

**RANCANG BANGUN PV EMULATOR BERBASIS *SYNCHRONOUS*  
*BUCK CONVERTER* MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**ALFIN FITROHUL HUDA  
NPM. 2015031053**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

## ABSTRAK

### RANCANG BANGUN PV EMULATOR BERBASIS *SYNCHRONOUS BUCK CONVERTER* MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER

Oleh

ALFIN FITROHUL HUDA

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dimanfaatkan. Pemanfaatannya menggunakan panel surya atau Photovoltaic (PV) yang mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Penelitian terkait teknologi pembangkit listrik tenaga surya seperti *maximum power point tracking* (MPPT) dan inverter, terus berkembang. Namun, pengujian teknologi tersebut menghadapi tantangan karena daya keluaran panel surya selalu berubah sesuai parameter lingkungan, seperti iradiasi dan suhu. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan PV emulator, alat yang dapat meniru karakteristik daya keluaran PV yang dapat diatur. PV emulator merupakan perangkat catu daya yang dapat menghasilkan karakteristik arus-tegangan (I-V) yang menyerupai modul PV. PV Emulator yang dibuat berbasis *synchronous buck converter*, dengan karakteristik I-V dari modul PV referensi dimodelkan menggunakan metode *look-up table* (LUT) yang diprogram pada mikrokontroler Arduino Nano. Tegangan keluaran *synchronous buck converter* menjadi masukan umpan balik bagi LUT dan menghasilkan arus referensi yang kemudian dibandingkan dengan arus keluaran aktual *synchronous buck converter*, Nilai *error* dari perbandingan ini diproses oleh *PID controller*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa PV emulator ini memiliki performa yang baik dalam meniru karakteristik daya keluaran modul PV referensi, dengan rata-rata kesalahan pengujian yang rendah, yaitu 2,3% untuk  $V_{mp}$ , 0,98% untuk  $I_{mp}$ , dan 1,38% untuk  $P_{mp}$  pada kondisi pengujian STC (1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C). Selain itu, rangkaian PV emulator yang dibuat memiliki efisiensi rata-rata sebesar 86,2%.

Kata kunci: *Photovoltaic* (PV), PV emulator, *synchronous buck converter*, *look-up table* (LUT), Arduino Nano

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PV EMULATOR BASED ON SYNCHRONOUS BUCK CONVERTER USING MICROCONTROLLER**

**By**

**ALFIN FITROHUL HUDA**

Solar energy is one of the most widely utilized renewable energy sources. It is harnessed using solar panels or Photovoltaic (PV) systems that convert solar radiation into electrical energy. Research related to solar power technologies, such as maximum power point tracking (MPPT) and inverters, continues to advance. However, testing these technologies faces challenges, as the output power of solar panels constantly fluctuates according to environmental parameters, such as irradiation and temperature. Therefore, this study focuses on developing a PV emulator, a device that can replicate adjustable PV output characteristics. The PV emulator is a power supply device capable of producing current-voltage (I-V) characteristics similar to those of actual PV modules. The developed PV emulator is based on a synchronous buck converter, with the I-V characteristics of the reference PV module modeled using a look-up table (LUT) programmed into an Arduino Nano microcontroller. The output voltage of the synchronous buck converter serves as feedback to the LUT, generating a reference current that is then compared to the actual output current of the synchronous buck converter. The error value from this comparison is processed by a PID controller. Test results show that this PV emulator performs well in replicating the output characteristics of the reference PV module, with low average testing errors of 2.3% for  $V_{mp}$ , 0.98% for  $I_{mp}$ , and 1.38% for  $P_{mp}$  under STC conditions ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ). Additionally, the developed PV emulator circuit achieves an average efficiency of 86.2%.

**Keywords:** Photovoltaic (PV), PV emulator, *synchronous buck converter*, *look-up table* (LUT), Arduino Nano

**RANCANG BANGUN PV EMULATOR BERBASIS *SYNCHRONOUS*  
*BUCK CONVERTER* MENGGUNAKAN MIKROKONTROLER**

Oleh  
**ALFIN FITROHUL HUDA**  
Skripsi

Sebagai salah satu syarat untuk mendapat gelar

**SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik  
Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

Judul Skripsi : **RANCANG BANGUN PV EMULATOR  
BERBASIS SYNCHRONOUS BUCK  
CONVERTER MENGGUNAKAN  
MIKROKONTROLER**

Nama Mahasiswa : **Alfin Fitrohul Huda**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015031053**


Jurusan : **Teknik Elektro**

Fakultas : **Teknik**

**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing

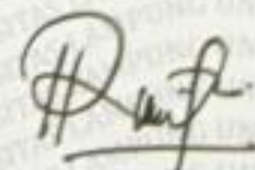
  
**Prof. Dr. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.**  
NIP. 19710415 199803 1 005

  
**Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.**  
NIP. 19710813 199903 1 003

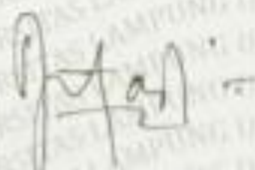
2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro



**Herlinawati, S.T., M.T.**  
NIP. 19710314 199903 2 001

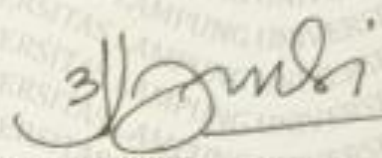


**Sumadi, S.T., M.T.**  
NIP. 19731104 200003 1 001

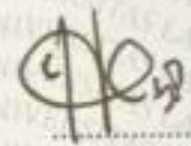
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

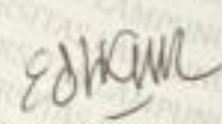
Ketua : **Prof. Dr. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T.** .....



Sekretaris : **Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.** .....



Penguji Utama : **Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.** .....



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. )**  
NIP. 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **25 September 2024**

## SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini yang berjudul "Rancang Bangun PV Emulator Berbasis *Synchronous Buck Converter* Menggunakan Mikrokontroler" tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat atas diterbitkannya oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 14 Oktober 2024



Alfin Fitrohul Huda  
NPM 2015031053

Dengan segala kerendahan hati,  
kupersembahkan karya sederhanaku ini sebagai tanda cinta, kasih, serta rasa  
terima kasihku

**Kepada Kedua Orang Tua**

**Bapak Masruri dan Ibu Siti Mu'minah**

yang telah membesarkan dan mendidiku dengan penuh perjuangan dan kasih  
serta selalu mendukung dan mendo'akan yang terbaik untuk keberhasilan dan  
kebahagianku

**Adikku Tersayang**

**Aulia Putri Okta Fitari dan Fahri Akbar Assauqi**

terima kasih untuk cinta, kasih, dukungan dan semangat yang selalu diberikan  
selama ini

Hai orang-orang yang beriman, jadikanlah sabar dan shalat sebagai penolongmu,  
sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar **(QS. Al-Baqarah: 153)**

Sesungguhnya sesudah kesulitan pasti ada kemudahan **(Q.S. Al-Insyirah: 6)**



## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Gisting, Tanggamus pada tanggal 16 Desember 2001, sebagai anak pertama dari tiga bersaudara, dari Bapak Masruri dan Ibu Siti Mu'minah. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari MI. Mathlaul Anwar Landbaw pada tahun 2008 hingga 2014, MTs. Mathlaul Anwar pada tahun 2014 hingga 2017, dan SMK Muhammadiyah Gisting pada tahun 2017 hingga tahun 2020.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2020 melalui jalur SBMPTN. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intrakampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) pada tahun 2021 hingga 2022 yang diamanahkan sebagai anggota Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri. Selama menjadi mahasiswa penulis juga berkesempatan menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik dari tahun 2022 dan menjadi asisten Praktikum Elektronika Daya dan Praktikum Mesin-Mesin Listrik tahun 2023. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. Semen Baturaja Tbk, Sumatera Selatan pada *Unit of Maintenance Plan and Control* dan membuat laporan yang berjudul “Sistem Kendali Kecepatan Motor *Cooler Fan 55FN08MT01* Pada *Grate Cooler Clinker* Menggunakan *Variable Frequency Drive* (VFD) Di Pt Semen Baturaja Tbk”.

## SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT, atas limpahan nikmat-Nya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam senantiasa dicurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan yang mampu membuka sesuatu yang terkunci, penutup dari semua yang terdahulu, penolong kebenaran dengan jalan yang benar, dan petunjuk kepada jalan-Mu yang lurus. Skripsi dengan judul “Rancang Bangun PV Emulator Berbasis *Synchronous Buck Converter* Menggunakan Mikrokontroler” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
3. Bapak Prof. Dr. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan dan nilai-nilai kehidupan kepada penulis dengan baik dan ramah. Serta membantu penulis mempersiapkan diri menjadi seorang sarjana teknik.
4. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan nasihat, arahan, dan bimbingan rutin, motivasi, dan pandangan kehidupan kepada penulis di setiap kesempatan dengan baik dan ramah dalam mempersiapkan diri menjadi seorang Sarjana Teknik.
5. Ibu Dr. Eng, Endah Komalasari, S.T., MT. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun kepada penulis dalam mengerjakan skripsi ini.

6. Segenap Dosen dan staf di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, wawasan, dan pengalaman bagi penulis.
7. Kepada kedua orang tua tercinta, adik-adik, serta seluruh keluarga besar, terima kasih atas kasih sayang yang tak ternilai, doa yang tiada henti, dan dukungan yang senantiasa mengiringi langkah saya. Tanpa cinta dan kehadiran kalian, perjalanan ini tak akan mungkin terselesaikan. Kalian adalah sumber kekuatan dan inspirasi terbesar dalam setiap langkah saya.
8. Sahabat sekaligus keluarga besar di Penampungan Rumah Amal, yang selalu menjadi tempat berbagi cerita, memberikan dukungan, dan menenangkan hati setelah hari-hari yang penuh tantangan. Terima kasih atas setiap momen kebersamaan yang penuh kehangatan dan dorongan semangat. Kehadiran kalian selalu memberi kekuatan bagi saya untuk terus maju dan menyelesaikan perjalanan ini. Rekan-rekan HELIOS 2020 dan HIMATRO Unila, terima kasih telah memberikan banyak bantuan dan motivasi serta sudah menjadi keluarga selama awal kuliah sampai saat ini.
9. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik, terima kasih atas semangat dan kebersamaannya selama menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Elektro.
10. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini penulis ucapkan terimakasih atas bantuan dan kerjasamanya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Bandar Lampung, 14 Oktober 2024



Alfin Fitrohul Huda

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>SURAT PERNYATAAN .....</b>	<b>vi</b>
<b>PERSEMBAHAN.....</b>	<b>vii</b>
<b>RIWAYAT HIDUP.....</b>	<b>viii</b>
<b>SANWACANA.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xv</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Tujuan Penelitian .....	3
1.3. Rumusan Masalah.....	3
1.4. Batasan Penelitian .....	4
1.5. Manfaat Penelitian .....	4
1.6. Hipotesis .....	4
1.7. Sistematika Penulisan .....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1. Rangkaian Ekuivalen PV .....	6
2.2. Kurva Karakteristik PV.....	8
2.2.1. Pengaruh Perubahan Iradiasi Terhadap Keluaran PV .....	9
2.2.2. Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Keluaran PV .....	10
2.2.3. Karakteristik Pembebanan Photovoltaic .....	12

2.3.	<i>Buck Converter</i> .....	13
2.3.1.	Prinsip Kerja <i>Buck Converter</i> .....	14
2.3.2.	Model <i>State-Space Buck Converter</i> .....	18
2.3.3.	<i>Buck Converter Transfer Function</i> .....	20
2.3.4.	<i>Synchronous Buck Converter</i> .....	20
2.4.	<i>PID Controller</i> .....	22
2.5.	Metode Penalaan <i>PID Controller</i> untuk <i>Synchronous Buck Converter</i> Menggunakan Model Matematis .....	24
2.6.	<i>PV Emulator</i> .....	26
2.7.	Mikrokontroler Arduino Nano .....	27
2.8.	<i>Gate Driver IC IR2110</i> .....	28
2.9.	Penelitian Terdahulu .....	30
<b>III.</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>32</b>
3.1.	Waktu dan Tempat.....	32
3.2.	Alat dan Bahan.....	32
3.3.	Metode Penelitian .....	33
3.4.	Data Spesifikasi Modul PV Referensi .....	38
3.5.	Perancangan <i>Synchronous Buck Converter</i> .....	39
3.5.1.	Pemilihan Induktor (L).....	40
3.5.2.	Pemilihan Kapasitor Keluaran ( $C_{out}$ ).....	42
3.5.3.	Pemilihan Kapasitor Masukan ( $C_{in}$ ).....	43
3.5.4.	Pemilihan MOSFET.....	44
3.6.	Pemodelan PV Emulator.....	46
3.6.1.	Pemodelan Karakteristik <i>Photovoltaic</i> .....	46
3.6.2.	Pemodelan <i>Synchronous Buck Converter</i> .....	48
3.6.3.	Pemodelan Sistem Kendali Umpan Balik PV .....	50
3.7.	Perancangan Perangkat Keras PV Emulator .....	53
3.7.1.	Pemodelan Sistem Kendali Umpan Balik PV Emulator .....	54
3.7.2.	Perancangan MOSFET <i>Gate Driver IR2110</i> .....	56
3.7.3.	Perancangan Perangkat Keras <i>Synchronous Buck Converter</i> .....	60
3.7.4.	Perancangan dan Pengujian Sensor Tegangan serta Sensor Arus ...	61
3.7.5.	Perancangan <i>PID Controller</i> .....	65

<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>68</b>
4.1. Simulasi Respon Sistem PV Emulator .....	68
4.2. Pengujian Respons Sistem Perangkat Keras PV Emulator .....	72
4.3. Hasil dan Analisis Pengujian PV Emulator .....	76
4.3.1. Pengujian PV Emulator Pada Kondisi STC .....	77
4.3.2. Pengujian PV Emulator dengan Variasi Tingkat Iradiasi Pada Suhu Konstan 25°C .....	79
4.3.3. Pengujian PV Emulator dengan Variasi Suhu Pada Iradiasi Konstan 1000W/m <sup>2</sup> .....	83
4.4. Pengujian Efisiensi Perangkat Keras PV Emulator .....	88
<b>V. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>91</b>
5.1. Kesimpulan .....	91
5.2. Saran .....	92
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>93</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>96</b>

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Pengaruh parameter P, I, dan D pada sistem <i>closed loop</i> .....	23
Tabel 2.2. Spesifikasi Arduino Nano Atmega 328 .....	28
Tabel 3.1. Data spesifikasi SolarWorld Sunmodule SW50 PV module pada standart test condition (STC), 1000 W/m <sup>2</sup> dan 25°C .....	38
Table 3.2. Spesifikasi <i>Synchronous Buck Converter</i> .....	39
Table 3.3. Nilai komponen <i>Synchronous Buck Converter</i> .....	45
Tabel 3.4. Karakteristik modul PV SolarWorld Sunmodule SW50 pada <i>Standard Test Condition</i> (1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C).....	46
Tabel 3.5. Parameter spesifikasi <i>high-side</i> dan <i>low-side</i> MOSFET model simulasi.....	49
Tabel 3.6. Parameter pemodelan sistem umpan balik PV emulator.....	52
Tabel 3.7. Nilai parameter-parameter perancangan <i>bootstrap capacitor</i> .....	58
Tabel 3.8. Parameter PID <i>controller</i> perangkat keras PV emulator .....	66
Tabel 4.1. Perbandingan <i>settling time</i> simulasi dan pengujian perangkat keras PV Emulator .....	76
Tabel 4.2. Nilai <i>error</i> hasil simulasi dan pengujian PV emulator pada variasi tingkat iradiasi dengan suhu konstan 25°C .....	88
Tabel 4.3. Nilai <i>error</i> hasil simulasi dan pengujian PV emulator pada variasi suhu dengan iradiasi konstan 1000 W/m <sup>2</sup> .....	88
Tabel 4.4. Hasil pengujian efisiensi perangkat keras PV Emulator .....	89

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Rangkaian ekuivalen sel surya .....	6
Gambar 2.2. Kurva karakteristik I-V dan P-V sel surya .....	9
Gambar 2.3. Kurva karakteristik keluaran modul PV pada tingkat iradiasi yang berbeda; $T = 25^{\circ}\text{C}$ ; (a) kurva I-V dan (b) kurva P-V .....	10
Gambar 2.4. Kurva karakteristik keluaran modul PV pada suhu yang berbeda; $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ; (a) kurva I-V dan (b) kurva P-V .....	11
Gambar 2.5. Kurva karakteristik pembebanan PV .....	13
Gambar 2.6. Rangkaian <i>buck converter</i> .....	13
Gambar 2.7. Kondisi sakelar tertutup <i>buck converter</i> .....	14
Gambar 2.8. Kondisi sakelar terbuka <i>buck converter</i> .....	15
Gambar 2.9. (a) <i>Duty Cycle</i> dan bentuk gelombang <i>buck converter</i> : (b) tegangan induktor; (c) arus induktor; (d) arus kapasitor .....	17
Gambar 2.10. Rangkaian <i>synchronous buck converter</i> .....	21
Gambar 2.11. Pulsa PWM dengan <i>dead-time</i> .....	22
Gambar 2.12. Diagram blok PID <i>controller</i> (a) domain waktu dan (b) domain frekuensi .....	23
Gambar 2.13. Diagram blok sistem kendali umpan balik .....	24
Gambar 2.14. Diagram blok sistem kendali PID pada sistem <i>synchronous buck converter</i> .....	25
Gambar 2.15. Bagian utama PV <i>emulator</i> .....	27
Gambar 2.16. Arduino Nano .....	28
Gambar 2.17. <i>Typical connection</i> IR2110 .....	29
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian .....	33
Gambar 3.2. Diagram blok rancangan sistem PV emulator berbasis <i>buck converter</i> .....	34



Gambar 3.3. Diagram blok pemodelan dan simulasi PV <i>emulator</i> berbasis <i>buck converter</i> .....	36
Gambar 3.4. Kurva karakteristik I-V dan P-V modul PV SolarWorld SW50 pada perubahan irradiance dan suhu konstan 25°C.....	39
Gambar 3.5. <i>Flowchart</i> perancangan <i>synchronous buck converter</i> .....	40
Gambar 3.6. <i>Normalized R<sub>DS(on)</sub> (RK) vs. Temperature</i> .....	45
Gambar 3.7. Rangkaian simulasi pengambilan data kurva I-V dan kurva P-V ..	47
Gambar 3.8. Kurva karakteristik <i>photovoltaic</i> Sunmodule SW50 untuk variasi nilai iradiasi pada suhu konstan 25°C.....	48
Gambar 3.9. Kurva karakteristik <i>photovoltaic</i> Sunmodule SW50 untuk variasi nilai suhu pada iradiasi konstan 1000W/m <sup>2</sup> .....	48
Gambar 3.10. Rangkaian pemodelan simulasi <i>synchronous buck converter</i> .....	49
Gambar 3.11. Sistem umpan balik PV emulator: (a) Rangkaian sistem kendali umpan balik dan (b) Subsistem <i>Lookup Table</i> PV Model .....	50
Gambar 3.12. <i>Flowchart</i> pemodelan dan simulasi PV emulator .....	53
Gambar 3.13. Skematik rangkaian mikrokontroler Arduino Nano PV emulator	55
Gambar 3.14. Sinyal PWM mikrokontroler dengan <i>dead-time</i> .....	56
Gambar 3.15. Diagram blok rangkaian <i>gate driver</i> IR2110 .....	57
Gambar 3.16. Skematik diagram rangkaian <i>gate driver</i> PV emulator .....	59
Gambar 3.17. Sinyal PWM <i>gate driver</i> .....	60
Gambar 3.18. Skematik diagram <i>synchronous buck converter</i> .....	61
Gambar 3.19. Rangkaian sensor tegangan .....	62
Gambar 3.20. Grafik hasil pengujian sensor tegangan .....	63
Gambar 3.21. Rangkaian sensor arus dan diagram pengaruh filter eksternal terhadap performa sensor ACS712 .....	63
Gambar 3.22. Grafik hasil pengujian sensor arus ACS712-05B.....	64
Gambar 3.23. <i>Flowchart</i> perancangan perangkat keras PV emulator .....	67
Gambar 4.1. Rangkaian simulasi PV Emulator berbasis <i>synchronous buck converter</i> .....	68
Gambar 4.2. Kurva daerah pembebanan PV emulator.....	69
Gambar 4.3. Grafik hasil simulasi respons sistem arus dan tegangan keluaran PV emulator dengan beban (a) 2,4Ω, (b) 6,6Ω, dan (c) 51,8Ω.....	72

Gambar 4.4. Rangkaian pengujian perangkat keras PV Emulator.....	73
Gambar 4.5. Grafik hasil pengujian respons sistem arus dan tegangan keluaran PV emulator dengan beban (a) $2,4\Omega$ , (b) $6,6\Omega$ , dan (c) $51,8\Omega$ .....	76
Gambar 4.6. Perbandingan kurva karakteristik saat STC dari PV referensi, simulasi, dan perangkat keras PV emulator: (a) kurva I-V dan (b) kurva P-V .....	78
Gambar 4.7. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator pada perubahan iradiasi saat suhu konstan $25^{\circ}\text{C}$ : (a) Kurva I-V dan (b) kurva P-V .....	79
Gambar 4.8. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator saat iradiasi $800\text{W}/\text{m}^2$ dan suhu $25^{\circ}\text{C}$ .....	81
Gambar 4.9. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator saat iradiasi $600\text{W}/\text{m}^2$ dan suhu $25^{\circ}\text{C}$ .....	81
Gambar 4.10. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator saat iradiasi $400\text{W}/\text{m}^2$ dan suhu $25^{\circ}\text{C}$ .....	82
Gambar 4.11. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator saat iradiasi $200\text{W}/\text{m}^2$ dan suhu $25^{\circ}\text{C}$ .....	83
Gambar 4.12. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator pada perubahan suhu saat iradiasi konstan $1000\text{W}/\text{m}^2$ : (a) Kurva I-V dan (b) kurva P-V .....	84
Gambar 4.13. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator pada suhu $20^{\circ}\text{C}$ dan iradiasi $1000\text{W}/\text{m}^2$ .....	85
Gambar 4.14. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator pada suhu $35^{\circ}\text{C}$ dan iradiasi $1000\text{W}/\text{m}^2$ .....	86
Gambar 4.15. Kurva karakteristik hasil simulasi dan pengujian PV emulator pada suhu $50^{\circ}\text{C}$ dan iradiasi $1000\text{W}/\text{m}^2$ .....	87
Gambar 4.16. Efisiensi perangkat keras PV emulator berdasarkan perubahan nilai beban.....	90

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kebutuhan akan sumber energi listrik yang bersih, terbarukan, dan ramah lingkungan telah menjadi salah satu perhatian utama di seluruh dunia. Hal ini didorong oleh meningkatnya kesadaran akan dampak negatif dari penggunaan sumber energi fosil, seperti pencemaran udara dan perubahan iklim [1]. Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dimanfaatkan adalah energi surya [2]. Pemanfaatan energi surya adalah dengan menggunakan teknologi panel surya atau *photovoltaic* (PV) yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung [3].

Penelitian dan pengembangan terkait teknologi pembangkit listrik tenaga surya seperti *maximum power point tracking* (MPPT) dan inverter, terus berkembang. [4]. Namun, pengujian teknologi tersebut menghadapi tantangan karena daya keluaran panel surya selalu berubah sesuai parameter lingkungan, seperti iradiasi dan suhu [5]. Oleh karena itu, tidak mungkin untuk mempertahankan kondisi lingkungan pengujian yang terkendali. Untuk mengatasi masalah ini, digunakan alat yang dapat meniru atau mensimulasikan karakteristik daya keluaran dari panel surya, yaitu PV emulator.

PV emulator adalah perangkat yang digunakan untuk meniru karakteristik arus-tegangan keluaran (I-V) yang sama dengan modul PV sebenarnya [6][7]. PV emulator memberikan solusi yang lebih sederhana dan efisien untuk pengujian modul PV dibandingkan menggunakan modul sel surya sebenarnya. Pengujian menggunakan PV emulator memiliki kelebihan dibandingkan dengan PV sebenarnya, yaitu ukurannya lebih kecil serta tingkat iradiasi dan suhu dapat disimulasikan dalam kondisi *steady-state* maupun fluktuatif tanpa cahaya matahari [8]. Terdapat PV emulator yang dijual dipasaran yang dapat meniru

karakteristik dari PV, mulai dari sebuah modul PV hingga susunan PV *array*. Bagaimanapun, PV emulator yang dijual dipasaran tersebut dijual dengan harga yang mahal [9]. Maka dari itu, pada penelitian ini akan dibuat sebuah PV emulator sederhana yang harganya murah.

Pada penelitian ini, akan dirancang dan direalisasikan sebuah PV emulator berbasis *synchronous buck converter* menggunakan mikrokontroler Arduino yang dapat meniru karakteristik daya keluaran dari PV sebenarnya. Sebelum dilakukan perancangan dan realisasi dari perangkat keras PV emulator, dilakukan pemodelan dan simulasi sistem PV emulator untuk menguji dan memvalidasi sistem perangkat yang akan dibuat. PV emulator yang akan dibuat terdiri dari tiga bagian sistem, yaitu sistem pemodelan PV, sistem pengendalian dan pembangkit pulsa *switching*, serta sistem *synchronous buck converter*.

Sistem pemodelan PV menggunakan *look-up table* (LUT) yang berisi data karakteristik arus dan tegangan (I-V) referensi PV sebenarnya yang diperoleh dari *datasheet* SolarWorld Sunmodule SW50 poly RMA. Saat nilai beban divariasikan, maka *output* arus dan tegangan dari *synchronous buck converter* akan menjadi umpan balik bagi mikrokontroler Arduino yang di dalam memorinya berisi program *look-up table*. Arus referensi dari *look-up table* dan arus keluaran *synchronous buck converter* akan dibandingkan dan hasilnya akan dikontrol dengan *PID controller* untuk membangkitkan sinyal PWM untuk *synchronous buck converter*. Dengan demikian, diharapkan bahwa PV emulator dapat menghasilkan karakteristik arus dan tegangan yang serupa dengan karakteristik arus dan tegangan modul PV sebenarnya.

## 1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan PV emulator berbasis *synchronous buck converter* yang dapat meniru karakteristik keluaran modul PV referensi, SolarWorld Sunmodule SW50.
2. Membandingkan hasil simulasi dan pengujian perangkat keras PV emulator dengan modul PV referensi berdasarkan parameter yang diperoleh dari *datasheet* modul PV.
3. Melakukan analisis terhadap respons sistem kendali umpan balik PV emulator pada daerah kurva karakteristik *Constant Current Region (CCR)*, *Constant Voltage Region (CVR)*, dan *Maximum Power Point (MPP)*, dengan mempertimbangkan perubahan nilai beban dalam kondisi tingkat iradiasi dan suhu yang konstan.

## 1.3. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan memodelkan PV emulator berbasis *synchronous buck converter*?
2. Bagaimana mensimulasikan dan menguji perangkat keras sistem PV emulator berbasis *synchronous buck converter*?
3. Apakah PV emulator yang dibuat mampu menghasilkan daya keluaran yang menyerupai karakteristik modul PV referensi ketika diuji melalui simulasi dan pengujian perangkat keras?
4. Bagaimana sistem kendali umpan balik PV emulator merespons di daerah karakteristik operasi CCR, CVR, dan MPP dengan adanya variasi nilai beban?

#### 1.4. Batasan Penelitian

Penelitian ini akan membatasi cakupannya pada beberapa hal berikut:

1. Modul PV yang digunakan sebagai referensi adalah SolarWorld Sunmodule SW50 dengan daya maksimum 50 Wp.
2. Sistem kendali umpan balik pada PV emulator berbasis *synchronous buck converter* ini menggunakan *PID controller*, dengan pemodelan modul PV yang diterapkan melalui metode *lookup table*.
3. Beban yang digunakan merupakan beban resistif dengan variasi nilai resistansi untuk mengamati perubahan keluaran arus dan tegangan pada setiap tingkat iradiasi dan suhu pada PV emulator.
4. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Nano.

#### 1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat sebagai berikut:

1. PV *emulator* yang dibuat dapat digunakan untuk menguji dan mengembangkan berbagai peralatan terkait panel surya, seperti inverter dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).
2. Penggunaan PV *emulator* dapat menghemat biaya dan waktu dalam pengujian, karena tidak perlu menggunakan panel surya yang sebenarnya.
3. Penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif terhadap pengembangan teknologi energi surya yang lebih efisien dan terjangkau.

#### 1.6. Hipotesis

PV *emulator* berbasis *synchronous buck converter* yang dirancang dan dibangun menggunakan mikrokontroler Arduino ini dapat menghasilkan karakteristik arus dan tegangan keluaran yang menyerupai modul PV sebenarnya pada tingkat iradiasi dan suhu yang berbeda.

## **1.7. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Menjelaskan penelitian ini secara umum, berisi latar belakang, tujuan, manfaat penelitian, batasan masalah, perumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini menjelaskan mengenai teori pendukung yang berhubungan dengan penelitian ini.

### **BAB III METODE PENELITIAN**

Pada bab ini dipaparkan langkah-langkah yang akan dilakukan pada penelitian ini, yaitu waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode penelitian, pemodelan dan simulasi sistem PV *emulator*, dan tahap perancangan perangkat keras PV *emulator*.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini akan menjelaskan tentang perancangan dan pengujian dari perangkat keras PV *emulator* yang dirancang, serta dilakukan analisa terhadap hasil pengujian.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil-hasil penelitian dan saran-saran yang berguna untuk pengembangan selanjutnya.

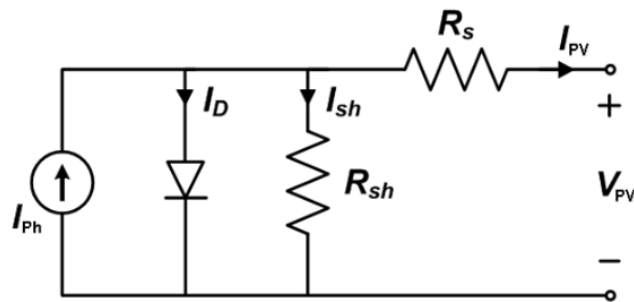
### **DAFTAR PUSTAKA**

### **LAMPIRAN**

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Rangkaian Ekuivalen PV

*Photovoltaic* (PV) merupakan alat yang dapat mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung [3]. Sebuah sel surya tunggal dari panel PV dapat direpresentasikan dengan terdiri dari sebuah sumber *photocurrent* ( $I_{ph}$ ) yang terhubung paralel dengan dioda, resistansi seri ( $R_s$ ), dan resistansi shunt ( $R_{sh}$ ), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 [10].



Gambar 2.1. Rangkaian ekuivalen sel surya [10]

*Photocurrent* ( $I_{ph}$ ) adalah arus yang dihasilkan dari penyinaran sinar matahari pada sel surya. *Photocurrent* nilainya bervariasi bergantung pada radiasi matahari yang terpapar ke sel surya dan juga bergantung pada suhu permukaan sel surya. Resistansi seri ( $R_s$ ) dan resistansi ( $R_{sh}$ ) shunt merupakan hambatan intrinsik dari sel surya. Berdasarkan Gambar 2.1, dapat diketahui bahwa persamaan matematis *photocurrent* ( $I_{ph}$ ) yang dihasilkan sel surya adalah sebagai berikut [10]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.1)$$

Dimana,

$I_{pv}$  = Arus Photovoltaic (A)

$I_{ph}$  = Arus Photocurrent (A)

$I_D$  = Arus pada dioda (A)

$I_{sh}$  = Arus shunt (A)



Arus yang melalui elemen-elemen tersebut diatur oleh tegangan jatuh pada dioda yang dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$V_D = V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s \quad (2.2)$$

Dimana,

$V_D$  = Tegangan yang melintasi dioda dan resistor  $R_{sh}$  (V)

$V_{pv}$  = Tegangan yang melintasi terminal keluaran (V)

$I_{pv}$  = arus keluaran (A)

$R_s$  = resistansi seri ( $\Omega$ )

Berdasarkan persamaan dioda Shockley, arus yang melewati dioda dapat dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$I_D = I_0 \left[ e^{\left(\frac{qV_D}{nkT}\right)} - 1 \right] \quad (2.3)$$

Dimana,

$I_0$  = arus saturasi balik (A)

$q$  = elektron =  $1.6 \times 10^{-19}$  C

$T$  = Suhu kerja sel

$n$  = faktor ideal dioda

$k$  = konstanta Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

Berdasarkan hukum Ohm, arus yang melalui resistor shunt dapat dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Dimana  $R_{sh}$  adalah resistansi shunt ( $\Omega$ ).

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2), (2.3), dan (2.4) ke persamaan (2.1), diperoleh persamaan karakteristik dari sebuah sel surya yang berkaitan antara parameter sel surya dengan arus dan tegangan keluarannya, yaitu [10]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{nkT}\right)} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) bergantung pada radiasi matahari, suhu sel, dan nilai referensi dari produsen modul PV untuk kondisi tertentu, seperti *standard test condition* (STC) dengan kondisi iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$  dan suhu sel  $25^\circ\text{C}$  [10].

Arus *photocurrent* ( $I_{ph}$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.6) berikut.

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_c - T_{ref})] \frac{\beta}{\beta_{ref}} \quad (2.6)$$

Dimana,

$\beta$  = Solar irradiance

$\beta_{ref}$  = Solar irradiance reference = 1000 W/m<sup>2</sup>

$K_i$  = Koefisien suhu dari arus  $I_{sc}$

$I_{sc}$  = Arus hubung singkat pada suhu kerja

$T_{ref}$  = Suhu referensi = 25 °C = 298 K

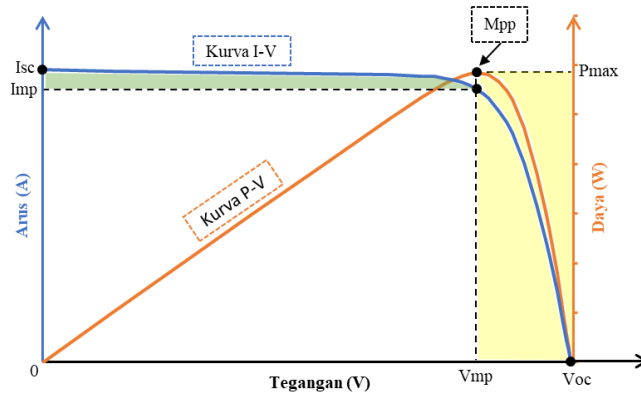
$I_{rs}$  = Arus saturasi gelap

## 2.2. Kurva Karakteristik PV

Kurva karakteristik PV menunjukkan hubungan antara arus dan tegangan keluaran (kurva I-V) serta daya dan tegangan keluaran (kurva P-V) dari modul PV, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Terdapat beberapa parameter pada kurva karakteristik PV, yaitu arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ), tegangan *open circuit* ( $V_{oc}$ ), titik maksimum tegangan ( $V_{mp}$ ), titik maksimum arus ( $I_{mp}$ ), dan pertemuan antara  $I_{mp}$  dan  $V_{mp}$  adalah titik maksimum daya ( $M_{pp}$ ) [11].

Arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ) adalah titik saat tegangannya sama dengan nol ( $V=0$ ), sehingga daya yang dihasilkan juga sama dengan nol. Sedangkan Tegangan *open circuit* ( $V_{oc}$ ) adalah titik saat arusnya sama dengan nol ( $I=0$ ), sehingga daya yang dihasilkannya juga sama dengan nol. Daya ( $P$ ) keluaran dari PV merupakan perkalian dari setiap titik arus dan tegangan. Sebuah titik dimana daya keluaran tertinggi dapat dicapai disebut titik daya maksimum (*maximum power point*,  $M_{pp}$ ) yang diperoleh dari perkalian antara titik arus maksimum ( $I_{mp}$ ) dan titik tegangan maksimum ( $V_{mp}$ ).

Ada berbagai faktor yang dapat mempengaruhi kinerja modul fotovoltaik (PV), termasuk tingkat iradiasi matahari dan suhu. Ketika modul PV beroperasi pada tingkat iradiasi dan suhu yang bervariasi, karakteristik arus dan tegangan yang dihasilkan juga akan berbeda. Iradiasi matahari yang lebih tinggi cenderung meningkatkan arus keluaran modul, sementara suhu yang lebih tinggi biasanya mengurangi tegangan keluaran.



Gambar 2.2. Kurva karakteristik I-V dan P-V sel surya [11]

### 2.2.1. Pengaruh Perubahan Iradiasi Terhadap Keluaran PV

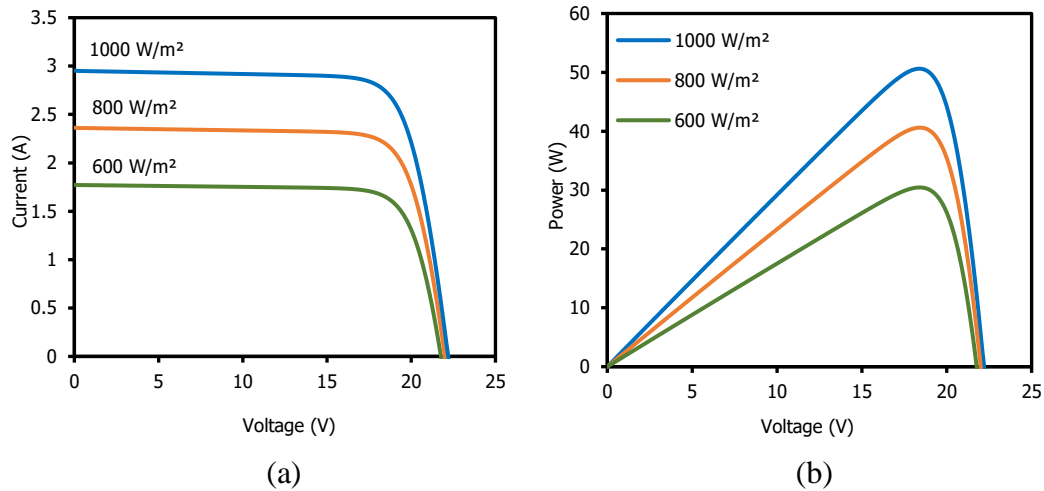
Perubahan iradiasi matahari memiliki pengaruh signifikan terhadap keluaran modul PV. Modul PV mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik, dan tingkat iradiasi matahari merupakan faktor utama yang menentukan jumlah energi yang dapat dikonversi. Ketika iradiasi matahari meningkat, jumlah foton yang mengenai permukaan modul PV juga meningkat, yang pada gilirannya meningkatkan arus keluaran (*photocurrent*,  $I_{ph}$ ) dari modul tersebut [12]. Hubungan antara  $I_{ph}$  dan iradiasi dapat dinyatakan melalui persamaan berikut [13].

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_c - T_{ref})] \frac{\beta}{\beta_{ref}}$$

Ketika tingkat iradiasi matahari ( $\beta$ ) meningkat, nilai *photocurrent* ( $I_{ph}$ ) juga meningkat secara proporsional. Ini karena lebih banyak foton yang tersedia untuk mengeksitasi elektron dalam bahan semikonduktor modul PV, sehingga menghasilkan lebih banyak pasangan elektron-hole yang berkontribusi pada arus listrik. Sebaliknya, ketika tingkat iradiasi berkurang, arus keluaran modul PV juga berkurang, yang berarti bahwa daya yang dihasilkan oleh modul tersebut akan menurun [13].

Selain itu, tingkat iradiasi juga mempengaruhi karakteristik tegangan modul PV. Meskipun tegangan keluaran dari modul PV tidak berubah secara signifikan dengan perubahan iradiasi, peningkatan iradiasi umumnya mengarah pada sedikit peningkatan tegangan keluaran. Namun, pengaruh ini jauh lebih kecil

dibandingkan dengan pengaruhnya pada arus keluaran. Tegangan keluaran lebih dipengaruhi oleh perubahan suhu, di mana peningkatan suhu cenderung menurunkan tegangan keluaran modul PV. Pengaruh perubahan iradiasi terhadap keluaran PV ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Kurva karakteristik keluaran modul PV pada tingkat iradiasi yang berbeda;  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ; (a) kurva I-V dan (b) kurva P-V

### 2.2.2. Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Keluaran PV

Perubahan suhu memiliki dampak yang signifikan terhadap keluaran modul fotovoltaik (PV), terutama terhadap tegangan hubung terbuka ( $V_{oc}$ ) dan arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ). Saat suhu operasi modul PV meningkat, tegangan hubung terbuka ( $V_{oc}$ ) cenderung menurun [14]. Hal ini dapat dijelaskan melalui persamaan yang menunjukkan hubungan antara tegangan hubung terbuka dan suhu berikut [15].

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = - \frac{E_{G0} - V_{OC} + \gamma \frac{kT}{q}}{T} \quad (2.7)$$

Dimana,

$V_{OC}$  = open circuit voltage (

$E_{G0}$  = energy band gap

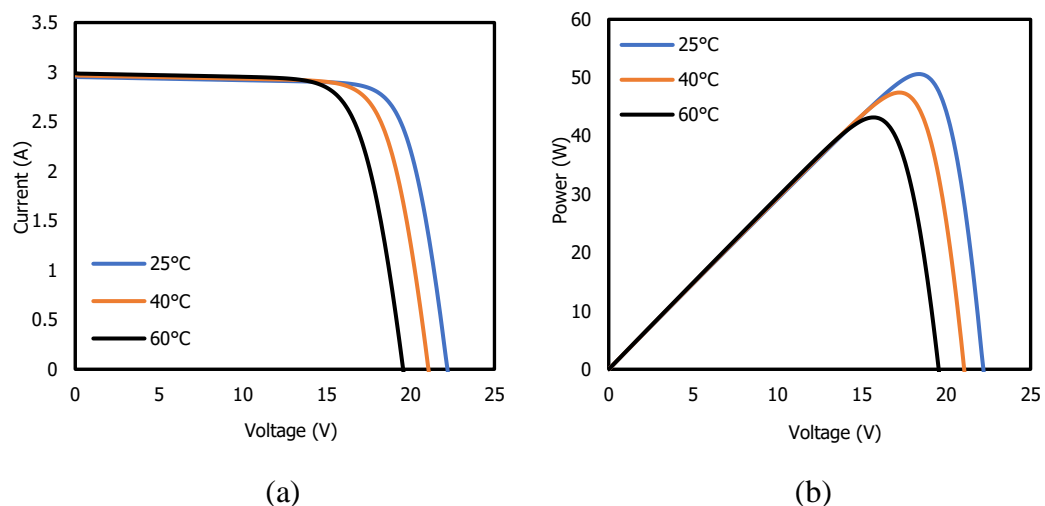
$T$  = operating temperature (K)

$\gamma$  = operating temperature constant = 3

$\frac{kT}{q}$  = 0.02586 V (thermal voltage at 300 K)

Persamaan (2.7) menunjukkan bahwa dengan peningkatan suhu operasi ( $T$ ), nilai  $V_{oc}$  menurun karena adanya faktor negatif di persamaan tersebut. Penurunan  $V_{oc}$  dengan peningkatan suhu disebabkan oleh penurunan *band gap* energi ( $E_{G0}$ ) dan peningkatan gerakan termal ( $\frac{kT}{q}$ ) dalam material semikonduktor. Energi *band gap* ( $E_{G0}$ ) adalah energi yang diperlukan untuk menggerakkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Ketika suhu meningkat, energi termal yang lebih tinggi mengurangi *band gap*, yang akibatnya menurunkan  $V_{oc}$  juga. Tegangan termal ( $\frac{kT}{q}$ ) berperan dalam mempercepat penurunan tegangan hubung terbuka seiring dengan peningkatan suhu [15].

Sebaliknya, arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ) sedikit meningkat dengan peningkatan suhu. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya energi *band gap* dan peningkatan energi termal yang menggerakkan lebih banyak elektron melintasi *junction* semikonduktor, meskipun peningkatan ini relatif kecil dibandingkan dengan pengaruh suhu pada tegangan hubung terbuka. Meskipun peningkatan suhu menguntungkan untuk arus, efek keseluruhan dari peningkatan suhu biasanya negatif karena penurunan tegangan hubung terbuka lebih signifikan, mengakibatkan penurunan daya keluaran total dari modul PV [15].



Gambar 2.4. Kurva karakteristik keluaran modul PV pada suhu yang berbeda;  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ; (a) kurva I-V dan (b) kurva P-V

### 2.2.3. Karakteristik Pembebanan Photovoltaic

Pada sistem Photovoltaic (PV), karakteristik pembebanan sangat mempengaruhi kinerja dan efisiensi dari panel surya. Memahami interaksi antara beban resistif dan kurva karakteristik PV, khususnya pada *Constant Current Region* (CCR) dan *Constant Voltage Region* (CVR), adalah kunci untuk mengoptimalkan sistem PV [16]. Kurva karakteristik pembebanan PV ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Ketika beban resistif ( $R$ ) yang dihubungkan ke panel PV memiliki nilai resistansi yang sangat kecil, arus yang mengalir melalui beban akan menjadi sangat besar. Dalam kondisi ini, panel PV beroperasi di dekat titik *short-circuit* ( $I_{sc}$ ) di mana arus maksimum dihasilkan tetapi tegangan mendekati nol. Pada kurva I-V PV, kondisi ini berada di ujung kiri kurva. Region ini dikenal sebagai *Constant Current Region* (CCR), di mana arus yang dihasilkan oleh panel surya tetap hampir konstan meskipun tegangan bervariasi. CCR adalah indikasi bahwa panel surya menerima jumlah cahaya yang cukup tinggi, sehingga mampu menghasilkan arus maksimum. Namun, karena tegangan sangat rendah, daya yang dihasilkan ( $P = I \times V$ ) juga akan menjadi sangat rendah, sehingga kondisi ini tidak ideal untuk aplikasi yang memerlukan daya maksimal [16].

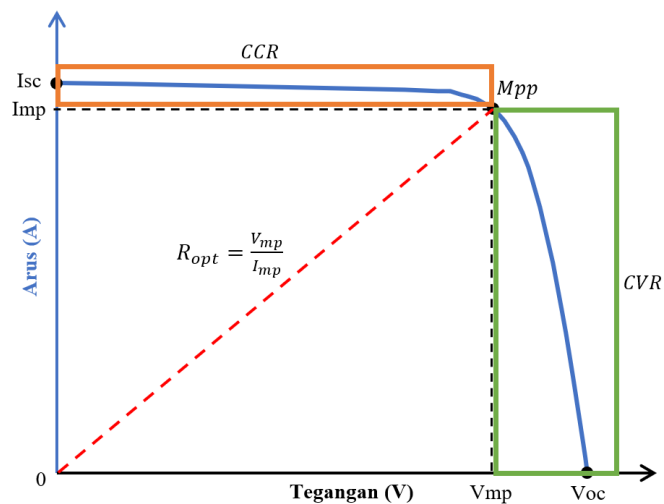
Ketika beban resistif disesuaikan untuk mencapai *Maximum Power Point* (MPP), daya yang dihasilkan oleh panel PV akan berada pada nilai maksimum. MPP adalah titik pada kurva I-V di mana produk arus ( $I$ ) dan tegangan ( $V$ ) mencapai nilai tertinggi. Beban resistif optimal untuk mencapai MPP dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$R_{opt} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2.8)$$

di mana  $V_{mp}$  adalah tegangan pada MPP dan  $I_{mp}$  adalah arus pada MPP. Pada kondisi ini, sistem PV beroperasi dengan efisiensi maksimum, menarik daya maksimum dari panel surya.

Sebaliknya, ketika beban resistif memiliki nilai resistansi yang sangat besar, arus yang mengalir melalui beban akan menjadi sangat kecil. Dalam kondisi ini, panel PV beroperasi di dekat titik *open-circuit* ( $V_{oc}$ ), di mana tegangan maksimum dihasilkan tetapi arus mendekati nol. Pada kurva I-V, kondisi ini berada di ujung

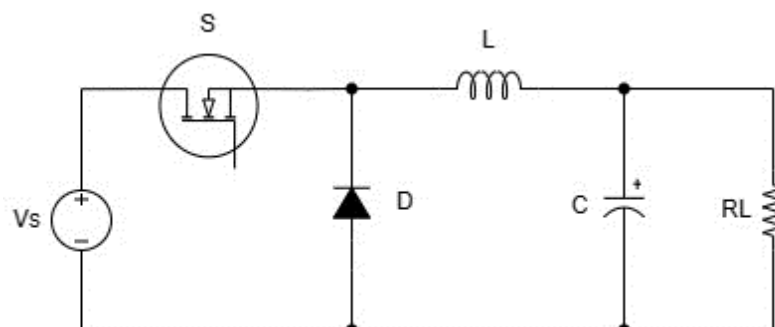
kanan kurva. Region ini dikenal sebagai *Constant Voltage Region* (CVR), di mana tegangan yang dihasilkan oleh panel surya tetap hampir konstan meskipun arus bervariasi. CVR mencerminkan kondisi di mana panel surya menghasilkan tegangan maksimum, tetapi karena arus sangat rendah, daya yang dihasilkan juga rendah. Kondisi ini lebih cocok untuk aplikasi yang membutuhkan tegangan konstan, seperti catu daya untuk perangkat elektronik tertentu, tetapi tidak ideal untuk aplikasi yang memerlukan daya maksimum.



Gambar 2.5. Kurva karakteristik pembebanan PV

### 2.3. Buck Converter

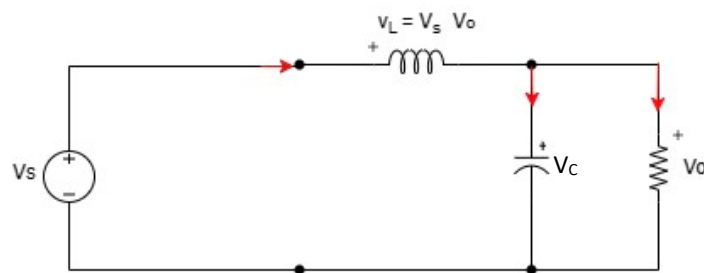
*Buck converter* atau *step-down converter* merupakan jenis *dc-dc converter* yang menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah daripada tegangan masukannya [17]. Rangkaian dasar *buck converter* terdiri dari komponen sakelar elektronika (Mosfet, IGBT, dsb.), dioda (D), induktor (L), kapasitor (C), dan beban ( $R_L$ ). Rangkaian *buck converter* ditunjukkan pada Gambar 2.5 [17].



Gambar 2.6. Rangkaian *buck converter* [17]

### 2.3.1. Prinsip Kerja *Buck Converter*

Prinsip kerja *buck converter* berdasarkan proses buka-tutup dari komponen sakelar Mosfet serta proses pengisian dan pengosongan energi pada komponen induktor dan kapasitor. Ketika kondisi sakelar tertutup (*switch on*), dioda akan bersifat *reverse bias* dan arus akan mengalir melewati induktor, kapasitor, beban, dan kembali ke sumber. Pada kondisi ini, induktor akan menyimpan energi dari arus yang melaluinya dalam bentuk medan magnet serta kapasitor juga akan melakukan proses pengisian muatan. Kondisi sakelar tertutup dari *buck converter* ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.7. Kondisi sakelar tertutup *buck converter*

Berdasarkan Gambar 2.6, rangkaian *buck converter* kondisi sakelar tertutup dapat dituliskan dalam bentuk persamaan, sebagai berikut:

$$V_S = v_L + V_O$$

$$v_L = V_S - V_O$$

Diketahui bahwa,

$$v_L = L \frac{di_L}{dt}$$

Arus induktor meningkat secara linier, sehingga perubahan arus induktor saat kondisi sakelar tertutup adalah,

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

$$(\Delta i_L)_{\text{tertutup}} = \left( \frac{V_S - V_O}{L} \right) DT \quad (2.9)$$



Dimana,

$\Delta i_L$  tertutup = perubahan arus induktor saat kondisi sakelar tertutup

$V_S$  = tegangan sumber (V)

$L$  = induktor (H)

$D$  = kondisi *duty cycle on*

$T$  = periode (s)

Berdasarkan Gambar 2.7, dengan menggunakan KVL (Kirchoff's *Voltage Law*) pada rangkaian tersebut, diperoleh persamaan (2.10) dan (2.11).

$$V_S - L \frac{di_L}{dt} - V_C = 0 \quad (2.10)$$

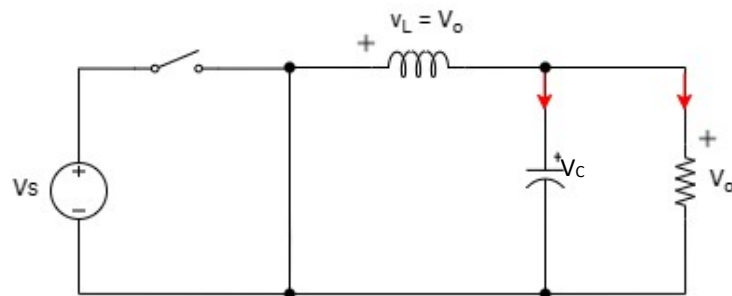
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_C}{L} \quad (2.11)$$

Kemudian dengan menggunakan KCL (Kirchoff's *Current Law*) pada rangkaian Gambar 2.7, diperoleh persamaan (2.12) dan (2.13).

$$\frac{V_C}{R} + C \frac{dV_C}{dt} = i_L \quad (2.12)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (2.13)$$

Kemudian, ketika kondisi sakelar terbuka (*switch off*), dioda akan bersifat *forward bias* dan arus yang tersimpan pada induktor akan dialirkan dan membuat induktor menjadi sumber sementara. Induktor akan mengalirkan arus menuju kapasitor dan beban, serta pada kondisi ini, kapasitor juga akan melakukan pengosongan muatan kepada beban. Kondisi sakelar terbuka dari *buck converter* ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Kondisi sakelar terbuka *buck converter*

Berdasarkan Gambar 2.8, rangkaian *buck converter* kondisi sakelar terbuka dapat dituliskan dalam bentuk persamaan, sebagai berikut:

$$v_L = -V_O$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_O$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_O}{L}$$

Arus induktor menurun secara linier, sehingga perubahan arus induktor saat kondisi sakelar terbuka adalah,

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_O}{L}$$

$$(\Delta i_L)_{\text{terbuka}} = -\left(\frac{V_O}{L}\right)(1-D)T \quad (2.14)$$

Dimana,

$\Delta i_L$  terbuka = perubahan arus induktor saat kondisi sakelar terbuka

$V_O$  = tegangan keluaran (V)

$1-D$  = kondisi *duty cycle off*

Pada operasi *steady state*, total perubahan arus induktor pada satu periode adalah bernilai nol.

$$(\Delta i_L)_{\text{tertutup}} + (\Delta i_L)_{\text{terbuka}} = 0$$

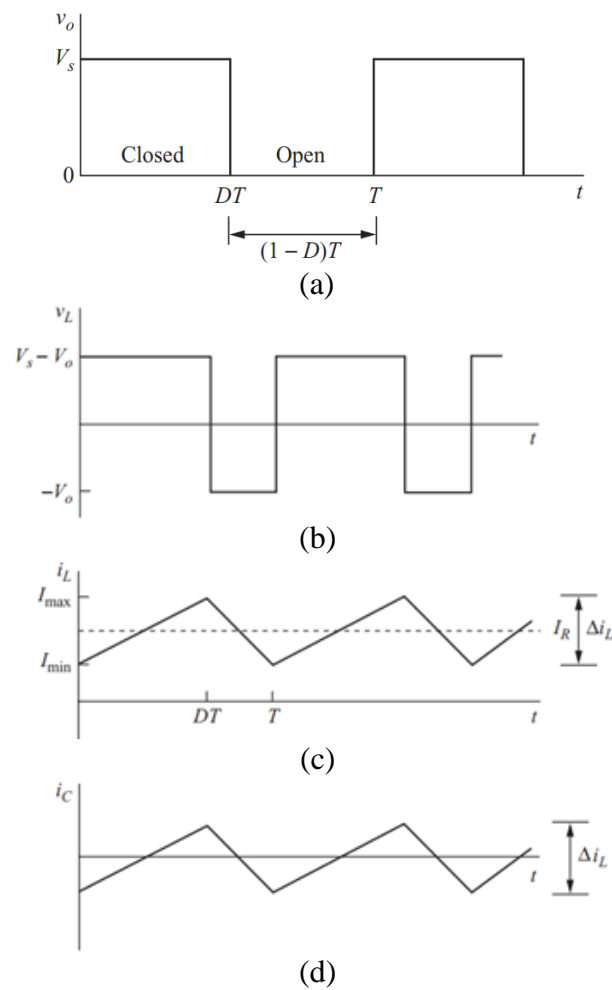
Dengan mensubstitusikan persamaan (2.6) dan (2.7), diperoleh,

$$\left(\frac{V_S - V_O}{L}\right)DT - \left(\frac{V_O}{L}\right)(1-D)T = 0$$

Sehingga pemecahan untuk tegangan keluaran  $V_O$  dari *buck converter* adalah,

$$V_O = V_S \cdot D \quad (2.15)$$

Dari persamaan (2.8), dapat diketahui bahwa *buck converter* menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah atau sama dengan tegangan masukannya.



Gambar 2.9. (a) *Duty Cycle* dan bentuk gelombang *buck converter*; (b) tegangan induktor; (c) arus induktor; (d) arus kapasitor

Berdasarkan Gambar 2.8, dengan menggunakan KVL diperoleh persamaan (2.16) dan (2.17).

$$L \frac{di_L}{dt} + V_C = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_C}{L} \quad (2.17)$$

Kemudian dengan menggunakan KCL pada Gambar 2.8, diperoleh persamaan (2.18) dan (2.19).

$$\frac{V_C}{R} + C \frac{dV_C}{dt} = i_L \quad (2.18)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (2.19)$$

### 2.3.2. Model State-Space Buck Converter

Model *state-space* adalah presentasi linier dari sistem dinamis. Model *state-space* menggambarkan sistem linier waktu-invarian dalam bentuk persamaan matriks. Model *state-space* sering digunakan untuk memodelkan sistem linier atau non-linier. *Buck converter* merupakan sistem yang bekerja menggunakan mode *switching* dalam pengoperasiannya, sehingga menyebabkan *buck converter* menjadi sistem non-linier [18].

Model *state-space* dari *buck converter* saat *switch on* diturunkan menggunakan persamaan (2.11) dan (2.13). Dari persamaan tersebut didapatkan bentuk matriks sebagai berikut [18].

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} V_S \quad (2.20)$$

Model *state-space* dari *buck converter* saat *switch off* diturunkan menggunakan persamaan (2.17) dan (2.19). Dari persamaan tersebut didapatkan bentuk matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_S \quad (2.21)$$

Berdasarkan matriks (2.18) dan (2.19), model *state-space buck converter* saat *switch on* dan *switch off* dapat dituliskan persamaannya sebagai:

$$\text{Saat switch on: } \dot{X} = A_1 \cdot x + B_1 \cdot u \quad (2.22)$$

$$\text{Saat switch off: } \dot{X} = A_2 \cdot x + B_2 \cdot u \quad (2.23)$$

Sehingga nilai-nilai dari matriks  $X$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  adalah sebagai berikut:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix}, \quad U = V_S$$

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dengan menerapkan teknik *state-space averaging* menggunakan *duty cycle* untuk mendapatkan ekuivalen matriks A dan B pada sistem *buck converter*. Matriks A dan B dihitung menggunakan [18]:

$$A = A_1 \cdot d + A_2(1 - d) \quad (2.24)$$

$$B = B_1 \cdot d + B_2(1 - d) \quad (2.25)$$

Dimana,

$d$  = *duty cycle* pada kondisi *on*

$(1 - d)$  = *duty cycle* kondisi *off*

Karena tegangan keluaran *buck converter* sama dengan tegangan keluaran kapasitor ( $V_C = V_O$ ), persamaan tegangan keluaran dapat ditulis dalam bentuk matriks berikut.

$$V_o = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L \\ V_C \end{bmatrix}$$

Model *state-space* lengkap dari sistem *buck converter* dapat ditulis sebagai berikut.

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \quad (2.26)$$

$$Y = C \cdot X + D \cdot U \quad (2.27)$$

Dimana,

$\dot{X}$  = state equation

$Y$  = output

$U$  = input

$A, B, C$  = matriks sistem *buck converter*

$D$  = matriks *feed forward gain* sistem *buck converter*

Nilai dari matriks  $A, B, C$  dan  $D$  adalah sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} d \\ \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1], \quad D = 0$$

### 2.3.3. Buck Converter Transfer Function

*Transfer fuction* dari sistem *buck converter* dapat diturunkan berdasarkan model *state-space* pada persamaan (2.26) dan (2.27). Transformasi Laplace dari persamaan (2.26) menghasilkan :

$$sX = A.X + B.U \quad (2.28)$$

$$X = (sI - A)^{-1}.BU \quad (2.29)$$

Dimana,

$s$  = *laplace form*

$U$  = input

$I$  = matriks identitas

$A, B$  = matriks sistem

Dengan mensubstitusi persaman (2.29) ke (2.27), persamaan untuk tegangan keluaran dapat ditulis sebagai berikut:

$$Y = C.(sI - A)^{-1}.BU + DU$$

*Transfer function* dari sistem *buck converter* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{Y}{U} = C.(sI - A)^{-1}.B + D \quad (2.30)$$

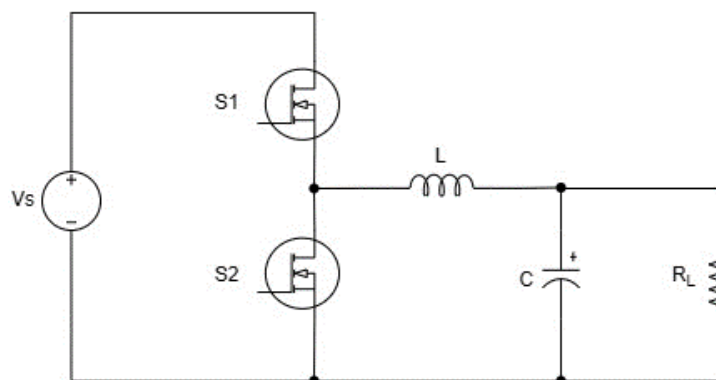
Setelah mensubstitusi nilai-nilai matriks  $A$ ,  $B$  dan  $C$  ke dalam persamaan (2.30), didapatkan *transfer fuction* dari *buck converter* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{V_o(s)}{V_s(s)} &= \frac{d}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \\ \frac{V_o(s)}{d(s)} &= \frac{V_s}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \end{aligned} \quad (2.31)$$

### 2.3.4. Synchronous Buck Converter

*Synchronous buck converter* merupakan salah satu jenis topologi *buck converter*. *Synchronous buck converter* pada dasarnya sama dengan rangkaian *buck converter* biasa, tetapi komponen dioda (D) digantikan dengan MOSFET sebagai sakelar

kedua (S2). Kelebihan dari *synchronous buck converter* adalah MOSFET kedua (S2) akan memiliki *voltage drop* yang lebih rendah dibandingkan dengan dioda, sehingga menghasilkan efisiensi rangkaian yang lebih baik. Penggunaan dioda akan memiliki tegangan jatuh 0,3V hingga 0,4V saat menghantarkan arus, sedangkan MOSFET memiliki tegangan jatuh yang sangat rendah karena resistansi  $R_{DSon}$  yang rendah sebesar  $\pm 50 \text{ m}\Omega$  [19]. Rangkaian *Synchronous buck converter* ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Rangkaian *synchronous buck converter*

MOSFET S1 berperan sebagai *High-side switch* dan MOSFET S2 sebagai *Low-side switch*. Saat MOSFET *High-side* ‘ON’, maka MOSFET *Low-side* akan ‘OFF’, dan sebaliknya. Kedua MOSFET ini tidak boleh hidup pada waktu bersamaan untuk menghindari hubung singkat (*shoot through*), sehingga harus ada *dead-time* atau jeda saat pergantian dalam menghidupkan dan mematikan kedua MOSFET tersebut [19]. *Dead-time* adalah waktu dimana kedua MOSFET dalam kondisi *off*, *dead-time* ini memastikan bahwa MOSFET *High-side* benar-benar mati sebelum MOSFET *Low-side* diaktifkan, dan sebaliknya. Hal ini mencegah terjadinya kondisi di mana keduanya aktif bersamaan, yang dapat menyebabkan kerusakan pada MOSFET atau beban.

Pada pengaplikasiannya, *dead-time* diatur oleh rangkaian kontrol atau mikrokontroler yang mengendalikan MOSFET. Sinyal kendali kedua MOSFET berupa PWMH dan PWML yang dihasilkan oleh mikrokontroler harus diatur lama *dead-time* dengan baik, karena Semakin lama *dead-time*, maka tegangan keluarannya akan sedikit berkurang dan semakin singkat *dead-time*, maka semakin besar kemungkinan mengalami *shoot through*. Persamaan (2.30) dapat

digunakan untuk menghitung *dead-time* MOSFET dari *synchronous buck converter* [20].

$$t_{dead(min)} = t_{d(on)HS} + t_{d(off)LS} + t_{on-GD} + 50ns \quad (2.32)$$

Dimana,

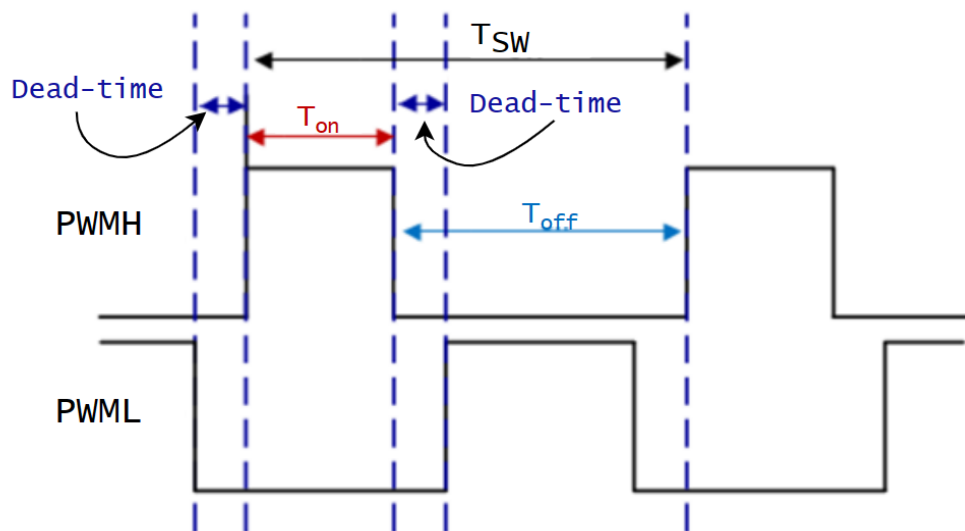
$t_{dead(min)}$  = *minimum dead-time*

$t_{d(on)HS}$  = *high-side MOSFET turn-on time*

$t_{d(off)LS}$  = *low-side MOSFET turn-off time*

$t_{on-GD}$  = *turn-on propagation delay of gate driver*

50ns = *safety margin*



Gambar 2.11. Pulsa PWM dengan *dead-time*

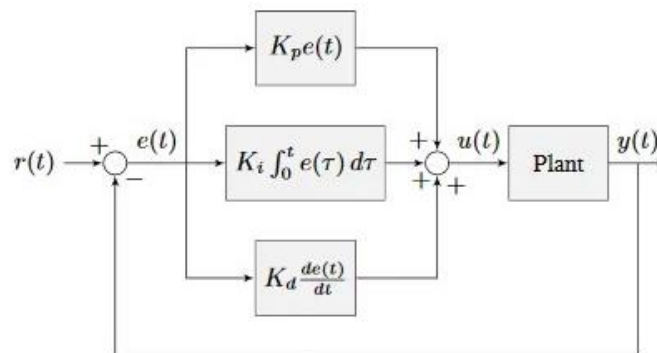
#### 2.4. PID Controller

PID *controller* merupakan sistem kendali umpan balik yang umum digunakan yang terdiri dari tiga parameter, yaitu *proportional* (P), *integral* (I), dan *derivative* (D). Diagram blok PID *controller* dalam domain waktu dan domain frekuensi ditunjukkan pada Gambar 2.12 [21]. Ketiga parameter PID *controller* tersebut memiliki pengaruh yang berbeda terhadap sistem yang ingin dikendalikan. Beberapa pengaruh umum dari masing-masing parameter PID *controller* pada sistem *closed-loop* ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.

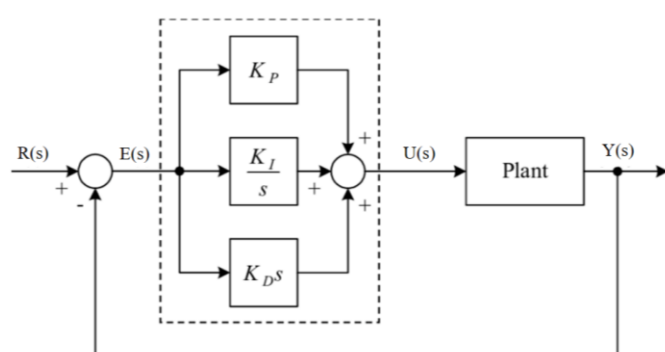


Tabel 2.1. Pengaruh parameter P, I, dan D pada sistem *closed loop* [22]

<i>Closed loop response</i>	<i>Rise time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Setling time</i>	<i>Steady state error</i>
K <sub>p</sub>	Menurun	Meningkat	Perubahan kecil	Menurun
K <sub>i</sub>	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
K <sub>d</sub>	Perubahan kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil



(a)



(b)

Gambar 2.12. Diagram blok PID *controller* (a) domain waktu dan (b) domain frekuensi [23]

PID *controller* menghitung secara terus-menerus nilai kesalahan  $e(t)$  yang merupakan perbedaan antara nilai referensi dan keluaran *plant*,  $r(t) - y(t)$ . Persamaan dari PID *controller* dalam domain waktu ditunjukkan pada persamaan (2.33) [23].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.33)$$

Persamaan dari PID *controller* juga dapat dituliskan dalam domain frekuensi yang ditunjukkan pada persamaan (2.34).

$$U(s) = \left[ K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \right] \cdot E(s) \quad (2.34)$$

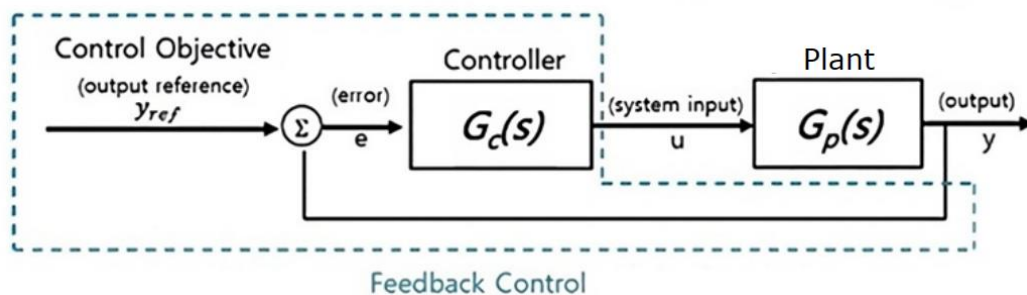
Sehingga diperoleh *transfer function* dari PID *controller* yang dituliskan pada persamaan (2.35) dan (2.36).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (2.35)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I}{s} \quad (2.36)$$

## 2.5. Metode Penalaan PID Controller untuk Synchronous Buck Converter Menggunakan Model Matematis

Sistem kendali umpan balik adalah mekanisme yang digunakan untuk mengatur keluaran dari suatu sistem agar sesuai dengan nilai yang diinginkan (referensi,  $y_{ref}$ ) dengan cara meminimalkan perbedaan antara *actual output* ( $y$ ) dan nilai referensi tersebut. Mekanisme ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu pengendali (*controller*), sistem yang dikendalikan (*plant*), dan elemen umpan balik. Diagram blok dari sistem kendali umpan balik ditunjukkan pada Gambar 2.13.



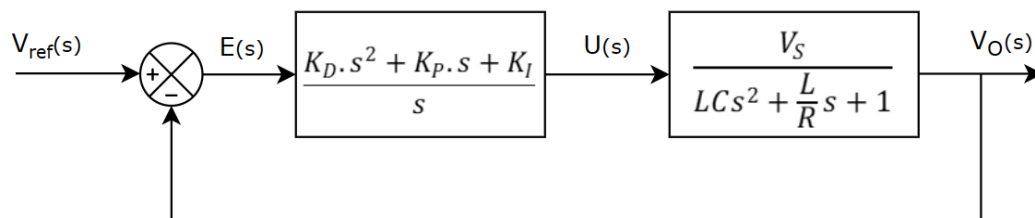
Gambar 2.13. Diagram blok sistem kendali umpan balik

Pada sistem kendali umpan balik, keluaran aktual dari sistem diukur dan dibandingkan dengan nilai referensi untuk menghasilkan sinyal *error* ( $e$ ), yang merupakan selisih antara nilai referensi dan keluaran aktual. Sinyal kesalahan ini kemudian diproses oleh pengendali ( $G_c(s)$ ) yang menghasilkan sinyal kontrol ( $u$ ).

Sinyal kontrol ini dikirimkan ke sistem yang dikendalikan ( $G_P(s)$ ) untuk mengatur perilaku sistem sehingga keluaran aktual mendekati nilai referensi.

Implementasi sistem kendali umpan balik memerlukan pemodelan yang akurat dari sistem yang dikendalikan serta desain pengendali yang tepat. Model matematis dari sistem, biasanya dalam bentuk fungsi transfer ( $G_P(s)$  untuk *plant* dan  $G_C(s)$  untuk *controller*), digunakan untuk menganalisis dan merancang pengendali yang mampu menghasilkan respons yang diinginkan. Kendali PID dapat diterapkan sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan spesifik dari sistem yang sedang dikendalikan.

Metode penalaan model matematis ini akan menghasilkan sebuah metode untuk mencari parameter PID dengan mudah. Metode ini diperoleh dengan menentukan persamaan tegangan dan arus dengan menggunakan Hukum Kirchhoff pada *buck converter* saat kondisi *switch on* dan saat *switch off*, model *state-space* dari *buck converter*, *transfer function* dari sistem *buck converter*, dan *transfer function* dari PID *controller* [18]. Diagram blok dari PID *controller* pada sistem *synchronous buck converter* ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Diagram blok sistem kendali PID pada sistem *synchronous buck converter*

Bentuk persamaan *open loop transfer function* dari PID *controller* pada sistem *buck converter* ditunjukkan persamaan (2.37) dan (2.38) berikut.

$$\frac{V_O(s)}{E(s)} = \frac{K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I}{s} \cdot \frac{V_S}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (2.37)$$

$$\frac{V_O(s)}{E(s)} = \frac{(K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I) \cdot V_S}{\left( LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1 \right) s} \quad (2.38)$$

Bentuk persamaan *closed loop transfer function* dari PID *controller* pada sistem *buck converter* ditunjukkan persamaan (2.39) dan (2.40) berikut.

$$\frac{V_O(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{\frac{(K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I) \cdot V_S}{(LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1)s}}{1 + \frac{(K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I) \cdot V_S}{(LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1)s}} \quad (2.39)$$

$$\frac{V_O(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{(K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I) \cdot V_S}{(LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1)s + (K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I) \cdot V_S} \quad (2.40)$$

Untuk memperoleh *transfer function* dari sistem kendali *buck converter* yang lebih sederhana dapat dilakukan dengan membuat bagian dari koefisien  $(K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I)$  dan  $(LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1)$  menjadi sama, seperti yang ditunjukkan melalui persamaan (2.41) [18].

$$(K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I) = \left( LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1 \right) \quad (2.41)$$

Sehingga diketahui bahwa nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dari PID *controller* dapat ditentukan melalui persamaan-persamaan berikut [18].

$$K_D = LC \quad (2.42)$$

$$K_P = L/R \quad (2.43)$$

$$K_I = 1 \quad (2.44)$$

Sehingga *closed loop transfer function* untuk sistem *buck converter* didapatkan sebagai berikut:

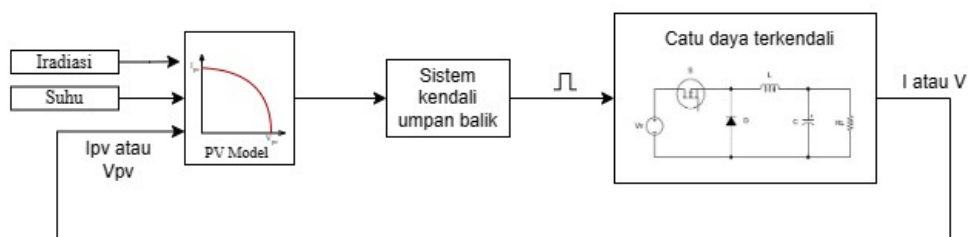
$$\frac{V_O(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{V_S}{s + V_S} \quad (2.45)$$

## 2.6. PV Emulator

PV *emulator* merupakan perangkat yang digunakan untuk meniru karakteristik arus-tegangan keluaran (I-V) yang mirip dengan modul PV sebenarnya [7]. PV *emulator* dapat berupa *power supply* DC terkontrol, seperti *dc-dc converter*, yang meniru karakteristik I-V dari PV sebenarnya pada iradiasi dan suhu tertentu.

Karakteristik beban eksternal menentukan titik operasi pada kurva karakteristik I-V [6][7]. PV *emulator* terdiri dari tiga bagian utama, yaitu sistem pemodelan PV, sistem catu daya, dan sistem kendali umpan balik, seperti yang terlihat pada Gambar 2.15 [24].

Sistem pemodelan PV berisikan data-data terkait karakteristik arus-tegangan dari modul PV sebenarnya. Keluaran sistem model PV adalah berupa sinyal digital sebagai masukan untuk sistem catu daya terkontrol. Sistem catu daya terkontrol ini menghasilkan keluaran arus dan tegangan yang mirip dengan karakteristik I-V modul PV sebenarnya. Biasanya sistem catu daya terkontrol dapat berupa rangkaian dc-dc *converter*, seperti *buck*, *boost*, atau *buck-boost*. Keluaran dari sistem catu daya terkontrol akan diumpan balikkan pada sistem model PV. Sistem umpan balik mempengaruhi akurasi dan respons dari keluaran PV *emulator*. Tugas utama dari sistem kendali umpan balik adalah untuk menemukan titik operasi akurat dari PV *emulator* berdasarkan data PV sebenarnya [7].



Gambar 2.15. Bagian utama PV *emulator*

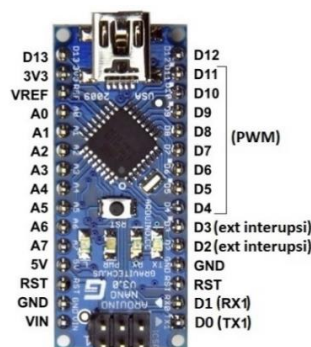
## 2.7. Mikrokontroler Arduino Nano

Arduino Nano adalah merupakan mikrokontroler berukuran kecil yang berbasis mikrokontroler Atmega328. Mikrokontroler Arduino Nano ditunjukkan pada Gambar 2.16. Arduino Nano mempunyai 14 pin *digital I/O* (pin D0 s.d. D13) yang terdiri dari 8 pin *input analog* (pin A0 s.d. A7) yang biasa digunakan untuk membaca tegangan dari sensor dan mengkonversikannya menjadi nilai ADC (*analog-to-digital converter*) 0 dan 1023, 6 pin *output analog* (pin D3, D5, D6, D9, D10, dan D11) yang digunakan untuk pengaturan PWM (*Pulse Width Modulation*), sebuah osilator kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah ICSP *header*, dan sebuah tombol *reset*. Arduino Nano dapat dioperasikan dengan menggunakan port USB komputer, USB *charger*, adaptor AC-DC dengan

tegangan yang direkomendasikan 7-12 Volt, atau melalui pin +5V [25]. Spesifikasi Arduino Uno terdapat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. Spesifikasi Arduino Nano Atmega 328 [26]

<i>Parameter</i>	<i>Type/Value</i>
<i>Microcontroller</i>	Atmega328
<i>Operating voltage</i>	5V
<i>Digital I/O pins</i>	14 (6 PWM outputs)
<i>Analog input pins</i>	8
<i>DC current per I/O pins</i>	40 mA
<i>DC current for 3.3V pin</i>	50 mA
<i>Flash memory</i>	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
<i>Clock speed</i>	16 MHz
Panjang PCB	4,3 cm
Lebar PCB	1,8 cm



Gambar 2.16. Arduino Nano

## 2.8. Gate Driver IC IR2110

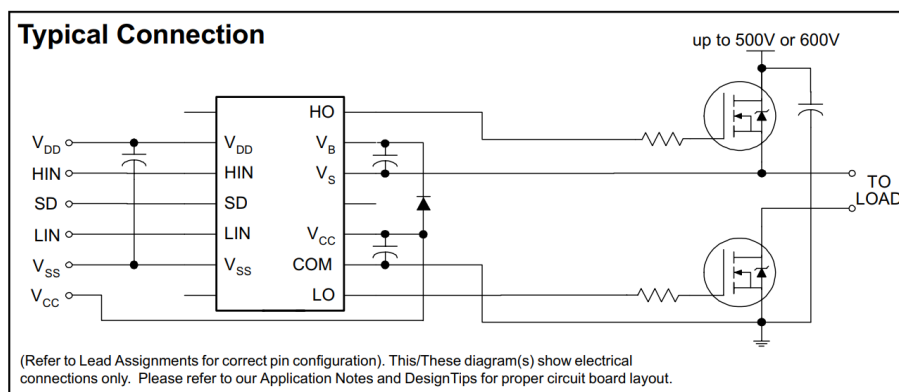
*Gate driver* merupakan perangkat yang digunakan untuk menguatkan sinyal PWM dari mikrokontroler. Pin *output* PWM dari mikrokontroler dihubungkan dengan input *gate driver* untuk menguatkan sinyal PWM sekaligus menaikkan tegangan dan arus yang diberikan ke MOSFET. Arduino memiliki keterbatasan pada tegangan keluarannya, dimana tegangan maksimum dari sinyal PWM yang mampu dibangkitkan oleh mikrokontroler hanya sekitar 5V, sehingga untuk memperkuat tegangan sinyal keluaran PWM dari mikrokontroler diperlukan rangkaian *gate driver* untuk pensakelaran MOSFET [27].

Salah satu IC yang dapat digunakan sebagai *gate driver* adalah IR2110. *Gate driver* IR2110 merupakan *gate driver high side* dan *low side driver* dengan

memiliki dua *input* PWM yang tidak saling bertautan atau independen, antara PWM *high-side* dan PWM *low-side*, yang berfungsi sebagai *output* untuk mengendalikan operasi *switching high-side* MOSFET dan *low-side* MOSFET [27]. *Gate driver* IR2110 menggunakan metode *bootstrap* untuk menyediakan tegangan gerbang (*gate voltage*) yang diperlukan oleh *high-side* MOSFET. *Typical connection* dari IC IR2110 dapat dilihat pada Gambar 2.18. IR2110 menggunakan kapasitor bootstrap ( $C_{boot}$ ) yang dihubungkan antara pin *bootstrap* ( $V_b$ ) dan pin *source high-side* ( $V_s$ ). Dioda *bootstrap* dihubungkan antara  $V_{cc}$  dan  $V_b$ , mengatur pengisian kapasitor *bootstrap* ( $D_{boot}$ ) saat MOSFET *low side* aktif.

Tegangan  $V_{bs}$  (perbedaan tegangan antara pin  $V_b$  dan  $V_s$  pada IC IR2110) menyediakan suplai tegangan ke rangkaian driver *high-side* dari IC IR2110. MOSFET *high-side* memerlukan tegangan *gate* yang lebih tinggi dari tegangan sumbernya ( $V_{cc}$ ) untuk dapat aktif. Untuk menghasilkan tegangan ini, IR2110 menggunakan rangkaian *bootstrap* yang terdiri dari sebuah dioda dan kapasitor *bootstrap*. Ketika *low-side* MOSFET aktif (*on*), kapasitor *bootstrap* ( $C_{boot}$ ) diisi oleh tegangan suplai (biasanya 12V atau 15V) melalui dioda bootstrap ( $D_{boot}$ ).

Ketika *low-side* MOSFET aktif, tegangan pada *node bootstrap* ( $V_b$ ) turun mendekati *ground* (GND). Pada saat ini, dioda *bootstrap* menjadi *forward-biased* dan kapasitor *bootstrap* terisi hingga tegangan suplai ( $V_{cc}$ ). Ketika *high-side* MOSFET perlu diaktifkan, driver IR2110 menggunakan tegangan yang tersimpan dalam kapasitor bootstrap. Tegangan pada  $V_b$  naik, dan kapasitor *bootstrap* menyediakan tegangan yang diperlukan untuk menaikkan tegangan *gate high-side* MOSFET ke tingkat yang lebih tinggi daripada tegangan sumbernya.



Gambar 2.17. *Typical connection* IR2110

## 2.9. Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian yang akan dilakukan, antara lain:

### A. *Design and Implementation of a Photovoltaic Emulator Using an Insulated Full Bridge Converter Based Switch Mode Power Supply* [28]

Penelitian ini dilakukan oleh Mohammed Chaker dkk. pada tahun 2021. PV emulator yang dibuat pada penelitian ini terdiri dari isolated switch mode power supply (SMPS) berbasis full bridge converter. Sistem kendali umpan balik yang digunakan adalah PI controller dengan rangkaian kontroler yang digunakan adalah F28335 DSP Controller yang diprogram juga untuk menghasilkan karakteristik PV menggunakan teknik pemodelan matematis dan teknik LUT. Kedua teknik pemodelan karakteristik PV tersebut dianalisis dan dibandingkan sehingga diperoleh PV emulator yang dibuat menunjukkan akurasi yang baik dalam meniru karakteristik PV yang sebenarnya.

### B. *Photovoltaic Emulator Of Different Solar Array Configurations Under Partial Shading Conditions Using Damping Injection Controller* [29]

Penelitian ini dilakukan pada tahun 2020 oleh Mustapha Alaoui dkk. dari Hassan First University, Morocco. Penelitian ini menggunakan teknik pengendali sistem umpan balik *damping injection control*, teknik *Look up Table* (LUT), dan *buck converter*. Simulasi menggunakan *software* MATLAB-Simulink dan dilakukan juga pengujian menggunakan perangkat keras yang telah diimplementasikan yang menunjukkan bahwa PV emulator dapat menghasilkan karakteristik arus dan tegangan *output* yang menyerupai karakteristik I-V asli yang diuji pada tingkat irradiasi dan suhu yang beragam.

### C. *Photovoltaic Emulator Berbasis Embedded System pada Jaringan Listrik Cerdas* [30]

Penelitian ini dilakukan pada tahun 2019 oleh Fitra Purnama Adi, Khairudin, dan Lukmanul Hakim dari Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung yang bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan Photovoltaic Emulator



dengan menggunakan rangkaian elektronika daya dengan pemrograman pemodelan panel surya. Pemodelan panel surya menggunakan persamaan matematis dari data karakteristik modul PV sebenarnya. Konverter dc-dc yang digunakan sebagai PV emulator-nya adalah buck-boost converter dan metode pengendalian umpan baliknya menggunakan PID controller yang diprogram dalam mikrokontroler Arduino Uno. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa PV emulator yang dibuat telah mampu meniru karakteristik tegangan dan arus keluaran dari panel surya. Persentase kemiripan karakteristik keluaran PV emulator dengan PV sebenarnya adalah 95.13%.

Perbedaan utama penelitian [28], [29], dan [30] tersebut dengan penelitian yang dilakukan adalah rangkaian konverter dc-dc yang digunakan untuk menghasilkan keluaran arus dan tegangan PV *emulator* adalah *synchronous buck converter* yang memiliki efisiensi daya yang lebih baik dibandingkan dengan rangkaian *buck converter* biasa. Kemudian sistem pengendalian yang digunakan adalah PID *controller* dan pemodelan dari modul PV menggunakan metode *Look-up table* (LUT), serta pada penelitian ini, akan dianalisis pengaruh perubahan beban terhadap respon sistem pada daerah operasi CCR, CVR, dan MPP. Selain itu, PV emulator yang dibuat pada penelitian ini akan menggunakan mikrokontroler Arduino Nano yang harganya lebih murah jika dibandingkan dengan kontroler yang digunakan pada penelitian [28] tersebut.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Waktu dan Tempat

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dari bulan November 2023 – Juni 2024.

#### 3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) sebagai berikut:

##### A. *Hardware*

1. Satu unit laptop yang berfungsi sebagai media untuk perancangan rangkaian dan sebagai tempat pengerjaan laporan penelitian.
2. Rangkaian *synchronous buck converter*, yang terdiri dari komponen induktor, kapasitor, MOSFET, dan resistor.
3. Rangkaian gate driver IR2110 yang digunakan sebagai penghubung antara rangkaian daya (*synchronous buck converter*) dan rangkaian kontrol sekaligus menguatkan amplitudo dari sinyal kontrol.
4. Mikrokontroler Arduino nano yang digunakan untuk memodelkan panel surya dengan metode look-up table, kendali *Proportional Integral Derivative* (PID), mengolah data tegangan dan arus keluaran *synchronous buck converter*, dan mengatur antarmuka keluaran LCD.
5. Catu daya, digunakan untuk memberikan suplai tegangan pada rangkaian *synchronous buck converter*, rangkaian *gate driver* dan mikrokontroler Arduino nano.
6. Multimeter digital sebagai alat ukur penelitian.
7. Satu unit solder dan timah untuk realisasi rangkaian.

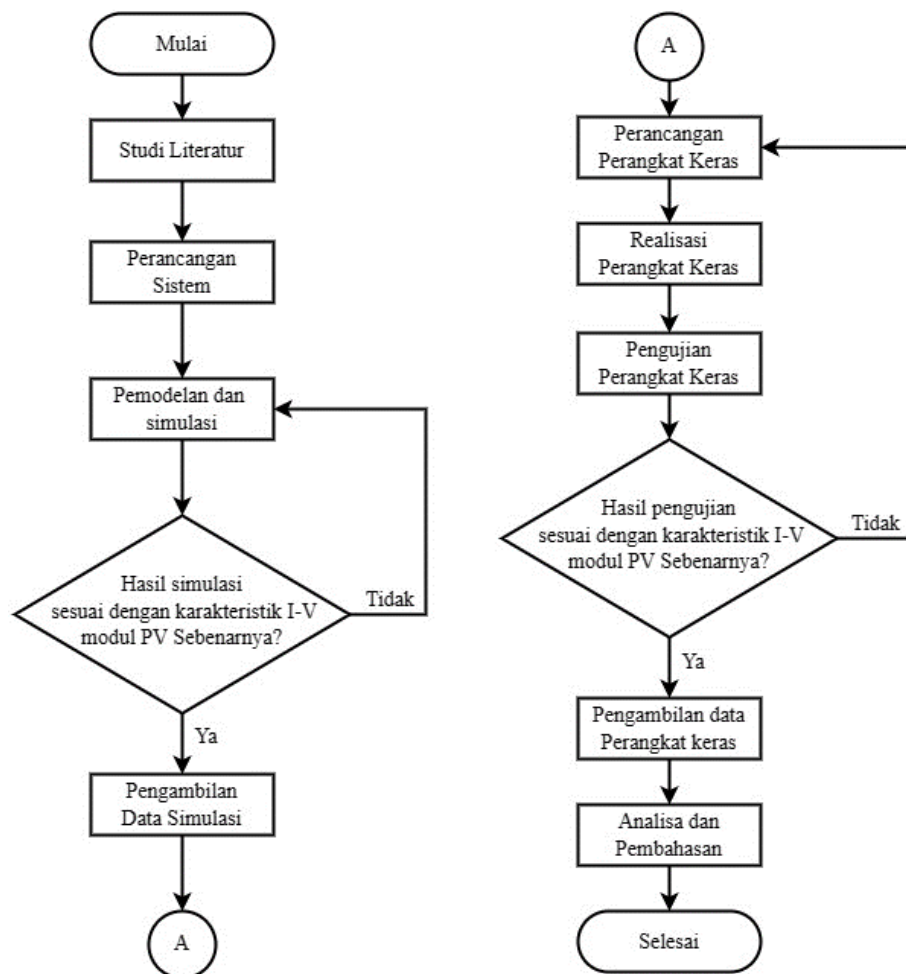
8. Osiloskop digital.
9. Sensor arus dan sensor tegangan.

### B. Software

1. MATLAB 2021a untuk perancangan model dan simulasi sistem PV emulator.
2. Arduino IDE untuk pembuatan kode program yang akan dimasukkan ke dalam mikrokontroler Arduino.
3. EasyEDA untuk membuat layout PCB rangkaian PV emulator.
4. Draw.io sebagai media pembuatan bagan *flowchart* penelitian.

### 3.3. Metode Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan pelaksanaan, yaitu tertera pada Gambar 3.1 diagram alir penelitian.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

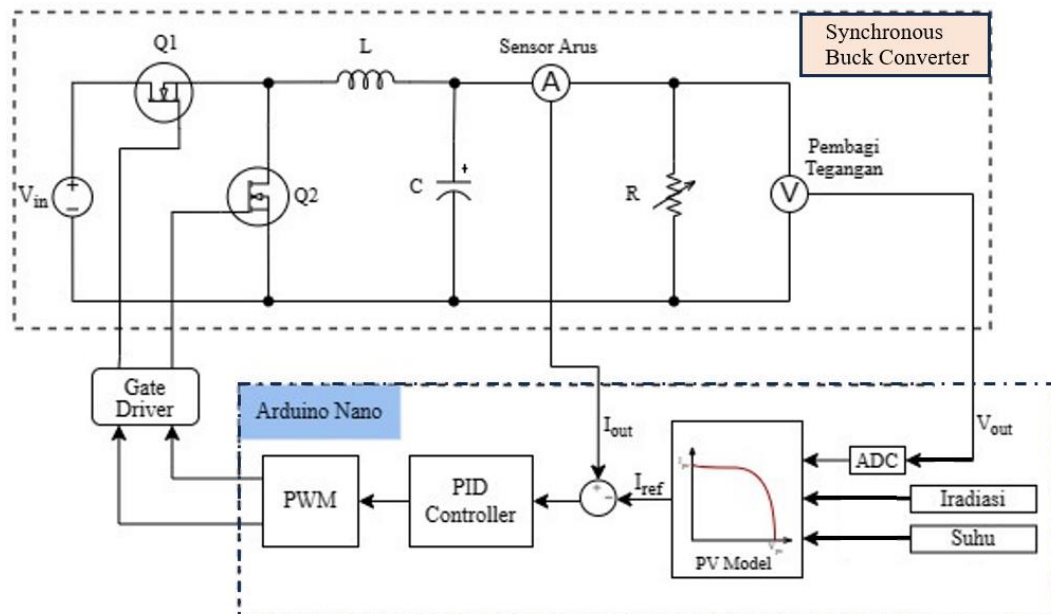
## A. Studi Literatur

Pada tahap ini, dilakukan pencarian informasi atau bahan materi baik dari buku, jurnal, maupun sumber-sumber lain yang berkaitan dengan penelitian ini, yaitu:

1. *PV emulator*
2. *Synchronous buck converter*
3. Mikrokontroler Arduino Nano
4. MOSFET *Gate Driver* IR2110
5. Pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID)
6. *Pulse Width Modulation* (PWM)
7. MATLAB/Simulink

## B. Perancangan Sistem

Pada tahap ini, akan dilakukan perancangan sistem perangkat keras dan sistem kontrol dari PV emulator berbasis *synchronous buck converter* menggunakan mikontroler Arduino Nano. Perangkat keras PV emulator yang akan dibuat terdiri dari rangkaian *synchronous buck converter*, rangkaian *gate driver*, dan rangkaian kontroler Arduino Nano. Rancangan sistem *PV emulator* berbasis *synchronous buck converter* ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram blok rancangan sistem PV emulator berbasis *synchronous buck converter*

Rangkaian *synchronous buck converter* yang dirancang terdiri dari dua MOSFET (*high side MOSFET* dan *low side MOSFET*), induktor, kapasitor, dan beban. *Synchronous buck converter* yang dirancang memiliki kapasitas sebesar 50 watt dengan rincian nilai komponen yang akan dijelaskan pada sub-bab perancangan *synchronous buck converter*. Selain itu, terdapat rangkaian sistem umpan balik yang akan diproses oleh mikrokontroler Arduino Nano. Sistem umpan balik yang akan diprogram melalui mikrokontroler terdiri dari sistem pemodelan kurva karakteristik PV referensi yang berisi data arus dan tegangan keluaran dari PV sesuai dengan kondisi *irradiance* dan *temperature*, sistem *PID controller* menggunakan library Quick PID yang tersedia secara open source pada library manager Arduino IDE, serta PWM generator yang diprogram menggunakan Timer-1 dengan pin keluaran PWM pada pin 9 dan pin 10 Arduino. Sinyal PWM Arduino dengan amplitudo tegangan 5 volt akan ditingkatkan amplitudo sinyalnya melalui rangkaian MOSFET *gate driver* tipe IR2110 sehingga keluaran PWM memiliki amplitudo tegangan 15 volt yang telah mencukupi untuk menjadi *drive voltage switching* MOSFET.

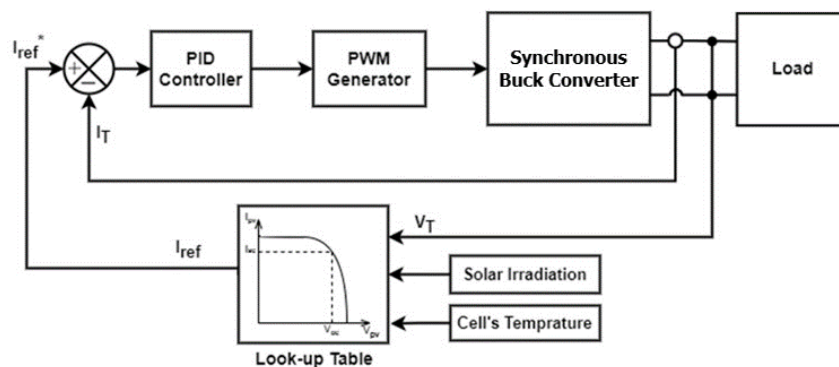
Rangkaian *synchronous buck converter* menghasilkan tegangan dan arus keluaran yang mirip dengan karakteristik I-V dari modul PV sebenarnya. Tegangan dan arus keluaran *synchronous buck converter* akan diumpan balikkan ke kontroler Arduino Nano untuk diproses, dimana tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) diubah menjadi arus referensi ( $I_{ref}$ ) melalui program *look-up table*. Arus referensi ( $I_{ref}$ ) akan dibandingkan dengan arus keluaran ( $I_{out}$ ) *synchronous buck converter* yang menghasilkan nilai *error*. Nilai *error* ini akan diproses oleh mikrokontroler Arduino Nano sebagai masukan untuk *PID controller*.

Keluaran *PID controller* akan diproses untuk menghasilkan pulsa PWM oleh mikrokontroler Arduino Nano. Pulsa PWM yang dihasilkan kontroler Arduino Nano masih memiliki amplitudo yang rendah, sehingga harus ditinggikan amplitudonya menggunakan rangkaian *gate driver* IC IR2110 untuk masukan pulsa *switching* Mosfet pada rangkaian *synchronous buck converter*. Proses *closed loop* dari Sistem PV *emulator* ini akan terus berulang, sehingga dihasilkan nilai arus dan tegangan keluaran yang mirip dengan karakteristik I-V modul PV sebenarnya.

### C. Pemodelan dan Simulasi

Pada tahap ini, dilakukan pemodelan dan simulasi dari PV emulator berbasis *synchronous buck converter* menggunakan *software* MATLAB/Simulink. Diagram blok pemodelan dan simulasi PV emulator berbasis *synchronous buck converter* ditunjukkan pada Gambar 3.3. Sistem PV emulator terdiri dari beberapa subsistem, yaitu model PV *module* berupa *look-up table*, rangkaian *synchronous buck converter*, *PID controller*, dan *PWM generator*. Perancangan model dari PV *module* menggunakan data kurva karakteristik arus-tegangan dari modul PV sebenarnya yang dimasukkan pada blok *look-up table*.

Pemodelan dan simulasi dari PV emulator ini meliputi pemodelan karakteristik modul PV referensi (Sunmodule SW50), pemodelan rangkaian *synchronous buck converter*, pemodelan sistem umpan balik PV emulator, dan simulasi PV emulator berbasis *synchronous buck converter*.



Gambar 3.3. Diagram blok pemodelan dan simulasi PV emulator berbasis *synchronous buck converter*

Pengujian model simulasi dilakukan pada setiap subsistem dan pada sistem rangkaian PV emulator berbasis *synchronous buck converter*. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa setiap subsistem penyusun PV emulator yang akan disimulasikan berfungsi dengan baik sebelum disatukan menjadi sistem PV emulator.

Pengujian model PV *module* dilakukan dengan memberikan masukan berupa variasi nilai referensi tegangan, *irradiance*, dan suhu, sehingga menghasilkan keluaran berupa nilai arus referensi sesuai dengan kurva karakteristik arus-tegangan modul PV sebenarnya.

Pengujian rangkaian *synchronous buck converter* dilakukan dengan memberikan nilai referensi arus yang akan dibandingkan dengan arus keluaran *synchronous buck converter*, dimana hasil perbandingan nilai tersebut akan dikendalikan oleh *PID controller*. Keluaran *PID controller* akan menjadi masukan untuk *PWM generator* yang akan memberikan pulsa *switching* bagi MOSFET *synchronous buck converter*, sehingga diperoleh arus keluaran yang sama dengan nilai arus referensi.

Setelah semua subsistem pembangun PV emulator berhasil diuji, selanjutnya dilakukan pengujian simulasi sistem PV emulator berbasis *synchronous buck converter* secara keseluruhan dengan mengubah-ubah nilai beban pada tingkat iradiasi dan suhu yang diinginkan sehingga diperoleh keluaran arus dan tegangan yang menyerupai karakteristik I-V dari modul PV sebenarnya.

#### **D. Implementasi Perangkat Keras**

Pada tahap ini, akan dilakukan implementasi perangkat keras PV emulator berbasis *synchronous buck converter* menggunakan mikrokontroler Arduino. Terdapat dua tahapan yang akan dilakukan, yaitu pembuatan perangkat keras sistem PV emulator dan pembuatan program pada mikrokontroler Arduino Nano. Pembuatan perangkat keras, dilakukan dengan membuat PCB layout dari skematik rangkaian PV emulator, yaitu rangkaian *synchronous buck converter*, rangkaian *gate driver*, serta rangkaian sensor arus dan sensor tegangan untuk keluaran *synchronous buck converter*. Kemudian memasang seluruh komponen sesuai dengan tata letaknya di papan PCB.

Pembuatan program pada mikrokontroler Arduino Nano dibuat melalui *software* Arduino IDE versi 1.8. Pemrograman yang dibuat pada Arduino adalah memprogram data *look-up table* yang berupa nilai-nilai arus dan tegangan sesuai dengan kondisi *irradiance* dan suhu dari panel PV sebenarnya. Selain itu, pada arduino juga diprogram sistem *PID controller* dan keluaran sinyal PWM. Setelah seluruh rangkaian perangkat keras PV emulator selesai dibuat, maka tahapan selanjutnya adalah melakukan pengujian pada keseluruhan perangkat keras tersebut.

### E. Pengujian Perangkat Keras

Pada tahap ini, akan dilakukan pengujian perangkat keras PV *emulator* berbasis *synchronous buck converter*. Pengujian dilakukan pada setiap sub-rangkaian penyusun PV *emulator*, yaitu rangkaian *synchronous buck converter*, rangkaian *gate driver* IC IR2110, serta pada rangkaian dan sistem pemrograman mikrokontroler Arduino Nano. Setelah setiap sub-rangkaian tersebut bekerja dengan baik, selanjutnya dilakukan pengujian pada seluruh rangkaian PV *emulator* yang telah disatukan.

### F. Pengambilan Data dan Analisis

Pada tahap ini, akan dilakukan pengambilan dan analisis data dari PV *emulator* berbasis *synchronous buck converter*. Data yang akan diambil adalah nilai arus dan tegangan keluaran dari rangkaian PV *emulator* berbasis *synchronous buck converter* yang akan dibandingkan dan dianalisa dengan karakteristik arus-tegangan (I-V) modul PV sebenarnya. Nilai arus dan tegangan keluaran PV *emulator* berbasis *synchronous buck converter* ini diperoleh dengan menvariasikan nilai beban pada tingkat iradiasi dan suhu yang berbeda.

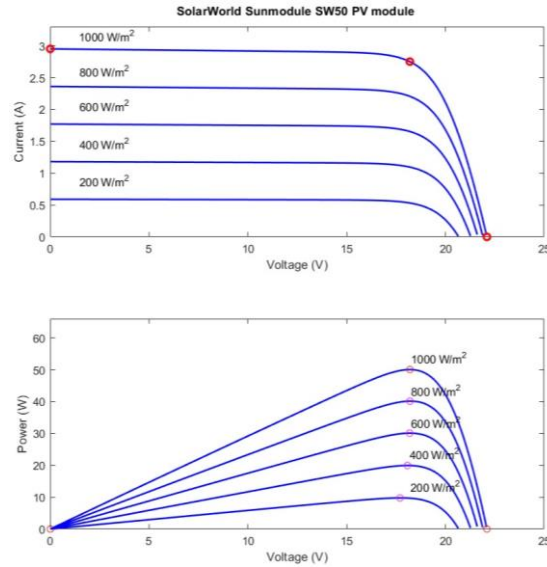
### 3.4. Data Spesifikasi Modul PV Referensi

Modul PV yang digunakan sebagai referensi pada penelitian ini adalah SolarWorld Sunmodule SW50 dengan data spesifikasi teknis yang tertera pada Tabel 3.1. Kurva karakteristik arus-tegangan (I-V) dan karakteristik daya-tegangan (P-V) dari modul PV ini ditunjukkan pada Gambar 3.4.

Tabel 3.1. Data spesifikasi SolarWorld Sunmodule SW50 PV *module* pada *standart test condition* (STC), 1000 W/m<sup>2</sup> dan 25°C

<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>
<i>Maximum power</i>	$P_{\max}$	50 W
<i>Open circuit voltage</i>	$V_{oc}$	22.1 V
<i>Voltage at max power</i>	$V_{mpp}$	18.2 V
<i>Short circuit current</i>	$I_{sc}$	2.95 A
<i>Current at max power</i>	$I_{mpp}$	2.75 A





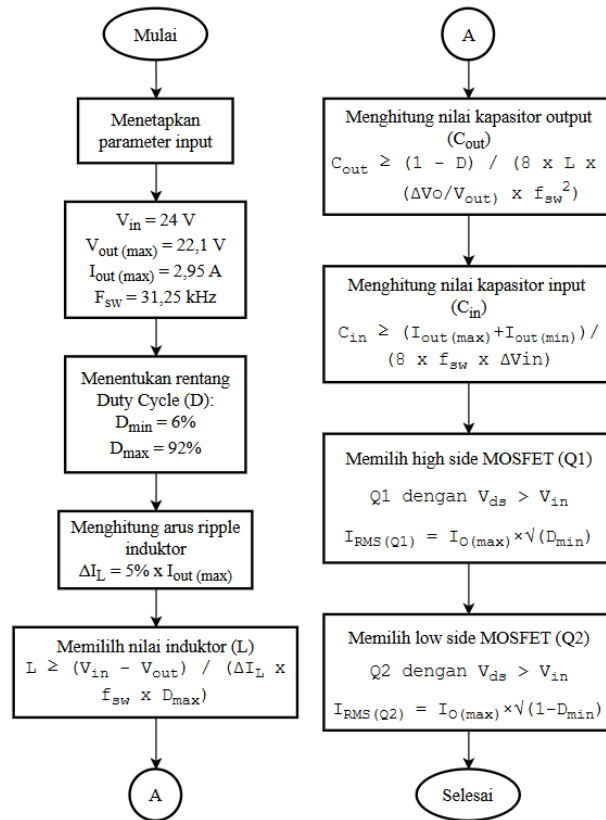
Gambar 3.4. Kurva karakteristik I-V dan P-V modul PV SolarWorld Sunmodule SW50

### 3.5. Perancangan *Synchronous Buck Converter*

Perancangan rangkaian *synchronous buck converter* bergantung pada empat parameter penting untuk pemilihan komponen penyusunnya, yaitu tegangan masukan, tegangan keluaran, arus keluaran, dan frekuensi pensakelaran. Tegangan dan arus keluaran dari *synchronous buck converter* ini didasarkan pada spesifikasi modul PV referensi SolarWorld Sunmodule SW50 dengan rating daya 50 Wp. Perancangannya meliputi pemilihan induktor, kapasitor *output*, kapasitor *input*, dan pemilihan MOSFET. Spesifikasi *synchronous buck converter* ditunjukkan pada tabel 3.2. *Flowchart* perancangannya ditunjukkan pada Gambar 3.5.

Tabel 3.2. Spesifikasi *Synchronous Buck Converter*

<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>
<i>Input voltage</i>	$V_{in}$	24 V
<i>Maximum Output voltage</i>	$V_{out(max)}$	22,1 V
<i>Maximum output current</i>	$I_{out(max)}$	2.95 A
<i>Switching frequency</i>	$f_{sw}$	31250 Hz
<i>Power rating</i>	$P_{max}$	50 W
<i>Input voltage ripple</i>	$\Delta V_{in}$	2%
<i>Output voltage ripple</i>	$\Delta V_o$	1%
<i>Output current ripple</i>	$\Delta I_o$	5%



Gambar 3.5. Flowchart perancangan *synchronous buck converter*

### 3.5.1. Pemilihan Induktor (L)

*Synchronous buck converter* ini dirancang untuk dapat bekerja dengan menghasilkan riak arus keluaran sekecil mungkin. Riak arus keluaran *synchronous buck converter* ini akan bernilai maksimum saat bekerja pada *duty cycle* minimum ( $D_{\min}$ ), dimana arus keluaran yang dihasilkan bernilai  $\pm 2,95$  A saat nilai tegangan keluaran bernilai minimum ( $V_{\text{out}(\min)}$ ). Untuk menentukan minimum dan maksimum *duty cycle* (D) dari *synchronous buck converter*, nilainya dapat dicari menggunakan persamaan (3.1).

$$D = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \quad (3.1)$$

Dengan asumsi bahwa nilai tegangan keluaran minimum ( $V_{\text{out}(\min)}$ ) dari *synchronous buck converter* adalah sebesar 1,5 V yang mana akan menghasilkan arus keluaran maksimum ( $I_{\text{o}(\max)}$ ) 2,95 A, yaitu seperti arus keluaran panel surya saat berada pada titik  $I_{\text{sc}} = 2,95$  A, sehingga dengan menggunakan persamaan (3.1) diperoleh nilai minimum dan maksimum *duty cycle*, sebagai berikut.

$$D_{min} = \frac{V_{out-min}}{V_{in}} = \frac{1.5}{24} = 0,0625 \approx 6\%$$

$$D_{max} = \frac{V_{out-max}}{V_{in}} = \frac{22.1}{24} = 0.9208 \approx 92\%$$

Riak arus keluaran ( $\Delta I_L$ ) dari *synchronous buck converter* yang dirancang adalah sebesar 5% dari arus keluaran maksimum ( $I_{o(max)}$ ). Persamaan (3.2) digunakan untuk mencari nilai riak arus keluaran dari *synchronous buck converter*.

$$\begin{aligned} \Delta I_L &= 5\% I_{o(max)} \\ &= 5\% \times 2.95 \\ &= 0.1475 A \end{aligned} \quad (3.2)$$

Setelah diperoleh nilai riak arus keluaran, maka nilai induktansi dari induktor (L) dapat dihitung menggunakan persamaan (3.3).

$$L_{min} \geq \left( \frac{V_{in} - V_{out}}{\Delta I_O \times f} \right) \times D \quad (3.3)$$

a.  $D_{min} = 6\%$  dan  $V_{out(min)} = 1,5 V$

$$L_{min} \geq \left( \frac{24 - 1,5}{0,1475 \times 31250} \right) \times 0.06$$

$$L_{min} \geq 0,29 \text{ mH}$$

b.  $D_{max} = 92\%$  dan  $V_{out(max)} = 22,1 V$

$$L_{min} \geq \left( \frac{24 - 22.1}{0,1475 \times 31250} \right) \times 0.92$$

$$L_{min} \geq 0,38 \text{ mH}$$

Nilai induktansi  $L_{min} \geq 0,29 \text{ mH}$  akan terlalu kecil untuk tegangan keluaran 22,1 V, sehingga digunakan nilai induktansi induktor  $L_{min} \geq 0,38 \text{ mH}$ . *Synchronous buck converter* ini dirancang untuk selalu bekerja pada mode CCM (*Continuous Current Mode*), maka digunakan induktor dengan nilai induktansi yang lebih besar dari 0,38 mH, yaitu akan digunakan induktor dengan nilai induktansi  $L = 0,5 \text{ mH}$ .

### 3.5.2. Pemilihan Kapasitor Keluaran ( $C_{out}$ )

Setelah nilai induktor ditetapkan, maka nilai kapasitor keluaran ( $C_{out}$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan (3.4). Penggunaan kapasitor pada sisi keluaran *synchronous buck converter* adalah untuk meminimalkan *overshoot* tegangan dan riak pada *output* konverter. Pada rangkaian *synchronous buck converter* ini, nilai riak tegangan keluaran ( $\Delta V_o$ ) yang ditetapkan adalah sebesar 1% dari tegangan keluaran maksimum ( $V_{out(max)}$ ).

$$C_{out} = \frac{1 - D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) f^2} \quad (3.4)$$

a. Saat  $D_{min} = 6\%$

$$C_{out} \geq \frac{1 - 0,06}{8 \times 0,5 \times 10^{-3} \times 0,01 \times (31250)^2}$$

$$C_{out} \geq 24,064 \mu F$$

b. Saat  $D_{max} = 92\%$

$$C_{out} \geq \frac{1 - 0,92}{8 \times 0,5 \times 10^{-3} \times 0,01 \times (31250)^2}$$

$$C_{out} \geq 2,048 \mu F$$

Kapasitor keluaran yang akan digunakan adalah yang bernilai lebih besar dari 24,064  $\mu F$ . Jika kapasitor yang digunakan tidak mencukupi, maka konverter akan mengalami *overshoot* yang besar. Demikian pula, jika kapasitor yang digunakan tidak mencukupi dan resistansi seri ekivalen (ESR) yang tinggi pada kapasitor keluaran, maka akan menyebabkan konverter menghasilkan riak yang besar. Sehingga pada perancangan ini, akan digunakan dua kapasitor dengan nilai kapasitansi  $C = 220 \mu F$  yang tersusun secara paralel menjadi  $C = 440 \mu F$  yang telah memenuhi syarat dan juga agar dapat mengurangi nilai ESR dari kapasitor. Kapasitor yang digunakan harus memiliki rating tegangan yang lebih besar dari tegangan input, maka pada rancangan ini dipilih kapasitor jenis *electrolytic* dengan rating tegangan 50 volt.

### 3.5.3. Pemilihan Kapasitor Masukan ( $C_{in}$ )

Kapasitor masukan ( $C_{in}$ ) berguna untuk mengurangi riak tegangan yang dihasilkan oleh sumber tegangan yang menjadi masukan untuk *synchronous buck converter*. Kapasitor masukan akan menggunakan dua jenis kapasitor, yaitu *multilayer ceramic capacitor* (MLCC) dan kapasitor *bulk* (*electrilytic capacitor*). Riak tegangan input ( $\Delta V_{in}$ ) ditetapkan pada nilai 2% dari tegangan input ( $V_{in}$ ) atau sebesar 0,48 V. Rumus untuk mencari nilai kapasitor masukan MLCC diberikan pada persamaan (3.5).

$$C_{in(MLCC)} \geq \frac{D_{min} \times (1 - D_{min}) \times I_{O(max)}}{\Delta V_{in} \times f_{sw}} \quad (3.5)$$

$$C_{in(MLCC)} \geq \frac{0.06 \times (1 - 0.06) \times 2.95}{0.48 \times 31250}$$

$$C_{in(MLCC)} \geq 11,092 \mu F$$

Dari perhitungan di atas, diperoleh nilai  $C_{in(MLCC)}$  minimum adalah sebesar 11,092  $\mu F$ . Oleh karena itu, pada perancangan ini akan dipilih kapasitor  $C_{in(MLCC)}$  sebesar 20  $\mu F$  yang terdiri dari kapasitor 10  $\mu F$  yang disusun secara paralel dengan rating tegangan 50 V.

Kapasitor *bulk* ( $C_{in(b)}$ ) biasanya merupakan kapasitor *electrolytic*, yang mana kapasitor *electrolytic* memiliki *range* nilai kapasitansi yang lebih besar dibandingkan dengan kapasitor MLCC, sehingga memiliki kemampuan lebih untuk memfilter riak maupun *overshoot* tegangan masukan. Dengan asumsi nilai arus keluaran minimum dari *synchronous buck converter* adalah 0,1 A, maka nilai kapasitor *bulk* dapat dicari menggunakan persamaan (3.6).

$$C_{in(b)} \geq \frac{I_{out(max)} + I_{out(min)}}{8 \times f_{sw} \times \Delta V_{in}} \quad (3.6)$$

$$C_{in(b)} \geq \frac{2,95 + 0,1}{8 \times 31250 \times 0,48}$$

$$C_{in(b)} \geq 25,417 \mu F$$

Kapasitor *bulk* yang digunakan harus lebih besar dari 25,417  $\mu F$ . Pada rancangan *synchronous buck converter* ini akan kapasitor *electrolytic capacitor* 440  $\mu F$  yang

terdiri dari dua kapasitor 220  $\mu\text{F}$  yang diisusun secara paralel untuk mengurangi nilai ESR dari kapasitor.

### 3.5.4. Pemilihan MOSFET

Pemilihan komponen MOSFET untuk PV emulator berbasis *synchronous buck converter* yang terdiri dari *high-side* dan *low-side* MOSFET perlu mempertimbangkan beberapa faktor penting, yaitu tegangan input ( $V_{in}$ ) dan arus keluaran ( $I_{out}$ ). Tegangan input berguna untuk menentukan nilai rating  $V_{DS}$  MOSFET yang diperlukan. Rangkaian *synchronous buck converter* ini dirancang dengan menggunakan tegangan input sebesar 24 V, sehingga akan dipilih MOSFET dengan rating tegangan  $V_{DS}$  lebih dari 24 V. Kemudian untuk menentukan rating arus *high-side* dan *low-side* MOSFET yang diperlukan, dapat dicari menggunakan persamaan (3.7) dan persamaan (3.8).

a. *High-side* MOSFET (Q1)

$$\begin{aligned} I_{RMS(Q1)} &= I_{O(max)} \times \sqrt{D_{min}} \\ &= 2,95 \times \sqrt{0.024} \\ &= 0,475 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.7)$$

b. *Low-side* MOSFET (Q2)

$$\begin{aligned} I_{RMS(Q2)} &= I_{O(max)} \times \sqrt{1 - D_{min}} \\ &= 2,95 \times \sqrt{1 - 0.024} \\ &= 2.914 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Berdasarkan perhitungan di atas, dipilih *high-side* dan *low-side* MOSFET dengan tipe N-Channel yang sama, yaitu IRF3205 produksi dari *International Rectifier* dengan spesifikasi  $V_{DS} = 55 \text{ V}$ ,  $I_D = 110 \text{ A}$ ,  $V_{GS} = \pm 20 \text{ V}$ ,  $R_{DS(on)} = 8 \text{ m}\Omega$ , dan  $Q_g = 146 \text{ nC}$ . Setelah jenis MOSFET ditentukan, maka dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai  $R_{DS(on)}$  maksimum dari MOSFET IRF3205. Untuk melakukan perhitungan  $R_{DS(on)}$  maksimum, terdapat parameter yang harus diketahui, yaitu suhu sambungan maksimum atau *maximum junction temperature* ( $T_{J(max)}$ ), suhu lingkungan atau *ambient temperature* ( $T_A$ ), *thermal impedance junction to*

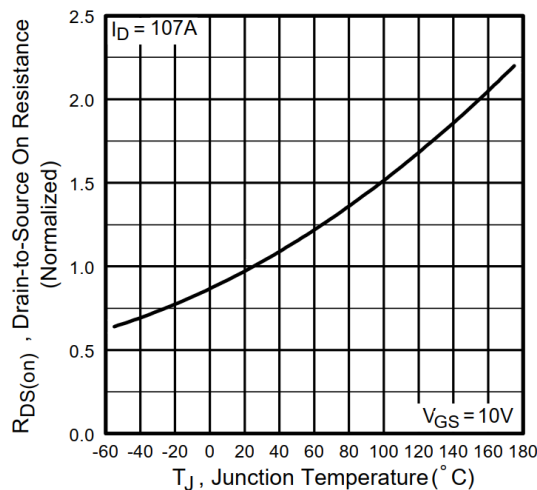
*ambient* ( $R_{\theta JA}$ ), dan faktor peningkatan  $R_{DS(on)}$  berdasarkan peningkatan suhu ( $RK$ ).  $T_{J(max)}$  dari MOSFET IRF3205 adalah  $175^{\circ}\text{C}$ , sedangkan  $T_A$  diatur pada nilai  $35^{\circ}\text{C}$ . Pada MOSFET IRF3205,  $R_{\theta JA}$  adalah  $62^{\circ}\text{C/W}$  dan  $RK$  adalah 2.2 saat  $175^{\circ}\text{C}$  (Gambar 3.6). Nilai-nilai parameter tersebut diperoleh melalui datasheet MOSFET IRF3205. Nilai Maksimum  $R_{DS(on)}$  dapat dicari menggunakan persamaan (3.9).

$$R_{DS(on)max} = \frac{T_{J(max)} - T_A}{I_{O(max)}^2 \times RK \times R_{\theta JA}} \quad (3.9)$$

$$= \frac{175 - 35}{2,95^2 \times 2,2 \times 62}$$

$$\approx 0,12 \Omega$$

Sehingga diperoleh  $R_{DS(on)}$  maksimum adalah  $0,12 \Omega$ .



Gambar 3.6. *Normalized  $R_{DS(on)}$  ( $RK$ ) vs. Temperature*

Tabel 3.3. Nilai komponen *Synchronous Buck Converter*

<i>Component</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value / Type</i>
<i>Inductor</i>	<i>L</i>	0.5 mH
<i>Input capacitor</i>	<i>C<sub>in</sub></i>	440 $\mu\text{F}$
<i>Output capacitor</i>	<i>C<sub>out</sub></i>	440 $\mu\text{F}$
<i>High-side MOSFET</i>	<i>Q1</i>	IRF3205
<i>Low-side MOSFET</i>	<i>Q2</i>	IRF3205

### 3.6. Pemodelan PV Emulator

Pemodelan PV emulator dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Pada tahap ini, masing-masing rangkaian penyusun PV emulator akan dimodelkan. Secara garis besar, pemodelan dan simulasinya meliputi pemodelan karakteristik *photovoltaic*, pemodelan *synchronous buck converter*, dan pemodelan sistem umpan balik PV emulator.

#### 3.6.1. Pemodelan Karakteristik *Photovoltaic*

Pemodelan karakteristik *photovoltaic* bertujuan untuk memperoleh data tegangan, arus, dan daya keluaran *photovoltaic* yang akan dimodelkan menjadi kurva arus-tegangan (*I-V curve*) dan kurva daya-tegangan (*P-V curve*) yang akan digunakan sebagai data *look-up table*. PV emulator yang dibuat menggunakan 101 titik data untuk memodelkan PV referensi, Sunmodule SW50. Tabel 3.4 menunjukkan parameter karakteristik dari modul PV referensi pada pengujian *standard test condition* (STC) dengan tingkat iradiasi  $1000 \text{ W/m}^2$  dan suhu  $25^\circ\text{C}$ . Nilai dari parameter-parameter pada tabel 3.4 tersebut digunakan untuk memodelkan modul PV referensi menggunakan *block PV Array* pada MATLAB/Simulink.

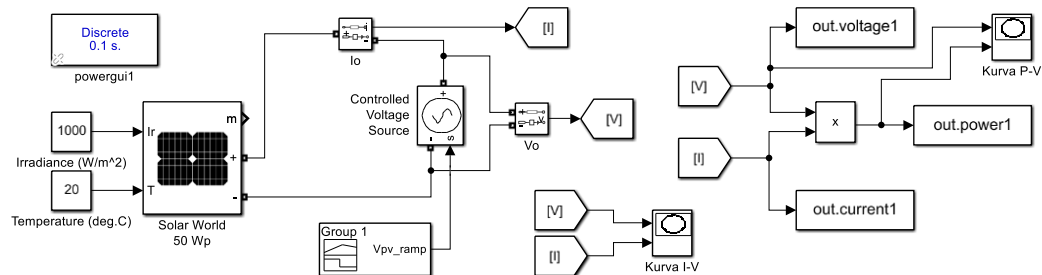
Rangkaian simulasi untuk pengambilan data kurva I-V dan kurva P-V dari modul PV referensi ditunjukkan pada Gambar 3.7. Pengujian rangkaian dilakukan dengan memberikan nilai masukan iradiasi dan suhu pada *block PV Array* yang pada model simulasi diberi nama Solar World SW50. Pengujian dan pengambilan data karakteristik PV dilakukan dalam dua tahap pengujian, yaitu yang pertama adalah dengan memvariasikan nilai iradiasi pada suhu konstan  $25^\circ\text{C}$ , kemudian yang kedua adalah dengan memvariasikan nilai suhu pada iradiasi konstan  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Tabel 3.4. Karakteristik modul PV SolarWorld Sunmodule SW50 pada *Standard Test Condition* ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ )

<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>
<i>Maximum power</i>	$P_{max}$	50 Wp
<i>Open circuit voltage</i>	$V_{oc}$	22,1 V



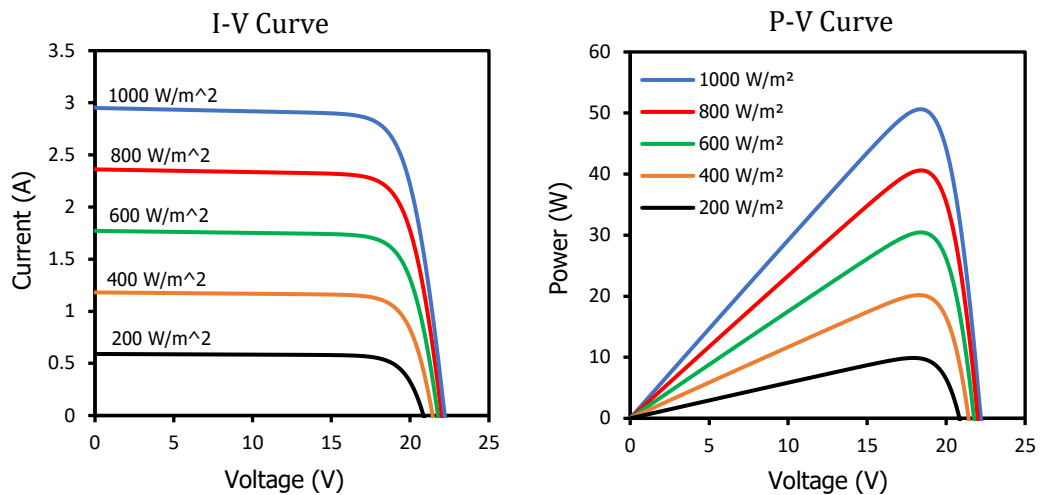
Maximum power point voltage	$V_{mpp}$	18,2 V
Short circuit current	$I_{sc}$	2,95 A
Maximum power point current	$I_{mpp}$	2,75 A
Temperature coefficient of $V_{oc}$	$TC V_{oc}$	-0,34%/K
Temperature coefficient of $I_{sc}$	$TC I_{sc}$	0,034%/K



Gambar 3.7. Rangkaian simulasi pengambilan data kurva I-V dan kurva P-V

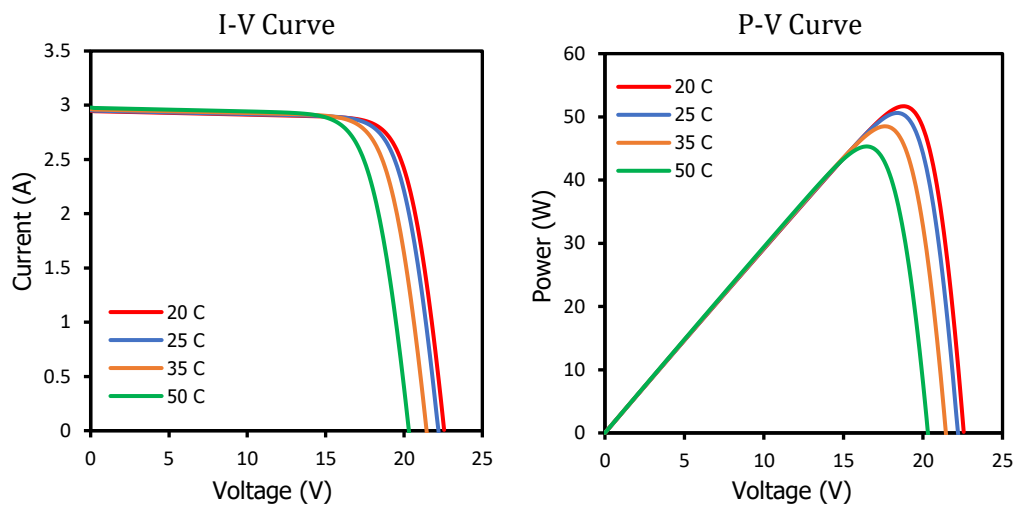
Pengambilan data arus, tegangan, dan daya keluaran dari *photovoltaic* dilakukan dengan memberikan masukan berupa nilai iradiasi dan suhu pada model *block PV array* dan juga dengan memberikan sumber tegangan pada terminal output *block PV array*. Keluaran *block PV array* adalah berupa nilai arus, tegangan, dan daya yang secara otomatis akan tersimpan pada *workspace* MATLAB. Nilai tegangan, arus, dan daya keluaran PV yang diperoleh merupakan karakteristik PV Sunmodule SW50 yang kemudian direpresentasikan menjadi kurva karakteristik PV menggunakan *chart* Microsoft Excel. Data tegangan, arus, dan daya keluaran yang diperoleh dilampirkan pada Lampiran A. Data tegangan, arus, dan daya yang diperoleh dari hasil simulasi ini digunakan sebagai data *look-up table* model PV.

Pada pengujian pertama, tingkat iradiasi divariasikan dengan nilai 200 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, dan 1000 W/m<sup>2</sup>, sedangkan suhu bernilai konstan 25°C sehingga diperoleh kurva I-V dan kurva P-V yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Kurva karakteristik *photovoltaic* Sunmodule SW50 untuk variasi nilai iradiasi pada suhu konstan 25°C

Pada pengujian kedua, nilai suhu divariasikan dengan nilai 20°C, 25°C, 35°C, dan 50°C, sedangkan iradiasi bernilai konstan 1000W/m<sup>2</sup> sehingga diperoleh kurva I-V dan kurva P-V yang ditunjukkan pada Gambar 3.9.

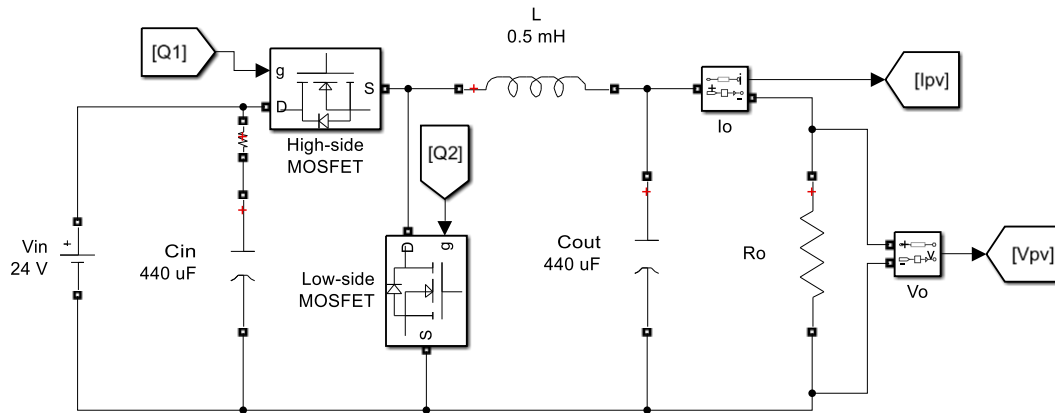


Gambar 3.9. Kurva karakteristik *photovoltaic* Sunmodule SW50 untuk variasi nilai suhu pada iradiasi konstan 1000 W/m<sup>2</sup>

### 3.6.2. Pemodelan *Synchronous Buck Converter*

Pemodelan rangkaian *synchronous buck converter* ditunjukkan pada Gambar 3.10. Komponen pada rangkaian *synchronous buck converter* terdiri dari kapasitor masukan ( $C_{in}$ ), *high-side* MOSFET (Q1), *low-side* MOSFET (Q2), induktor (L),

kapasitor keluaran ( $C_{out}$ ), dan beban resistif ( $R$ ). Nilai-nilai parameter dari setiap komponen untuk pemodelan ditunjukkan pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3.



Gambar 3.10. Rangkaian pemodelan simulasi *synchronous buck converter*

Parameter pemodelan *high-side* dan *low-side* MOSFET ditunjukkan pada Tabel 3.5. Parameter MOSFET yang dimodelkan pada simulasi mengikuti parameter MOSFET IRF3205.  $R_{DS(on)}$  maksimum dari MOSFET IRF3205 adalah  $0,12 \Omega$  yang diperoleh dari persamaan (3.9), *Internal diode forward voltage* ( $V_f$ ) sebesar  $1,3 \text{ V}$ , *body diode Continuous Source Current* ( $I_S$ ) adalah  $110 \text{ A}$ , dan nilai *internal diode resistance* ( $R_d$ ) diperoleh dari persamaan (3.10).

$$R_d = \frac{V_f}{I_S} \quad (3.10)$$

$$= \frac{110}{1,3}$$

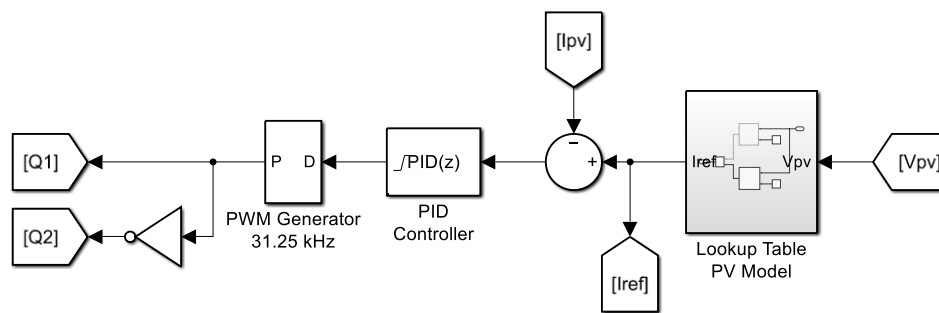
$$= 0,012 \Omega$$

Tabel 3.5. Parameter spesifikasi *high-side* dan *low-side* MOSFET model simulasi

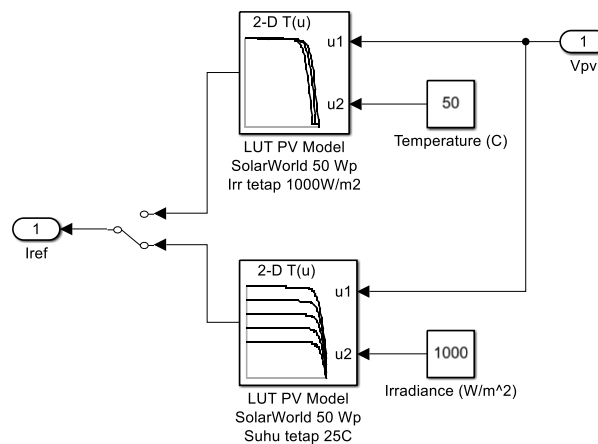
<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>
<i>Maximum drain-to-source on-Resistance</i>	$R_{DS(on)max}$	$0,12 \Omega$
<i>Internal diode resistance</i>	$R_d$	$0.012 \Omega$
<i>Internal diode forward voltage</i>	$V_f$	$1,3 \text{ V}$

### 3.6.3. Pemodelan Sistem Kendali Umpan Balik PV Emulator

Rangkaian pemodelan sistem kendali umpan balik PV emulator terdiri dari subsistem *Lookup table* PV model, *PID controller*, dan *PWM generator* yang ditunjukkan pada Gambar 3.11. Pada subsistem *Lookup table* PV model terdapat *manual switch* yang digunakan untuk memilih penggunaan jenis *lookup table* PV model yang akan disimulasikan. Terdapat dua model *lookup table*, yaitu yang pertama adalah perubahan iradiasi (200, 400, 600, 800, dan 1000 W/m<sup>2</sup>) pada suhu konstan 25°C dan yang kedua adalah perubahan suhu (20°C, 25°C, 35°C, dan 50°C) pada iradiasi konstan 1000 W/m<sup>2</sup>. Data *lookup table* dari PV model terlampir pada Lampiran A.



(a)



(b)

Gambar 3.11. Sistem umpan balik PV emulator: (a) Rangkaian sistem kendali umpan balik dan (b) Subsistem *Lookup Table* PV Model

PV emulator berbasis *synchronous buck converter* menghasilkan tegangan dan arus keluaran yang menyerupai karakteristik arus-tegangan (I-V) dari modul PV

sebenarnya. Pemodelan modul PV referensi dilakukan menggunakan blok *lookup table*, dimana *lookup table* berisi data karakteristik arus dan tegangan dari modul PV referensi, Sunmodule SW50.

Urutan kerja dari rangkaian sistem umpan balik PV emulator adalah sebagai berikut. Tegangan *output* ( $V_{out}$ ) dari *synchronous buck converter* diukur dan dijadikan sebagai *input* umpan balik. *Input* ini kemudian diproses oleh *lookup table* yang berfungsi sebagai model PV. *Lookup table* ini akan menghasilkan arus referensi ( $I_{ref}$ ) yang sesuai dengan karakteristik panel surya yang disimulasikan.

Selanjutnya, arus referensi ( $I_{ref}$ ) ini dibandingkan dengan arus *output* ( $I_{out}$ ) aktual yang dihasilkan oleh *synchronous buck converter*. Hasil perbandingan ini berupa sinyal *error*, yang mencerminkan selisih antara  $I_{ref}$  dan  $I_{out}$ . Sinyal *error* ini kemudian diproses oleh *PID controller*. Fungsi *PID controller* adalah untuk meminimalkan *error* tersebut dengan mengatur sinyal kontrol yang tepat.

*Output* dari *PID controller* kemudian dikirimkan ke *PWM generator*. *PWM generator* menghasilkan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) dengan frekuensi tertentu berdasarkan sinyal dari *PID controller*. Sinyal PWM ini digunakan untuk mengatur pensakelaran MOSFET Q1 dan Q2 pada *synchronous buck converter*. Melalui pensakelaran ini, tegangan dan arus *output* dari *converter* diatur sedemikian rupa sehingga sesuai dengan nilai referensi yang diinginkan.

*PID controller* yang dirancang pada rangkaian sistem kendali umpan balik *synchronous buck converter* ini menggunakan metode *tuning* model matematis yang persamaan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dari *PID controller* diperoleh dari persamaan (2.40), (2.41), dan (2.42). Berdasarkan Tabel 3.3, spesifikasi komponen dari *synchronous buck converter*, yaitu  $L = 0,5$  mH,  $C = 440$   $\mu$ F, dan diasumsikan beban maksimum yang digunakan adalah  $R = 200$   $\Omega$ . Sehingga diperoleh nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dari *PID controller* sebagai berikut.

$$K_p = \frac{L}{R} = \frac{0,5 \times 10^{-3}}{200} = 2,5 \times 10^{-6}$$

$$K_i = 1$$

$$K_d = LC = (0,5 \times 10^{-3}) \times (440 \times 10^{-6}) = 0,22 \times 10^{-6}$$

Nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang diperoleh masih memiliki respons sistem yang lambat, sehingga nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  tersebut harus dikalikan dengan suatu nilai *gain* tertentu agar memperoleh respons sistem yang baik. Berdasarkan hasil *fine tuning* yang dilakukan berdasarkan *trial and error*, diperoleh nilai gain untuk  $K_i$  adalah 10, serta nilai *gain* untuk  $K_p$  dan  $K_d$  adalah 1000. Sehingga nilai akhir dari parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  terakhir yang akan digunakan pada sistem adalah sebagai berikut.

$$K_p = (2,5 \times 10^{-6}) \times 1000 = 2,5 \times 10^{-3}$$

$$K_i = 1 \times 10 = 10$$

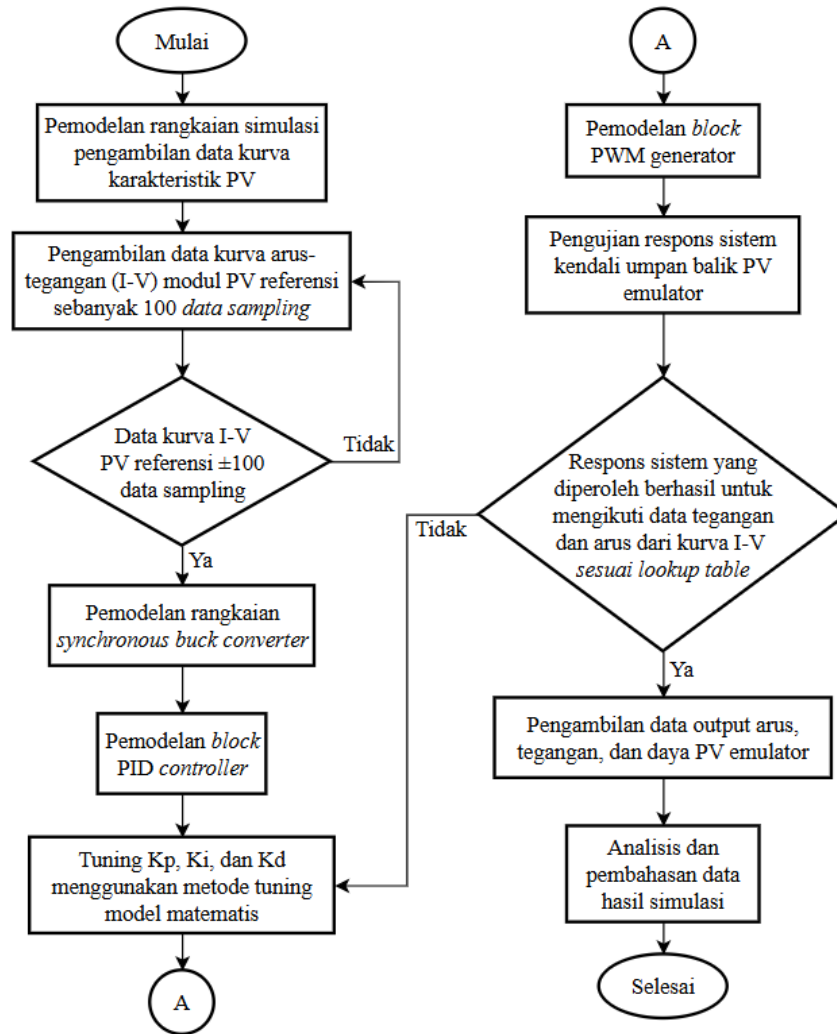
$$K_d = (0,22 \times 10^{-6}) \times 1000 = 2,2 \times 10^{-4}$$

Nilai parameter *PID controller* yang diatur, yaitu untuk konstanta gain proportional  $K_p = 2,5 \times 10^{-3}$ , konstanta gain integral  $K_i = 10$ , dan konstanta gain derivative  $K_d = 2,2 \times 10^{-4}$ . Pada *block PID controller* juga diatur untuk saturasi keluaran, yaitu *upper limit* sebesar 0,95 dan *lower limit* sebesar 0,01, serta metode *anti-windup* yang digunakan adalah *clamping method*. Frekuensi PWM generator diatur sebesar 31250 Hz yang menghasilkan keluaran berupa sinyal PWM untuk *switching* MOSFET Q1 dan Q2 dari rangkaian *synchronous buck converter*.

Tabel 3.6. Parameter pemodelan sistem umpan balik PV emulator

<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>
<i>Switching frequency</i>	$f_{sw}$	31250 Hz
<i>Proportional gain</i>	$K_p$	$2,5 \times 10^{-3}$
<i>Integral gain</i>	$K_i$	10
<i>Derivative gain</i>	$K_d$	$2,2 \times 10^{-4}$
<i>Upper limit output saturation</i>	—	0,95
<i>Lower limit output saturation</i>	—	0,01

*Flowchart* pemodelan dan simulasi dari sistem PV emulator yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 3.12 berikut.



Gambar 3.12. Flowchart pemodelan dan simulasi PV emulator

### 3.7. Perancangan Perangkat Keras PV Emulator

Pada sub-bab ini, akan dibahas mengenai proses perancangan perangkat keras dari setiap sub-sistem PV emulator berbasis *synchronous buck converter*. Sub-bab ini mencakup beberapa prosedur, mulai dari perancangan hingga realisasi fisik komponen-komponen yang membentuk PV emulator. Fokus utama bab ini adalah untuk memberikan gambaran detail mengenai bagaimana setiap bagian dari sistem dirancang dan diimplementasikan untuk memastikan kinerja yang optimal. Dimulai dengan pembangkitan sinyal PWM menggunakan mikrokontroler, perancangan dan pengujian *gate driver* MOSFET, pembuatan *synchronous buck converter*, perancangan dan pengujian sensor tegangan dan sensor arus, serta perancangan PID *controller*.

### 3.7.1. Pembangkitan dan Pengujian Sinyal PWM Mikrokontroler

Pada perancangan PV emulator berbasis *synchronous buck converter* ini, sinyal PWM yang digunakan untuk mengendalikan MOSFET IRF3205 dihasilkan oleh mikrokontroler Arduino. Arduino digunakan untuk membangkitkan dua sinyal PWM utama, yaitu PWMH (pada pin D10) dan PWML (pada pin D9). Skematik mikrokontroler Arduino pada perangkat keras PV emulator ini ditunjukkan pada Gambar 3.13. Untuk memastikan operasi *switching* yang aman dan menghindari kondisi *short circuit* yang dapat merusak komponen, diterapkan *dead-time* antara kedua sinyal PWM tersebut yang diperoleh dari persamaan (2.32).

$$\begin{aligned} t_{dead(\min)} &= t_{d(on)HS} + t_{d(off)LS} + t_{on-GD} + 50ns \\ &= 14ns + 50ns + 120ns + 50ns \\ &= 234 ns \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, diperoleh nilai *dead-time* minimum dari sinyal PWM adalah sebesar 234 ns. Pada mikrokontroler Arduino, satu *cycle* dari sinyal PWM-nya adalah sebesar 62,5 ns ( $T = \frac{1}{16}$  MHz), sehingga *dead-time* yang akan diterapkan pada sistem PV emulator berbasis *synchronous buck converter* ini adalah sebesar 250 ns atau empat *cycle* sinyal PWM Arduino. Untuk membangkitkan sinyal PWM dari mikrokontroler arduino dengan parameter yang telah dirancang, digunakan kode pemrograman berikut.

```
const byte lowSide_pwm = 9;    // PB1 OC1A D9 - PWML
const byte highSide_pwm = 10; // PB2 OC1B D10 - PWMH

const long fXTAL = 16000000; // crystal oscillator frequency
const int fPWM = 31250;      // fMax = 31250 Hz
const int icr = ((fXTAL / fPWM) / 2); // icr = 256 (D_max = 255)
const int deadTime = 4;      // deadTime = 62.5ns*4 = 250ns
volatile int dutyOn = icr * 0.1;

void setup() {
  pinMode(lowSide_pwm, OUTPUT);
  pinMode(highSide_pwm, OUTPUT);

  TCCR1A = 0b10110000; // OC1A & OC1B enable
  TCCR1B = 0b00010001; // WGM1 3:2 = 10 (Waveform Generation Mode
                        // 8), CS1 2:0 = 001 (no prescale)
  ICR1 = icr;          // Counter TOP value.
  OCR1B = icr - dutyOn;
```



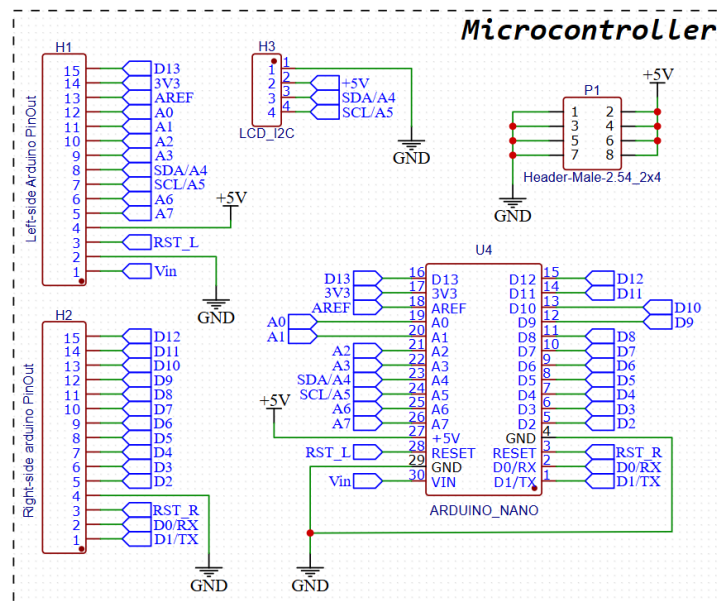
```

OCR1A = icr - dutyOn - deadTime;
}

void loop() {
  dutyOn = 127;           // 50% duty cycle
}

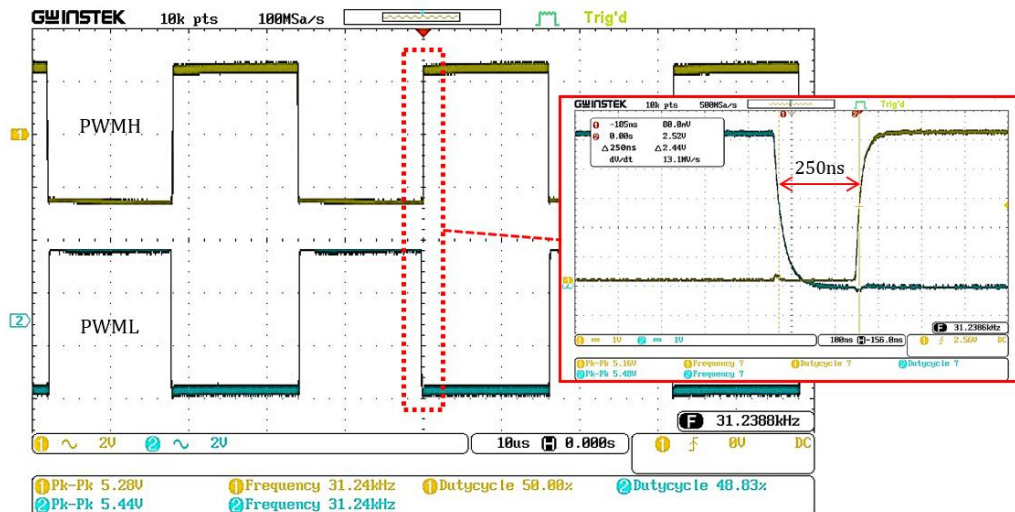
ISR(TIMER1_OVF_vect) { // Interrupt Service Routine
  int temp = icr - dutyOn;
  OCR1A = temp - deadTime;
  OCR1B = temp;
}

```



Gambar 3.13. Skematik rangkaian mikrokontroler Arduino Nano PV emulator

Pada Gambar 3.14, ditunjukkan hasil pengamatan sinyal PWMH dan PWML yang dihasilkan oleh mikrokontroler Arduino menggunakan osiloskop. Sinyal PWM yang dibangkitkan oleh Arduino untuk PWMH dan PWML adalah sekitar 5 V. Kedua sinyal PWM ini memiliki frekuensi sekitar 31,25 kHz. Terdapat *dead-time* sebesar 250 ns antara kedua sinyal PWM tersebut, seperti yang ditunjukkan dalam gambar tersebut. *Dead-time* memastikan bahwa tidak terjadi *overlap* saat kedua MOSFET *high-side* dan *low-side* pada *synchronous buck converter* diaktifkan, sehingga mencegah terjadinya kondisi *short circuit* yang dapat merusak komponen. *Dead-time* memastikan bahwa hanya satu MOSFET yang aktif pada satu waktu. Hasil pengamatan ini menunjukkan bahwa sinyal PWM yang dihasilkan oleh Arduino sesuai dengan perancangan dan mampu memenuhi kebutuhan kontrol dalam PV emulator berbasis *synchronous buck converter*.

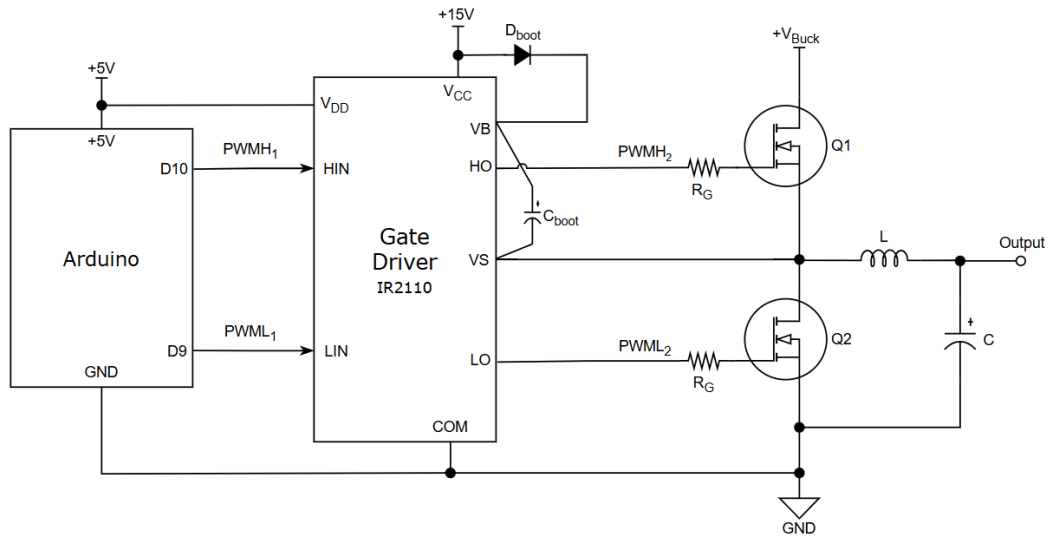


Gambar 3.14. Sinyal PWM mikrokontroler dengan *dead-time*

### 3.7.2. Perancangan MOSFET *Gate Driver* IR2110

Rangkaian *gate driver* digunakan untuk menghubungkan antara mikrokontroler dengan rangkaian *synchronous buck converter*. Rangkaian *gate driver* diperlukan karena sinyal PWM yang dihasilkan mikrokontroler hanya memiliki tegangan sebesar 5 volt, yang mana belum cukup untuk membuat MOSFET bekerja. Rangkaian *gate driver* IR2110 yang digunakan akan meningkatkan tegangan sinyal PWM dari 5 volt menjadi 15 volt agar MOSFET dapat bekerja. Diagram blok rangkaian *gate driver* IR2110 ditunjukkan pada Gambar 3.15.

IC IR110 merupakan *gate driver* tipe *non-isolated*, yang berarti bahwa *ground* dari rangkaian mikrokontroler dan *ground* dari rangkaian daya saling terhubung. IC IR2110 bekerja dengan metode bootstrap, sehingga membutuhkan rangkaian *bootstrap* (dioda dan kapasitor *bootstrap*) untuk dapat mengoperasikan MOSFET. *Logic supply* ( $V_{DD}$ ) menggunakan tegangan sebesar 5 volt menyamakan dengan tegangan *logic* dari mikrokontroler. Sedangkan  $V_{CC}$  (*low-side supply*) menggunakan tegangan 15 volt sebagai *gate voltage* ( $V_{GS}$ ), dimana  $V_{GS}$  harus lebih besar dari tegangan *threshold* ( $V_{th}$ ) MOSFET IRF3205, yaitu  $V_{th} = 4$  V, serta harus lebih besar dari *drive voltage* sebesar 10 V agar MOSFET dapat bekerja dengan maksimal sesuai dengan speifikasinya.



Gambar 3.15. Diagram blok rangkaian *gate driver* IR2110

Perancangan *gate driver* IR2110 yang akan menjadi driver untuk MOSFET IRF3205 adalah untuk merancang nilai *bootstrap capacitor* ( $C_{boot}$ ) dan dioda *bootstrap*. Dioda *bootstrap* harus memiliki tegangan maju ( $V_f$ ) rendah dan waktu pemulihan ( $t_{rr}$ ) cepat untuk memastikan efisiensi pengisian dan pengosongan yang tinggi, sehingga dioda dioda *fast recovery* FR107. Perhitungan nilai *bootstrap capacitor* ini berdasarkan “*Design Tip DT 98-2a: Bootstrap Component Selection For Control IC’s*” dan “*Design Tip DT 04-4: Using Monolithic High Voltage Gate Driver*”.

Nilai kapasitor bootstrap dapat dihitung menggunakan persamaan (3.11) berikut.

$$C \geq \frac{2 \left[ 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{CC} - V_f - V_{LS} - V_{Min}} \quad (3.11)$$

Dimana:

$Q_g$  : *Gate charge of high-side FET*

$I_{qbs(max)}$  : *Maximum quiescent current for the high-side driver*

$Q_{ls}$  : *level shift charge required per cycle = 5 nC (500 V/600 V IC’s)*

$I_{Cbs(leak)}$  : *Bootstrap capacitor leakage current*

$f$  : *Frequency of operation*

$V_{CC}$  : *Supply voltage*

$V_f$  : *Forward voltage drop across the bootstrap diode*

$V_{LS}$  : Voltage drop across the low side FET

$V_{Min} = V_{BSUV-}$  : Minimum voltage between VB and VS

Parameter yang digunakan untuk perhitungan nilai bootstrap capacitor menggunakan nilai-nilai yang diperoleh dari datasheet MOSFET IRF3205, IC IR2110, dan dioda FR107. Nilai-nilai parameter tersebut terdapat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7. Nilai parameter-parameter perancangan *bootstrap capacitor*

<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>
<i>Gate charge (IRF3205)</i>	$Q_g$	146 nC
<i>Quiescent current (IR2110)</i>	$I_{qbs}$	230 $\mu$ A
<i>Bootstrap capacitor leakage current (capXon capacitor)</i>	$I_{cbs}$	3 $\mu$ A
<i>Level shift charge per cycle (IR2110)</i>	$Q_{ls}$	5 nC
<i>Frequency of operation</i>	$f$	31250 Hz
<i>Supply voltage</i>	$V_{cc}$	15 V
<i>Forward voltage drop across the bootstrap diode (FR107)</i>	$V_f$	1.3 V
<i>Voltage drop across the low side FET (IRF3205)</i>	$V_{LS}$	0.5 V
<i>Minimum voltage between VB and VS (IR2110)</i>	$V_{BSUV-}$	9.5 V

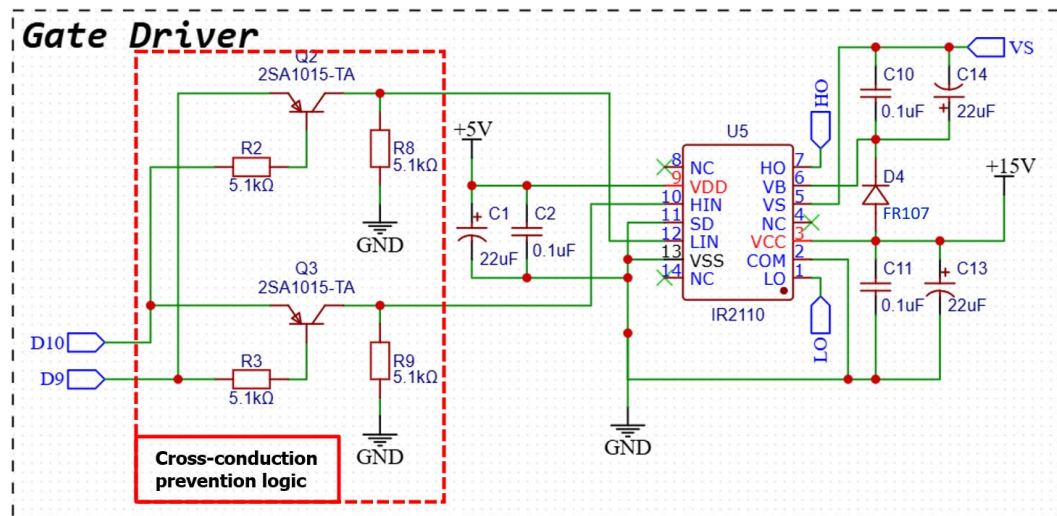
Dengan menggunakan persamaan (3.11), diperoleh nilai kapasitor *bootstrap* dengan nilai:

$$C \geq \frac{2 \left[ 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f} \right]}{V_{CC} - V_f - V_{LS} - V_{Min}}$$

$$C \geq \frac{2 \left[ 2(146 \times 10^{-9}) + \frac{230 \times 10^{-6}}{31250} + 5 \times 10^{-9} + \frac{3 \times 10^{-3}}{31250} \right]}{15 - 1.3 - 0.5 - 9.5}$$

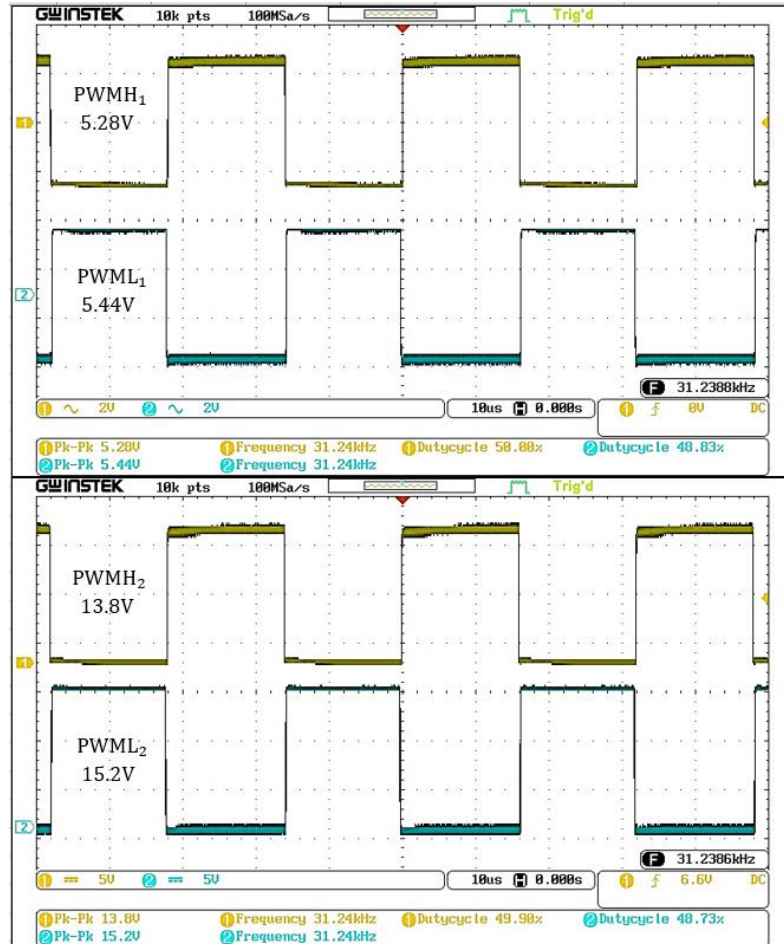
$$C \geq 164,57 \text{ nF}$$

Berdasarkan perhitungan diatas, diperoleh nilai minimum kapasitor *bootstrap* sebesar  $C \geq 164,57$  nF. Dikarenakan nilai kapasitor tersebut merupakan nilai minimum yang disyaratkan, dimana jika menggunakan nilai minimum dapat menyebabkan overcharging yang dapat merusak IC IR2110, maka nilai minimum tersebut harus dikalikan dengan faktor 15 (*rule of thumb*), sehingga diperoleh nilai  $C \geq 2.46$   $\mu$ F. Pada penelitian ini digunakan nilai capacitor bootstrap sebesar 22  $\mu$ F. Skematik rangkaian *gate driver* PV emulator ditunjukkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16. Skematik diagram rangkaian *gate driver* PV emulator

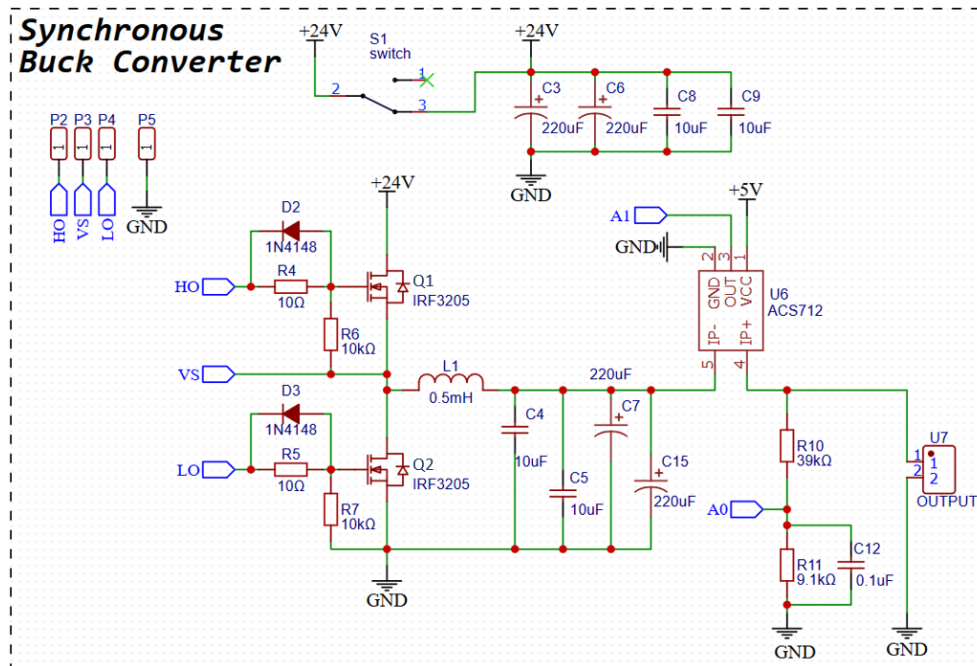
Sinyal  $PWMH_1$  dan  $PWML_1$  dari mikrokontroler memiliki tegangan sekitar 5 volt yang kemudian tegangannya akan ditingkatkan oleh *gate driver* menjadi sinyal  $PWMH_2$  dan  $PWML_2$  dengan tegangan 15 volt. Sinyal  $PWMH_2$  dan  $PWML_2$  berkebalikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.17. Terdapat rangkaian proteksi tambahan pada rangkaian *gate driver* PV emulator, yaitu rangkaian *cross-conduction prevention logic* yang berfungsi untuk menghindari kondisi *shoot-through*, di mana kedua MOSFET *high-side* (Q1) dan *low-side* (Q2) aktif secara bersamaan.



Gambar 3.17. Sinyal PWM *gate driver*

### 3.7.3. Perancangan Perangkat Keras *Synchronous Buck Converter*

Perancangan parameter untuk komponen *synchronous buck converter* telah dilakukan pada sub-bab sebelumnya, parameter-parameter tersebut dapat ditemukan pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3. Skematik diagram *synchronous buck converter* ditunjukkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.18. Skematik diagram *synchronous buck converter*

Rangkaian perangkat keras *synchronous buck converter* terdiri dari kapasitor input sebesar  $2 \times 220 \mu\text{F}$ , MOSFET dengan tipe IRF3205, Induktor sebesar 0,5 mH, dan kapasitor output sebesar  $2 \times 220 \mu\text{F}$ . Pada sisi *input* dan *output* juga ditambahkan komponen *multilayer capacitor ceramic* (MLCC) sebesar  $2 \times 10 \mu\text{F}$  untuk memperkecil nilai ESR, nilai ini diperoleh berdasarkan *rule of thumb*. Kemudian terdapat  $R_G$  (*gate resistor*) yang diparalelkan dengan dioda zener, serta  $R_{GS}$  (*pull down resistor*) berfungsi untuk men-*discharge* muatan yang terbentuk oleh efek parasitik kapasitansi  $C_{GD}$  akibat proses *switching*, dimana nilai dari komponen-komponen tersebut dirancang berdasarkan *rule of thumb* juga. Selain itu, pada rangkaian *synchronous buck converter* terdapat rangkaian sensor tegangan dan arus yang berfungsi untuk sistem kendali umpan balik PV emulator.

#### 3.7.4. Perancangan dan Pengujian Sensor Tegangan serta Sensor Arus

Pembagi tegangan resistif digunakan untuk mengukur tegangan pada sisi keluaran *synchronous buck converter*. Dikarenakan tegangan yang masuk ke ADC *microcontroller* tidak dapat melebihi dari 5 volt, maka dilakukan pencarian nilai resistansi yang sesuai. Persamaannya adalah sebagai berikut:

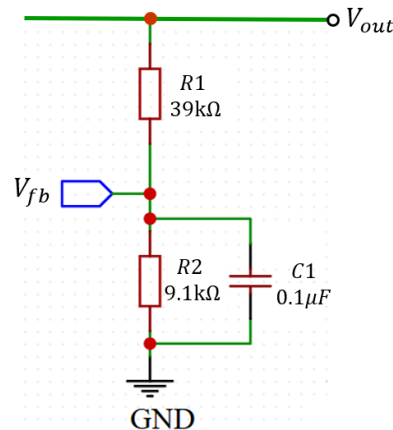
$$V_{ADC} = V_{out} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.12)$$

Tegangan keluaran maksimal yang dapat dihasilkan rangkaian *synchronous buck converter* ini adalah sama dengan tegangan keluaran, yaitu 24 volt dan agar lebih aman bagi *microcontroller*, maka nilai tegangan keluaran sebesar 24 volt tersebut akan dikalikan dengan faktor 1,1 atau 110% lebih besar dari tegangan input dan diperoleh nilai 26,4 volt. Untuk mempermudah perhitungan, nilai  $R_2$  ditetapkan sebesar  $9k1 \Omega$ , sehingga perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$5 V = 26.4 V \times \frac{9k1 \Omega}{R_1 + 9k1 \Omega}$$

$$R_1 = 38.948 \Omega$$

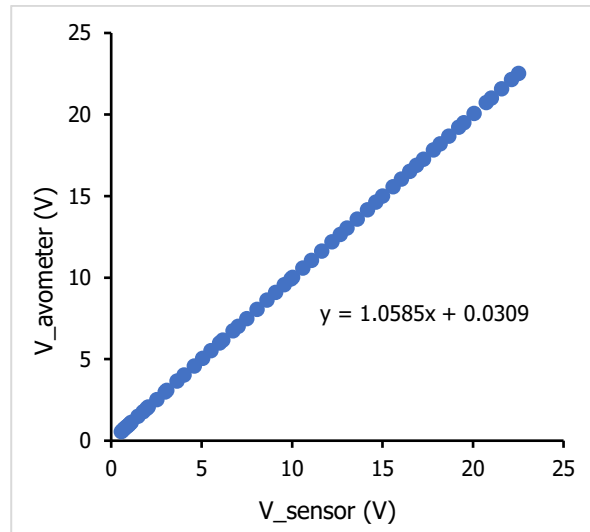
Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai  $R_1$  sebesar  $38.948 \Omega$  dan untuk menyesuaikan nilai yang ada di pasaran, maka nilai resistor  $R_1$  yang digunakan adalah sebesar  $39k \Omega$  dan  $R_2$  sebesar  $9k1 \Omega$ , seperti yang terlihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19. Rangkaian sensor tegangan

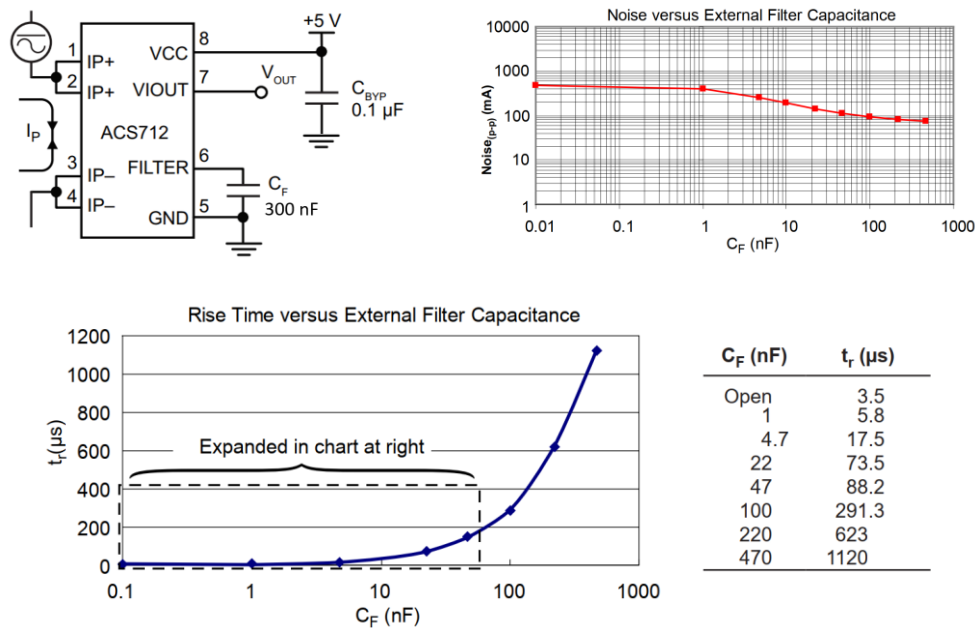
Sebelum dilakukan pengambilan data hasil pengujian, dilakukan proses kalibrasi dari sensor tegangan terlebih dahulu, sehingga diperoleh nilai ukur tegangan yang baik. Tabel hasil pengujian sensor tegangan dilampirkan pada Lampiran B. Pengujian sensor dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan dari avometer dan sensor tegangan sehingga diperoleh nilai error dan persamaan regresi linier  $y = 0,999x + 0,002$ , seperti yang terlihat pada Gambar 3.20. Persamaan regresi linier tersebut digunakan untuk menyesuaikan keluaran sensor tegangan agar nilainya mendekati nilai alat ukur. Berdasarkan hasil pengujian sensor tegangan, diperoleh nilai rata-rata *error* sebesar 0,221%.





Gambar 3.20. Grafik hasil pengujian sensor tegangan

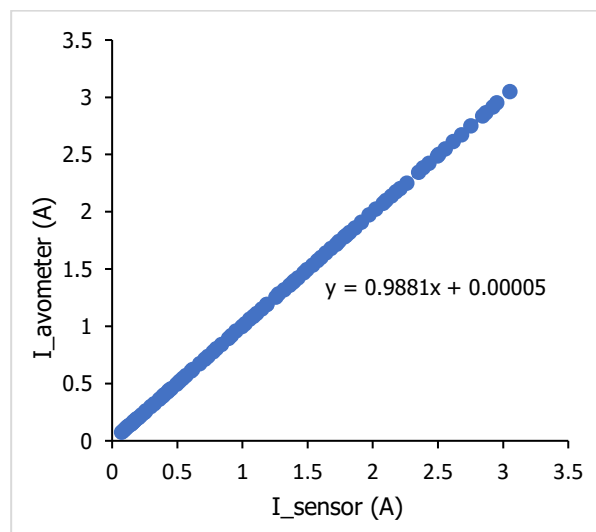
Sensor arus yang digunakan adalah sensor ACS712-05B dengan rating arus maksimum yang dapat diukur adalah sebesar  $\pm 5$  A. Sensor ini bekerja dengan memanfaatkan *Hall-effect* yang dapat digunakan baik untuk arus DC dan juga arus AC. Keluaran dari sensor ini dalam bentuk tegangan yang akan menuju ke pin ADC dari Arduino. Sensitivitas dari sensor ACS712-05B adalah 185 mV/A, dimana setiap kenaikan arus 1 A maka tegangan yang keluar bertambah 185 mV.



Gambar 3.21. Rangkaian sensor arus dan diagram pengaruh filter eksternal terhadap performa sensor ACS712

Saat proses kalibrasi sensor arus, *output* yang terbaca memiliki *noise* yang cukup signifikan, sehingga diperlukan filter eksternal yang mampu meredam *noise* tersebut. Pada awalnya, sensor ACS712 menggunakan filter eksternal bawaan berupa kapasitor keramik sebesar 1 nF, nilai kapasitor ini sangat kecil dan belum dapat meredam *noise* dengan baik, sehingga kemudian ditambahkan kapasitor keramik sebesar 300 nF untuk meningkatkan performa dan meredam *noise* dari sensor ini. Gambar 3.21 menunjukkan Rangkaian sensor arus dan diagram pengaruh filter eksternal terhadap performa sensor ACS712.

Pengujian sensor arus dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran dari avometer dan sensor ACS712, sehingga diperoleh nilai error serta diperoleh nilai persamaan regresi linier dari sensor arus ini, yaitu  $y = 0,997 + 0,0025x$ , seperti yang terlihat pada Gambar 3.22. Tabel hasil pengujian sensor arus dilampirkan pada Lampiran B. Berdasarkan hasil pengujian sensor arus, diperoleh nilai rata-rata *error* sebesar 0,387%.



Gambar 3.22. Grafik hasil pengujian sensor arus ACS712-05B

Nilai persamaan regresi linier yang diperoleh dari pengujian sensor tegangan dan arus dimasukkan ke dalam pemrograman Arduino Nano yang bertujuan untuk memperoleh hasil pembacaan yang akurat. Berikut adalah kode pemrograman yang digunakan untuk pembacaan nilai sensor tegangan dan arus dari rangkaian PV emulator berbasis *synchronous buck converter*.

```

void read_adc() {
  for (int i = 0; i < Iiter; i++) {
    Vadc += (5.0 / 1023.0) * analogRead(sensVolt_Pin);
    Iadc += (analogRead(sensAmp_Pin) - 515.3); // choose from 510 to
                                               516 to get precise value of 0Amp
  }
  Vadc = Vadc / Iiter;
  Iadc = Iadc / Iiter;
}

void read_Sensor() {
  read_adc();
  Vout = ((9100 + 39000) / 9100) * Vadc; // R1 = 39k , R2 = 9k1
  if (Vadc == 0.0) {
    Vout = 0.0;
  } else {
    Vout = (1.0585 * Vout) + 0.0309; // linear regression
  }

  Iout = Iadc * 27.03 / 1023; // ACS712-5ampere
  Iout = (Iout + lastAmps) / 2;
  lastAmps = Iout;
  Iout = (Iout * 0.9881) - 0.00005; // linear regression
}

```

### 3.7.5. Perancangan PID Controller

Nilai konstanta parameter PID *controller* yang dirancang pada perangkat keras nilainya berbeda dari perancangan PID *controller* pada simulasi. Perancangan PID *controller* pada perangkat keras dilakukan dengan menggunakan metode penalaan *trial and error*. Penalaan PID *controller* dilakukan dengan beberapa langkah, yaitu:

1. Menggunakan awalan nilai parameter konstanta Kp, Ki, dan Kd yang telah diperoleh melalui simulasi.
2. Jika *rise time* masih terlalu lama, maka tingkatkan nilai Kp dan Ki untuk mempercepat *rise time*.
3. Turunkan nilai Kp dan Ki jika *overshoot* meningkat dan naikkan nilai Kd secara bertahap hingga *overshoot* berkurang.
4. Jika respons sistem yang diperoleh masih belum baik, maka dilakukan proses tuning kembali hingga diperoleh respons sistem yang diinginkan.

Setelah dilakukan proses penalaan, nilai parameter PID *controller* yang diperoleh adalah Kp = 3,5, Ki = 40, dan Kd = 0,13. Nilai *duty cycle* dibatasi dari 0% s.d. 95%. Tabel 3.8 memuat parameter PID *controller* dari perangkat keras PV

emulator. Pada pengaplikasiannya, digunakan library “QuickPID” pada pemrograman Arduino sebagai sistem pengendali PID.

Tabel 3.8. Parameter PID *controller* perangkat keras PV emulator

<i>Parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Value</i>
<i>Proportional gain</i>	<i>Kp</i>	3,5
<i>Integral gain</i>	<i>Ki</i>	40
<i>Derivative gain</i>	<i>Kd</i>	0,13
<i>Upper limit output saturation</i>	–	0,95
<i>Lower limit output saturation</i>	–	0,01

```
#include <QuickPID.h>

float Kp = 3.5, Ki = 40, Kd = 0.3;

QuickPID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd,
               myPID.pMode::pOnError,          /* pOnError, pOnMeas,
                                                pOnErrorMeas */
               myPID.dMode::dOnMeas,          /* dOnError, dOnMeas */
               myPID.iAwMode::iAwClamp,       /* iAwCondition,
                                                iAwClamp, iAwOff */
               myPID.Action::direct           /* direct, reverse */)

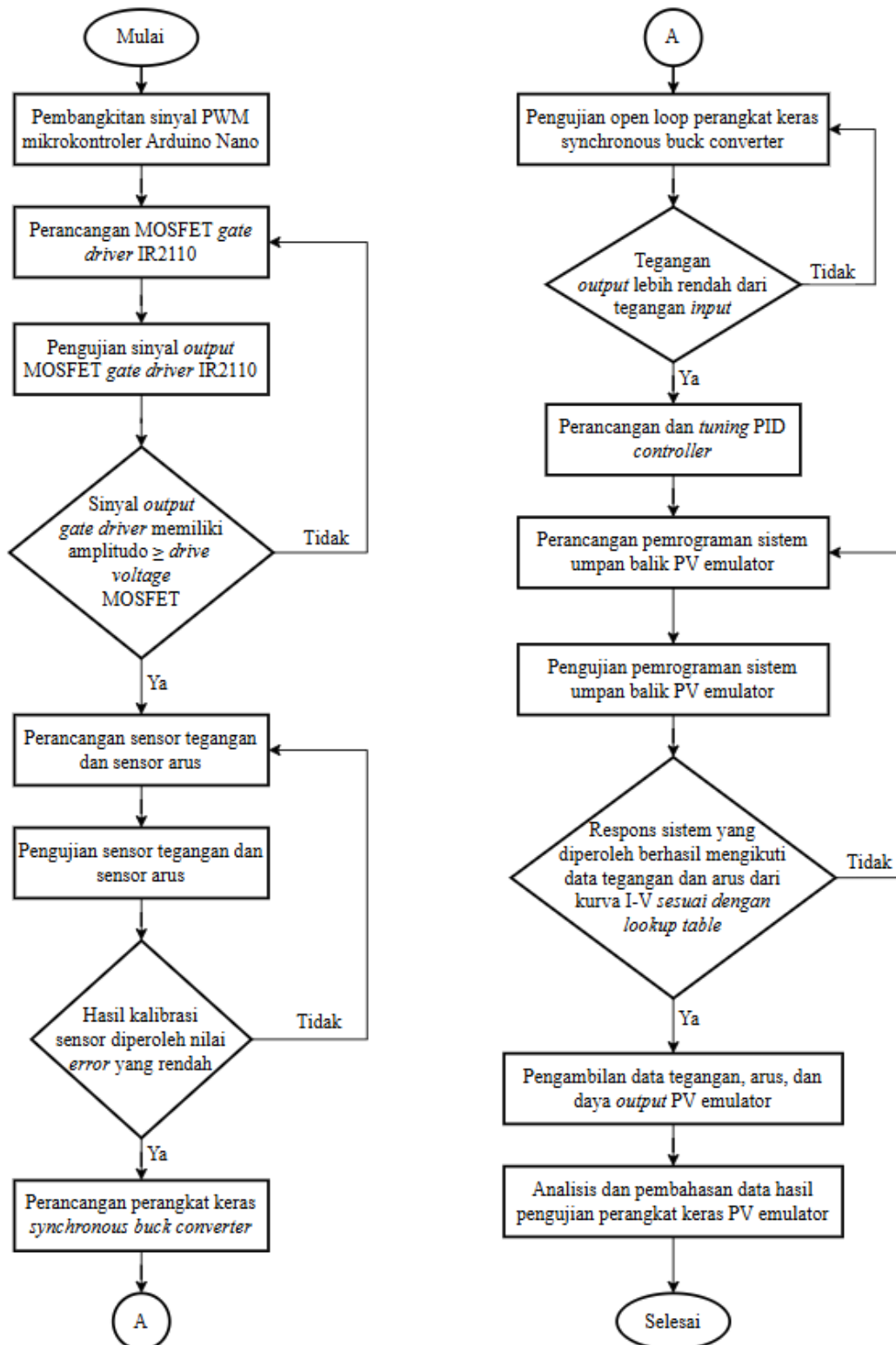
void setup ()
  //initialize the variables we're linked to
  Input = Iout;

  //turn the PID on
  myPID.SetMode(myPID.Control::automatic);
  myPID.SetOutputLimits(0, 243); // 0 - 95% pwm

void loop()
  Setpoint = ipvValue;
  Input = Iout;

  myPID.SetTunings(Kp, Ki, Kd);
  myPID.Compute();
```

Setelah semua komponen maupun pemrograman sistem mikrokontroler Arduino telah selesai dirancang, dilakukan analisis dari hasil simulasi dan pengujian perangkat keras PV emulator berbasis synchronous buck converter. *Flowchart* perancangan perangkat keras PV emulator ditunjukkan pada Gambar 3.23.



Gambar 3.23. Flowchart perancangan sistem perangkat keras PV emulator

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian perangkat keras PV emulator berbasis *synchronous buck converter* menggunakan mikrokontroler yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. PV emulator berbasis *synchronous buck converter* yang dirancang memiliki performa yang baik dalam meniru karakteristik daya keluaran modul PV referensi. Pada pengujian STC (1000 W/m<sup>2</sup> dan 25°C), rata-rata *error* yang diperoleh untuk  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ , dan  $P_{mp}$  masing-masing adalah 2,3%, 0,98%, dan 1,38%. Selain itu, rangkaian PV emulator memiliki efisiensi rata-rata sebesar 86,2% dengan efisiensi tertinggi sebesar 94,73% pada pengujian dengan beban 51,8  $\Omega$ .
2. Respons sistem PV emulator menunjukkan kinerja yang bervariasi dalam hal stabilitas dan osilasi. Pada daerah operasi *Constant Current Region* (CCR) dan daerah *Maximum Power Point* (MPP), sistem menunjukkan respons yang cepat dan stabil. Ketidakstabilan tegangan keluaran ( $V_{out}$ ) menyebabkan sinyal arus referensi ( $I_{ref}$ ) menjadi berosilasi pada daerah *Constant Voltage Region* (CVR) akibat dari *lookup table* yang digunakan memiliki *data sampling* yang sedikit, yaitu hanya 101 *data sampling*.
3. PV emulator yang dirancang memiliki respons yang cepat dan stabil dengan *settling time* yang cepat pada simulasi, tetapi pada pengujian perangkat keras *settling time*-nya lebih lama. *Settling time* sistem PV emulator bervariasi tergantung pada nilai beban dan daerah operasi yang diuji. Rata-rata *settling time* hasil simulasi adalah 0,07 detik, sedangkan rata-rata *settling time* hasil pengujian perangkat keras adalah 9,3 detik.

## 5.2. Saran

Berdasarkan keterbatasan penelitian, terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan terhadap pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Meningkatkan jumlah data sampling arus dan tegangan dalam *lookup table* yang digunakan dapat memperbaiki akurasi simulasi dan pengujian. Dengan data yang lebih detail, PV emulator dapat meniru karakteristik panel surya dengan lebih presisi, sehingga hasil pengujian mendekati kondisi operasional yang sebenarnya.
2. Selain kontrol arus yang sudah digunakan, implementasi kontrol tegangan ataupun kontrol *hybrid* yang mengombinasikan kontrol arus dan tegangan dapat dipertimbangkan.
3. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan untuk meniru PV dengan rating daya yang lebih besar dan juga untuk menguji rangkaian *maximum power point tracking* (MPPT).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Strielkowski, L. Civín, E. Tarkhanova, M. Tvaronavičienė, and Y. Petrenko, “Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review,” *Energies*, vol. 14, no. 24, p. 8240, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14248240.
- [2] A. Sa’diah and Sudarti, “Analisis manfaat dan kendala pemakaian energi solar cell sebagai teknologi tepat guna di lingkungan masyarakat,” *KACANEGARA J. Pengabd. pada Masy.*, vol. 6, no. 1, pp. 115–122, 2023, doi: 10.28989/kacanegara.v6i1.1255.
- [3] N. Safitri, T. Rihayat, and S. Riskina, *Teknologi Photovoltaic*, 1st ed., no. 1. Banda Aceh: Yayasan Puga Aceh Riset, 2019.
- [4] M. Woodhouse *et al.*, “Research and Development Priorities to Advance Solar Photovoltaic Lifecycle Costs and Performance,” 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/24/8240>.
- [5] D. M. Atia, A. A. Hassan, H. T. El Madany, A. Y. Eliwa, and M. B. Zahran, “Degradation and energy performance evaluation of mono - crystalline photovoltaic modules in Egypt,” *Sci. Rep.*, vol. 13, pp. 1–16, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-40168-8.
- [6] I. D. G. Jayawardana, C. N. M. Ho, M. Pokharel, and G. E. Valderrama, “A Fast-Dynamic Control Scheme for a Power-Electronics-Based PV Emulator,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 11, no. 2, pp. 485–495, 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3041188.
- [7] H. A. A. Khawaldeh, “Design of Efficient, Fast and Accurate Emulators for Photovoltaic Systems,” University of Technology Sydney, 2022.



- [8] I. Moussa, A. Khedher, and A. Bouallegue, "Design of a Low-Cost PV Emulator Applied for PVECS," *Electronics*, vol. 8, no. 232, pp. 1–15, 2019, doi: 10.3390/electronics8020232.
- [9] H. A. Khawaldeh, M. Al-soeidat, D. D. Lu, and L. Li, "Simple and Fast Dynamic Photovoltaic Emulator based on a Physical Equivalent PV-cell Model," *J. Eng.*, vol. 2021, no. February, pp. 276–285, 2021, doi: 10.1049/tje2.12032.
- [10] A. S. Samosir, H. Gusmedi, S. R. Purwiyanti, and A. F. Huda, "Modeling and Simulation of Buck Converter-Based PV Emulator," in *2023 International Conference on Converging Technology in Electrical and Information Engineering (ICCTEIE)*, 2023, pp. 27–31, doi: 10.1109/ICCTEIE60099.2023.10366746.
- [11] E. Roza and M. Mujirudin, "Perancangan Pembangkit Tenaga Surya Fakultas Teknik Uhamka," *JKTE UTA '45 Jakarta*, vol. 4, no. 1, pp. 16–30, 2019.
- [12] M. K. S. Al-Ghezi, R. T. Ahmed, and M. T. Chaichan, "The Influence of Temperature and Irradiance on Performance of the Photovoltaic Panel in the Middle of Iraq," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 11, no. 2, pp. 501–513, 2022, doi: 10.14710/ijred.2022.43713.
- [13] Sameera, M. Tariq, and M. Rihan, "Analysis of The Impact of Irradiance, Temperature and Tilt Angle on The Performance of Grid-Connected Solar Power Plant," *Meas. Energy*, vol. 2, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1016/j.meae.2024.100007.
- [14] F. Shaik, S. S. Lingala, and P. Veeraboina, "Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: a review and the experimental study," *Sustain. Energy Res.*, vol. 10, no. 6, pp. 1–23, 2023, doi: 10.1186/s40807-023-00076-x.
- [15] A. H. T. Le, A. Srinivasa, S. G. Bowden, Z. Hameiri, and A. Augusto, "Temperature and illumination dependence of silicon heterojunction solar cells with a wide range of wafer resistivities," *Prog Photovolt Res Appl.*

- 2023, vol. 31, no. 5, pp. 536–545, 2023, doi: 10.1002/pip.3657.
- [16] H. H. Ammar, M. I. Mahmoud, A. Taher, and R. Shalaby, “An Efficient Design and Control Techniques of Photo-Voltaic Pumping System (PVPS),” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 48, no. 11, pp. 14865–14882, 2023, doi: 10.1007/s13369-023-07861-2.
- [17] B. Mirafzal, *Power Electronics in Energy Conversion System*, 1st ed. New York: McGraw-Hill, 2022.
- [18] A. S. Samosir, T. Sutikno, and L. Mardiyah, “Simple formula for designing the PID controller of a DC-DC buck converter,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 327–336, 2023, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i1.pp327-336.
- [19] A. X. Svensson, “Investigation of switching power losses of SiC MOSFET used in a DC / DC Buck converter Investigation of switching power losses of SiC MOSFET used in a DC / DC Buck converter,” KTH Royal Institute of Technology, 2022.
- [20] H. Wang, J. Guo, J. Gong, J. Chen, and S. Zhang, “The Impact of Dead-time on Synchronous Rectification Circuit Efficiency,” vol. 89, no. Wenme, pp. 125–128, 2019, doi: 10.2991/wcnme-19.2019.29.
- [21] L. K. Fong, M. S. Islam, and M. A. Ahmad, “Optimized PID Controller of DC-DC Buck Converter based on Archimedes Optimization Algorithm,” *Int. J. Robot. Control Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 658–672, 2023, doi: 10.31763/ijrcs.v3i4.1113.
- [22] L. Mardiyah, “Desain dan Simulasi Sistem Pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID) Pada Boost Converter,” Universitas Lampung, 2022.
- [23] H. Shayeghi and A. Younesi, “Fuzzy PID Control of Microgrids,” in *Microgrid Architectures, Control and Protection Methods*, 1st ed., Ardabil: Springer Nature Switzerland AG, 2020, pp. 555–575.
- [24] R. Ayop, C. W. Tan, and B. A. Lawan, “Simple and Fast Computation

- Photovoltaic Emulator Using Shift Controller,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 14, no. 11, pp. 2017–2026, 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.1504.
- [25] K. S. Budi, S. Muslim, and A. B. Santosa, “Literature Study on the Influence of Arduino Microcontroller Trainer Media on Creative Thinking Level and Student Learning Outcomes in Microcontroller Learning,” in *International Symposium on Social Sciences, Education, and Humanities*, 2019, pp. 90–94.
- [26] Arduino, “Arduino Nano Datasheet.” pp. 1–13, 2023.
- [27] K. Fathoni, E. Apriaskar, N. A. Salim, V. N. Sulistyawan, R. L. Satria, and S. Hidayat, “Design of Brushless DC Motor Driver Based on Bootstrap Circuit,” *J. Elektron. dan Telekomun.*, vol. 23, no. 2, pp. 108–114, 2023, doi: 10.55981/jet.563.
- [28] M. Chaker *et al.*, “Design and Implementation of a Photovoltaic Emulator Using an Insulated Full Bridge Converter Based Switch Mode Power Supply,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy Systems (ICEERE 2020)*, 2021, pp. 531–541, doi: 10.1007/978-981-15-6259-4\_56.
- [29] M. Alaoui, H. Maker, A. Mouhsen, and H. Hihi, “Photovoltaic emulator of different solar array configurations under partial shading conditions using damping injection controller,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 1019–1030, 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i2.
- [30] F. P. Adi, Khairudin, and L. Hakim, “Photovoltaic Emulator Berbasis Embedded System pada Jaringan Listirk Cerdas,” *Electrician*, vol. 13, no. 2, pp. 30–37, 2019.