

SKRIPSI

**PERANCANGAN *BIDIRECTIONAL* DC-DC CONVERTER
MENGUNAKAN MPPT BERBASIS *PERTURB AND
OBSERVE* UNTUK PENYIMPANAN ENERGI PADA PANEL
SURYA**

Disusun dan diajukan oleh :

NATASYA CHATRIN BAMBANG S

D041 20 1114



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**PERENCANAAN *BIDIRECTIONAL* DC-DC CONVERTER
MENGUNAKAN MPPT BERBASIS *PERTURB AND
OBSERVE* UNTUK PENYIMPANAN ENERGI PADA PANEL
SURYA**

Disusun dan diajukan oleh

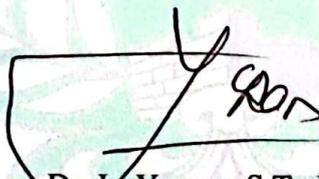
Natasya Chatrin Bambang S

D041201114

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas
Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 20 November 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



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

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ing. Ir. Faizal A Samman, M.T., IPU., ASEAN.Eng. ACPE.
NIP 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Natasya Chatrin Bambang S
NIM : D041201114
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PERANCANGAN *BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER* MENGUNAKAN MPPT BERBASIS *PERTURB AND OBSERVE* UNTUK PENYIMPANAN ENERGI PADA PANEL SURYA

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

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

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

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

Gowa, 20 November 2024

Yang Menyatakan



Natasya Chatrin Bambang S

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus karena penyertaan, berkat dan kasih karunia-Nya yang selalu baru setiap hari sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul : “Perancangan *Bidirectional* DC-DC *Converter* Menggunakan MPPT Berbasis *Perturb And Observe* untuk Penyimpanan Energi pada Panel Surya”.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan tugas akhir ini banyak kendala yang dihadapi. Namun, berkat penyertaan dan pertolongan Tuhan Yesus Kristus serta bantuan dan dukungan yang tiada hentinya dari berbagai pihak, akhirnya tugas akhir ini dapat diselesaikan.

Di kesempatan kali ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan doa dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis, Ibu Yeny Godjang dan Bapak Bambang Imam Susilo, Saudara Joanita Rifca A. P beserta seluruh keluarga yang senantiasa dan tiada hentinya memberikan doa dan dukungan yang tulus sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T. selaku pembimbing yang setia dan tidak pernah lelah dalam memberikan arahan serta meluangkan waktu terhadap penelitian yang dilakukan.
3. Bapak Ir. Yusri Syam Akil, S.T., M.T., IPM., MCE, Ph.D. dan Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang memberikan saran, koreksi, dan arahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ing. Ir. Faizal Arya Samman, IPU, ACPE, APEC Eng dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T., M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

5. Seluruh dosen pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan, dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan.
6. Kakak-kakak FIREWALL (Teknik Elektro UH 2011) yang telah memberikan beasiswa *FIRST* kepada penulis selama menjalani perkuliahan.
7. Asisten Laboratorium Elektronika Daya dan Laboratorium Elektronika Terpadu yang telah memberikan kebersamaan, bantuan, kerja sama, dan ilmu yang bermanfaat selama menjadi asisten.
8. Teman-teman seperjuangan di Laboratorium Elektronika Daya yang telah kebersamai, memberi dukungan dan bantuan, kerja sama yang baik dalam menghadapi permasalahan yang terjadi di laboratorium.
9. BACOTERS yaitu Nisa, Ani, Fira, Nada, Mita, dan Ammi yang selalu ada dari awal perkuliahan hingga saat ini. Terima kasih atas kebersamaan, suka dan duka, wacana-wacana yang ada, dinamika perkuliahan terkhususnya dinamika lab yang telah dilalui bersama, dan drama kehidupan sebagai mahasiswa yang selalu ada setiap harinya. Terlalu banyak pengalaman berharga yang penulis dapatkan bersama kalian. Terima kasih karena telah kebersamai dari maba hingga saat ini. Kemanapun dua kaki ini melangkah nanti, ku ingin kalian mengerti bahwa kalianlah teman sejati.
10. Teman-teman “PROCEZ20R” yang telah kebersamai penulis sejak pertama kali menyandang identitas sebagai mahasiswa Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Terima kasih atas proses yang telah dilalui bersama, motivasi untuk terus melangkah, dan cerita suka-duka yang dialami bersama.
11. Keluarga ARROW OF GOD 2020 (Nada, Dinda, Febe, Tasya, Thesa, Fresa, Yoflin, Rendy, Andi, Aditya, Anto, Reiky, Kelvin, dan sebagainya). Terima kasih sudah menjadi rumah rohani untuk penulis, suka dan duka yang telah dilalui bersama, dan pengalaman-pengalaman yang tidak akan terlupakan.
12. Keluarga PIONEERS 2020 dan VOLTAGE 2022 yang telah mewarnai kehidupan penulis selama menjadi mahasiswa. Terima kasih atas segala cerita, pengalaman dan kebersamaan yang sudah dibangun hingga saat ini.

13. Teman-teman KKN 110 Universitas Hasanuddin khususnya KKNT Perhutanan Sosial Bialo Desa Anrang (Rahma, Fira, Dilla, Feby, Farid, Abner, Accip, Algi, dan Emil) terima kasih atas kebersamaan, suka-duka dan pengalaman yang tak terlupakan selama melaksanakan pengabdian kepada masyarakat di Desa Anrang.
14. Kepada Gabriel Jeremia Mardolina yang telah kebersamai penulis hingga saat ini, menjadi tempat untuk mencurahkan segala sesuatu, menjadi pendengar dan penasehat yang setia, dan tidak pernah berhenti dalam menyemangati penulis untuk segera menyelesaikan tugas akhir ini. Terima kasih telah menjadi rumah yang nyaman buat penulis.
15. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini namun tidak dapat disebutkan satu persatu pada kesempatan ini.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini jauh dari kata sempurna yang disebabkan keterbatasan kemampuan dan ilmu pengetahuan yang dimiliki oleh penulis. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap saran dan kritik dari berbagai pihak dengan tujuan untuk membangun serta dijadikan bahan evaluasi untuk meningkatkan kualitas kedepannya. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Gowa, 20 November 2024

Penulis

ABSTRAK

NATASYA CHATRIN BAMBANG S. *Perancangan Bidirectional DC-DC Converter Menggunakan MPPT Berbasis Perturb And Observe untuk Penyimpanan Energi pada Panel Surya* (dibimbing oleh Yusran)

Panel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi sinar matahari yang bersifat intermiten, sehingga menyebabkan daya keluaran pada panel surya juga bervariasi. Oleh karena itu, dibutuhkan teknologi yang dapat meningkatkan keandalan dengan cara menyediakan teknologi penyimpanan energi listrik. Sistem penyimpanan energi bekerja untuk menyimpan energi ke dalam baterai ketika daya keluaran panel lebih tinggi dari beban (pengisian). Kemudian, energi yang tersimpan dalam baterai dapat digunakan untuk menyuplai kekurangan dari daya keluaran panel apabila daya yang dihasilkan lebih rendah dari beban (pengosongan). *Bidirectional DC-DC converter* dapat bekerja dalam dua mode yaitu mode pengisian dan pengosongan. Penelitian ini bertujuan untuk memahami bagaimana merancang sistem *bidirectional DC-DC converter* menggunakan algoritma *Perturb and Observe* untuk penyimpanan energi pada panel surya serta melakukan perbandingan keluaran terhadap sistem yang menggunakan MPPT dan PI dengan sistem yang tidak menggunakan MPPT dan PI. Perancangan sistem ini dilakukan menggunakan *tool* simulink pada *software* Matrix Laboratory (MATLAB). Hasil simulasi yang diperoleh yakni kinerja sistem *bidirectional DC-DC converter* pada mode *buck* (pengisian) dan juga pada mode *boost* (pengosongan) berlangsung dengan optimal. Pada iradiasi 1000 W/m^2 dan suhu 25°C dengan beban 7Ω diperoleh daya PV yang lebih besar daripada daya beban. Hal ini dibuktikan dengan kondisi baterai mengalami pengisian karena adanya kenaikan tegangan dan arus pengisian bernilai negatif. Sedangkan, pada saat beban sebesar 4Ω diperoleh daya PV yang lebih kecil daripada daya beban. Hal ini dibuktikan dengan kondisi baterai mengalami pengosongan karena adanya penurunan tegangan dan arus pengisian bernilai positif. Adapun hasil perbandingan pada sistem dengan MPPT dan PI dan tanpa MPPT dan PI yakni sistem dengan MPPT dan PI menunjukkan hasil yang lebih optimal dikarenakan MPPT memperoleh daya yang lebih besar daripada sistem tanpa MPPT dan PI berhasil menjaga tegangan agar tetap konstan.

Kata Kunci : Konverter DC-DC *Bidirectional*, MPPT, Kontrol PI, Panel Surya, Baterai, Simulink MATLAB.

ABSTRACT

NATASYA CHATRIN BAMBANG S. *Design of Bidirectional DC-DC Converter Using Perturb And Observe Based MPPT for Energy Storage on Solar Panels* (supervised by Yusran)

Solar panels are strongly influenced by intermittent sunlight conditions, causing the output power on solar panels also varies. Therefore, technology is needed that can increase reliability by providing electrical energy storage technology. The energy storage system works to store energy into the battery when the panel output power is higher than the load (charging). Then, the energy stored in the battery can be used to supply the shortage of the panel output power when the generated power is lower than the load (discharging). Bidirectional DC-DC converter can work in two modes, namely charging and discharging modes. This research aims to understand how to design a bidirectional DC-DC converter system using the MPPT Perturb and Observe algorithm for energy storage on solar panels and compare the output of a system that uses MPPT and PI with a system that doesn't use MPPT and PI. This system design is carried out using the simulink tool on the Matrix Laboratory (MATLAB) software. The simulation results obtained are the performance of the bidirectional DC-DC converter system in buck mode (charging) and also in boost mode (discharging) takes place optimally. At an irradiation of 1000 W/m^2 and a temperature of 25°C with a load of 7Ω , the PV power is greater than the load power. This is evidenced by the condition of the battery charging due to an increase in voltage and negative charging current. Meanwhile, when the load is 4Ω , the PV power is smaller than the load power. This is evidenced by the condition of the battery experiencing discharge due to a decrease in voltage and positive charging current. As for the comparison results on the system with MPPT and PI and without MPPT and PI, the system with MPPT and PI shows more optimal results because MPPT obtains more power than the system without MPPT and PI manages to keep the voltage constant.

Keywords : Bidirectional DC-DC Converter, MPPT, PI Control, Solar Panels, Battery, Simulink MATLAB.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 <i>Photovoltaic</i> (PV).....	7
2.2 Konverter DC-DC <i>Bidirectional</i>	10
2.2.1 Mode <i>Buck</i>	11
2.2.2 Mode <i>Boost</i>	14
2.3 Konverter <i>Buck</i>	16
2.4 Konverter <i>Boost</i>	18
2.5 Baterai.....	21
2.6 Kontrol <i>Proportional-Integral</i> (PI).....	22
2.7 <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT).....	23
2.7.1 Algoritma <i>Perturb and Observe</i> (PO).....	24
2.8 Matlab Simulink.....	27
2.9 Penelitian Terdahulu.....	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	32
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	32

3.2	Bahan Uji dan Alat	32
3.3	Teknik Pengumpulan Data	32
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	33
3.5	Rancangan Sistem	39
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Pemodelan Panel Surya	41
4.2	Pemodelan <i>Buck Converter</i>	43
4.3	Pemodelan PWM	46
4.4	Panel Surya tanpa menggunakan MPPT.....	47
4.5	MPPT dengan Algoritma <i>Perturb and Observe</i> (PO).....	48
4.6	Pemodelan Baterai.....	48
4.6.1	Pengujian Pengosongan Baterai	51
4.6.2	Pengujian Pengisian Baterai	52
4.7	Pemodelan Konverter DC-DC <i>Bidirectional</i>	54
4.8	Pemodelan Sistem Kontrol pada <i>Bidirectional DC-DC converter</i>	58
4.9	Pengujian Konverter <i>Bidirectional</i> DC-DC dengan Panel Surya.....	61
4.9.1	Pengujian rangkaian pada mode <i>charging</i> (pengisian) dan <i>discharging</i> (pengosongan).....	63
4.9.2	Pengujian Rangkaian <i>Bidirectional DC-DC Converter</i> dengan MPPT & Kontrol PI	69
4.9.3	Pengujian Rangkaian <i>Bidirectional DC-DC Converter</i> Tanpa menggunakan MPPT & Kontrol PI	71
4.9.4	Analisis Perbandingan <i>Bidirectional DC-DC Converter</i> dengan MPPT & Kontrol PI dan Tanpa MPPT & Kontrol PI	66
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		81
5.1	Kesimpulan	81
5.2	Saran	82
DAFTAR PUSTAKA		83
LAMPIRAN.....		86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Skema sel surya.....	8
Gambar 2 Kurva I-V terhadap radiasi cahaya matahari.....	9
Gambar 3 Kurva I-V terhadap perubahan suhu.....	10
Gambar 4 Rangkaian konverter DC-DC <i>bidirectional</i>	10
Gambar 5 Pemodelan saklar pada konverter DC-DC <i>bidirectional</i>	11
Gambar 6 <i>Bidirectional</i> DC-DC <i>converter</i> mode <i>buck</i>	12
Gambar 7 Mode <i>buck</i> saat kondisi saklar <i>buck</i> dalam kondisi <i>closed</i>	12
Gambar 8 Rangkaian pengganti saat saklar <i>buck</i> dalam kondisi <i>closed</i>	13
Gambar 9 Mode <i>buck</i> saat kondisi saklar <i>buck</i> dalam kondisi <i>open</i>	13
Gambar 10 Rangkaian pengganti saat saklar <i>buck</i> dalam kondisi <i>open</i>	13
Gambar 11 <i>Bidirectional</i> DC-DC <i>converter</i> mode <i>boost</i>	14
Gambar 12 Mode <i>boost</i> saat kondisi saklar <i>boost</i> dalam kondisi <i>closed</i>	14
Gambar 13 Rangkaian pengganti saat saklar <i>boost</i> dalam kondisi <i>closed</i>	15
Gambar 14 Mode <i>boost</i> saat kondisi saklar <i>boost</i> dalam kondisi <i>open</i>	15
Gambar 15 Rangkaian pengganti saat saklar <i>boost</i> dalam kondisi <i>open</i>	15
Gambar 16 Rangkaian konverter <i>buck</i>	16
Gambar 17 Rangkaian konverter <i>buck</i> saat kondisi saklar “ON”.....	16
Gambar 18 Rangkaian konverter <i>buck</i> saat kondisi saklar “OFF”.....	17
Gambar 19 Rangkaian konverter <i>boost</i>	19
Gambar 20 Rangkaian konverter <i>boost</i> saat kondisi saklar “ON”.....	19
Gambar 21 Rangkaian konverter <i>boost</i> saat kondisi saklar “OFF”.....	20
Gambar 22 Proses <i>discharge</i> dan <i>charge</i>	22
Gambar 23 Blok sistem aksi kontrol proporsional-integral.....	23
Gambar 24 Flowchart algoritma P&O.....	26
Gambar 25 Alur penelitian.....	36
Gambar 26 Diagram pembuatan program matlab <i>simulink</i>	38
Gambar 27 Rancangan sistem.....	39
Gambar 28 Parameter <i>Solarland</i> USA SLP200S-24H.....	41
Gambar 29 Kurva I-V 200 WP <i>Solarland</i> USA SLP200S-24H pada kondisi pengukuran standar.....	42
Gambar 30 Kurva P-V 200 WP <i>Solarland</i> USA SLP200S-24H pada kondisi pengukuran standar.....	42
Gambar 31 Rangkaian <i>buck converter</i> pada Matlab <i>Simulink</i>	45
Gambar 32 Gelombang arus dan tegangan keluaran konverter <i>buck</i>	46
Gambar 33 Spesifikasi PWM generator.....	46
Gambar 34 Rangkaian panel surya tanpa menggunakan MPPT.....	47
Gambar 35 Blok MPPT dengan algoritma PO.....	48
Gambar 36 Data parameter baterai.....	49
Gambar 37 Data <i>discharge</i> baterai.....	50
Gambar 38 Rangkaian <i>discharging</i> baterai.....	51
Gambar 39 Gelombang rangkaian saat mode <i>discharging</i>	52
Gambar 40 Rangkaian <i>charging</i> baterai.....	53

Gambar 41 Gelombang rangkaian saat mode <i>charging</i>	54
Gambar 42 Rangkaian konverter DC-DC <i>bidirectional</i>	54
Gambar 43 Rangkaian ekuivalen saat mode <i>buck</i>	55
Gambar 44 Rangkaian ekuivalen saat mode <i>boost</i>	56
Gambar 45 Rangkaian blok kontrol PI.....	58
Gambar 46 Identifikasi struktur plant.....	59
Gambar 47 Hasil identifikasi <i>plant</i>	60
Gambar 48 Nilai P dan I.....	61
Gambar 49 Rangkaian <i>bidirectional</i> DC-DC <i>converter</i> menggunakan MPPT dan kontrol PI.....	62
Gambar 50 Grafik tegangan pada mode <i>charging</i>	63
Gambar 51 Hasil <i>zoom</i> grafik tegangan mode <i>charging</i>	64
Gambar 52 Performa baterai pada mode <i>charging</i>	65
Gambar 53 Grafik tegangan pada mode <i>discharging</i>	66
Gambar 54 Hasil <i>zoom</i> grafik tegangan mode <i>discharging</i>	67
Gambar 55 Performa baterai pada mode <i>discharging</i>	68
Gambar 56 Rangkaian <i>bidirectional</i> DC-DC <i>converter</i> tanpa menggunakan MPPT dan kontrol PI	73

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan	30
Tabel 2 Spesifikasi panel surya <i>Solarland</i> USA SLP200S-24H.....	33
Tabel 3 Data suhu lingkungan dan iradiasi matahari	34
Tabel 4 Spesifikasi <i>buck converter</i>	43
Tabel 5 Data spesifik <i>buck converter</i>	45
Tabel 6 Parameter konverter DC-DC <i>bidirectional</i> pada mode <i>buck</i>	55
Tabel 7 Parameter konverter DC-DC <i>bidirectional</i> mode <i>boost</i>	56
Tabel 8 Parameter pada saat beban 7 ohm	66
Tabel 9 Parameter pada saat beban 4 ohm	69
Tabel 10 Pengujian <i>bidirectional</i> DC-DC <i>converter</i> menggunakan MPPT dan kontrol PI	70
Tabel 11 Pengujian <i>bidirectional</i> DC-DC <i>converter</i> tanpa menggunakan MPPT dan kontrol PI	75
Tabel 12 Perbandingan rangkaian <i>bidirectional</i> DC-DC <i>converter</i> menggunakan MPPT dan tanpa menggunakan MPPT.....	77
Tabel 13 Perbandingan rangkaian <i>bidirectional</i> DC-DC <i>converter</i> menggunakan kontrol PI dan tanpa menggunakan kontrol PI.....	79

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Program MPPT dengan algoritma <i>Perturb and Observe</i>	86
Lampiran 2 Rangkaian Konverter DC-DC <i>Bidirectional</i> menggunakan MPPT dan Kontrol PI	88
Lampiran 3 Rangkaian Konverter DC-DC <i>Bidirectional</i> tanpa menggunakan MPPT dan Kontrol PI	89

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi menjadi sebuah kebutuhan yang sangat krusial akhir-akhir ini. Kebutuhan akan energi listrik di dunia meningkat seiring berjalannya waktu. Populasi manusia di muka bumi juga tentu saja bertambah dari waktu ke waktu yang dimana ini juga akan mempengaruhi konsumsi energi yang semakin meningkat. Energi utama di Indonesia yang bersumber pada bahan bakar fosil memiliki efek samping yakni melepaskan karbon dioksida (CO₂) sebagai gas rumah kaca ke atmosfer pada saat pembakaran sehingga menghangatkan bumi dengan menjebak radiasi inframerah yang seharusnya terpancar dari bumi ke luar angkasa (Huda, 2023).

Sumber energi fosil tersebut terdiri dari minyak bumi, batubara, dan gas bumi. Pasokan energi fosil berasal dari sumber daya alam nasional yang semakin terbatas, sehingga proses impor minyak bumi menjadi prioritas utama untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar minyak di dalam negeri. Hal yang sama berlaku untuk gas bumi, di mana peningkatan penggunaan gas bumi membuka peluang impor LNG. Pembangkit listrik yang menggunakan batubara mendominasi pemenuhan kebutuhan listrik nasional, sehingga cadangan batubara terus berkurang. Untuk menjaga keseimbangan pasokan energi, penting untuk meningkatkan peran energi berbasis terbarukan dalam memenuhi kebutuhan energi dalam negeri.

Indonesia sendiri memiliki peranan sentral sebagai produsen dan pengeksport terbesar minyak dan gas bumi. Namun, pasokan sumber daya ini mengalami penurunan. Demi mencapai keberlanjutan dan kemandirian energi, pemerintah telah memprioritaskan energi terbarukan. Indonesia memiliki potensi besar dalam pemanfaatan energi terbarukan, meskipun penggunaannya belum sepenuhnya dimaksimalkan. Sumber daya seperti tenaga air, angin, matahari, dan arus laut dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, namun potensi ini baru mulai dikenali sehingga pemanfaatannya belum maksimal (Huda, 2023).

Terjadinya peningkatan kebutuhan energi ini tentunya akan meningkatkan peran energi terbarukan itu sendiri. Hal ini juga selaras dengan komitmen Indonesia untuk mewujudkan *Net Zero Emission* dan menghentikan penggunaan energi fosil dengan melakukan peralihan dari penggunaan energi fosil menjadi pengoptimalan penggunaan energi terbarukan. Energi terbarukan (*Renewable Energy*) ini memiliki sifat yang berkelanjutan dan tidak akan habis seperti yang didapatkan dari sinar matahari, angin atau pasang surut air laut (Sulistomo et al., 2018).

Indonesia sendiri menjadi kawasan yang sangat tepat untuk menerapkan *Renewable Energy* baik itu memanfaatkan sinar matahari, angin, air dan tidal. Sinar matahari sangat berlimpah di Indonesia hal ini dikarenakan Indonesia merupakan daerah khatulistiwa yang berlimpah akan sinar matahari (Raharja et al., 2019). Sinar matahari dapat menjadi sumber energi yang berkelanjutan karena sifatnya tidak akan habis. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan sinar matahari untuk diubah menjadi energi listrik. PLTS ini sendiri sangat cocok untuk diterapkan di Indonesia yang memiliki sinar matahari yang berlimpah.

Sistem fotovoltaik (*Photovoltaic*) sangat populer di era transisi energi saat ini dikarenakan sistem PV merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat melimpah, tidak dapat habis, bersih, dan sangat populer. Sistem fotovoltaik ini juga dapat diterapkan pada skala kecil yaitu di atap rumah maupun pada skala besar sehingga dapat ditempatkan dimana saja yang mendapatkan paparan sinar matahari secara langsung. Terlepas dari keunggulan yang dimiliki oleh sistem fotovoltaik juga memiliki kekurangan yaitu sistem ini tidak memiliki keandalan dalam menangkap energi surya. Hal ini dikarenakan sinar matahari yang bersifat intermiten, yang dipengaruhi oleh iklim, musim, waktu dan polusi. Oleh karena itu, sistem fotovoltaik ini tentunya memerlukan teknologi yang dapat meningkatkan keandalan dengan cara menyediakan teknologi penyimpanan energi listrik. Hal ini dapat membantu sistem pada saat tidak terpenuhinya permintaan beban yang ada dan begitupun sebaliknya saat permintaan beban lebih rendah daripada energi yang dihasilkan maka teknologi akan menyimpan energi (Pratiwi et al., 2020).

Bagian terpenting dari sistem energi terbarukan adalah elemen penyimpanan. Elemen penyimpanan mengumpulkan fluktuasi energi dan memungkinkan untuk meningkatkan sifat dinamis sistem. Sebuah baterai kimia atau *super capacitor* digunakan sebagai elemen penyimpanan. Dibutuhkan rangkaian konverter yang dapat diatur arah aliran daya yang mengalir untuk mengisi dan menggunakan baterai (Sulistomo et al., 2018). Konverter DC-DC *Bidirectional* yang dilengkapi dengan baterai sebagai penyimpan energi dapat menjadi pilihan untuk mengatasi masalah mengenai penyimpanan energi pada sistem PV. Metode *bidirectional* pada konverter DC-DC dapat difungsikan sebagai proses pengisian baterai dan sebagai proses penyedia sumber tegangan pada beban. Sehingga dengan adanya 2 fungsi pada 1 konverter tersebut dapat menyediakan sumber tegangan baik saat proses pengisian baterai maupun saat menyediakan sumber tegangan pada beban (Raharja et al., 2019).

Dengan menerapkan konverter DC-DC *Bidirectional* pada panel surya dapat menggabungkan dua tipe sumber energi yang berbeda dengan melalui input ganda pada konverter DC-DC *Bidirectional*. Konverter ini mempunyai dua mode yaitu mode pengisian baterai (mode *buck*) dan mode pengosongan baterai yang dapat digunakan sebagai suplai beban (mode *boost*) (Eviningsih, 2017).

Sistem penyimpanan energi menggunakan konverter DC-DC *Bidirectional* ini sudah banyak dikembangkan. Sistem penyimpanan energi bekerja untuk menyimpan energi ke dalam baterai ketika kapasitas pembangkitan energi lebih tinggi dari permintaan beban dan energi yang disimpan dalam baterai akan dikeluarkan untuk digunakan ketika kapasitas pembangkitan lebih rendah dari permintaan beban. Topologi konverter DC-DC *Bidirectional* yang paling sederhana dan banyak digunakan adalah jenis *non-isolated bidirectional DC-DC converter* (Pratiwi et al., 2020).

Pada penelitian kali ini akan dilakukan “Perancangan *Bidirectional* DC-DC Converter Menggunakan MPPT Berbasis *Perturb And Observe* untuk Penyimpanan Energi Pada Panel Surya” sehingga dapat bekerja dalam dua mode pengisian dan pengosongan secara bergantian. Rancangan ini dapat berguna sebagai pemanfaatan energi terbarukan dan sebagai sumber energi alternatif untuk

mengurangi penggunaan energi fosil, dan memaksimalkan perpindahan arus dalam dua arah dengan menggunakan modul *Bidirectional DC to DC Converter* serta dapat membantu kebutuhan listrik yang sangat meningkat di masa sekarang.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana merancang sistem *Bidirectional DC-DC Converter* untuk penyimpanan energi pada panel surya ?
2. Bagaimana kinerja dari sistem *Bidirectional DC-DC Converter* pada mode *buck* dan mode *boost* ?
3. Bagaimana perbandingan keluaran yang dihasilkan dengan menggunakan metode kontrol PI & metode MPPT ataupun tanpa menggunakan metode kontrol PI & metode MPPT ?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Merancang sistem *Bidirectional DC-DC Converter* untuk penyimpanan energi pada panel surya.
2. Mengetahui kinerja dari sistem *Bidirectional DC-DC Converter* pada mode *buck* dan mode *boost*.
3. Mengetahui perbandingan keluaran yang dihasilkan dengan menggunakan metode kontrol PI & metode MPPT ataupun tanpa menggunakan metode kontrol PI & metode MPPT.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai bahan acuan dalam pengembangan teknologi *Bidirectional DC-DC Converter* dan meningkatkan keandalan sistem penyaluran energi serta konverter *Bidirectional DC-DC* dapat

bekerja dengan dua mode, yaitu mode pengisian baterai (mode *buck*) dan mode pengosongan baterai (mode *boost*).

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini sebagai berikut :

1. Teknologi *Bidirectional DC-DC Converter* untuk penyimpanan energi pada panel surya disimulasikan melalui *software* Matlab Simulink.
2. Model sel surya yang digunakan yaitu panel surya modul *Solarland USA SLP200S-24H*.
3. Konverter daya yang digunakan adalah jenis *buck converter*.
4. Penggunaan MPPT untuk mendapatkan *tracking* daya yang maksimal.

1.6 Sistematika Penulisan

Berikut merupakan sistematika penulisan Tugas Akhir ini :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan teori-teori yang mendukung penelitian ini, yang meliputi *photovoltaic* (PV), konverter DC-DC *bidirectional*, konverter *buck*, konverter *boost*, baterai, kontrol *proportional-integral* (PI), *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), matlab simulink, serta penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini berisi waktu dan lokasi penelitian, bahan uji dan alat, teknik pengumpulan data, diagram alir penelitian serta rancangan sistem.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai pemodelan sistem *bidirectional* DC-DC *converter* menggunakan Matlab Simulink serta pengujian dan analisa data.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

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

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Photovoltaic* (PV)

Photovoltaic merupakan teknologi yang menghasilkan tenaga listrik DC (*direct current*) dari bahan semikonduktor ketika terpapar oleh foton. Selama cahaya menyinari solar sel maka akan menghasilkan tenaga listrik, jika tidak ada cahaya maka tidak akan dapat menghasilkan energi listrik (Kameliajum, 2023). PV adalah bidang teknologi dan penelitian yang terkait dengan perangkat yang secara langsung mengonversi sinar matahari menjadi listrik. Sel surya adalah unsur dasar dari teknologi PV. Sel surya terbuat dari bahan semikonduktor, seperti silikon. Satu dari sifat semikonduktor yang paling bermanfaat adalah konduktivitasnya dapat dengan mudah dimodifikasi dengan memasukkan campuran ke dalam kisi kristalnya (Pratiwi et al., 2020).

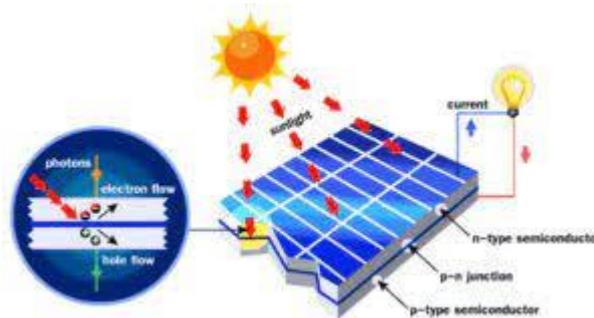
Dalam hal ini sel fotovoltaik lebih spesifik mengambil energi cahaya matahari sebagai sumber energi utama yang dapat diambil secara bebas, bersih dan tidak bersuara. Piranti ini dapat diterapkan dalam berbagai peralatan. Pada umumnya digunakan dalam situasi di mana sumber pembangkit listrik tidak tersedia, digunakan pada satelit yang mengorbit, alat-alat elektronik seperti kalkulator, jam tangan, telepon, radio, dan pompa air (Rizal, 2008). Listrik tenaga matahari dibangkitkan oleh komponen yang disebut *photovoltaic* yang besarnya 10 – 15 cm persegi. Komponen ini mengkonfirmasi energi dari cahaya matahari menjadi energi listrik. *Photovoltaic* merupakan komponen vital yang umumnya terbuat dari bahan semi konduktor (Kameliajum, 2023).

Berikut ini adalah penjelasan singkat mengenai cara kerja *solar cell* dalam bangunan (Rizal, 2008) :

1. Foton dalam cahaya matahari mengenai panel solar dan diserap oleh bahan semikonduktor, seperti silikon.
2. Elektron (muatan negatif) dilepaskan dari atomnya, memungkinkan elektron-elektron ini untuk mengalir melalui material untuk memproduksi

listrik. Muatan positif pelengkap yang juga terbentuk (seperti gelombang) disebut *hole* dan mengalir ke arah yang berlawanan dengan elektron di dalam silikon panel solar.

3. Lajur panel solar mengkonversi energi matahari menjadi sejumlah arus listrik satu arah (DC) yang siap pakai.



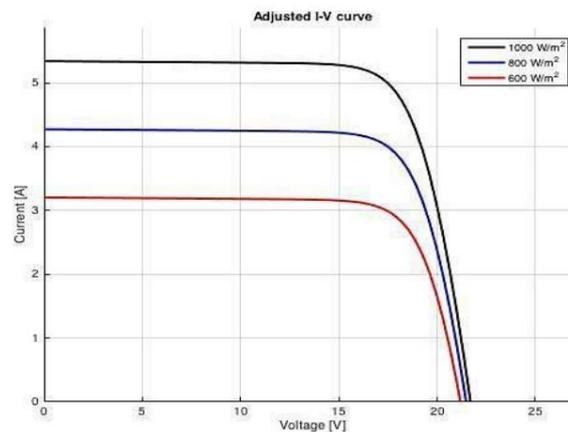
Gambar 1 Skema sel surya

(Sumber: <https://cdn.sanspower.com/2020/08/efek-photovoltaik-1-600x333.jpg>)

Pada Gambar 1 terdapat proses kerja dasar dari panel surya. Cahaya matahari yang mengandung foton mengenai sel surya yang terbuat dari semikonduktor tipe P dan tipe N. Foton membebaskan elektron dan menghasilkan arus listrik. Urutan pemasangan fotovoltaik dimulai dari satu sel, lalu kumpulan dari sel-sel menjadi panel, dan penyusunan panel-panel secara *array*. *Array* fotovoltaik inilah yang nantinya disusun terintegrasi dengan bangunan. Teknologi *Solar Photovoltaic* (PV) menawarkan metode yang nyaman untuk konversi sinar matahari, tersedia dalam jumlah besar selama sebagian besar tahun ini, langsung menjadi listrik. Teknik konversi sinar matahari langsung menjadi listrik oleh sel surya yang menggunakan efek *photovoltaic* ramah lingkungan, mudah dirawat dan dioperasikan (Safitri et al., 2019).

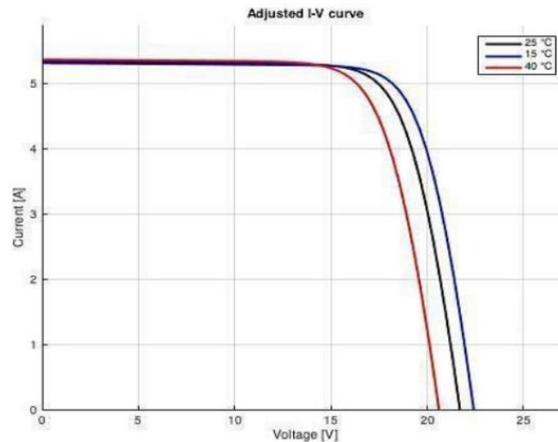
Hal yang mempengaruhi dari kinerja *photovoltaic* dengan bahan silikon adalah temperatur dan intensitas cahaya matahari yang masuk ke dalam sel surya. Radiasi matahari ialah pancaran energi yang berasal dari proses thermonuklir yang terjadi di matahari. Pada umumnya yang tertera pada *datasheet* panel surya pengujian yang dilakukan pada *standart test condition* (STC) yaitu nilai radiasi matahari sampai pada kisaran 1000 W/m^2 . Tetapi dalam prakteknya nilai tersebut tidak tercapai

karena ada beberapa faktor yang mempengaruhi seperti posisi lintang, posisi matahari, keadaan cuaca, serta nilai radiasi matahari pada suatu lokasi tertentu (Araujo, 2011). Berikut ini Gambar 2 merupakan kurva arus & tegangan terhadap radiasi matahari.



Gambar 2 Kurva I-V terhadap radiasi cahaya matahari (Araujo, 2011)

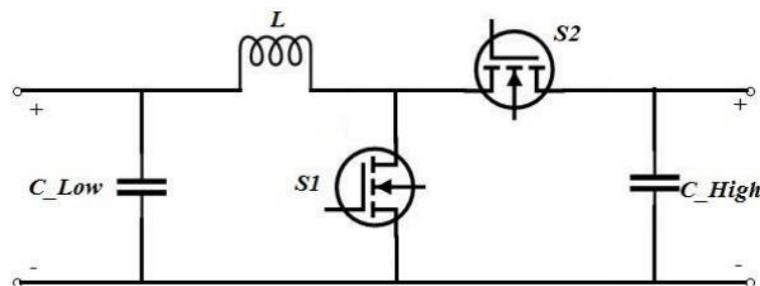
Tidak hanya radiasi matahari ada faktor lain yang mempengaruhi efisiensi panel surya tersebut yaitu suhu. Sel *photovoltaic* identik dengan piranti semikonduktor *diode* dimana pada pengoperasiannya sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Secara umum, modul *photovoltaic* dapat bekerja secara maksimal jika temperatur yang diterimanya tetap stabil pada temperatur 25°C. Kenaikan suhu dari temperatur normal modul *photovoltaic* ini akan menurunkan tegangan (V_{oc}) yang dihasilkan. Setiap kenaikan suhu sebesar 1°C dari temperatur normal 25°C akan mengurangi daya yang dihasilkan oleh modul *photovoltaic* sekitar 0,5%. Kecepatan angin di sekitar lokasi modul *photovoltaic* akan sangat membantu terhadap pendinginan temperatur permukaan *photovoltaic*, sehingga temperatur dapat terjaga dikisaran 25°C dan membuat efisiensi daya yang dihasilkan tetap stabil (Araujo, 2011). Berikut ini Gambar 3 merupakan kurva arus & tegangan terhadap perubahan suhu.



Gambar 3 Kurva I-V terhadap perubahan suhu (Araujo, 2011)

2.2 Konverter DC-DC *Bidirectional*

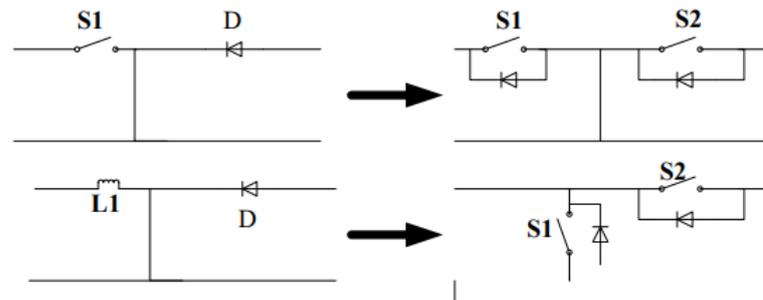
Bidirectional DC-DC converter saat ini menerima banyak perhatian karena meningkatnya kebutuhan sistem dengan kemampuan perpidahan energi dua arah antara dua bus DC, salah satunya pada sistem energi terbarukan. Konverter DC-DC dasar seperti *buck converter* dan *boost converter* tidak memiliki kemampuan aliran daya dua arah. Keterbatasan ini disebabkan oleh adanya *diode* dalam rangkaian yang mencegah aliran arus balik (Pratiwi et al., 2020). Berikut ini merupakan gambar rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada Gambar 4.



Gambar 4 Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* (Pratiwi et al., 2020)

Konverter DC-DC *bidirectional* beserta penyimpanan energi menjadi pilihan yang menjanjikan bagi banyak sistem yang berhubungan dengan daya, termasuk kendaraan hibrida, kendaraan dengan bahan bakar baterai, sistem energi terbarukan, dan sebagainya. Selain itu, dengan menggunakan sistem *bidirectional* tidak hanya mengurangi biaya dan meningkatkan efisiensi, tetapi juga meningkatkan performa

pada sistem. Pada sistem energi terbarukan, *multiple-input* konverter DC-DC *bidirectional* digunakan untuk menggabungkan sumber energi yang berbeda (Kameliajum, 2023).

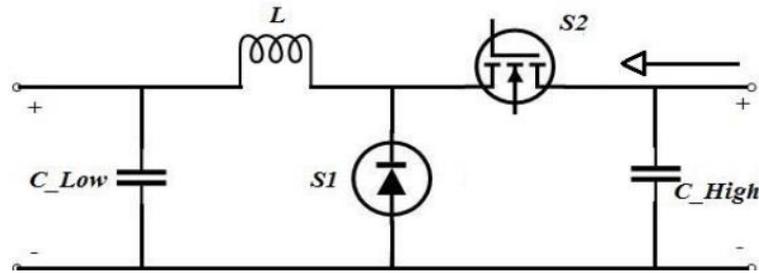


Gambar 5 Pemodelan saklar pada konverter DC-DC *bidirectional* (Kameliajum, 2023)

Pada Gambar 5 diatas menunjukkan bahwa aplikasi dari saklar yang akan digunakan pada konverter DC-DC *bidirectional* sehingga konverter akan dapat bekerja dalam dua mode, yaitu mode *buck* dan mode *boost* (Kameliajum, 2023). Untuk menerapkan aliran arus dua arah pada konverter DC-DC *bidirectional*, maka saklar pada konverter harus dapat mengalirkan arus pada kedua arah. Biasanya konverter tersebut diaplikasikan dengan menggunakan saklar daya *unidirectional semiconductor*, seperti MOSFET atau IGBT. Oleh karena itu, dengan penambahan dioda yang terpasang seri dengan saklar akan dapat digunakan untuk mengalirkan arus dua arah (Eviningsih, 2017).

2.2.1 Mode *Buck*

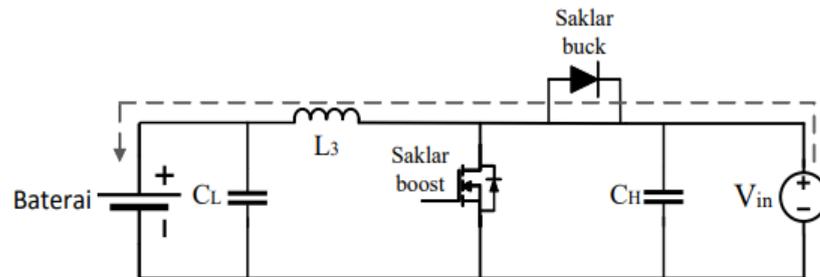
Pada mode *buck*, *bidirectional DC-DC converter* akan berfungsi pada saat energi listrik lebih yang dihasilkan dari panel surya. Ketika panel surya menghasilkan daya yang maksimal maka akan dapat memenuhi permintaan beban secara langsung dan sisanya dapat digunakan untuk proses pengisian baterai. Berikut ini Gambar 6 merupakan rangkaian *bidirectional DC-DC converter* pada mode *buck*.



Gambar 6 Bidirectional DC-DC converter mode buck
(Pratiwi et al., 2020)

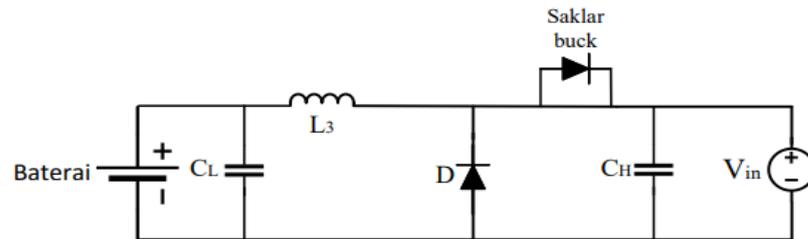
Mode *buck* pada konverter DC-DC *bidirectional* terbagi menjadi dua kondisi, yaitu kondisi saat saklar *buck* dalam keadaan *open* dan saat saklar *buck* dalam kondisi *closed*.

1. Saat kondisi saklar *closed*



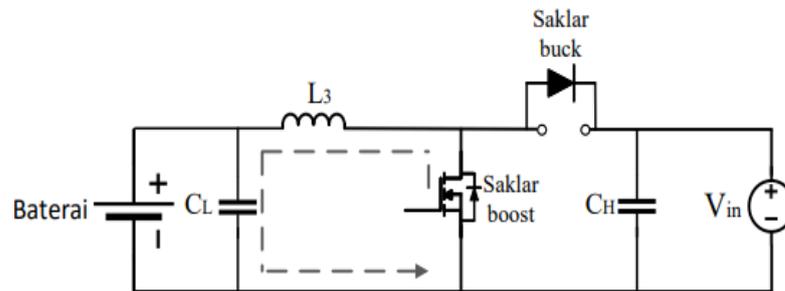
Gambar 7 Mode *buck* saat kondisi saklar *buck* dalam kondisi *closed*
(Eviningsih, 2017)

Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *buck* saat kondisi saklar *buck closed* ditunjukkan pada Gambar 7. Pada saat saklar *buck* dalam kondisi *closed* dan saklar *boost* saat kondisi *open*, maka dioda internal pada saklar *boost* dalam keadaan *reverse bias* dan arus akan mensuplai induktor dan baterai, sehingga arus akan menambah muatan di dalam induktor dan baterai akan mengalami proses *charging* atau pengisian. Rangkaian pengganti konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *buck* saat saklar *buck* dalam kondisi *closed* ditunjukkan pada Gambar 8 (Eviningsih, 2017).



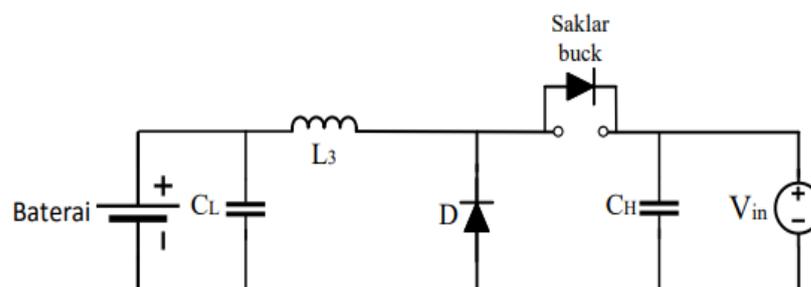
Gambar 8 Rangkaian pengganti saat saklar *buck* dalam kondisi *closed* (Eviningsih, 2017)

2. Saat kondisi saklar *open*



Gambar 9 Mode *buck* saat kondisi saklar *buck* dalam kondisi *open* (Eviningsih, 2017)

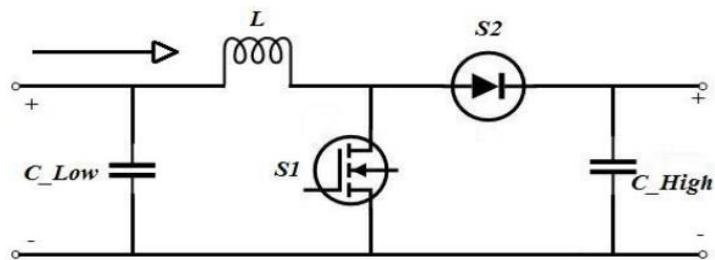
Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *buck* saat kondisi saklar *buck open* ditunjukkan pada Gambar 9. Pada saat saklar *buck* dalam kondisi *open*, maka arus yang tersimpan di dalam induktor akan mengalir menuju dioda internal pada saklar *boost*. Oleh karena itu dioda internal dalam kondisi *forward bias*, lalu arus akan dialirkan melewati dioda yang bertindak sebagai *freewheeling*. Rangkaian pengganti konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *buck* saat saklar *buck* dalam kondisi *open* ditunjukkan pada Gambar 10 (Eviningsih, 2017).



Gambar 10 Rangkaian pengganti saat saklar *buck* dalam kondisi *open* (Eviningsih, 2017)

2.2.2 Mode Boost

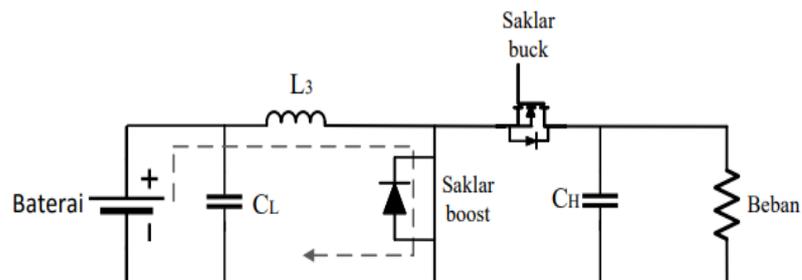
Pada mode *boost*, *bidirectional DC-DC converter* akan berfungsi pada saat daya yang dihasilkan dari panel surya tidak mampu memenuhi permintaan beban. Sehingga baterai akan memberikan sumber tegangan atau daya pada beban. Gambar rangkaian pada mode *boost* ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 *Bidirectional DC-DC converter mode boost* (Pratiwi et al., 2020)

Mode *boost* pada konverter DC-DC *bidirectional* terbagi menjadi dua kondisi, yaitu kondisi saat saklar *boost* dalam keadaan *open* dan saat saklar *boost* dalam kondisi *closed*.

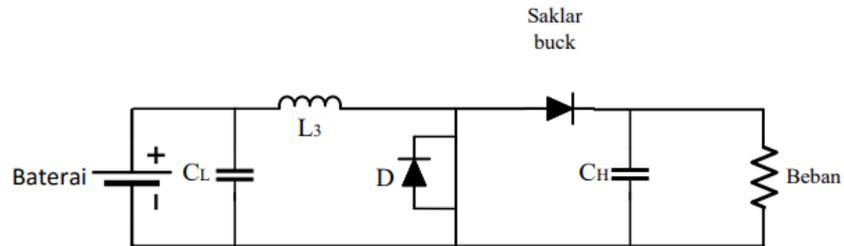
1. Saat kondisi saklar *closed*



Gambar 12 Mode *boost* saat kondisi saklar *boost* dalam kondisi *closed* (Eviningsih, 2017)

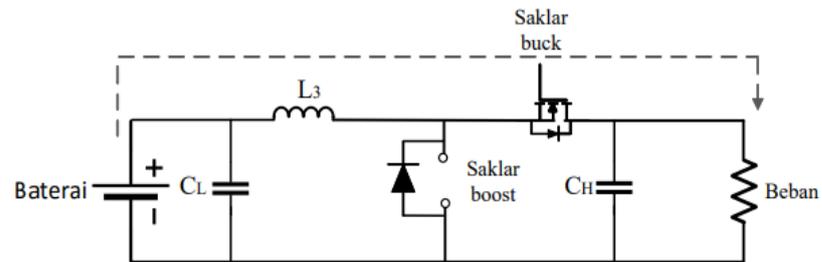
Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *boost* saat saklar *boost* dalam kondisi *closed* ditunjukkan pada Gambar 12. Pada saat saklar *boost* dalam kondisi *closed* dan saklar *buck* saat kondisi *open*, maka dioda internal pada saklar *boost* dalam keadaan *reverse bias* dan dioda internal yang terdapat pada saklar *buck* dalam keadaan *forward bias*, sehingga baterai hanya akan mensuplai arus ke induktor. Rangkaian pengganti konverter DC-DC

bidirectional pada mode *boost* saat saklar *boost* dalam kondisi *closed* ditunjukkan pada Gambar 13 (Eviningsih, 2017).



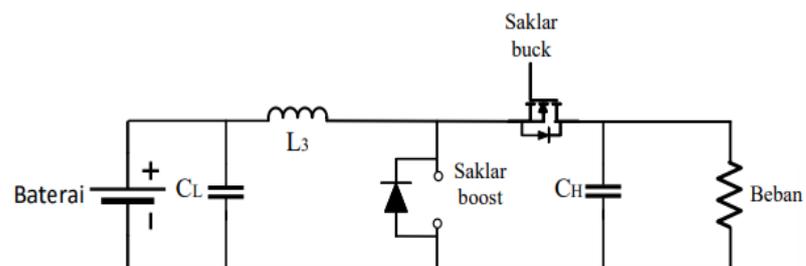
Gambar 13 Rangkaian pengganti saat saklat *boost* dalam kondisi *closed* (Eviningsih, 2017)

2. Saat kondisi saklar *open*



Gambar 14 Mode *boost* saat kondisi saklar *boost* dalam kondisi *open* (Eviningsih, 2017)

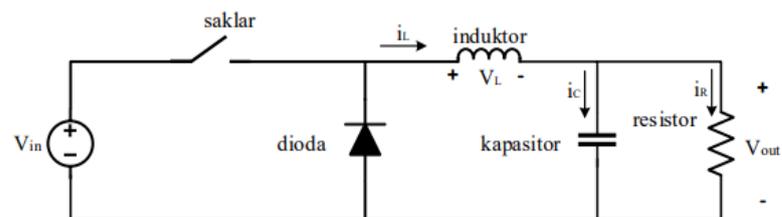
Rangkaian konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *boost* saat saklar *boost* dalam kondisi *open* ditunjukkan pada Gambar 14. Pada saat saklar *boost* dalam keadaan *open*, maka arus akan mengalir dari baterai menuju beban dan proses ini yang dinamakan proses *discharging* atau pengosongan baterai. Rangkaian pengganti konverter DC-DC *bidirectional* pada mode *boost* saat saklar *boost* dalam kondisi *open* ditunjukkan pada Gambar 15 (Eviningsih, 2017).



Gambar 15 Rangkaian pengganti saat saklar *boost* dalam kondisi *open* (Eviningsih, 2017)

2.3 Konverter *Buck*

Konverter *buck* merupakan jenis konverter DC-DC *step-down* yang dirancang untuk menurunkan tegangan DC. Konverter ini digunakan untuk mendapatkan tegangan DC yang lebih rendah dari tegangan input. Konverter *buck* beroperasi dalam dua kondisi, yaitu ketika saklar tertutup (*ON*) dan ketika saklar terbuka (*OFF*). Apabila saklar dalam kondisi *ON* dioda akan berada pada posisi bias mundur, sehingga arus pada induktor akan mengalir menuju beban dan tegangan induktor akan bernilai positif. Sedangkan ketika saklar dalam kondisi *OFF* maka dioda akan berada pada bias maju yang akan menyebabkan arus pada induktor akan mengalir langsung pada sisi beban (Kameliajum, 2023).

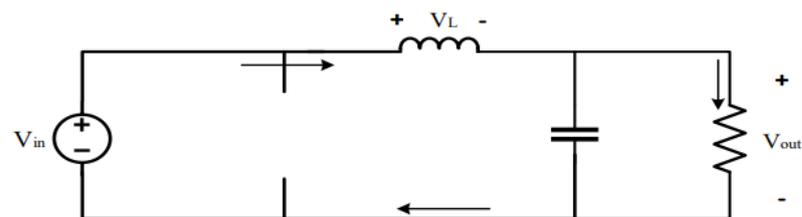


Gambar 16 Rangkaian konverter *buck*
(Eviningsih, 2017)

Pada Gambar 16 diatas menunjukkan rangkaian konverter *buck* yang terdiri dari tegangan masukan (V_{in}), saklar, dioda, induktor (L), kapasitor C , dan resistansi beban R . Pada konverter *buck* terdapat dua kondisi, antara lain (Eviningsih, 2017) :

1. Saat saklar dalam kondisi “ON”

Pada Gambar 17 menunjukkan rangkaian konverter *buck* saat kondisi saklar “ON”, maka arus akan mengalir ke induktor dan beban. Kondisi ini disebut periode pengisian arus induktor dan dioda dalam keadaan *reverse bias*.



Gambar 17 Rangkaian konverter *buck* saat kondisi saklar “ON”
(Eviningsih, 2017)

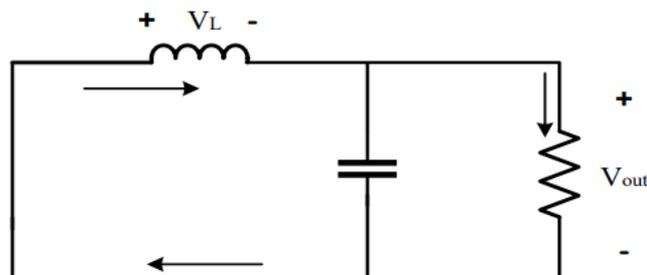
Maka dapat dicari rumus matematiknya sebagai berikut ini :

$$\begin{aligned}
 V_{in} &= V_L + V_{out} \\
 V_{in} &= L \frac{di}{dt} + V_{out} \\
 V_{in} &= L \frac{\Delta_{iL}(on)}{t_{on}} + V_{out} \\
 V_{in} &= L \frac{\Delta_{iL}(on)}{DT} + V_{out} \\
 \Delta_{iL}(on) &= \frac{(V_{in} - V_{out})DT}{L}
 \end{aligned} \tag{1}$$

2. Saat saklar dalam kondisi “OFF”

Pada Gambar 18 menunjukkan rangkaian konverter *buck* saat kondisi saklar “OFF”, maka dioda akan *forward bias* karena adanya pengosongan dari induktor. Arus mengalir dari induktor ke beban dilanjutkan ke dioda dan kembali lagi ke induktor. Karena arus yang mengalir adalah arus pengosongan induktor saja dan induktor bersifat murni (tidak ada resistansi) maka arus akan membentuk kurva linier menurun. Oleh karena ini $V_o < V_{in}$ dengan menggunakan konverter *buck*. Maka dari itu dapat dicari rumus matematiknya sebagai berikut ini :

$$\begin{aligned}
 -V_{out} &= V_L \\
 -V_{out} &= L \frac{di}{dt} \\
 -V_{out} &= L \frac{\Delta_{iL}(off)}{t_{off}} \\
 -V_{out} &= L \frac{\Delta_{iL}(off)}{(1-D)T} \\
 \Delta_{iL}(off) &= -\frac{V_{out}(1-D)T}{L}
 \end{aligned} \tag{2}$$



Gambar 18 Rangkaian konverter *buck* saat kondisi saklar “OFF”
(Eviningsih, 2017)

Saat dalam operasi *steady-state*, total perubahan arus pada induktor harus sama dengan nol. Maka akan didapatkan rumus matematik sebagai berikut ini :

$$\Delta_{iL(on)} + \Delta_{iL(off)} = 0 \quad (3)$$

Dengan memasukkan persamaan (1) dan (2) ke persamaan (3), maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut ini :

$$\begin{aligned} \frac{(V_{in}-V_{out})DT}{L} - \frac{V_{out}(1-D)T}{L} &= 0 \\ V_{in}D - V_{out}D - V_{out} + V_{out}D &= 0 \\ V_{out} &= V_{in}D \end{aligned} \quad (4)$$

Komponen induktor pada rangkaian konverter *buck* digunakan sebagai filter arus yang dapat mengurangi riak arus. Dengan menggunakan persamaan berikut ini dapat dicari nilai induktor :

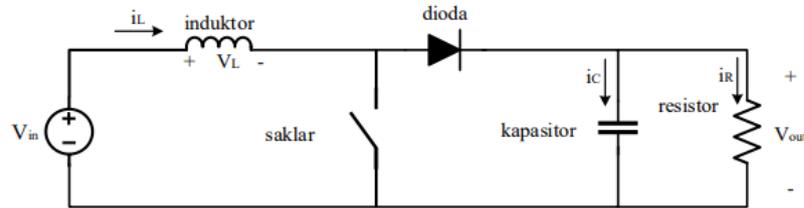
$$L = \frac{V_{out}(1-D)}{\Delta i_{L,fs}} \quad (5)$$

Sedangkan komponen kapasitor pada rangkaian konverter *buck* diatas digunakan sebagai filter tegangan yang dapat mengurangi riak tegangan. Nilai kapasitor dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$C = \frac{(1-D)}{8.L.\left(\frac{\Delta V_o}{V_{out}}\right).f^2s} \quad (6)$$

2.4 Konverter Boost

Konverter *Boost* adalah *step up* konverter atau konverter DC-DC dengan tegangan *output* yang lebih besar dari tegangan *input* ($V_o > V_{in}$). Prinsip kerjanya adalah menaikkan tegangan DC dengan mengatur besar *duty cycle switching*. Rangkaian konverter *boost* pada Gambar 19 terdiri dari tegangan *input* (V_{in}), saklar aktif (MOSFET), dioda, induktor, kapasitor, dan resistor (Rahayu, 2020).



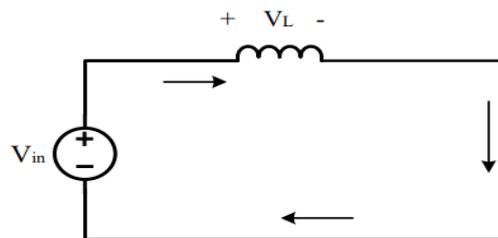
Gambar 19 Rangkaian konverter *boost*
(Eviningsih, 2017)

Terdapat dua kondisi pada konverter *boost*, antara lain (Eviningsih, 2017):

1. Saat dalam kondisi saklar “*ON*”

Pada Gambar 20 menunjukkan rangkaian konverter *boost* dalam kondisi saklar “*ON*”, maka induktor akan terhubung langsung dengan sumber atau V_{in} dan akan mengalami proses pengisian (*charging*). Maka dari itu dapat dicari rumus matematikanya sebagai berikut ini :

$$\begin{aligned}
 V_{in} &= V_L \\
 V_{in} &= L \frac{di}{dt} \\
 V_{in} &= L \frac{\Delta i_L(on)}{t_{on}} \\
 V_{in} &= L \frac{\Delta i_L(on)}{DT} \\
 \Delta i_L(on) &= \frac{V_{in}DT}{L}
 \end{aligned} \tag{7}$$

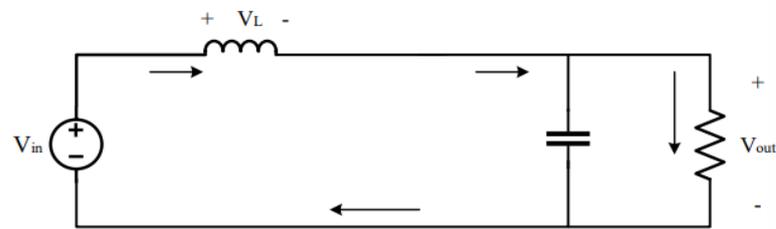


Gambar 20 Rangkaian konverter *boost* saat kondisi saklar “*ON*”
(Eviningsih, 2017)

2. Saat dalam kondisi saklar “*OFF*”

Pada Gambar 21 merupakan rangkaian konverter *boost* saat kondisi saklar dalam keadaan “*OFF*”, tegangan masukan (V_{in}) akan terangkai seri dengan induktor dan resistor. Induktor yang semula dalam keadaan pengisian berubah menjadi pengosongan arus dan dalam kondisi ini induktor berfungsi sebagai sumber

arus atau sumber tegangan V_L dan resistor berfungsi sebagai beban yang di catu oleh dua sumber tegangan yaitu V_{in} dan V_L .



Gambar 21 Rangkaian konverter *boost* saat kondisi saklar “OFF” (Eviningsih, 2017)

Maka dari itu dapat dicari rumus matematiknya sebagai berikut ini :

$$V_{in} = V_L + V_{out}$$

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + V_{out}$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta_{iL}(off)}{t_{off}} + V_{out}$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta_{iL}(off)}{(1-D)T} + V_{out}$$

$$\Delta_{iL}(off) = \frac{(V_{in}-V_{out})(1-D)T}{L} \quad (8)$$

Saat operasi *steady-state*, total perubahan arus pada induktor harus sama dengan nol. Maka akan didapatkan rumus matematik sebagai berikut ini :

$$\Delta_{iL}(on) + \Delta_{iL}(off) = 0 \quad (9)$$

Dengan memasukkan persamaan (7) dan (8) ke persamaan (9), maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut ini :

$$\frac{V_{in}DT}{L} + \frac{(V_{in}-V_{out})(1-D)T}{L} = 0$$

$$V_{in}(D + 1 - D) - V_{out}(1 - D) = 0$$

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (10)$$

Komponen induktor dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta_{iL} \cdot f_s} \quad (11)$$

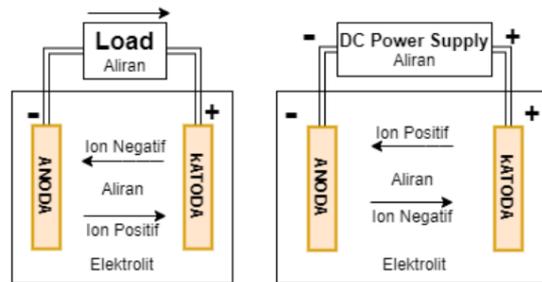
Sedangkan komponen kapasitor pada rangkaian konverter *boost* diatas digunakan sebagai filter tegangan yang dapat mengurangi riak tegangan. Nilai kapasitor dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$C = \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f_s} \quad (12)$$

2.5 Baterai

Baterai merupakan suatu perangkat yang mengandung sel listrik sehingga dapat digunakan untuk menyimpan energi dimana energi tersebut dapat di konversikan menjadi daya. Didalam sel listrik yang terdapat pada baterai berlangsung proses elektrokimia yang bersifat *reversibel* (dapat berkebalikan) dengan efisiensi yang tinggi. Proses elektrokimia *reversibel* maksudnya yaitu terdapat proses perubahan energi kimia menjadi energi listrik dan juga terjadi proses perubahan energi listrik menjadi energi kimia (proses pengisian) dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang dipakai (Kameliajum, 2023).

Baterai bekerja pada dua kondisi yaitu pengosongan (*discharge*) dan pengisian (*charge*). Secara prinsip, aliran listrik akan mengalir dari kutub positif menuju kutub negatif. Sumber elektron yang ada pada kutub bertanda negatif akan menjadi sumber listrik bagi peralatan listrik jika disambungkan dengan baterai. Saat baterai dihubungkan dengan peralatan listrik, maka elektrolit akan berpindah dalam bentuk ion dan memicu reaksi kimia pada kedua kutubnya. Terjadinya perpindahan ion akan mengalirkan arus listrik keluar dari baterai. Pada saat pengisian, jika sel dihubungkan dengan *power supply* maka elektroda positif akan menjadi anoda dan elektroda negatif akan menjadi katoda sehingga ion akan mengalirkan arus masuk ke dalam baterai (Kameliajum, 2023). Gambar proses *charging* dan *discharging* ditunjukkan pada Gambar 22 dibawah ini.



Gambar 22 Proses *discharge* dan *charge* (Aditya, 2016)

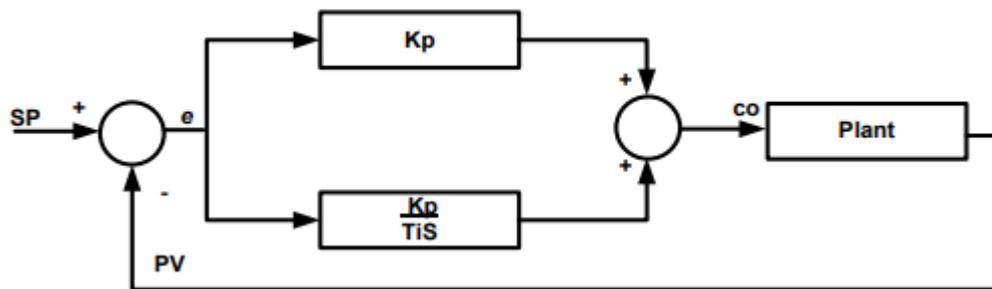
Penyimpanan baterai menggunakan cara elektro-kimia adalah bentuk energi semi-teratur. Listrik yang dihasilkan dari penyimpanan baterai mudah diubah menjadi panas atau cahaya, tetapi proses konversi dalam baterai relatif tidak efisien. Jenis baterai dikategorikan sebagai primer dan sekunder. Baterai primer tidak dapat dibalik — baterai tidak dapat diisi ulang dan dibuang setelah energi dikonsumsi. Sel alkali yang umum adalah contoh dari jenis ini. Baterai sekunder dapat diisi ulang. Baterai timbale-asam adalah jenis yang paling umum dan digunakan dalam sistem mobil dan cadangan. Efisiensi baterai sekunder biasanya 70 hingga 80% untuk siklus pulang-pergi (pengisian dan pengosongan). Energi hilang dalam bentuk panas untuk siklus pengisian dan pengosongan. Jenis umum lainnya dari baterai sekunder termasuk nikel-kadmium (NiCad), nikellogam hidrida (NiMh), lithium-ion, seng-udara, dan polimer lithium (Safitri et al., 2019).

2.6 Kontrol *Proportional-Integral* (PI)

Bidirectional DC-DC converter yang beroperasi dalam mode konduksi kontinu (CCM) mengontrol tegangan DC dengan mengendalikan *duty cycle*. Kontrol ini mempertahankan tegangan konstan di sisi keluaran, baik pada sisi *buck* maupun sisi *boost*. Kontrol ini disusun oleh dua loop kontrol PI. Tegangan keluaran (V_b) dan arus keluaran induktor (I_b) adalah sinyal umpan balik ke kontrol PI (Pratiwi et al., 2020). Kontrol proporsional berfungsi untuk memperkuat sinyal kesalahan penggerak (sinyal *error*), sehingga akan mempercepat keluaran sistem mencapai titik referensi. Kontrol Integral pada prinsipnya bertujuan untuk menghilangkan

kesalahan keadaan tunak (*offset*) yang biasanya dihasilkan oleh kontrol proporsional (Kameliajum, 2023).

Kontroler proporsional memiliki keluaran yang sebanding atau proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya). Secara lebih sederhana dapat dikatakan bahwa keluaran kontroler proporsionalnya merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukannya. Kontroler integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan yang bagus yaitu nol. Kontroler PI dapat saling menutupi kekurangan dan kelebihan sehingga masing-masing dapat mempercepat reaksi sebuah sistem (Rahayu et al., 2020). Gambar blok sistem kontrol PI ditunjukkan pada Gambar 23 berikut ini.



Gambar 23 Blok sistem aksi kontrol proporsional-integral (Rindho et al., 2010)

2.7 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) digunakan untuk melacak titik daya maksimum berdasarkan kurva karakteristik. MPPT bukanlah suatu sistem pelacakan mekanik yang mengubah posisi panel surya terhadap posisi matahari sehingga mendapatkan intensitas radiasi maksimum. Prinsip utama MPPT adalah melacak daya maksimum yang tersedia dan menjaga panel surya beroperasi pada titik daya maksimum.

MPPT akan terhubung dengan DC-DC *converter* untuk menjaga panel surya beroperasi pada titik daya maksimum. MPPT akan mengatur *duty cycle* yang menjadi nilai *switching DC-DC converter*. Dengan mengatur *duty cycle*, DC-DC *converter* akan memaksa panel surya untuk membangkitkan daya maksimum yang

tersedia. Efisiensi *tracking* yang dihasilkan MPPT dapat dihitung sebagai berikut (Al Haqq et al., 2021) :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{max}} \times 100\%$$

Keterangan :

η = efisiensi *tracking*

P_o = daya keluaran yang terlacak

P_{max} = daya maksimum sebenarnya

Untuk tiap nilai iradiasi dan temperatur yang diterima sel surya terdapat nilai daya maksimum yang dihasilkan. Metode untuk men-*tracking* nilai tersebut disebut sebagai *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Keuntungan penggunaan MPPT ini salah satunya adalah cepat terpenuhinya keadaan *equilibrium photovoltaic*. Kondisi ini merupakan terpenuhinya nilai daya yang diperlukan oleh beban dari daya yang dihasilkan oleh panel surya. Komponen yang diperlukan dalam penentuan nilai MPPT ini ada dua (2) yaitu: arus (I) dan tegangan (V). Keduanya nilai ini akan membentuk nilai daya yang dihasilkan oleh panel surya. Untuk masing-masing temperatur dan iradiasi yang diterima terdapat nilai MPP yang berbeda. Diperlukan implementasi metode yang tepat untuk memperoleh nilai daya maksimum panel surya tersebut (Utami et al., 2018).

Dalam penelitian ini digunakan algoritma *Perturb and Observe* (PO), yang bertujuan untuk mencari nilai titik maksimum dengan menggunakan *buck converter*.

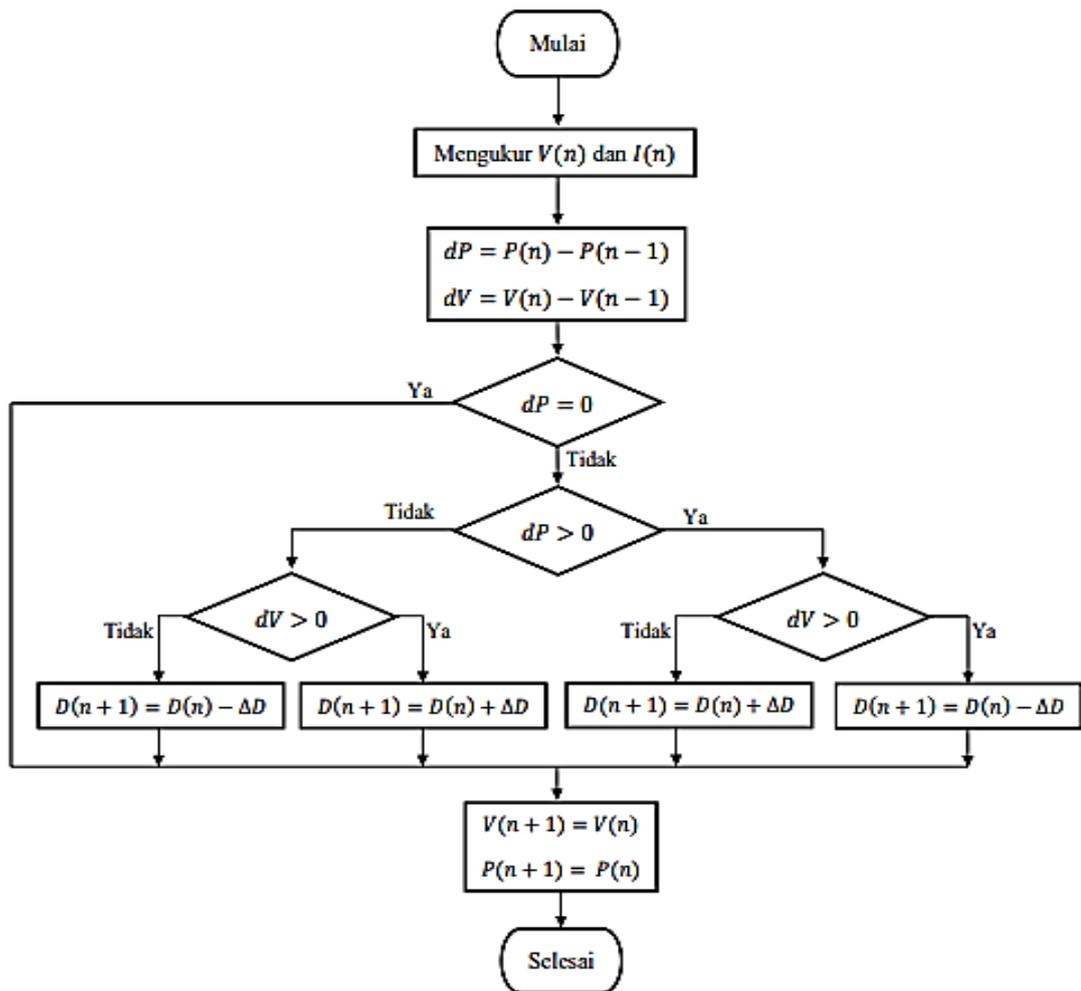
2.7.1 Algoritma *Perturb and Observe* (PO)

Metode *Perturb and Observe* merupakan metode MPPT yang umum digunakan. Dalam metode ini, gangguan diterapkan pada tegangan referensi atau sinyal arus dari sistem panel surya (Azmi et al., 2018). Metode *Perturb and Observe* terdiri dari dua tahap; *perturb* yaitu mengubah dan *observe* yaitu

menghitung perubahan daya akibat aksi *perturb* sebelumnya. Jika perubahan daya positif maka *perturb* selanjutnya akan tetap pada arah yang sama, sedangkan jika perubahan daya negatif maka *perturb* akan dibalik (Dwidayanti et al., 2017).

Metode *perturb and observe* (P&O) dapat digunakan untuk menentukan titik optimum. Dengan menggunakan metode P&O, nilai daya maksimum bisa didapatkan tanpa harus mengetahui karakteristik dari sistem sel surya. Nilai daya maksimum didapatkan dengan cara mengatur besaran tegangan DC pada konverter. Dengan perubahan besar tegangan DC pada konverter, maka nilai daya juga akan berubah. Metode ini mengatur dan mengamati setiap perubahan tersebut. Perubahan ditentukan pada *step-size* (ΔD) tertentu dan waktu tertentu.

Besar nilai daya listrik yang dihasilkan dibandingkan dengan daya listrik sebelumnya. Hal ini menentukan variabel ΔD berikutnya. Jika besar nilai daya yang dihasilkan meningkat maka variabel ΔD akan bernilai tetap, sebaliknya jika besar nilai daya yang tersedia. Dari daya tambahan yang terkumpul yang berasal dari modul sel surya, sehingga arus pengisian baterai dapat ditingkatkan. MPPT dapat juga dihubungkan dengan sistem tracking mekanis, tetapi kedua sistem ini benar-benar sangat berbeda (Huda et al., 2021). Gambar *flowchart* algoritma *perturb and observe* ditunjukkan pada Gambar 24.



Gambar 24 Flowchart algoritma P&O

Dalam metode ini, tegangan dari panel surya dianggap sebagai sinyal referensi. Target dari metode ini adalah memaksa tegangan referensi dari panel surya sebagai VMPP. Hal ini dilakukan dengan menerapkan gangguan kecil dan konstan untuk tegangan panel surya. Setelah setiap gangguan variasi dalam *output* daya (dP) diukur. Sebuah dP positif menunjukkan bahwa daya *output* akan mendekati MPP. Oleh karena itu, gangguan dari tanda positif diterapkan pada tegangan panel surya di tahap berikutnya. Di sisi lain, jika dP negatif diberikan tanda gangguan negatif. Langkah-langkah ini berulang kali dilakukan hingga MPP sistem tercapai di mana dP sama dengan nol.

P&O MPPT memiliki dua kelemahan. Pertama, sulitnya menentukan nilai gangguan yang ideal. Jika gangguan besar, kemungkinan algoritma untuk

berosilasi disekitar MPP menjadi tinggi dan jika gangguan kecil, kecepatan konvergensi algoritma menjadi sangat rendah. Kelemahan ini dapat diatasi dengan menggunakan ukuran gangguan variabel, yang menurun sebagai algoritma menyatu dengan MPP. Perubahan kondisi lingkungan juga mempengaruhi kinerja sistem dalam mencapai MPP (Azmi et al., 2018).

2.8 Matlab Simulink

MATLAB merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk pemrograman, analisis, serta komputasi teknis dan matematis berbasis matriks, MATLAB adalah singkatan dari *Matrix Laboratory* karena mampu menyelesaikan masalah perhitungan dalam bentuk matriks. MATLAB versi pertama dirilis pada tahun 1970 oleh Cleve Moler. Pada awalnya, MATLAB didesain untuk menyelesaikan masalah – masalah persamaan aljabar linear. Seiring berjalannya waktu, program ini terus mengalami perkembangan dari segi fungsi dan performa komputasi (Kameliajum, 2023).

Simulink merupakan perangkat lunak yang interaksinya dalam lingkungan blok diagram untuk simulasi multi domain dan *model-based design*. Simulink dapat digunakan untuk *system level design*, simulasi, *Automatic code generation*, dan *continuous test and verification embedded systems*. Simulink menyajikan editor dalam bentuk grafik. Simulink juga terintegrasi dengan Matlab sehingga memungkinkan untuk saling bertukar informasi maupun data antara simulink dan Matlab secara bersamaan, dengan kata lain mengkombinasikan antara *Textual Programming* dan *Graphical Programming* dalam melakukan simulasi dari suatu desain sistem. Ribuan algoritma yang tersedia di Matlab dapat dengan mudah dimasukkan dalam blok simulink (Ningrum, 2020).

2.9 Penelitian Terdahulu

Adapun terdapat beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini. Meskipun demikian, penelitian yang diajukan ini masih berbeda dengan

penelitian terdahulu yang ada. Berikut ini beberapa penelitian terdahulu tersebut yaitu :

1. “Desain dan Simulasi *Bidirectional DC-DC Converter* untuk Penyimpanan Energi pada Sistem Fotovoltaik” (2020). Adapun fokus dari penelitian ini yaitu mendesain dan mensimulasikan *bidirectional DC-DC converter* untuk penyimpanan energi pada sistem fotovoltaik dengan menggunakan Simulink MATLAB. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *bidirectional DC-DC converter* dapat bekerja dalam mode pengisian maupun mode pengosongan, yang dibuktikan dengan adanya arus pengisian baterai dan kenaikan atau penurunan tegangan baterai.
2. “Pengaturan Konverter DC-DC *Bidirectional* dengan MPPT Berbasis *Modified Perturbation and Observation* pada Sistem Turbin Angin” (2017). Penelitian ini berfokus pada sistem turbin angin yang dipengaruhi oleh kondisi angin yang fluktuatif, sehingga menyebabkan daya keluaran pada sistem turbin angin pun juga mengalami fluktuasi dan daya pada DC Bus tidak konstan. Hasil dari penelitian ini mampu mempercepat kondisi tunak pencarian daya maksimal jika dibandingkan dengan metode P&O konvensional serta konverter *bidirectional* yang mampu mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai dengan baik.
3. “Perancangan dan Implementasi DC-DC *Bidirectional Converter* Dengan Sumber Energi Listrik Dari Panel Surya dan Baterai untuk Pemenuhan Kebutuhan Daya Listrik Beban” (2019). Penelitian ini berfokus pada perancangan dan pengimplementasian untuk mengelolah energi listrik langsung dari PLTS. Untuk mengatur sumber energi tersebut digunakan metode *Bidirectional* pada konverter DC-DC. Hasil penelitian yang diperoleh yaitu sistem *converter bidirectional* dapat bekerja dengan baik pada mode *boost* daya yang dihasilkan oleh panel surya sebesar 219,86 W sedangkan daya yang dibutuhkan oleh beban sebesar 232,53 W. Sehingga, daya yang disuplai oleh baterai ke beban sebesar 12,97 W. Sedangkan pada mode *buck* daya yang dihasilkan oleh panel surya sebesar 207,23 W dan daya yang dibutuhkan oleh

beban sebesar 149,04 W. Sehingga, daya lebih yang dihasilkan oleh panel surya akan disimpan pada baterai sebesar 58,28 W.

4. “Desain dan Implementasi *Bidirectional DC-DC Converter* untuk Penerangan Darurat” (2020). Penelitian ini berfokus pada sistem penerangan darurat yang diperoleh dari baterai dan baterai memperoleh sumber energi listrik dari PLN. Untuk hasil penelitian yang diperoleh ada 2, yaitu yang pertama saat konverter belum menggunakan kontrol PI pada mode *buck* dengan *duty cycle* sebesar 58% didapatkan tegangan keluaran sebesar 13,92V dan mode *boost* dengan *duty cycle* sebesar 50% didapatkan tegangan keluaran sebesar 23,84V. Adapun yang kedua setelah menggunakan kontrol PI metode analitik, proses *charging* pada mode *buck* dengan nilai K_p sebesar 8,62 dan K_i sebesar 17240 didapatkan nilai tegangan keluaran sebesar 13,99V dari *setpoint* yang diinginkan yaitu 14V dan saat proses *discharging* pada mode *boost* dengan nilai K_p sebesar 2,44 dan K_i sebesar 344,63 didapatkan nilai tegangan keluaran sebesar 23,99V dari *setpoint* yang diinginkan yaitu 24V.
5. “Perancangan Modul *Bidirectional DC-DC* Konverter Berbasis Mikrokontroler untuk Penyimpanan Energi pada Sistem Energi Terbarukan” (2022). Pada penelitian ini terfokus pada perancangan modul sistem *bidirectional* konverter DC-DC berbasis mikrokontroler ESP 8266 pada panel surya. Pengujian panel surya bertujuan untuk mengetahui besarnya tegangan dan arus yang di dapat dari *output* panel surya dalam setiap jam. Dari hasil pengujian didapatkan kesimpulan *solar cell* ini jika pada cuaca paling cerah dan panas bisa mendapatkan hasil tegangan sebesar 20,8 V dan jika pada cuaca paling gelap / mendung sebesar 13,9 V dan arus yang di dapat paling tinggi pada cuaca cerah sebesar 0,40 A dan paling rendah sebesar 0,25 A. Pada hasil penelitian terdapat kenaikan tegangan dari 12,56 V menjadi 12,92 V atau sebesar 0,34 V, dimana pada pengujian ini dimana rancang bangun pada alat ini berkerja dengan baik dan kondisi baterai yang diisi dikatakan dalam kondisi baik.

Tabel 1 Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan

No	Penelitian Terdahulu	Persamaan	Perbedaan
1.	Desain dan Simulasi <i>Bidirectional DC-DC Converter</i> untuk Penyimpanan Energi pada Sistem Fotovoltaik (Pratiwi et al., 2020)	Sistem <i>bidirectional</i> pada panel surya dan menggunakan kontrol PI serta konverter <i>buck</i>	Penelitian ini belum menggunakan metode MPPT sedangkan pada penelitian yang diajukan akan menggunakan metode MPPT
2.	Pengaturan Konverter DC-DC <i>Bidirectional</i> dengan MPPT Berbasis <i>Modified Perturbation and Observation</i> pada Sistem Turbin Angin (Eviningsih, 2017)	Menggunakan sistem <i>bidirectional</i> dengan dilengkapi metode MPPT	Penelitian ini menggunakan sistem turbin angin sedangkan penelitian yang diajukan menggunakan panel surya
3.	Perancangan dan Implementasi DC-DC <i>Bidirectional Converter</i> Dengan Sumber Energi Listrik Dari Panel Surya dan Baterai untuk Pemenuhan Kebutuhan Daya Listrik Beban (Raharja et al., 2019)	Menggunakan sistem <i>bidirectional DC-DC converter</i>	Penelitian ini belum menggunakan metode kontrol PI dan metode MPPT sedangkan penelitian yang diajukan menggunakan metode kontrol PI dan metode MPPT
4.	Desain dan Implementasi <i>Bidirectional DC-DC Converter</i> untuk Penerangan Darurat (Rahayu et al., 2020)	Menggunakan sistem <i>bidirectional DC-DC converter</i> dan sistem kontrol PI	Penelitian ini belum menggunakan metode MPPT sedangkan penelitian yang diajukan menggunakan metode MPPT
5.	Perancangan Modul <i>Bidirectional DC-DC</i> Konverter Berbasis Mikrokontroler untuk	Menggunakan <i>bidirectional DC-DC converter</i>	Penelitian ini menggunakan mikrokontroler ESP 8266 dan <i>software</i> arduino IDE

	Penyimpanan Energi pada Sistem Energi Terbarukan (Septiyoko et al., 2022)		sedangkan penelitian yang diajukan tidak menggunakan mikrokontroler dan menggunakan <i>software</i> MATLAB simulink
--	---	--	---