

Desain dan Simulasi CUK Konverter untuk Pengisian Baterai Lead Acid dan Estimasi SoC Baterai

Rifki Qurotul A'yun¹, Era Purwanto², Ony Asrarul Qudsi³

^{1,2,3}Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

email: rifkiqurotul@gmail.com¹, era@pens.ac.id², ony@pens.ac.id³

Abstrak - Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Alam, penggunaan energi surya sebagai sumber energi alternatif dapat menjadi solusi atas kenaikan harga minyak bumi. Panel surya tidak hanya tidak terbatas, tetapi juga tidak menyebabkan polusi. Potensi energi surya di Indonesia sebesar 4,8 KWh/m² atau 112.000 GWp, namun pemanfaatannya baru sekitar 10 MWp. Pemerintah menargetkan terpasang 0,87 GW pada 2025. Oleh karena itu, riset energi surya harus diperkuat untuk mempersiapkan pengembangan energi surya yang lebih besar di masa mendatang. Baterai diperlukan untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh panel surya dalam realisasi pembentukan pemanfaatan energi matahari. Penggunaan baterai harus memperhatikan cara pengisian baterai, lama pengisian dan *State of Charge* (SoC). Maka dirancanglah sebuah penelitian mengenai pengisian baterai menggunakan CUK konverter dan estimasi SoC. DC-DC konverter jenis CUK ini berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan masukannya dengan mengatur tegangan pengisian baterai sehingga dijaga konstan pada tegangan 14,6V menggunakan kontrol PI. SoC atau level pengisian baterai akan diestimasi dengan metode *coulomb counting*, sehingga pengisian baterai tidak akan mengalami *overcharge* atau pengisian yang berlebihan yang dapat mempersingkat usia pemakaian baterai. Dengan bantuan simulasi yang dibuat dengan perangkat lunak Matlab, tegangan keluaran konverter dapat dijaga konstan pada 14,6 V dengan mengatur nilai KP 5 dan KI 2972,65. Estimasi SoC baterai terbukti lebih cepat menacapai 100 % ketika arus keluaran konverter nilainya lebih besar atau pada kondisi iradiasi tinggi.

Kata Kunci – CUK konverter, State of Charge (SoC), Constan Volatge

Abstract – According to the ministry of energy and mineral resources, the use of solar energy as an alternative energy source can overcome rising oil prices. Solar energy has an unlimited supply, and solar panels also do not cause pollution. The potential for solar energy in Indonesia is very large, around 4,8 KWh/m², or the equivalent of 112,000 GWp, but its utilization is only around 10 MWp. The government hopes to have 0,87 GW installed by 2025. Thus, it is necessary to increase research on solar energy to prepare for greater development of solar energy in the future. A battery is required to store the energy produced by solar panels in order to realize the full potential of solar energy. Battery users must pay attention to how to charge the battery, the charging time, and the battery's state of charge (SoC). So a study is needed regarding battery charging using a CUK converter and SoC estimation. This CUK-type DC-DC converter functions to raise and lower the input voltage by adjusting the battery charging voltage so that it is maintained constant at 14.6V using PI control. SoC, or battery charge level, will be estimated using the coulomb counting method so that battery charging will not experience overcharging, which can shorten battery life. Through simulations carried out in the Matlab software, the converter voltage can be kept constant at 14.6V by adjusting the values of KP 5 and KI 2972.65. When the connection converter output is larger or in high irradiation conditions, SoC battery estimation is proven to reach 100% faster.

Keywords - CUK Converter, State of Charge (SoC), and Constant Voltage.

I. PENDAHULUAN

Potensi energi terbarukan (EBT) di Indonesia cukup besar, salah satunya energi matahari yang menghasilkan 4,80 kWh/m² per hari [1]. Memanfaatkan energi matahari melibatkan

penggunaan panel surya yang mengubah energi panas menjadi energi listrik. Merancang sistem pemanenan energi surya membutuhkan beberapa komponen pendukung lainnya. Energi yang dihasilkan oleh panel surya disimpan dalam baterai. Berdasarkan karakteristik pengujian panel surya, daya yang dihasilkan oleh panel surya bergantung pada radiasi dan temperatur. Semakin tinggi temperatur permukaan modul surya maka tegangan yang dihasilkan semakin rendah dan arus cenderung konstan [2]. Panel surya menghasilkan tegangan yang bervariasi tergantung pada kondisi radiasi dan suhu, sehingga diperlukan regulator DC-DC untuk mengatur tegangan output panel surya ke tegangan konstan. Konverter yang digunakan adalah CUK konverter dengan kontrol PI untuk menjaga tegangan keluaran konstan.

CUK konverter merupakan salah satu jenis konverter DC-DC yang menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar dari atau kurang dari tegangan masukan. CUK konverter terdiri dari dua kapasitor, dua induktor, saklar daya atau mosfet dan diode sehingga merupakan sistem non-linier orde empat [3]. Dibutuhkan control umpan balik untuk mengatur pensaklaran pada konverter. Kontrol yang digunakan adalah control PI.

Konverter DC memiliki 2 mode operasi, yaitu DCM (*Discontinuous Conduction Mode*) yang arus induktornya mencapai nol, dan CCM (*Continuous Conduction Mode*) yang merupakan mode operasi tunggal di mana arus induktor pada konverter mengalir terus menerus dalam artian tidak pernah mencapai nol [4].

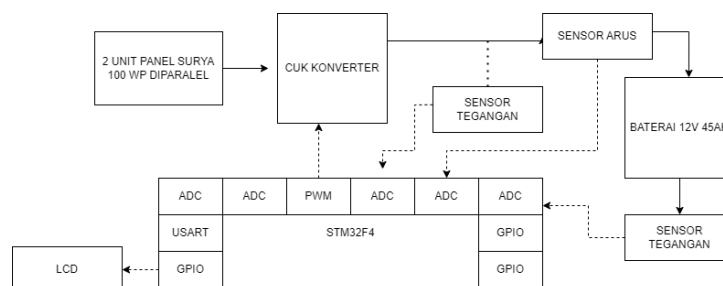
Pengisian baterai dalam energi terbarukan dengan panel surya penting dan harus dipertimbangkan. Selama proses pengisian baterai perlu dilakukan pemantauan nilai SoC (*State of Charge*) agar baterai tidak rusak akibat overcharging atau deep discharge. Terdapat beberapa metode estimasi SoC baterai, salah satunya adalah *coulomb counting*. *Coulomb counting* adalah metode menghitung sisa kapasitas baterai dengan mengumpulkan muatan yang ditransfer masuk atau keluar dari baterai ketika kondisi baterai terbebani [5].

Penelitian ini membahas tentang pemanfaatan panel surya untuk pengisian baterai lead acid dengan monitoring *state of charge* (SoC). Kontrol pada konverter menggunakan kontrol PI dan estimasi SoC dengan metode *coulomb counting*.

II. METODE

A. Perencanaan Sistem

Pada penelitian ini, langkah awal yang dilakukan yaitu mendesain sistem mulai dari panel surya, konverter, baterai, dan kontroler yang digunakan. Berikut, merupakan blok diagram perencanaan sistem.



Gambar 1. Block Diagram Sistem

Gambar 1 menjelaskan sebuah sistem pengisian baterai lead acid menggunakan sumber dari panel surya yang dikonversikan tegangannya oleh CUK *converter* sehingga menghasilkan tegangan konstan yang berfungsi untuk mengisi baterai dengan metode *constan voltage*. Dengan menjaga tegangan keluaran konstan maka diperlukan sebuah control. Pada sistem ini digunakan control PI (*Proportional Integral*). Tegangan dijaga konstan pada 14,6V untuk mengisi baterai 12V 45 Ah. SoC pada baterai dimonitoring dengan metode *coulomb counting*.

Desain sistem yang perlu diperhitungkan meliputi sebagai berikut:

1. *Panel Surya.*

Panel Surya digunakan sebagai *input* dari CUK *converter*. Energy listrik yang dihasilkan oleh panel surya nilainya akan bervariasi bergantung pada perubahan iradiasi dan suhu. Data sheet dari panel surya yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

TABEL 1. SPESIFIKASI PANEL SURYA

Maximum Power (Pmax)	100 W
Voltage at Pmax (Vmp)	18,24 V
Current at pmax (Imp)	5,48 A
Open Circuit Voltage (Voc)	21,8 V
Short Circuit Current (Isc)	5,81 A

Panel surya dirangkai paralel sehingga tegangan *input converter* adalah 18,24 V dan arus *input*-nya 10,96 A pada kondisi maksimum.

2. *Desain CUK Konverter*

Perlu dilakukan perhitungan masing-masing komponen untuk menciptakan CUK konverter yang akan menghasilkan daya sesuai dengan desain. Berikut adalah perhitungan untuk mendapatkan nilai komponen pada CUK konverter:

1. Frekuensi *Switching* = 40kHz
2. Nilai *Duty Cycle*

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{V_{out}}{V_{out}+V_{in}} \\
 &= \frac{14,4}{14,4 + 18,24} \\
 &= 0,441
 \end{aligned}$$

3. Nilai Induktor (Mode CCM)

$$\begin{aligned}
 L_{min1} &\geq \frac{V_{in} \times D}{2 \times f \times I_{in}} \\
 &\geq \frac{18,24 \times 0,44}{2 \times 40000 \times 10,96} \\
 &\geq 9,154 \mu H \\
 L_1 &= 9,154 \mu H \times 10 = 91,54 \mu H \\
 L_{min2} &\geq \frac{V_{in} \times D}{2 \times f \times I_o} \\
 &\geq \frac{18,24 \times 0,44}{2 \times 40000 \times 11,106} \\
 &\geq 9,033 \mu H \\
 L_2 &= 9,033 \mu H \times 10 = 90,33 \mu H
 \end{aligned}$$

4. Nilai kapasitor 2

$$\begin{aligned}
 C_2 &\geq \frac{1-D}{\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) 8L_2 (f)^2} \\
 &\geq \frac{1-0,44}{(1\%) 8 \times 90,33 \times 10^{-6} (40000)^2} \\
 &\geq 48,43 \mu F
 \end{aligned}$$

5. Nilai Resistor Internal

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{V_{out}}{I_{out}} \\
 &= \frac{14,4}{11,106} \\
 &= 1,297 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

6. Nilai Capasitor 1

Ripple tegangan pada kapasitor

$$\begin{aligned}
 \Delta V_{c1} &= 0,5\% (V_{in} - V_{out}) \\
 &= 0,5\% (18,24 - (-14,4)) \\
 &= 0,1632
 \end{aligned}$$

Nilai kapaitor 1

$$C1 = \frac{V_{out} \times D}{R f \Delta V_{c1}}$$

$$= \frac{14,4 \times 0,44}{1,297 \times 40000 \times 0,1632}$$

$$= 748,33 \mu F$$

Parameter dalam membuat CUK konverter secara keseluruhan ditampilkan pada Tabel

2.

TABEL 2. PARAMETER KOMPONEN CUK KONVERTER

Parameter	Nilai
L1	91,54 μ H
L2	90,33 μ H
C1	748,33 μ F
C2	48,43 μ F
Rsnubber	\leq 376,455 Ω
Csnubber	14,61 nF

3. Baterai Lead Acid

Betarai yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis lead acid 12V 45Ah yang dirancang untuk beban penerangan berupa lampu DC 12V 9W. Spesifikasi baterai ditunjukkan pada Tabel

3.

TABEL 3. SPESIFIKASI BATERAI LEAD ACID 12V 45 AH

Parameter	Nilai
Cell Per Unit	6
Voltage Per Unit	12
Capacity	45 Ah 1,80V per cell
Maximum Discharge Current	450A (5sec)
Internal Resistance	8m Ω
Float Charging Voltage	13,6 to 13,8VDC
Recommended Maximum Charging Current	13,5A
Width(mm/inch)	166/6,53
Height(mm/inch)	171/6,73

B. Metode Pengisian Constant Voltage

Pada penelitian ini siklus kerja konverter dikontrol dengan kontrol PI dengan metode *constan voltage* (CV). Metode kontrol tegangan konstan adalah mempertahankan tegangan keluaran *converter* konstan meskipun iradiasi dan suhuberubah. Metode ini membandingkan tegangan referensi dengan tegangan keluaran *converter* sehingga dapat diperhatikan konstan [6].

C. Control PI

Pengontrol proporsional-integral (PI) adalah pengontrol dengan mekanisme umpan balik yang menghitung respons sistem secara proporsional (P) dan integral (I) untuk menyesuaikan sistem dengan tujuan tertentu [7].

Kontrol PI sering digunakan pada industri. Ketika model matematis dari suatu sistem yang dirancang tidak dapat diketahui, sehingga metode analitik tidak dapat digunakan. Proses pemilihan parameter pengontrol yaitu KP dan KI metode Ziegler Nichols menyarankan pengaturan kontrol PI berdasarkan langkah eksperimental respon atau berdasar nilai yang menghasilkan stabilitas ketika kontrol proporsional saja yang diberikan [8].

Rumus tuning Ziegler-Nichols cukup besar untuk meningkatkan kapasitas konverter DC-DC. Urutan desain kontroler adalah sebagai berikut:

1. Parameter proporsional KP dan parameter integral KI ditetapkan nol.
2. Ada peningkatan selangkah demi selangkah di KP sedangkan KI adalah tetap sampai bentuk gelombang tegangan keluaran kira-kira sama dengan referensi tegangan.

3. KP tetap sedangkan parameter integralnya tetap meningkat. Parameter dipilih sesuai dengan transien waktu pendek, tegangan osilasi kecil [9].

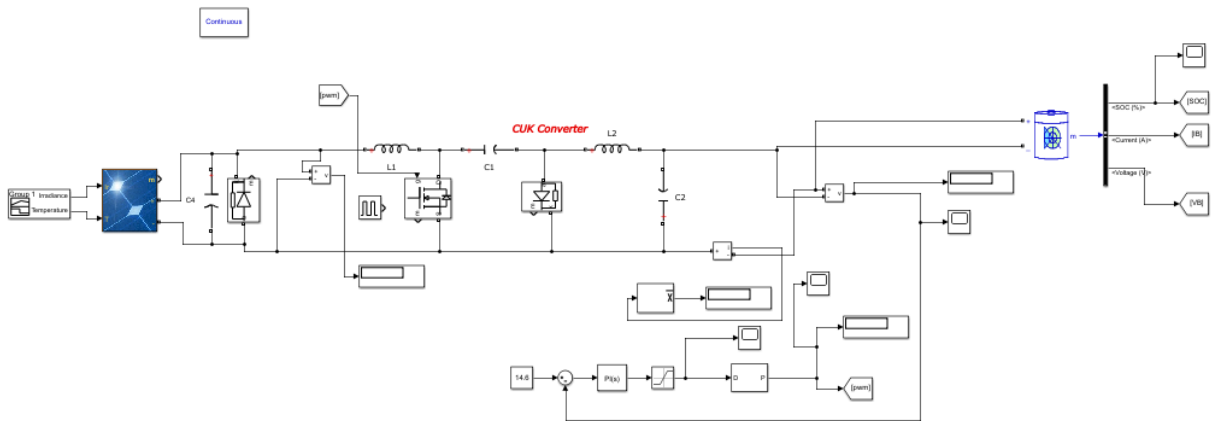
D. Coulomb Counting

Estimasi *State of Charge* (SoC) perlu diperhatikan dalam pengaplikasian baterai. Estimasi SoC digunakan untuk mengetahui level kapasitas baterai sehingga tidak terjadi *over charge* atau *over discharge*. Metode *coulomb counting* dilakukan dengan cara menghitung kapasitas yang tersisa pada baterai dengan menjumlahkan muatan arus yang masuk (ketika *charge*) atau yang keluar (ketika *discharge*) dari baterai. Metode *coulomb counting* cukup akurat dalam estimasi SoC. SoC metode *coulomb counting* dapat dihitung dengan menjumlahkan SoC awal yang didapatkan dengan pengukuran pada terminal baterai dengan penambahan arus dibandingkan dengan kapasitas baterai persatuan waktu [10]. Rumus coulomb counting ditunjukkan pada persamaan berikut

$$SOC(t) = SOC \text{ awal} + \frac{I(A)}{Ah} \Delta t \tag{1}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

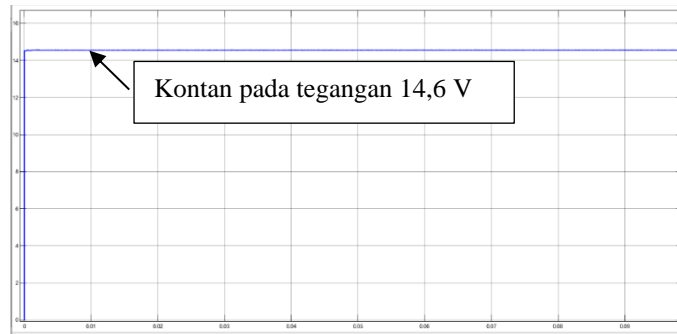
Desain sistem diuji melalui simulasi pada *software* Matlab. Rangkaian terdiri dari sumber panel surya 100 wp dirangkai paralel, CUK *converter*, baterai 12V 45 Ah, dan kontrol PI. Hasil pengukuran tegangan dan arus akan ditampilkan untuk dibandingkan dengan sistem tanpa kontrol (*open loop*). *Open loop* dimaksudkan dengan memberikan *switching* pada gate mosfet dengan menggunakan *duty cycle* manual sesuai perhitungan desain atau tanpa adanya *feedback*. Rangkaian kerja *close loop* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Simulasi

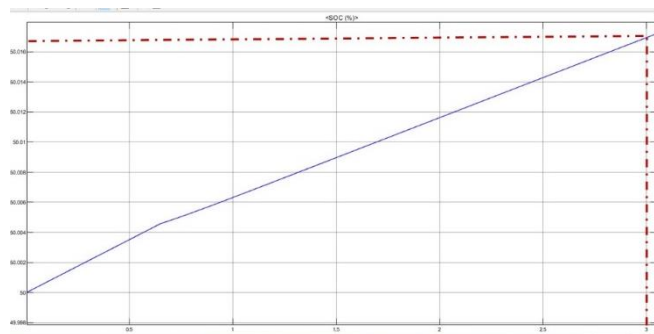
TABEL 4. DATA HASIL SIMULASI

Irradian	Open Loop			Close Loop		
	Vin	Vo	Io	Vin	Vo	Io
1000	17,45	13,23	13,26	17,79	14,6	11,82
950	17,32	12,22	12,64	17,69	14,6	10,7
900	17,2	12,21	12	17,58	14,6	10,17
850	17,07	12,21	11,36	17,48	14,59	9,64
800	16,95	12,1	9,83	17,36	14,58	9,1
750	16,8	12,19	10,04	17,24	14,58	8,52
700	16,68	12,19	9,37	17,13	14,58	7,9
650	16,54	12,18	8,7	17,01	14,57	7,4
600	16,42	12,17	7,14	16,9	14,57	6,8
550	16,28	12,17	7,33	16,78	14,57	6,3
500	16,14	12,15	6,64	16,67	14,56	5,7
450	16,01	12,13	6,31	16,56	14,56	5,1
400	15,81	12,11	5,93	16,42	14,56	4,5

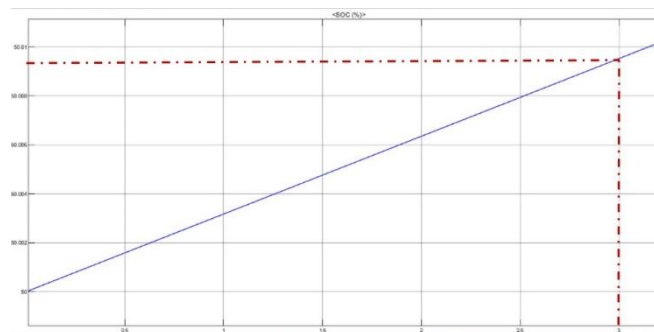


Gambar 3. Tegangan Keluaran Konverter (*Constan Voltage*)

Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa, konverter tanpa kontrol akan menghasilkan tegangan *output* jauh dari *set point* dikarenakan tidak ada *feedback error* yang akan dibandingkan oleh kontrol, sehingga tidak akan memunculkan nilai *duty cycle* baru yang akan menghasilkan *output* mendekati *set point*. Dibandingkan dengan konverter dengan kontrol PI nilai tegangan ouputnya konstan pada kisaran 14,6V. Arus keluaran *converter* sebanding dengan iradian yang didapatkan. Semakin kecil nilai iradian maka arus keluaran konverter akan semakin kecil. Inisialisasi SoC baterai pada simulasi diatur dalam keadaan 50%, sehingga dapat dilihat kenaikan SoC selama pengisian dengan metode *constan voltage* (CV). Metode CV hanya menjaga tegangan tetap konstan namun dapat terjadi perubahan arus yang signifikan jika terjadi perubahan iradiasi. Pada simulasi dilakukan pengujian SoC ketika iradiasi 900 w/m² dan dibandingkan dengan iradiasi 400 w/m². Pada keadaan sebenarnya diharapkan estimasi SoC menggunakan metode *coulomb counting*, dimana perhitungan SoC didasarkan pada besarnya arus masuk (*charging*) baterai. Berikut adalah perbandingan estimasi SoC pada Iradian 900 w/m² dan 400 w/m²



Gambar 4. Grafik SoC iradian 900 w/m²



Gambar 5. Grafik SoC iradian 400 w/m²

Dari hasil simulasi menunjukkan, pengisian baterai lebih cepat dilakukan ketika Iradian 900 w/m² dikarenakan arusnya 10,7A jika dibandingkan dengan iradian 400 w/m² yang mana arusnya adalah 5,1A. Berdasarkan rumus SoC baterai coulomb counting, jika dibandingkan lama pengisian baterai adalah sebagai berikut:

$$SOC(t) = SOC \text{ awal} + \frac{I(A)}{Ah} \Delta t$$

$$100 \% = 30\% + \frac{10,7A}{45Ah} \Delta t$$

$$100 \% = 30\% + 23,7\% \frac{1}{h} \Delta t$$

$$70\% = 23,7\% \frac{1}{h} \Delta t$$

3 h = ΔtIradian 900 w/m²

$$100 \% = 30\% + \frac{5,1A}{45Ah} \Delta t$$

$$100 \% = 30\% + 11,3\% \frac{1}{h} \Delta t$$

$$70\% = 11,3\% \frac{1}{h} \Delta t$$

6,2 h = Δt Iradian 400 w/m²

IV. KESIMPULAN

Pada simulasi pengisian baterai lead acid 12V 45Ah dengan software matlab menunjukkan hasil bahwa suatu sistem pengisian tanpa kontrol (*open loop*) menghasilkan tegangan keluaran yang tidak konstan dan tidak sesuai dengan kebutuhan baterai. Dibandingkan dengan sistem pengisian baterai dengan kontrol PI menghasilkan keluaran konverter dengan hasil yang konstan, meskipun ada sedikit penurunan yang diakibatkan oleh berkurangnya iradian. Kontrol PI pada simulasi dengan nilai KP 5 dan KI 2972.65 dapat menghasilkan *constan voltage* yaitu 14,6V. Nilai SoC pada simulasi menunjukkan bahwa lama waktu pengisian berkaitan dengan iradiasi matahari dan arus yang dihasilkan. Semakin besar arus yang dihasilkan maka semakin singkat waktu pengisian baterai hingga penuh. Berdasarkan dengan perhitungan *coulomb counting*, lama waktu tergantung pada arus pengisian baterai. Pada inialisasi SoC 50 %, dengan iradiasi 900 w/m² yang menghasilkan arus 10,7A membutuhkan waktu 3 jam hingga baterai menjadi penuh. Sedangkan, pada iradiasi 400 w/m² yang menghasilkan arus 5,1 A membutuhkan waktu 6,2 jam hingga baterai menjadi SoC 100 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Tim Jurnal Elektro Polbeng yang telah meluangkan waktu untuk membuat template jurnal, sehingga penulis lebih mudah untuk menuangkan isi penelitian.

REFERENSI

- [1] “Potensi Energi Baru Terbarukan (EBT) Indonesia,” *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*, 2008. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/potensi-energi-baru-terbarukan-ebt-indonesia#:~:text=Indonesia memiliki Potensi Energi Baru,dan energi nuklir 3 GW.>
- [2] Suwarti, Wahyono, and B. Pasetiyo, “Analisis Pengaruh Intensitas Matahari, Suhu Permukaan & Sudut Pengarah Terhadap Kinerja Panel Surya,” *J. Tek. Energi*, vol. 14, no. 3, pp. 78 – 85, 2018.
- [3] B. K. Kushwaha and A. Narain, “Controller Design for CUK Converter Using Model Order Reduction,” in *2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, IEEE, 2012, pp. 1–5.
- [4] M. A. Lababan, M. Facta, and B. Winardi, “Analisis Perbandingan Hasil Operasi CCM

- Dan DCM DC Chopper Tipe Buck Boost Berbasis Transistor,” *Transient*, vol. 4, no. 3, pp. 582–588, 2015.
- [5] D. R. S. Nugraha, A. B. Pangestu, and F. Husnayain, “State of Charge Estimation of Lead-Acid Battery with Coulomb Counting and Feed-Forward Neural Network Method,” in *2020 FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*, 2020, pp. 119–124. doi: 10.1109/FORTEI-ICEE50915.2020.9249870.
- [6] S. Alagammal, N. R. Prabha, and I. Aarthy, “Centralized Solar PV Systems for Static Loads Using Constant Voltage Control Method,” *Circuits Syst.*, vol. 7, no. 13, pp. 4213–4226, 2016, doi: 10.4236/cs.2016.713346.
- [7] K. W. B. Pamungkas and B. Fandidarma, “Pengaturan Mass-Spring-Damper menggunakan Kontroler PI dan Fuzzy,” *ELECTRA Electr. Eng. Artic.*, vol. 1, no. 2, pp. 34–40, 2021, doi: 10.25273/electra.v1i2.8964.
- [8] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Tokyo: Prentice Hall, 2010.
- [9] M. Q. Duong, V. T. Nguyen, G. N. Sava, M. Scripcariu, and M. Mussetta, “Design and Simulation of PI-Type Control for The Buck Boost Converter,” in *2017 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, 2017, pp. 79–82. doi: 10.1109/CIEM.2017.8120769.
- [10] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh, “Enhanced Coulomb Counting Method for Estimating State-of-Charge and State-of-Health of Lithium-Ion Batteries,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.021>.