tersebut bertujuan untuk memperkecil nilai ripple yang muncul karena sesuai persamaan (2.4) dan (2.5) yaitu bahwa nilai kapasitansi C berbanding terbalik dengan nilai ripple tegangan ΔV_o dan nilai induktansi L berbanding terbalik dengan nilai ripple arus Δi_L .

2.3 Pompa Air *Direct Current* (DC)

Permanent Magnet DC (PMDC) motor sebagai penggerak pompa air yang dihubungkan langsung kepada panel surya semakin banyak digunakan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi yang dihasilkan oleh motor akan semakin meningkat dengan adanya *tracking*. *Tracking* manual panel surya terhadap posisi matahari yang dilakukan selama tiga kali dalam sehari telah terbukti menghasilkan 20% output yang lebih besar dibandingkan dengan panel surya yang terpasang dengan posisi tetap [16]. Salah satu pengamatan efisiensi dapat dilakukan dengan mengamati debit air Q yang dihasilkan melalui persamaan berikut ini [16]:

$$T_L \cdot \omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2.6)$$

Persamaan (2.6) menunjukkan bahwa debit air akan sebanding dengan torsi beban T_L dikalikan dengan kecepatan ω . Nilai torsi ini jelas terbanding lurus dengan daya yang diterima pompa air karena pada gerak melingkar berlaku:

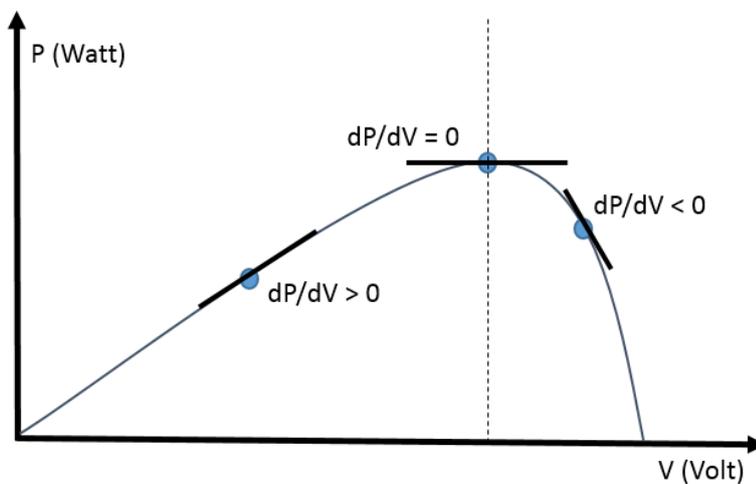
$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(T_L \cdot \theta)}{dt} = T_L \cdot \frac{d\theta}{dt} = T_L \cdot \omega \quad (2.7)$$

Daya yang diterima oleh motor merupakan daya output pada pengendali daya atau konverter dengan daya inputnya adalah dari panel surya. Perbandingan daya output terhadap daya input merupakan nilai efisiensi dari konverter yang digunakan ditunjukkan pada persamaan (2.8). Karena daya input P_{in} sebanding dengan daya output P_{out} , dan daya output P_{out} sebanding dengan torsi dikalikan kecepatan $T_L \cdot \omega$ yang juga berbanding lurus dengan debit air Q maka bisa disimpulkan bahwa debit air yang dihasilkan akan berbanding lurus dengan daya input yang diterima oleh pengendali daya. Dengan demikian debit air yang dihasilkan berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan oleh panel surya.

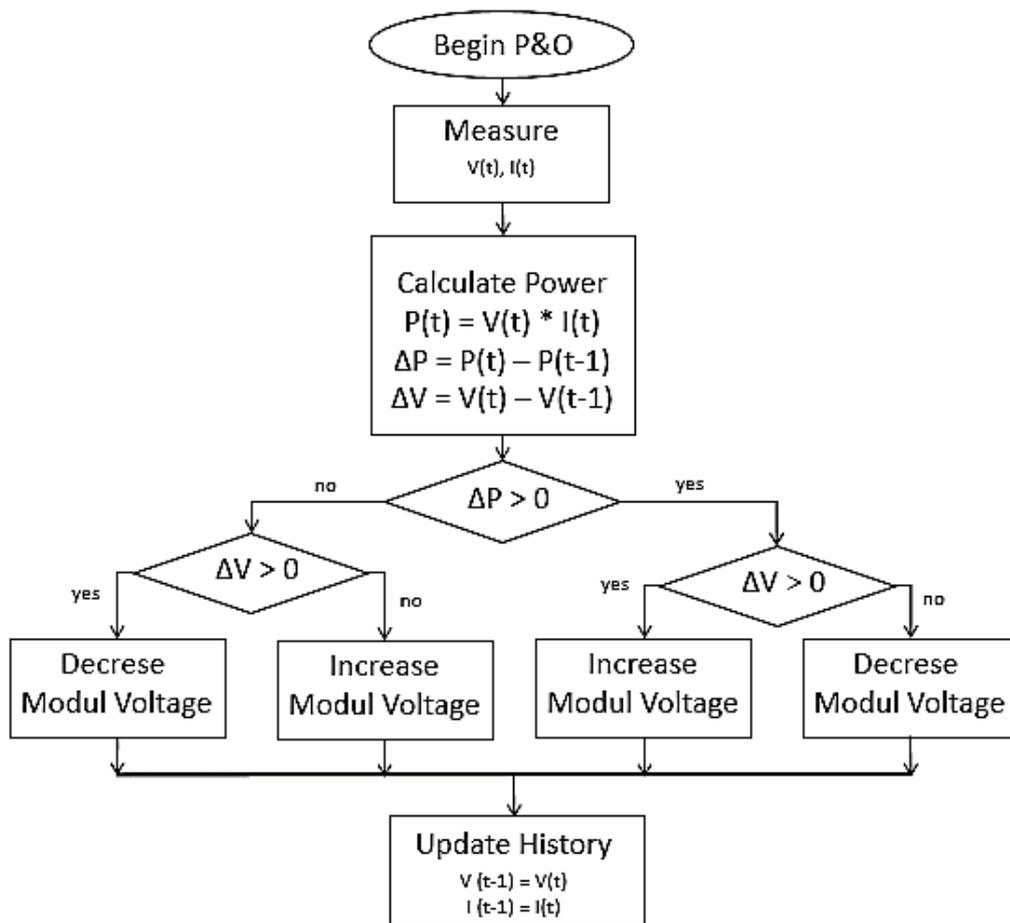
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad .(2.8)$$

2.4 Teknik Perturb and Observe (P&O)

Teknik P&O sebagai MPPT bekerja berdasarkan prinsip kemiringan kurva perubahan daya terhadap perubahan tegangan (dP/dV) yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Teknik ini membagi daerah kurva karakteristik panel surya menjadi dua bagian yaitu mengacu pada titik kemiringan 0 atau pada titik MPP. Bagian sebelah kiri adalah daerah gradien positif. Pada daerah ini, nilai tegangan kerja harus dinaikkan sehingga menuju titik MPP. Pada daerah bagian kanan atau area gradien negatif, nilai tegangan kerja harus diturunkan sehingga menuju titik MPP. Diagram alur teknik P&O ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6. Gradien pada kurva P-V karakteristik panel surya



Gambar 2.7. Alur diagram P&O secara umum [17]

2.5 Algoritma Free Search Krill Herd (FSKH)

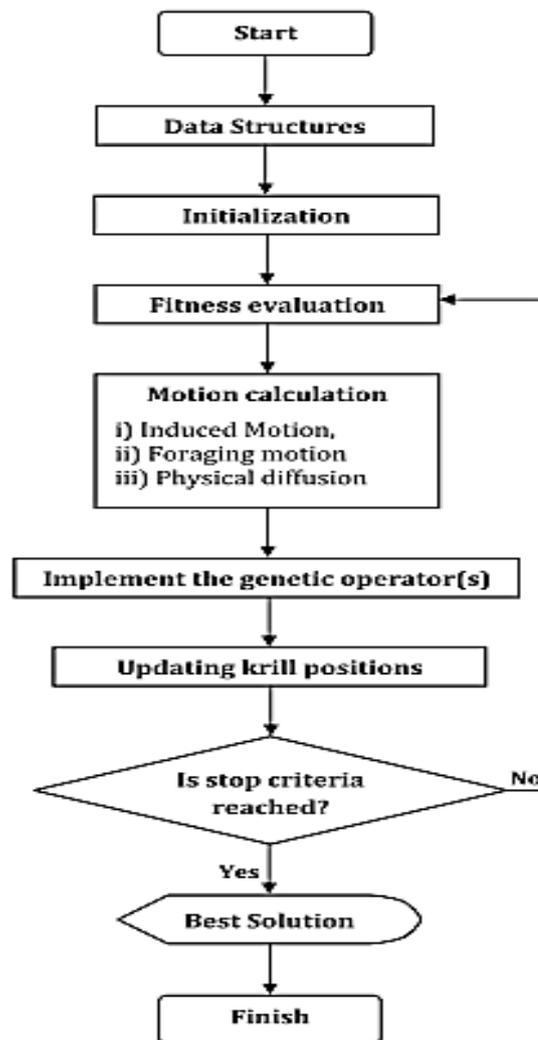
Krill Herd merupakan algoritma metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku individu *krill* dalam mencari makanan. Algoritma ini pertama kali diperkenalkan oleh Gandomi dan Alavi pada tahun 2012. Algoritma ini memiliki tiga aksi utama yaitu pergerakan yang dipacu oleh individu *krill* yang lain N_i , aktifitas mencari makanan F_i dan penyebaran secara fisik D_i sesuai pada persamaan (2.10). Ketiga aktifitas tersebut merupakan formula pergerakan setiap individu *krill* untuk menuju lokasi makanan. Pada waktu tertentu semua *krill* akan berada pada lokasi makanan (kondisi konvergen). Algoritma *Free Search Krill Herd* yang diusulkan pada penelitian ini adalah modifikasi algoritma *Krill Herd* dengan memanfaatkan strategi pencarian bebas supaya memiliki kecepatan konvergensi yang lebih baik. Diagram alur algoritma *Krill Herd* ditunjukkan pada gambar 2.9.

Pergerakan yang dilakukan oleh individu krill ditunjukkan oleh persamaan:

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + \Delta t \frac{dX_i}{dt} \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan

$$\frac{dX_i}{dt} = Ni + Fi + Di \dots\dots\dots (2.10)$$



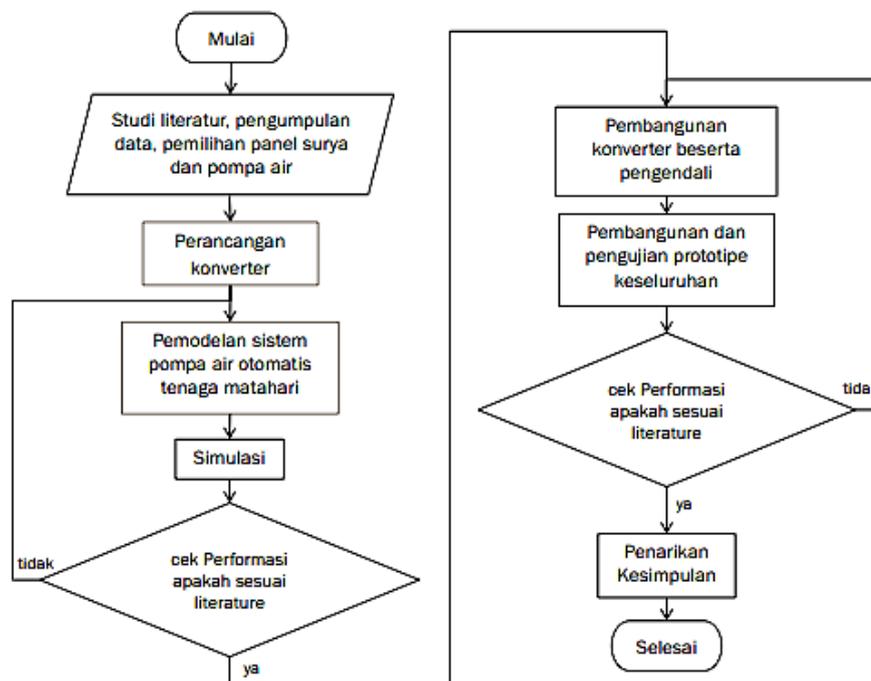
Gambar 2.8 Diagram alur algoritma *Krill Herd* [18]

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur dari berbagai sumber. Langkah selanjutnya adalah pengumpulan data dan pemilihan nilai parameter dari setiap komponen pada sistem pompa air tenaga matahari. Setelah itu, pengendali daya yang berisi konverter dirancang dengan perhitungan nilai komponen berdasarkan data teknis panel surya dan pompa air. Tugas pengendali adalah mengatur *duty cycle* dari konverter menggunakan algoritma sehingga daya yang dibangkitkan panel surya selalu pada kondisi optimal.

Pemodelan sistem pompa air tenaga matahari disesuaikan dengan data teknis perangkat keras yang sebenarnya. Model yang sudah dibangun disimulasikan dan dipilih nilai variable nilai daya sebagai obyek utama yang diamati. Setelah simulasi berhasil maka langkah terakhir adalah pembangunan dan pengujian prototipe. Kesimpulan dari keseluruhan penelitian yang telah dilakukan akan diperoleh berdasarkan hasil pengujian secara simulasi dan pengujian perangkat keras. Diagram metodologi penelitian secara lengkap disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alur penelitian

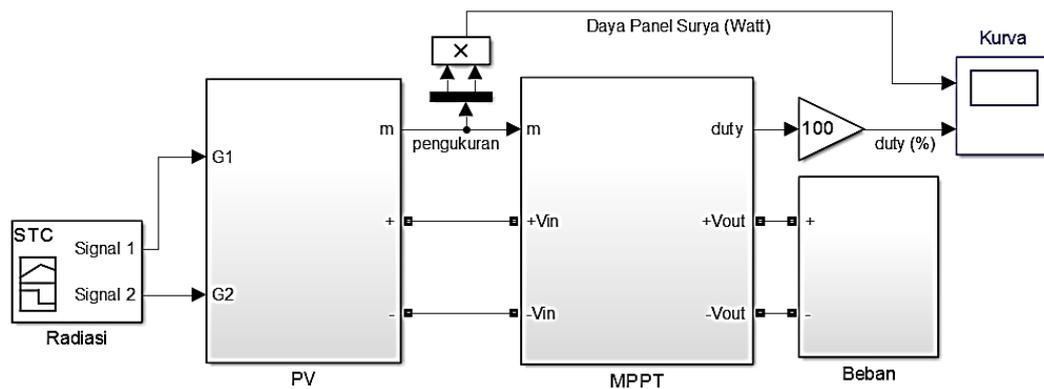
3.1 Perancangan Sistem pada Simulasi

Suatu MPPT pada teknologi panel surya adalah sebuah teknik memperoleh daya paling optimal dari sumber tenaga matahari. Implementasi MPPT tersebut adalah dengan menambahkan suatu perangkat pengendali daya yang berisi satu atau gabungan dari beberapa konverter. Tugas konverter tersebut adalah melacak tegangan kerja pada nilai tertentu sehingga panel surya dapat menghasilkan daya paling optimum melalui pengaturan nilai *duty cycle*. Pengaturan *duty cycle* tersebut dilakukan kepada konverter dengan mengimplementasikan suatu algoritma ke dalam mikrokontroler.

Implementasi MPPT membutuhkan pembahasan yang lebih detail dari beberapa model komponen yang digunakan. Model yang dibahas pertama kali adalah model panel surya sebagai sumber energi. Model ini dibuat sedemikian rupa sehingga dapat menghasilkan kurva karakteristik yang sesuai dengan kondisi alat yang sebenarnya. Selain itu, model panel surya tersebut juga dapat disimulasikan untuk menjelaskan fenomena tertutup sebgaiian atau *Partial Shading Condition* (PSC). Model selanjutnya yang dibahas adalah perhitungan nilai komponen pengendali daya dengan menyesuaikan kebutuhan beban terhadap kemampuan panel surya sebagai sumber energi. Pembahasan berikutnya adalah model beban yang digunakan yaitu beban resistif dan pompa air.

Setelah pembahasan beberapa model komponen pada sistem, perancangan algoritma yang diimplementasikan pada mikrokontroler juga akan disajikan untuk keperluan simulasi dan pengujian prototipe. Algoritma yang sudah sangat populer digunakan adalah P&O dan juga telah disajikan pada dasar teori. Algoritma lain yang secara rinci diuraikan pada penelitian ini adalah algoritma *Recurrence P&O* (RP&O) dan FSKH yang selanjutnya saling dibandingkan termasuk dengan algoritma P&O. Performa ketiga algoritma tersebut akan diperoleh melalui hasil simulasi dan pengujian prototipe. Pengujian tersebut dilakukan pada kondisi normal dan beberapa pola kondisi tertutup sebagian (PSC). Metode simulasi, pembangunan dan pengujian prototipe akan dibahas lebih detail pada sub bab selanjutnya.

Desain keseluruhan sistem untuk pengujian MPPT ditunjukkan oleh Gambar 3.2. Blok *Photovoltaic* (PV) berisi model panel surya yang akan diuraikan pada pembahasan selanjutnya Bab 3.1.1. Nilai variable yang akan diamati dalam simulasi adalah daya (Watt) yang dihasilkan panel surya dan *duty cycle* (%). Nilai daya yang dihasilkan diperoleh dari hasil perkalian arus dan tegangan yang terukur. Nilai pengukuran ini juga digunakan sebagai input MPPT untuk menghasilkan nilai *duty cycle*. Selanjutnya, nilai *duty cycle* diubah menjadi sinyal PWM dan digunakan oleh pengendali daya didalam blok MPPT.

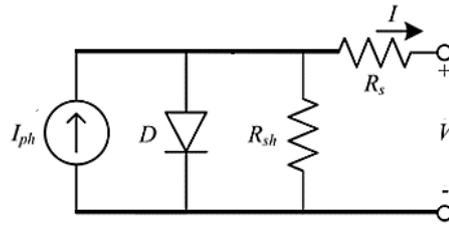


Gambar 3.2 Desain keseluruhan sistem untuk pengujian MPPT

2.5.1 Perancangan Model Panel Surya Satu Dioda

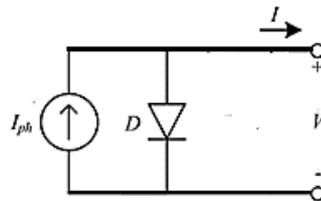
Beberapa macam model panel surya untuk keperluan simulasi sudah banyak dibuat dan diuji oleh para peneliti. Model yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada model panel surya satu dioda. Model panel surya satu dioda merupakan model terbaik karena memiliki keunggulan yaitu akurasi yang tinggi dan model yang sederhana [19]. Secara umum model panel surya satu dioda dilengkapi resistor seri R_s dan resistor paralel R_{sh} [19] ditunjukkan pada Gambar 3.3. Model tersebut menghasilkan persamaan (3.1) dan terdapat 5 parameter yang tidak diketahui yaitu I_{ph} , I_s , A , R_s dan R_{sh} . Semua parameter tersebut diperoleh melalui perhitungan atau iterasi.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V+I R_s)}{N_s A K T}\right) - 1 \right] - \frac{V+I R_s}{R_{sh}} \quad (3.1)$$



Gambar 3.3. Rangkaian pengganti panel surya satu dioda

Model diatas menghasilkan nilai arus $I = f(I, V)$ sebagai fungsi dari tegangan dan arus. Penelitian ini menggunakan model yang sudah lebih disederhanakan yaitu nilai arus $I = f(V)$ yang hanya merupakan fungsi tegangan [20]. Model tersebut adalah model panel surya satu dioda ideal tanpa R_s dan R_{sh} . Keuntungan model ini adalah waktu simulasi yang lebih cepat dengan total waktu reduksi 34,72% [20] dengan akurasi yang tetap tinggi [21]. Akurasi model ini dapat lebih ditingkatkan lagi melalui persamaan yang sudah diusulkan oleh pembuat model [22]. Rangkaian model panel surya satu dioda ideal ditunjukkan pada Gambar 3.4. Rangkaian tersebut menghasilkan persamaan (3.2) yang hanya memiliki 3 nilai parameter tidak diketahui yaitu I_{ph} , I_s , dan A .



Gambar 3.4. Rangkaian pengganti panel surya satu dioda ideal

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{N_s A K T}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Parameter I_{ph} dan I_s adalah besaran yang bergantung dari nilai radiasi matahari dan suhu lingkungan. Nilai I_{ph} diperoleh melalui persamaan (3.3) dan I_s diperoleh melalui persamaan (3.4). Parameter A merupakan besaran yang menjadikan kurva karakteristik sesuai dengan nilai *datasheet* panel surya. Data teknis panel surya yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1 atau selengkapnya pada Lampiran L.1. Nilai parameter A diperoleh dari persamaan (3.6) menggunakan teknik iterasi.

$$I_{ph} = G(I_{sc} - K_i \Delta T) \quad (3.3)$$

$$I_s = \frac{\exp\left(\frac{K_v \cdot q \cdot \Delta T}{N_s \cdot K \cdot T \cdot A}\right) G(I_{sc} - K_i \Delta T)}{\left(G \frac{I_{sc}}{I_{rs}} + 1\right)^{T_0/T} - \exp\left(\frac{K_v \cdot q \cdot \Delta T}{N_s \cdot K \cdot T \cdot A}\right)} \quad (3.4)$$

dengan

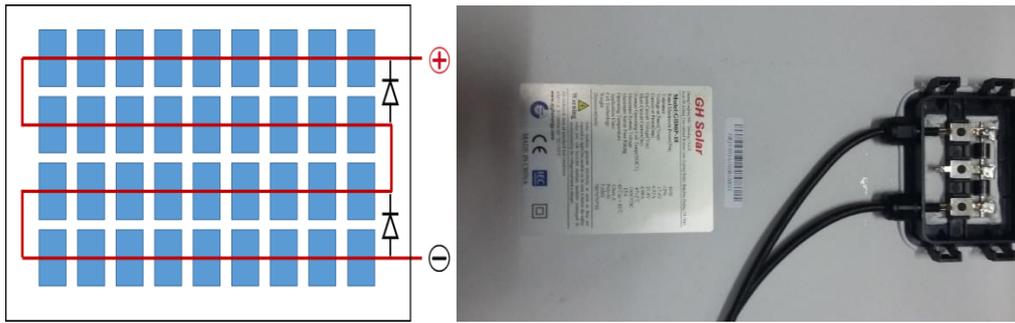
$$I_{rs} = I_{sc} / (\exp\left(\frac{K_v \cdot q \cdot \Delta T}{N_s \cdot K \cdot T \cdot A}\right) - 1) \quad (3.5)$$

$$\frac{I_m}{I_{sc}} = \exp\left(\frac{q \cdot V_m}{N_s \cdot K \cdot T_0 \cdot A}\right) - \left(\frac{I_{sc} - I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{N_s \cdot K \cdot T_0 \cdot A}\right) \quad (3.6)$$

Panel surya yang dipilih tersusun dari 36 *cell* terangkai seri dengan 2 dioda ditunjukkan pada Gambar 3.5. Model panel surya yang dibangun juga sudah disesuaikan menggunakan 2 dioda *bypass*. Nilai parameter yang digunakan telah disesuaikan sehingga daya maksimum yang dikeluarkan dapat sesuai dengan data teknis panel surya. Blok panel surya memiliki output berupa nilai arus dan input berupa radiasi dan suhu. Persamaan di dalam blok untuk mendapatkan nilai arus dari inputan radiasi dan suhu menggunakan persamaan (3.2) dengan beberapa parameter yang diperoleh melalui persamaan (3.3), (3.4) dan (3.5). Nilai parameter A yang diperoleh melalui (3.6) selalu bernilai konstan sedangkan nilai parameter I_{ph} dan I_s bergantung dari besarnya nilai radiasi matahari dan suhu lingkungan.

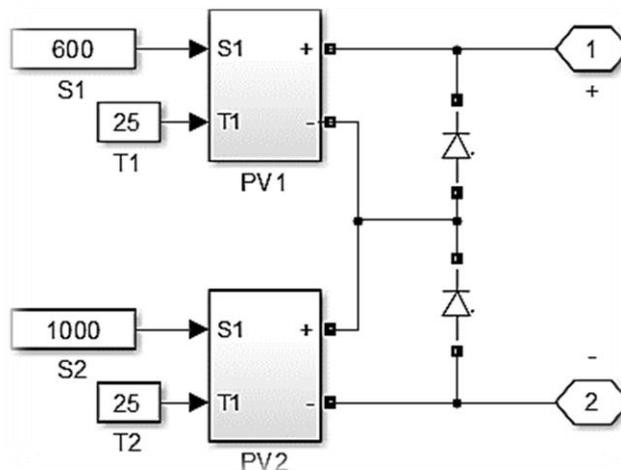
Tabel 3.1 Data teknis panel surya

Parameter	Simbol	Nilai
Jumlah <i>cell</i>	N_s	36
Tegangan <i>open circuit</i>	V_{oc}	21V
Arus <i>short circuit</i>	I_{sc}	4,72A
Tegangan maksimal	V_m	17,5V
Arus maksimal	I_m	4,45A
Koefisien arus I_{sc}	K_i	+0,04 % / °C
Koefisien tegangan V_{oc}	K_v	-0,32 % / °C



Gambar 3.5 Gambar teknis panel surya dengan dua dioda *bypass*

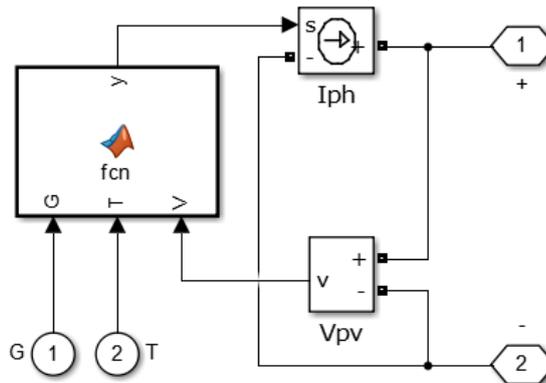
Dioda pada panel surya digunakan sebagai pengaman ketika beberapa *cell* mengalami kerusakan. Dioda tersebut memastikan bahwa panel surya selalu berfungsi sebagai sumber energi dan bukan sebagai beban. Beberapa panel surya secara default dari pabrik sudah terpasang dioda seperti yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan Gambar 3.5. Dioda tersebut juga sering ditambahkan secara manual pada konfigurasi seri paralel beberapa modul panel surya terutama untuk pengaman ketika kondisi berbayang. Hasil pengujian pada simulasi menggunakan nilai suhu konstan dan nilai radiasi yang berubah terhadap modul ditunjukkan pada Gambar 3.6 dapat memberikan hasil untuk penjelasan lebih detail mengenai efek dari kondisi berbayang atau *Partial Shading Condition* (PSC).



Gambar 3.6 Model panel surya dengan dua dioda *bypass*

Masing-masing blok panel surya pada Gambar 3.6 berisikan model panel surya satu dioda ideal yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Model tersebut sesuai

rangkaian pengganti pada Gambar 3.4 dan menghasilkan nilai arus $I=f(V)$ yang hanya sebagai fungsi dari tegangan. Model panel surya yang telah dibangun memiliki dua buah input yaitu radiasi dan suhu lingkungan seperti penjelasan yang sudah diuraikan. Nilai parameter yang ada di dalam blok sudah disesuaikan dengan data teknis panel surya yang digunakan dalam penelitian. Persamaan (3.2) digunakan dalam blok ini yaitu output fungsi y adalah nilai arus I_{pv} .



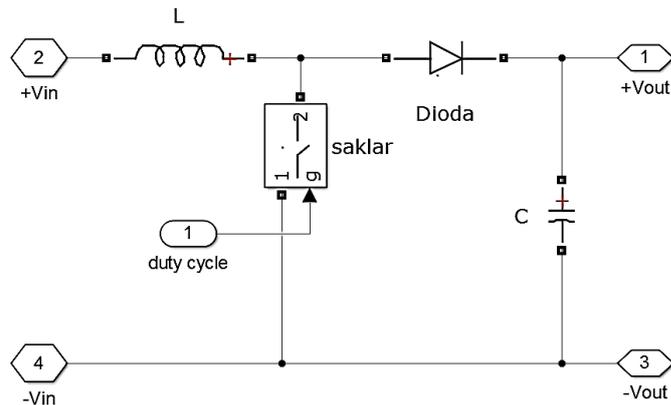
Gambar 3.7 Model panel surya satu dioda ideal

2.5.2 Perhitungan Parameter Pengendali Daya

Pengendali daya yang digunakan sebagai MPPT adalah *boost converter*. Pemilihan *boost converter* ini didasari oleh tegangan output yang lebih besar daripada tegangan input. Tegangan kerja panel surya sebagai sumber tenaga adalah senilai 0 sampai dengan $V_{oc} = 21$ Volt sedangkan tegangan kerja pompa air bernilai 24 Volt. Model yang digunakan untuk simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.8 sudah sesuai dengan yang diuraikan dasar teori pada Bab 2.2. Perhitungan nilai komponen yang digunakan dimulai dengan menetapkan beberapa nilai variabel awal yaitu frekuensi $f = 7812$ Hz, range tegangan input $V_{in} = 5-19$ V, *ripple* tegangan $\Delta V = 1,5$ %, *ripple* arus $\Delta I = 15$ %, tegangan output $V_o = 24$ V dan arus output $I_o = 3$ A.

Tabel 3.2 Spesifikasi *boost converter* yang sudah dirancang.

Parameter	Simbol	Nilai
Frekuensi <i>switching</i>	f	7812 Hz
Induktor	L	1 mH
Kapasitor	C	1 mF



Gambar 3.8 Rangkaian *boost converter* sebagai pengendali daya

Perhitungan dimulai menggunakan persamaan (2.2) sehingga nilai *duty cycle* $D_{(5V)} = 83,33\%$ dan $D_{(19V)} = 20,83\%$. Melalui persamaan $I_L = V_o * I_o / V_{in}$ maka diperoleh $I_{L(5V)} = 18A$ dan $I_{L(19V)} = 3,8A$. Selanjutnya $\Delta i_L = I_L \cdot \Delta t$ sehingga diperoleh $\Delta i_{L(5V)} = 2,7A$ dan $\Delta i_{L(19V)} = 0,57A$. Nilai komponen induktor diperoleh menggunakan persamaan (2.3) menghasilkan nilai $L_{(5V)} = 158\mu H$ dan $L_{(19V)} = 891\mu H$. Nilai Induktor yang dipilih adalah nilai terbesar yaitu $891\mu H$ supaya dapat bekerja pada semua rentang nilai tegangan input yang ditentukan. Perhitungan nilai kapasitor menggunakan persamaan (2.4) sehingga dengan nilai *duty cycle* terbesar diperoleh nilai kapasitor sebesar $888\mu F$.

Perhitungan yang sudah dilakukan merupakan langkah untuk memperoleh nilai minimal induktor dan kapasitor. Pembuatan prototipe pengendali daya yang sebenarnya menggunakan nilai yang sedikit lebih besar menyesuaikan komponen yang ada di pasaran yaitu kapasitor bernilai 1 mF dan induktor 1 mH . Rangkuman data spesifikasi *boost converter* yang sudah dirancang disajikan pada Tabel 3.4.

2.5.3 Pemilihan Beban

Beban resistif telah digunakan pada pengujian prototipe untuk memperoleh data yang dibutuhkan dalam pembuatan kurva karakteristik panel surya [23]. Beban resistif terbukti memiliki fleksibilitas, modularitas, dan ketelitian yang cukup dengan harga yang terjangkau dalam pembentukan kurva karakteristik panel surya [24]. Resistor yang digunakan adalah resistor variabel dengan nilai maksimal

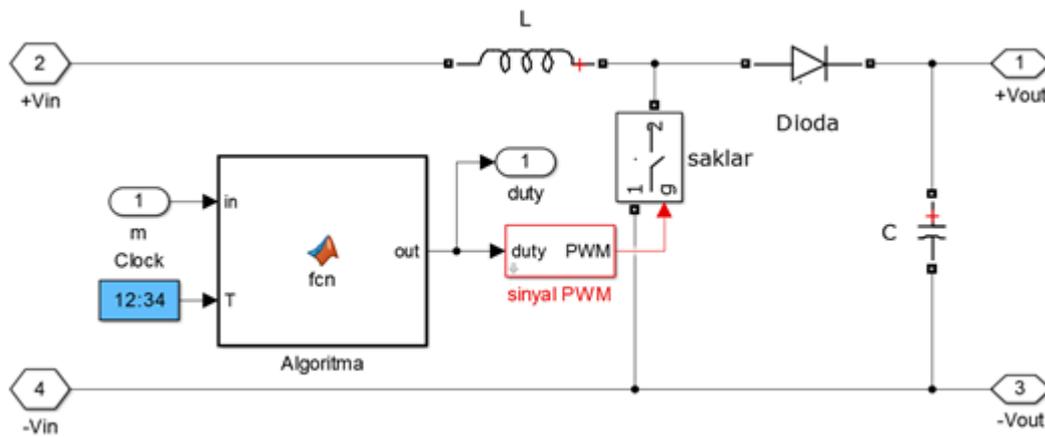
resistansi adalah 100 ohm dengan rating daya 100 watt. Nilai rating tersebut sudah disesuaikan dengan kemampuan panel surya sebesar 77,87 Watt.

Pengujian MPPT pada penelitian ini dilakukan pada keadaan normal dan beberapa kondisi berbayang. Pengujian secara simulasi dilakukan dengan beban resistif yang sudah disesuaikan dengan data teknis pompa air sehingga dapat menguji kemampuan pengendali daya. Nilai resistor adalah sebesar 8 Ohm karena tegangan kerja pompa air senilai 24 V dengan arus 3 A. Pompa air sebagai beban digunakan pada pengujian perangkat keras dan nilai variabel yang fokus diamati adalah hasil nilai debit air yang dihasilkan.

Pompa air yang digunakan adalah pompa air yang bekerja berdasarkan gaya sentrifugal. Air yang mengikuti putaran rotor akan bergerak menjauhi pusat gerak lingkaran dan akhirnya mampu terangkat akibat adanya gaya sentrifugal tersebut. Daya angkat pompa air ini sebesar 9,7 meter. Pompa air ini digunakan secara *submersible* atau sepenuhnya terendam di dalam air. Merk yang digunakan adalah *rule* dengan model iL500 dengan data teknis lengkap pada Lampiran L.2. Tegangan kerja pompa ini adalah 24 Volt dengan arus 3 Ampere. Debit maksimal yang bisa terukur adalah 500 gph atau 1920 lph.

3.2 Perancangan Perangkat Keras

Keseluruhan sistem dirangkai seperti pada diagram Gambar 3.2 dengan detail isi dari blok MPPT dijelaskan pada Gambar 3.9. Algoritma MPPT yang digunakan dijelaskan pada Bab 3.3. Perangkat keras yang digunakan sebagai pengendali daya adalah mikrokontroler arduino uno dan sudah diinstal algoritma MPPT. *Duty cycle* hasil perhitungan algoritma oleh arduino uno berupa sinyal PWM dengan nilai tegangan sekitar 5 Volt. Saklar elektrik yang digunakan oleh *boost converter* bekerja pada nilai tegangan yang lebih besar yaitu minimal bernilai 10 Volt. Dengan demikian, piranti saklar elektrik tambahan telah digunakan sehingga mampu menghasilkan sinyal PWM yang lebih tinggi dari sinyal PWM arduino uno. Saklar elektrik yang digunakan adalah *chip Photocoupler* TLP250. Hasil frekuensi *switching* sinyal PWM pengendali daya dari arduino uno dan TLP250 ditunjukkan Gambar 3.10.

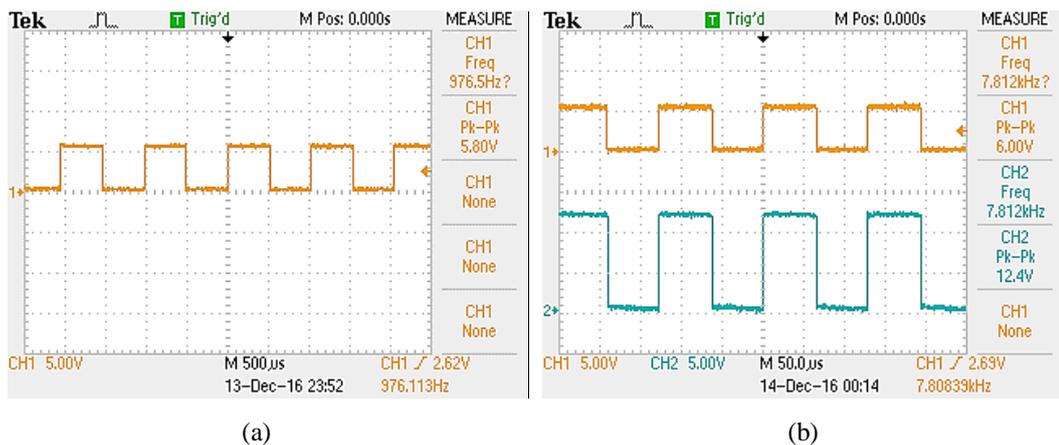


Gambar 3.9 Desain MPPT secara detail beserta sinyal PWM generator

3.2.1 Pengaturan Mikrokontroler sebagai Pengendali Daya

Mikrokontroler sangat berperan penting dalam mengaplikasikan algoritma MPPT dan pengambilan data. Mikrokontroler ini melakukan komunikasi data dengan laptop melalui serial port untuk membaca dan mencatat hasil sensor peralatan. Nilai yang diperoleh oleh sensor tersebut merupakan nilai input yang selanjutnya diolah menggunakan suatu algoritma dan menghasilkan nilai *duty cycle*. Melalui mikrokontroler, nilai *duty cycle* yang dihasilkan sudah berupa sinyal PWM. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino UNO R3.

Di Arduino UNO, pin 3, 5, 6, 9, 10, 11 dapat dikonfigurasi sebagai output PWM. Nilai PWM adalah 8-bit diaktifkan dengan memanggil fungsi `analogWrite`. Sebagai contoh adalah tulisan kode `“analogWrite (myPWMpin, 128);”` yang menunjukkan output *duty cycle* 50% pada pin `myPWMpin`. Gelombang kotak yang dihasilkan merupakan hasil perbandingan nilai analog yang kita tulis terhadap nilai dalam 8-bit counter. Ketika counter kurang dari nilai PWM, pin output akan bernilai HIGH begitu juga sebaliknya. Dalam contoh di atas, gelombang persegi bernilai HIGH adalah dari jumlah 0 sampai 127, dan LOW dari jumlah 128-255. Pada kondisi default, nilai frekuensi yang dihasilkan adalah 976,5 Hz. Penelitian ini hanya menggunakan 1 PWM sebagai sinyal pengendali daya dan telah ditentukan pin 5 sebagai PWM generator. Selanjutnya, perubahan nilai frekuensi menjadi sesuai perhitungan 7812 Hz telah dilakukan dengan pengaturan counter `TCCR0B`.



Gambar 3.10 Sinyal PWM output pada (a) frekuensi *default* arduino 976,5 Hz (b) frekuensi disesuaikan 7,812 kHz (arduino dan TLP250).

Gambar 3.10 menunjukkan sinyal output PWM pada pin 5 arduino senilai 50% dengan dan tanpa pengaturan prescaler. Pada kondisi default, nilai frekuensi yang dihasilkan adalah 976,5 Hz. Dengan mengubah nilai prescaler melalui tulisan kode “`TCCR0B = (TCCR0B & 0b11111000) | 0b00000010;`” maka frekuensi menjadi 7,812 kHz. Perubahan nilai frekuensi juga akan mempengaruhi fungsi waktu yang ada seperti fungsi `delay()`. Pada kondisi default, “`delay(1000)`” menunjukkan penundaan waktu 1000 milidetik atau *delay* selama satu detik. Pada kondisi setting diatas, penulisan `delay` satu detik akan menjadi “`delay(8000)`”.

3.2.2 Pemilihan Alat Pengukuran Prototipe

Sensor yang diimplementasikan dalam penelitian ini ada empat yaitu sensor arus, sensor tegangan, sensor suhu dan sensor debit air. Sensor arus dan tegangan digunakan untuk memantau daya yang dikeluarkan oleh panel surya sekaligus sebagai input dari MPPT. *Chip* sensor yang digunakan adalah ACS712ELC-05B dan memiliki sensitivitas output senilai 66-185 mV/A dengan nilai arus maksimum sebesar 5A. Nilai arus *short circuit* I_{sc} dari panel surya senilai 4,72 Ampere adalah nilai arus maksimal yang dapat dihasilkan yaitu pada kondisi hubung singkat. Kemampuan sensor yang dapat membaca nilai arus maksimum 5 Ampere ini tidak melebihi nilai arus yang mungkin terjadi dan sudah tepat untuk digunakan.

Sensor tegangan yang digunakan menggunakan prinsip pembagi tegangan. Sensor ini dapat dibaca secara analog 5 kali lebih kecil dari tegangan yang terdeteksi. Dengan input analog tegangan arduino uno mencapai 5 Volt menunjukkan bahwa sensor mampu mendeteksi tegangan tidak lebih dari $5\text{Volt} \times 5 = 25\text{Volt}$. Kemampuan pembacaan analog arduino bernilai dari 0 sampai dengan 1023 menunjukkan resolusinya bernilai $5\text{ Volt} / 1023 = 0,00489$. Dengan demikian, tegangan minimum yang dapat terdeteksi adalah $0,00489 \times 5 = 0,002445\text{ Volt}$. Nilai maksimal dari panel surya yang dipilih adalah setara dengan nilai V_{oc} yaitu sekitar 21 Volt sehingga pemilihan sensor tegangan ini sudah tepat.

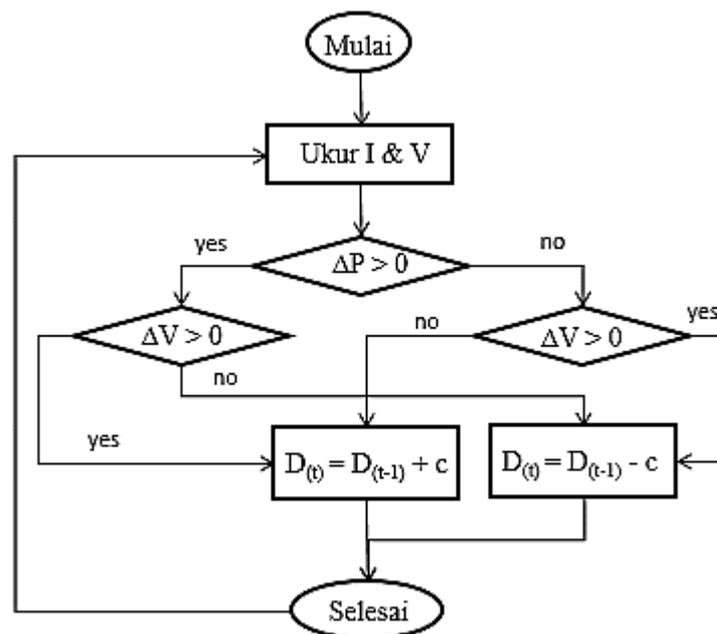
Sensor suhu yang digunakan adalah LM35 dengan kemampuan sensitivitas sebesar $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$. Secara umum, sensor ini dapat membaca suhu pada rentang $2\text{ }^\circ\text{C}$ sampai dengan $150\text{ }^\circ\text{C}$. Sensor ini sebenarnya dapat membaca nilai suhu sampai dengan $-55\text{ }^\circ\text{C}$ dengan mengubah rangkaian penggunaan secara *full range*. Hal tersebut tidak dilakukan karena suhu di tempat pengambilan data tidak mencapai nilai negatif. Sensor debit air yang digunakan pada penelitian ini memiliki kemampuan maksimum yang dapat dibaca adalah senilai $60\text{ liter per menit}$ (lpm) atau $3.600\text{ liter per hour}$ (lph). Nilai tersebut sudah sesuai dengan kemampuan pompa air yang memiliki debit air maksimum senilai 1920 lph atau $500\text{ galon per hour}$ (gph).

3.3 Desain Algoritma sebagai MPPT

Algoritma P&O adalah teknik MPPT yang sudah sangat umum digunakan dengan prinsip kerja telah diuraikan pada Dasar Teori. Algoritma P&O digunakan sebagai pembanding dari dua algoritma yang diusulkan yaitu algoritma RP&O dan FSKH. Algoritma RP&O adalah desain modifikasi algoritma P&O dengan tujuan mendapatkan kecepatan konvergensi yang lebih baik dan mampu menghadapi PSC. Algoritma FSKH didesain dengan tujuan mampu menghadapi seluruh kondisi parsial shading. Ketiga algoritma yang diuji juga telah didesain untuk dapat menghasilkan daya optimal pada kondisi normal.

3.3.1 Algoritma *Perturb and Observed* (P&O)

Gambar 3.11 menunjukkan diagram alur algoritma P&O yang umum digunakan dengan prinsip kerjanya sudah dijelaskan pada Dasar Teori. Diagram alur tersebut menjelaskan bahwa ketika nilai kemiringan kurva perubahan daya terhadap perubahan tegangan $m = \Delta P/\Delta V$ bernilai positif maka dilakukan penambahan nilai *duty cycle* begitu pula sebaliknya. Nilai m yang menunjukkan kemiringan kurva bernilai positif diperoleh ketika nilai ΔP positif dan ΔV positif atau ketika nilai ΔP negatif dan ΔV negatif. Nilai m bernilai negatif diperoleh ketika nilai ΔP positif dan ΔV negatif atau ketika nilai ΔP negatif dan ΔV positif. Implementasi P&O dan RP&O menggunakan nilai *duty cycle* awal sebesar 80%.

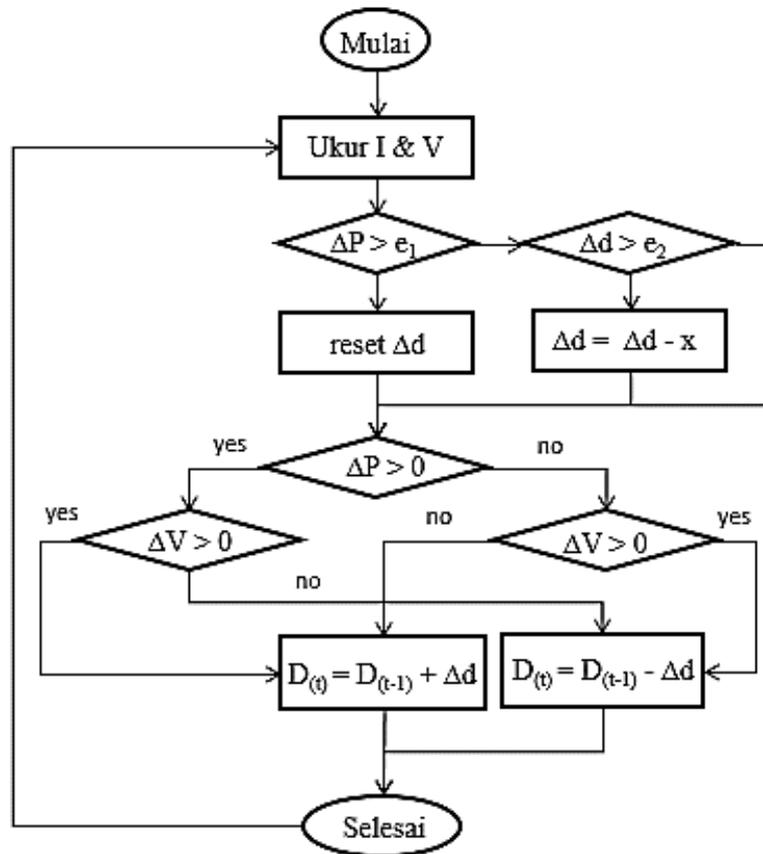


Gambar 3.11 Diagram alur algoritma P&O sebagai MPPT

3.3.2 Algoritma *Recurrence Perturb and Observed* (RP&O)

Implementasi algoritma P&O membutuhkan penentuan nilai konstanta c yang tepat untuk menaikkan atau menurunkan *duty cycle*. Semakin kecil nilai konstanta c maka osilasi pada keadaan *steady* akan semakin kecil. Semakin besar nilai c maka akan semakin cepat konvergen. Dengan kondisi tersebut, penulis mengusulkan algoritma *Recurrence* P&O (RP&O) yang dapat cepat konvergen dengan nilai osilasi yang kecil pada kondisi *steady*. Cara yang dilakukan adalah

dengan nilai konstanta c yang besar saat awal iterasi dan semakin lama semakin mengecil sampai dengan nilai yang diinginkan. Nilai c ini akan diubah kembali menjadi besar ketika ada perubahan daya yang signifikan.



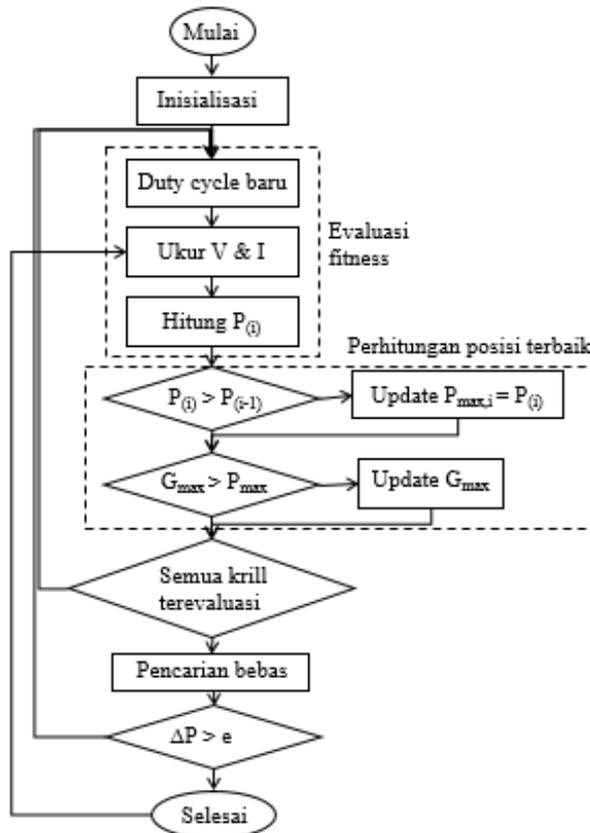
Gambar 3.12 Diagram alur algoritma RP&O sebagai MPPT

Diagram alur algoritma RP&O ditunjukkan Gambar 3.12. Penerapannya perlu menentukan beberapa parameter yaitu Δd_0 , x , e_1 dan e_2 . Nilai Δd_0 adalah nilai awal Δd dan bernilai besar. Selama proses iterasi, nilai Δd akan semakin mengecil dengan pengurangan sebesar nilai konstanta x dan menuju nilai konstanta terkecil sebesar e_2 pada kondisi *steady*. Nilai konstanta e_1 menunjukkan nilai perubahan daya yang signifikan digunakan untuk mengubah nilai Δd kembali seperti semula menjadi Δd_0 dan berulang mengalami penurunan sebesar nilai x sampai mencapai nilai konstanta e_2 . Pada penelitian ini, nilai c dan e_2 bernilai 1,5%, nilai e_1 sebesar 5 Watt, Δd_0 bernilai 12% dan x sebesar 1,83%.

3.3.3 Algoritma *Free Search Krill Herd* (FSKH)

Gambar 3.13 menjelaskan diagram alur algoritma FSKH sebagai MPPT. Langkah inisialisasi dimulahi dengan penentuan parameter FSKH ($N^{\max} = 0,01$; $f^{\max} = 0,02$; $D^{\max} = 0,05$; $krill = 3$). Selain itu, langkah inisialisasi juga mengatur nilai awal *duty cycle* (0,2;0,5;0,8). Nilai *duty cycle* tersebut merupakan representasi posisi awal individu *krill*. Setelah masing-masing individu *krill* memiliki nilai awal, selanjutnya dilakukan evaluasi fungsi fitness yaitu perhitungan nilai daya $P=V \cdot I$. Daya yang terukur pada masing-masing *krill* (P_{\max}) telah dibandingkan untuk mendapatkan solusi global (G_{\max}) yang tidak lain juga merupakan nilai daya.

Ketika semua *krill* sudah terevaluasi maka akan dilakukan pencarian bebas untuk menuju nilai konvergen. Pencarian bebas dilakukan dengan memberikan nilai random *duty cycle* yang jaraknya dekat dengan nilai daya optimum. Perhitungan perubahan daya [$\Delta P = P_{(i)} - P_{(i-1)}$] yang cukup besar melebihi nilai $e = 10W$ akan mengakibatkan perhitungan *duty cycle* yang baru sesuai dengan rumus perpindahan *krill* dijelaskan pada persamaan (2.9) atau lebih detail pada [18].



Gambar 3.13 Diagram alur algoritma FSKH sebagai MPPT

3.4 Metode Pengujian Secara Simulasi

Pengujian secara umum dilakukan pada dua fokus yaitu pembangunan kurva karakteristik panel surya dan pengujian MPPT pada beberapa kondisi berbayang. Pembangunan kurva karakteristik panel surya pada simulasi membahas mengenai pengaruh radiasi, suhu dan parameter A dari model panel surya satu dioda ideal pada kondisi normal dan beberapa kondisi berbayang.

3.4.1 Pembangunan Kurva Karakteristik Panel Surya

Simulasi yang dilakukan untuk membangun kurva karakteristik panel surya dilakukan dengan mengamati perubahan nilai radiasi, temperatur dan parameter A pada pemodelan panel surya. Variasi nilai radiasi cahaya matahari yang digunakan adalah 1 kW/m^2 , $0,8 \text{ kW/m}^2$ dan $0,6 \text{ kW/m}^2$. Variasi nilai temperatur yang digunakan adalah $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $75 \text{ }^\circ\text{C}$. Nilai parameter A dihitung melalui proses iterasi dan kurva karakteristik yang digambar menggunakan tiga nilai A yang berbeda yaitu nilai A terbaik, yang sedikit lebih tinggi dan sedikit lebih rendah. Selain itu, penelitian ini juga membahas simulasi mengenai pengaruh dioda *bypass* pada sistem panel surya dan kurva karakteristik pada PSC.

3.4.2 Metode Pengujian MPPT pada Beberapa Kondisi

Simulasi dilakukan pada beberapa kondisi yang berbeda-beda untuk mengetahui performa algoritma P&O, RP&O dan FSKH. Pada kondisi kondisi normal, kedua blok panel surya mendapatkan radiasi matahari yang sama yaitu pada kondisi STC. Selanjutnya pengujian dilakukan pada empat kondisi berbayang yang berbeda. Pengujian PSC III dan PSC IV dilakukan secara simultan untuk mengetahui performa algoritma MPPT pada keadaan dinamis. Seluruh kondisi pengujian dilakukan pada nilai temperatur $25 \text{ }^\circ\text{C}$ dan nilai radiasi sebagai berikut:

1. Kondisi STC (1 kW/m^2 dan 1 kW/m^2)
2. PSC I ($0,86 \text{ kW/m}^2$ dan $0,62 \text{ kW/m}^2$)
3. PSC II ($0,92 \text{ kW/m}^2$ dan $0,78 \text{ kW/m}^2$)
4. PSC III ($0,7 \text{ kW/m}^2$ dan $0,8 \text{ kW/m}^2$)
5. PSC IV ($0,8 \text{ kW/m}^2$ dan $0,9 \text{ kW/m}^2$)

3.5 Metode Pengujian Perangkat Keras

Pengujian perangkat keras secara umum juga hampir sama dengan pengujian simulasi yaitu pembangunan kurva karakteristik dan pengujian MPPT pada beberapa kondisi. Pembangunan kurva karakteristik panel surya pada kondisi normal dilakukan dengan tiga pola berbeda dan pada kondisi berbayang (tertutup bayangan kardus) dilakukan pada empat pola berbeda. Pengujian pada pola yang berbeda digunakan untuk mengamati efek letak dan luas bayangan (besarnya radiasi) yang terjadi pada panel surya terhadap karakteristiknya.

3.5.1 Pembangunan Kurva Karakteristik Panel Surya

Pengujian perangkat keras untuk membangun kurva karakteristik panel surya pada kondisi normal dilakukan pada 3 kondisi radiasi yang berbeda disesuaikan kondisi sebenarnya. Beberapa pola pada Gambar 3.14-3.17 digunakan untuk pembangunan kurva karakteristik panel surya pada kondisi tertutup sebagian dengan nilai radiasi yang sama. Beberapa pola kondisi berbayang pada panel surya untuk pengamatan adalah sebagai berikut ini.

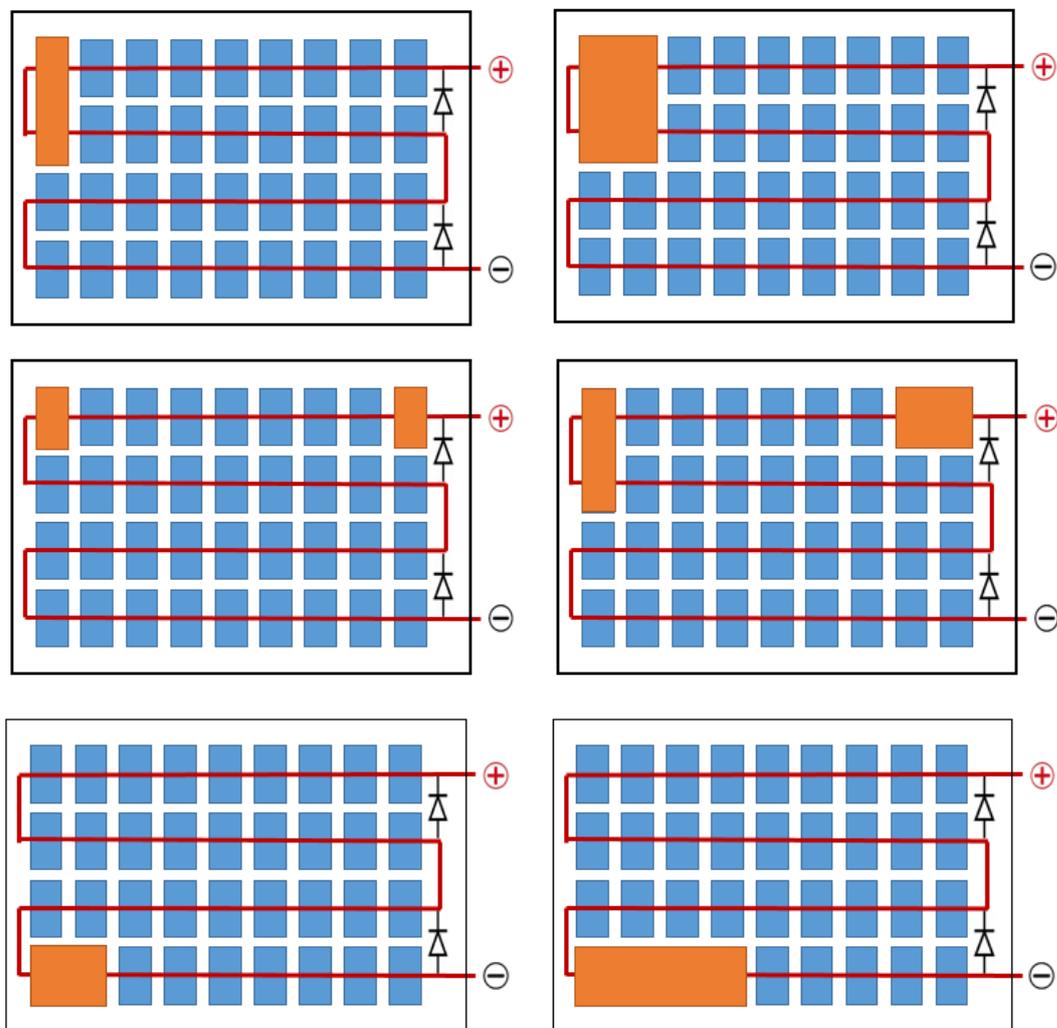
1. Tertutup 2 sel dan 4 sel (3 lokasi berbeda).
2. Tertutup 8 sel horisontal sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, 50% dan 60%.
3. Tertutup 4 sel horisontal sebesar 24%, 50%, 75% dan 100%.
4. Tertutup 8 sel horisontal sebesar 24%, 50%, 75% dan 100%.

3.5.2 Metode Pengujian MPPT pada Beberapa Kondisi

Pengujian perangkat keras untuk mengetahui performa MPPT yang diusulkan dilakukan pada empat kondisi yang berbeda. Kondisi pertama adalah kondisi normal sedangkan tiga kondisi yang lain adalah kondisi berbayang. Pola penutupan kondisi berbayang hampir mirip dengan yang ditunjukkan pada Gambar 3.14-3.17. Seluruh kondisi pengujian sebagai berikut ini:

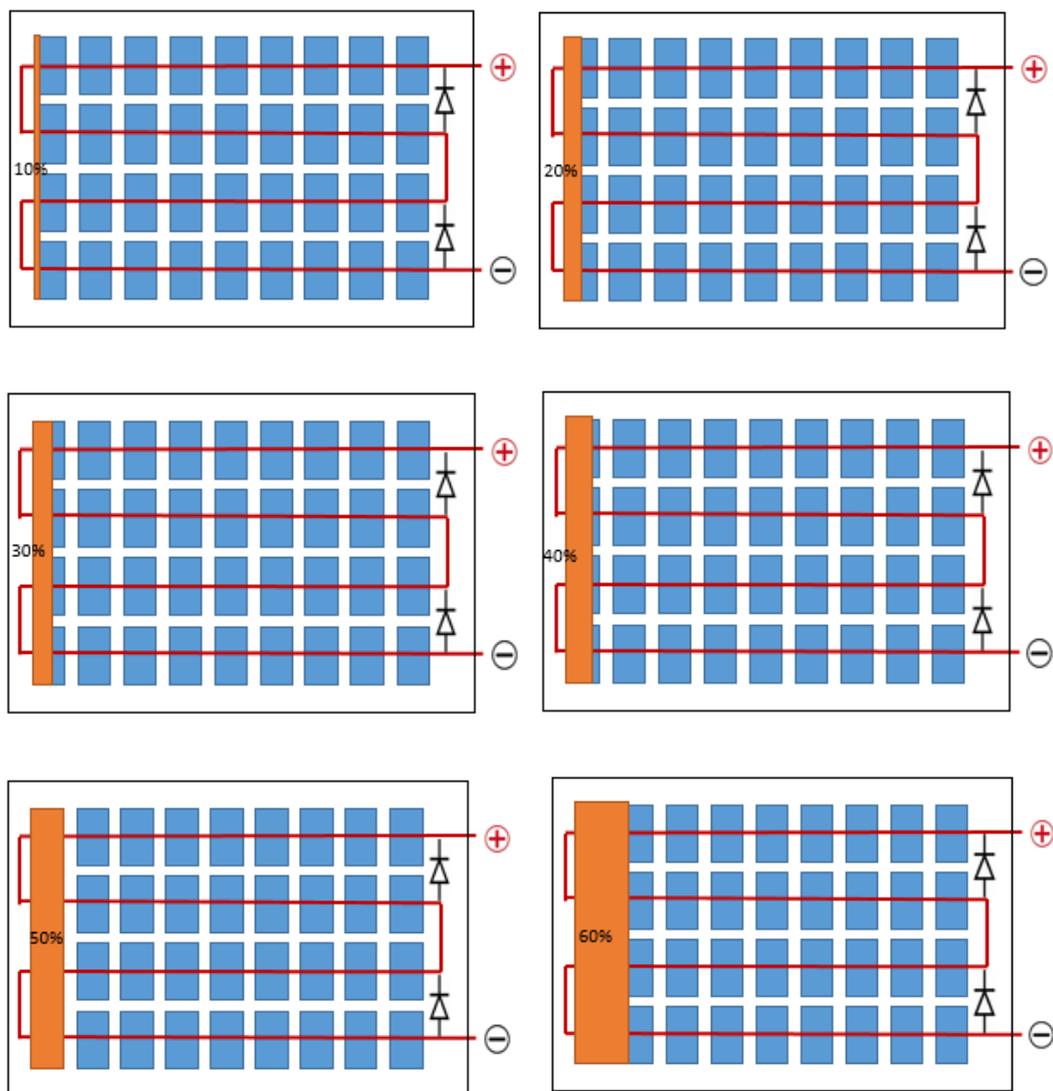
1. Kondisi normal
2. Panel surya tertutup 8 sel vertikal
3. Panel surya tertutup 4 sel horisontal
4. Panel surya tertutup 8 sel horisontal

Pengujian penutupan 2 sel dan 4 sel dilakukan pada berbagai lokasi bertujuan untuk mengetahui pengaruh lokasi dan besarnya radiasi (luas bayangan yang ditutup) terhadap kurva karakteristik yang dihasilkan panel surya. Lokasi penutupan yang dipilih adalah vertikal pada bagian dioda *bypass* atas, campuran vertikal dan horisontal, dan horisontal pada bagian dioda *bypass* bawah. Pengujian telah dilakukan pada saat nilai radiasi dan suhu tetap. Selain itu, material penutup yang digunakan juga selalu sama yaitu dengan kardus. Langkah teknis penutupan juga dikondisikan sama yaitu menempel dengan permukaan panel surya.

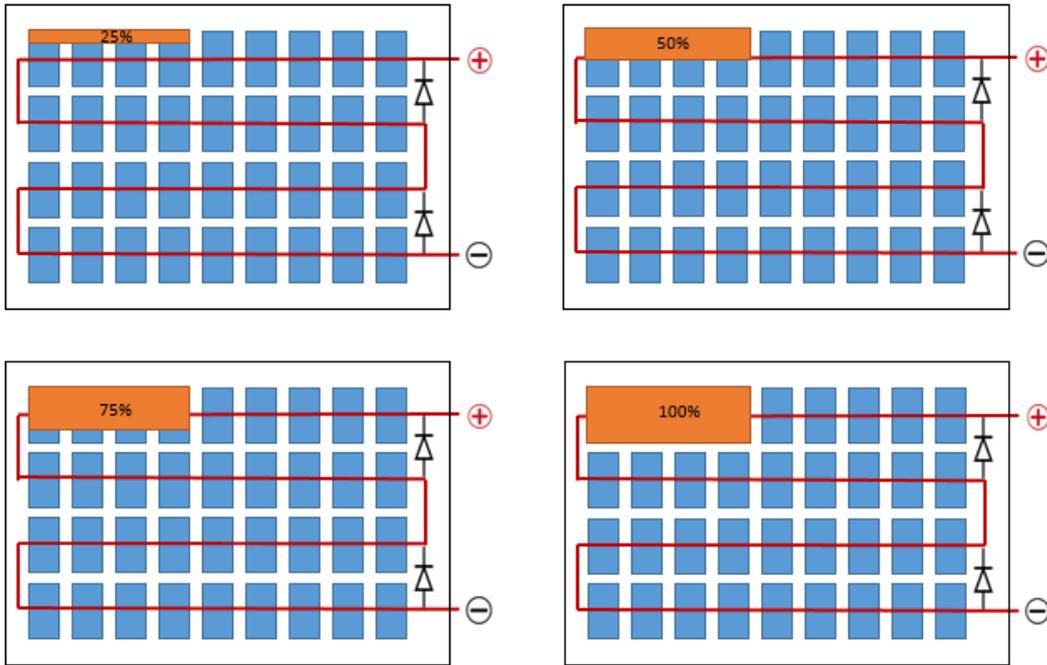


Gambar 3.14 Panel surya tertutup 2 sel dan 4 cell

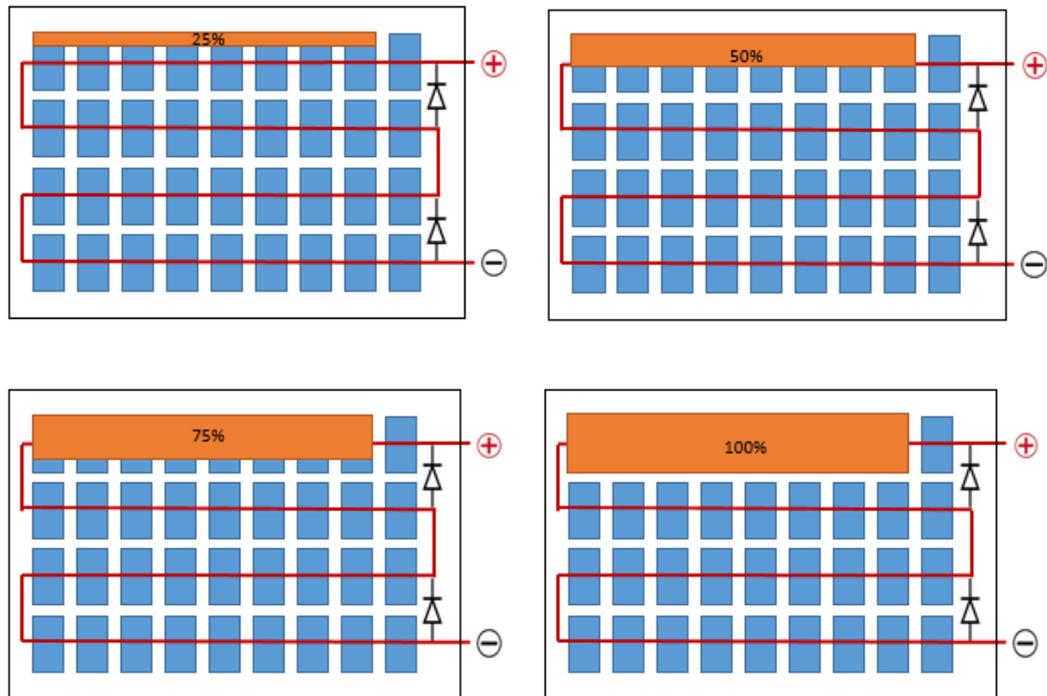
Pengujian penutupan 8 sel secara vertikal dilakukan untuk mengamati hasil kurva karakteristik yang dihasilkan panel surya ketika penutupan daerah bagian dioda *bypass* atas sama dengan daerah dioda *bypass* bawah. Pengujian telah dilakukan pada saat nilai radiasi dan suhu tetap. Selain itu, material penutup yang digunakan juga selalu sama yaitu dengan kardus. Langkah teknis penutupan juga dikondisikan sama yaitu menempel dengan permukaan panel surya. Penutupan yang dilakukan adalah dari ditutup 10 % sampai dengan 60 %.



Gambar 3.15 Panel surya tertutup 8 sel vertikal



Gambar 3.16 Panel surya tertutup 4 sel horisontal



Gambar 3.17 Panel surya tertutup 8 sel horisontal

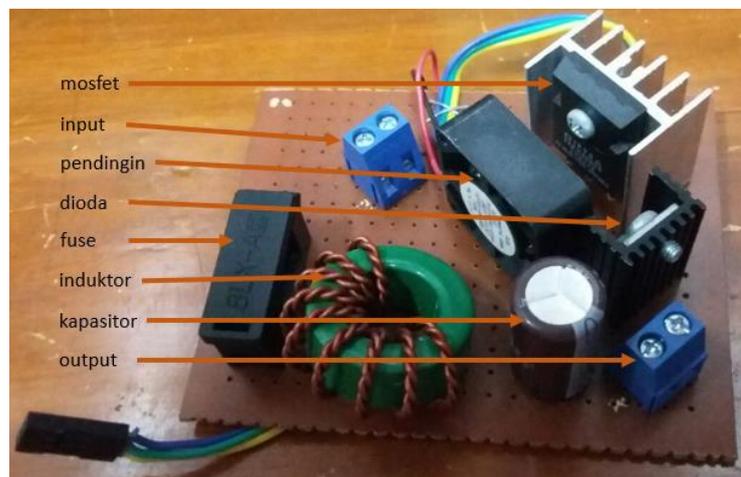
BAB 4

HASIL PENELITIAN

Bab ini membahas seluruh hasil penelitian yang telah dilakukan baik secara simulasi maupun pengujian perangkat keras. Topik pembahasan meliputi prototipe yang telah dibangun, kalibrasi alat pengukur nilai arus dan tegangan, pengaruh dioda *bypass* terhadap sistem panel surya, kurva karakteristik panel surya, dan pengujian MPPT baik secara simulasi maupun uji perangkat keras. Kurva karakteristik dan pengujian MPPT dilakukan pada kondisi normal dan beberapa kondisi berbayang atau *Partial Shading Condition* (PSC) yang sudah dijelaskan pada Bab sebelumnya. Pengujian pada parsial shading dilakukan pada beberapa pola yang berbeda untuk mengetahui efek lokasi dan luas bayangan yang menutupi panel surya.

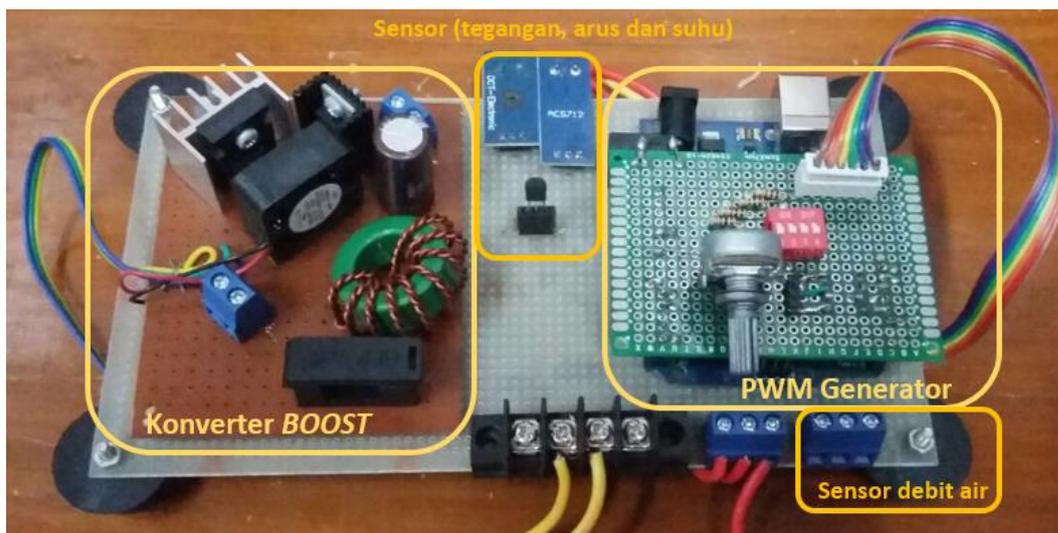
4.1 Hasil Pembangunan Prototipe

Prototipe Gambar 4.1 adalah konverter *boost* sebagai pengendali daya sebagai implementasi MPPT dan menghubungkan panel surya dengan pompa air atau resistor sebagai beban. Rangkaian konverter *boost* telah dibangun sesuai Gambar 3.8 dan parameter sesuai dengan Tabel 3.2. Perlengkapan lain yang ditambahkan adalah *fuse* sebagai pengaman arus berlebih dan kipas pendingin karena mosfet dioperasikan pada frekuensi yang cukup tinggi senilai 7812 Hz.



Gambar 4.1 Prototipe konverter boost sebagai pengendali daya

Konverter *boost* dilengkapi PWM generator ditunjukkan pada prototipe Gambar 4.2 yang sebelumnya telah dibahas pada Gambar 3.9. Arus dan tegangan terukur dari panel surya digunakan sebagai input MPPT diperankan oleh Arduino Uno. Output algoritma MPPT adalah berupa sinyal PWM dan selanjutnya dikirimkan kepada konverter *boost* sehingga daya yang dikirim dari panel surya ke beban menjadi optimal. Implementasi MPPT adalah menggunakan tiga algoritma yang diusulkan yaitu P&O, RP&O dan FSKH. Selain untuk implementasi MPPT, prototipe ini juga digunakan untuk pengambilan data sebagai bahan membangun kurva karakteristik panel surya pada beberapa pola kondisi yang ditentukan.



Gambar 4.2 Prototipe pengendali daya sistem pompa air tenaga matahari

Generator PWM juga diperankan arduino Uno yang tegangannya telah dinaikkan oleh TLP250 sehingga dapat mengaktifkan saklar dari konverter *boost*. Bentuk sinyal frekuensi switching sebagai *duty cycle* yang dihasilkan seperti pada Gambar 3.10 pada proses tracking akan menyesuaikan hasil perhitungan algoritma MPPT. Selanjutnya pengamatan perolehan air dilakukan oleh sensor debit air terpasang secara eksternal dan langsung dibaca oleh arduino secara realtime ditampilkan ke serial monitor. Seluruh data pengujian diambil dari serial monitor laptop yang terhubung arduino.

4.2 Kalibrasi Alat Ukur

Sebelum sensor sebagai alat ukur digunakan untuk pengujian, alat ukur tegangan dan arus terlebih dahulu dikalibrasi dengan membandingkan hasil

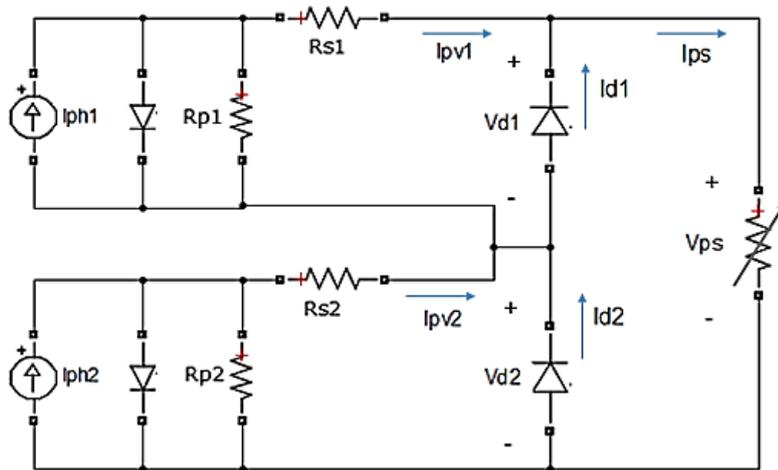
pengukuran sensor dengan alat ukur terstandar lainnya. Alat ukur pembanding yang telah digunakan adalah sumber tegangan DC skala laboratorium merk “Gw INSTEK GPS-2303”. Besar tegangan dan arus yang diuji sudah disesuaikan dengan tegangan kerja pada saat pengujian karakteristik panel surya dan pengujian algoritma MPPT pada prototipe.

Lampiran L.3 menunjukkan bahwa pengujian kalibrasi alat ukur arus telah dilakukan pada nilai maksimum sebesar 4,81 Ampere. Nilai tersebut sudah sesuai dengan kemampuan panel surya sebagai sumber energi yaitu memiliki nilai arus *short circuit* I_{sc} sebesar 4,72 A. Karena panel surya tersebut adalah satu-satunya sumber energi yang digunakan, pengujian MPPT pada prototipe juga memberikan hasil tidak melebihi nilai I_{sc} tersebut. Hasil kalibrasi alat ukur ini menunjukkan bahwa akurasi sudah memiliki performa yang baik yaitu bernilai diatas 99%. Akurasi yang akurat menunjukkan bahwa alat ukur arus ini layak digunakan.

Kalibrasi alat ukur tegangan menunjukkan bahwa pengujian telah dilakukan pada nilai maksimum sebesar 27,11 Volt. Nilai tersebut sudah sesuai dengan kemampuan panel surya sebagai sumber energi yaitu memiliki nilai tegangan *open circuit* V_{oc} sebesar 21 Volt dan nilai tegangan kerja pompa air 24 Volt. Hasil kalibrasi alat sudah menunjukkan performa yang baik karena nilai akurasi terendah yang terdeteksi adalah senilai 99,17%.

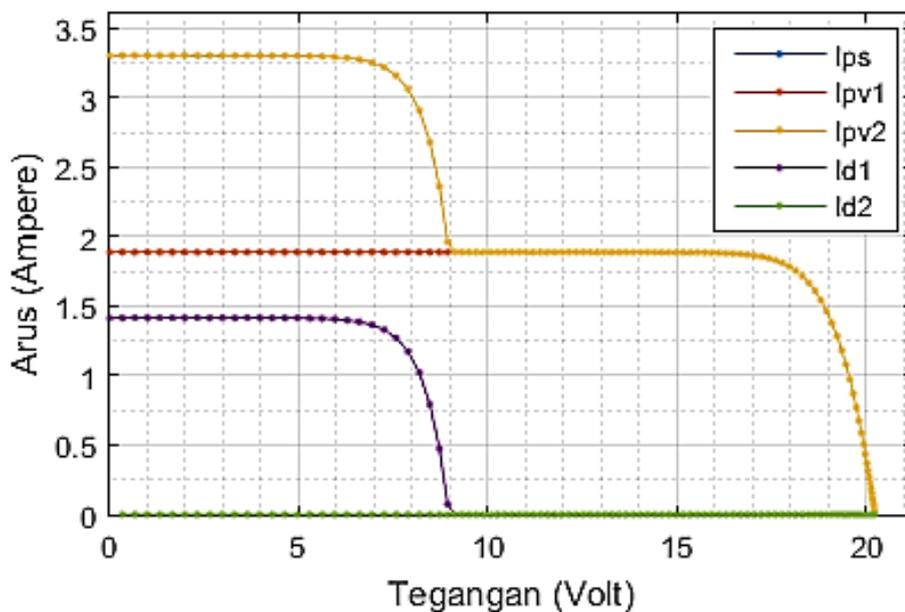
4.3 Hasil Pengujian Pengaruh Dioda Bypass Panel Surya

Model PV yang terhubung seri dilengkapi dengan dioda *bypass* ditunjukkan pada Gambar 4.3. Nilai arus yang mengalir dari sumber arus dan dioda model panel surya adalah menggunakan persamaan (3.3) dan (3.4) yaitu nilainya bergantung dari intensitas radiasi matahari dan suhu lingkungan. Untuk mengetahui pengaruh dioda *bypass*, penelitian ini telah melakukan simulasi pada model tersebut dengan memberikan nilai intensitas radiasi yang berbeda. Simulasi telah dilakukan dengan mengamati tegangan dan arus yang mengalir pada setiap cabang sehingga dapat diketahui dioda mana yang sedang aktif mengalirkan arus listrik. Pengaturan nilai resistansi beban dari nol atau kondisi *short circuit* sampai dengan resistansi maksimal atau kondisi *open circuit* akan digunakan untuk membentuk kurva Arus terhadap tegangan karakteristik panel surya.



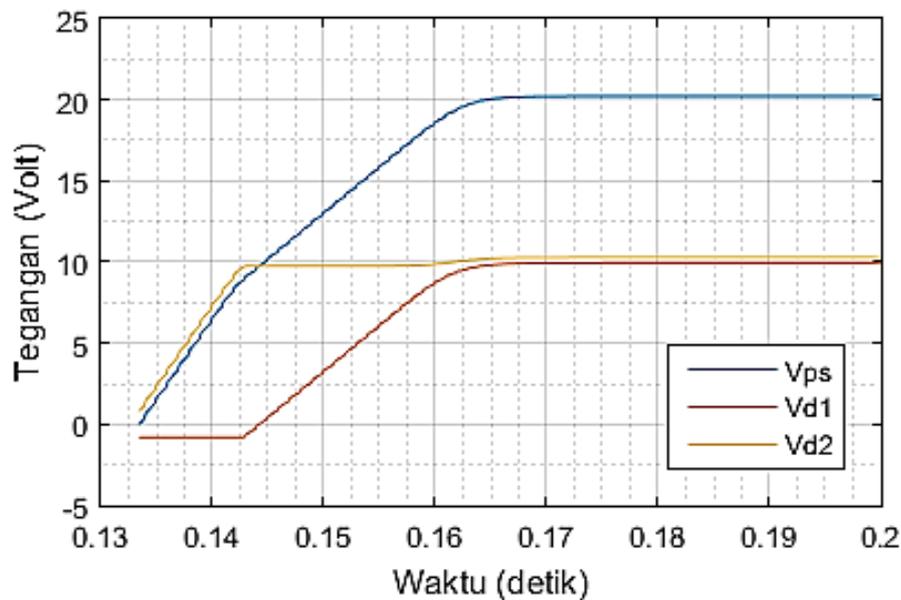
Gambar 4.3 Dua model PV satu dioda terhubung seri dilengkapi dioda *bypass*

Nilai intensitas radiasi yang digunakan pada simulasi adalah 400 W/m^2 pada bagian atas dan 700 W/m^2 pada bagian bawah dengan suhu yang sama yaitu $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Parameter yang diamati adalah nilai arus yang keluar dari masing-masing model panel surya yaitu I_{pv1} bagian atas, I_{pv2} bagian bawah, arus dioda bypas I_{d1} bagian atas dan I_{d2} bagian bawah, dan arus yang mengalir ke beban adalah I_{ps} . Selain mengamati nilai arus, pengujian juga menyajikan nilai tegangan masing-masing dioda V_{d1} bagian atas, V_{d2} bagian bawah dan tegangan beban V_{ps} sehingga dapat diperoleh informasi kapan dioda aktif mengalirkan arus listrik.



Gambar 4.4 Hasil simulasi nilai arus listrik pada masing-masing cabang

Hasil kurva nilai arus terhadap tegangan ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada kondisi *short circuit*, nilai arus bagian bawah I_{pv2} bernilai lebih tinggi karena intensitas cahaya lebih besar. Nilai arus I_{pv1} dijumlahkan dengan nilai arus I_{d1} telah mengalir ke beban senilai I_{ps} . Pada titik percabangan ditengah dioda *bypass* telah diketahui bahwa tidak ada arus mengalir pada dioda *bypass* bagian bawah I_{d2} sehingga nilai I_{pv2} terpecah mengalir kecabang dioda atas I_{d1} dan sebagian kembali ke sumber panel surya bagian atas. Hal tersebut menyebabkan arus yang mengalir ke beban I_{ps} adalah setara dengan nilai I_{pv2} atau nilai arus maksimal dari panel surya. Jika dioda *bypass* tidak dipasang maka, nilai arus yang mengalir ke beban adalah nilai terkecil dari panel surya yaitu bagian sel yang terkena bayangan.



Gambar 4.5 Hasil simulasi nilai tegangan pada masing-masing cabang.

Selanjutnya Gambar 4.5 menunjukkan nilai tegangan masing-masing cabang dioda menjelaskan bahwa tegangan dioda bagian atas V_{d1} sempat bernilai negatif yaitu pada sebelum nilai sekitar 9 Volt. Aliran arus listrik dan rangkaian Gambar 4.3 menunjukkan bahwa tegangan dioda negatif dapat menjadikan dioda aktif mengalirkan arus listrik karena arah dioda *bypass* menuju keatas, begitu juga ketika tegangan dioda bagian bawah selalu positif menjelaskan dioda tersebut tidak pernah aktif atau I_{d2} selalu bernilai nol. Sesuai dengan rangkain, tegangan pada beban V_{ps} adalah penjumlahan tegangan dioda bagian atas V_{d1} dan dioda bagian bawah V_{d2} .

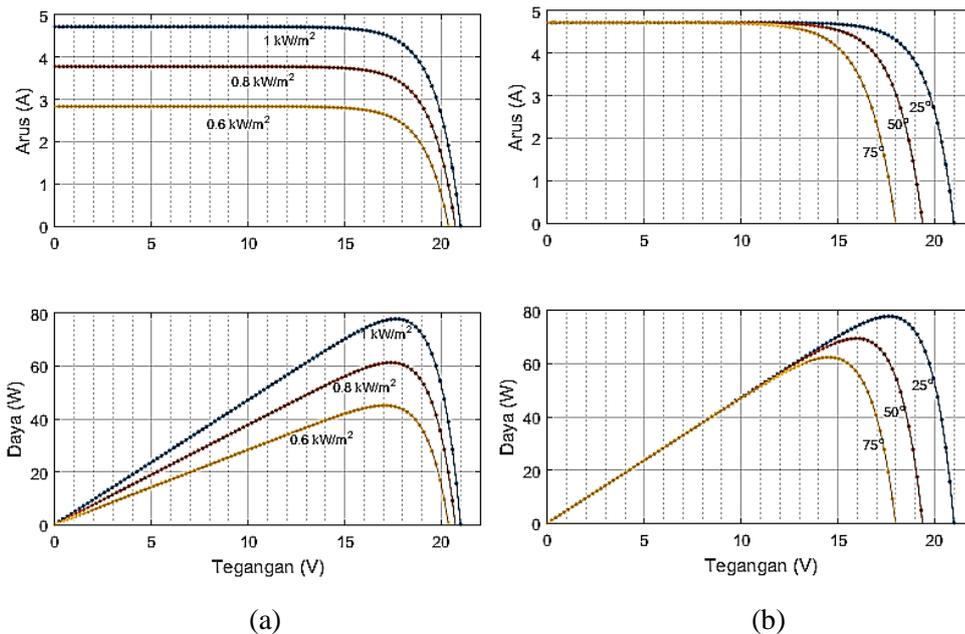
4.4 Hasil Pengujian Secara Simulasi

Pengujian secara simulasi meliputi pengujian konverter untuk mengamati nilai tegangan dan ripple arus yang dihasilkan, pengaruh dioda bypass pada sistem panel surya dengan pembahasan difokuskan pada kondisi berbayang atau tertutup sebagian, pembangunan kurva karakteristik panel surya pada kondisi normal dan pada kondisi berbayang. Pada kondisi normal, pengaruh besarnya nilai intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan dan parameter A terhadap kurva karakteristik sesuai model panel surya yang telah dibuat juga telah dibahas.

Selanjutnya, simulasi karakteristik panel surya pada kondisi berbayang akan dilakukan pada beberapa kondisi yang berbeda. Pola kondisi *partial shading* yang dipilih yaitu kondisi berbayang PSC I (0,86 kW/m² dan 0,62 kW/m²), PSC II (0,92 kW/m² dan 0,78 kW/m²), PSC III (0,7 kW/m² dan 0,8 kW/m²) dan PSC IV (0,8 kW/m² dan 0,9 kW/m²). Pengujian PSC III dan PSC IV dilakukan secara simultan untuk mengetahui performa algoritma MPPT pada keadaan dinamis. Algoritma MPPT yang sudah dibuat akan diujikan pada masing-masing kondisi tersebut selain pada kondisi normal. Kesimpulan performa seluruh algoritma pada kondisi normal dan beberapa kondisi berbayang akan diuraikan pada akhir sub bab ini.

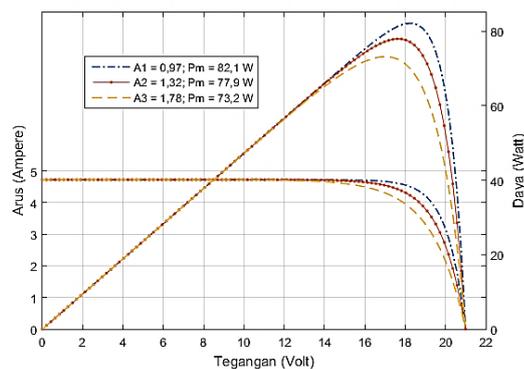
4.4.1 Kurva Karakteristik Panel Surya pada Kondisi Normal

Kurva karakteristik Panel Surya pada Gambar 4.6 menjelaskan bahwa daya yang dihasilkan panel surya bergantung pada kondisi radiasi dan suhu lingkungan. Gambar 4.6a menjelaskan nilai radiasi yang semakin besar akan menghasilkan nilai arus semakin besar sehingga daya juga semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan persamaan (3.3) bahwa arus I_{pv} sebanding dengan nilai radiasi G . Gambar 4.6b menjelaskan bahwa semakin panas suhu lingkungan justru menghasilkan daya yang semakin kecil. Hal tersebut disebabkan oleh performa kemampuan dioda yang semakin menurun ketika suhu lebih panas.



Gambar 4.6 Kurva karakteristik I-V dan P-V panel surya hasil simulasi terhadap perubahan (a) radiasi dan (b) suhu

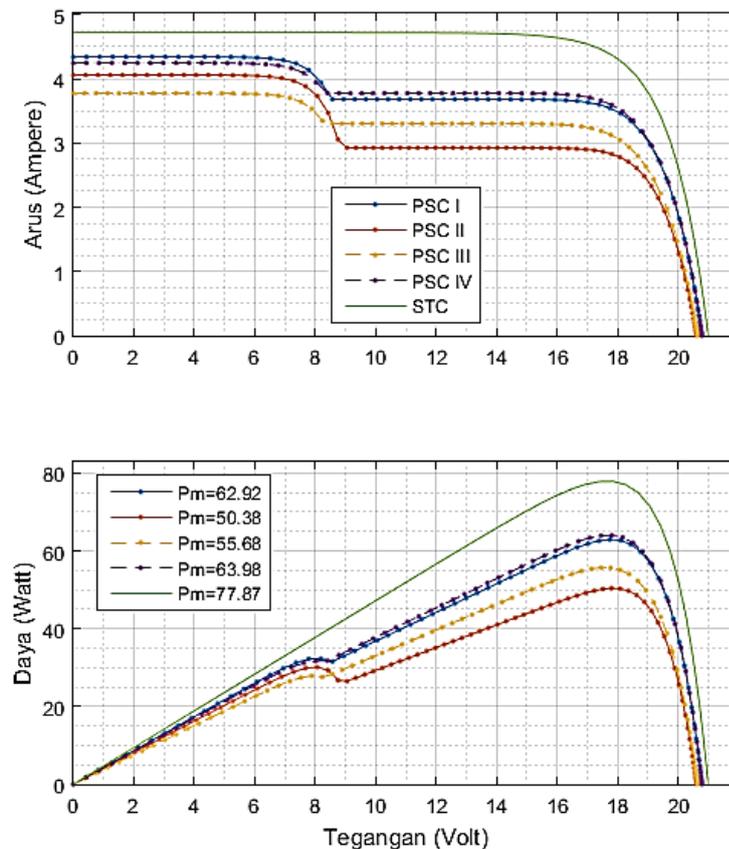
Panel surya yang diimplementasikan pada perangkat keras memiliki daya maksimum elektrik senilai 77,875 Watt peak. Pada pemodelan secara simulasi, daya maksimal tersebut dapat dicapai dengan memberikan nilai parameter A yang sesuai. Nilai parameter A yang diperoleh melalui iterasi adalah sebesar 1,32. Nilai parameter A ini perlu dihitung dengan tepat sesuai referensi model yang digunakan. Pengaruh nilai parameter A terhadap kurva karakteristik panel surya ditunjukkan oleh Gambar 4.7. Dari gambar tersebut tampak jelas bahwa perhitungan nilai parameter A yang tepat sangat diperlukan untuk mendapatkan kurva karakteristik yang sesuai dengan data teknis panel surya yang digunakan.



Gambar 4.7 Pengaruh nilai parameter A terhadap kurva karakteristik panel surya

4.4.2 Kurva Karakteristik Kondisi Berbayang

Pengujian secara simulasi pada kondisi berbayang dilakukan pada empat pola yang berbeda. Nilai daya optimal yang diperoleh pada masing-masing kondisi ditunjukkan pada kurva bagian dibawah. Nilai daya maksimum panel surya pada kondisi berbayang selalu lebih rendah daripada daya pada kondisi normal 77,87 W. Kurva karakteristik kondisi berbayang dan normal ditunjukkan pada Gambar 4.8.



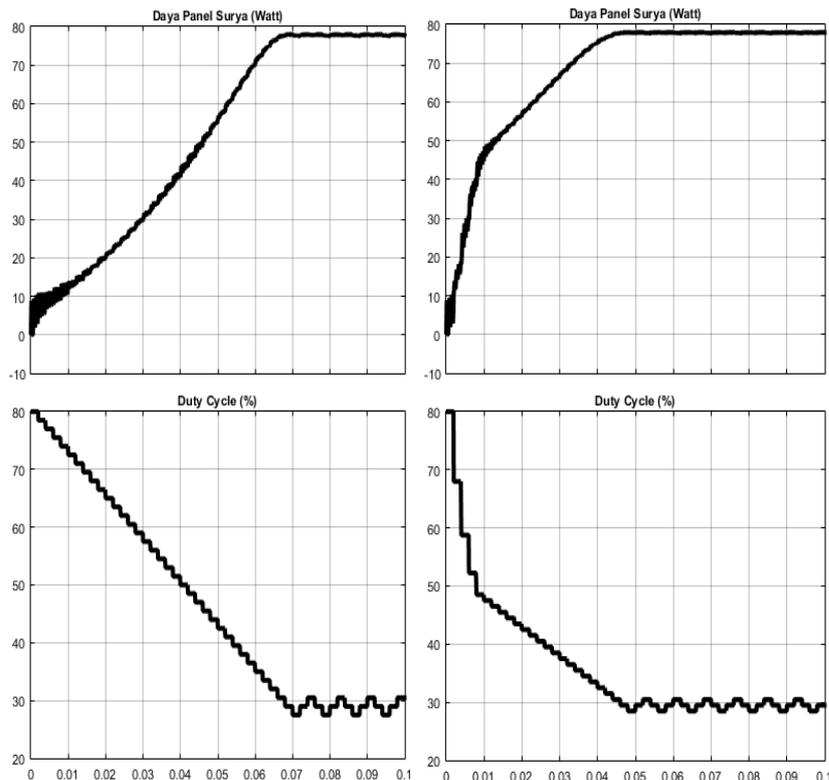
Gambar 4.8 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi berbagai pola tertutup sebagian (PSC) dibandingkan dengan kondisi normal

Seluruh kurva karakteristik kondisi berbayang membuktikan adanya 2 nilai puncak daya akibat ada 2 dioda *bypass* pada panel surya. Hasil kurva karakteristik akan sama ketika ditutup bagian dioda atas maupun bawah pada setiap pola. Puncak yang tertinggi adalah titik MPP yang sebenarnya dan sering disebut sebagai solusi global sedangkan puncak yang lain disebut solusi lokal. MPPT bertugas mencari nilai solusi global. Selanjutnya, hasil simulasi dari seluruh MPPT yang diusulkan pada semua kondisi yang sudah dipilih diuraikan pada sub bab selanjutnya.

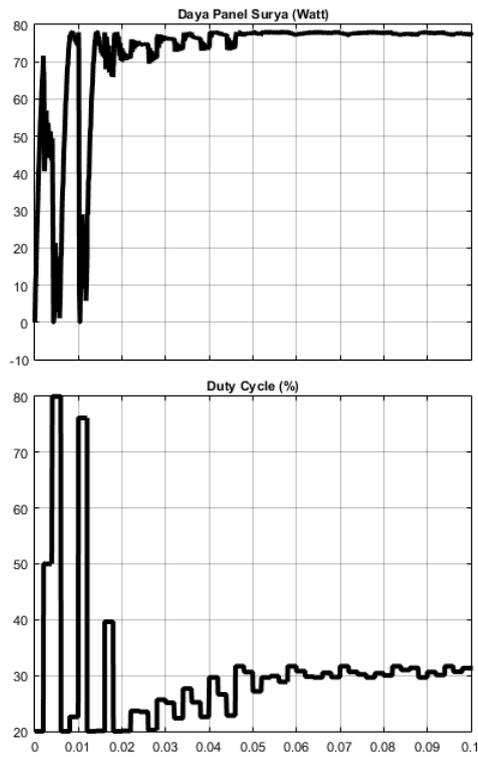
4.4.3 Pengujian MPPT pada Kondisi Normal

Kurva daya dan *duty cycle* terhadap tegangan pada kondisi normal untuk algoritma P&O ditunjukkan oleh Gambar 4.9. Gambar tersebut telah menjelaskan bahwa P&O mampu melakukan tracking secara bertahap dalam menemukan daya maksimum. Daya maksimum yang diperoleh adalah senilai 77,85 Watt dengan daya maksimum seharusnya adalah 77,87 Watt selama 0.068 detik. Dengan demikian P&O telah menunjukkan performa yang baik dengan akurasi 99,97%.

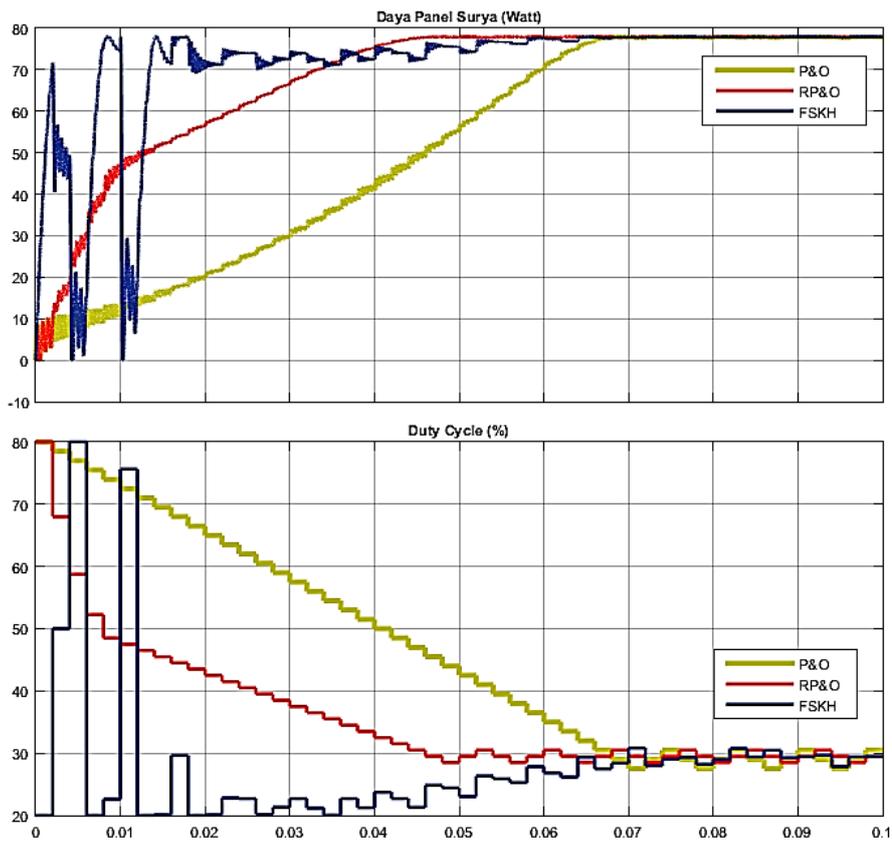
Kurva daya dan *duty cycle* pada kondisi normal untuk algoritma RP&O ditunjukkan oleh Gambar 4.9 dan algoritma FSKH ditunjukkan oleh Gambar 4.10. Gambar tersebut telah menjelaskan bahwa kedua algoritma tersebut juga mampu melakukan tracking secara bertahap dalam menemukan daya maksimum. Daya maksimum yang diperoleh RP&O adalah senilai 77,85 Watt selama 0,044 detik dan FSKH mendapatkan 77,85 Watt selama 0,064 detik. Dengan demikian, RP&O menunjukkan kecepatan konvergensi yang lebih baik dari P&O sesuai desain yang sudah ditentukan. Kecepatan konvergensi dari yang tercepat untuk ketiga algoritma pada kondisi normal adalah RP&O, FSKH dan P&O dirangkum pada Gambar 4.11.



Gambar 4.9 Kurva daya dan *duty cycle* algoritma P&O dan RP&O pada kondisi normal



Gambar 4.10 Kurva daya dan *duty cycle* algoritma FSKH pada kondisi normal

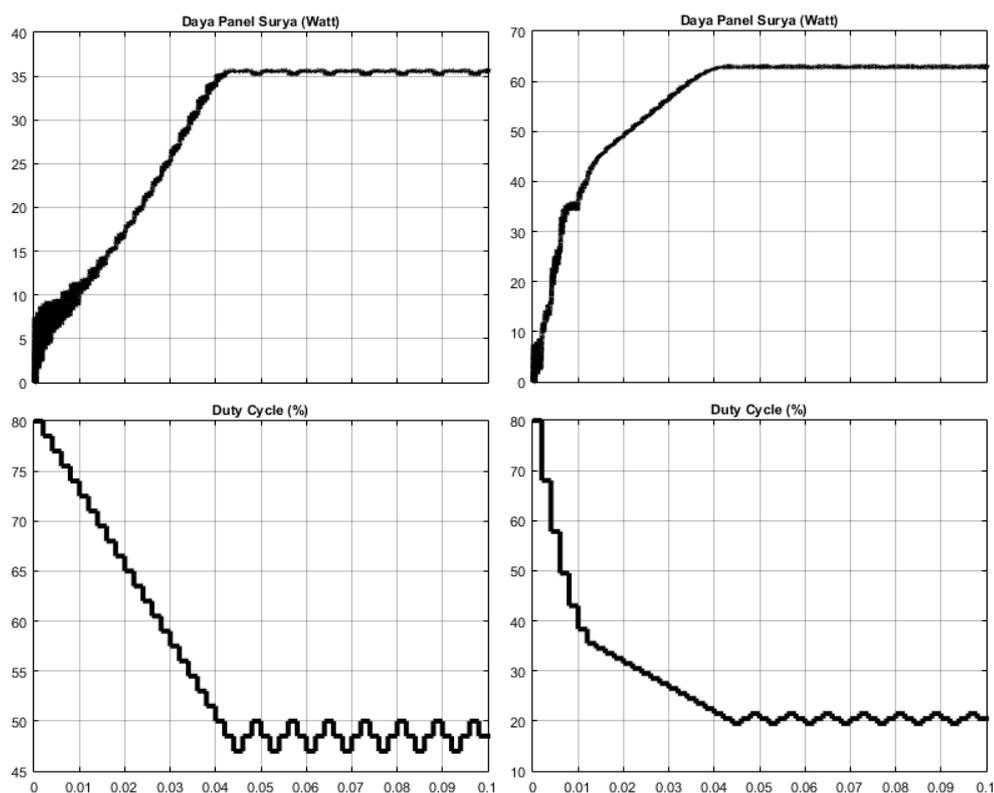


Gambar 4.11 Kurva daya dan *duty cycle* semua algoritma pada kondisi normal

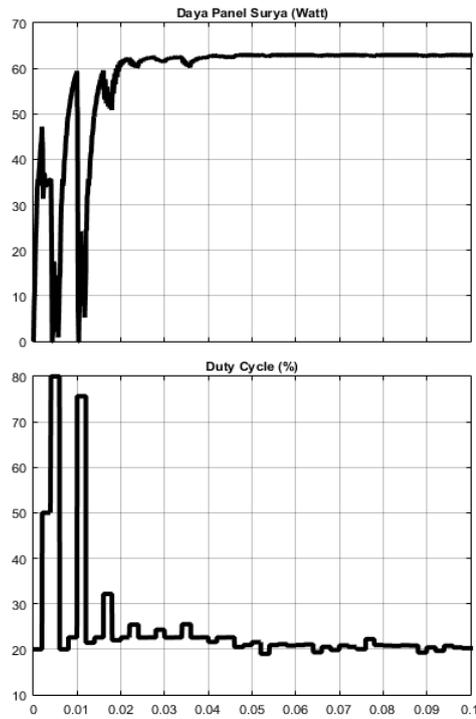
4.4.4 Pengujian MPPT pada PSC Pola I

Kurva daya dan *duty cycle* pada kondisi tertutup sebagian (PSC) pola I untuk algoritma P&O dan RP&O ditunjukkan oleh Gambar 4.12 dan algoritma FSKH ditunjukkan oleh Gambar 4.13. Gambar tersebut telah menjelaskan bahwa P&O terjebak pada solusi lokal senilai 35,5 Watt dengan akurasi senilai 56,64% dicapai dalam waktu 0,040 detik dan terlihat sesuai dengan solusi lokal pada kurva karakteristik panel surya Gambar 4.8.

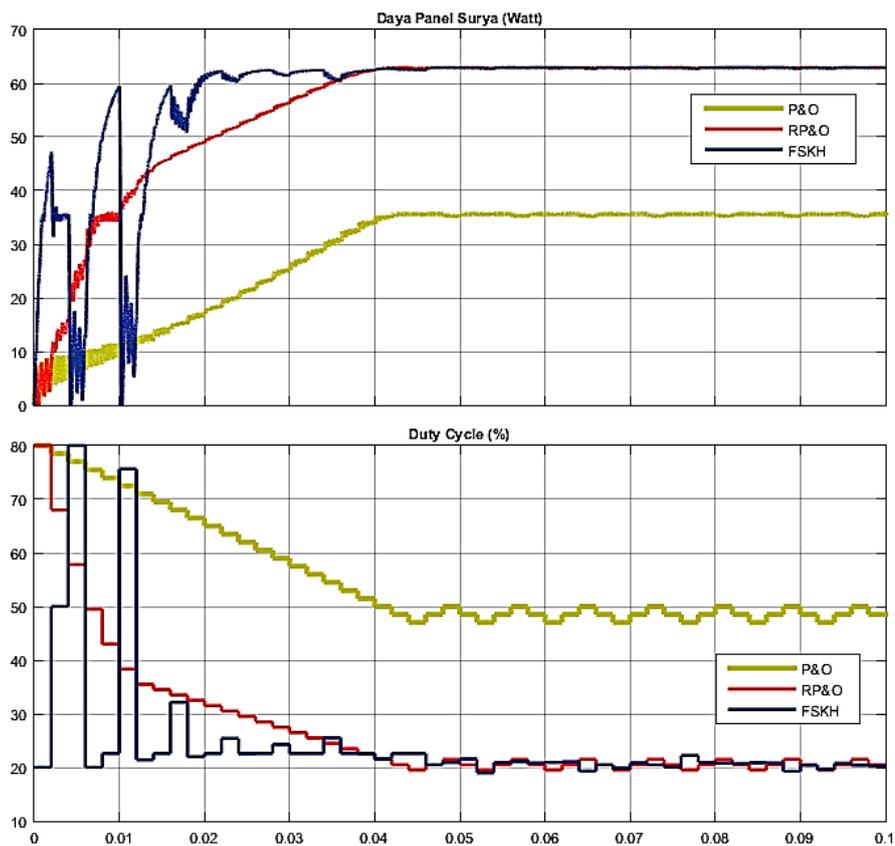
Pada kondisi ini, RP&O mendapatkan daya senilai 62,88 Watt selama 0,40 detik dan FSKH mendapatkan 62,64 Watt selama 0,046 detik. Dengan demikian RP&O dan FSKH telah mampu menemukan solusi global atau mencapai daya maksimum. Pada kondisi PSC pola I ini, hal tersebut membuktikan bahwa RP&O dan FSKH menunjukkan akurasi yang baik itu senilai 99,55% dan 99,94%. Kecepatan konvergensi terbaik diperoleh oleh P&O dan RP&O yang selanjutnya disusul oleh FSKH ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.12 Kurva daya dan *duty cycle* algoritma P&O dan RP&O pada kondisi PSC I



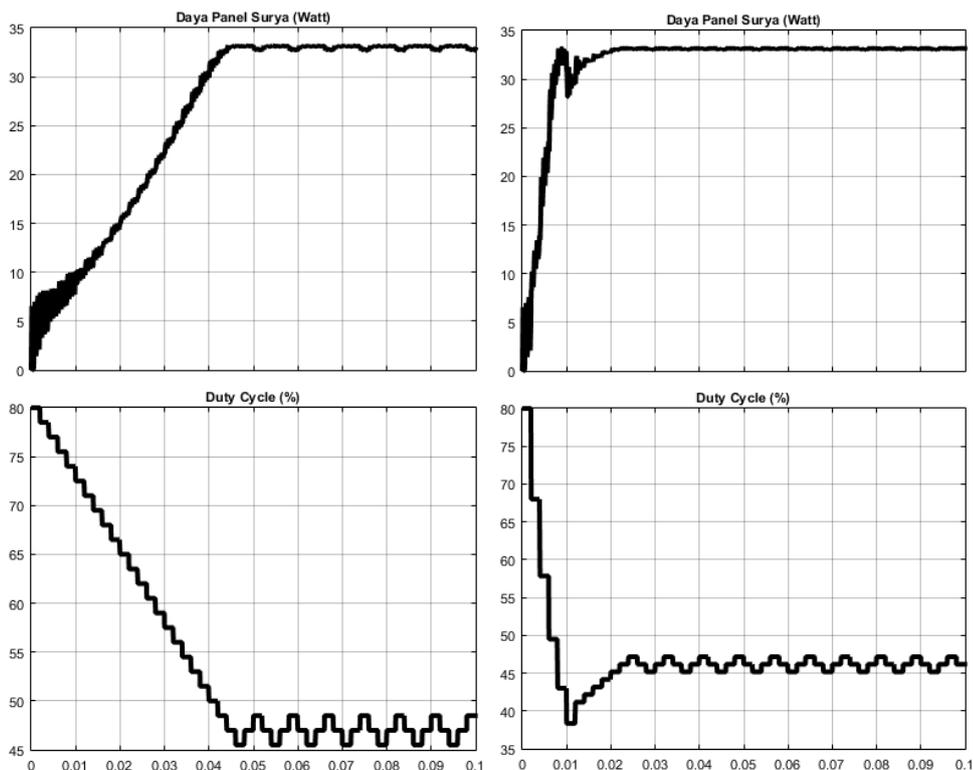
Gambar 4.13 Kurva daya dan *duty cycle* algoritma FSKH pada kondisi PSC I



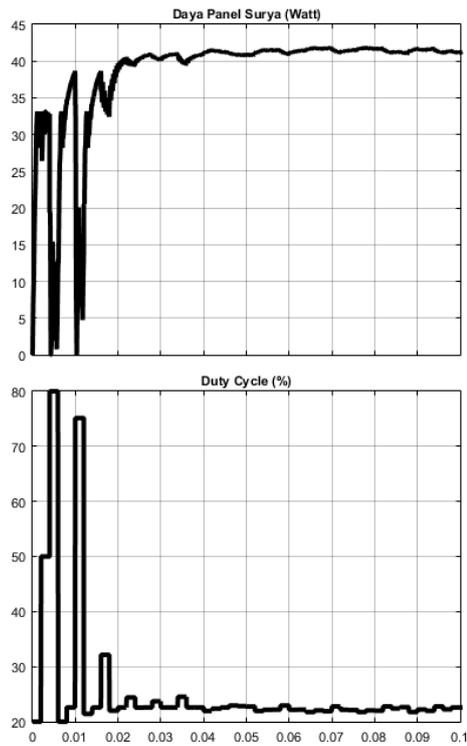
Gambar 4.14 Kurva daya dan *duty cycle* semua algoritma pada kondisi PSC I

4.4.5 Pengujian MPPT pada PSC Pola II

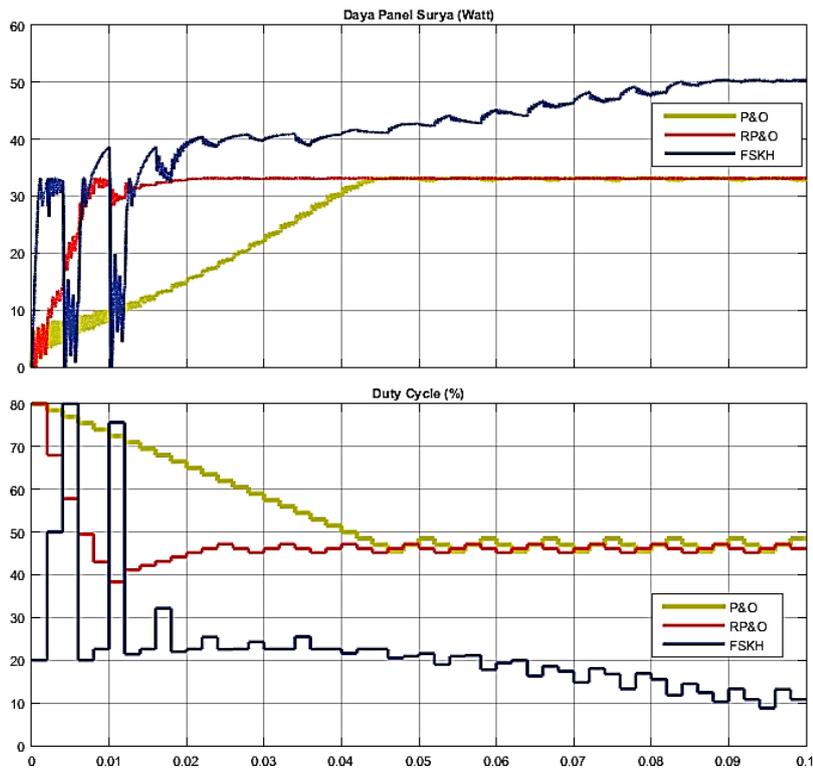
Kurva daya dan *duty cycle* pada kondisi tertutup sebagian (PSC) pola II untuk algoritma P&O dan RP&O ditunjukkan oleh Gambar 4.15 dan algoritma FSKH ditunjukkan oleh Gambar 4.16. Gambar tersebut telah menjelaskan bahwa kecepatan konvergensi dari yang tercepat untuk ketiga algoritma ini adalah RP&O, P&O dan FSKH. Pada kondisi ini, P&O dan RP&O terjebak pada solusi lokal sekitar senilai 33 Watt atau sekitar senilai 65% dan sudah sesuai dengan solusi lokal kurva karakteristik panel surya Gambar 4.8. Algoritma FSKH pada kondisi PSC pola II ini menunjukkan tetap mampu menemukan solusi global atau melacak daya maksimum senilai yaitu 99,74% pada nilai daya 50,25 Watt dan sudah sesuai dengan kurva karakteristik panel surya. FSKH pada kondisi ini memiliki kecepatan konvergensi paling lama tetapi tidak terjebak pada solusi lokal dan tetap mampu melacak daya maksimum. Rangkuman kinerja ketiga algoritma pada PSC II ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.15 Kurva daya dan *duty cycle* algoritma P&O dan RP&O pada kondisi PSC II



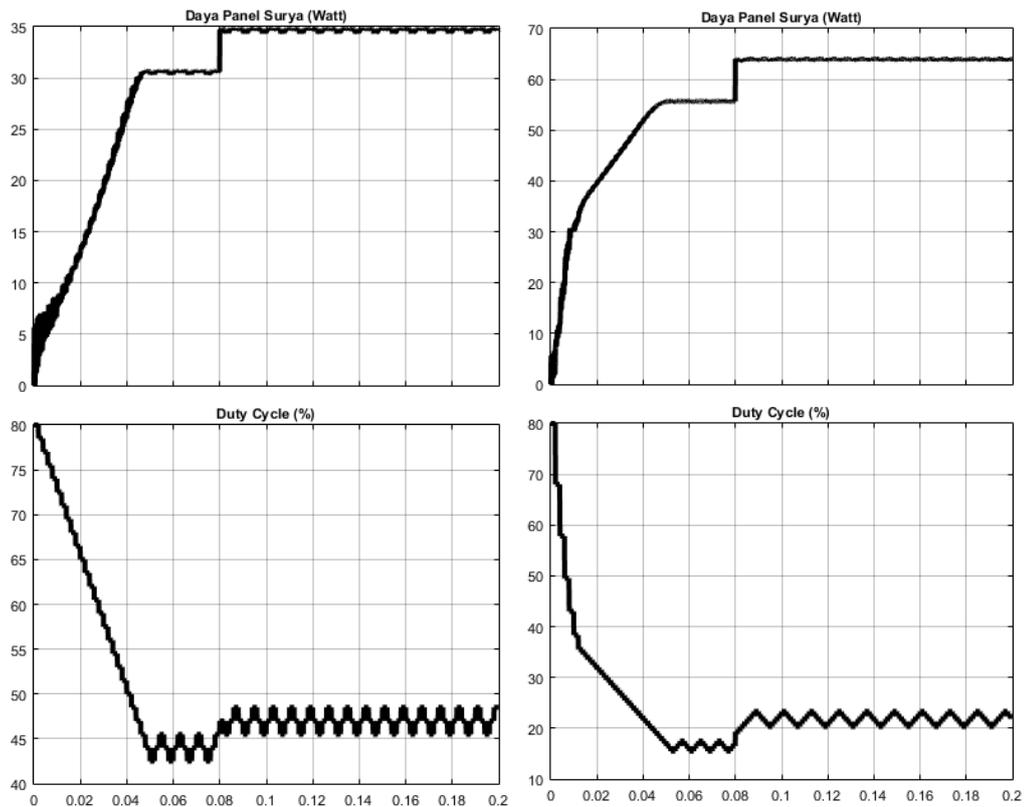
Gambar 4.16 Kurva daya dan *duty cycle* algoritma FSKH pada kondisi PSC II



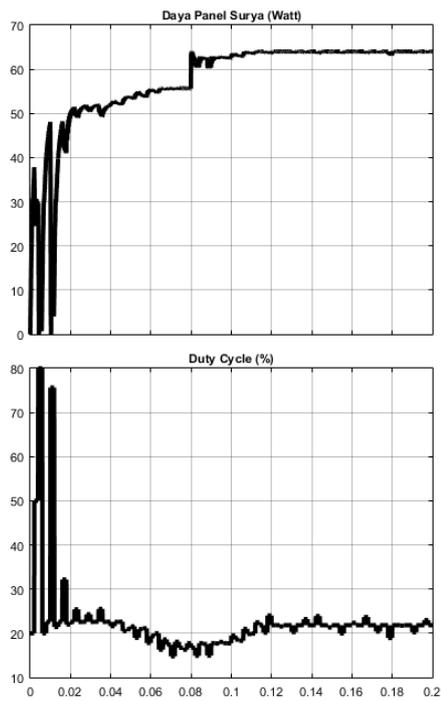
Gambar 4.17 Kurva daya dan *duty cycle* semua algoritma pada kondisi PSC II

4.4.6 Pengujian MPPT pada PSC Pola III dan Pola IV

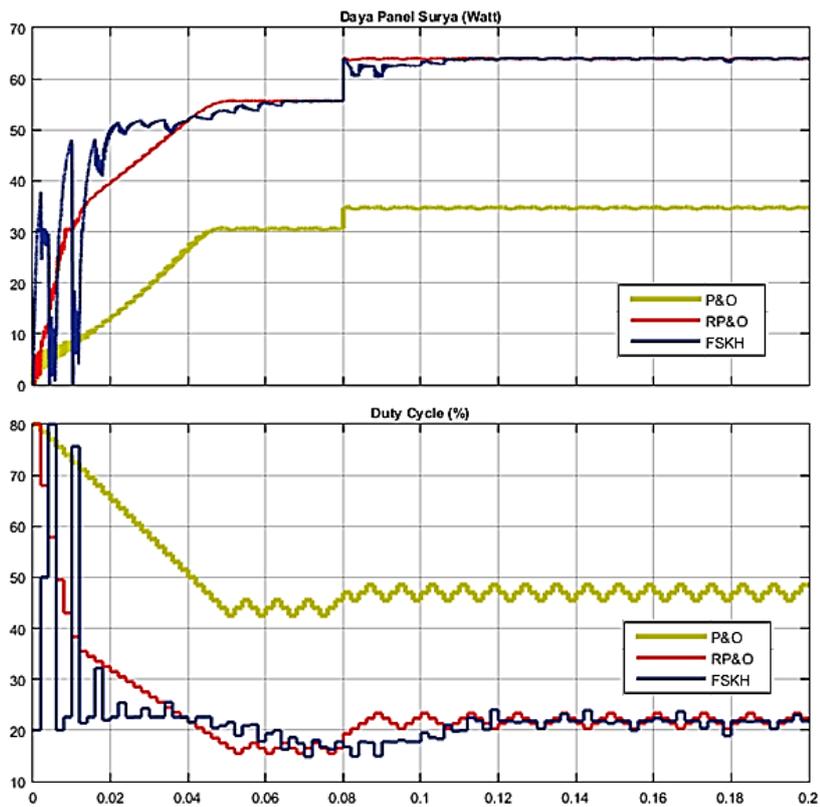
Simulasi keadaan PSC III dan PSC IV dilakukan secara simultan untuk mengetahui performa seluruh algoritma ketika menghadapi perubahan pola kondisi tertutup sebagian. Perubahan kondisi dari PSC III menuju PSC IV terjadi pada 0,08 detik. Hasil kurva daya dan *duty cycle* algoritma P&O dan RP&O ditunjukkan pada Gambar 4.18 sedangkan algoritma FSKH ditunjukkan pada Gambar 4.19. Pada pola PSC III dan IV, algoritma yang paling cepat menuju konvergen adalah P&O selanjutnya disusul oleh RP&O dan selanjutnya FSKH. Meskipun P&O lebih cepat menuju konvergen, algoritma ini terbukti selalu terjebak pada solusi lokal dan tidak dapat melacak daya optimum. Rangkuman hasil kinerja seluruh algoritma pada perubahan PSC III menuju PSC IV ditunjukkan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.18 Kurva daya dan *duty cycle* algoritma P&O dan RP&O pada kondisi PSC III dan IV



Gambar 4.19 Kurva daya dan *duty cycle* algoritma FSKH pada kondisi PSC III dan IV



Gambar 4.20 Kurva daya dan *duty cycle* semua algoritma pada PSC III dan PSC IV

4.4.7 Rangkuman Hasil Pengujian Secara Simulasi

Rangkuman hasil pengujian secara simulasi dari keseluruhan algoritma pada semua kondisi yang dipilih diuraikan pada Tabel 4.1. Dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa algoritma FSKH tidak pernah terjebak pada solusi lokal dan dapat menemukan solusi global atau mampu melacak daya maksimum dengan akurasi yang tinggi yaitu selalu diatas nilai 99%. Algoritma RP&O tidak terjebak pada kondisi berbayang pada PSC I tetapi terjebak pada kondisi berbayang pada PSC II. Algoritma P&O selalu terjebak pada semua kondisi berbayang.

Kecepatan konvergensi ketiga algoritma ini berbeda-beda pada setiap kondisi. Bila dibandingkan dengan P&O, algoritma RP&O menunjukkan lebih cepat konvergen pada kondisi normal dan sedikit lebih lama pada saat kondisi tertutup sebagian. Algoritma FSKH menunjukkan akurasi tracking yang paling baik pada semua kondisi meskipun memiliki waktu paling lama untuk menuju konvergen dibandingkan kedua yang lain.

Tabel 4.1 Hasil uji simulasi keseluruhan sistem pada seluruh kondisi

Panel Surya	Algoritma MPPT	Daya Optimum (Watt)	Daya Terdeteksi (Watt)	Kecepatan Tracking (detik)	Akurasi Tracking (%)
Kondisi Normal	P&O	77,87	77,85	0,068	99,97
	RP&O	77,87	77,85	0,044	99,97
	FSKH	77,87	77,85	0,064	99,97
PSC pola I	P&O	62,92	35,50	0,040	56,42
	RP&O	62,92	62,64	0,040	99,55
	FSKH	62,92	62,88	0,046	99,94
PSC pola II	P&O	50,38	32,90	0,046	65,30
	RP&O	50,38	33,10	0,022	65,70
	FSKH	50,38	50,25	0,086	99,74
PSC pola III	P&O	55,68	30,46	0,044	54,71
	RP&O	55,68	55,24	0,046	99,21
	FSKH	55,68	55,52	0,064	99,71
PSC pola IV	P&O	63,98	34,90	0,004	54,55
	RP&O	63,98	63,50	0,006	99,25
	FSKH	63,98	63,88	0,022	99,84

4.5 Hasil Pengujian Perangkat Keras

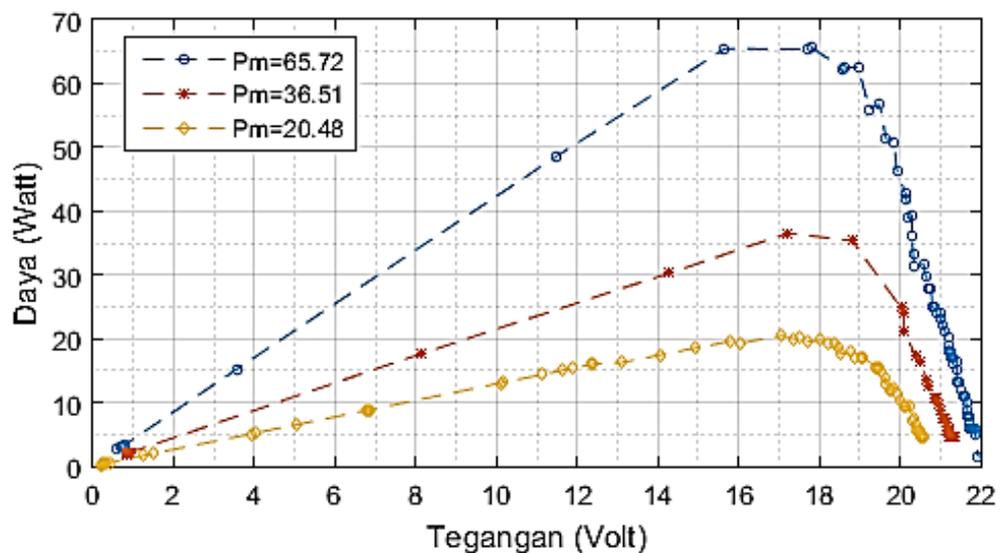
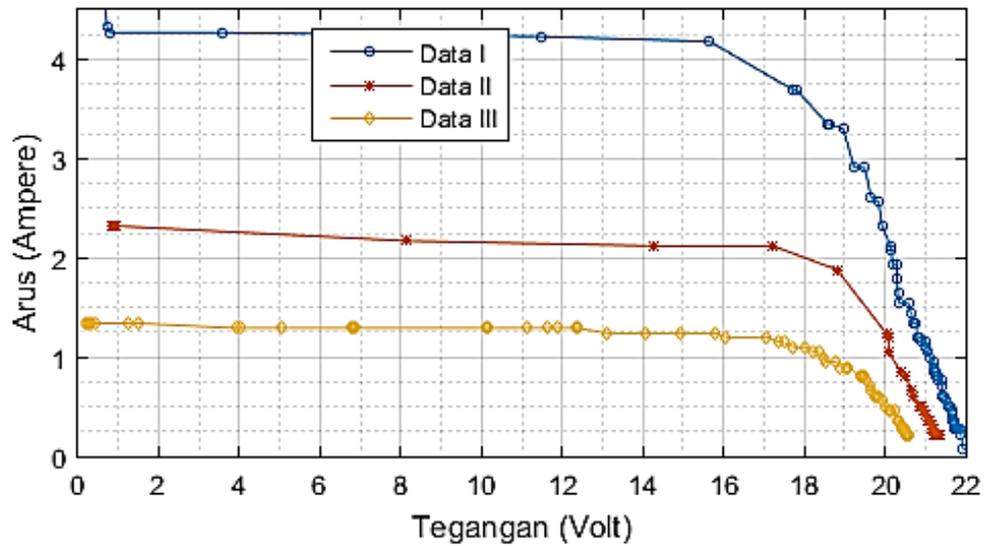
Pengujian perangkat keras meliputi pembangunan kurva karakteristik panel surya pada kondisi normal dan beberapa pada kondisi berbayang. Pada kondisi normal, pengujian telah dilakukan sebanyak tiga kali pada kondisi nilai radiasi dan suhu yang berbeda-beda. Selanjutnya, pengujian pada kondisi berbayang dilakukan pada 4 pola yang berbeda yaitu panel surya tertutup 2 sel di daerah dioda *bypass* bagian atas dibandingkan dengan tertutup 2 sel di daerah dioda *bypass* bagian bawah, panel surya tertutup 8 sel secara vertikal, panel surya tertutup 4 sel secara horisontal dan panel surya tertutup 8 sel secara horisontal. Performa MPPT telah diuji pada 4 keadaan berbeda yaitu kondisi normal, panel surya tertutup 8 sel vertikal, panel surya tertutup 4 sel horisontal dan tertutup 8 sel horisontal.

4.5.1 Kurva Karakteristik Panel Surya pada Kondisi Normal

Pengujian pada kondisi normal dilakukan sebanyak 3 pola kondisi radiasi dan suhu yang berbeda-beda. Hasil kurva karakteristik panel surya disajikan pada Gambar 4.21. Dari gambar tersebut telah tampak bahwa semakin besar nilai radiasi maka nilai daya output yang dihasilkan juga semakin besar. Nilai radiasi sinar matahari pada Data I menuju data III semakin mengecil sehingga daya maksimal yang dihasilkan panel surya juga semakin kecil. Hasil tersebut sudah sesuai dengan dasar teori pada Bab 2.2.1 dan diperkuat dengan hasil pengujian secara simulasi kondisi normal pada Bab 4.4.1.

Nilai temperatur juga berpengaruh terhadap penggeseran nilai V_{oc} selain mempengaruhi nilai daya panel surya yang dihasilkan. Data pengujian menjelaskan nilai suhu semakin menaik dari data I menuju data III sehingga nilai V_{oc} semakin menurun. Hasil pengaruh suhu tersebut sudah sesuai dengan dasar teori pada Bab 2.2.1 dan juga diperkuat dengan hasil pengujian secara simulasi kondisi normal pada Bab 4.4.1. Ketiga kondisi normal yang digunakan untuk pembangunan kurva karakteristik adalah sebagai berikut ini :

1. Data I (radiasi 1030 W/m^2 dan suhu $26,5^\circ \text{ C}$)
2. Data II (radiasi 610 W/m^2 dan suhu $27,9^\circ \text{ C}$)
3. Data III (radiasi 425 W/m^2 dan suhu $28,9^\circ \text{ C}$)



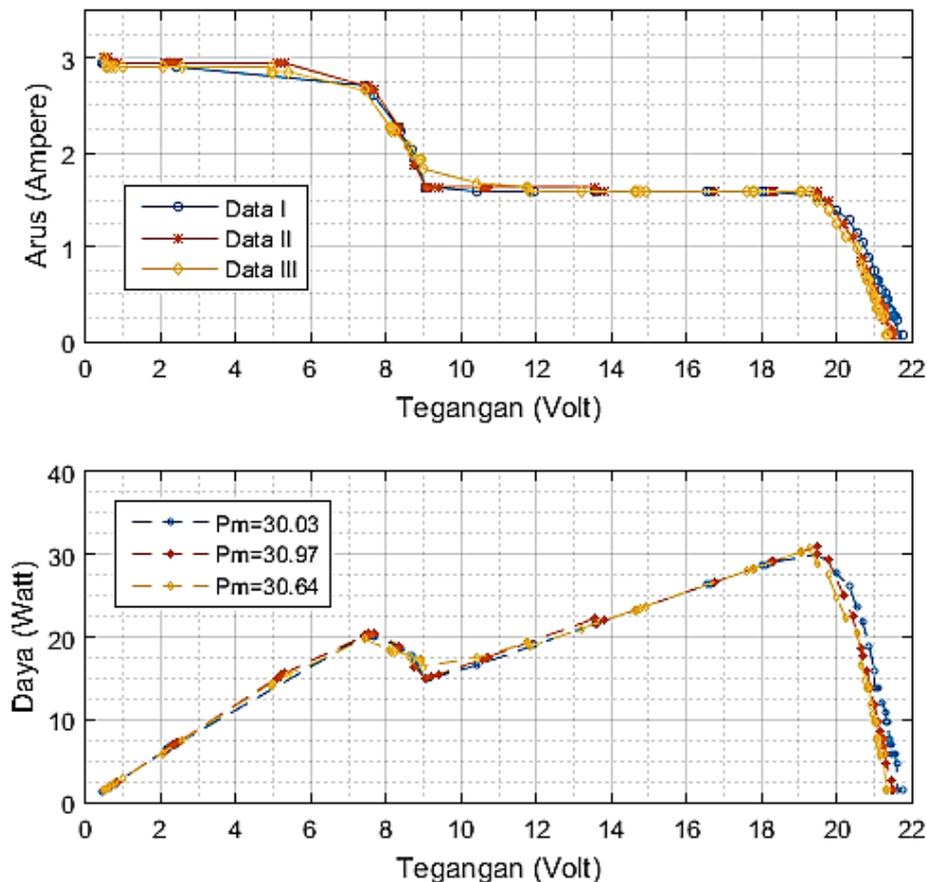
Gambar 4.21 Hasil Pengujian perangkat keras kondisi normal

4.5.2 Kurva Karakteristik Panel Surya pada Kondisi Berbayang

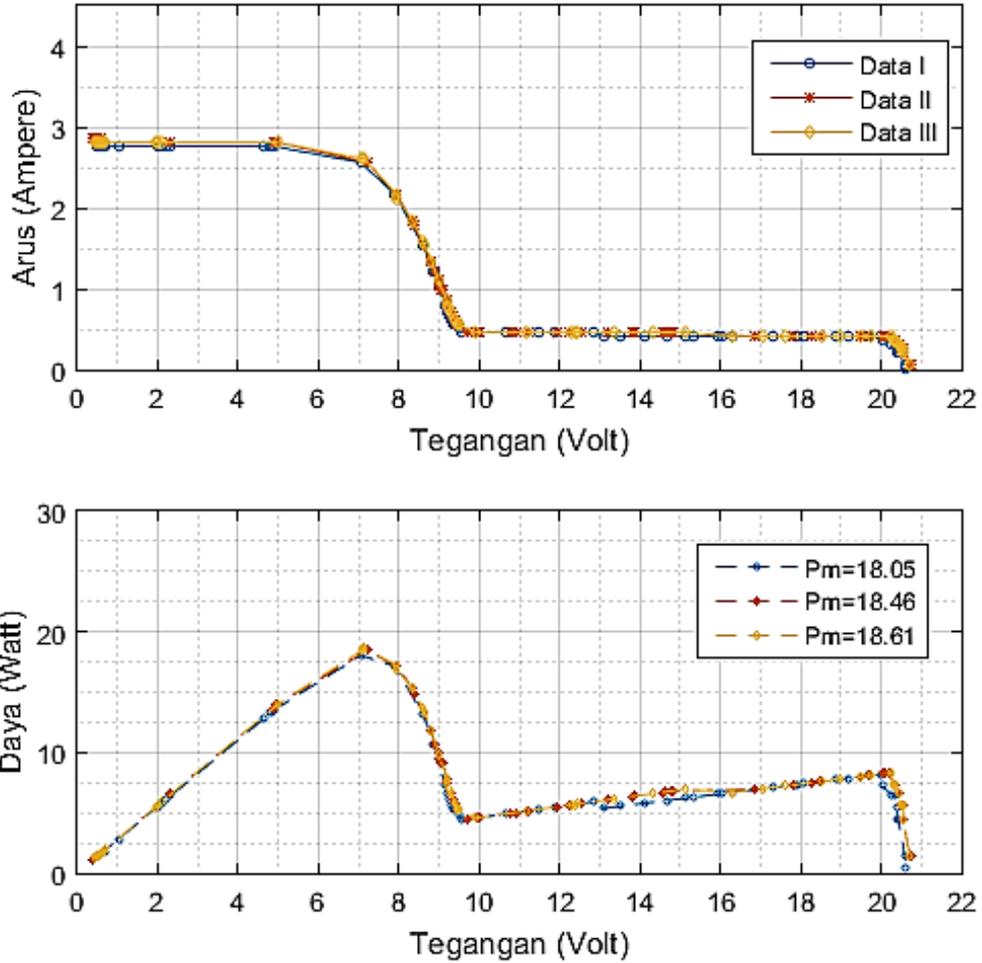
Pengujian pada kondisi berbayang dilakukan pada 4 pola yang berbeda. Pola pertama adalah panel surya tertutup 2 sel di daerah dioda *bypass* bagian atas dibandingkan dengan tertutup 2 sel di daerah dioda *bypass* bagian bawah. Pola selanjutnya adalah panel surya tertutup 8 sel secara horisontal sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, 50% dan 60%. Pola yang ketiga adalah panel surya tertutup 4 sel secara horisontal sebesar 24%, 50%, 75% dan 100%. Pola pengujian terakhir adalah panel surya tertutup 8 sel secara horisontal sebesar 24%, 50%, 75% dan 100%.

4.5.2.1 Panel Surya Tertutup 2 Sel dan 4 Sel Atas atau Bawah

Pengujian kondisi tertutup 2 sel dan 4 sel yang telah dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh letak dan luas penutupan bayang-bayang terhadap hasil kurva karakteristiknya. Pada kasus panel surya terdapat dua konfigurasi dioda *bypass* dengan masing-masing daerah memiliki jumlah sel tertutup yang sama, kurva karakteristik yang dihasilkan seharusnya sama atau sesuai dengan simulasi pada Bab 4.3 dan Bab 4.4.2. Hasil pengujian penutupan 2 sel pada panel surya sesuai pola Gambar 3.14 kiri menghasilkan kurva karakteristik ditunjukkan pada Gambar 4.22. Kurva yang dihasilkan tersebut telah menunjukkan hasil yang sesuai antara ditutup bagian atas maupun bawah. Hasil tersebut telah sesuai dengan hasil simulasi pada Bab 4.3 dan Bab 4.4.2. Pengujian pada bagian ini telah dilakukan pada 3 kondisi yang diusahakan hampir selalu sama atau sangat sedikit berbeda yaitu pada kondisi I (830 W/m^2 dan $27,9 \text{ }^\circ\text{C}$), kondisi II (834 W/m^2 dan $27,8 \text{ }^\circ\text{C}$) dan kondisi III (835 W/m^2 dan $27,6 \text{ }^\circ\text{C}$).



Gambar 4.22 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi tertutup 2 sel

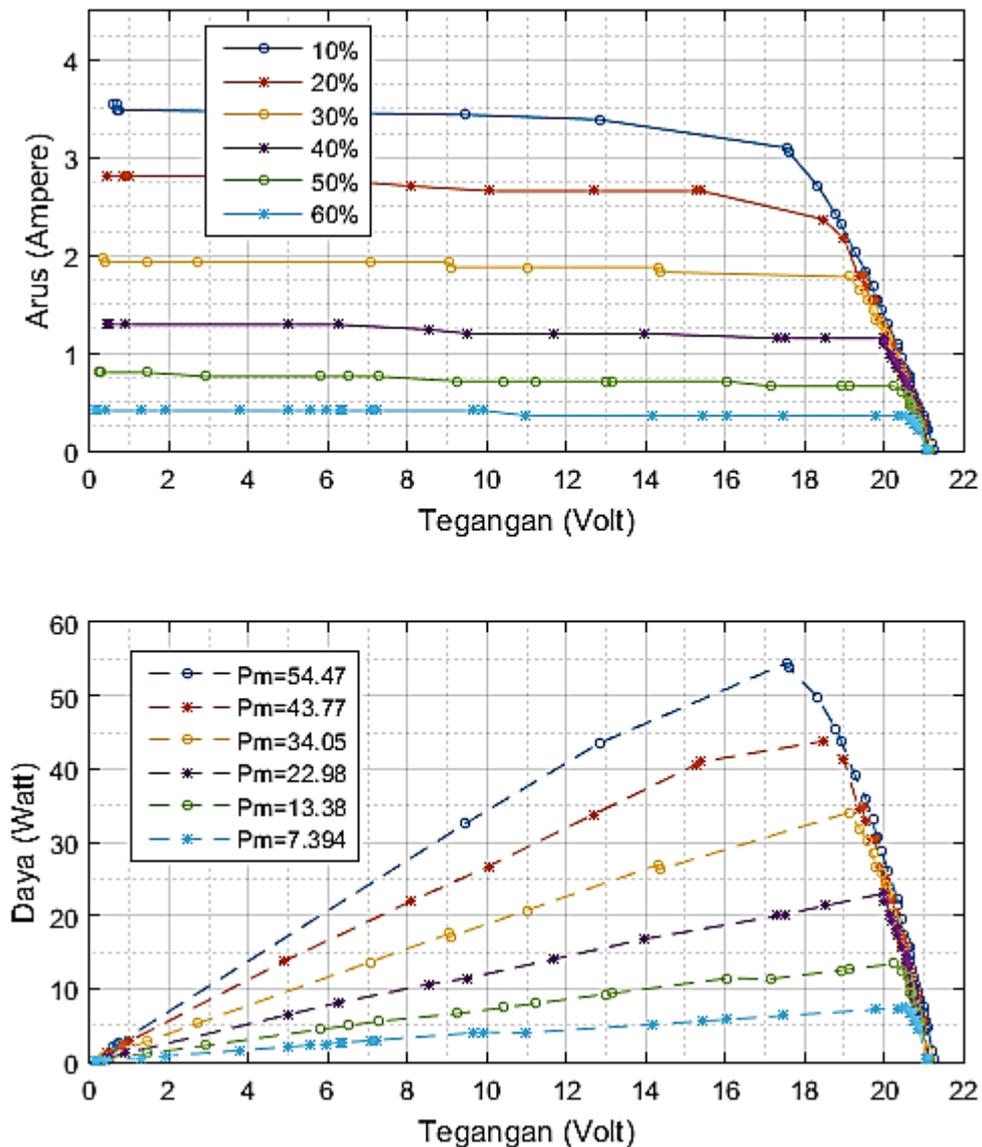


Gambar 4.23 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi tertutup 4 sel

Pengujian selanjutnya adalah penutupan panel surya 4 sel baik bagian dioda *bypass* atas maupun bawah sesuai pola pada Gambar 3.15. Pengujian dilakukan juga pada 3 kondisi yang diusahakan hampir selalu sama yaitu pada kondisi I (854 W/m^2 dan $27,9 \text{ }^\circ\text{C}$), kondisi II (856 W/m^2 dan $27,9 \text{ }^\circ\text{C}$) dan kondisi III (856 W/m^2 dan $27,6 \text{ }^\circ\text{C}$) yang juga sama dengan kondisi pengujian penutupan 2 sel panel surya. Hasil kurva karakteristik maka sudah menunjukkan bahwa penutupan 4 sel menghasilkan daya output yang lebih sedikit jika dengan dibandingkan dengan penutupan 2 sel panel surya. Jumlah sel panel surya yang ditutup sama meskipun pola penutupan berbeda pada Gambar 3.14 kanan (horisontal daerah dioda bawah, vertikal daerah dioda atas, atau vertikal horisontal daerah dioda atas) telah menghasilkan kurva karakteristik yang sama pada Gambar 4.23 dan telah sesuai dengan hasil simulasi pada Bab 4.3 dan Bab 4.4.2.

4.5.2.2 Panel Surya Tertutup 8 Sel Vertikal

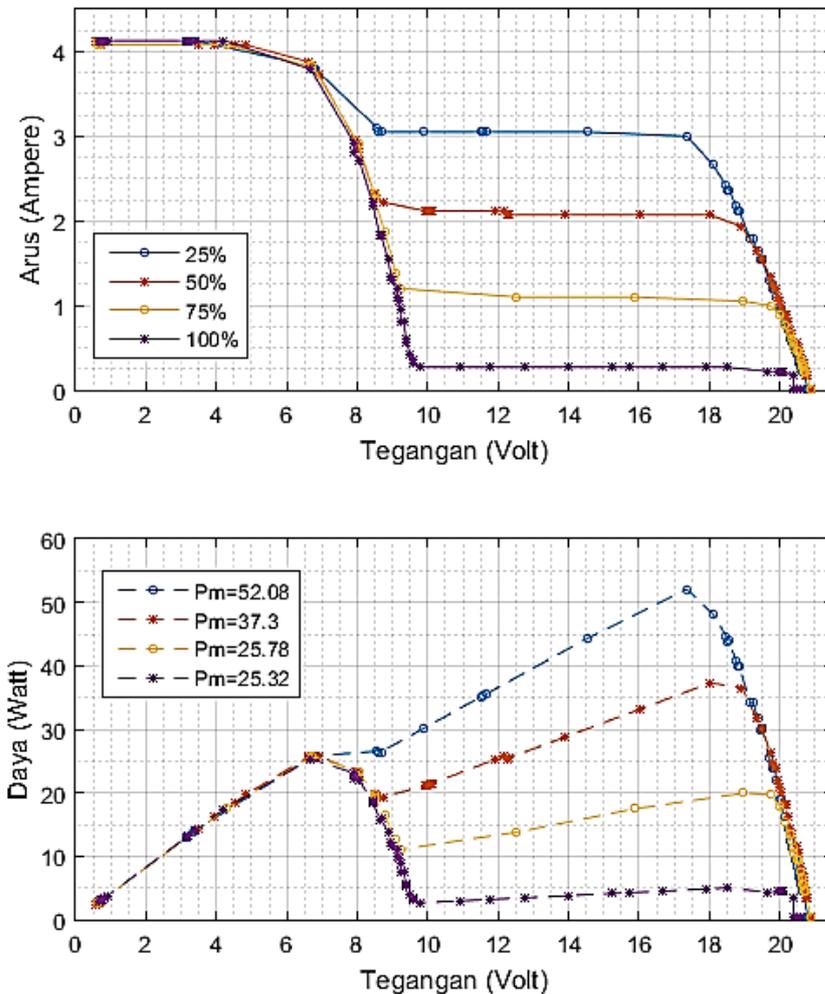
Pengujian panel surya tertutup 8 sel vertikal dilakukan sebanyak 6 pola yaitu tertutup 10%, 20%, 30%, 40%, 50% dan 60%. Hasil kurva karakteristik pada Gambar 4.24 menunjukkan bahwa semakin besar bagian yang ditutup maka nilai arus yang dihasilkan bernilai semakin kecil sehingga daya output juga semakin kecil. Kurva karakteristik yang dihasilkan berbentuk mirip dengan kondisi normal yaitu hanya memiliki satu nilai puncak karena antara daerah dioda *bypass* bagian atas dan bawah mendapatkan nilai radiasi yang sama. Pengambilan data seluruh pola dilakukan pada nilai suhu $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan radiasi 1012 W/m^2 .



Gambar 4.24 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi tertutup 8 sel vertikal

4.5.2.3 Panel Surya Tertutup 4 Sel Horizontal

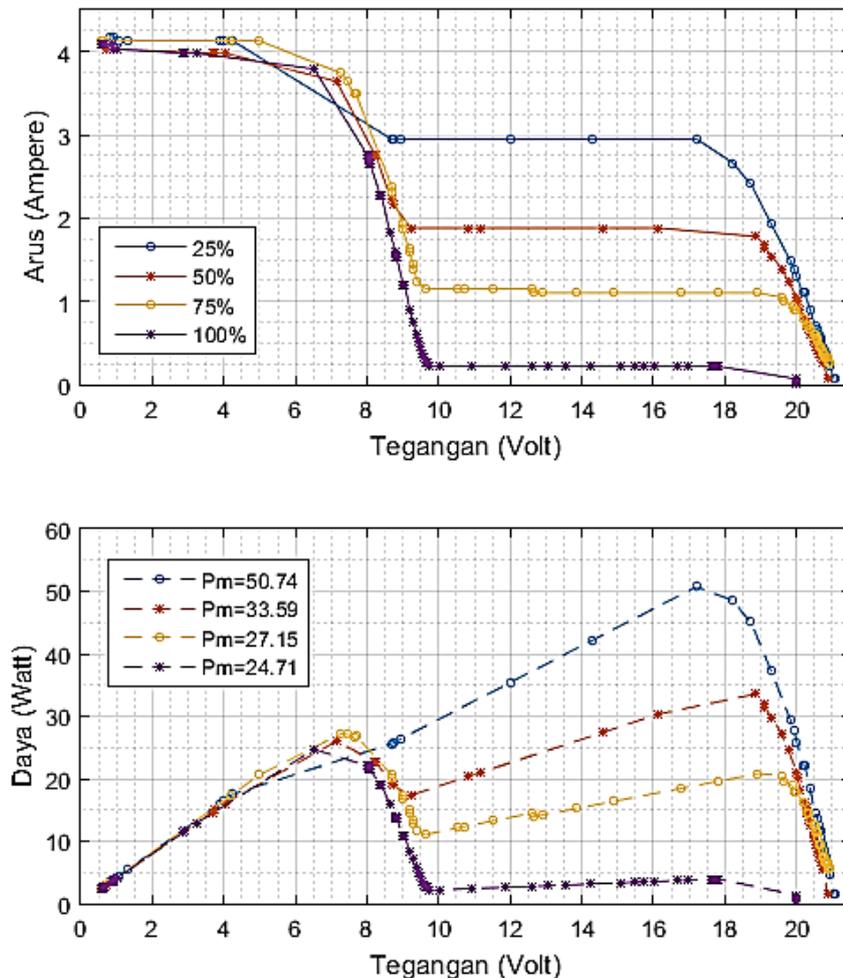
Pengujian panel surya tertutup 4 sel horizontal dilakukan pada empat pola berbeda yaitu tertutup 25%, 50%, 75% dan 100%. Kurva karakteristik hasil pengujian pada Gambar 4.25 menunjukkan bahwa semakin luas daerah yang tertutup menghasilkan nilai arus yang lebih kecil pada daerah dioda *bypass* yang bersangkutan. Hal tersebut adalah akibat adanya dua dioda *bypass* yang terpasang sehingga menghasilkan dua puncak daya yang berbeda karena adanya dua lekukan pada kurva arus terhadap tegangan. Karena nilai arus berbanding lurus dengan nilai radiasi, maka ketika semakin luas daerah tertutup menunjukkan semakin menurunnya nilai radiasi menyebabkan penurunan nilai arus dibagian daerah dioda *bypass* yang bersangkutan. Hasil nilai daya panel surya juga bernilai semakin menurun dengan semakin luasnya daerah yang ditutup.



Gambar 4.25 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi tertutup 4 sel horizontal

4.5.2.4 Panel Surya Tertutup 8 Sel Horizontal

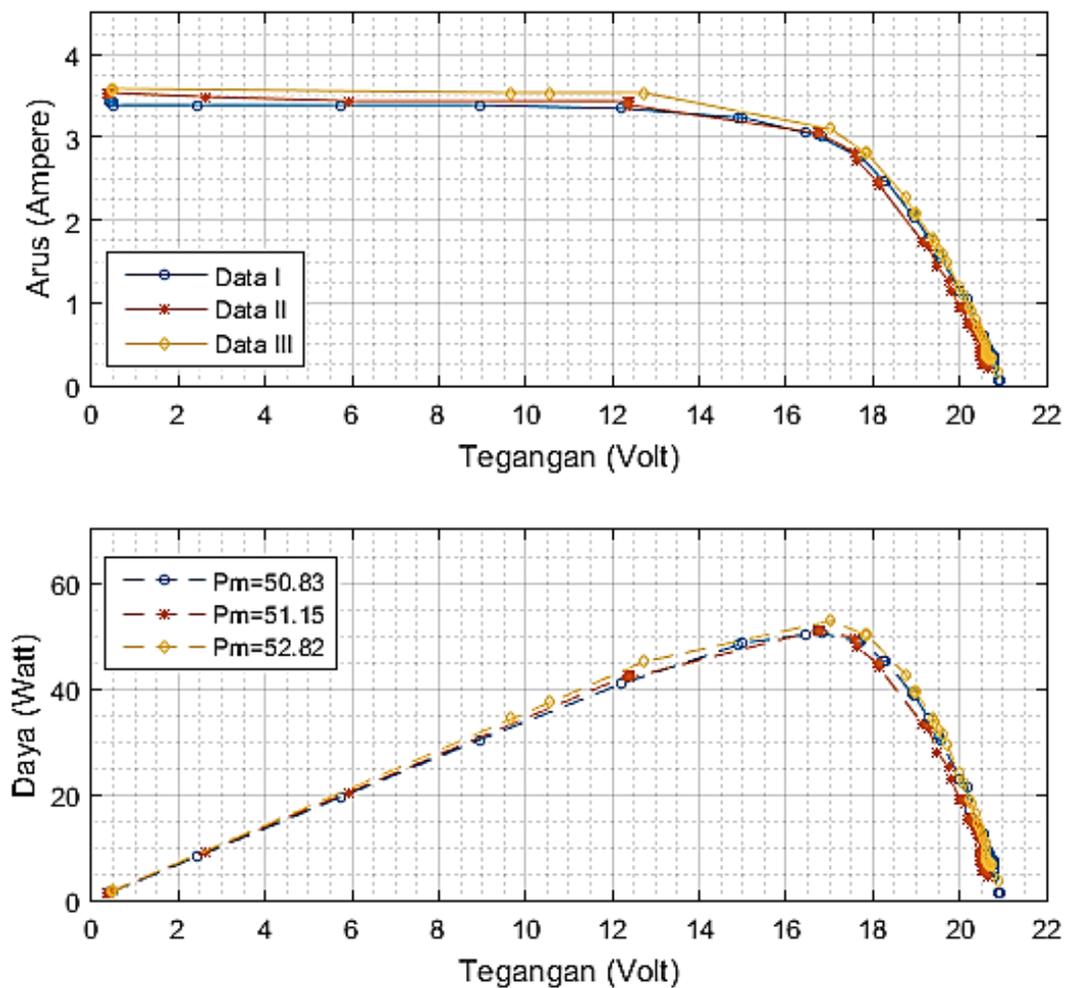
Pengujian panel surya tertutup 8 sel horizontal dilakukan pada empat pola berbeda mirip dengan pengujian tertutup 4 sel horizontal yaitu tertutup 25%, 50%, 75% dan 100%. Data kurva karakteristik hasil pengujian pada Gambar 4.26 menunjukkan hasil yang sudah sesuai yaitu bahwa ketika semakin luas daerah yang tertutup maka akan menurunkan nilai arus. Jika dibandingkan dengan hasil tertutup 4 sel horizontal, penutupan 8 sel akan mengakibatkan nilai arus yang lebih kecil pada bagian dioda *bypass* yang bersangkutan. Hal tersebut bisa dilihat pada nilai daya puncak dibagian daerah dioda *bypass* bersangkutan yaitu pada pola pertama dan kedua. Pada pola pertama, penutupan 4 sel menghasilkan daya 52,08 W dan penutupan 8 sel menghasilkan 50,74 W. Pada pola kedua penutupan 4 sel menghasilkan daya 37,3 W dan penutupan 8 sel menghasilkan 33,59 W.



Gambar 4.26 Kurva karakteristik panel surya pada kondisi tertutup 8 sel vertikal

4.5.3 Pengujian MPPT pada Kondisi Normal

Pengujian pada kondisi normal dilakukan sebanyak 3 kali (satu kali untuk satu algoritma) yaitu diusahakan pada kondisi yang sama pada nilai radiasi 924 W/m^2 dan nilai temperatur $26,8 \text{ }^\circ\text{C}$ sehingga dapat dibandingkan hasilnya. Kurva karakteristik hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.27 menunjukkan arus bernilai sekitar $3,5 \text{ A}$ dan daya maksimal bernilai sekitar 52 W . Ketiga algoritma menunjukkan mampu melacak daya maksimal dengan akurasi terendah $98,76\%$. Debit air tertinggi yang dihasilkan adalah 1142 lph yaitu pada saat daya panel surya tertinggi terdeteksi $52,17 \text{ W}$ (berbanding lurus dengan nilai daya panel surya) disajikan pada Tabel 4.2. Pada kondisi ini FSKH menunjukkan performa terbaik dengan akurasi tertinggi dan selanjutnya disusul RP&O dan yang terakhir P&O.

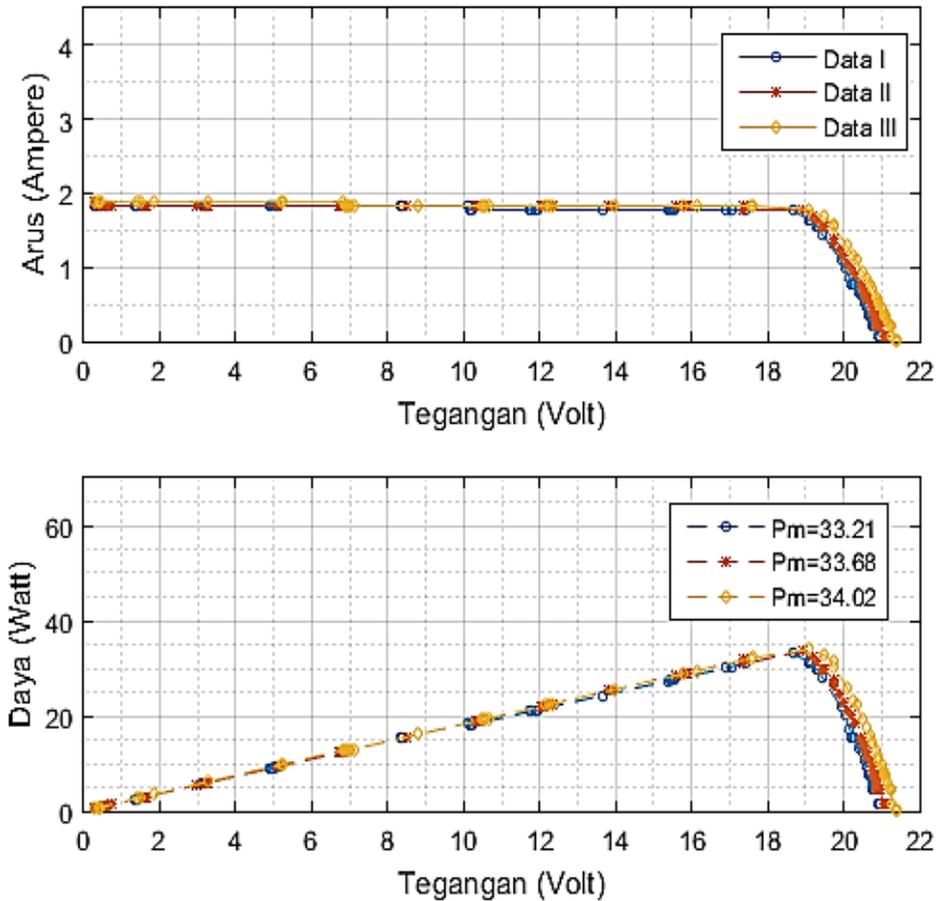


Gambar 4.27 Kurva karakteristik pengujian perangkat keras kondisi normal

4.5.4 Pengujian MPPT pada Panel Surya Tertutup 8 Sel Vertikal

Pengujian pada kondisi panel surya tertutup 8 sel vertikal menghasilkan kurva karakteristik pada Gambar 4.28 menunjukkan nilai arus sekitar 1,9 A dan daya maksimal bernilai sekitar 33,5 W. Pengambilan data kurva karakteristik juga dilakukan 3 kali yaitu data I untuk P&O, data II untuk RP&O dan data III untuk FSKH. Pengujian tentu tetap diusahakan pada nilai radiasi dan nilai temperatur yang sama yaitu 745 W/m^2 dan $28,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

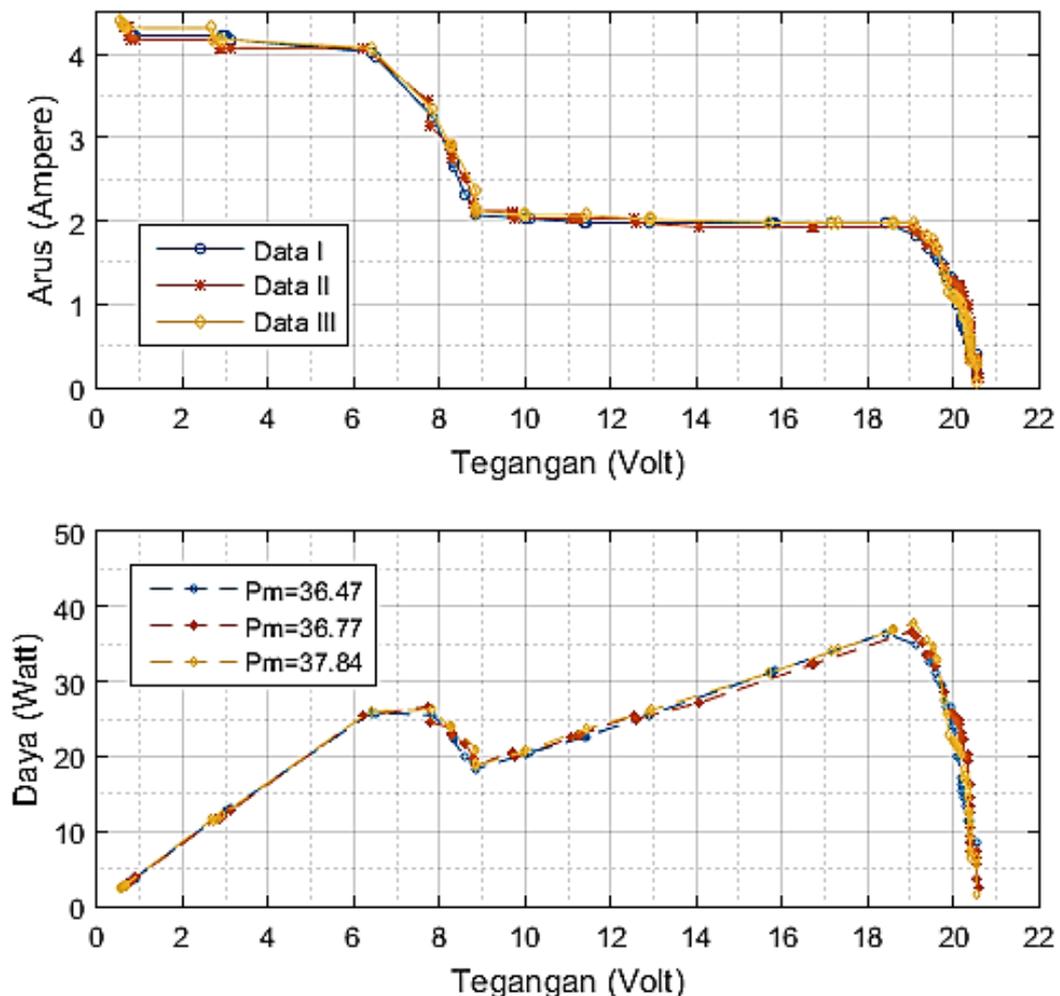
Pada kondisi ini, ketiga algoritma telah dapat melacak daya paling optimal dan kurva karakteristik masih menyerupai kondisi normal. Kurva karakteristik seperti kondisi normal yang hanya memiliki satu nilai puncak daya disebabkan oleh kondisi penutupan vertikal Gambar 3.15 (jumlah sel tertutup sama antara daerah dioda *bypass* bawah ataupun atas). Pada kondisi ini, akurasi algoritma sebagai MPPT dalam melacak daya optimal yang tertinggi adalah FSKH (98,63%). Nilai tertinggi debit air diperoleh pada nilai 732 lph pada daya terdeteksi 33,55 W.



Gambar 4.28 Pola tertutup vertikal dan kurva karakteristik panel surya

4.5.5 Pengujian MPPT pada Panel Surya Tertutup 4 Sel Horizontal

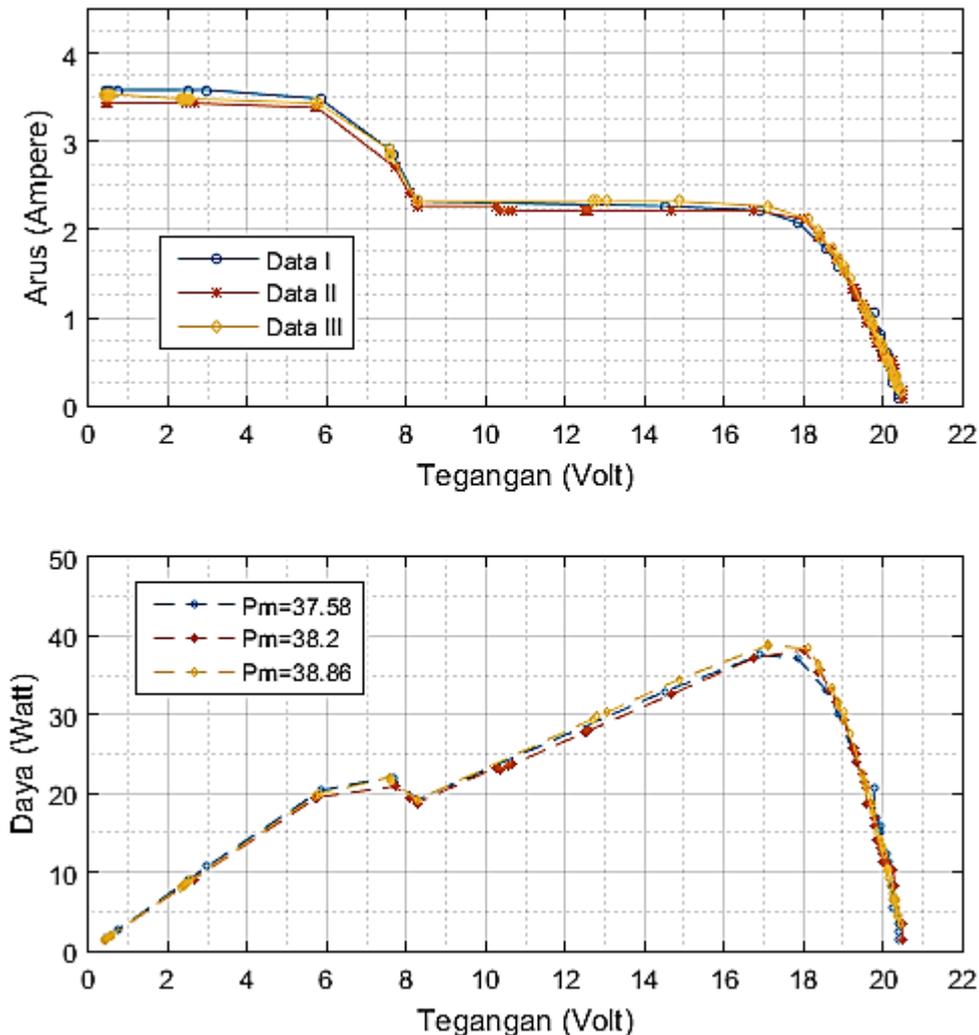
Kurva karakteristik panel surya pada Gambar 4.29 menunjukkan nilai arus terbesar adalah 4,3 A dan daya maksimal senilai 37,84 W. Pengujian juga dilakukan pada kondisi nilai radiasi 1040 W/m^2 dan nilai temperatur $27,5 \text{ }^\circ\text{C}$ yang diusahakan konstan untuk pengujian masing-masing MPPT. Pada kondisi penutupan tidak seimbang antara jumlah sel daerah dioda *bypass* atas dan bawah, kurva lekukan arus telah terjadi dan mengakibatkan adanya dua puncak daya (ada solusi lokal dan global). Pada kondisi ini, akurasi algoritma tertinggi sebagai MPPT dalam melacak daya adalah FSKH 98.30% pada nilai 37,2 Watt dengan nilai debit air 817 lph. P&O terjebak pada solusi lokal sehingga akurasinya terkecil hanya senilai 26,53 Watt atau 72,75% dengan debit air 576 lph. FSKH dan RP&O menunjukkan performa terbaik karena dapat melacak solusi global atau daya optimal yang sebenarnya.



Gambar 4.29 Pola tertutup 4 sel horisontal dan kurva karakteristik panel surya

4.5.6 Pengujian MPPT pada Panel Surya Tertutup 8 Sel Horisontal

Kurva karakteristik pada Gambar 4.30 menunjukkan nilai arus terbesar adalah 3,54 A dan daya maksimal pada kurva senilai 38,86 W dilakukan pada pengujian ketika nilai radiasi 910 W/m^2 dan nilai temperatur $27 \text{ }^\circ\text{C}$. Pada kondisi ini kurva daya juga menunjukkan terdapat solusi lokal yaitu puncak daya lain dibawah daya maksimal yang seharusnya dapat diperoleh. Dengan kondisi tersebut ternyata algoritma P&O terjebak pada solusi lokal dengan daya terdeteksi senilai 22,44 Watt. Akurasi seluruh algoritma sebagai MPPT dalam melacak daya optimal diurutkan dari yang tertinggi adalah FSKH (98,87%), RP&O (98,54%) dan P&O (59,71%). Nilai debit air juga telah berbanding lurus dengan daya output dari panel surya yaitu FSKH (884 lph), RP&O (865 lph) dan P&O (631 lph).



Gambar 4.30 Pola tertutup 8 sel horisontal dan kurva karakteristik panel surya

4.5.7 Rangkuman Hasil Pengujian Perangkat Keras

Rangkuman hasil uji perangkat keras keseluruhan algoritma pada semua kondisi diuraikan pada Tabel 4.2. Pada kondisi normal, semua algoritma mampu melacak daya maksimal yang dapat dihasilkan oleh panel surya. Algoritma P&O tidak terjebak pada kondisi berbayang 8 sel vertikal karena kurva karakteristiknya masih menyerupai kondisi normal dengan memiliki hanya satu nilai puncak daya. Pada kondisi panel surya tertutup horisontal 4 sel atau 8 sel, P&O terjebak pada solusi lokal dengan nilai akurasi terendah adalah 59,71%. Algoritma RP&O dan FSKH menunjukkan performa yang sangat baik karena tidak pernah terjebak pada solusi lokal dan dapat menemukan solusi global atau mampu melacak daya maksimum dengan akurasi yang tinggi yaitu selalu diatas nilai 97%. Nilai debit air yang dihasilkan juga selalu berbanding lurus dengan nilai output daya panel surya. Hal tersebut sudah sesuai dengan penjelasan dasar teori pada sub bab 2.3.

Tabel 4.2 Hasil uji perangkat keras keseluruhan sistem

Panel Surya	Algoritma MPPT	Daya Optimum (Watt)	Daya Terdeteksi (Watt)	Akurasi Tracking (%)	Debit Air (lph)
Kondisi Normal	P&O	50,83	50,09	98,54	1096
	RP&O	51,15	50,49	98,70	1105
	FSKH	52,82	52,17	98,76	1142
PSC 8 sel vertikal	P&O	33,21	32,54	97,98	698
	RP&O	33,68	33,06	98,17	713
	FSKH	34,02	33,55	98,63	732
PSC 4 sel horisontal	P&O	36,47	26,53	72,75	576
	RP&O	36,77	35,96	97,81	790
	FSKH	37,84	37,20	98,30	817
PSC 8 sel horisontal	P&O	37,58	22,44	59,71	516
	RP&O	38,20	37,64	98,54	865
	FSKH	38,86	38,42	98,87	884

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5

PENUTUP

Bab ini memberikan rangkuman dari seluruh hasil penelitian yang sudah dilakukan. Beberapa batasan permasalahan dan topik bahasan yang berhubungan dan belum sempat dilaksanakan akan dijadikan saran untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian yang pertama dibahas adalah hasil uji kalibrasi alat pengukur tegangan dan arus menunjukkan performa yang baik dengan nilai akurasi diatas 99%. Selanjutnya model panel surya yang sudah dibangun dapat menampilkan kurva karakteristik yang sesuai dengan dasar teori. Hasil simulasi dan pengujian pada kondisi berbayang juga mampu menunjukkan adanya solusi lokal dan solusi global pada kurva karakteristik panel surya. Pada penelitian ini nilai puncak daya pada kurva karakteristik sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi yang diterima.

Hasil simulasi pada kondisi normal menunjukkan seluruh algoritma mampu melacak daya optimum dengan akurasi diatas 99%. P&O terjebak di solusi lokal pada seluruh pola tertutup sebagian dan RP&O hanya terjebak pada kondisi PSC II. FSKH selalu mampu melacak daya optimum pada seluruh kondisi yang ditentukan dengan akurasi diatas 99%. RP&O mampu mencapai kondisi konvergen lebih cepat sebesar 35% daripada P&O pada kondisi normal sesuai dengan desain. Hasil pengujian perangkat keras menunjukkan ketiga algoritma telah mampu melacak daya optimum dengan akurasi diatas 97% pada kondisi normal atau tertutup vertikal. P&O selalu terjebak pada penutupan secara horisontal. Debit air yang dihasilkan selalu berbanding lurus dengan nilai daya output dari panel surya.

5.2 Saran

Penelitian yang sudah dilakukan belum mencocokkan kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian pada nilai radiasi dan temperatur yang sebenarnya. Selain itu, pengendali juga belum dibahas secara rinci. Model simulasi pompa air yang akurat juga akan menjadi topik penelitian yang menarik untuk dilaksanakan.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Caracas, J.V.M., de Carvalho Farias, G., Teixeira, L.F.M. and de Souza Ribeiro, L.A., "Implementation of a high-efficiency, high-lifetime, and low-cost converter for an autonomous photovoltaic water pumping system," IEEE Transactions on Industry Applications, vol 50, pp.631-641, 2014.
- [2] International Energy Agency IEA, "World Energy Outlook, Executive Summary", France, 2012.
- [3] Callahan C., P.E., "Solar Water Pumping Basic", Project of Agricultural Engineering, The University of Tennessee, Tunisia, 2013.
- [4] T. Eswam, P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", Energy Conversion, IEEE Transactions, vol. 22, pp. 439-449, 2007.
- [5] Li Liangliang, Zhou Y., and Xie Jian, "A Free Search Krill Herd Algorithm for Functions Optimization", Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2014, Article ID 936374, 2014.
- [6] Sontake, V.C. and Kalamkar, V.R., "Solar photovoltaic water pumping system-A comprehensive review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, pp.1038-1067. 2016.
- [7] Enrico Dallago, Alessandro Liberale, Davide Miotti, and Giuseppe Venchi, "Direct MPPT algorithm for PV sources with only voltage measurements," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 12, pp 6742-6750, December 2015.
- [8] M. A. Elgandy, Bashar Zahawi, and David J. Atkinson, "Assessment of Perturb and Observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, no. 1, pp 21-33, January 2012.
- [9] M.K.D. Ulaganathan, C.Saravanan, and Olivia Ramya Chitranjan, "Cost-effective Perturb and Observe MPPT method using arduino microcontroller for a standalone photo voltaic system," International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), vol. 8,no. 1,pp 24-28, February 2014.

- [10] T. Logeswaran, and A. SenthilKumar, "A review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems under uniform and non-uniform irradiances,"4th International Conference on Advances in Energy Research (ICAER), vol. 54, pp. 228-235, 2013.
- [11] Kamarzaman, N.A. and Tan, C.W., "A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, pp.585-598, 2014.
- [12] Young-Hyok Ji, Doo-Yong Jung, Chung-Yuen, Won Byoung-Kuk Lee, and Jin-Wook Kim, "Maximum power point tracking method for PV array under partially shaded condition," IEEE, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp 307-312, 2009.
- [13] Efstratios I. Batzelis, Georgios E. Kampitsis, Stavros A. Papathanassiou, and Stefanos N. Manias, "Direct MPP calculation in terms of the single-diode pv model parameters," IEEE Transactions on Energy Conversion, August 2014.
- [14] Vicente, E.M., Moreno, R.L. and Ribeiro, E.R., "MPPT Technique Based on Current and Temperature Measurements. International Journal of Photoenergy," Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Photoenergy, 2015.
- [15] Daniel W. Hard, "Power Electronic", The McGraw-Hill Companies, Inc., page 211-220, New York, 2011.
- [16] Kolhe, M., Joshi, J.C. and Kothari, D.P., "Performance analysis of a directly coupled photovoltaic water-pumping system," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.19(3), pp.613-618, 2004.
- [17] Elbaset, A.A., Ali, H., Abd-El Sattar, M. and Khaled, M., "Implementation of a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using an embedded microcontroller," IET Renewable Power Generation, 10(4), pp.551-560, 2016.
- [18] Gandomi, A.H. and Alavi, A.H., "Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm," Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol.17(12), pp.4831-4845, 2012.

- [19] Samkeliso Shongwe, and Moin Hanif, "Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods," IEEE Journal Of Photovoltaics, vol. 5, pp. 938-946, January 2015.
- [20] Mahmoud, Y.A., Xiao, W. and Zeineldin, H.H., "A parameterization approach for enhancing PV model accuracy," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(12), pp.5708-5716, 2013.
- [21] Mahmoud, Y., Xiao, W. and Zeineldin, H.H., "A simple approach to modeling and simulation of photovoltaic modules," IEEE transactions on Sustainable Energy, vol 3(1), pp.185-186, 2012.
- [22] Mahmoud, Y. and El-Saadany, E., "Accuracy improvement of the ideal PV model," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol 6(3), pp.909-911, 2015.
- [23] Ibrahim, A., "Analysis of Electrical Characteristics of Photovoltaic Single Crystal Silicon Solar Cells at Outdoor Measurements. Smart Grid and Renewable Energy, vol 2(2), p.169, 2011.
- [24] Durán, E., Piliougine, M., Sidrach-de-Cardona, M., Galán, J. and Andújar, J.M., "Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: a review" In Photovoltaic Specialists Conference, PVSC'08, 33rd IEEE (pp. 1-6), 2008.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN 1 : Data Teknis Panel Surya

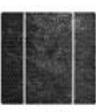


GH SOLAR
The future looks bright

80 Wp Polycrystalline Series



Mono



Poly



Thin Film



Model GH 80P-18

Mechanical Data

Solar Cell	High Efficiency Polycrystalline Cell
Cell Efficiency	16,40%
Cell Size	Rectangular (5"x3,5")
Number of Cells	36 cells (3x12 cells)
Dimensions (new)	1200 x 540 x 30 mm
Weight	± 7,5 Kg
Cable Lengths	1000mm
Frame module	Aluminium Alloy
Application Class	A

Electrical Data

Rated Current (Imp)	4.45 A
Rated Voltage (Vmp)	17.5 V
Short Circuit Current (Isc)	4.72 A
Open Circuit Voltage (Voc)	21 V
Fill Factor	0.78
Rated Power (Pmax)	80Wp (0%/+3% tolerance)
Module Efficiency	14.5%
Maximum Forward Current	10A
Maximum System Voltage	1000V DC

Warranties & Certifications

Product Warranty	12 years
Power Warranty (90% of Pmax)	10 years
Power Warranty (80% of Pmax)	25 years
Certificates	IEC 61215, IEC 61730, CE

Operating Conditions

Operating Temperature	-40°C to +85°C
Mechanical Load	>5400Pa

Temperature Data

Nominal Operation Cell Temperature (NOCT)	45°C
Current Temperature Coefficient	0.04%/°C
Voltage Temperature Coefficient	-0.32%/°C
Power Temperature Coefficient	-0.35%/°C

Specifications in these datasheets are subject to changes without prior notice.

contact us









GH SOLAR • Campus Greenhill, Interleuvenlaan 15D
3001 Heverlee, België
website www.ghsolar.be
www.anekasurya.com
CV. Aneka Surya Energi
Jl. Mayjend Sungkono. No. 5 Blok BC 6-8, Gresik

LAMPIRAN 2 : Data Teknis Pompa Air

rule Submersible and Inline Pump

Features

- Pumps fresh and sea water.
- Rapid diesel refuelling and transfer with no spillage (models iL500^{Plus}, iL280^{Plus} and iL200^{Plus} only).
- Bilge pump-out in tight areas.
- Water Transfer; Deck Showers; Deck, Anchor & General Wash-down.
- Robust, slim line with clip-on easily cleaned filter.



Instructions

Fit a length of appropriate size hose (see specification table for details) to the outlet nozzle and immerse the complete pump in liquid. Connect the battery clips to the battery terminals (+) positive to (+) positive and (-) negative to (-) negative (if powering from a car or boat battery do not use with engine running). The pump will deliver immediately.

For an in-line installation unclip the filter to expose the inlet nozzle. Connect a length of hose between the tank and nozzle. The pump must be fitted below the tank.

- Avoid dry running for long periods.
- For drinking water applications sterilize regularly.
- Store away from excessive heat and direct sunlight to avoid external damage.
- If the pump fails to perform, check for blockages (including filter), leaks and correct hose & electrical connections.

Specifications

Model	iL500 ^{Plus}	iL280 ^{Plus}	iL200 ^{Plus}	iL200
Part No.:	iL500P iL500P-24	iL280P iL280P-24	iL200P iL200P-24	iL200
Pump Type:	Centrifugal submersible and in-line pump			
Current:	12V (6amp) 24V (3amp)	12V (4.5amp) 24V (2.5amp)	12V (4.5amp) 24V (2.5amp)	12V (2.8amp)
Head:	32ft (9.7m)	32ft (9.7m)	32ft (9.7m)	25ft (7.6m)
Flow rate:	500 gph (1920 lph)	280 gph (1080 lph)	200 gph (760 lph)	200 gph (760 lph)
Rating:	Continuous*	Continuous*	Continuous*	Intermittent ^
Outlets (id hose):	3/4" (19mm)	1/2" (13mm)	1/2" (13mm)	3/8" (10mm) & 1/2" (13mm)
Pressure:	14psi (0.96bar)	14psi (0.96bar)	11psi (0.76bar)	14psi (0.96bar)
Body:	POM	POM	POM	HIP
Length:	6.5" (165mm)	6.5" (165mm)	5.6" (165mm)	5.1" (130mm)
Diameter:	1.5" (38mm)	1.5" (38mm)	1.5" (38mm)	1.4" (36mm)
Cable Length:	13ft (4m)	13ft (4m)	3ft (1m)	3ft (1m)
Weight:	1.1lbs (500g)	1.1lbs (500g)	0.5lbs (227g)	0.25lbs (113g)
Liquid:	Fresh & Sea Water / Diesel			Fresh & Sea Water
Operating Temp:	Diesel to 104°F (40°C) Water to 176°F (80°C)			Water to 140°F (60°C)

- * Continuous Duty - Should not be run dry for long periods of time.
- ^ Intermittent Duty - Should not be run for more than 20mins and rested for equal time.

WARNING
DO NOT use any Rule pump for petrol, petroleum products or any products with a flash point below 37°C (98°F).



- GB Submersible and Inline Pumps
- FR Pompes immergées et en ligne
- DE Tauch- und In-Line-Pumpen
- IT Pompa Sommersa e In Linea
- NL Onderwater- en Inlinpomp
- SE Dränkbara centrifugal och "In-Line" pumpar
- ES Bombas sumergibles y en linea
- CE



USA Tel: +1 928 281 0400
UK Tel: +44 (0) 1992 450 145
Canada Tel: +1 519 821 1500
Japan Tel: +81 (0) 05 275 8906
Germany Tel: +49 (0) 40 53 53 730
Italy Tel: +39 039 6852323

Pompes immergées et en ligne

Caractéristiques

- Pour pomper l'eau douce ou salée.
- Réapprovisionnement rapide en gazole et transfert sans éclaboussures (modèles iL500^{Plus}, iL280^{Plus} et iL200^{Plus} seulement).
- Pompe d'assèchement de cales dans des zones difficiles d'accès.
- Transfert d'eau ; douches de pont ; lavage de pont, ponton ou autres.
- Mince et robuste avec filtre enfichable à nettoyage facile.

Instructions

Brancher un tuyau de dimension adéquate (voir tableau des caractéristiques pour plus de détails) sur le raccord de sortie et immerger la pompe complètement dans le liquide. Brancher les pinces pour batterie aux bornes respectives, positive (+) et négative (-) (si l'alimentation de la pompe se fait par une batterie de voiture ou de bateau, ne pas laisser le moteur tourner). La pompe débite immédiatement.

Pour une installation en ligne, décliper le filtre pour accéder au raccord d'entrée. Brancher un tuyau entre le réservoir et la buse. La pompe doit être située sous le niveau du réservoir.

• Éviter d'utiliser la pompe en continu pendant de longues périodes. • Lorsque la pompe est utilisée pour pomper de l'eau potable, il faut la stériliser régulièrement. • Stocker la pompe à l'abri de la chaleur excessive et de la lumière directe du soleil, pour éviter d'endommager l'intérieur. • Si la pompe ne fonctionne pas, rechercher les éventuelles obstructions (y compris le filtre) et lubrifier si les flexibles sont correctement raccordés et si les connexions électriques sont correctement effectuées. •

Caractéristiques

Modèle	iL500 ^{Plus}	iL280 ^{Plus}	iL200 ^{Plus}	iL200
Référence :	iL500P iL500P-24	iL280P iL280P-24	iL200P iL200P-24	iL200
Type de pompe:	Centrifuge immergée et en ligne			
Intensité:	12V (6 A) 24V (3 A)	12V (4,5 A) 24V (2,5 A)	12V (4,5 A) 24V (2,5 A)	12V (2,8 A)
Hauteur manométrique:	32pi (9,7m)	32pi (9,7m)	32pi (9,7m)	25pi (7,6m)
Débit:	500 gph (1920 lph)	280 gph (1080 lph)	200 gph (760 lph)	200 gph (760 lph)
Fonctionnement:	Continu*	Continu*	Continu*	Intermittent ^
Sorties (id de tuyau):	3/4" (19mm)	1/2" (13mm)	1/2" (13mm)	3/8" (10mm) et 1/2" (13mm)
Pression:	14psi (0,96bar)	14psi (0,96bar)	11psi (0,76bar)	14psi (0,96bar)
Corps:	POM	POM	POM	HIP
Longueur:	6,5" (165mm)	6,5" (165mm)	5,6" (165mm)	5,1" (130mm)
Diamètre:	1,5" (38mm)	1,5" (38mm)	1,5" (38mm)	1,4" (36mm)
Longueur de câble:	13pi (4m)	13pi (4m)	3pi (1m)	3pi (1m)
Poids:	1,1lbs (500g)	1,1lbs (500g)	0,5lbs (227g)	0,25lbs (113g)
Liquide:	Eau douce et salée / gazole			Eau douce et salée
Température de fonctionnement:	Diesel jusqu'à 104°F (40°C) Eau jusqu'à 176°F (80°C)			Eau jusqu'à 140°F (60°C)

- * Fonctionnement permanent - Ne doit pas tourner à sec de façon prolongée.
- ^ Fonctionnement intermittent - Ne doit pas fonctionner à sec. Si la pompe fonctionne pendant plus de 20 minutes elle doit rester arrêtée pendant un temps équivalent.

AVERTISSEMENT
Ne pas utiliser pour pomper de l'essence ou d'autres produits inflammables.
Ne pas utiliser pour pomper de l'eau potable sans la stériliser régulièrement.
Ne pas utiliser pour pomper de l'eau de mer sans la filtrer.

LAMPIRAN 3 : Data Penelitian

Kalibrasi alat ukur sensor arus

Alat Ukur (A)	Pembanding (A)	Akurasi (%)
0,27	0,27	100,00
0,51	0,51	100,00
0,76	0,76	100,00
1,00	1,01	99,01
1,29	1,29	100,00
1,54	1,54	100,00
1,78	1,77	99,44
2,03	2,02	99,50
2,27	2,28	99,56
2,47	2,48	99,60
2,71	2,70	99,63
3,07	3,05	99,34
3,25	3,26	99,69
3,49	3,49	100,00
3,74	3,76	99,47
4,03	4,03	100,00
4,23	4,24	99,76
4,52	4,54	99,56
4,81	4,81	100,00

Kalibrasi alat ukur sensor tegangan

Alat Ukur (V)	Pembanding (V)	Akurasi (%)
1,51	1,50	99,34
2,92	2,90	99,32
4,32	4,30	99,54
5,80	5,80	100,00
7,34	7,30	99,46
8,82	8,80	99,77
10,1	10,10	100,00
11,5	11,50	100,00
12,98	12,90	99,38
14,12	14,10	99,86
15,37	15,30	99,54
17,46	17,40	99,66
18,50	18,40	99,46
19,85	19,70	99,24
21,33	21,20	99,39
22,79	22,60	99,17
23,98	23,80	99,25
25,65	25,50	99,42
27,11	27,00	99,59

Kondisi Berbayang 2 cell

Data I		Data II		Data III	
V	I	V	I	V	I
0.50	2.81	0.37	2.86	0.42	2.81
0.50	2.76	0.40	2.86	0.45	2.81
0.53	2.76	0.42	2.86	0.48	2.81
0.56	2.76	0.48	2.86	0.48	2.81
0.56	2.76	0.50	2.86	0.48	2.81
0.58	2.76	0.50	2.86	0.50	2.81
0.58	2.76	0.56	2.86	0.53	2.81
0.61	2.76	0.56	2.86	0.53	2.81
0.61	2.76	0.58	2.81	0.56	2.81
0.61	2.76	2.33	2.81	0.56	2.81
0.61	2.76	4.88	2.81	0.61	2.81
0.66	2.76	4.96	2.81	0.69	2.81
1.03	2.76	7.21	2.56	1.96	2.81
1.99	2.76	7.92	2.17	2.01	2.81
2.01	2.76	7.92	2.17	2.12	2.81
2.01	2.76	8.35	1.83	4.98	2.81
2.01	2.76	8.35	1.83	7.08	2.61
2.07	2.76	8.35	1.83	7.10	2.61
2.09	2.76	8.37	1.78	7.13	2.61
2.23	2.76	8.80	1.34	7.95	2.17
2.31	2.76	8.90	1.20	7.95	2.12
4.64	2.76	9.01	1.10	8.35	1.83
4.80	2.76	9.01	1.05	8.35	1.83
4.82	2.76	9.01	1.05	8.59	1.59
4.90	2.76	9.06	1.00	8.64	1.54
7.05	2.56	9.09	1.00	8.64	1.54
7.90	2.17	9.20	0.85	8.64	1.54
7.90	2.17	9.22	0.80	8.82	1.34
7.90	2.17	9.30	0.71	8.98	1.10
8.59	1.54	9.33	0.66	9.20	0.85
8.59	1.54	9.41	0.61	9.22	0.80
8.77	1.34	9.41	0.61	9.25	0.76
8.85	1.20	9.43	0.56	9.30	0.71
8.88	1.20	9.43	0.56	9.41	0.61
8.98	1.05	9.43	0.56	9.43	0.56
9.14	0.80	9.70	0.46	9.46	0.56
9.22	0.71	9.96	0.46	9.49	0.56
9.22	0.71	9.99	0.46	9.91	0.46
9.27	0.66	10.79	0.46	11.18	0.46
9.30	0.61	10.92	0.46	12.27	0.46
9.35	0.56	10.92	0.46	12.38	0.46
9.38	0.56	11.24	0.46	12.43	0.46
9.49	0.51	11.95	0.46	12.43	0.46
9.57	0.46	12.22	0.46	13.38	0.46
10.65	0.46	12.53	0.46	14.34	0.46
11.50	0.46	13.20	0.46	15.13	0.46
11.90	0.46	13.20	0.46	16.30	0.41
12.83	0.46	13.83	0.46	17.04	0.41
13.12	0.41	13.86	0.46	17.62	0.41
13.49	0.41	14.55	0.46	18.55	0.41
14.10	0.41	14.60	0.46	18.97	0.41
14.65	0.41	14.79	0.46	19.48	0.41
15.13	0.41	14.84	0.46	19.72	0.41
15.34	0.41	16.85	0.41	20.27	0.41
15.95	0.41	17.83	0.41	20.30	0.36
16.06	0.41	18.26	0.41	20.35	0.36
16.30	0.41	18.50	0.41	20.43	0.32
17.30	0.41	19.48	0.41	20.51	0.27
17.89	0.41	19.69	0.41	20.51	0.27
17.94	0.41	20.06	0.41	20.51	0.27
18.05	0.41	20.09	0.41	20.51	0.27
18.87	0.41	20.19	0.41	20.51	0.27
19.19	0.41	20.33	0.36	20.54	0.27
19.69	0.41	20.46	0.32	20.54	0.22
20.01	0.41	20.51	0.27	20.54	0.22
20.03	0.36	20.51	0.27	20.70	0.07
20.27	0.32	20.54	0.27	20.70	0.07
20.33	0.32	20.54	0.27	20.72	0.07
20.40	0.27	20.54	0.27	20.72	0.07
20.40	0.22	20.54	0.22	20.72	0.07
20.40	0.22	20.72	0.07	20.72	0.07
20.43	0.22	20.75	0.07	20.72	0.07
20.62	0.07	20.75	0.07	20.72	0.07
20.62	0.02	20.75	0.07	20.72	0.07

Kondisi Berbayang 4 cell

Data I		Data II		Data III	
V	I	V	I	V	I
0.42	2.95	0.50	3.00	0.48	3.02
0.48	2.95	0.50	3.00	0.53	2.91
0.56	2.95	0.56	3.00	0.56	2.91
0.56	2.95	0.58	2.95	0.56	2.91
0.56	2.95	0.58	2.95	0.58	2.91
0.58	2.95	0.69	2.95	0.66	2.91
0.61	2.95	0.69	2.95	0.69	2.91
0.61	2.95	0.72	2.95	0.80	2.91
0.64	2.95	0.82	2.95	1.01	2.91
0.64	2.95	2.09	2.95	2.04	2.91
0.72	2.95	2.25	2.95	2.54	2.91
0.74	2.95	2.25	2.95	4.93	2.91
0.77	2.95	2.28	2.95	4.93	2.86
2.17	2.95	2.33	2.95	4.98	2.86
2.20	2.95	2.36	2.95	5.38	2.86
2.23	2.95	2.41	2.95	7.42	2.66
2.25	2.95	2.41	2.95	8.11	2.27
2.25	2.95	2.46	2.95	8.16	2.27
2.28	2.95	2.46	2.95	8.16	2.22
2.36	2.95	5.11	2.95	8.22	2.22
2.41	2.91	5.19	2.95	8.59	2.07
7.50	2.71	5.19	2.95	8.69	1.98
7.55	2.66	5.22	2.95	8.90	1.93
7.63	2.66	5.22	2.95	8.96	1.93
7.66	2.61	5.30	2.95	8.98	1.83
8.32	2.27	7.42	2.71	10.44	1.68
8.37	2.22	7.45	2.71	11.74	1.64
8.69	2.03	7.53	2.71	11.79	1.64
8.75	1.93	7.55	2.71	11.82	1.59
8.80	1.88	7.55	2.66	13.22	1.59
8.82	1.88	7.69	2.66	14.60	1.59
9.06	1.64	8.35	2.27	14.65	1.59
9.09	1.64	8.35	2.22	14.65	1.59
10.44	1.59	8.75	1.88	14.76	1.59
10.44	1.59	8.75	1.88	14.92	1.59
11.85	1.59	9.06	1.64	17.60	1.59
11.85	1.59	9.06	1.64	17.78	1.59
11.95	1.59	9.06	1.64	17.78	1.59
13.57	1.59	9.20	1.64	17.81	1.59
13.57	1.59	9.38	1.64	19.05	1.59
13.59	1.59	10.57	1.64	19.11	1.59
13.62	1.59	10.65	1.64	19.27	1.59
13.62	1.59	10.73	1.64	19.48	1.49
16.54	1.59	13.57	1.64	19.77	1.39
16.64	1.59	13.62	1.59	20.01	1.24
16.67	1.59	13.83	1.59	20.25	1.10
18.02	1.59	16.75	1.59	20.56	1.00
18.02	1.59	16.77	1.59	20.67	0.80
18.10	1.59	18.26	1.59	20.78	0.71
18.23	1.59	18.31	1.59	20.80	0.66
19.48	1.54	19.48	1.59	20.88	0.66
19.50	1.54	19.50	1.54	20.91	0.56
19.98	1.39	19.77	1.49	20.96	0.51
20.33	1.29	20.19	1.24	20.99	0.46
20.54	1.15	20.43	1.10	21.07	0.46
20.56	1.15	20.64	0.90	21.07	0.36
20.70	1.05	20.72	0.85	21.09	0.36
20.88	0.90	20.83	0.76	21.09	0.36
21.01	0.76	20.91	0.66	21.09	0.32
21.01	0.66	21.01	0.56	21.12	0.32
21.04	0.66	21.12	0.46	21.12	0.32
21.12	0.66	21.17	0.41	21.15	0.27
21.33	0.51	21.20	0.36	21.15	0.27
21.36	0.46	21.20	0.36	21.17	0.27
21.41	0.36	21.23	0.36	21.17	0.27
21.44	0.36	21.25	0.36	21.17	0.27
21.46	0.32	21.28	0.32	21.17	0.27
21.46	0.32	21.28	0.32	21.17	0.27
21.52	0.27	21.31	0.27	21.17	0.27
21.54	0.27	21.33	0.27	21.25	0.27
21.57	0.27	21.33	0.22	21.33	0.07
21.60	0.22	21.46	0.12	21.36	0.07
21.76	0.07	21.52	0.07	21.36	0.07
21.76	0.07	21.52	0.07	21.36	0.07

LAMPIRAN 4 : Data Penelitian

Kondisi Normal

Data I		Data II		Data III	
V	I	V	I	V	I
0.66	4.57	0.82	2.32	0.19	1.34
0.72	4.57	0.85	2.32	0.19	1.34
0.77	4.32	0.85	2.32	0.21	1.34
3.55	4.27	0.87	2.32	0.24	1.34
11.47	4.23	0.95	2.32	0.26	1.34
15.66	4.18	8.16	2.17	0.29	1.34
17.73	3.69	14.28	2.12	0.32	1.34
17.81	3.69	17.22	2.12	0.45	1.34
18.58	3.35	18.81	1.88	1.22	1.34
18.63	3.30	20.03	1.24	1.48	1.29
18.97	3.30	20.09	1.20	3.92	1.29
19.24	2.91	20.09	1.05	4.05	1.29
19.24	2.91	20.40	0.85	5.06	1.29
19.50	2.91	20.51	0.80	6.84	1.29
19.66	2.61	20.67	0.66	6.89	1.29
19.85	2.56	20.70	0.61	6.89	1.29
19.93	2.32	20.86	0.51	10.10	1.29
20.14	2.12	20.91	0.51	11.13	1.29
20.17	2.12	20.96	0.46	11.90	1.29
20.30	2.07	21.01	0.41	12.35	1.29
20.30	1.93	21.07	0.36	12.40	1.29
20.33	1.93	21.09	0.36	13.09	1.24
20.33	1.93	21.12	0.36	14.07	1.24
20.35	1.78	21.15	0.32	14.92	1.24
20.59	1.64	21.15	0.32	15.79	1.24
20.67	1.64	21.17	0.27	16.06	1.20
20.70	1.54	21.20	0.27	17.07	1.20
20.70	1.54	21.20	0.27	17.38	1.15
20.75	1.44	21.23	0.27	17.49	1.15
20.78	1.44	21.23	0.27	17.73	1.10
20.88	1.34	21.23	0.27	17.73	1.10
20.93	1.34	21.23	0.27	18.02	1.10
20.99	1.20	21.23	0.22	18.23	1.05
21.01	1.20	21.25	0.22	18.36	1.05
21.07	1.15	21.25	0.22	18.47	1.00
21.12	1.15	21.28	0.22	18.55	0.95
21.20	1.05	21.28	0.22	18.79	0.95
21.23	0.95	21.28	0.22	18.87	0.90
21.25	0.90	21.28	0.22	19.03	0.90
21.25	0.85	21.28	0.22	19.08	0.90
21.33	0.85	21.28	0.22	19.40	0.80
21.41	0.76	21.28	0.22	19.42	0.80
21.41	0.76	21.31	0.22	19.56	0.76
21.52	0.61	21.31	0.22	19.64	0.71
21.52	0.56	21.31	0.22	19.82	0.61
21.57	0.56	21.31	0.22	19.87	0.61
21.57	0.56	21.33	0.22	19.93	0.61
21.60	0.41	21.33	0.22	19.95	0.56
21.65	0.41	21.36	0.22	20.01	0.51
21.70	0.36	21.36	0.22	20.17	0.46
21.73	0.27	21.36	0.22	20.25	0.46
21.76	0.22	21.36	0.22	20.38	0.36
21.84	0.07	21.36	0.22	20.43	0.27
22.10	0.07	21.36	0.22	20.54	0.22

Kondisi Berbayang 8 cell Vertikal

10%		20%		30%		40%		50%		60%	
V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
0.56	3.54	0.45	2.81	0.32	1.98	0.42	1.29	0.24	0.80	0.11	0.41
0.56	3.54	0.85	2.81	0.32	1.98	0.48	1.29	0.26	0.80	0.11	0.41
0.66	3.49	1.01	2.81	0.37	1.93	0.87	1.29	0.29	0.80	0.13	0.41
0.66	3.49	4.90	2.81	1.46	1.93	4.98	1.29	1.43	0.80	0.16	0.41
0.72	3.49	8.08	2.71	2.70	1.93	6.25	1.29	2.94	0.76	0.40	0.41
9.46	3.44	10.04	2.66	7.05	1.93	8.53	1.24	5.80	0.76	1.27	0.41
12.83	3.39	12.69	2.66	9.06	1.93	9.49	1.20	6.52	0.76	1.91	0.41
12.83	3.39	15.26	2.66	9.09	1.88	11.69	1.20	7.26	0.76	3.76	0.41
17.57	3.10	15.40	2.66	11.00	1.88	13.99	1.20	7.26	0.76	4.98	0.41
17.62	3.05	18.47	2.37	14.31	1.88	17.33	1.15	9.27	0.71	5.57	0.41
18.34	2.71	19.00	2.17	14.36	1.83	17.52	1.15	10.44	0.71	5.94	0.41
18.79	2.42	19.37	1.78	19.13	1.78	18.55	1.15	11.21	0.71	6.33	0.41
18.92	2.32	19.48	1.78	19.40	1.64	19.98	1.15	13.01	0.71	6.33	0.41
19.27	2.03	19.53	1.68	19.58	1.54	20.01	1.10	13.17	0.71	6.36	0.41
19.56	1.83	19.69	1.54	19.72	1.44	20.17	1.00	16.06	0.71	6.36	0.41
19.72	1.68	19.77	1.54	19.82	1.34	20.22	0.95	17.17	0.66	7.08	0.41
19.82	1.54	19.90	1.34	19.93	1.29	20.30	0.90	18.92	0.66	7.23	0.41
19.82	1.54	20.03	1.24	20.03	1.20	20.33	0.90	19.16	0.66	9.65	0.41
19.85	1.54	20.06	1.20	20.09	1.15	20.35	0.85	20.27	0.66	9.91	0.41
19.95	1.44	20.11	1.15	20.09	1.15	20.46	0.76	20.46	0.61	10.97	0.36
20.11	1.29	20.14	1.10	20.19	1.00	20.46	0.76	20.59	0.56	14.15	0.36
20.11	1.29	20.19	1.10	20.30	0.95	20.54	0.71	20.64	0.51	15.45	0.36
20.33	1.10	20.30	1.00	20.33	0.90	20.54	0.71	20.64	0.51	16.06	0.36
20.33	1.10	20.43	0.85	20.35	0.90	20.54	0.66	20.67	0.46	17.46	0.36
20.33	1.05	20.46	0.80	20.35	0.85	20.59	0.66	20.70	0.46	19.77	0.36
20.43	0.95	20.48	0.76	20.35	0.85	20.59	0.66	20.70	0.46	20.35	0.36
20.51	0.85	20.54	0.76	20.46	0.76	20.62	0.61	20.80	0.36	20.43	0.36
20.56	0.80	20.62	0.66	20.46	0.76	20.62	0.61	20.80	0.36	20.54	0.36
20.59	0.76	20.62	0.61	20.54	0.66	20.67	0.56	20.86	0.32	20.64	0.32
20.64	0.76	20.67	0.61	20.62	0.61	20.67	0.56	20.86	0.32	20.70	0.32
20.64	0.71	20.70	0.56	20.64	0.56	20.70	0.51	20.86	0.32	20.75	0.27
20.67	0.66	20.72	0.56	20.70	0.51	20.72	0.51	20.86	0.32	20.75	0.27
20.72	0.61	20.78	0.51	20.75	0.41	20.72	0.51	20.88	0.32	20.78	0.27
20.78	0.56	20.83	0.46	20.80	0.36	20.75	0.51	20.88	0.27	20.80	0.27
20.80	0.51	20.86	0.41	20.83	0.32	20.75	0.46	20.88	0.27	20.80	0.27
20.86	0.46	20.88	0.36	20.86	0.32	20.75	0.46	20.88	0.27	20.86	0.22
20.88	0.41	20.88	0.32	20.88	0.27	20.78	0.46	20.91	0.27	20.86	0.22
20.91	0.41	20.91	0.32	20.91	0.22	20.78	0.41	20.91	0.27	20.86	0.22
20.91	0.41	20.91	0.32	20.93	0.22	20.83	0.36	20.91	0.27	20.88	0.22
20.93	0.36	20.93	0.32	20.93	0.22	20.86	0.36	20.96	0.22	20.88	0.22
20.99	0.32	20.93	0.32	20.93	0.22	20.88	0.32	20.96	0.22	20.88	0.22
20.99	0.32	20.96	0.27	20.96	0.22	20.91	0.32	20.96	0.22	20.88	0.22
21.01	0.32	20.96	0.27	20.96	0.22	20.91	0.32	20.96	0.22	20.88	0.22
21.01	0.27	20.96	0.27	21.09	0.07	20.93	0.27	20.96	0.22	20.88	0.22
21.04	0.27	20.99	0.27	21.09	0.02	20.93	0.27	20.96	0.22	21.07	0.02
21.04	0.27	20.99	0.22	21.09	0.02	20.96	0.22	20.96	0.22	21.07	0.02
21.07	0.27	20.99	0.22	21.09	0.02	20.96	0.22	21.12	0.02	21.07	0.02
21.07	0.22	21.01	0.22	21.09	0.02	20.99	0.22	21.12	0.02	21.07	0.02
21.09	0.22	21.01	0.22	21.09	0.02	21.01	0.22	21.12	0.02	21.07	0.02
21.09	0.22	21.01	0.22	21.09	0.02	21.12	0.02	21.12	0.02	21.09	0.02
21.23	0.02	21.15	0.02	21.12	0.02	21.12	0.02	21.12	0.02	21.09	0.02
21.25	0.02	21.15	0.02	21.12	0.02	21.12	0.02	21.12	0.02	21.09	0.02
21.25	0.02	21.15	0.02	21.15	0.02	21.12	0.02	21.12	0.02	21.09	0.02
21.25	0.02	21.15	0.02	21.15	0.02	21.15	0.02	21.15	0.02	21.09	0.02

LAMPIRAN 5 : Data Penelitian

Kondisi Berbayang 4 cell/ Horizontal

25%		50%		75%		100%	
V	I	V	I	V	I	V	I
0.69	4.13	0.58	4.13	0.61	4.13	0.69	4.13
0.72	4.13	0.58	4.13	0.61	4.13	0.74	4.13
0.74	4.13	0.61	4.13	0.64	4.13	0.77	4.13
3.13	4.13	0.72	4.08	0.64	4.13	0.80	4.13
3.15	4.13	3.50	4.08	0.64	4.13	0.80	4.13
3.15	4.13	3.95	4.08	0.64	4.08	0.80	4.13
3.34	4.13	4.51	4.08	0.64	4.08	0.80	4.13
3.37	4.13	4.82	4.08	0.72	4.08	0.80	4.13
6.70	3.83	6.60	3.88	4.29	4.08	0.90	4.13
6.76	3.79	6.63	3.88	4.29	4.08	3.15	4.13
6.81	3.79	6.68	3.83	6.65	3.83	3.21	4.13
8.56	3.10	6.73	3.83	6.65	3.83	3.37	4.13
8.61	3.05	6.89	3.74	6.68	3.83	4.21	4.13
8.67	3.05	7.95	2.95	6.73	3.83	6.68	3.79
9.86	3.05	7.98	2.91	8.03	2.91	7.92	2.91
11.53	3.05	7.98	2.91	8.03	2.91	7.92	2.81
11.58	3.05	8.00	2.86	8.48	2.32	7.92	2.81
11.66	3.05	8.03	2.86	8.48	2.32	7.92	2.81
14.55	3.05	8.48	2.32	8.48	2.27	8.06	2.71
17.36	3.00	8.53	2.27	8.77	1.88	8.43	2.22
18.10	2.66	8.56	2.27	8.77	1.88	8.43	2.22
18.47	2.42	8.72	2.22	8.77	1.88	8.45	2.17
18.52	2.37	9.91	2.12	8.77	1.88	8.64	1.83
18.55	2.37	9.99	2.12	9.09	1.39	8.67	1.83
18.76	2.17	10.07	2.12	9.22	1.20	8.88	1.54
18.81	2.12	10.12	2.12	9.22	1.20	8.88	1.54
18.84	2.12	11.90	2.12	12.53	1.10	8.96	1.34
19.16	1.78	12.14	2.12	12.53	1.10	8.98	1.29
19.24	1.78	12.24	2.07	15.87	1.10	9.12	1.20
19.24	1.78	12.32	2.07	18.97	1.05	9.12	1.10
19.37	1.64	13.89	2.07	18.97	1.05	9.17	1.05
19.42	1.54	16.03	2.07	19.72	1.00	9.22	0.95
19.50	1.54	18.02	2.07	19.98	0.90	9.25	0.95
19.69	1.29	18.92	1.93	20.14	0.76	9.25	0.80
19.77	1.24	19.34	1.64	20.27	0.66	9.33	0.80
19.80	1.20	19.50	1.54	20.33	0.61	9.38	0.61
19.85	1.20	19.80	1.24	20.40	0.51	9.41	0.56
19.90	1.10	19.90	1.20	20.40	0.51	9.51	0.41
19.98	0.95	19.93	1.10	20.40	0.51	9.57	0.36
20.03	0.95	19.98	1.05	20.40	0.51	9.59	0.32
20.14	0.80	20.03	1.00	20.46	0.46	9.78	0.27
20.25	0.71	20.14	0.90	20.51	0.46	10.92	0.27
20.30	0.61	20.17	0.90	20.56	0.36	11.79	0.27
20.35	0.56	20.22	0.80	20.59	0.36	12.77	0.27
20.40	0.51	20.30	0.71	20.62	0.32	13.99	0.27
20.43	0.46	20.35	0.66	20.62	0.32	15.21	0.27
20.48	0.41	20.46	0.56	20.64	0.27	15.74	0.27
20.51	0.36	20.51	0.51	20.64	0.27	16.69	0.27
20.54	0.32	20.56	0.41	20.64	0.27	17.91	0.27
20.56	0.32	20.59	0.41	20.67	0.27	18.50	0.27
20.59	0.27	20.62	0.36	20.67	0.27	19.66	0.22
20.62	0.27	20.64	0.32	20.70	0.22	19.93	0.22
20.62	0.27	20.67	0.32	20.70	0.22	20.03	0.22
20.64	0.22	20.67	0.27	20.72	0.22	20.09	0.22
20.64	0.22	20.70	0.27	20.72	0.22	20.11	0.22
20.80	0.02	20.72	0.22	20.72	0.22	20.38	0.17
20.80	0.02	20.75	0.22	20.72	0.22	20.38	0.02
20.80	0.02	20.75	0.22	20.88	0.02	20.46	0.02
20.83	0.02	20.78	0.22	20.88	0.02	20.59	0.02
20.83	0.02	20.88	0.02	20.88	0.02	20.59	0.02

Kondisi Berbayang 8 cell/ Horizontal

25%		50%		75%		100%	
V	I	V	I	V	I	V	I
0.82	4.18	0.72	4.03	0.56	4.13	0.56	4.08
0.93	4.18	3.68	3.98	0.58	4.13	0.61	4.08
1.06	4.13	3.76	3.98	0.58	4.13	0.61	4.08
1.32	4.13	4.03	3.98	0.64	4.13	0.64	4.08
3.87	4.13	7.15	3.64	0.77	4.13	0.66	4.08
3.98	4.13	8.22	2.76	4.21	4.13	0.87	4.08
4.24	4.13	8.24	2.76	4.98	4.13	0.90	4.03
8.67	2.95	8.67	2.22	7.26	3.74	0.93	4.03
8.75	2.95	8.72	2.17	7.45	3.64	1.01	4.03
8.96	2.95	9.22	1.88	7.63	3.49	2.84	3.98
12.03	2.95	10.81	1.88	7.69	3.49	2.92	3.98
14.28	2.95	11.16	1.88	8.69	2.37	2.92	3.98
17.20	2.95	14.57	1.88	8.69	2.32	3.23	3.98
18.23	2.66	16.14	1.88	8.98	1.93	6.52	3.79
18.68	2.42	18.84	1.78	8.98	1.88	6.52	3.79
18.71	2.42	18.87	1.78	9.17	1.64	8.00	2.76
19.29	1.93	19.11	1.68	9.17	1.59	8.03	2.76
19.82	1.49	19.11	1.64	9.30	1.44	8.03	2.76
19.93	1.39	19.32	1.54	9.30	1.39	8.03	2.71
20.01	1.29	19.58	1.39	9.41	1.24	8.06	2.66
20.17	1.10	19.77	1.24	9.62	1.15	8.08	2.66
20.22	1.10	20.01	1.05	10.55	1.15	8.37	2.27
20.38	0.90	20.03	1.00	10.71	1.15	8.40	2.27
20.51	0.71	20.11	0.90	11.53	1.15	8.64	1.83
20.54	0.71	20.22	0.80	12.61	1.15	8.80	1.59
20.54	0.71	20.27	0.76	12.67	1.10	8.80	1.54
20.59	0.66	20.30	0.71	12.91	1.10	8.82	1.54
20.62	0.61	20.35	0.66	13.86	1.10	9.01	1.20
20.64	0.56	20.40	0.61	14.89	1.10	9.04	1.20
20.70	0.56	20.40	0.61	16.75	1.10	9.20	0.90
20.70	0.51	20.46	0.56	17.83	1.10	9.27	0.76
20.72	0.46	20.46	0.56	18.92	1.10	9.38	0.61
20.75	0.46	20.48	0.51	19.58	1.05	9.43	0.51
20.78	0.41	20.54	0.46	19.64	1.00	9.49	0.46
20.78	0.41	20.54	0.46	19.87	0.95	9.54	0.36
20.80	0.41	20.56	0.41	19.95	0.90	9.57	0.32
20.80	0.41	20.59	0.41	20.01	0.90	9.62	0.27
20.80	0.36	20.62	0.36	20.17	0.80	9.67	0.27
20.83	0.36	20.64	0.36	20.30	0.71	9.73	0.22
20.83	0.36	20.64	0.36	20.33	0.71	10.02	0.22
20.83	0.36	20.64	0.36	20.35	0.71	10.94	0.22
20.86	0.32	20.70	0.32	20.40	0.66	11.85	0.22
20.88	0.32	20.70	0.32	20.46	0.61	12.59	0.22
20.88	0.32	20.70	0.32	20.51	0.61	13.04	0.22
20.88	0.32	20.70	0.32	20.54	0.56	13.57	0.22
20.88	0.32	20.70	0.32	20.56	0.56	14.23	0.22
20.88	0.27	20.72	0.27	20.59	0.51	15.08	0.22
20.88	0.27	20.72	0.27	20.64	0.46	15.48	0.22
20.91	0.27	20.72	0.27	20.67	0.46	15.74	0.22
20.91	0.27	20.72	0.27	20.70	0.46	16.03	0.22
20.91	0.27	20.72	0.27	20.72	0.41	16.69	0.22
20.91	0.27	20.72	0.27	20.75	0.36	16.96	0.22
20.91	0.27	20.75	0.27	20.78	0.36	17.65	0.22
20.91	0.27	20.88	0.07	20.83	0.32	17.68	0.22
20.93	0.22	20.88	0.07	20.86	0.32	17.78	0.22
21.04	0.07	20.88	0.07	20.86	0.27	17.81	0.22
21.04	0.07	20.88	0.07	20.88	0.27	19.98	0.07
21.04	0.07	20.88	0.07	20.88	0.27	19.98	0.07
21.07	0.07	20.88	0.07	20.91	0.27	19.98	0.02
21.07	0.07	20.88	0.07	20.91	0.27	20.01	0.02

LAMPIRAN 6 : Data Penelitian

Kondisi Normal						Kondisi Berbayang 8 cel/ Vertikal						Kondisi Berbayang 4 cel/ Horizontal						Kondisi Berbayang 8 cel/ Horizontal					
Data I		Data II		Data III		Data I		Data II		Data III		Data I		Data II		Data III		Data I		Data II		Data III	
V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
0.42	3.44	0.37	3.54	0.45	3.59	0.26	1.83	0.29	1.88	0.26	1.88	0.77	4.23	0.64	4.32	0.53	4.57	0.45	3.59	0.42	3.49	0.37	3.54
0.42	3.44	0.40	3.54	0.48	3.59	0.26	1.83	0.32	1.88	0.26	1.88	0.77	4.23	0.64	4.32	0.53	4.42	0.48	3.59	0.42	3.44	0.42	3.54
0.45	3.44	2.60	3.49	0.50	3.59	0.29	1.83	0.32	1.88	0.29	1.88	0.77	4.23	0.66	4.32	0.53	4.42	0.48	3.59	0.50	3.44	0.48	3.54
0.48	3.44	2.60	3.49	9.67	3.54	0.29	1.83	0.34	1.88	0.37	1.88	0.77	4.23	0.69	4.32	0.58	4.37	0.53	3.59	2.46	3.44	0.56	3.54
0.48	3.39	5.91	3.44	10.57	3.54	0.29	1.83	0.37	1.88	0.40	1.88	0.77	4.23	0.69	4.32	0.58	4.37	0.53	3.59	2.65	3.44	2.31	3.54
0.50	3.39	12.35	3.44	12.72	3.54	0.32	1.83	0.37	1.88	0.40	1.88	0.82	4.23	0.69	4.32	0.61	4.37	0.72	3.59	5.72	3.39	2.36	3.54
2.41	3.39	12.38	3.44	17.04	3.10	0.32	1.83	0.53	1.83	0.40	1.88	0.87	4.23	0.72	4.32	0.61	4.37	2.49	3.59	5.75	3.39	2.36	3.49
5.75	3.39	12.40	3.39	17.83	2.81	0.32	1.83	0.56	1.83	0.40	1.88	0.90	4.23	0.72	4.23	0.61	4.37	2.99	3.59	7.71	2.71	2.39	3.49
8.99	3.39	16.75	3.05	17.86	2.81	0.32	1.83	0.72	1.83	0.42	1.88	2.89	4.23	0.77	4.18	0.61	4.32	5.83	3.49	8.06	2.42	2.41	3.49
12.19	3.35	16.77	3.05	18.76	2.27	0.32	1.83	1.59	1.83	0.42	1.88	2.92	4.23	0.90	4.18	0.61	4.32	5.83	3.49	8.24	2.32	2.44	3.49
14.89	3.24	17.60	2.81	18.97	2.07	0.34	1.83	1.64	1.83	0.45	1.88	2.92	4.23	2.76	4.18	0.66	4.32	7.58	2.91	8.27	2.27	2.49	3.49
15.00	3.24	17.62	2.71	19.00	2.07	0.34	1.83	2.99	1.83	1.40	1.88	2.97	4.23	2.76	4.18	0.66	4.32	7.66	2.86	10.28	2.27	2.57	3.49
16.46	3.05	17.65	2.71	19.37	1.78	0.34	1.83	3.23	1.83	1.48	1.88	3.02	4.23	2.86	4.08	0.66	4.32	8.29	2.32	10.39	2.22	5.72	3.44
16.72	3.04	18.10	2.47	19.45	1.73	0.42	1.83	3.23	1.83	1.48	1.88	3.10	4.18	2.94	4.08	2.68	4.32	14.52	2.27	10.57	2.22	5.78	3.44
16.81	3.00	18.15	2.42	19.50	1.64	0.56	1.83	3.23	1.83	1.86	1.88	3.13	4.18	3.10	4.08	2.73	4.18	16.99	2.22	10.62	2.22	7.58	2.91
16.81	3.00	19.16	1.73	19.61	1.59	1.32	1.83	3.23	1.83	3.26	1.88	6.39	4.03	3.13	4.08	2.73	4.18	18.58	1.78	12.51	2.22	7.58	2.86
17.68	2.76	19.29	1.68	19.72	1.49	1.35	1.83	3.29	1.83	5.19	1.88	6.39	4.03	6.23	4.08	2.81	4.18	18.89	1.59	12.56	2.22	7.61	2.86
17.73	2.76	19.48	1.44	19.72	1.49	1.38	1.83	5.09	1.83	5.22	1.88	6.49	3.98	7.74	3.44	2.81	4.18	19.34	1.24	12.59	2.22	8.27	2.32
18.26	2.47	19.74	1.27	19.98	1.20	3.13	1.83	6.73	1.83	5.22	1.88	7.84	3.25	7.76	3.15	2.94	4.18	19.53	1.10	14.68	2.22	12.69	2.32
18.31	2.47	19.74	1.27	19.98	1.20	3.18	1.83	6.76	1.83	5.25	1.88	8.32	2.71	8.24	2.91	6.39	4.08	19.77	1.05	16.77	2.22	12.80	2.32
18.89	2.07	19.80	1.15	20.09	1.10	3.23	1.83	6.76	1.83	6.81	1.88	8.32	2.66	8.27	2.81	7.82	3.35	19.82	0.85	18.02	2.12	13.04	2.32
18.97	2.07	20.01	0.95	20.09	1.10	4.88	1.83	6.81	1.83	6.89	1.83	8.59	2.32	8.27	2.76	8.24	2.91	19.87	0.85	18.39	1.99	14.87	2.32
18.97	2.07	20.03	0.95	20.22	0.95	4.93	1.83	6.84	1.83	6.94	1.83	8.59	2.32	8.61	2.51	8.29	2.91	19.99	0.80	18.42	1.99	17.09	2.32
18.97	2.03	20.14	0.90	20.27	0.90	4.96	1.83	6.94	1.83	6.97	1.83	8.61	2.32	8.82	2.22	8.85	2.47	19.95	0.76	18.66	1.78	17.12	2.27
19.29	1.78	20.17	0.76	20.35	0.80	4.98	1.83	8.51	1.83	7.00	1.83	8.61	2.32	8.85	2.12	8.85	2.27	19.98	0.66	18.84	1.68	18.10	2.12
19.50	1.59	20.19	0.76	20.38	0.80	5.06	1.83	8.51	1.83	7.02	1.83	8.85	2.07	9.70	2.12	8.85	2.22	19.98	0.66	19.03	1.54	18.39	1.98
19.56	1.54	20.25	0.76	20.43	0.71	5.09	1.83	8.51	1.83	7.10	1.83	8.85	2.07	9.73	2.07	9.94	2.17	20.01	0.61	19.24	1.34	18.44	1.99
20.01	1.15	20.25	0.76	20.46	0.66	6.84	1.83	8.51	1.83	8.82	1.83	9.99	2.03	9.78	2.03	10.02	2.17	20.09	0.61	19.27	1.34	18.71	1.78
20.11	1.10	20.27	0.71	20.46	0.66	6.89	1.83	10.34	1.83	10.47	1.83	10.12	2.03	11.10	2.03	11.42	2.17	20.09	0.61	19.32	1.29	18.87	1.68
20.19	1.05	20.30	0.71	20.46	0.66	8.32	1.83	10.34	1.83	10.47	1.83	11.39	1.98	11.21	2.03	12.88	2.12	20.14	0.56	19.34	1.24	18.89	1.64
20.19	0.95	20.35	0.71	20.51	0.61	8.35	1.83	10.36	1.83	10.47	1.83	11.42	1.98	11.29	2.03	12.96	2.12	20.14	0.46	19.48	1.15	19.03	1.59
20.25	0.85	20.38	0.66	20.54	0.56	8.37	1.83	10.41	1.83	10.49	1.83	11.45	1.98	12.53	2.03	12.96	2.12	20.14	0.46	19.53	1.10	19.05	1.54
20.27	0.76	20.40	0.66	20.56	0.56	10.12	1.83	12.06	1.83	10.52	1.83	12.88	1.98	12.59	1.98	15.71	2.07	20.17	0.46	19.56	1.10	19.19	1.44
20.48	0.66	20.43	0.61	20.59	0.51	10.15	1.78	12.08	1.83	10.52	1.83	15.74	1.98	12.61	1.98	17.15	2.07	20.22	0.41	19.58	1.05	19.48	1.15
20.48	0.61	20.43	0.61	20.59	0.46	10.18	1.78	12.08	1.83	10.57	1.83	15.79	1.98	14.07	1.93	17.33	2.07	20.25	0.41	19.61	0.95	19.56	1.10
20.54	0.61	20.46	0.61	20.59	0.46	10.20	1.78	12.32	1.83	10.65	1.83	15.85	1.98	16.69	1.93	18.58	2.07	20.25	0.41	19.69	0.95	19.58	1.05
20.59	0.51	20.46	0.56	20.59	0.41	11.74	1.78	12.35	1.83	12.14	1.83	17.15	1.98	16.75	1.93	18.63	2.07	20.25	0.41	19.80	0.85	19.66	1.00
20.62	0.46	20.46	0.56	20.59	0.41	11.77	1.78	12.35	1.83	12.16	1.83	18.42	1.98	16.77	1.93	19.11	1.98	20.25	0.36	19.82	0.80	19.72	0.95
20.67	0.46	20.46	0.46	20.62	0.36	11.90	1.78	13.83	1.83	12.22	1.83	19.45	1.68	19.05	1.93	19.37	1.88	20.25	0.32	19.82	0.80	19.74	0.90
20.67	0.41	20.46	0.46	20.64	0.36	11.93	1.78	13.89	1.83	12.32	1.83	19.58	1.59	19.16	1.88	19.53	1.83	20.25	0.32	19.87	0.71	19.87	0.76
20.70	0.41	20.48	0.41	20.67	0.36	11.95	1.78	15.58	1.83	13.97	1.83	19.66	1.54	19.27	1.83	19.64	1.73	20.25	0.32	19.90	0.71	19.95	0.71
20.70	0.36	20.48	0.36	20.67	0.36	11.95	1.78	15.85	1.83	15.77	1.83	19.72	1.49	19.27	1.83	19.77	1.39	20.27	0.27	19.95	0.66	19.98	0.66
20.72	0.36	20.51	0.36	20.67	0.36	13.65	1.78	15.85	1.83	15.79	1.83	19.80	1.39	19.37	1.73	19.85	1.29	20.27	0.27	19.98	0.61	20.06	0.61
20.75	0.36	20.51	0.36	20.67	0.32	13.67	1.78	15.90	1.83	16.14	1.83	19.87	1.34	19.48	1.73	19.90	1.15	20.27	0.27	20.01	0.61	20.14	0.51
20.75	0.36	20.51	0.27	20.70	0.32	15.37	1.78	17.36	1.83	17.54	1.83	19.99	1.34	19.61	1.64	19.98	1.10	20.40	0.22	20.01	0.56	20.17	0.46
20.78	0.36	20.51	0.27	20.72	0.32	15.42	1.78	17.36	1.78	17.57	1.83	19.98	1.29	19.82	1.44	20.03	1.10	20.40	0.17	20.03	0.56	20.19	0.41
20.78	0.32	20.54	0.27	20.72	0.32	15.48	1.78	18.92	1.78	17.57	1.83	19.98	1.24	19.95	1.29	20.09	1.05	20.40	0.12	20.09	0.56	20.27	0.36
20.78	0.27	20.56	0.27	20.75	0.32	15.56	1.78	19.21	1.68	17.62	1.83	19.98	1.20	19.98	1.29	20.11	1.05	20.40	0.07	20.09	0.56	20.27	0.32
20.78	0.22	20.56	0.27	20.75	0.32	16.93	1.78	19.21	1.68	19.08	1.78	20.09	1.15	20.09	1.24	20.17	1.05	20.40	0.07	20.27	0.51	20.30	0.32
20.91	0.07	20.56	0.27	20.75	0.32	17.07	1.78	19.27	1.64	19.08	1.78	20.11	1.00	20.14	1.24	20.19	1.00	20.40	0.07	20.30	0.41	20.35	0.27
20.91	0.07	20.59	0.27	20.88	0.17	17.41	1.78	19.42	1.54	19.11	1.78	20.19	0.85	20.14	1.20	20.19	1.00	20.40	0.07	20.30	0.32	20.35	0.22
20.91	0.07	20.64	0.22	20.88	0.17	18.66	1.78	19.45	1.54	19.48	1.68	20.19	0.80	20.19	1.15	20.25	0.90	20.40	0.07	20.48	0.17	20.35	0.22
20.93	0.07	20.64	0.22	20.88																			

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama **Quota Alief Sias** lahir di kota Kediri, putra pertama dari dua bersaudara. Penulis memulai jenjang pendidikannya di SDN Dermo I Kediri lulus tahun 2002, SMPN 2 Kediri lulus tahun 2005, SMAN 2 Kediri lulus tahun 2008. Selanjutnya penulis menempuh pendidikan pada program sarjana di jurusan Teknik Tenaga Listrik Institut Teknologi Bandung lulus pada tahun 2013. Disela-sela kesempatan, penulis berhasil menyalurkan hobi sebagai pengusaha dan pernah bekerja menjadi web programmer perusahaan di kota Sidoarjo. Alhamdulillah penulis selanjutnya sudah membangun rumah tangga dan telah memiliki seorang putra serta melanjutkan kegemaran yang dimulai sejak awal kuliah yaitu berbagi ilmu menjadi pengajar. Penulis melanjutkan jenjang pendidikannya pada program magister Teknik Sistem Tenaga Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis dapat dihubungi di alamat email *quo_alief@live.com*.