



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER *CUK*
TERMODIFIKASI DENGAN *MPPT* BERBASIS
ALGORITMA *Perturb and Observe* UNTUK
APLIKASI *SOLAR WATER PUMP***

Andika Mada Rachmanto
NRP 07111440000035

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODIFIED
CUK CONVERTER WITH MPPT BASED ON
PERTURB AND OBSERVE ALGORITHM FOR SOLAR
WATER PUMP APPLICATION**

Andika Mada Rachmanto
NRP 07111440000035

Supervisors
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER CUK
TERMODIFIKASI DENGAN MPPT BERBASIS
ALGORITMA PERTURB AND OBSERVE UNTUK
APLIKASI SOLAR WATER PUMP**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Heri Survoatmojo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198006032006041003

Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198208292006042001



Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER *CUK* TERMODIFIKASI DENGAN *MPPT* BERBASIS ALGORITMA *PERTURB AND OBSERVE* UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER PUMP* ” 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, Juli 2018

Andika Mada Rachmanto
0711144000035

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI KONVERTER *CUK* TERMODIFIKASI DENGAN *MPPT* BERBASIS ALGORITMA *PERTURB AND OBSERVE* UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER PUMP*

Andika Mada Rachmanto
07111440000035

Dosen Pembimbing 1 : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Sistem *solar water pump* merupakan suatu sistem pompa air yang mengandalkan sel surya sebagai sumber utamanya. Pada sistem ini nilai daya yang dihasilkan oleh sel surya sangat berpengaruh, dikarenakan semakin optimal daya yang dihasilkan oleh sel surya maka semakin optimal pula air yang dapat dipompa oleh sistem *solar water pump* ini. Pada sistem *solar water pump* tanpa *MPPT* (*Maximum Power Point Tracker*), debit air yang dapat dihasilkan sistem cenderung tidak maksimal dikarenakan sel surya tidak beroperasi pada nilai maksimalnya. *MPPT* dengan algoritma *perturb and observe* dapat memaksimalkan daya pada sel surya dengan kecepatan *tracking* yang bergantung pada kecepatan respon dari konverter. Sedangkan *cuk* konverter termodifikasi memiliki nilai *ripple* arus dan tegangan yang relatif kecil serta memiliki *gain* yang besar saat mode *step up* untuk mempercepat *tracking* pada *MPPT*. Untuk itu, pada tugas akhir ini akan dirancang dan implementasi sistem *solar water pump* menggunakan *MPPT* dengan algoritma *perturb and observe* dan konverter *cuk* termodifikasi, metode ini dapat memaksimalkan daya pada solar panel sebesar 98.56% dengan peningkatan jumlah debit sebesar 1,023 kali.

Kata kunci: Konverter *Cuk* Termodifikasi, *MPPT*, *Perturb and Observe*, *Solar Water Pump*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODIFIED CUK CONVERTER WITH MPPT BASED ON PERTURB AND OBSERVE ALGORITHM FOR SOLAR WATER PUMP APPLICATION

Andika Mada Rachmanto
0711144000035

1st Advisor : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
2nd Advisor : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Solar water pump system is a water pump system using solar energy as its main source. This system is strongly depends on the value of power generated by solar cells, meaning the more optimal power generated by solar cells , than the more optimal water can be pumped by the solar water pump system. In the solar water pump system without MPPT Maximum Power Point Tracker, the water flow rate which produced by the system tend not to be maximal, because the solar cell is not operating on its maximum value. MPPT with perturb and observe algorithm can maximize the solar cell power with tracking speed depending on the respond speed of the converter. On the other hand, the modified cuk converter has a relative lower current and lower voltage ripple and also has a large gain during the step up mode to speed up the tracking of the MPPT. So, this final project will discuss about the design and implementation of the solar water pump system using MPPT with perturb and observe algorithm and the modified cuk converter. This method can maximize power in solar panels by 98.56% with the water flow rate increase about 1,023 times.

Key Word: Modified Cuk Converter, MPPT, Perturb and Observe, Solar Water Pump

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah senantiasa penulis panjatkan kehadirat Allah ‘Azza Wa Jalla. Karena atas limpahan berkah, rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan buku penelitian ini dengan judul **“Desain Dan Implementasi Konverter Cuk Termodifikasi Dengan MPPT Berbasis Algoritma Perturb and Observe Untuk Aplikasi Solar Water Pump”**. Buku ini penulis persembahkan khususnya untuk keluarga penulis dan umumnya untuk bahan referensi penelitian selanjutnya. “khoirunnas anfa’uhum linnas”. Penulisan buku penelitian ini dilakukan dengan penuh kesungguhan agar penelitian ini dapat bermanfaat di masa yang akan datang, namun penulis menyadari bahwa buku penelitian ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan di masa yang akan datang.

Selama pengerjaan penelitian ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang membantu dan membimbing dalam proses pengerjaan penelitian ini :

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Ruklan dan Ibu Anik Setiawatiningsih yang selalu memberikan do’a dan dukungan yang sangat berarti.
2. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. dan Ibu Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan dan bimbingan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan sebaik mungkin.
3. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi B101 yang selalu memberikan support.
4. Mahasiswa S2 Mas Ridwan, Mas Firyal dan Mas Anggi yang telah bersedia meluangkan waktu untuk membantu kelancaran dalam pengerjaan penelitian ini.
5. Teman-teman e54 yang telah berjuang bersama semenjak awal masuk perkuliahan.
6. Dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan kepada penulis selama ini. Penulis juga memohon maaf atas segala kekurangan pada penelitian ini. Semoga

penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2018

Andika Mada Rachmanto

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	4
BAB 2 KONVERTER <i>CUK</i> TERMODIFIKASI DENGAN <i>MPPT</i> BERBASIS ALGORITMA <i>PERTURB AND OBSERVE</i> UNTUK APLIKASI <i>SOLAR WATER PUMP</i>	5
2.1 <i>Solar Water Pump</i>	5
2.2 Panel Surya.....	6
2.2.1 Permodelan Panel Surya	6
2.2.2 Kurva V-I	8
2.2.3 Pengaruh Iradian dan Temperatur	9
2.3 <i>MPPT (Maximum Power Point Tracking)</i>	9
2.3.1 Arsitektur dan Metode <i>MPPT</i>	10
2.3.2 Algoritma <i>Perturb and Observe</i>	11
2.4 Konverter <i>Cuk</i> Termodifikasi.....	12
2.4.1 Analisa Kondisi <i>Steady State</i>	15
2.4.2 Penurunan Parameter Komponen	20
2.5 <i>PMDC (Permanent Magnet DC Motor)</i>	21
2.6 Pompa Sentrifugal.....	23
2.6.1 Karakteristik Torsi-Kecepatan	24
BAB 3 DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI	27
3.1 Permodelan Blok Sistem	27
3.2 Parameter Pompa Sentrifugal	27
3.3 Parameter <i>PMDC (Permanent Magnet DC Motor)</i>	30
3.3.1 Parameter Elektrik	30
3.3.2 Parameter Mekanik	30
3.4 Desain Konverter <i>Cuk</i> Termodifikasi	35

3.4.1	Penentuan <i>Duty Cycle</i> dan Rasio Konversi.....	36
3.4.2	Penentuan Nilai Resistansi Beban	37
3.4.3	Penentuan Nilai Induktor L1, L2, dan L3	37
3.4.4	Penentuan Nilai Kapasitor C1, C2, C3 dan Co	40
3.4.5	Penentuan MOSFET	41
3.4.6	Penentuan Dioda D1 dan D2	43
3.5	Parameter Panel Surya	44
3.6	Simulasi dan Implementasi Sistem	46
3.6.1	Simulasi konverter dalam keadaan <i>Steady State</i>	46
3.6.2	Simulasi Sistem <i>Solar Water Pump</i> dengan <i>MPPT</i>	49
3.6.3	Implementasi Sistem <i>Solar Water Pump</i>	51
BAB 4	PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	55
4.1	Kurva Karakteristik Panel Surya	55
4.2	Pengujian Sensor.....	56
4.2.1	Sensor Arus dan Tegangan.....	56
4.2.2	Sensor <i>Flow Rate</i>	58
4.3	Pengujian Konverter <i>Cuk</i> Termodifikasi.....	59
4.3.1	Pengujian Sinyal Dari Tiap Komponen	59
4.3.2	Pengujian Efisiensi.....	62
4.4	Pengujian <i>MPPT</i> pada <i>Solar Water Pump</i>	63
4.4.1	Kurva Daya.....	64
4.4.2	Kurva <i>Duty cycle</i>	65
4.4.3	Kurva Debit	66
4.5	Perbandingan <i>Solar Water Pump</i> dengan dan tanpa <i>MPPT</i>	66
4.5.1	Perbandingan Daya	67
4.5.2	Perbandingan Total Debit.....	68
BAB 5	PENUTUP	69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA		71
LAMPIRAN		73
BIODATA PENULIS		81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Arsitektur sistem kelistrikan solar water pump.....	5
Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen panel surya	6
Gambar 2.3 Kurva I-V dan daya <i>output</i> pada panel surya [2].....	8
Gambar 2.4 Efek perubahan iradian dan suhu terhadap kurva I-V [2].	9
Gambar 2.5 Kurva kerja PV saat beban berubah [5]	10
Gambar 2.6 Arsitektur <i>MPPT</i> secara keseluruhan	10
Gambar 2.7 Algoritma <i>Perturb and Observe</i>	11
Gambar 2.8 Rangkaian konverter <i>cuk</i> konvensional	12
Gambar 2.9 Rangkaian <i>cuk</i> konverter termodifikasi	13
Gambar 2.10 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada masing-masing komponen [6].....	14
Gambar 2.11 Rangkaian konverter <i>cuk</i> termodifikasi saat mode I.....	15
Gambar 2.12 Rangkaian konverter <i>cuk</i> termodifikasi saat mode II ...	16
Gambar 2.13 Rangkaian konverter <i>cuk</i> termodifikasi saat mode III ..	16
Gambar 2.14 Rangkaian ekuivalen motor <i>PMDC</i>	22
Gambar 2.15 Kurva karakteristik torsi-kecepatan motor <i>PMDC</i> dengan pompa sentrifugal	25
Gambar 3.1 <i>Solar Water Pump</i> dengan <i>MPPT</i>	27
Gambar 3.2 Kurva karakteristik torsi-kecepatan motor <i>PMDC</i> dengan pompa sentrifugal	29
Gambar 3.3 Respon kecepatan aktual motor <i>PMDC</i>	33
Gambar 3.4 Respon kecepatan model motor <i>PMDC</i>	35
Gambar 3.5 Grafik penguatan tegangan.....	36
Gambar 3.6 MOSFET IRFP4332	42
Gambar 3.7 Dioda MUR 1560	44
Gambar 3.8 Bentuk gelombang tegangan V_{GS} dan V_{DS}	46
Gambar 3.9 Bentuk gelombang arus dioda D_1 dan dioda D_2	47
Gambar 3.10 Bentuk gelombang arus pada induktor L_1 , induktor L_2 dan induktor L_3	47
Gambar 3.11 Bentuk gelombang tegangan kapasitor C_1 , C_2 dan C_3 ..	48
Gambar 3.12 Bentuk gelombang tegangan input dan output pada konverter <i>cuk</i> termodifikasi	48
Gambar 3.13 Simulasi <i>Solar Water Pump</i> dengan <i>MPPT</i>	49

Gambar 3.14 Gelombang pada sistem <i>Solar Water Pump</i> dengan <i>cuk</i> konverter termodifikasi sebagai hardware <i>MPPT</i> . (a) gelombang iradian, (b) gelombang PMPP, (c) gelombang VMPP, (d) gelombang IMPP, (e) gelombang debit air, (f) gelombang total debit	50
Gambar 3.15 Implementasi Konverter <i>Cuk</i> Termodifikasi	52
Gambar 3.16 Implementasi sistem <i>Solar Water Pump</i>	53
Gambar 4.1 Kurva karakteristik arus dan tegangan.....	55
Gambar 4.2 Kurva karakteristik daya dan tegangan	56
Gambar 4.3 Sinyal <i>switching</i> pada MOSFET	59
Gambar 4.4 Sinyal pada induktor L_1 , induktor L_2 dan induktor L_3	60
Gambar 4.5 Sinyal pada kapasitor C_1 , kapasitor C_2 dan kapasitor C_3	61
Gambar 4.6 Sinyal tegangan pada sisi input dan output	62
Gambar 4.7 Kurva efisiensi <i>cuk</i> konverter termodifikasi.....	63
Gambar 4.8 Kurva iradian terhadap waktu.....	64
Gambar 4.9 Tracking daya <i>MPPT Solar Water Pump</i>	64
Gambar 4.10 <i>Duty cycle</i> pada <i>MPPT</i>	65
Gambar 4.11 Debit air yang dihasilkan <i>Solar Water Pump</i> dengan <i>MPPT</i>	66
Gambar 4.12 Perbandingan daya pada sistem <i>Solar Water Pump</i> dengan dan tanpa <i>MPPT</i>	67
Gambar 4.13 Perbandingan daya pada sistem <i>Solar Water Pump</i> dengan dan tanpa <i>MPPT</i>	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rasio tabulasi torsi-kecepatan pompa sentrifugal	24
Tabel 3.1 Spesifikasi pompa sentrifugal	28
Tabel 3.2 Rasio tabulasi torsi-kecepatan pompa sentrifugal	28
Tabel 3.3 Hasil pengukuran R dan L	30
Tabel 3.4 Hasil pengukuran konstanta kecepatan.....	31
Tabel 3.5 Hasil pengukuran konstanta gesekan.....	32
Tabel 3.6 Parameter motor <i>PMDC</i>	34
Tabel 3.7 Parameter <i>cuk</i> konverter termodifikasi.....	35
Tabel 3.8 Parameter komponen pada <i>cuk</i> konverter.....	44
Tabel 3.9 <i>Datasheet</i> solar panel Gema Solar	45
Tabel 3.10 Komponen sistem <i>Solar Water Pump</i>	51
Tabel 4.1 Pengujian sensor tegangan dan arus	57
Tabel 4.2 Pengujian sensor flow rate FS300A	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini kebutuhan akan energi kian meningkat, akan tetapi peningkatan kebutuhan energi tersebut berbanding terbalik dengan sumber energi fosil yang tersedia. Sehingga untuk tetap memenuhi kebutuhan akan energi, para pakar serta peneliti gencar melakukan penelitian tentang energi alternatif. Salah satu yang menjadi pusat perhatian adalah sel surya, karena sel surya dapat mengubah energi cahaya matahari yang merupakan sumber energi bersih, melimpah, dan mudah digunakan.

Tidak seperti sumber energi yang lain, sel surya termasuk sumber energi tidak linier. Daya yang dihasilkan akan berubah-ubah bergantung pada iradiasi dan temperatur lingkungan. Sel surya juga memiliki grafik karakteristik yang menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan *output*. Sehingga, untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh panel surya, perlu adanya pengkondisian tegangan *output* agar sel surya bekerja pada titik maksimalnya. Metode pengkondisian ini lazim disebut dengan *MPPT (Maximum Power Point Tracking)*. Pada *MPPT* terdapat dua komponen utama, yaitu rangkaian konverter dan algoritma pengontrol. Jenis algoritma yang umum digunakan pada *MPPT* adalah *Perturb and Observe*, karena metode ini cukup sederhana dan juga memiliki teknik *tracking* yang efisien. Sayangnya, di sisi konverter masih menggunakan rangkaian *buck/boost* konvensional yang memiliki *ripple* arus dan tegangan relatif besar.

Salah satu dari aplikasi panel surya yaitu *Solar Water Pump*. Sistem ini sering digunakan sebagai solusi untuk memenuhi kebutuhan air di daerah yang terisolir maupun daerah yang belum memiliki akses listrik. *Solar Water Pump* sendiri bekerja berdasarkan daya yang diproduksi dari panel surya. Semakin maksimal daya yang dihasilkan panel surya, maka semakin besar pula debit air yang dapat dipompa. Sehingga dibutuhkan sebuah konverter DC/DC yang menghubungkan panel surya ke pompa dengan *MPPT* agar motor dari pompa dapat bekerja secara lebih maksimal. Sayangnya, pada saat ini sistem *Solar Water Pump* masih

menggunakan konverter DC/DC konvensional yang memiliki kekurangan dibagian *ripple* arus dan tegangan yang relatif besar.

Maka dari itu, pada penelitian ini akan dilakukan perancangan dan implementasi konverter DC/DC dengan rangkaian dasar *cuk converter* yang dapat mengurangi ripple tegangan dan arus *output* serta menggunakan *MPPT* dengan algoritma *Perturb and Observe* yang mampu mengoptimalkan daya pada sistem *Solar Water Pump*.

1.2 Perumusan Masalah

Solar Water Pump adalah sistem pompa air yang menggunakan sel surya sebagai sumber dayanya. Pada saat beroperasi, banyaknya air yang dapat di pompa sebanding dengan daya yang di ambil dari sel surya. Sehingga untuk memaksimalkan sistem *Solar Water Pump* maka diperlukan *MPPT Maximum Power Point Tracking*. Salah satu algoritma yang sering digunakan pada *MPPT (Maximum Power Point Tracking)* adalah *Perturb and Observe*, algoritma ini dapat menyesuaikan perubahan iradian dan perubahan beban secara adaptif dengan cara mengubah *duty cycle* dari konverter.

Pada saat ini *MPPT* yang banyak digunakan terdiri dari rangkaian *buck* atau *boost* konvensional yang memiliki *ripple* arus dan *ripple* tegangan yang relatif besar. Sehingga untuk aplikasi pada *Solar Water Pump* diperlukan *MPPT* dengan konverter DC/DC yang memiliki *ripple* arus dan *ripple* tegangan yang lebih baik. Salah satu yang dapat digunakan adalah rangkaian *cuk converter* termodifikasi. Kelebihan dari konverter ini adalah memiliki *ripple* yang rendah dan mempunyai *range CCM (Continuous Conduction Mode)* yang cukup lebar pada saat pengoperasiannya.

1.3 Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mendesain dan Mengimplementasikan *MPPT (Maximum Power Point Tracking)* berbasis algoritma *Perturb and Observe* untuk memaksimalkan daya keluaran pada panel surya.
2. Mendesain dan Mengimplementasikan konverter *cuk* termodifikasi untuk aplikasi *Solar Water Pump*.

1.4 Batasan Masalah

1. Desain dan implementasi konverter *cuk* termodifikasi untuk aplikasi *Solar Water Pump*.
2. Pengujian dilakukan dengan menggunakan panel surya laboratorium dengan daya 100 WP
3. Beban pada sistem *Solar Water Pump* menggunakan pompa *submersible* yang ada di pasaran.
4. Analisis dan perhitungan dilakukan pada kondisi ideal.

1.5 Metodologi

Penelitian ini akan dilakukan dalam beberapa langkah yaitu sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Mempelajari cara kerja *MPPT* dengan algoritma *Perturb and Observe* dan juga mempelajari konverter DC/DC yang diusulkan. Karena penelitian ini menggunakan konverter DC/DC dengan topologi baru maka cara kerja serta respon konverter saat dibebani harus di ketahui secara pasti. Selain itu, perlu diketahui spesifikasi dari motor DC sebagai bagian akhir dari sistem *Solar Water Pump*.

2. Pengimplementasian Alat

Pada proses ini akan dilakukan pembuatan *MPPT* yang terdiri dari dua bagian utama, yaitu *software* yang diwakilkan oleh program *Perturb and Observe* dan *hardware* yang diwakilkan oleh konverter *cuk* termodifikasi. Selanjutnya *MPPT* akan direalisasikan berdasarkan spesifikasi dari panel surya dan pompa DC yang tersedia.

3. Pengujian Alat

Tahap ini akan dilakukan pengujian tentang kinerja alat yang sudah di buat. Selain itu, peralatan yang dibuat akan di bandingkan. Perbandingan dilakukan antara sistem *Solar Water Pump* pada desain, simulasi dan pada implementasi.

4. Analisis Data

Setelah pengujian, maka akan dilakukan analisa terhadap data-data yang telah didapat. Analisis dilakukan pada kinerja konverter dalam keadaan *open loop*. Serta dianalisis pula kinerja dari *MPPT* P&O terhadap pengaruh dari intensitas cahaya.

5. Kesimpulan

Pada akhir penelitian akan ditarik kesimpulan berdasarkan analisa yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Berisi penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi terhadap Tugas Akhir ini.

Bab 2 : Konverter *cuk* termodifikasi dengan *MPPT* berbasis Algoritma *perturb and observe* untuk aplikasi *Solar Water Pump*

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang karakteristik PV, konverter *cuk* termodifikasi, *MPPT*, algoritma *Perturb and Observe*, motor DC permanen magnet dan pompa sentrifugal.

Bab 3 : Desain, Simulasi dan Implementasi

Bab ini membahas perencanaan *MPPT*, konverter *cuk* termodifikasi dan sistem *Solar Water Pump* secara matematis, simulasi dengan perangkat lunak dan implementasi.

Bab 4 : Pengujian dan Analisis Data

Bab ini berisi pengujian dan analisis data terhadap hasil pengujian rangkaian dari konverter *cuk* termodifikasi yang telah dibuat serta pengujian performa dari algoritma *Perturb and Observe*.

Bab 5 : Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

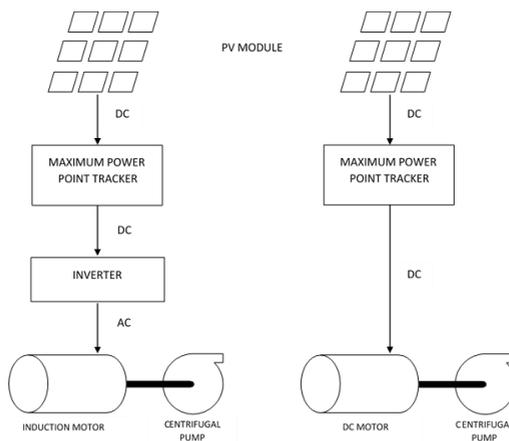
1. Dapat dijadikan rujukan untuk perkembangan teknologi *renewable energy* pada umumnya dan teknologi *Solar Water Pump* pada khususnya.
2. Dapat dijadikan referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian dengan topik energi terbarukan.

BAB 2

KONVERTER *CUK* TERMODIFIKASI DENGAN *MPPT* BERBASIS ALGORITMA *PRTURB AND OBSERVE* UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER PUMP*

2.1 *Solar Water Pump*

Belum meratanya pembangunan sistem kelistrikan yang ada di Indonesia, dan juga meningkatnya kebutuhan air bersih seiring dengan meningkatnya populasi penduduk. Menyebabkan kurangnya pasokan air bersih di daerah pedesaan maupun daerah tertinggal dikarenakan *supply* air bersih yang bergantung pada ketersediaan listrik. Sehingga perlu adanya teknologi pompa air alternatif untuk menggantikan pompa diesel yang biasa digunakan. Sistem pompa air tenaga surya (*Solar Water Pump*) merupakan teknologi yang dapat diandalkan untuk masalah tersebut dikarenakan teknologi ini dapat mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi listrik yang dihasilkan dari diesel, gas dan batubara. [1] *Solar Water Pump* memiliki arsitektur sistem kelistrikan seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Arsitektur sistem kelistrikan solar water pump

Solar Water Pump terbagi dua berdasarkan motor penggeraknya yaitu sistem AC dan sistem DC.[1] Pada sistem AC digunakan motor induksi pada sisi akuatornya sedangkan pada sistem DC menggunakan motor DC permanen magnet. Jika di dibandingkan, sistem DC memiliki keuntungan dibandingkan sistem AC dikarenakan tidak diperlukannya inverter untuk mengubah arus searah yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus bolak balik sebagai *supply* dari motor induksi.

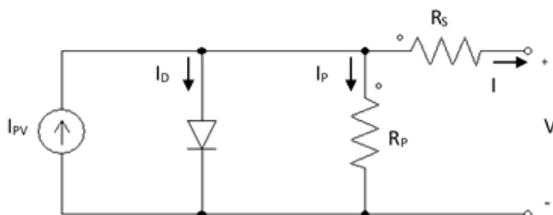
2.2 Panel Surya

Sel surya (*Photovoltaic*) merupakan sebuah *device* elektronik yang terbuat dari material semikonduktor. Material ini memiliki karakteristik yang unik dikarenakan dapat menghasilkan arus listrik dengan cara melepaskan elektrom terluar dari sebuah atom dengan menggunakan energi yang diambil dari foton yang memiliki panjang gelombang tidak lebih dari $1,11 \mu\text{m}$ [2]. Di sisi lain sumber energi primer penghasil foton paling besar adalah energi matahari, dengan frekuensi penyinaran di daerah tropis terjadi hampir setiap tahun.

Pada aplikasinya sel surya tidak pernah bekerja hanya dengan menggunakan satu sell saja akan tetapi minimal dalam bentuk satu panel (*PV Module*). Dalam satu *PV Module* terdapat 36 sel yang disusun secara seri, sehingga dapat meningkatkan energi yang dihasilkan dari sel surya tersebut [3].

2.2.1 Permodelan Panel Surya

Satu panel surya dapat dimodelkan dengan rangkain ekivalen yang terdiri dari sumber arus dan diode, sedangkan untuk *losses* nya dimodelkan dengan resistansi seri (R_s) dan parallel (R_p) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen panel surya

Dari rangkaian ekivalen, I_{pv} dapat dihitung menggunakan persamaan

$$I_{pv} = [I_{sc} + K_i(T - 298)] \frac{\beta}{1000} \quad (2.1)$$

I_{sc} = Arus *short circuit* (A)

K_i = Konstanta temperature (0.0017A/°C)

T = Temperatur lingkungan (K)

β = Iradiasai (W/m²)

Nilai arus *output* pada panel surya merupakan arus yang dihasilkan sel surya dan dikurangi oleh arus yang melewati diode, sehingga nilai arus output dapat dihitung dengan persamaan

$$I = I_{pv} - I_D - I_p \quad (2.2)$$

Selanjutnya untuk menghitung nilai arus diode (I_D) dapat menggunakan persamaan

$$I_D = I_o \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{N_s \frac{kT}{q} a} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Dengan

I_o = Arus saturasi dioda (A)

V = Tegangan panel surya (V)

R_s = Resistansi seri (Ω)

N_s = Jumlah sel terpasang

k = Konstanta Boltzman (1.3805×10^{-23} J/K)

q = Muatan elektron (1.6×10^{-19} C)

a = Konstanta diode ($1 \leq a \leq 2$)

Sedangkan arus yang melewati resistansi paralel dapat dicari menggunakan persamaan

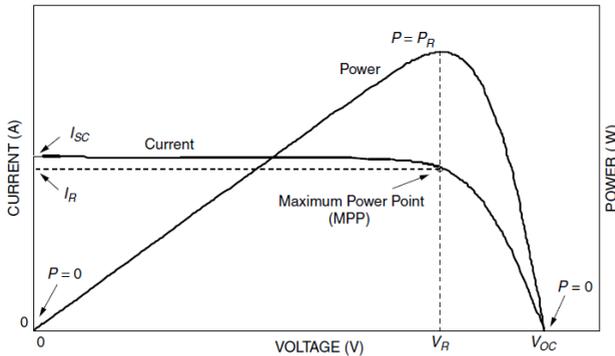
$$I_p = \frac{V+R_S I}{R_p} \quad (2.4)$$

Sehingga didapatkan persamaan arus *output* dan tegangan *output* pada panel surya adalah

$$I = I_p v - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_S I}{N_S \frac{kT}{q} a}\right) - 1 \right] - \left[\frac{V+R_S I}{R_p} \right] \quad (2.5)$$

2.2.2 Kurva V-I

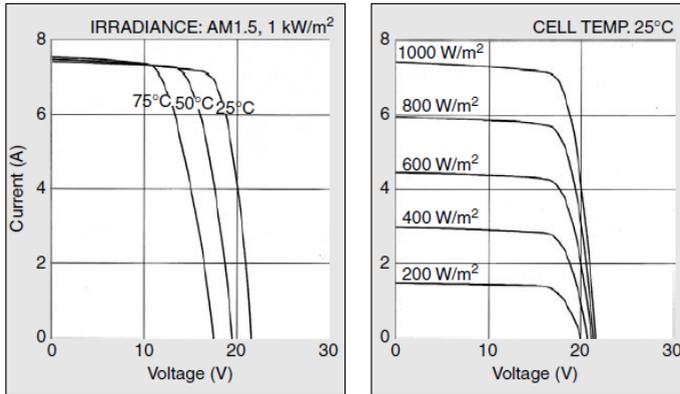
Tegangan saat *open circuit* (V_{OC}) dan arus saat *short circuit* (I_{SC}) merupakan dua komponen penting untuk menentukan kurva karakteristik dari panel surya saat bekerja. Saat panel surya dibebani resistansi geser dengan nilai hambatan (R) yang bervariasi dari nol sampai tak hingga serta menggunakan persamaan (2.5) maka akan didapatkan kurva I-V yang merupakan kurva operasi dari panel surya tersebut.



Gambar 2.3 Kurva I-V dan daya *output* pada panel surya [2].

Sedangkan untuk kurva daya dari panel surya didapatkan dari perkalian tegangan dan arus pada nilai resistansi yang sama. Sedangkan untuk daya maksimal (titik MPP) didapatkan saat nilai tegangan (V_R) dan arus (I_R) pada panel surya bernilai maksimal pada nilai resistansi tertentu. Titik *MPP* (*Maximum Power Point*) ini berada pada puncak dari kurva P-V yang dapat dilihat pada Gambar 2.3.

2.2.3 Pengaruh Iradian dan Temperatur



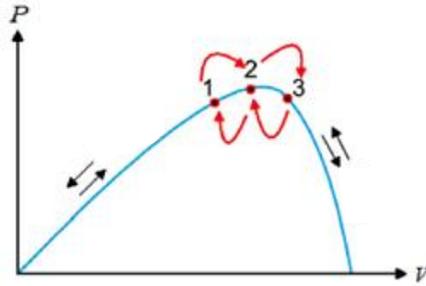
Gambar 2.4 Efek perubahan iradian dan suhu terhadap kurva I-V [2]

Kurva karakteristik I-V pada panel surya dipengaruhi oleh dua hal, yaitu iradiasi dan temperatur yang berakibat bergesernya kurva I-V pada panel surya [2]. Pergeseran kurva I-V dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Besarnya nilai iradian berbanding lurus dengan I_{SC} akan tetapi sedikit berpengaruh pada V_{OC} . Sedangkan semakin tinggi nilai temperatur akan mengakibatkan menurunnya V_{OC} dan berpengaruh juga pada penurunan I_{SC} . Sehingga untuk selalu mendapatkan nilai daya maksimum dari panel surya, harus diperhatikan pula kedua parameter tersebut.

2.3 MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)

Terdapat dua jenis pemaksimalan daya pada panel surya jika ditinjau berdasarkan sistemnya, yaitu : sistem mekanik dan elektrik. Pada sisi mekanik disebut *Solar Tracker*, yaitu sebuah metode untuk memaksimalkan daya dengan cara mengubah posisi panel surya terhadap matahari untuk memperoleh energi maksimum yang dipancarkan oleh matahari. Sedangkan dalam penelitian ini yang dibahas adalah pemaksimalan daya pada sisi elektrik dengan menggunakan *MPPT*, yaitu sebuah metode yang berfungsi untuk menjaga sistem tetap bekerja pada titik MPP [4].

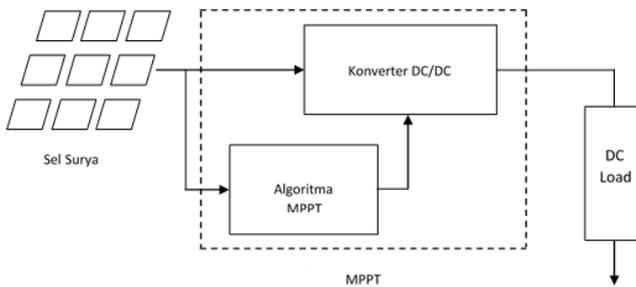


Gambar 2.5 Kurva kerja PV saat beban berubah [5]

Gambar 2.5 menunjukkan kurva karakteristik PV saat diberi beban. Yang mana *MPPT* harus bisa bekerja untuk menjaga PV tetap beroperasi pada titik MPPnya atau yang ditunjukkan pada nomor dua.

2.3.1 Arsitektur dan Metode *MPPT*

Dikarenakan *MPPT* adalah sebuah metode atau algoritma, maka perlu ditanamkan pada *microcontroller* serta membutuhkan *device* berupa aktuator untuk menjalankan metode tersebut. Arsitektur dari *MPPT* secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.6. Algoritma *MPPT* tersebut digunakan untuk mengatur *duty cycle* pada Konverter DC/DC.



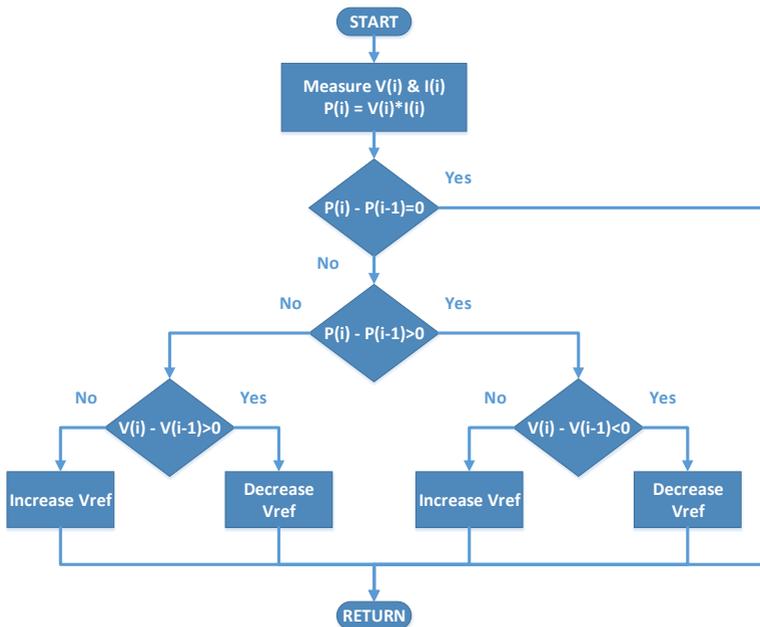
Gambar 2.6 Arsitektur *MPPT* secara keseluruhan

Berikut merupakan beberapa metode dan algoritma *MPPT* yang sering digunakan, yaitu :

- a. Membutuhkan karakteristik kurva PV
 1. *Voltage-based Method*
 2. *Current-based Method*
 3. *Maximum Power Line*
- b. Tidak dibutuhkan karakteristik kurva PV
 1. *Perturb and Observe*
 2. *Incremental Conductance*
 3. *Hill Climbing*

Perbedaan antara masing masing metode diatas adalah efisiensi, kemudahan dalam penerapannya, jumlah sensor, kecepatan respon serta sistem *trackingnya*.

2.3.2 Algoritma *Perturb and Observe*



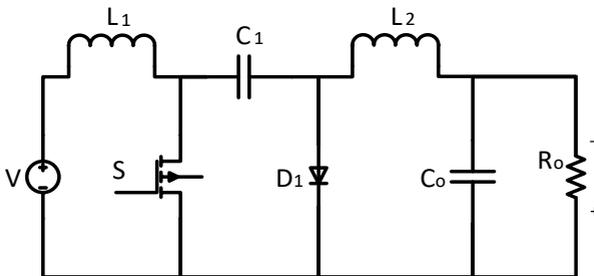
Gambar 2.7 Algoritma *Perturb and Observe*

Pada penelitian dalam tugas akhir ini digunakan metode *Perturb and Observe* dikarenakan metode ini cukup sederhana dan juga memiliki teknik *tracking* yang cukup efisien [5]. Flowchart dari algoritma *Perturb and Observe* dapat dilihat pada Gambar 2.7

Algoritma ini bekerja dengan cara mengganggu tegangan pada sisi *output* panel surya dan mengamati efek dari perubahan daya yang terjadi. Cara pengambilan keputusan pada algoritma ini berdasarkan pada perubahan daya dan tegangan PV. Apabila nilai daya dan tegangan bernilai semakin membesar maka nilai V_{ref} pun akan di perbesar. namun saat sebaliknya maka nilai V_{ref} akan di perkecil. Output dari Algoritma *Perturb and Observe* berupa nilai tegangan referensi yang selanjutnya akan diproses oleh kontroller PID sebagai *driver* dari konverter DC/DC.

2.4 Konverter *Cuk* Termodifikasi

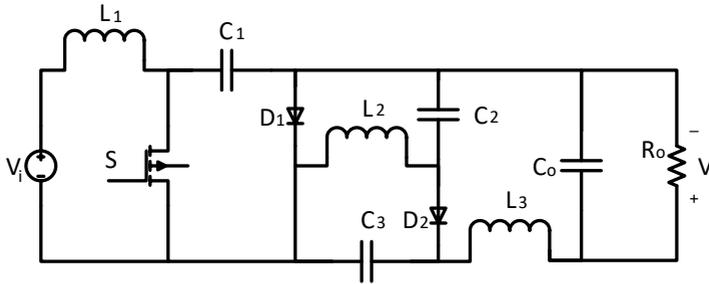
Konverter *cuk* termasuk dari keluarga konverter *buck-boost* yang tegangan output bisa lebih tinggi maupun lebih rendah dari tegangan inputnya. Dikarenakan topologi dari konverter *cuk* sendiri terdiri dari *boost converter* di sisi input, *buck converter* di sisi output, dan sebuah kapasitor penghubung yang berfungsi sebagai penyimpanan energi. Konverter *cuk* memiliki beberapa kelebihan diantaranya *ripple* tegangan *output* yang kecil serta tahan terhadap gangguan dari frekuensi radio [6]. Topologi dari rangkaian konverter *cuk* konvensional ditunjukkan seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Rangkaian konverter *cuk* konvensional

Pada penelitian ini konverter *cuk* dimodifikasi sedemikian rupa, sehingga diperoleh *gain* tegangan di sisi *output* yang lebih tinggi dari pada

topologi *cuk* konvensional saat dioperasikan pada mode CCM [6]. Konverter ini terdiri dari beberapa komponen, antara lain induktor L_1 , induktor L_2 , induktor L_3 , kapasitor C_1 , kapasitor C_2 , kapasitor C_3 , dioda D_1 , dioda D_2 , dan kapasitor *filter* C_o . Rangkaian dari konverter *cuk* termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 2.9.

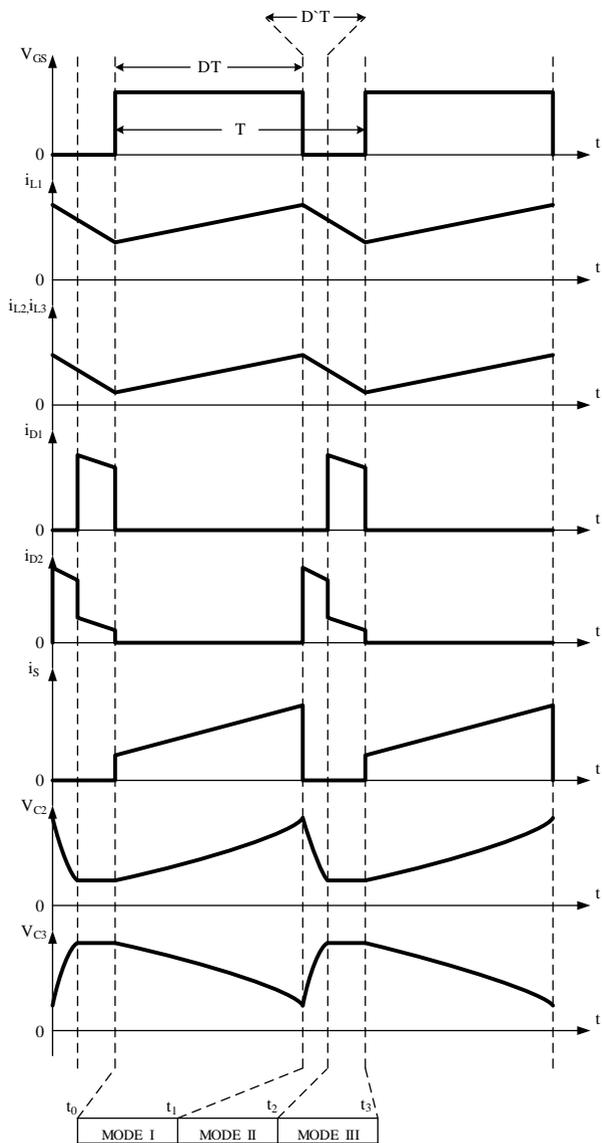


Gambar 2.9 Rangkaian *cuk* konverter termodifikasi

Analisis rangkaian konverter *cuk* termodifikasi didasarkan pada beberapa asumsi berikut ini [6]:

1. Semua kapasitor pada rangkaian *cuk* termodifikasi mempunyai nilai kapasitansi cukup besar, sehingga *ripple* tegangan dapat diabaikan pada saat kondisi *steady state*.
2. *Switch* pada rangkaian merupakan komponen ideal dan nilai kapasitansinya diabaikan.
3. Rangkaian beroperasi pada kondisi *steady state* sehingga tegangan dan arus merupakan gelombang periodik.

Analisis rangkaian pada kondisi *steady state* akan dibahas dalam dua mode yaitu CCM (*Continuous Conduction Mode*). Pada kondisi CCM terdapat tiga buah mode, mode I saat keadaan *switch on* sedangkan mode II dan III pada keadaan *switch off*. Bentuk gelombang tegangan dan arus pada masing-masing mode dari konverter *cuk* termodifikasi pada saat dioperasikan ditunjukkan pada Gambar 2.10.

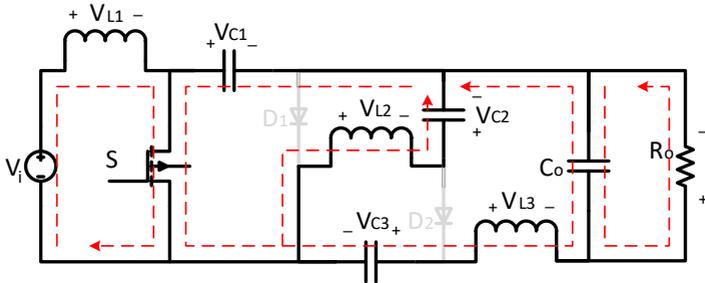


Gambar 2.10 Bentuk gelombang tegangan dan arus pada masing-masing komponen [6].

2.4.1 Analisa Kondisi *Steady State*

A. Mode I (t_0-t_1)

Pada saat sakelar S dalam keadaan konduksi, dioda D_1 dan dioda D_2 dalam keadaan *reverse-biased*. Arus dari sumber tegangan V_1 akan mengalir pada induktor L_1 , sakelar S dan akan kembali menuju sumber V_1 yang mengakibatkan L_1 dalam keadaan *charge*. Pada kondisi ini, kapasitor C_1 mengisi energi pada induktor L_2 dan induktor L_3 . Sementara itu, kapasitor C_3 mengisi energi pada induktor L_3 dan kapasitor C_2 mengalami *discharge* oleh kapasitor C_1 . Disisi lain energi pada kapasitor C_1 dan kapasitor C_3 akan mengalir menuju beban R_0 .



Gambar 2.11 Rangkaian konverter *cuk* termodifikasi saat mode I

Gambar 2.11 menunjukkan rangkaian ekuivalen saat konverter mengalami mode I pada interval waktu t_0 hingga t_1 . Sehingga persamaan dari mode ini yaitu :

$$V_{L1} = V_1 \quad (2.6)$$

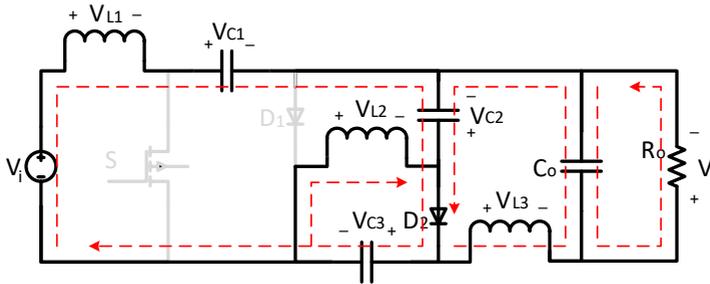
$$V_{L2} = V_{C1} - V_{C2} \quad (2.7)$$

$$V_{L3} = V_{C1} + V_{C3} - V_0 \quad (2.8)$$

B. Mode II (t_1-t_2)

Pada saat sakelar S dalam keadaan terbuka, dioda D_1 dalam keadaan *reverse-biased* dan D_2 dalam keadaan *forward-biased*. Arus dari sumber tegangan V_1 akan mengisi muatan pada kapasitor C_1 dan kapasitor C_3 . Pada mode ini semua induktor dalam keadaan *discharge* dan kapasitor

C_2 mengalami mode *discharge* dan energinya akan mengalir menuju beban R_o .



Gambar 2.12 Rangkaian konverter *cuk* termodifikasi saat mode II

Gambar 2.12 merupakan rangkaian ekuivalen saat konverter mengalami mode II pada interval waktu t_1 hingga t_2 . Dari rangkaian tersebut dapat diperoleh persamaan :

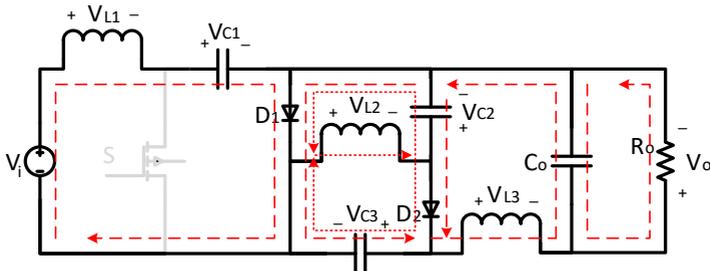
$$V_{L1} = V_i + V_{C2} - V_{C1} - V_{C3} \quad (2.9)$$

$$V_{L2} = -V_{C3} \quad (2.10)$$

$$V_{L3} = V_{C2} - V_o \quad (2.11)$$

C. Mode III (t_2 - t_3)

Pada saat interval waktu t_2 hingga t_3 sakelar S masih dalam keadaan terbuka, dioda D_1 dan dioda D_2 dalam keadaan *forward-biased*. Rangkaian ekuivalen pada mode III seperti pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 Rangkaian konverter *cuk* termodifikasi saat mode III

Tegangan pada kapasitor C_2 dan kapasitor C_3 sama, sehingga kedua kapasitor tersebut terhubung paralel. Sedangkan sumber tegangan V_1 akan mengisi muatan pada kapasitor C_1 dan semua induktor dalam keadaan *discharge*. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{L1} = V_I - V_{C1} \quad (2.12)$$

$$V_{L2} = -V_{C3} \quad (2.13)$$

$$V_{L3} = V_{C2} - V_O \quad (2.14)$$

Dengan menggunakan hukum *voltage-second balance* pada induktor L_1 , induktor L_2 , dan induktor L_3 serta dengan menggunakan nilai kapasitor $C_2 = C_3$, maka persamaan pada setiap induktor dapat ditulis sebagai berikut :

Pada induktor L_1

$$V_1 D + (V_I + V_{C2} - V_{C1} - V_{C3}) D' + (V_I - V_{C1})(1 - D - D') = 0$$

$$V_I - V_{C1} + V_{C1} D = 0$$

$$V_I - (V_{C1}(1 - D)) = 0$$

$$V_I = V_{C1}(1 - D)$$

$$V_{C1} = \frac{V_I}{(1-D)} \quad (2.15)$$

Pada induktor L_2

$$(V_{C1} - V_{C2}) D - V_{C3} D' - V_{C3}(1 - D - D') = 0$$

$$V_{C1} D - V_C = 0$$

$$V_C = V_{C1} D \quad (2.16)$$

Pada induktor L_3

$$(V_{C1} + V_{C3} - V_O) D + (V_{C2} - V_O) D' + (V_{C2} - V_O)(1 - D - D')$$

$$V_{C1} D + V_{C3} D + V_{C2} - V_{C2} D - V_O = 0$$

$$V_{C1}D + V_C - V_O = 0$$

$$V_O = V_{C1}D + V_C \quad (2.17)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.15 dan 2.16 pada persamaan 2.17, maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_O = \left[\frac{V_I}{(1-D)} \right] D + \left[\frac{V_I}{(1-D)} \right] D$$

$$V_O = 2 \left[\frac{V_I D}{(1-D)} \right]$$

$$\frac{V_O}{V_I} = \frac{2D}{(1-D)} \quad (2.18)$$

Persamaan 2.18 merupakan persamaan untuk menentukan rasio konversi tegangan pada konverter *cuk* termodifikasi dalam kondisi *steady state*. Dengan menggunakan Gambar 2.11, 2.12 dan 2.13 arus yang mengalir pada masing-masing kapasitor dapat didefinisikan sebagai persamaan :

$$i_{C1} \approx \begin{cases} -(I_{L2} + I_{L3}), & 0 < t < DT \\ I_{L1}, & DT < t < T \end{cases} \quad (2.19)$$

$$i_{C2} \approx \begin{cases} I_{L2}, & 0 < t < DT \\ -(I_{L3} + I_{L1}), & DT < t < (D' + D)T \\ 0, & (D' + D)T < t < T \end{cases} \quad (2.20)$$

$$i_{C3} \approx \begin{cases} -I_{L3}, & 0 < t < DT \\ (I_{L1} + I_{L2}), & DT < t < (D' + D)T \\ 0, & (D' + D)T < t < T \end{cases} \quad (2.21)$$

Dengan menggunakan hukum *ampere-second balance* pada kapasitor C₁, kapasitor C₂, dan kapasitor C₃, persamaan 2.19 sampai 2.21 dapat disederhanakan sebagai berikut :

Pada kapasitor C₁

$$I_{L1} - I_{L1}D - I_{L2}D - I_{L3}D = 0 \quad (2.22)$$

Pada kapasitor C_2

$$I_{L2}D - I_{L1}D' - I_{L3}D' = 0 \quad (2.23)$$

Pada kapasitor C_3

$$-I_{L3}D + I_{L1}D' + I_{L2}D' = 0 \quad (2.24)$$

Kemudian, dilakukan eliminasi antara persamaan 2.23 dan persamaan 2.24 sehingga didapatkan persamaan

$$I_{L2} = I_{L3} \quad (2.25)$$

Untuk mendapatkan persamaan rasio konversi arus pada konverter *cuk* termodifikasi dalam kondisi CCM, dilakukan substitusi persamaan 2.25 pada persamaan 2.23, maka didapatkan persamaan

$$\frac{I_{L3}}{I_{L1}} = \frac{(1-D)}{2D} \quad (2.26)$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan *ripple* tegangan pada kapasitor C_3 , besar D' dapat diketahui. Pada mode I arus yang melewati kapasitor C_3 dan induktor L_3 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$v_{C3}(t) = v_{C3}(t_0) + \frac{1}{C_3} \int_{t_0}^t i_{C3} dt \quad (2.27)$$

Untuk $t = DT$ dan $t_0 = 0$

$$\Delta V_{C3} = v_{C3}(DT) - v_{C3}(0) = \frac{1}{C_3} DT i_{C3}$$

$$\Delta V_{C3} = V_{C3}(DT) - V_{C3}(0) = -\frac{I_{L3}D}{C_3 f} \quad (2.28)$$

Sedangkan tegangan *ripple* pada mode I dan mode II bernilai sama, sehingga dengan menggunakan persamaan 2.27 dan dengan nilai $t = (D + D')T$ dan $t_0 = DT$, maka didapatkan persamaan *ripple* tegangan pada kapasitor C_3 sebagai berikut:

$$\Delta V_{C3} = V_{C3}[(D + D')T] - V_{C3}(DT) = -\frac{(I_{L1} + I_{L2})D'}{C_3 f} \quad (2.29)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.28 dan 2.29 pada persamaan 2.25, maka besarnya D' dapat diketahui menggunakan persamaan

$$D' = \frac{D(1-D)}{1+D} \quad (2.30)$$

2.4.2 Penurunan Parameter Komponen

Konverter *cuk* termodifikasi memiliki beberapa parameter yang harus ditentukan nilainya. Parameter tersebut terdiri dari parameter internal dan parameter eksternal. Parameter internal meliputi nilai dari setiap komponen yaitu, induktor L_1 , induktor L_2 , induktor L_3 , kapasitor C_1 , kapasitor C_2 , kapasitor C_3 dan kapasitor *filter* C_0 . Sedangkan untuk parameter eksternal yaitu nilai resistor R_0 yang berfungsi sebagai *dummy load*.

Nilai pada masing-masing induktor dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan *ripple* arus pada masing-masing induktor.

Untuk induktor L_1

$$\begin{aligned} \Delta I_{L1} &= \frac{DV_I}{fL_1} \\ L_1 &= \frac{DV_I}{f\Delta I_{IN}} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Untuk induktor L_2

$$\begin{aligned} \Delta I_{L2} &= \frac{DV_I}{fL_2} \\ L_2 &= \frac{DV_I}{f\Delta I_{OUT}} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Untuk induktor L_3

$$\begin{aligned} \Delta I_{L3} &= \frac{DV_I}{fL_3} \\ L_3 &= \frac{DV_I}{f\Delta I_{OUT}} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Dengan menggunakan persamaan 2.28, maka nilai dari semua kapasitor dapat di tentukan. Pada penelitian ini, nilai kapasitor C_1 , kapasitor C_2 , dan kapasitor C_3 dianggap sama sehingga persamaannya menjadi:

$$\Delta V_{C3} = \frac{I_{L3}D}{C_3f}$$

$$C_3 = \frac{I_{L3}D}{f\Delta V_{C3}} \quad (2.34)$$

Penentuan nilai kapasitor *filter* C_O dapat menggunakan persamaan tegangan kapasitor saat mode *discharge* [7]. Dengan menyederhanakan persamaan kapasitor saat mode *discharge*, maka didapatkan persamaan:

$$\Delta V = V_{MAX} \left(\frac{t_{off}}{RC} \right)$$

$$C_O = V_{MAX} \left(\frac{1-D}{R_O\Delta V_{of}} \right) \quad (2.35)$$

Untuk menentukan nilai R_O , dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_O = \frac{V_O^2}{P_O} \quad (2.36)$$

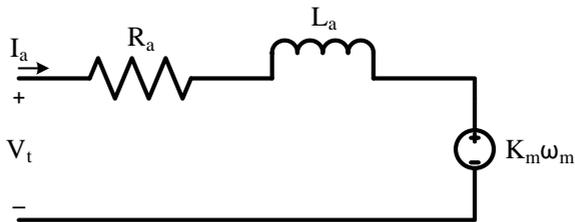
Dengan V_O adalah tegangan *output* dari konverter sedangkan P_O adalah daya *output* dari konverter yang dianggap ideal, sehingga daya *output* P_O sama dengan daya *input* P_I .

2.5 PMDC (*Permanent Magnet DC Motor*)

Motor DC (*direct current*) merupakan motor listrik arus searah yang memiliki dua komponen utama yaitu rotor dan stator. Pada bagian rotor terdapat belitan jangkar dan pada bagian stator terdapat belitan medan. Berdasarkan sumber penghasil medannya motor DC dibedakan menjadi tiga yaitu : *separately exciter*, *self exciter*, dan *PMDC*. Untuk *separately* dan *self exciter* menggunakan belitan medan sebagai penghasil medannya dan belitan jangkar sebagai tempat menghasilkan torsi induksi, sehingga kedua motor tersebut dapat dikontrol pada bagian jangkar dan medannya.

Sedangkan untuk motor *PMDC* belitan medannya digantikan oleh permanen magnet yang nilai medannya tetap, sehingga dari sistem kontruksinya lebih sederhana akan tetapi untuk sistem pengontrolnya hanya dapat dikontrol pada bagian jangkarnya.

Pada penelitian ini digunakan *PMDC* (*permanent magnet DC motor*) dikarenakan harganya lebih murah, ukuran kecil, sederhana dan memiliki efisiensi tinggi [8]. Motor *PMDC* dapat dimodelkan sebagai sumber tegangan yang diseri dengan sebuah resistor dan induktor. Rangkaian ekuivalen dari motor *PMDC* ditunjukkan pada Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Rangkaian ekuivalen motor *PMDC*

$$V_t = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + K_m \omega_m \quad (2.37)$$

$$T_e = K_m I_a \quad (2.38)$$

Dengan :

V_t = Tegangan terminal (V)

I_a = Arus jangkar (A)

R_a = Resistansi jangkar (Ω)

L_a = Induktansi jangkar (mH)

K_m = Konstanta torsi (V.s/rad)

ω_m = Kecepatan rotor (RPM)

T_e = Torsi elektromagnetik (Nm)

Persamaan 2.36 merupakan persamaan motor *PMDC* yang menunjukkan hubungan antara tegangan terminal pada motor *PMDC* terhadap kecepatan sedangkan untuk persamaan 2.37 adalah persamaan torsi yang terbangkit pada motor *PMDC*. Sedangkan K_m adalah konstanta torsi pada motor *PMDC*.

2.6 Pompa Sentrifugal

Pompa Sentrifugal adalah pompa mekanik yang digunakan untuk memindahkan cairan dengan cara mengubah energi mekanik dari motor ke fluida melalui putaran *impeller* [9]. Putaran dari *Impeller* mengakibatkan terbentuknya gaya sentrifugal yang mendorong fluida keluar melalui bagian daun dari *impeller* ke dalam *diffuser*.

Performa pompa sentrifugal dapat dijelaskan menggunakan hukum afinitas yang menunjukkan hubungan matematika antara variabel pada pompa sentrifugal [10]. Dengan nilai dari diameter *impeller* dianggap konstan maka, persamaan dari hukum afinitas dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.39)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (2.40)$$

$$\frac{BHP_1}{BHP_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (2.41)$$

Dengan :

Q = Debit (gpm)

H = Total head (ft)

BHP = Brake horsepower (hp)

N = Kecepatan pompa (RPM)

Sedangkan besarnya nilai torsi akan sebanding dengan kuadrat dari kecepatan seperti pada persamaan berikut :

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (2.42)$$

2.6.1 Karakteristik Torsi-Kecepatan

Karakteristik torsi-kecepatan merupakan analisa yang menggambarkan titik operasi pada saat motor *PMDC* dihubungkan dengan pompa sentrifugal. Dengan menggunakan Persamaan (2.42) maka dapat dibuat rasio tabulasi antara torsi dan kecepatan pada pompa sentrifugal sebagai berikut :

Tabel 2.1 Rasio tabulasi torsi-kecepatan pompa sentrifugal

Kecepatan	Torsi
100%	1
75%	0.5625
50%	0.25
25%	0.0625
10%	0.015
0%	0.05

Tabel 2.1 menunjukkan rasio antara torsi dan kecepatan pada pompa sentrifugal. Setiap titik yang didapatkan akan digunakan untuk membentuk kurva karakteristik torsi-kecepatan pada pompa sentrifugal dengan menggunakan polinomial orde ke-3.

Sedangkan untuk karakteristik torsi-kecepatan pada motor *PMDC* dapat diketahui melalui hubungan antara kecepatan dan tegangan yang terbangkit pada belitan jangkar saat kondisi pembebanan yang berbeda dengan persamaan sebagai berikut:

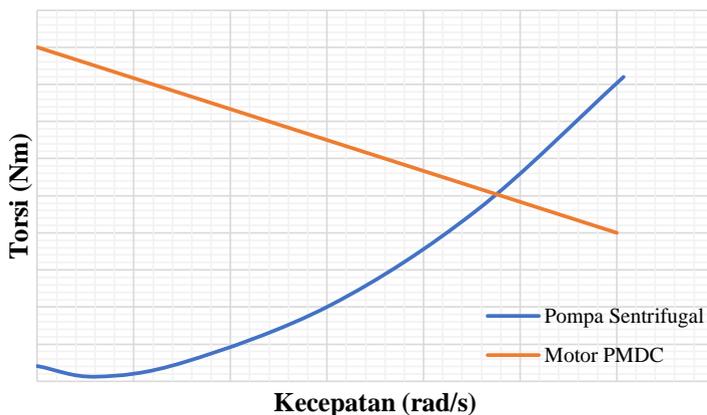
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Ea_2}{Ea_1} \quad (2.43)$$

Sedangkan nilai torsi pada motor *PMDC* dinotasikan sebagai daya konversi dibagi dengan kecepatan pada beban tertentu dengan persamaan sebagai berikut:

$$\tau_{ind} = \frac{E_A I_A}{\omega} \quad (2.44)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.43) dan (2.44) maka kurva karakteristik dari torsi dan kecepatan pada motor *PMDC* dapat diketahui.

Sehingga kurva karakteristik torsi-kecepatan pada motor *PMDC* dengan beban pompa sentrifugal dapat dilihat pada gambar 2.15. Dengan titik perpotongan antara kedua kurva merupakan titik operasi dari motor *PMDC* dan pompa sentrifugal. Titik operasi tersebut sangatlah penting untuk menentukan berapa besar nilai torsi dan kecepatan yang dihasilkan oleh motor *PMDC* agar mendapatkan debit yang diinginkan pada sisi beban yang berupa pompa sentrifugal. Dikarenakan sistem *Solar Water Pump* yang dirancang hanya memaksimalkan daya pada panel surya sehingga titik operasi motor dan pompa dapat bergeser sesuai dengan perubahan iradiasi.



Gambar 2.15 Kurva karakteristik torsi-kecepatan motor *PMDC* dengan pompa sentrifugal

Adapun parameter-parameter yang harus ditentukan sebelum pengoperasian sistem *Solar Water Pump* yaitu *head* (H) dan debit (Q) serta perlu diperhatikan parameter-parameter pada saat pengoperasian pompa, diantaranya :

1. *Water Horse Power* (WHP) yaitu daya yang dibutuhkan untuk memindahkan fluida dengan debit dan *head* tertentu.

$$WHP = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot g}{1000} \quad (2.45)$$

2. *Shaft Horse Power* (SHP) yaitu daya yang dibutuhkan pada poros pompa dengan mempertimbangkan efisiensi pompa.

$$SHP = \frac{WHP}{\text{efisiensi}} \quad (2.46)$$

Dengan :

ρ = masa jenis air (kg/m^3)

Q = debit fluida (l/s)

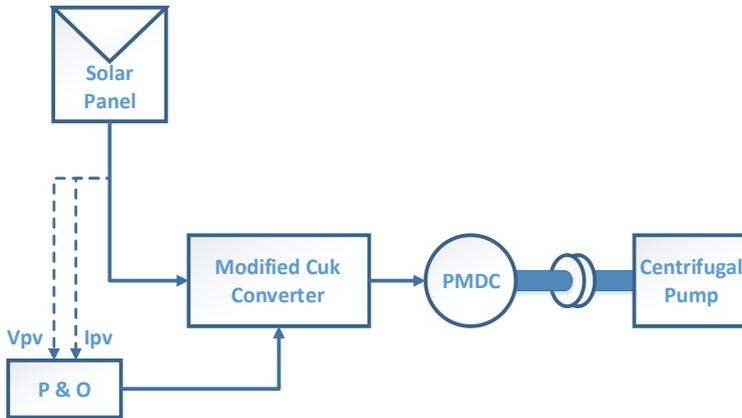
H = total head (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

BAB 3 DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

3.1 Permodelan Blok Sistem

Pada penelitian ini, simulasi dari sistem *Solar Water Pump* secara keseluruhan menggunakan aplikasi SIMULINK yang ada pada *software* MATLAB (Matrix Laboratory). Simulasi sistem secara keseluruhan meliputi panel surya, konverter *cuk* termodifikasi, motor *PMDC* dan pompa sentrifugal seperti ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 *Solar Water Pump* dengan *MPPT*

Sedangkan untuk konverter *cuk* termodifikasi akan dioperasikan sebagai aktuator dari sistem *MPPT* dengan menggunakan algoritma *perturb and observe*.

Pada pemodelan tersebut hanya ditunjukkan blok diagram dari sistem *solar water pump* berupa subsistem yang didalamnya terdapat beberapa rangkaian. Tujuan pemodelan tersebut berguna untuk mempermudah pembaca melihat sistem secara keseluruhan.

3.2 Parameter Pompa Sentrifugal

Jenis pompa yang digunakan pada penelitian ini adalah pompa *submersible*, yang mana pompa *submersible* yang tersedia dipasaran

terdiri dari motor *PMDC* yang *dicouple* dengan pompa sentrifugal tipe “*endsuction pump*”.

Pompa sentrifugal yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi seperti ditunjukkan pada tabel 3.1 sebagai berikut :

Tabel 3.1 Spesifikasi pompa sentrifugal

Parameter	Nilai
Daya rating motor	50 Watt
Kecepatan maksimal	7000 rpm
<i>Head</i> maksimal	4 meter
Debit	35 l/min

Parameter pompa sentrifugal dapat diketahui dengan cara memasukan nilai torsi dan kecepatan maksimal pompa pada persamaan 2.42 serta mencari perbandingan torsi dan kecepatan pada setiap titiknya dengan menggunakan tabel 2.1, sehingga didapatkan variasi nilai torsi terhadap kecepatan tertentu sebagai berikut :

Tabel 3.2 Rasio tabulasi torsi-kecepatan pompa sentrifugal

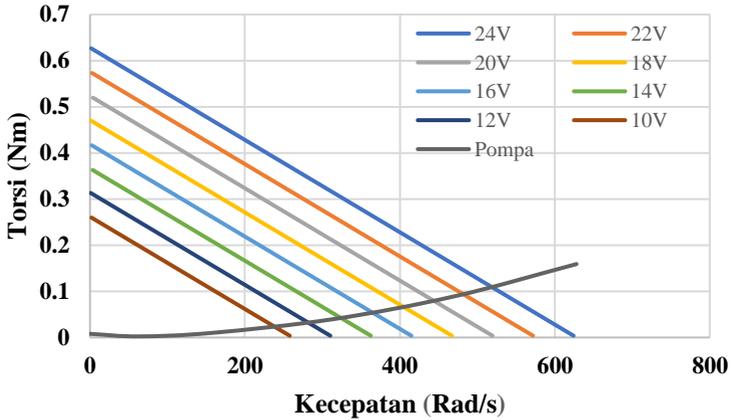
Kecepatan (rad/s)	Torsi (Nm)
628	0.159150
471	0.089522
314	0.039788
157	0.009947
62.8	0.002387
0	0.007958

Dari data pada tabel 3.2 dapat ditentukan persamaan pompa sentrifugal dengan menggunakan *polynomial* orde 3 menggunakan *Microsoft Excel*. Sehingga persamaan pompa didapatkan sebagai berikut:

$$\tau = -6x10^{-11}n^3 + 2x10^{-7}n^2 - 3x10^{-5}n + 0,003$$

Sedangkan untuk kurva karakteristik torsi dan kecepatan pada motor *PMDC* dapat diketahui menggunakan persamaan 2.44, dengan memasukan nilai variabel berupa tegangan dan arus *input* serta menentukan kecepatan operasi motor nilai dari torsi induksi yang dihasilkan oleh motor bisa didapatkan.

Gambar 3.2 merupakan hubungan antara kurva torsi-kecepatan pada motor *PMDC* yang dihubungkan dengan pompa sentrifugal.



Gambar 3.2 Kurva karakteristik torsi-kecepatan motor *PMDC* dengan pompa sentrifugal

Berdasarkan spesifikasi pompa nilai dari parameter WHP dan SHP pada persamaan 2.45 dan 2.46 dapat diketahui, nilai debit dan head pompa ditentukan pada saat motor *PMDC* mencapai *rating*, yaitu :

$$Q = \frac{6000}{7000} \times 0,583 = 0,49 \text{ l/s}$$

$$H = \left(\frac{6000}{7000}\right) \times 4 = 3,4 \text{ m}$$

Dengan *efisiensi* pompa sebesar 70%, parameter WHP dan SHP pada pompa dapat ditentukan sebagai berikut:

$$WHP = \frac{1000 \cdot 0,49 \cdot 3,4 \cdot 9,87}{1000} = 16,44 \text{ Watt} = 0,022 \text{ HP}$$

$$SHP = \frac{0,022}{0,7} = 0,0314 \text{ HP}$$

3.3 Parameter *PMDC* (*Permanent Magnet DC Motor*)

Parameter-parameter motor *PMDC* dibutuhkan untuk pemodelan motor saat proses simulasi yang hasilnya akan digunakan untuk mengetahui karakteristik sistem secara keseluruhan. Parameter motor *PMDC* didapatkan melalui proses identifikasi dan pengukuran, proses identifikasi terdiri dari dua tahapan, yaitu identifikasi parameter elektrik yang meliputi resistansi *armature* (R_A) dan induktansi *armature* (L_A); dan identifikasi parameter mekanik yang meliputi konstanta torsi, konstanta kecepatan, koefisien gaya gesek serta momen inersia.

3.3.1 Parameter Elektrik

Parameter elektrik yang dibutuhkan dalam permodelan motor *PMDC* adalah resistansi dan induktansi. Untuk nilai resistansi jangkar R_A didapatkan dengan pengukuran LCR meter, dikarenakan untuk pengukuran menggunakan metode perhitungan tegangan dan arus tidak dapat diterapkan pada motor *PMDC*. Dan untuk nilai induktansi jangkar L_A diperoleh juga dengan pengukuran LCR meter. Nilai dari parameter elektrik yang telah didapatkan dari proses pengukuran dapat dilihat pada tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Hasil pengukuran R dan L

Parameter	Nilai
Resistansi jangkar R_A	1,85 Ω
Induktansi jangkar L_A	1,02 mH

3.3.2 Parameter Mekanik

Parameter mekanik yang dibutuhkan dalam permodelan motor *PMDC* meliputi konstanta kecepatan k_e , konstanta torsi k_τ , konstanta waktu mekanik τ_m , konstanta gesekan B, dan momen inersia J.

Semua konstanta pada parameter mekanik didapatkan dengan uji langsung pada motor DC *PMDC*, semua konstanta yang didapatkan akan digunakan sebagai parameter awal untuk mensimulasikan model sistem motor *PMDC* pada aplikasi SIMULINK yang ada pada *software* MATLAB.

A. Konstanta Kecepatan (k_e)

Konstanta kecepatan merupakan konstanta perbandingan antara kecepatan putaran pada motor terhadap tegangan ggl yang terbentuk pada stator. Cara identifikasinya yaitu menghubungkan motor dengan *prime mover*, selanjutnya motor diputar dengan kecepatan tertentu. Saat motor dalam keadaan *steady state* (asumsi $t \geq 3$ sekon), maka dilakukan pengukuran tegangan yang terbangkit pada stator. Tabel 3.4 merupakan hasil dari pengukuran konstanta kecepatan motor pada *PMDC*.

Tabel 3.4 Hasil pengukuran konstanta kecepatan

Kecepatan (RPM)	Tegangan motor (V)	k_e (V/rpm)
1778	4,06	0,002283464567
1988	4,55	0,002288732394
2059	4,84	0,002350655658
2156	5,11	0,002370129870
2350	5,53	0,002353191489
2515	5,80	0,002306163022
2677	6,29	0,002349451250
2878	6,74	0,002341904100
2985	7,01	0,002348408710
3000	7,03	0,002343333333
Rata-rata		0,002333562827

Sehingga nilai dari konstanta kecepatan k_e dari motor *PMDC* adalah 0,002333562827 V/rpm.

B. Konstanta torsi (k_t)

Berdasarkan nilai konstanta kecepatan k_e , maka konstanta torsi k_t dapat dicari menggunakan persamaan:

$$k_t = \frac{k_e \cdot 60}{2\pi}$$

$$k_t = \frac{0,002333562827 \cdot 60}{2 \cdot 3,14}$$

$$k_t = 0,022295186 \text{ Nm/A}$$

Sehingga, nilai konstanta torsi k_τ dari motor *PMDC* adalah 0,022295186 Nm/A.

C. Konstanta gesekan (B)

Konstanta gesekan B dapat dicari menggunakan identifikasi, yaitu motor dihubungkan dengan *prime mover*, selanjutnya motor diputar dengan kecepatan tertentu. Saat motor dalam keadaan *steady state* (asumsi $t \geq 3$ sekon), maka dilakukan pengukuran arus dengan cara menghubungsingkatkan terminal dari motor *PMDC*. Dengan menggunakan persamaan torsi elektromagnetik sebagai berikut:

$$T_e = B \cdot \omega_m$$

T_e merupakan torsi elektromagnetik dari motor yang didefinisikan sebagai konstanta torsi k_τ dikalikan dengan arus yang mengalir pada motor. Nilai konstanta gesekan B dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut:

Tabel 3.5 Hasil pengukuran konstanta gesekan

Arus (A)	k_τ (Nm/A)	Kecepatan (rad/s)	B (N.m.s)
1,80	0,022295186	88,967	0,000451081
1,88	0,022295186	105,294	0,000398075
2,17	0,022295186	116,599	0,000414931
2,58	0,022295186	137,637	0,000417922
2,62	0,022295186	135,543	0,000430958
2,65	0,022295186	138,160	0,000427636
2,72	0,022295186	139,939	0,000433352
3,52	0,022295186	157,000	0,000499867
3,62	0,022295186	177,933	0,000453590
3,60	0,022295186	179,399	0,000447398
Rata-rata			0,000437481

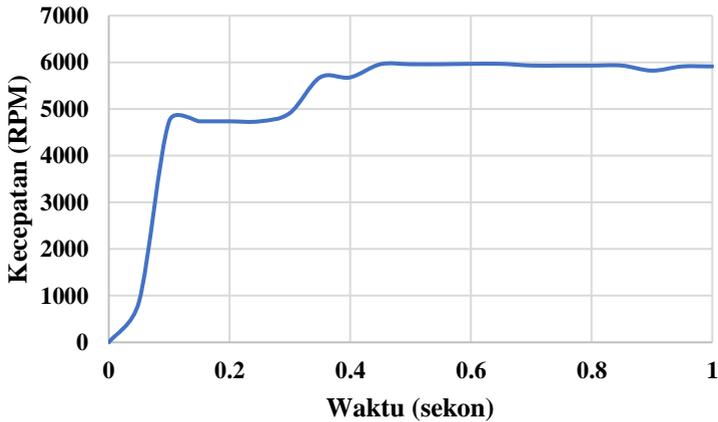
Jadi, nilai konstanta gesekan B dari motor *PMDC* adalah 0,000437481 N.m.s.

D. Konstanta waktu mekanik (τ_m)

Selanjutnya nilai dari konstanta waktu mekanik τ_m didefinisikan sebagai waktu saat motor mencapai kecepatan 63% dari kecepatan *steady state*-nya. Pengukuran konstanta mekanik τ_m didapatkan dengan cara menghubungkan motor dengan *prime mover*. Nilai kecepatan dari motor

direkam per satuan waktu, selanjutnya dilakukan plot data kecepatan vs waktu. Dari plot grafik kecepatan pada saat motor *starting* dapat dilihat pada Gambar 3.3. Didapatkan nilai konstanta waktu mekanik sebesar 0,1 sekon.

Pada saat pengukuran, *hand drill* merk DCA AJZ10A. Sedangkan untuk piranti perekaman kecepatan digunakan sensor FC-03 yang terhubung dengan *microcontroller* arduino UNO untuk melihat hasil rekam kecepatan motor.



Gambar 3.3 Respon kecepatan aktual motor *PMDC*

E. Momen Inersia (J)

Momen inersia J merupakan konstanta kelembaman pada rotornya. Momen inersia ini berpengaruh pada saat motor *starting* maupun saat akselerasi dan deselerasi. Momen inersia pada motor *PMDC* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$J = \frac{\tau_m(R_a B + k_e k_\tau)}{R_a}$$

$$J = \frac{0,1(1,85 \cdot 0,000437481 + 0,002333562827 \cdot 0,022295186)}{1,85}$$

$$J = \frac{0,1(0,00080934 + 5,20272 \cdot 10^{-5})}{1,85}$$

$$J = \frac{8,61367 \cdot 10^{-5}}{1,85}$$

$$J = 0,000046560392 \text{ kg.m}^2$$

Sehingga nilai momen inersia pada motor *PMDC* sebesar 0,000046560392 kg.m².

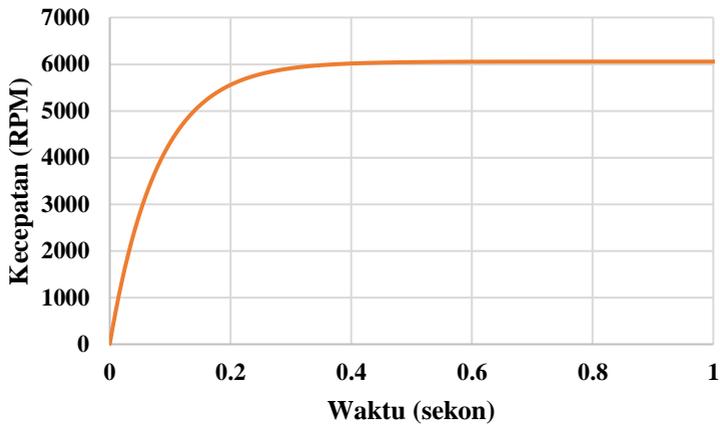
Sedangkan untuk parameter operasi dari motor *PMDC* yaitu tegangan *input* V_{IN} , arus *input* I_{IN} dan daya *input* P_{IN} didapatkan dari pengujian menggunakan power supply dan piranti pengukuran dan didapatkan nilai V_{IN} sebesar 24 V, I_{IN} sebesar 4,167 dan daya yang dibutuhkan pada sisi *input* P_{IN} sebesar 100 W.

Berdasarkan identifikasi dan pengukuran yang telah dilakukan, maka didapatkan parameter-parameter pada motor *PMDC*. Tabel 3.6 menunjukkan parameter-parameter dari motor *PMDC*.

Tabel 3.6 Parameter motor *PMDC*

Parameter	Nilai
Tegangan input (V_{IN})	24 V
Arus input (I_{IN})	4,167 A
Resistansi jangkar (R_A)	1,85 Ω
Induktansi jangkar (L_A)	1,02 mH
Konstanta kecepatan (k_e)	0,002333562827 V/rpm
Konstanta torsi (k_τ)	0,022295186 Nm/A
Konstanta waktu mekanik (τ_m)	0,1 sekon
Konstanta gesekan (B)	0,000437481 N.m.s.
Momen Inersia (J)	0,000046560392 kg.m ²

Selanjutnya dari parameter-parameter yang telah didapatkan, maka dilakukan simulasi motor *PMDC*. Gambar 3.4 menunjukkan respon kecepatan pada motor *PMDC* pada saat pemodelan menggunakan aplikasi SIMULINK pada *software* MATLAB.



Gambar 3.4 Respon kecepatan model motor *PMDC*

3.4 Desain Konverter *Cuk* Termodifikasi

Desain dari konverter digunakan untuk menentukan parameter-yang diinginkan dari konverter. Parameter tersebut meliputi kapasitas dari konverter, arus serta tegangan kerja dari konverter. Pada saat perancangan desain harus mempertimbangkan pula ketersediaan komponen yang ada di pasaran serta peralatan penunjang. Tabel 3.7 merupakan nilai parameter yang digunakan pada konverter.

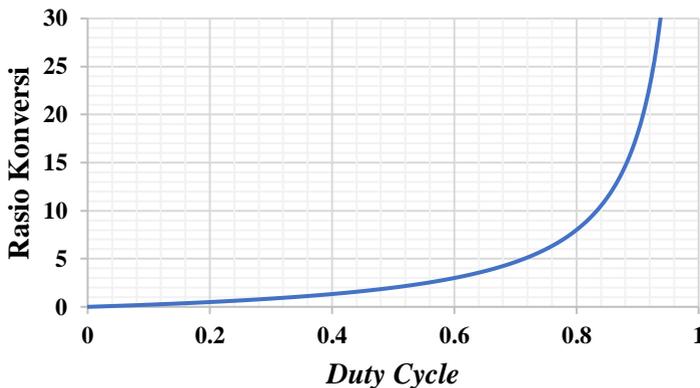
Tabel 3.7 Parameter *cuk* konverter termodifikasi

Parameter	Nilai
P_{OUT}	100 Watt
V_{OUT}	24 Volt
V_{IN}	17,5 Volt
Frekuensi <i>Switching</i>	50 kHz
<i>Ripple</i> I_{IN} (ΔI_{L1})	0,34 Ampere
<i>Ripple</i> I_{OUT} (ΔI_{L2} & ΔI_{L3})	0,18 Ampere
<i>Ripple</i> V_{OUT} (ΔV_{C0})	2 %
<i>Ripple</i> V_{C1}	0,98 Volt
<i>Ripple</i> V_{C2} & V_{C3}	0,72 Volt

Konverter didesain dengan kapasitas daya 100 Watt dengan mempertimbangkan sumber daya dari Panel Surya yang dapat mencapai 100 Watt. Untuk nilai tegangan *input* ditentukan 17,5 Volt mengikuti *range* tegangan dari Panel Surya saat daya maksimum, sedangkan untuk tegangan *output* ditentukan 24 Volt mengikuti *rating* dari motor *PMDC*. Frekuensi *switching* ditentukan sebesar 50 kHz agar nilai induktor L_1 , L_2 dan L_3 dapat diperkecil.

3.4.1 Penentuan *Duty Cycle* dan Rasio Konversi

Dengan menggunakan persamaan (2.18) saat konverter dalam keadaan *steady state*, rasio konversi dapat di definisikan sebagai *gain* dikalikan dengan tegangan *input* V_1 . Besarnya nilai *gain* bergantung dari nilai *duty cycle*. Sehingga didapatkan karakteristik kurva rasio kenaikan tegangan terhadap *duty cycle* seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



Gambar 3.5 Grafik penguatan tegangan

Pada penelitian ini nilai rasio konversi dapat diketahui dengan menggunakan parameter tegangan *input* V_1 dan *output* V_O

$$M = \frac{V_O}{V_1} = \frac{24}{17,5} = 1,37$$

Berdasarkan persamaan (2.18), maka besar nilai *duty cycle* adalah:

$$D = \frac{V_o}{(2V_I + V_o)} = \frac{24}{(2 \cdot 17,5 + 24)} = 0,407$$

Dari perhitungan rasio konversi M dan perhitungan *duty cycle* diatas, maka dapat diketahui konverter bekerja pada rasio konversi 1,37 dan nilai *duty cycle* yang dibutuhkan sebesar 0,407.

3.4.2 Penentuan Nilai Resistansi Beban

Penentuan resistansi beban pada konverter mempertimbangkan nilai daya maksimal yang dapat dioperasikan oleh konverter, yaitu sebesar 100 Watt pada tegangan 24 Volt. Dengan menggunakan persamaan (2.36), nilai resistansi beban dapat ditentukan sebesar:

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{24^2}{100} = 5,76 \Omega$$

3.4.3 Penentuan Nilai Induktor L1, L2, dan L3

Penentuan nilai induktor pada saat desain dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.31-2.33) saat konverter dalam operasi CCM (*Continuous Conduction Mode*), yaitu kondisi saat arus yang mengalir pada induktor tidak pernah bernilai nol. Nilai induktor L₁ dibuat berbeda dengan induktor L₂ dan L₃, dikarenakan nilai arus yang melewati induktor L₁ setara dengan arus I_{IN} sedangkan nilai arus yang melewati induktor L₂ dan L₃ setara dengan arus I_{OUT}. Penentuan nilai induktor sebagai berikut.

Untuk induktor L₁

$$L_1 = \frac{DV_I}{f\Delta I_{IN}}$$

$$L_1 = \frac{0,407 \cdot 17,5}{50000 \cdot 0,34}$$

$$L_1 = \frac{7,1225}{17000}$$

$$L_1 = 419 \mu H$$

Untuk induktor L₂ dan L₃

$$L_2 = L_3 = \frac{DV_I}{f\Delta I_{OUT}}$$

$$L_2 = L_3 = \frac{0,407 \cdot 17,5}{50000 \cdot 0,18}$$

$$L_2 = L_3 = \frac{7,1225}{8500}$$

$$L_2 = L_3 = 791 \mu H$$

Perancangan dan implementasi induktor dimulai dengan penentuan kawat email yang digunakan sebagai belitan induktor. Penentuan jenis kawat email berdasarkan dua parameter, yaitu frekuensi *switching* dari konverter dan arus maksimal yang melewati induktor. Nilai frekuensi *switching* yang digunakan adalah 50 kHz sedangkan untuk arus pada tiap-tiap induktor dapat dicari menggunakan arus input dan arus output. Dengan menganggap konverter dalam keadaan ideal maka daya input P_I sama dengan daya output P_O , sehingga arus pada tiap-tiap induktor bernilai:

Untuk induktor L_1

$$I_{L1} = I_{IN} = \frac{P_I}{V_{IN}}$$

$$I_{IN} = \frac{100}{17,5}$$

$$I_{IN} = 5,71 A$$

Untuk induktor L_2 dan L_3

$$I_{L2} = I_{L3} = I_{OUT} = \frac{P_O}{V_{OUT}}$$

$$I_{L2} = I_{L3} = I_{OUT} = \frac{100}{24}$$

$$I_{L2} = I_{L3} = I_{OUT} = 4,16 A$$

Berdasarkan parameter frekuensi *switching*, kawat email yang digunakan untuk induktor L_1 , L_2 dan L_3 harus mampu bekerja pada frekuensi 50 kHz sehingga dipilih kawat email jenis AWG 26 yang memiliki diameter 0,404 mm dengan resistansi 0,133 Ω/m , daya hantar arus 0,361 A dan frekuensi maksimal 107kHz. Berdasarkan parameter arus, kawat email untuk induktor L_1 harus mampu menahan arus sebesar 5,88 A. Nilai tersebut merupakan nilai arus yang mengalir pada induktor L_1 dengan mempertimbangkan ΔI_{L1} . Untuk faktor keamanan maka dipilih kawat email yang memiliki kapasitas arus lebih besar yaitu jenis AWG 9 yang memiliki diameter 2,90 mm dengan resistansi 0,0026 Ω/m , daya hantar arus 19 A dan frekuensi maksimal 2,05 kHz. Sedangkan untuk induktor L_2 dan L_3 , kawat email harus mampu menahan arus sebesar 4,25 A dengan pertimbangan arus yang mengalir pada induktor telah mempertimbangkan nilai *ripple* arus. Sehingga dipilih kawat email jenis AWG 11 yang memiliki diameter 2,30 mm dengan resistansi 0,0041 Ω/m , daya hantar arus 12 A dan frekuensi maksimal 3,20 kHz.

Selanjutnya dilakukan pemilinan dari dua jenis kawat email yang dipilih pada tiap-tiap induktor untuk menambah kapasitas dari kawat email tersebut. Untuk induktor L_1 kawat email harus memiliki ketahanan arus maksimum 19A dan frekuensi maksimum 107kHz, sedangkan pada induktor L_2 dan L_3 kawat email harus memiliki ketahanan arus maksimum 12 A dan frekuensi maksimum 107kHz. Selain itu pemilinan juga dapat mengurangi *skin effect*, mengurangi resistansi dan meningkatkan elastisitas konduktor yang digunakan. Penentuan jumlah pilinan didapatkan dari hasil pembagian antara diameter kawat kapasitas arus besar dengan kawat kapasitas arus kecil. Perhitungan jumlah pilinan pada masing masing induktor sebagai berikut:

Untuk induktor L_1

$$n_{kawat} = \frac{d_{AWG\ 9}}{d_{AWG\ 26}} = \frac{2,90}{0,404} = 7,18 \approx 8$$

Untuk induktor L_2 dan L_3

$$n_{kawat} = \frac{d_{AWG\ 11}}{d_{AWG\ 26}} = \frac{2,30}{0,404} = 5,69 \approx 6$$

Sehingga kawat email yang dipilin pada induktor L_1 sejumlah 8 kawat email jenis AWG 26 sedangkan pada induktor L_2 dan L_3 sejumlah 6 kawat email jenis AWG 26. Untuk mengurangi *copper losses* serta untuk faktor keamanan jumlah pilinan pada induktor L_2 dan L_3 dinaikan menjadi 8 buah.

Selanjutnya dilakukan pemilihan inti untuk induktor berdasarkan kapasitas frekuensi dari inti. Maka dipilih inti *ferrite* dengan merk TDK ETD 49 dengan nilai A_L sebesar 3700 nH. Sehingga untuk mendapatkan nilai induktansi yang di inginkan diperlukan perhitungan jumlah belitan N pada masing-masing induktor sebagai berikut:

Untuk induktor L_1

$$N = \sqrt{\frac{L_1}{A_L}} = \sqrt{\frac{419 \mu H}{3,7 \mu H}} = 10,64 \approx 11$$

Untuk induktor L_2 dan L_3

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{791 \mu H}{3,7 \mu H}} = 14,62 \approx 15$$

3.4.4 Penentuan Nilai Kapasitor C_1 , C_2 , C_3 dan C_0

Penentuan nilai untuk kapasitor C_1 , C_2 dan C_3 didasarkan pada persamaan (2.34). Nilai pada kapasitor C_1 dibuat berbeda dengan nilai dari kapasitor C_2 dan C_3 , dikarenakan pada kondisi CCM (*Continuous Conduction Mode*) nilai dari kapasitor C_2 dan C_3 sama. Dengan *ripple* tegangan 0,98 Volt dan arus yang melewati kapasitor setara dengan I_{IN} , maka dibutuhkan nilai kapasitansi untuk C_1 sebesar:

$$C_1 = \frac{I_{IN} D}{f \Delta V_{C_1}}$$

$$C_1 = \frac{5,71 \cdot 0,407}{50000 \cdot 0,98}$$

$$C_1 = 4,742 \cdot 10^{-5} \approx 47 \mu F$$

Sedangkan untuk kapasitor C_2 dan C_3 dengan menggunakan *ripple* tegangan 0,72 Volt dan arus yang melewati kapasitor setara dengan I_{OUT} , maka dibutuhkan nilai kapasitansi untuk C_2 dan C_3 sebesar:

$$C_2 = C_3 = \frac{I_{OUT}D}{f\Delta V_C}$$

$$C_2 = C_3 = \frac{4,16 \cdot 0,407}{50000 \cdot 0,72}$$

$$C_2 = C_3 = 4,703 \cdot 10^{-5} \approx 47\mu F$$

Dalam implementasi, digunakan kapasitor jenis *electrolytic condenser* pada kapasitor C_1 C_2 dan C_3 dengan nilai 47 μ F 250 Volt. Pemilihan *rating* tegangan sebesar 250 Volt didasarkan pada nilai ESR (*Equivalent Series Resistance*) dari kapasitor yang nilainya berbanding terbalik dengan tegangan kerja dari kapasitor. Sehingga untuk memperkecil *losses* pada kapasitor dipilih nilai ESR yang kecil.

Untuk penentuan nilai C_O dapat menggunakan persamaan (2.35) dengan memasukan nilai *ripple* tegangan sesuai desain sebesar 2 % dari tegangan *output* V_{OUT} . Sehingga nilai kapasitansi yang dibutuhkan pada kapasitor C_O sebesar:

$$C_O = V_{MAX} \left(\frac{1 - D}{R_O \Delta V_O f} \right)$$

$$C_O = \left(V_O + \frac{\Delta V_O}{2} \right) \left(\frac{1 - D}{R_O \Delta V_O f} \right)$$

$$C_O = \left(24 + \frac{2/100 \cdot 24}{2} \right) \left(\frac{1 - 0,407}{5,76 \cdot 2/100 \cdot 24 \cdot 50000} \right)$$

$$C_O = (24,24)(4,289 \cdot 10^{-6})$$

$$C_O = 0,104 \cdot 10^{-3} \approx 100\mu F$$

3.4.5 Penentuan MOSFET

Rangkaian konverter *cuk* termodifikasi menggunakan MOSFET sebagai sakelar elektronik. Penentuan MOSFET yang digunakan berdasarkan parameter tegangan dapat dicari menggunakan nilai tegangan

yang diterima oleh MOSFET. Dengan mengabaikan tegangan *ripple* pada kapasitor C_1 , maka tegangan maksimum pada sakelar MOSFET saat *steady state* dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$V_{S(DS)} = V_I + V_{C1} = \left(\frac{1}{1-D}\right) V_I$$

$$V_{S(DS)} = \left(\frac{1}{1-0,407}\right) 17,5$$

$$V_{S(DS)} = 29,51 \text{ V}$$

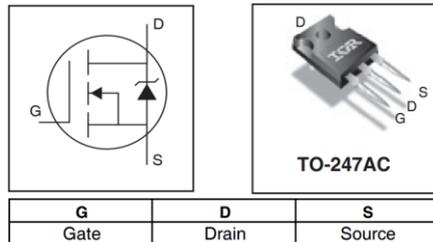
Untuk arus yang melewati sakelar MOSFET setara dengan arus pada induktor L_1 saat mode *charge* sehingga dapat ditentukan:

$$I_{S(DS)} = I_{IN} \cdot D$$

$$I_{S(DS)} = 5,71 \cdot 0,407$$

$$I_{S(DS)} = 2,32 \text{ A}$$

Parameter terakhir adalah frekuensi *switching* yang didesain 50 kHz. Sehingga dipilih MOSFET IRFP4332 dengan tegangan pada *gate-source* sebesar $\pm 30\text{V}$. Dan mampu menahan tegangan *drain-source* V_{DS} sebesar 250V, sedangkan arus maksimum yang dapat mengalir pada *drain-source* I_{DS} sebesar 40A pada temperatur *cell* 100°C. MOSFET ini memiliki *reverse recovery time* sebesar 290ns atau frekuensi maksimumnya dapat mencapai 3,45MHz. IRFP4332 yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 MOSFET IRFP4332

3.4.6 Penentuan Dioda D1 dan D2

Dioda D₁ dan dioda D₂ pada konverter *cuk* termodifikasi berfungsi sebagai penentu kapan terjadinya mode I, II, dan III. Penentuan dioda saat implementasi sama halnya seperti penentuan MOSFET yaitu berdasarkan pada parameter tegangan, arus dan frekuensi *switching*. Dengan mengabaikan tegangan pada kapasitor C₁ dan C₂, maka tegangan maksimum pada dioda D₁ dan D₂ saat *steady state* dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$V_{D1} = V_{D2} = V_l + V_{C1} = \left(\frac{1}{1-D} \right) V_l$$

$$V_{D1} = V_{D2} = \left(\frac{1}{1-0,407} \right) 17,5$$

$$V_{D1} = V_{D2} = 29,51 \text{ V}$$

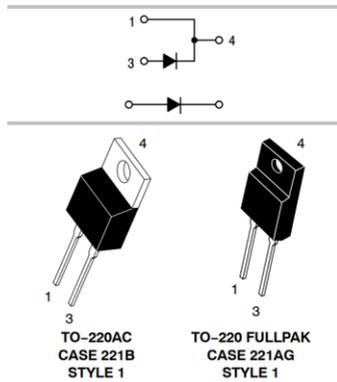
Untuk arus yang melewati dioda D₁ dan D₂ dapat diketahui besarnya dengan menggunakan persamaan :

$$i_{D1} = i_{D2} = \sqrt{\frac{1+D}{1-D}} I_o$$

$$i_{D1} = i_{D2} = \sqrt{\frac{1+0,407}{1-0,407}} 4,16$$

$$i_{D1} = i_{D2} = 6,41 \text{ A}$$

Untuk parameter frekuensi mengikuti desain dari frekuensi *switching*, yaitu sebesar 50kHz. Sehingga dengan mempertimbangkan ketiga parameter, maka dipilih dioda MUR1560. Dioda ini memiliki kapasitas arus maksimum sebesar 15A dengan DC *blocking voltage* sebesar 600V. Dioda ini merupakan dioda *ultrafast switching* dikarenakan memiliki waktu *recovery time* yang sangat cepat yaitu sebesar 60ns atau setara dengan frekuensi *switching* sebesar 16,7MHz. Dioda ini memiliki seri *packaging* TO-220AC akan tetapi hanya memiliki dua buah kaki terminal yaitu anoda (A) dan katoda (K) seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7. berikut.



Gambar 3.7 Dioda MUR 1560

Berdasarkan perhitungan desain yang telah dilakukan dan juga memperhatikan ketersediaan nilai dari komponen dipasaran, maka komponen yang dibutuhkan dalam implementasi konverter *cuk* termodifikasi dapat dilihat pada tabel 3.8 sebagai berikut :

Tabel 3.8 Parameter komponen pada *cuk* konverter

Komponen	Nilai
Resistansi beban R_O	5,76 Ω
Induktor L_1	419 μH
Induktor L_2	791 μH
Induktor L_3	791 μH
Kapasitor C_1	47 $\mu\text{F}/250\text{V}$
Kapasitor C_2	47 $\mu\text{F}/250\text{V}$
Kapasitor C_3	47 $\mu\text{F}/250\text{V}$
Kapasitor C_O	100 $\mu\text{F}/400\text{V}$
MOSFET S	IRFP 4332
Dioda D_1	MUR 1560
Dioda D_2	MUR 1560

3.5 Parameter Panel Surya

Sumber daya utama dari sistem *Solar Water Pump* pada penelitian ini menggunakan panel surya. Dikaenakan tidak adanya sistem

penyimpanan daya (*battery*), maka dibutuhkan proses *sizing* yang tepat dan akurat agar sistem yang dibuat dapat bekerja secara baik dan optimal. Beban yang digunakan pada implementasi sistem *Solar Water Pump* ini adalah pompa *submersible*, yang terdiri dari motor *PMDC* (*Permanent Magnet DC*) yang dikopel dengan pompa sentrifugal. Motor *PMDC* sendiri pada sub bab sebelumnya yang telah di bahas memiliki rating pengoperasian sebagai berikut :

Tegangan V_{IN} : 24 Volt
 Arus input I_{IN} : 4,167 Ampere
 Daya input P_{IN} : 100 Watt

Dengan mempertimbangkan rating dari motor *PMDC* tersebut maka digunakan panel surya yang memiliki kapasitas daya sebesar 100Watt dengan mengasumsikan rugi-rugi daya pada konverter dianggap nol.

Sehingga dipilihlah panel surya dengan merk “Gema Solar” dengan spesifikasi bahan semikonduktor pada panel surya menggunakan tipe “*polycrystalline*”. Panel surya tersebut nantinya akan digunakan sebagai sumber daya utama pada sistem *Solar Water Pump* yang dirancang dengan *datasheet* ditunjukkan pada Tabel 3.9 berikut.

Tabel 3.9 *Datasheet* solar panel Gema Solar

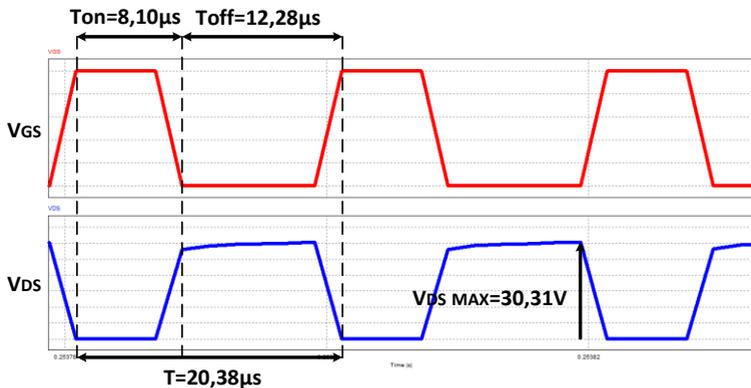
Parameter	Nilai
Model	SP-100-P36
Daya maksimum (Pmax)	100 Watt
Tegangan saat daya maksimum (Vmp)	17,6 Volt
Arus saat daya maksimum (Imp)	5,69 Ampere
Tegangan buka (Voc)	22,6 Volt
Arus hubung singkat (Isc)	6,09 Ampere
Temperatur normal (NOCT)	47 ± 2°C
Tegangan maksimum sistem	700 VDC
Rating fuse maksimum	10 Ampere
Temperatur operasi	-45°-+80°C
<i>Cell Technology</i>	Poly-Si
Berat	6,8kg
Dimensi	1020x670x35mm

3.6 Simulasi dan Implementasi Sistem

Simulasi digunakan untuk melihat respon sistem secara keseluruhan serta mendapatkan gambaran umum saat melakukan implementasi sistem *Solar Water Pump*.

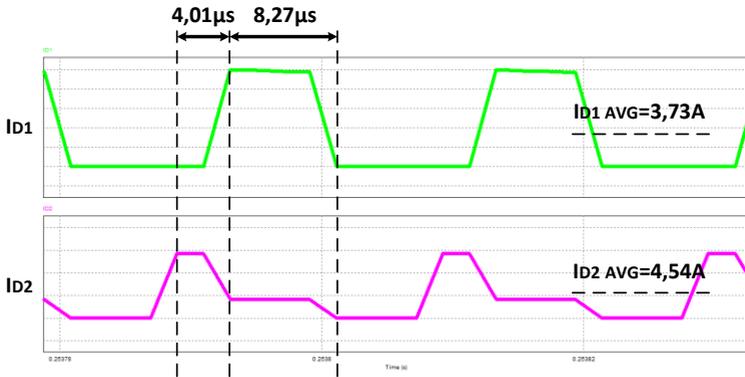
3.6.1 Simulasi konverter dalam keadaan *Steady State*

Dengan parameter yang telah disebutkan pada saat desain maka rangkaian konverter disimulasikan untuk memastikan konverter bekerja sesuai desain yang diinginkan.



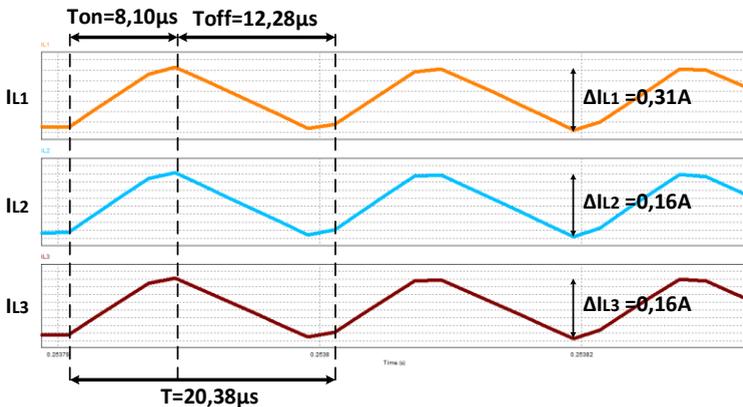
Gambar 3.8 Bentuk gelombang tegangan V_{GS} dan V_{DS}

Gambar 3.8 merupakan bentuk gelombang *switching* tegangan *gate-source* dan tegangan *drain-source*. Ketika sinyal PWM diberikan pada *gate-source* berlogika “1”, maka MOSFET akan merespon dengan berubahnya tegangan pada sisi *drain-source* menjadi logika “0” sehingga akan ada arus yang mengalir dari *drain-source*. Ketika mode konduksi, MOSFET akan membuka selama $8,10\ \mu s$ sedangkan saat mode non konduksi, MOSFET akan menutup selama $12,28\ \mu s$. Nilai tersebut sudah memenuhi desain yang diinginkan yaitu *duty cycle* 0,407 dengan frekuensi *switching* sebesar 50 kHz. Untuk nilai tegangan maksimal dari *drain-source* MOSFET bernilai 30,31 V pada saat keadaan non konduksi.



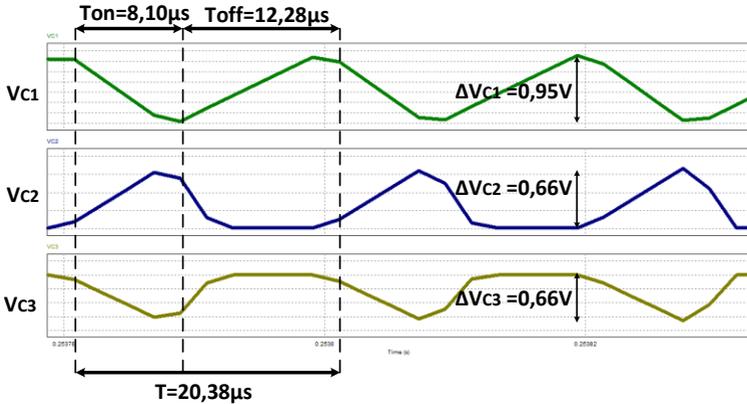
Gambar 3.9 Bentuk gelombang arus dioda D_1 dan dioda D_2

Gambar 3.9 menunjukkan bentuk gelombang arus pada dioda D_1 dan D_2 . Pada simulasi nilai arus *average* pada dioda D_1 bernilai 3,73 A sedangkan pada dioda D_2 bernilai 4,54 A. Bentuk gelombang arus pada kedua dioda dapat digunakan untuk melihat berapa lama mode II dan mode III berlangsung. Mode II memiliki interval waktu $4,01\mu\text{s}$ setiap periodenya, sedangkan mode III memiliki interval waktu $8,27\mu\text{s}$ setiap periodenya.



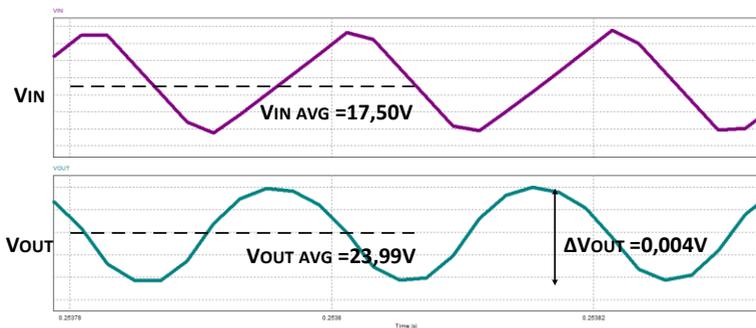
Gambar 3.10 Bentuk gelombang arus pada induktor L_1 , induktor L_2 dan induktor L_3

Gambar 3.10 diatas adalah bentuk gelombang arus pada induktor L_1 , L_2 dan L_3 . Dapat dilihat bahwa nilai *ripple* arus pada masing-masing induktor sedikit berbeda dari desain yang telah ditetapkan, akan tetapi nilai *error* tersebut masih dapat di toleransi. Nilai *ripple* arus induktor L_1 , L_2 dan L_3 berturut-turut adalah 0,31 A, 0,16 A dan 0,16A.



Gambar 3.11 Bentuk gelombang tegangan kapasitor C_1 , C_2 dan C_3

Gambar 3.11 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada kapasitor C_1 , C_2 dan C_3 . Nilai *ripple* tegangan kapasitor C_1 , C_2 dan C_3 berturut-turut adalah 0,95 V, 0,66 V dan 0,16V.

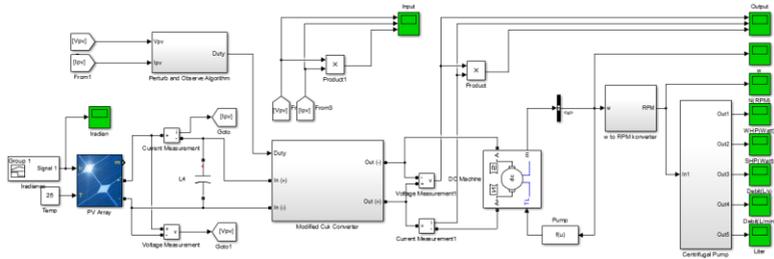


Gambar 3.12 Bentuk gelombang tegangan input dan output pada konverter *cuk* termodifikasi

Gambar 3.12 menunjukkan tegangan pada sisi input dan output konverter. Pada sisi input besar tegangannya tetap yaitu 17,5 V dikarenakan dianggap *supply* konverter memiliki daya *infinite*, akan tetapi pada simulasi dapat dilihat tegangan input memiliki *ripple* yang sangat kecil yang diakibatkan oleh *switching* yang dilakukan oleh MOSFET. Sedangkan tegangan output memiliki nilai *average* sebesar 23,99 V dengan *ripple* 0,004 V yang sudah sesuai dengan desain yang ditetapkan.

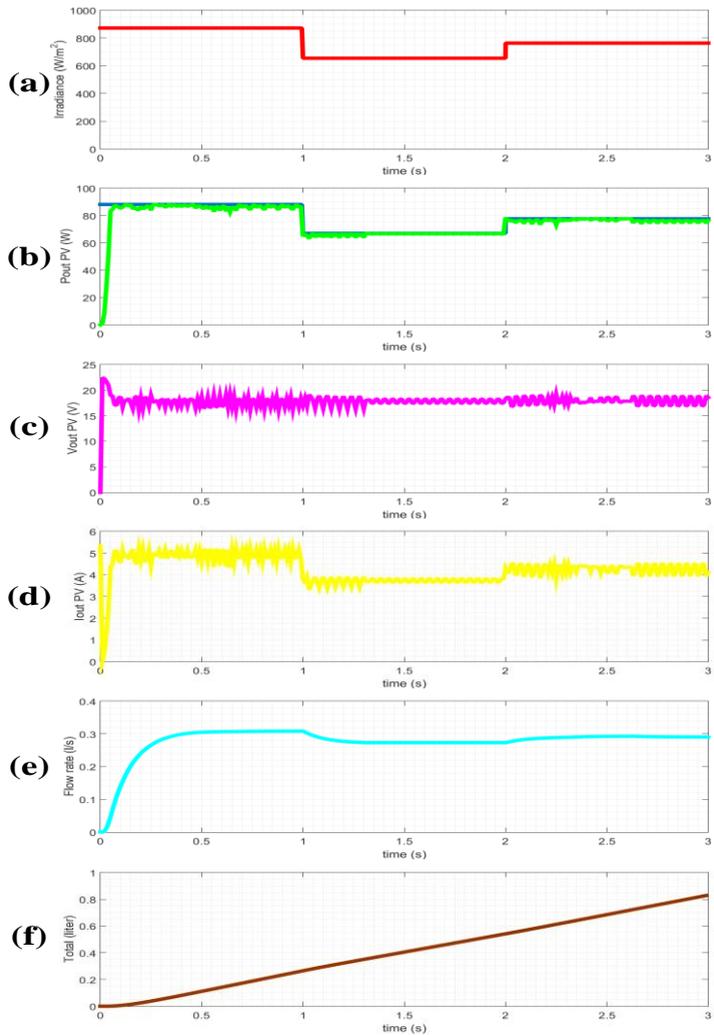
3.6.2 Simulasi Sistem Solar Water Pump dengan MPPT

Simulasi sistem secara keseluruhan menggunakan aplikasi SIMULINK di MATLAB dengan sistem yang disimulasikan terdiri dari : Panel Surya, Konverter *Cuk* Termodifikasi, Motor hingga Pompa Sentrifugal. Simulasi ini digunakan untuk melihat respon sistem *Solar Water Pump* dari sumber hingga beban. Rangkaian sistem secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.13 berikut:



Gambar 3.13 Simulasi *Solar Water Pump* dengan MPPT

Rangkaian konverter *cuk* termodifikasi dalam sistem *Solar Water Pump* menggunakan parameter yang telah di tentukan saat desain. Dalam simulasi tersebut akan diamati bentuk gelombang tegangan ouput panel surya (V_{PV}), arus output panel surya (I_{PV}), daya panel surya (P_{PV}), serta debit air yang dihasilkan oleh pompa. Besar *iradian* yang diberikan pada panel surya dimulai dari 872 W/m^2 , 654 W/m^2 dan 763 W/m^2 dengan waktu masing-masing sebesar 1 detik. Dalam simulasi yang dilakukan semua komponen yang digunakan dalam kondisi ideal.



Gambar 3.14 Gelombang pada sistem *Solar Water Pump* dengan *cuk* konverter termodifikasi sebagai hardware *MPPT*. (a) gelombang iradian, (b) gelombang PMPP, (c) gelombang VMPP, (d) gelombang IMPP, (e) gelombang debit air, (f) gelombang total debit

Dari gambar 3.14 (b) dapat dilihat bahwa sistem *MPPT* pada *Solar Water Pump* yang disimulasikan dapat mengikuti daya maksimal yang dihasilkan dari panel surya. Dengan menggunakan variasi iradian mulai dari 872 W/m^2 , 654 W/m^2 dan 763 W/m^2 , total air yang dapat dipompa dengan sistem ini mencapai 0,26 liter dalam waktu tiga sekon.

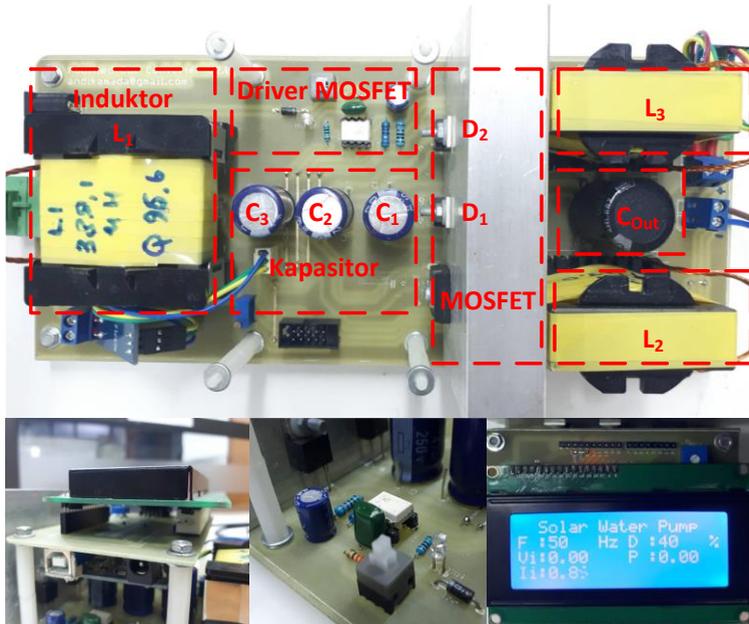
3.6.3 Implementasi Sistem *Solar Water Pump*

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai implementasi sistem *Solar Water Pump*. Implementasi dilakukan untuk mengetahui kinerja dari sistem pada kondisi riil. Berikut merupakan komponen serta parameter yang digunakan pada implementasi sistem *Solar Water Pump* seperti ditunjukkan pada tabel 3.10.

Tabel 3.10 Komponen sistem *Solar Water Pump*

Parameter Solar Panel	Nilai
Panel Surya	Gema Solar SP-100-P36
Daya MPP	100 WP
Tegangan V_{MPP}	17,6 V
Arus I_{MPP}	5,69 A
Komponen & Parameter Konverter Cuk	Nilai
Micro Controller	Arduino Uno
Frekuensi <i>switching</i>	50kHz
Induktor L_1	389,1 μ H / Q 96,6
Induktor L_2	796,8 μ H / Q 127,0
Induktor L_3	826,0 μ H / Q 124,4
Kapasitor C_1 , C_2 , dan C_3	Panasonic 47 μ F / 250 V
Kapasitor C_0	KMH 100 μ F / 400 V
Dioda D_1 dan D_2	MUR 1560
MOSFET S_1	IRFP4332
Driver MOSFET	FOD3182
Supply Driver MOSFET	12 Vdc
Komponen Sensor & Aktuator	Nilai
Sensor Tegangan	Multiturn 100k Ω
Sensor Arus	ACS 712
Sensor <i>Flow rate</i>	FS300A
Pompa air	MARINE SE-2524S

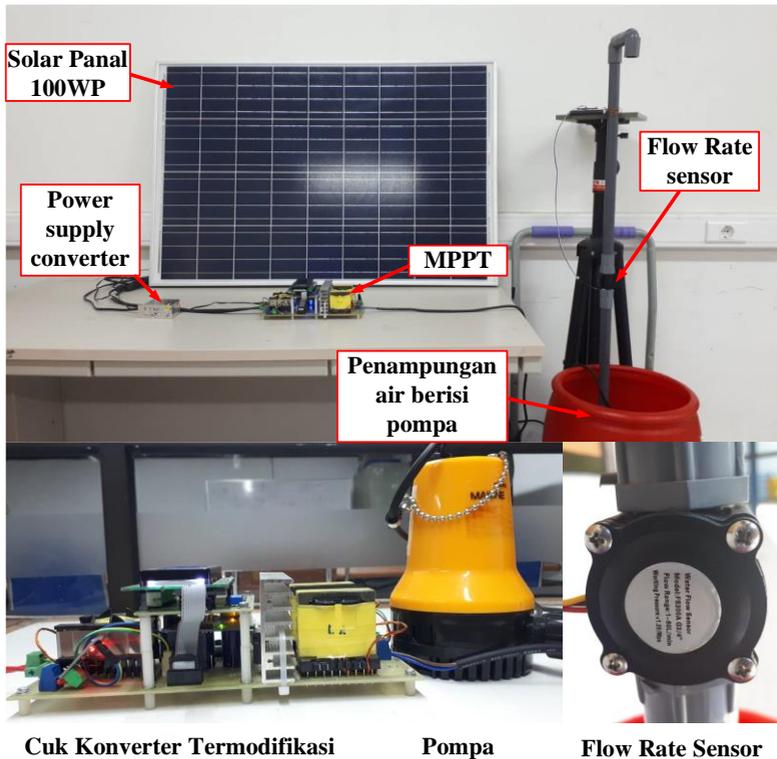
Semua komponen yang digunakan pada implementasi sistem *Solar Water Pump* mengikuti ketersediaan komponen yang ada di pasaran. Nilai komponen pada implementasi merupakan nilai yang lebih besar dari pada nilai komponen yang telah didesain. Hal tersebut bertujuan untuk mengantisipasi konverter dalam keadaan DCM.



Micro Controller Driver MOSFET LCD Display
Gambar 3.15 Implementasi Konverter *Cuk* Termodifikasi

Gambar 3.15 merupakan implementasi dari konverter *cuk* termodifikasi. Pada implementasinya, sistem konverter *cuk* termodifikasi terdiri dari beberapa bagian. Bagian pertama yaitu rangkaian *controller* yang berupa Arduino UNO dengan sumber *supply* 5 V. Pada bagian *controller* inilah nantinya akan ditanam program *MPPT* dengan algoritma *Perturb and Observe*. Bagian kedua adalah LCD Display untuk menampilkan seluruh informasi dari konverter saat beroperasi. Informasi yang ditampilkan adalah Frekuensi *switching*, tegangan input (V_{PV}), arus input (I_{PV}), daya maksimal (P_{PV}) serta *duty cycle*. Bagian ketiga adalah

driver MOSFET, sebagai penghubung antara sistem kontroller dengan sakelar MOSFET. Dan bagian terakhir adalah konverter *cuk* termodifikasi dengan parameter yang telah didesain pada sub bab sebelumnya.



Gambar 3.16 Implementasi sistem *Solar Water Pump*

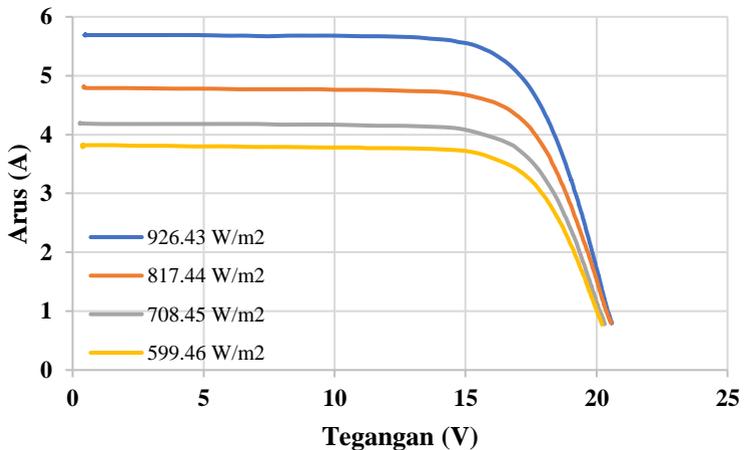
Gambar 3.16 menunjukkan tiap-tiap bagian dan komponen dari sistem *Solar Water Pump*. Untuk implementasi sistem secara keseluruhan dirangkai mulai sumber (Panel Surya) hingga beban (Pompa Sentrifugal) sesuai yang ditunjukkan pada gambar 3.16.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

4.1 Kurva Karakteristik Panel Surya

Kurva Karakteristik Panel Surya didapatkan melalui pengujian langsung panel surya dengan menggunakan iradiasi yang berbeda-beda serta suhu yang diasumsikan tetap. Setiap titik yang diperoleh pada pengujian didapatkan dengan memberikan beban resistif yang bervariasi pada sisi *output* panel surya. Hasil pengujian Kurva Karakteristik dari Panel Surya dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2.

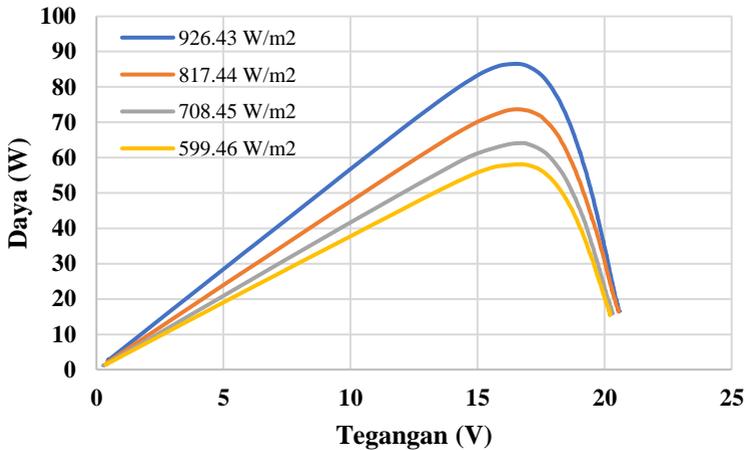


Gambar 4.1 Kurva karakteristik arus dan tegangan

Gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara arus dengan tegangan keluaran yang dihasilkan oleh panel surya. Dapat dilihat dari kurva tersebut nilai I_{SC} dan V_{OC} yang dihasilkan oleh panel surya berbanding lurus dengan nilai iradiansi.

Sedangkan untuk Gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara daya yang dihasilkan dengan tegangan keluaran pada panel surya. Dari kurva tersebut dapat dilihat daya yang dihasilkan tidak dapat mencapai rating yang tertera pada *nameplate* dikarenakan banyak faktor antara lain :

1. Iradiansi yang hanya mencapai $926,43 \text{ W/m}^2$
2. Temperatur *cell* yang nilainya mencapai 36°C
3. Dan juga faktor umur dari panel surya



Gambar 4.2 Kurva karakteristik daya dan tegangan

Untuk nilai arus output tidak bisa mencapai nol saat V_{OC} dikarenakan keterbatasan nilai dari resistansi beban yang tersedia di Laboratorium. Akan tetapi kedua kurva tersebut sudah dapat dijadikan referensi dikarenakan sudah memperlihatkan titik daya maksimum dari panel surya.

4.2 Pengujian Sensor

Perangkat sensor yang digunakan pada penelitian ini antara lain sensor tegangan dengan multiturm trimpot, sensor arus ACS 712, dan sensor *flow rate* FS300A.

4.2.1 Sensor Arus dan Tegangan

Pada pengujian sensor arus dan tegangan, sensor dibandingkan dengan alat ukur konvensional sebagai referensi. Untuk sensor arus dibandingkan menggunakan SANWA DCM-22AD sedangkan untuk sensor tegangan dibandingkan menggunakan SANWA CD800a.

Hasil pengujian sensor arus dan tegangan ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut ini. Pada tabel tersebut, yang dimaksud nilai arus dan tegangan aktual adalah nilai arus dan tegangan hasil pembacaan alat ukur referensi.

Tabel 4.1 Pengujian sensor tegangan dan arus

Arus aktual (A)	Arus sensor (A)	Error sensor (%)	Tegangan aktual (V)	Tegangan sensor (V)	Error sensor (%)
0,22	0,19	13,64	1,01	0,94	6,93
0,49	0,46	6,12	2,00	1,97	1,50
0,74	0,71	4,05	3,02	2,96	1,99
1,07	1,05	1,87	4,02	3,97	1,24
1,23	1,20	2,44	5,00	4,97	0,60
1,56	1,53	1,92	6,00	5,93	1,17
1,72	1,67	2,91	7,01	6,94	1,00
2,06	2,01	2,43	8,01	7,94	0,87
2,25	2,20	2,22	9,00	8,96	0,44
2,50	2,46	1,60	10,02	9,98	0,40
2,73	2,68	1,83	11,02	10,99	0,27
3,02	2,96	1,99	12,00	11,97	0,25
3,28	3,21	2,13	13,03	12,99	0,31
3,52	3,47	1,42	14,02	14,00	0,14
3,74	3,68	1,60	15,03	14,99	0,27
4,04	3,99	1,24	16,00	15,99	0,06
4,26	4,19	1,64	17,01	17,01	0,00
4,52	4,46	1,33	18,03	18,02	0,06
4,74	4,68	1,27	19,00	18,99	0,05
4,99	4,94	1,00	20,01	20,00	0,05
Rata-rata		2,73	Rata-rata		0,88

Berdasarkan tabel 4.1 dapat ditarik kesimpulan bahwa sensor arus ACS 712 dan sensor tegangan dengan *multiturn trimpot* memiliki performa yang baik dengan memperhatikan rata-rata *error* pada setiap sensor dan nilai *error* terendahnya.

Untuk sensor arus memiliki *error* rata-rata 2,73 % dengan nilai *error* tertinggi mencapai 13,64 % sedangkan untuk sensor tegangan memiliki *error* rata-rata 0,88 % dengan nilai *error* terbesar mencapai 6,93%.

4.2.2 Sensor Flow Rate

Pada pengujian sensor *flow rate*, sensor dibandingkan dengan gelas ukur untuk mengukur seberapa presisi sensor yang digunakan. Hasil pengujian dari sensor *flow rate* ditunjukkan pada tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2 Pengujian sensor flow rate FS300A

Debit gelas ukur (l/s)	Debit sensor (l/s)	Akurasi sensor
0,02	0,02	100,00
0,04	0,04	100,00
0,06	0,05	83,33
0,08	0,06	75,00
0,10	0,08	80,00
0,12	0,11	91,67
0,14	0,12	85,71
0,16	0,15	93,75
0,18	0,17	94,44
0,20	0,20	100,00
0,22	0,18	81,82
0,24	0,21	87,50
0,26	0,22	84,62
0,28	0,23	82,14
0,30	0,27	90,00
0,32	0,30	93,75
0,34	0,32	94,12
0,36	0,35	97,22
0,38	0,36	94,74
0,40	0,40	100,00
Rata-rata		90,49

Dari tabel 4.2 dapat ditarik kesimpulan bahwa sensor *flow rate* FS300A yang digunakan pada implementasi *Solar Water Pump* sudah memiliki performa yang cukup baik berdasarkan nilai *error* rata-rata dari sensor dan juga nilai *error* tertingginya.

Sensor *flow rate* yang digunakan memiliki nilai rata-rata 9,51 % dengan nilai akurasi terendah dapat mencapai 25,00 %.

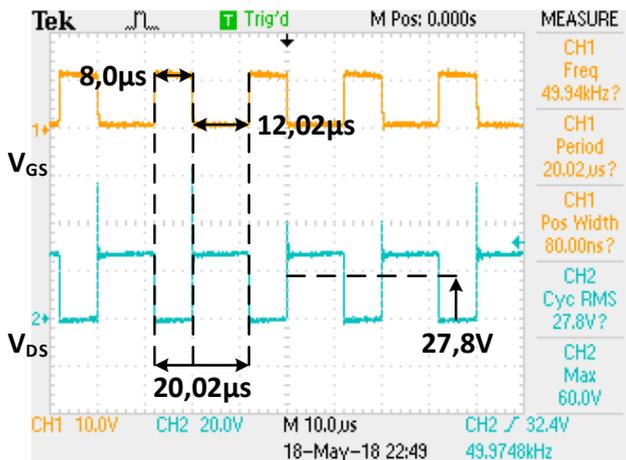
4.3 Pengujian Konverter *Cuk* Termodifikasi

Pada pengujian ini bertujuan untuk memastikan konverter saat implementasi sudah sesuai dengan desain yang diinginkan. Pengujian dilakukan dengan peralatan yang tersedia pada Laboratorium Konversi Energi B101 yang meliputi sumber DC *Regulated Power Supply*, osiloskop Tektronik TPS 2014B, multimeter sanwa CD800a, *clamp* meter sanwa DCM-22AD, LCR meter sanwa LCR700, dan beban R variabel LANGLOIS.

4.3.1 Pengujian Sinyal Dari Tiap Komponen

Pengujian sinyal dari tiap komponen ini terbagi atas empat buah pengujian. Pengujian tersebut dimaksudkan untuk melihat sinyal dari berbagai komponen yang digunakan saat implementasi sudah sesuai atau tidak dengan nilai yang telah ditentukan saat desain awal. Berikut merupakan pengujian sinyal tiap komponen, antara lain :

A. Pengujian sinyal MOSFET

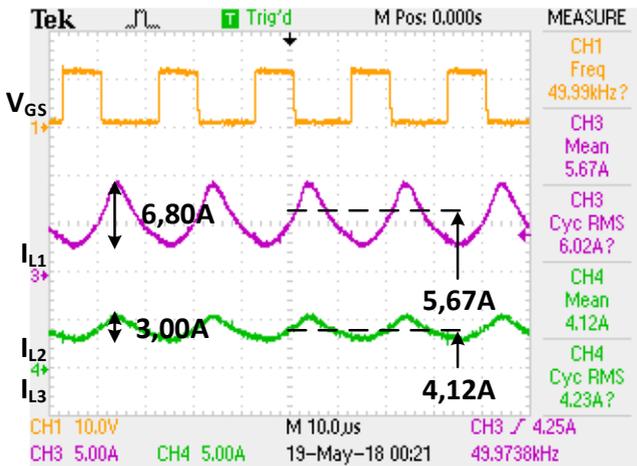


Gambar 4.3 Sinyal *switching* pada MOSFET

Dapat dilihat pada Gambar 4.3, konverter sudah bisa beroperasi pada desain yang diinginkan yaitu dengan frekuensi *switching* sebesar 49,94

kHz dan dengan duty cycle sebesar 0,407 atau setara dengan 80,00 ns. Nilai tegangan pada sisi *drain-source* hanya mencapai 27,8 V, nilai tersebut lebih kecil dari pada desain yang diinginkan dikarenakan MOSFET yang digunakan saat implementasi nilainya tidak ideal. Sedangkan untuk tegangan *pulse* yang terbentuk karena *switching* memiliki nilai maksimal 60,0 V.

B. Pengujian sinyal induktor

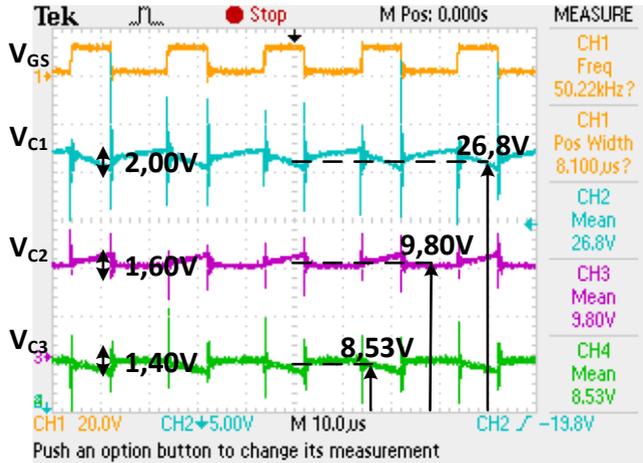


Gambar 4.4 Sinyal pada induktor L₁, induktor L₂ dan induktor L₃

Pada gambar 4.4 menunjukkan sinyal pada induktor L₁, induktor L₂ dan induktor L₃. Dapat dilihat gelombang arus yang mengalir pada semua induktor berada pada kondisi CCM (*Continuous Conduction Mode*)

Arus pada Induktor L₁ bernilai 5,67 A, yang mana nilainya lebih besar dari pada desain yang ditetapkan. Sedangkan untuk induktor L₂ dan induktor L₃ bernilai 4,12 A lebih kecil dari pada desain yang ditetapkan. Dikarenakan terdapat rugi-rugi dari induktor yang dibuat dengan cara manual.

C. Pengujian sinyal Kapasitor

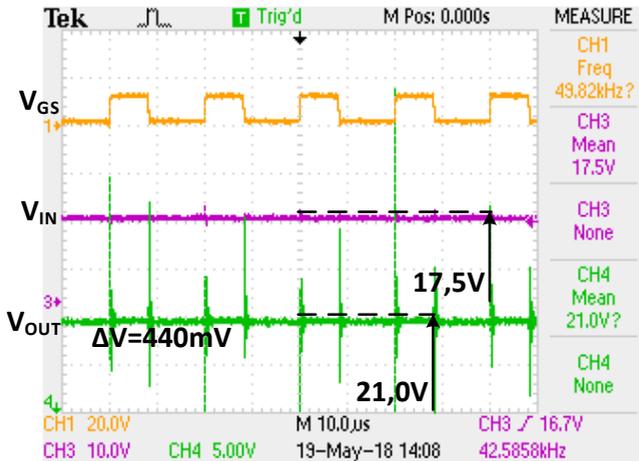


Gambar 4.5 Sinyal pada kapasitor C₁, kapasitor C₂ dan kapasitor C₃

Pada gambar 4.5 dapat dilihat sinyal *charge* dan *discharge* pada setiap kapasitor. Bentuk sinyal dari kapasitor C₁, kapasitor C₂ dan kapasitor C₃ sudah sesuai dengan desain dan simulasi yang telah dilakukan. Pada kapasitor C₁ nilai tegangan rata-rata bernilai 26,8 V dengan tegangan *ripple* sebesar 1,84 V. Untuk kapasitor C₂ nilai tegangan rata-rata bernilai 9,80 V dengan *ripple* sebesar 1,36 V. Sedangkan untuk kapasitor C₃ nilai tegangan rata-rata bernilai 8,53 V dengan *ripple* sebesar 1,36 V.

Tegangan pada setiap komponen kapasitor memiliki nilai yang lebih besar dikarenakan kapasitor yang digunakan tidak ideal. Sedangkan untuk nilai tegangan pada kapasitor C₂ dan kapasitor C₃ seharusnya bernilai sama akan tetapi dapat dilihat pada gambar 4.5 sinyal pada kapasitor C₃ memiliki nilai *spike* yang lebih besar dari pada kapasitor C₂ sehingga mempengaruhi pembacaan dari tegangan rata-ratanya.

D. Pengujian sinyal Input dan Output

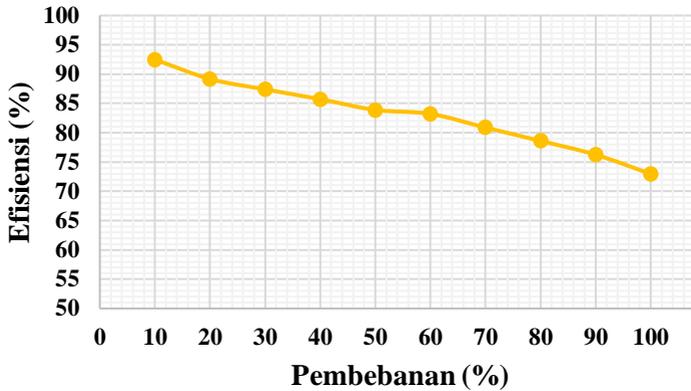


Gambar 4.6 Sinyal tegangan pada sisi input dan output

Pada gambar 4.6 nilai tegangan pada sisi input bernilai 17,5 V dengan *ripple* tegangan sangat kecil, dikarenakan tegangan input merupakan keluaran dari sumber DC yang digunakan. Sedangkan tegangan pada sisi output bernilai 21,0 V dengan *ripple* tegangan sebesar 1,8 %. Nilai tersebut lebih rendah dari pada desain yang ditentukan dikarenakan ada *losses* dari tiap-tiap komponen.

4.3.2 Pengujian Efisiensi

Pengujian efisiensi pada konverter digunakan untuk mengetahui seberapa efisien konverter yang dirancang. Dikarenakan pada aplikasi *Solar Water Pump* daya yang di hasilakan dari panel surya nilainya terbatas, sehingga parameter efisiensi dari konverter yang digunakan merupakan hal penting yang perlu diperhatikan. Pengujian efisiensi dengan cara penambahan beban dengan V_I dan V_O dijaga tetap nilainya. Gambar 4.7 merupakan grafik dari konverter *cuk* termodifikasi dengan porsi pembebanan antara 10% hingga 100% dari kapasitas konverter yang ditentukan saat desain.

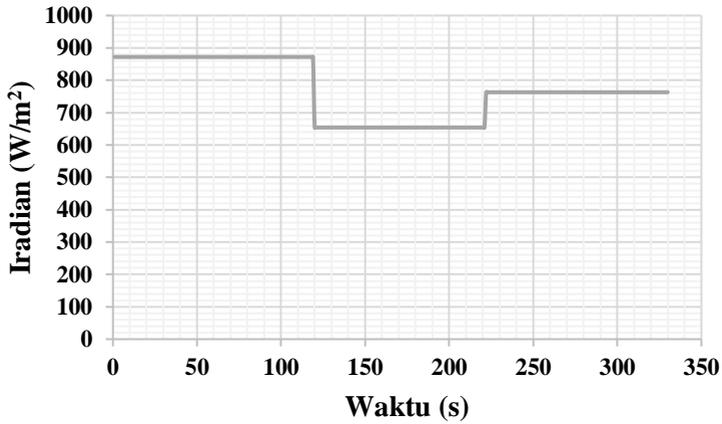


Gambar 4.7 Kurva efisiensi *cuk* konverter termodifikasi

Dari kurva tersebut terlihat bahwa efisiensi tertinggi dari konverter dapat mencapai 92,49 % sedangkan efisiensi minimal dapat mencapai 73,00 %. Sehingga efisiensi rata-rata dari *cuk* konverter termodifikasi mencapai 83,06 %. Dari gambar 4.7 dapat di lihat semakin besar pembebanan semakin menurun efisiensi dari konverter, hal tersebut dikarenakan semakin membesar arus yang mengalir pada konverter. *Losses* yang paling besar disebabkan oleh komponen pensakelaran yaitu pada MOSFET dan dioda serta terdapat *losses* I^2R pada sisi Induktor.

4.4 Pengujian MPPT pada Solar Water Pump

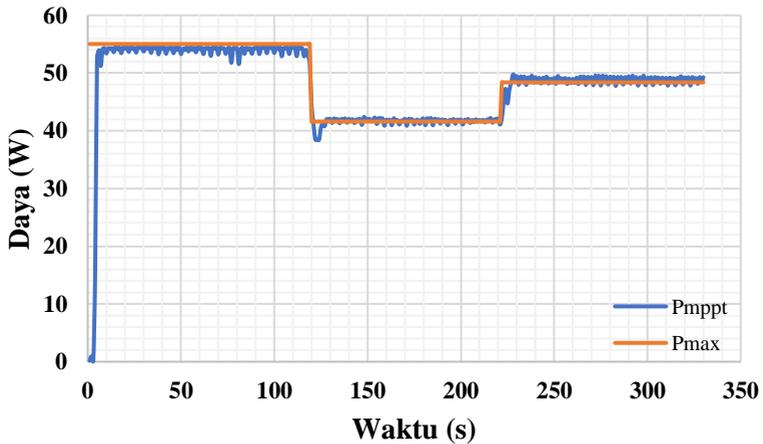
Pengujian ini digunakan untuk mengetahui respon dari MPPT pada sistem Solar Water Pump dengan iradiasi yang berubah ubah. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur daya maksimal pada panel surya pada kondisi normal, selanjutnya panel surya diposisikan dengan sudut tertentu untuk mendapatkan nilai iradian yang berbeda. Pada pengujian nyata, sulit untuk menyamakan nilai daya maksimal saat pengukuran dan saat pengujian MPPT. Grafik perubahan iradian terhadap waktu dapat dilihat pada gambar 4.8. Nilai iradian diubah dengan tiga variasi yaitu 872 W/m², 654 W/m² dan 763 W/m².



Gambar 4.8 Kurva iradian terhadap waktu

4.4.1 Kurva Daya

Berdasarkan kurva iradian pada gambar 4.8, maka didapatkan kurva antara daya maksimal panel surya dan daya *tracking MPPT*.



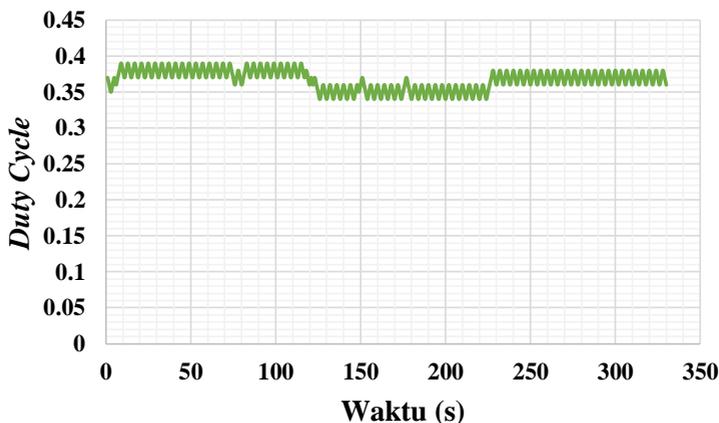
Gambar 4.9 Tracking daya MPPT Solar Water Pump

Berdasarkan kurva pada gambar 4.9 dapat disimpulkan bahwa *MPPT* yang dirancang pada *Solar Water Pump* dapat mengikuti daya solar panel pada iradiasi yang berbeda. Akan tetapi pada iradian 763 W/m^2 daya pada *MPPT* melebihi dari daya maksimal panel surya. Hal ini dikarenakan pada saat pengukuran daya maksimal panel surya dilakukan setelah pengujian *MPPT* sehingga berakibat pada penurunan iradian dan meningkatnya temperatur dari panel surya.

Total energi maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya sebesar 4,463 Wh, sedangkan dengan menggunakan *MPPT* energi yang dapat dihasilkan sebesar 4,383 Wh. Sehingga daya yang hilang pada saat pengujian sebesar 1,8 %.

4.4.2 Kurva *Duty cycle*

Untuk melihat performa dari *MPPT* maka dapat dilihat dari perubahan *duty cycle* pada konverter saat beroperasi.

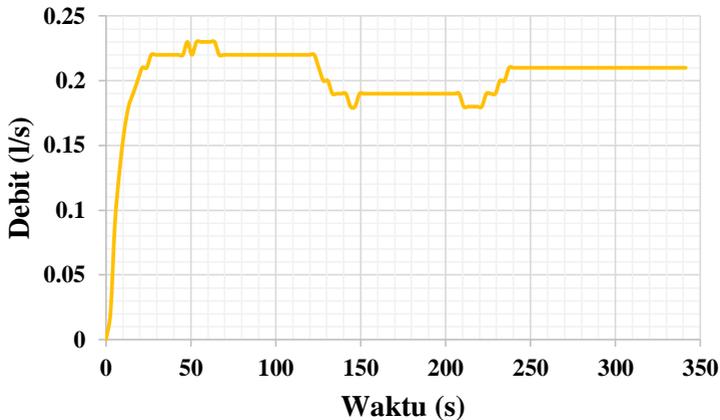


Gambar 4.10 *Duty cycle* pada *MPPT*

Pada gambar 4.10 terlihat *duty cycle* pada konverter berubah-ubah sesuai dengan perubahan iradian. *Duty cycle* pada konverter berosilasi pada suatu nilai, hal tersebut dikarenakan sistem kerja dari Algoritma *Perturb and Observe* saat berada pada titik MPP.

4.4.3 Kurva Debit

Pada sisi *output* dari *Solar Water Pump* digunakan *flow rate* sensor untuk mengetahui debit yang dihasilkan saat proses pengujian dengan iradian berubah.



Gambar 4.11 Debit air yang dihasilkan *Solar Water Pump* dengan *MPPT*

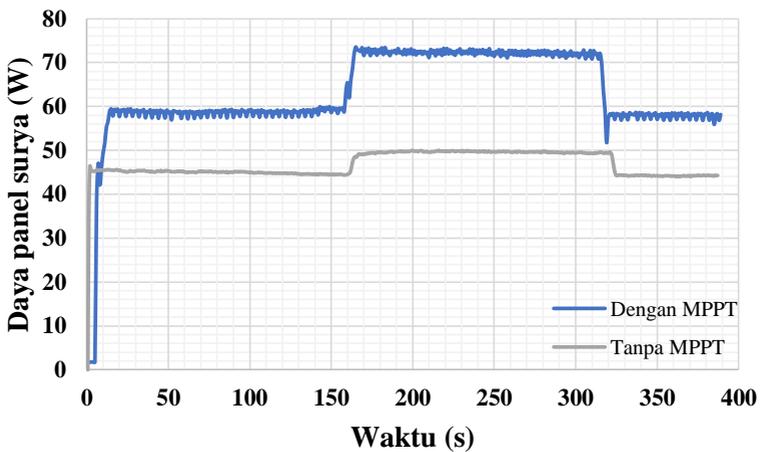
Dapat dilihat dari kurva debit air pada gambar 4.11, nilai yang dihasilkan dari *Solar Water Pump* saat implementasi sudah sesuai dengan simulasi. Dengan total air yang dapat dipompa sebesar 25,96 liter dalam waktu 5 menit 30 detik.

4.5 Perbandingan *Solar Water Pump* dengan dan tanpa *MPPT*

Perbandingan antara sistem *Solar Water Pump* dengan menggunakan *MPPT* dan tanpa menggunakan *MPPT* berfungsi untuk mengetahui efek dari *MPPT* yang dirancang pada sistem *Solar Water Pump*. Pada pengujian ini, terdapat dua parameter yang di bandingkan yaitu : daya *output* pada panel surya saat implementasi dengan dan tanpa *MPPT* serta debit yang mampu dihasilkan oleh keduanya.

4.5.1 Perbandingan Daya

Pada sistem *Solar Water Pump* tanpa *MPPT* terdiri atas panel surya yang langsung dihubungkan dengan motor dan pompa sentrifugal. Pengukuran daya yang dihasilkan diperoleh dari sensor arus dan tegangan yang diletakkan antara panel surya dan motor *PMDC* yang terhubung pompa sentrifugal. Sedangkan untuk sistem *Solar Water Pump* dengan *MPPT* menggunakan metode yang diusulkan pada penelitian ini. Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan daya yang dihasilkan kedua sistem.

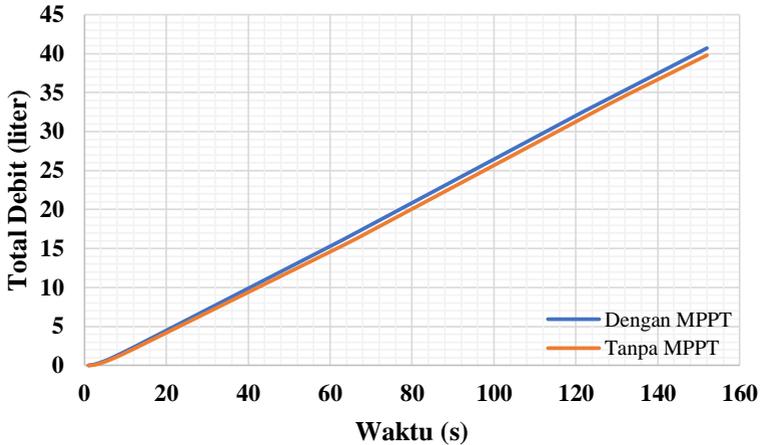


Gambar 4.12 Perbandingan daya pada sistem *Solar Water Pump* dengan dan tanpa *MPPT*

Berdasarkan pada gambar 4.12, dengan menggunakan parameter iradain dan suhu pada panel surya dibuat sama, total energi yang dapat dihasilkan pada sistem dengan *MPPT* lebih besar dibandingkan tanpa *MPPT*. Total energi dari sistem *Solar Water Pump* dengan menggunakan *MPPT* dapat mencapai 6,81 Wh sedangkan energi pada sistem *Solar Water Pump* tanpa *MPPT* hanya 5,04 Wh dalam waktu pengujian untuk keduanya sebesar 6 menit 29 detik.

4.5.2 Perbandingan Total Debit

Perbandingan antara debit yang dihasilkan pada sistem *Solar Water Pump* dengan *MPPT* dan tanpa *MPPT* didapatkan dari pola pengujian sebelumnya. Gambar 4.13 menunjukkan perbandingan total debit air yang dihasilkan oleh kedua sistem.



Gambar 4.13 Perbandingan daya pada sistem *Solar Water Pump* dengan dan tanpa *MPPT*

Dari gambar 4.13 dapat disimpulkan bahwa sistem *Solar Water Pump* dengan menggunakan *MPPT* dapat menghasilkan total debit air 1,023 kali lebih besar dari pada sistem tanpa *MPPT* dengan waktu pengujian selama 6 menit 29 detik. Dari perbandingan debit didapatkan perbedaan yang tidak terlalu signifikan, hal tersebut dikarenakan banyak faktor yang mempengaruhi. Salah satunya adalah efisiensi konverter dan juga lama waktu pengujian. Dapat di lihat pada gambar 4.13 semakin lama waktu pengujian maka semakin terlihat perbedaan antara menggunakan dan tanpa *MPPT*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari simulasi dan implementasi, *sistem Solar Water Pump* dengan menggunakan konverter *cuk* termodifikasi dapat diambil kesimpulan :

1. Konverter *cuk* termodifikasi pada tugas akhir ini memiliki efisiensi yang cukup baik pada pembebanan 10% hingga 100% dari kapasitas dengan rata-rata efisiensinya mencapai 83,06%.
2. *MPPT* dengan kontrol algoritma *Perturb and Observe* pada sistem *Solar Water Pump* pada tugas akhir ini dapat memaksimalkan daya keluran panel surya sebesar 98.56%.
3. Sistem *Solar Water Pump* dengan menggunakan *MPPT* dapat meningkatkan jumlah debit air sebesar 1,023 kali dibanding tanpa menggunakan *MPPT* dengan waktu pengujian selama 6 menit 29 detik.

5.2 Saran

Adapun saran pada penelitian ini untuk dapat memperbaiki dan mengembangkan penelitian selanjutnya, yaitu :

1. Perlu dilakukan pengujian menggunakan PV emulator agar didapatkan hasil implementasi pada kondisi yang ideal.
2. Penggunaan sensor arus dan tegangan yang telah teruji keandalannya serta kepresisiannya sehingga daya maksimal MPP dapat di *track* dengan tepat dan akurat.
3. Perlu adanya penambahan dan analisa sistem “*storage*” pada implementasi untuk mengatasi penggunaan *Solar Water Pump* pada daerah yang sering berawan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Choudhary, R. K. Srivatava, and S. De, “Solar Powered Induction Motor Based Water Pumping System : A Review of Components , Parameters and Control Methodologies,” no. Dc, pp. 666–674, 2017.
- [2] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. 2004.
- [3] M. Villalva, J. Gazoli, and E. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.
- [4] T. Lueangamornsiri, K. Thongpull, K. Chalermyanont, and W. Wichakool, “Design and development of a stand-alone solar energy harvesting system by MPPT and quick battery charging,” *2016 13th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol. ECTI-CON 2016*, 2016.
- [5] M. Killi and S. Samanta, “Modified perturb and observe MPPT algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5549–5559, 2015.
- [6] H. Ardi, A. Farakhor, and A. Ajami, “Design, analysis and implementation of a buck–boost DC/DC converter,” *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 12, pp. 2902–2913, 2014.
- [7] M. Ashari, *Desain Konverter Elektronika Daya*. 2017.
- [8] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*. 2012.
- [9] Grundfos, “The Centrifugal Pump,” *Centrif. Pump*, pp. 1–128, 2008.
- [10] P. J. Pritchard, *Fox and McDonald’s Introduction to Fluid Mechanics*. 2011.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

1. Tabel American Wire Gauge (AWG) Conductor Size

AWG	Diameter [mm]	Area [mm²]	Resistance [Ohms/km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency For 100% skin depth
4/0	11.684	107	0.16072	302	160 Hz
3/0	10.40384	85	0.202704	239	200 Hz
2/0	9.26592	67.4	0.255512	190	250 Hz
1/0	8.25246	53.5	0.322424	150	325 Hz
1	7.34822	42.4	0.406392	119	410 Hz
2	6.54304	33.6	0.512664	94	500 Hz
3	5.82676	26.7	0.64616	75	650 Hz
4	5.18922	21.2	0.81508	60	810 Hz
5	4.62026	16.8	1.027624	47	1100 Hz
6	4.1148	13.3	1.295928	37	1300 Hz
7	3.66522	10.5	1.634096	30	1650 Hz
8	3.2639	8.37	2.060496	24	2050 Hz
9	2.90576	6.63	2.598088	19	2600 Hz
10	2.58826	5.26	3.276392	15	3200 Hz
11	2.30378	4.17	4.1328	12	4150 Hz
12	2.05232	3.31	5.20864	9.3	5300 Hz
13	1.8288	2.62	6.56984	7.4	6700 Hz
14	1.62814	2.08	8.282	5.9	8250 Hz
15	1.45034	1.65	10.44352	4.7	11 k Hz
16	1.29032	1.31	13.17248	3.7	13 k Hz
17	1.15062	1.04	16.60992	2.9	17 kHz
18	1.02362	0.823	20.9428	2.3	21 kHz
19	0.91186	0.653	26.40728	1.8	27 kHz
20	0.8128	0.518	33.292	1.5	33 kHz
21	0.7239	0.41	41.984	1.2	42 kHz
22	0.64516	0.326	52.9392	0.92	53 kHz
23	0.57404	0.258	66.7808	0.729	68 kHz
24	0.51054	0.205	84.1976	0.577	85 kHz
25	0.45466	0.162	106.1736	0.457	107 kHz
26	0.40386	0.129	133.8568	0.361	130 kHz

2. Program *MPPT* yang digunakan pada MATLAB (Simulasi)

```
function dutyOut = pno(Vsense, Isense)
persistent duty p p0 v0 dp dv n ;

if isempty(duty)
    duty=0.33;
end
if isempty(p)
    p = 0;
end
if isempty(p0)
    p0=0;
end
if isempty(v0)
    v0=0;
end

if isempty(n)
    n=0;
end

if duty<=1
    p = Vsense*Isense;
    dp = p-p0;
    dv = Vsense-v0;

    if (dp/dv>0)
        duty = duty - 0.01;
    end

    if (dp/dv<0)
        duty = duty + 0.01;
    end
    v0=Vsense;
    p0=p;
    if n==0
        duty = duty - 0.01;
        n=1;
    end
end
```

```

    end
    if (duty<0.33)
    duty = 0.33;
    end
    if (duty>0.71)
    duty = 0.71;
    end

end

    dutyOut = duty;

end

```

3. Program *MPPT* yang digunakan paada Arduino (Implementasi)

```

#define prescaler 19.5
#define offset 512.0
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 10, 5, 4, 3, 2);

float D = 0.00;
float Vin = 0.0;
float Iin = 0.0;
float VsampleIn = 0.0;
float IsampleIn = 0.0;
float VavgIn = 0.0;
float IavgIn = 0.0;
float VreadIn = 0.0;
float IreadIn = 0.0;
float PreadIn = 0.0;
float VprevIn = 0.0;
float PprevIn = 0.0;
float delV = 0.0;
float delP = 0.0;

```

```

void setup()
{
  lcd.begin(20, 4);
  Serial.begin(9600);
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(WGM11);
  TCCR1B = _BV(WGM13) | _BV(CS10);
}

void loop()
{

  // sensor tegangan dan arus

  VsampleIn = 0;
  IsampleIn = 0;

  for (int x = 0; x < 1000; x++)
  { //10000 sampel data

    Vin = analogRead(A3);
    Iin = analogRead(A2);

    VsampleIn = VsampleIn + Vin;
    IsampleIn = IsampleIn + Iin;

    delayMicroseconds(1);
  }

  VavgIn = VsampleIn / 1000;
  IavgIn = IsampleIn / 1000;

  VreadIn = VavgIn * 50 / 1023.0;

```

```
IreadIn = ((IavgIn * (5.0 / 1023.0)) - offset * 5.0 / 1023.0) / (prescaler *  
5.0 / 1023.0);
```

```
PreadIn = VreadIn * IreadIn;
```

```
PreadOut = VreadOut * IreadOut;
```

```
//MPPT P & O
```

```
delV = VreadIn - VprevIn;
```

```
delP = PreadIn - PprevIn;
```

```
if (delP != 0 || delV != 0)
```

```
{
```

```
    if (delP > 0)
```

```
    {
```

```
        if (delV > 0)
```

```
        {
```

```
            D = D - 0.01;
```

```
        }
```

```
        else if (delV < 0)
```

```
        {
```

```
            D = D + 0.01;
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    else if (delP < 0)
```

```
    {
```

```
        if (delV > 0)
```

```
        {
```

```
            D = D + 0.01;
```

```
        }
```

```
        else if (delV < 0)
```

```
        {
```

```
            D = D - 0.01;
```

```
        }
```

```
    }
```

```

}
VprevIn = VreadIn;
PprevIn = PreadIn;

//PWM

ICR1 = 160;
OCR1A = D*160;

if (D > 0.71) D = 0.71; //0,71
if (D < 0.33) D = 0.33; //0,33

//Display

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("F : 50kHz");
lcd.setCursor(11,0);
lcd.print("D :");
lcd.print(D);
lcd.setCursor(19,0);
lcd.print("%");

lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Vi:");
lcd.print(VreadIn);
lcd.setCursor(8,1);
lcd.print("V");

lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Ii:");
lcd.print(IreadIn);
lcd.setCursor(8,2);
lcd.print("A");

```

```
lcd.setCursor(0,3);  
lcd.print("Pi:");  
lcd.print(PreadIn);  
lcd.setCursor(8,3);  
lcd.print("W");  
  
Serial.print(VreadIn);  
Serial.print("\t");  
Serial.print(IreadIn);  
Serial.print("\t");  
Serial.print(PreadIn);  
Serial.print("\t");  
Serial.print(D);  
Serial.print("\t");  
Serial.print(delP);  
Serial.print("\t");  
Serial.println(delV);  
}
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Andika Mada Rachmanto, biasa dipanggil Mada, lahir di Tuban pada 24 Desember 1995. Besar di Baturetno, sebuah desa pesisir di ujung utara dari kabupaten Tuban. Pendidikan formal dimulai dari tingkat dasar di SDN Sendangharjo 4 no 12 Tuban, pendidikan tingkat menengah di SMP N 2 Tuban, pendidikan tingkat lanjut di SMA N 2 Tuban, pendidikan tinggi di Departemen Teknik Elektro FTE-ITS. Selama masa studi tingkat lanjut hingga tinggi banyak organisasi dan kepanitiaan yang telah di ikuti, seperti : OSIS SMA N 2 Tuban masa bakti 2011/2012 dan 2012/2013, Pecinta Alam dan Pendaki Gunung MIDORI pada tahun 2012 hingga sekarang, Koordinator Sie Perlengkapan ELECTRA 2017, dan Asisten Laboratorium Konversi Energi 2016 hingga 2018. Pada bidang keilmiahan tingkat nasional maupun internasional banyak karya yang telah dihasilkan, seperti PIMNAS ke-30 Makasar dengan program PKM-KC dan 2nd Runner Up Chula International Innovation Challenge for Community 2018 di Thailand. Selanjutnya, terkait riset maupun hal-hal lain yang perlu didiskusikan, dapat dihubungi melalui email : andikamada@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan