

Rancang Bangun Stabilisasi Pengisian Baterai Sepeda Listrik Menggunakan *Buck-Boost Converter*

¹Adi Kurniawan Saputro, ²Achmad Fiqhi Ibadillah, ³Amira Rohadatul Aisy, ⁴Dian Neipa Purnamasari, ⁵Deni Tri Laksono, ⁶Muttaqin Hardiwansyah

^{1,2,3,4,5,6} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Trunojoyo Madura, Bangakalan

¹adi.kurniawan@trunojoyo.ac.id, ²fiqhi.ibadillah@trunojoyo.ac.id, ³amiraaisy004@gmail.com, ⁴dian.neipa@trunojoyo.ac.id,

⁵deni.laksono@trunojoyo.ac.id, ⁶muttaqin.hardiwansyah@trunojoyo.ac.id

Abstract - The advancement of electric vehicle technology, particularly electric bicycles, demands an efficient and stable charging system to maintain battery performance and longevity. This study aims to design a stable battery charging system for electric bicycles using a Buck-Boost Converter controlled by a PID controller based on the Ziegler-Nichols method. The system allows the adjustment of input voltage from a bicycle generator to match the battery's requirements, whether by increasing (boost) or decreasing (buck) the voltage as needed. To achieve voltage stability and efficiency, a PID controller is employed to regulate the duty cycle through a digital potentiometer. The system was tested with input voltage variations ranging from 7V to 30V, and the results showed that the output voltage was successfully stabilized at 25,2V, with a maximum deviation of $\pm 0,4V$. The output current was also maintained at a stable level, not exceeding 2A, during the charging of a 24V/10Ah lithium-ion battery. Using the trial-and-error method, K_u and P_u values were determined to be 4,0 and 0,6, respectively. Based on the Ziegler-Nichols tuning method, the resulting PID parameters were $T_i = 0,30$; $T_d = 0,80$; $K_p = 2,40$; $K_i = 8,00$; and $K_d = 0,18$, achieving a settling time of 3 seconds and an overshoot of less than 7,7%. The charging system is also equipped with real-time voltage and current monitoring using two PZEM-017 sensors and an LCD I2C display. The results indicated that the charging process was safe, with no overcharging observed, and the battery temperature remained below 40°C, averaging 27,5 °C throughout the charging period. This research successfully enhances charging stability, extends battery lifespan, and offers a self-sustaining, pedal-powered charging solution that is both efficient and environmentally friendly.

Keywords — *Buck-Boost Converter, Charging Efficiency, Electric bicycle, Lithium-Ion Battery, PID Ziegler-Nichols, Voltage Stability*

Abstrak—Perkembangan teknologi kendaraan listrik, khususnya sepeda listrik, menuntut sistem pengisian daya yang efisien dan stabil guna menjaga performa dan umur baterai. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengisian baterai sepeda listrik yang stabil menggunakan *Buck-Boost Converter* dengan kendali PID metode Ziegler-Nichols. Sistem ini memungkinkan penyesuaian tegangan *input* dari generator sepeda menjadi sesuai dengan kebutuhan baterai, baik saat perlu ditingkatkan (*boost*) maupun diturunkan (*buck*). Untuk mencapai kestabilan dan efisiensi, pengontrol PID digunakan dalam pengaturan *duty cycle* melalui digital potensiometer. Sistem diuji dengan variasi tegangan *input* antara 7V hingga 30V, dan hasil menunjukkan bahwa tegangan *output* berhasil distabilkan pada 25,2V dengan deviasi maksimal sebesar $\pm 0,4V$. Arus *output* juga dijaga stabil tidak lebih atau max 2A, saat pengisian baterai lithium-ion 24V/10Ah. Parameter K_u 4,0 dan P_u 0,6 yang diperoleh dari

metode *trial and error* dan didapatkan parameter lain yang diperoleh menggunakan metode PID Ziegler-Nichols adalah T_i 0,30; T_d 0,80; K_p 2,40; K_i 8,00; dan K_d 0,18, dengan *settling time* sebesar 3 detik dan *overshoot* kurang dari 7,7%. Sistem pengisian ini juga dilengkapi dengan pemantauan tegangan dan arus secara *real-time* menggunakan dua sensor PZEM-017 dan tampilan LCD I2C. Hasil menunjukkan bahwa pengisian berlangsung aman tanpa overcharge, serta suhu baterai tetap terjaga di bawah 40 °C dengan rata-rata 27,5 °C selama proses pengisian. Penelitian ini berhasil meningkatkan kestabilan pengisian, memperpanjang umur baterai, dan memberikan solusi pengisian mandiri berbasis energi pedal sepeda yang efisien dan ramah lingkungan.

Kata Kunci— *Baterai Lithium-Ion, Buck-Boost Converter, Efisiensi Pengisian, PID Ziegler-Nichols, Sepeda listrik, Stabilitas Tegangan*

I. Pendahuluan

Sepeda telah lama menjadi alat transportasi tradisional yang digerakkan dengan kayuhan pedal kaki. Namun perkembangan teknologi mendorong evolusi sepeda konvensional menjadi sepeda listrik yang menggabungkan kenyamanan, efisiensi energi, dan teknologi mutakhir dengan menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama, sehingga memungkinkan pengguna untuk menempuh jarak yang lebih jauh tanpa mengeluarkan banyak tenaga fisik. Selain itu, sepeda listrik juga ramah lingkungan karena mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan emisi karbon. Popularitasnya yang terus meningkat menunjukkan potensinya sebagai solusi transportasi hijau, inovatif, dan berkelanjutan di masa depan. Dengan berbagai manfaat ini, sepeda listrik tidak hanya memenuhi kebutuhan mobilitas individu tetapi juga berperan sebagai bagian integral dari transisi menuju sistem transportasi yang lebih ramah lingkungan dan efisien [1].

Salah satu elemen utama dalam sistem sepeda listrik adalah motor sebagai penggerak roda sekaligus penghasil torsi untuk mempercepat kendaraan. Dalam implementasinya, sepeda listrik umumnya menggunakan motor DC karena kemampuannya untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik secara efisien serta memberikan kontrol kecepatan yang halus dan responsif, bahkan dapat difungsikan sebagai generator untuk mengubah energi mekanik kembali menjadi energi listrik pada sistem regeneratif. Namun, dalam pembuatan prototipe penelitian ini, peneliti memilih menggunakan motor AC 3 fasa sebagai alternatif karena lebih murah dan mudah ditemukan dibandingkan motor DC dengan spesifikasi setara.

Kendati demikian, motor AC memerlukan inverter untuk dapat bekerja dengan sumber baterai DC sehingga penggunaannya hanya bersifat sementara untuk validasi konsep secara ekonomis. Nantinya, pada tahap implementasi aktual, motor DC akan digunakan karena selain dapat digerakkan langsung oleh baterai DC, motor ini juga memungkinkan untuk berfungsi ganda sebagai penggerak dan generator dalam sistem sepeda listrik [2].

Sepeda listrik yang dikenal efisien dan bebas polusi masih memiliki kelemahan terutama pada aspek pengisian baterai. Proses pengisian sering menghadapi masalah seperti ketidakstabilan tegangan dan arus selama proses pengisian sehingga dapat mengakibatkan pengisian yang tidak optimal dan berpotensi merusak baterai. Selain itu, waktu pengisian yang lama sering menjadi kendala, terutama bagi pengguna yang memerlukan kendaraan mereka siap digunakan dalam waktu singkat. Penggunaan charger yang tidak sesuai atau kualitas komponen yang rendah juga dapat mengurangi efisiensi pengisian dan umur baterai. Dengan tantangan-tantangan ini, penting untuk mengembangkan sistem pengisian yang lebih efektif dan stabil, guna meningkatkan keandalan sepeda listrik sebagai solusi transportasi yang berkelanjutan [3].

Kondisi tersebut sejalan dengan temuan beberapa penelitian sebelumnya yang menyoroti pentingnya sistem pengisian yang lebih stabil dan adaptif. Putra *et al.* (2024) melakukan penelitian tentang rancang bangun PID *controller buck-boost converter* pada pembangkit listrik pico-hydro yang berhasil menstabilkan tegangan dengan menurunkan error dari 12% menjadi 0,05% [4]. Penelitian tentang kontrol PID pada pembangkit listrik tenaga hybrid yang dilakukan oleh Aziz *et al.* (2022) menunjukkan kendali PID mampu menjaga tegangan mendekati *setpoint* 13,4V dengan error relatif kecil serta daya yang dihasilkan sebesar 14,85 Watt [5]. Penelitian yang dilakukan oleh Atmajaya *et al.* (2023) tentang pemodelan *buck-boost converter* dengan kendali *artificial neural network* pada sistem *photovoltaic* yang membuktikan efektivitas *buck-boost converter* dalam menjaga tegangan pengisian baterai antara 12,93V hingga 14,01V [6]. Widhiawan *et al.* (2021) melakukan penelitian tentang perancangan sistem *charging* baterai menggunakan *buck-boost converter* berbasis *Arduino Nano* yang menunjukkan efisiensi pengisian mencapai 90,06% [7].

Pengembangan sistem pengisian baterai perlu dilakukan karena sistem yang ada seringkali tidak dilengkapi kendali otomatis, sehingga pengisian kurang optimal, memakan waktu lama, dan beresiko memperpendek umur baterai. Untuk mengatasi masalah ini, penelitian ini bertujuan merancang sistem pengatur tegangan DC menggunakan modul *Buck Boost converter*. *Buck Boost converter* memiliki peran krusial dalam pengisian baterai sepeda listrik untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai dengan tegangan output yang diinginkan [8]. Kemampuan ini dapat menjamin efisiensi dan melindungi baterai dari kerusakan akibat tegangan yang tidak sesuai. Dengan implementasi *Buck-Boost converter*, pengguna dapat menikmati performa yang lebih optimal serta umur pakai baterai yang lebih panjang [9].

Dalam meningkatkan efisiensi dan keandalan pengisian baterai sepeda listrik, sistem kontrol yang stabil dan adaptif memainkan peran penting dalam memastikan proses pengisian berjalan optimal. Salah satu pendekatan yang paling

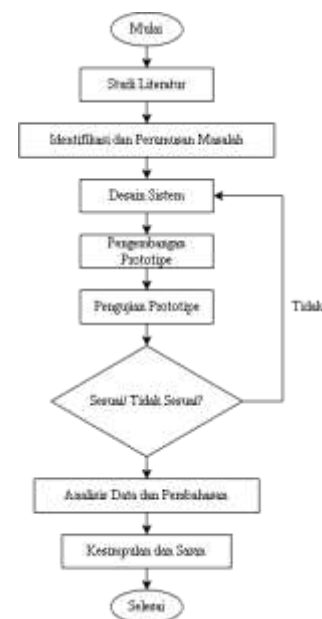
efektif adalah penggunaan pengendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*), yang terdiri dari komponen proporsional (P) untuk memberi respon sesuai besar kesalahan, integral (I) untuk mengatasi kesalahan tetap dan meminimalkan kesalahan jangka panjang, serta derivatif (D) untuk meramalkan kesalahan di masa depan [10]. Ketika diterapkan pada *Buck-Boost converter*, pengendali PID memungkinkan penyesuaian tegangan dan arus secara presisi selama proses pengisian, menjamin baterai diisi secara efisien, aman, dan bebas dari risiko seperti *overcharging* atau kerusakan akibat ketidakstabilan daya. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan performa sepeda listrik tetapi juga memperpanjang umur baterai [11].

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berarti dalam mendorong kemajuan teknologi sepeda listrik yang lebih *eco-friendly* dan berkelanjutan sehingga pengguna sepeda listrik dapat merasakan manfaat berupa peningkatan efisiensi dan keandalan sistem pengisian baterai yang dapat meningkatkan pengalaman berkendara dan umur pakai perangkat. Selain itu, penelitian ini juga berpotensi memberikan panduan strategis bagi industri terkait khususnya dalam merancang sistem pengisian daya yang lebih optimal, hemat energi, dan kompatibel dengan kebutuhan teknologi masa depan.

II. Metode Penelitian

A. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan prosedur yang saling berhubungan satu sama lain. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

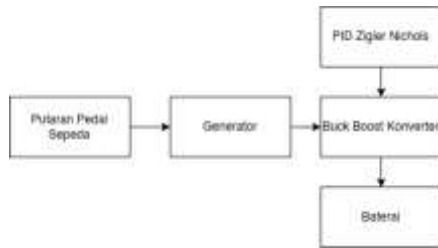


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Perancangan Sistem

1. Diagram Blok Sistem

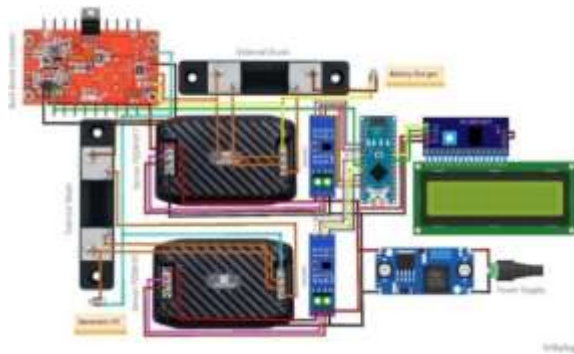
Blok diagram pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. Blok Diagram

Diagram blok ini menggambarkan sistem pengisian baterai pada sepeda listrik yang dirancang untuk memberikan kemudahan dan efisiensi bagi pengguna. Sistem ini dirancang untuk memudahkan pengguna dalam mengisi baterai, memastikan daya yang dihasilkan aman dan efisien, sekaligus memperpanjang umur baterai.

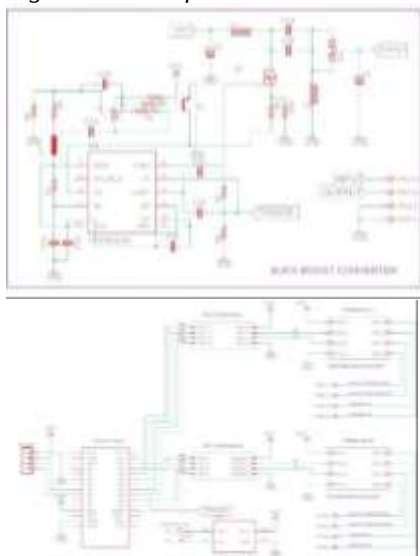
2. Perancangan Hardware



Gambar 3. Perancangan Hardware

Gambar ini menampilkan rangkaian komponen yang digunakan dalam sistem untuk menstabilkan tegangan menggunakan *Buck-Boost Converter* sebagai bagian dari pengisian baterai sepeda listrik dengan Inputan listrik yang dihasilkan dari putaran pedal.

3. Perancangan Desain Software



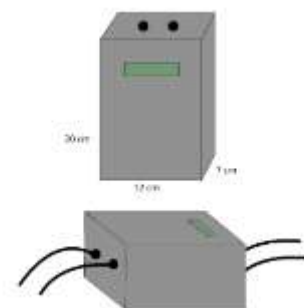
Gambar 4. Skema Rangkaian

Rangkaian ini terdiri dari tiga bagian utama: *Buck-Boost Converter*, Arduino Nano, dan modul sensor PZEM-017. Bagian *Buck-Boost Converter* berfungsi untuk mengatur tegangan *Input* menjadi lebih tinggi atau lebih rendah sesuai kebutuhan [8]. Komponen utamanya adalah IC LTC1625 yang mengontrol proses konversi, MOSFET N-Channel HY1707P Q1 sebagai saklar untuk mengalirkan arus, serta induktor L1 dan L2 yang menyimpan energi. Komponen pendukung seperti kapasitor (C1, C2, dan lainnya) berfungsi menyimpan dan menyaring tegangan agar lebih stabil dalam periode tertentu [12]. Sementara resistor (R1-R6) mengatur arus dengan menghambat aliran listrik dan memberikan umpan balik [13]. Dioda D1 membantu memastikan arus hanya mengalir ke satu arah [14].

Bagian Arduino Nano bertindak sebagai otak dari sistem ini yang menyediakan semua komponen yang dibutuhkan untuk mendukung kinerja mikrokontroler seperti untuk membaca data dari sensor, mengolah informasi, dan mengontrol komponen lainnya [15]. Data dari sensor dikirim menggunakan modul TTL to RS-485, yang mengonversi sinyal komunikasi agar dapat diterima oleh modul PZEM-017. Sensor PZEM-017 bertugas mengukur tegangan, arus, daya, dan energi listrik [16]. Terdapat dua modul PZEM-017 di sini: satu mengukur sebelum tegangan diatur oleh *Buck-Boost Converter* (PZEM-017), dan satu lagi mengukur setelah tegangan dikonversi (PZEM-017).

Bagian terakhir adalah modul DC-DC *Step Down*, yang berfungsi untuk menurunkan tegangan *Input* ke level yang diinginkan. Modul ini memiliki *Input* dan *Output* untuk mengatur arus listrik yang sesuai dengan kebutuhan spesifik [17]. Arduino juga berperan dalam mengontrol proses ini melalui sinyal *trigger*. Secara keseluruhan, tegangan listrik dari sumber masuk ke *Buck-Boost Converter*, lalu diatur menjadi lebih tinggi atau lebih rendah. Sensor PZEM-017 mengukur tegangan dan arus sebelum dan sesudah proses konversi, sementara Arduino Nano mengolah data tersebut dan menampilkannya melalui modul tampilan. Kemudian saat baterai telah terisi penuh, BMS menghentikan pengisian baterai untuk menghindari *overcharge*.

4. Perancangan Mekanik



Gambar 5. Desain Alat Buck-Booster Converter

Pada bagian depan, box ini dilengkapi dengan layar untuk menampilkan informasi sistem, sedangkan di sisi samping terdapat soket koneksi yang digunakan untuk menghubungkan sumber daya.



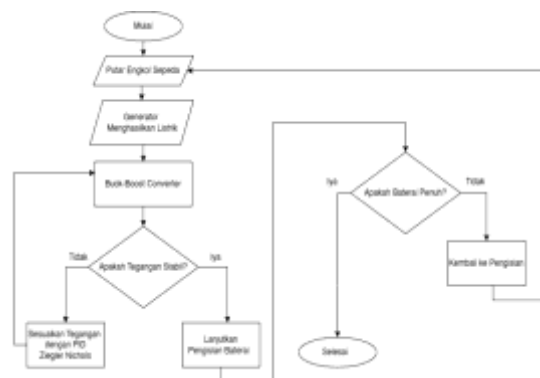
Gambar 6. Perancangan Desain Mekanik

Alat ini dirancang agar bisa menghasilkan listrik dari kayuhan pedal dengan sistem penggerak rantai, yang kemudian dikonversi menjadi tegangan yang sesuai untuk mengisi baterai. Kayuhan pedal akan memutar gear besar yang terhubung dengan motor atau generator melalui rantai, sehingga bisa menghasilkan energi listrik. Energi listrik ini lalu diatur menggunakan *Buck-Boost converter* yang ada di dalam kotak putih untuk menjaga agar tegangan tetap stabil saat masuk ke baterai. Di bagian atas kotak tersebut juga terdapat layar tampilan yang digunakan untuk memantau kondisi pengisian, seperti tegangan dan arus yang masuk. Komponen pedal dan *gear* besar ditempatkan di sisi kanan alat dan terhubung langsung ke dinamo melalui rantai untuk mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik.

C. Flowchart

1. Flowchart Sistem

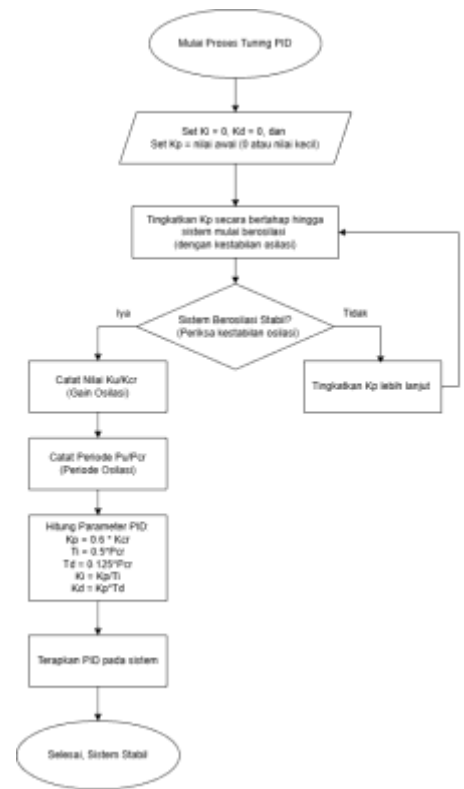
Flowchart sistem dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 7. Flowchart Sistem

Flowchart dari sistem pengisian baterai sepeda listrik dengan Buck Boost converter menggunakan metode PID Ziegler Nichols.

2. Perancangan Sistem PID



Gambar 8. Flowchart Tuning PID

Flowchart ini menjelaskan tahapan dalam menentukan parameter PID agar sistem kendali bekerja stabil. Proses diawali dengan mengatur nilai awal konstanta ($K_i=0$, $K_d=0$, dan K_p kecil), kemudian meningkatkan K_p secara bertahap hingga sistem mulai berosilasi. Jika sistem berosilasi stabil, nilai gain osilasi (K_u) dan periode osilasi (P_u) dicatat. Selanjutnya parameter PID dihitung menggunakan rumus *Ziegler-Nichols*. Hasil parameter kemudian diterapkan ke sistem sehingga sistem menjadi stabil.

3. Perancangan Sistem Buck-Booster Converter



Gambar 9. Flowchart Sistem Buck-Boost Converter

Flowchart ini menjelaskan proses pengisian baterai lithium-ion dengan sumber energi yang berasal dari putaran pedal sepeda. Proses dimulai ketika pedal

sepeda diputar yang menggerakkan generator untuk mengubah energi mekanik menjadi listrik. Listrik DC yang dihasilkan oleh motor ini disebut sebagai tegangan Input (V_{in}). Selanjutnya, sensor PZEM017 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus listrik yang dihasilkan. Data yang diperoleh dari sensor ini dikirim ke Arduino nano. Setelah itu, sistem menghitung error antara tegangan Input (V_{in}) dan tegangan target atau setpoint ($V_{setpoint}$). Perhitungan error ini digunakan dalam algoritma PID Controller untuk menentukan nilai duty cycle berdasarkan parameter K_p , K_i , dan K_d . Sistem kemudian memeriksa apakah tegangan Input lebih kecil dari 25,2V. Jika tegangan lebih kecil dari 25,2V, maka sistem akan beralih ke Mode Boost untuk menaikkan tegangan. Jika tegangan lebih besar atau sama dengan 25,2V, sistem akan masuk ke Mode Buck untuk menurunkan tegangan agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai.

D. Skema Pengujian

1. Pengujian Baterai: Mengukur kapasitas, stabilitas tegangan, arus, dan durasi pengisian untuk memastikan kinerja optimal.
2. Pengujian Generator: Mengevaluasi kemampuan mengubah energi mekanik pedal menjadi listrik serta kestabilan tegangan dan arus.
3. Pengujian Sensor: Memastikan akurasi sensor PZEM017 dalam mengukur tegangan dan arus.
4. Pengujian PID Ziegler-Nichols: Menguji tuning parameter PID (K_p , K_i , K_d) pada Buck-Boost converter agar tegangan dan arus stabil saat pengisian baterai.
5. Pengujian Buck-Boost Converter: Mengukur performa konversi tegangan pada mode Buck (turun) dan Boost (naik).

III. Hasil dan Pembahasan

A. Alat

Berdasarkan hasil penelitian, alat yang telah berhasil dirancang dan direalisasikan mampu menjalankan fungsinya sebagai sistem pengisian baterai sepeda listrik yang stabil dan efisien. Sistem ini memanfaatkan energi mekanik dari kayuhan pedal, yang dikonversi menjadi energi listrik oleh generator, kemudian distabilkan menggunakan *Buck-Boost Converter*. Penggunaan metode kontrol PID Ziegler-Nichols terbukti efektif dalam menjaga kestabilan tegangan dan arus selama proses pengisian baterai, sehingga menghindari risiko *overcharging* maupun *undercharging*. Selain itu, sensor PZEM017 yang mampu memberikan data pengukuran tegangan dan arus secara akurat, yang ditampilkan secara *real-time* melalui LCD I2C. Dengan demikian, alat ini tidak hanya berfungsi secara optimal sesuai dengan tujuan penelitian, tetapi juga berpotensi untuk diterapkan sebagai solusi mandiri dalam pengisian daya sepeda listrik yang hemat energi dan ramah lingkungan.



Gambar 1. Alat

B. Pengujian Pengisian Baterai

Pengujian pengisian baterai dilakukan untuk mengetahui seberapa stabil tegangan *Output* dari *Buck-Boost converter* selama proses pengisian berlangsung, serta untuk memantau temperatur baterai sebagai indikator keamanan sistem.

Tabel 1. Pengujian Pengisian Baterai

No	V_{in}	V_{Out}	VB	Waktu	Suhu
1	15,42	25,21	22,89 27%	14:28	29,9°C
2	16,84	25,32	22,91 28%	14:30	29,6°C
3	20,54	25,20	22,95 29%	14:34	29,7°C
4	20,61	25,01	22,96 30%	14:38	29,6°C
5	19,78	25,08	23,00 31%	14:40	29,5°C
6	19,29	25,24	23,12 35%	14:42	29,4°C
7	18,55	25,24	23,22 38%	14:45	29,4°C
8	18,31	25,24	23,28 40%	14:47	29,4°C
9	14,66	25,24	23,37 42%	14:48	28,8°C
10	11,42	25,24	23,44 45%	14:55	28,8°C
11	16,76	25,08	23,56 48%	15:00	28,8°C
12	4,55	25,21	23,60 49%	15:08	28,7°C
13	4,84	25,34	23,62 50%	15:08	28,7°C
14	4,83	25,34	23,69 52%	15:08	28,7°C
15	4,83	25,33	23,71 53%	15:09	28,7°C
16	4,85	25,35	23,82 56%	15:09	28,2°C
17	26,40	25,31	23,86 58%	15:10	27,9°C
18	4,49	25,21	23,98 61%	15:14	27,7°C
19	4,55	25,24	24,07 64%	15:14	27,7°C
20	4,40	25,22	24,17 67%	15:15	27,5°C
21	4,54	25,23	24,21 69%	15:15	27,5°C
22	4,52	25,22	24,25 70%	15:15	27,5°C
23	16,28	23,50	24,32 72%	15:25	27,5°C
24	18,41	23,78	24,41 75%	15:25	27,5°C
25	19,37	25,24	24,43 76%	15:56	27,5°C
26	25,13	25,31	24,53 79%	15:56	27,5°C
27	4,36	25,01	24,58 80%	15:59	27,5°C
28	4,45	25,19	24,60 81%	16:00	27,5°C
29	4,38	25,29	24,68 83%	16:00	27,5°C
30	4,41	25,22	24,75 85%	16:00	27,5°C
31	12,89	25,16	24,77 86%	16:08	27,5°C
32	4,37	24,89	24,85 88%	16:09	27,5°C
33	11,66	23,46	24,91 90%	16:10	27,5°C

No	V_in	V_Out	VB	Waktu	Suhu
34	13,95	25,26	24,96 92%	16:10	27,5°C
35	14,34	25,30	25,05 95%	16:11	27,5°C
36	16,92	25,34	25,11 97%	16:11	27,5°C
37	14,44	25,26	25,17 99%	16:12	27,5°C
38	13,82	25,35	25,20 100%	16:12	27,5°C

Pengujian ini dilakukan sebanyak 2 kali dari 27% sampai 80% dan 80% sampai 100%, pada awal pengujian, baterai berada dalam kondisi *terdischarge* dengan tegangan sekitar 22,89 V dan kemudian mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai 25,20 V setelah proses pengisian selama 1 jam 44 menit. Suhu baterai selama pengujian juga diukur dan menunjukkan kestabilan pada sekitar 28°C, yang menandakan bahwa tidak terjadi kenaikan suhu berlebih atau *overheat*. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem *Buck-Boost converter* yang dikendalikan oleh PID mampu menjaga kestabilan tegangan *Output* pada nilai 25,2V tanpa menyebabkan panas berlebih pada baterai. Hal ini juga mengindikasikan bahwa proses pengisian berlangsung aman, efisien, dan dapat digunakan untuk diaplikasikan dalam sistem sepeda listrik.

C. Pengujian Generator

Pengujian generator bertujuan untuk mengetahui hubungan antara kecepatan putaran pedal terhadap tegangan *Output* yang dihasilkan. generator diuji dengan variasi putaran mulai dari 195 RPM hingga 1155 RPM.

Tabel 2. Pengujian Generator

No	Kecepatan	V_in	V_out
1	RPM: 195	6,11	16,40
2	RPM: 240	10,57	23,46
3	RPM: 360	17,80	24,50
4	RPM: 375	14,83	24,49
5	RPM: 405	11,74	23,46
6	RPM: 420	12,47	23,86
7	RPM: 450	14,19	24,09
8	RPM: 465	15,72	24,39
9	RPM: 555	18,79	24,62
10	RPM: 660	19,89	24,69
11	RPM: 675	21,36	24,84
12	RPM: 690	22,34	25,08
13	RPM: 705	21,84	24,84
14	RPM: 750	22,49	25,08
15	RPM: 780	24,33	25,24
16	RPM: 795	24,62	25,25
17	RPM: 795	25,45	25,43
18	RPM: 825	27,27	25,49
19	RPM: 870	27,37	25,43
20	RPM: 885	27,10	25,54
21	RPM: 900	27,10	25,54
22	RPM: 900	26,95	25,54
23	RPM: 900	27,22	25,55
24	RPM: 930	27,37	25,55
25	RPM: 945	26,37	25,55
26	RPM: 945	26,04	25,62
27	RPM: 1110	24,94	25,25
28	RPM: 1155	26,04	25,62

No	Kecepatan	V_in	V_out
29	RPM: 1155	27,18	25,62
30	RPM: 1155	27,48	25,62

Hasil pengujian generator sebanyak 30 kali menghasilkan tegangan yang meningkat seiring bertambahnya kecepatan putaran pedal. Pada putaran 195 RPM, tegangan *Output* generator tercatat sebesar 6,11V, sedangkan pada 1155 RPM, tegangan mencapai 27,48V. Tegangan tersebut kemudian masuk ke *Buck-Boost converter* untuk disesuaikan ke tegangan *Output* pengisian baterai sebesar 25,2V. Pengujian ini membuktikan bahwa generator mampu menghasilkan listrik yang cukup untuk kebutuhan sistem pengisian baterai, dengan variasi tegangan *Input* yang masih bisa dikendalikan oleh rangkaian converter agar sesuai dengan kebutuhan baterai.

D. Pengujian Sensor

Pengujian sensor PZEM017 dilakukan untuk mengukur tingkat akurasi sensor dalam membaca nilai tegangan dan arus listrik pada rangkaian. Hasil pembacaan sensor kemudian dibandingkan dengan multimeter digital sebagai acuan standar.

Dari hasil pengujian, perbedaan antara pembacaan sensor dan multimeter sangat kecil yaitu tidak kurang dan tidak lebih dari 2V, selisih tertinggi tegangan pada kolom ke-133 yang menunjukkan hasil selisih 0,19V dan pada selisih arus pada tabel baris ke-143 dan 147 menunjukkan hasil selisih 0,02 A. Selisih yang rendah ini menunjukkan bahwa sensor PZEM017 cukup presisi dan dapat dipercaya dalam mendeteksi perubahan nilai listrik pada sistem. Selisih yang minimal ini menunjukkan bahwa sensor PZEM017 memiliki akurasi yang cukup baik dan dapat digunakan untuk mendukung sistem, terutama dalam hal pemantauan parameter listrik dan pengambilan data oleh kendali PID secara *real-time*.

E. Pengujian PID Ziegler Nichols

Pengujian sistem *Proportional Integral Derivative* (PID) ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh program kendali PID terhadap bentuk grafik respons tegangan *Output* serta waktu yang diperlukan untuk mencapai tegangan *setpoint* sebesar 25,2V. Sistem PID ini dikendalikan menggunakan mikrokontroler Arduino Nano. Pada program Arduino Nano, terdapat kode untuk mengatur *peripheral* PID dan kode untuk melakukan perhitungan nilai PID.

Dalam pengujian ini, nilai konstanta Ku dan Pu diperoleh menggunakan metode coba-coba (*trial and error*). Metode ini dilakukan dengan melakukan berbagai percobaan secara manual menggunakan nilai-nilai acak hingga ditemukan kombinasi yang memberikan hasil *Output* PID paling optimal. Dari proses ini, diperoleh nilai Ku 4,0 dan Pu 0,6. Selain kode program untuk pengaturan *peripheral* PID, juga terdapat kode program untuk fungsi perhitungan PID yang digunakan dalam proses kerja sistem PID.

Kode program untuk fungsi perhitungan PID dijalankan menggunakan mikrokontroler Arduino. Kode ini terdiri dari beberapa fungsi utama, seperti membaca sinyal

dari sensor sebagai umpan balik, mengatur level digital *potentiometer* berdasarkan perintah dari komunikasi serial, serta menghitung nilai *Output* PID dengan mempertimbangkan selisih antara *setpoint* dan *Input* aktual, akumulasi *error*, serta perubahan *error* dari waktu ke waktu. Hasil perhitungan ini digunakan untuk mengatur respons sistem secara otomatis. Selain itu, terdapat fungsi untuk menerima perintah melalui serial monitor guna mengontrol jalannya sistem.

Berdasarkan pengujian yang diperoleh dari nilai $K_u = 1,0$ dan $P_u = 0,1$ detik. Dengan metode *Ziegler-Nichols*, dihitung parameter PID: $K_p = 0,60$, $T_i = 0,05$, $T_d = 0,0125$, $K_i = 12,00$, dan $K_d = 0,01$. Proses uji menghasilkan 224 data, dimulai pukul 16:55:09, *set point* tercapai pada 16:55:41 dengan tegangan *output* 25,20 V, dan pengujian berakhir pukul 16:56:05. Sistem mencapai *steady-state* dalam 32 detik, namun terjadi 18 kali *error* sehingga hasil dinilai kurang optimal dan perlu pengujian ulang dengan parameter K_u dan P_u berbeda.

Dari hasil pengujian yang diperoleh dari nilai $K_u = 3,0$ dan $P_u = 0,3$ detik. Dengan metode *Ziegler-Nichols*, dihitung parameter PID: $K_p = 1,80$, $T_i = 0,15$, $T_d = 0,04$, $K_i = 12,00$, dan $K_d = 0,07$. Proses uji menghasilkan 326 data, dimulai pukul 17:01:49, *set point* tercapai pada 17:01:56 dengan tegangan *output* 25,20 V, dan pengujian berakhir pukul 17:02:47. Sistem mencapai *steady-state* dalam 7 detik, namun terjadi 16 kali *error* sehingga hasil dinilai kurang optimal dan perlu dilakukan pengujian ulang dengan parameter K_u dan P_u berbeda.

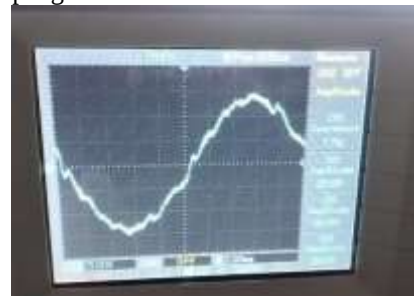
Dari hasil pengujian yang diperoleh dari nilai $K_u = 4,0$ dan $P_u = 0,4$ detik. Dengan metode *Ziegler-Nichols*, dihitung parameter PID: $K_p = 2,40$, $T_i = 0,20$, $T_d = 0,05$, $K_i = 12,00$, dan $K_d = 0,12$. Proses uji menghasilkan 335 data, dimulai pukul 17:04:56, *set point* tercapai pada 17:04:59 dengan tegangan *output* 25,29 V, dan pengujian berakhir pukul 17:05:48. Sistem mencapai *steady-state* dalam 3 detik, namun terjadi 19 kali *error* sehingga hasil dinilai kurang maksimal meskipun waktu *steady-state* sudah baik. Oleh karena itu, diperlukan pengujian ulang dengan parameter K_u dan P_u berbeda.

Dari hasil pengujian diperoleh $K_u = 4,0$ dan $P_u = 0,6$ detik. Dengan metode *Ziegler-Nichols*, dihitung parameter PID: $K_p = 2,40$, $T_i = 0,30$, $T_d = 0,08$, $K_i = 8,00$, dan $K_d = 0,18$. Proses uji menghasilkan 381 data, dimulai pukul 17:13:48, *set point* tercapai pada 17:13:51 dengan tegangan *output* 25,20 V, dan pengujian berakhir pukul 17:14:47. Sistem mencapai *steady-state* dalam 3 detik dengan hanya 3 kali *error*, sehingga hasil dinilai sudah maksimal. Namun akan dilakukan pengujian kembali pada parameter K_u dan P_u yang berbeda untuk melihat apakah nilai ini sudah memiliki hasil paling maksimal.

Dari hasil pengujian yang diperoleh dari nilai $K_u = 5,0$ dan $P_u = 0,6$ detik. Dengan metode *Ziegler-Nichols*, dihitung parameter PID: $K_p = 3,00$, $T_i = 0,30$, $T_d = 0,08$, $K_i = 10,00$, dan $K_d = 0,22$. Proses uji menghasilkan 235 data, dimulai pukul 17:21:31, *set point* tercapai pada 17:21:35 dengan tegangan *output* 25,20 V, dan pengujian berakhir pukul 17:22:12. Sistem mencapai *steady-state* dalam 4 detik, namun mengalami 8 kali *error*, sehingga hasil dinilai

kurang maksimal. Dibandingkan dengan hasil pengujian $K_u = 4,0$ dan $P_u = 0,6$, parameter $K_u = 5,0$ dan $P_u = 0,6$ memberikan hasil kurang maksimal. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan parameter $K_u = 4,0$ dan $P_u = 0,6$ karena memberikan hasil terbaik antara kecepatan respons, kestabilan, dan keamanan operasional.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perilaku sistem yang diuji sejalan dengan teori PID. Perubahan parameter K_u dan P_u berpengaruh langsung terhadap respon sistem, khususnya dalam hal *rise time*, waktu *steady-state*, jumlah *error*, dan kestabilan tegangan output. Hasil pengujian membuktikan bahwa penerapan metode *Ziegler-Nichols* pada pengendali PID efektif dalam mengatur *Buck-Boost converter* untuk menjaga tegangan output konstan sebesar 25,2V sehingga aman digunakan dalam proses pengisian baterai.



Gambar 2. Gelombang Osilasi

Berdasarkan gambar osiloskop, sinyal *Output* regulator berosilasi dengan amplitudo 28,91V dan *overshoot* sebesar 7,7%, serta total ripple tegangan sekitar 0,467 Vp-p. Fenomena *overshoot* pada awal respon merupakan karakteristik umum pada setiap kendali, khususnya ketika tegangan output harus naik dari kondisi awal 0V menuju *setpoint* 25,2V dalam waktu 3 detik untuk mencapai kondisi *steady-state*.

Berdasarkan datasheet LTC1625, waktu start-up ini ditentukan oleh kapasitor *soft start* (CSS) sehingga untuk mencapai 3 detik diperlukan kapasitor sekitar 47,5 μF . Waktu naik yang lambat ini dirancang untuk menghindari lonjakan arus (*inrush current*) dan memberikan start-up yang halus. Setelah tegangan *Output* mencapai nilai nominal, sistem menunjukkan *ripple* kecil dan *overshoot* yang masih dalam batas aman, menandakan bahwa *loop* kompensasi bekerja dengan baik meskipun bisa disempurnakan untuk meredam osilasi lebih lanjut.

Sistem pengisian dengan *Buck-Boost Converter* berbasis PID *Ziegler-Nichols* terbukti mampu menjaga tegangan *output* konstan pada 25,2 V dengan deviasi $\pm 0,4$ V. Parameter optimal PID ($K_u = 4,0$; $P_u = 0,6$) menghasilkan respon cepat dengan *settling time* 3 detik dan *overshoot* 7,7%. *Overshoot* sebesar 7,7% yang muncul pada awal respon dapat dijelaskan melalui sifat dasar pengendali PID. Saat tegangan *output* masih jauh dari *setpoint*, aksi proporsional memberikan koreksi besar agar sistem cepat mencapai nilai target. Namun, kombinasi dengan aksi integral yang mengakumulasi *error* membuat sistem cenderung melampaui *setpoint* sebelum akhirnya diredam oleh aksi derivatif. Fenomena ini sesuai dengan teori kontrol, di mana adanya integral mempercepat eliminasi *error* tetap tetapi berpotensi menimbulkan *overshoot*, sedangkan *derivatif* berfungsi menurunkan osilasi. Hasil pengujian yang menunjukkan *settling time* hanya 3 detik dengan *overshoot* 7,7% membuktikan bahwa PID berhasil memberikan respon cepat dan tetap stabil. Dari sisi keandalan baterai, tegangan yang sedikit melebihi *setpoint* masih aman karena nilainya jauh di bawah batas maksimum pengisian sel *lithium-ion*, namun jika berulang tanpa kendali dapat mempercepat degradasi elektrolit.

Dari sisi keamanan, kestabilan tegangan dan arus yang dicapai PID mencegah terjadinya *overcharge*, menjaga suhu pengisian tetap rendah pada kisaran 27–29 °C, serta mengurangi fluktuasi ekstrem yang dapat mempercepat degradasi elektrolit. Dengan demikian, penerapan kontrol PID tidak hanya meningkatkan performa sistem pengisian, tetapi juga memberikan kontribusi langsung dalam menjaga keamanan serta memperpanjang umur pakai baterai.

F. Pengujian Buck Boost

Pada tahap pengujian *Buck-Boost converter*, dilakukan dua pengujian, yaitu mode *Buck* dan mode *Boost*, guna mengetahui kemampuan sistem dalam mempertahankan tegangan *Output* yang stabil sebesar 25,2V. Pada mode *Buck*, Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan *Input* yang lebih tinggi dari tegangan *Output*, yaitu berkisar antara 25V hingga lebih dari 36V.

Tabel 3. Pengujian Buck

No	Buck	
	V_in	V_out
1	26,35	25,15
2	26,81	25,23
3	27,27	25,16
4	26,82	23,23
5	26,10	25,23
6	26,02	25,27
7	34,21	25,22
8	36,15	25,20
9	34,85	25,21
10	30,87	25,27
11	26,48	25,27
12	32,19	25,29

No	Buck	
	V_in	V_out
13	27,83	25,32
14	34,77	25,29
15	32,19	25,28
16	26,70	25,31
17	26,40	25,31
18	25,81	25,31
19	25,86	25,31
20	25,91	25,31
21	26,25	25,31
22	26,66	25,31
23	25,47	25,24
24	34,85	25,27
25	27,83	25,29
26	26,25	25,24
27	26,27	25,24
28	27,19	25,23
29	27,23	25,23
30	25,46	25,24

Sebaliknya, pada mode *Boost*, tegangan *Input* yang digunakan berada di bawah nilai *Output*, mulai dari 4V hingga 23V.

Tabel 4. Pengujian Boost

No	Boost	
	V_in	V_out
1	6,52	25,21
2	4,68	25,20
3	23,18	25,24
4	22,06	25,24
5	17,50	25,24
6	14,66	25,24
7	17,70	25,24
8	13,20	25,24
9	10,64	25,24
10	15,08	25,23
11	8,62	25,23
12	4,43	25,20
13	11,42	25,24
14	10,46	25,24
15	11,92	25,24
16	11,33	25,23
17	13,51	25,24
18	6,65	25,24
19	4,39	25,20
20	4,51	25,20
21	11,99	25,23
22	9,76	25,24
23	11,37	25,24
24	9,57	25,24
25	11,06	25,23
26	10,76	25,23
27	10,58	25,23

No	Boost	
	V _{in}	V _{out}
28	10,22	25,23
29	9,82	25,23
30	10,33	25,22

Hasil pengujian sebanyak masing - masing 30 data *Buck* dan *Boost* menunjukkan bahwa meskipun tegangan *Input* bervariasi, sistem berhasil melakukan mode *Buck* atau menurunkan dan menstabilkan tegangan *Output* dalam rentang 25,20V hingga 25,30V. Dalam mode *Boost*, *converter* mampu meningkatkan tegangan *Input* dan tetap mempertahankan tegangan *Output* di sekitar 25,2V. Kestabilan ini menunjukkan bahwa kontrol PID metode Ziegler-Nichols yang diterapkan pada sistem mampu menyesuaikan respon *converter* terhadap perubahan *Input* secara cepat dan akurat. Dengan demikian, *converter* bekerja secara optimal pada kedua mode kerja, menjamin proses pengisian baterai berlangsung efisien dan aman dari risiko seperti *overcharging* atau fluktuasi tegangan berlebih. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem pengisian berbasis *Buck-Boost converter* dengan kendali PID memiliki performa yang baik dalam menjaga kestabilan tegangan *Output*, baik saat *Input* lebih rendah maupun lebih tinggi dari tegangan yang dibutuhkan oleh baterai.

IV. Kesimpulan dan Saran

A. Kesimpulan

1. Sistem pengisian baterai sepeda listrik menggunakan Buck-Boost converter yang dikendalikan oleh metode PID Ziegler-Nichols berhasil menstabilkan tegangan *Output* pada nilai 25,2V, meskipun tegangan *Input* dari generator mengalami fluktuasi.
2. Penggunaan metode tuning PID Ziegler-Nichols dapat menstabilkan tegangan *output* pada nilai 25,2V serta menghasilkan performa kontrol yang stabil dengan waktu naik (*rise time*) sebesar 3 detik dan overshoot sebesar 7.7%, yang mendukung efisiensi dan keamanan pengisian baterai lithium-ion.
3. Sistem menunjukkan efisiensi pengisian yang meningkat seiring waktu serta kestabilan suhu operasional, yang menandakan bahwa sistem bekerja secara optimal dan aman untuk jangka panjang.

B. Saran

1. Diperlukan peningkatan kapasitas arus *Output* maksimal (lebih dari 2A) untuk mempercepat proses pengisian baterai, dengan tetap memperhatikan sistem pendinginan dan proteksi untuk mencegah overheating.
2. Disarankan untuk mengganti generator AC dengan generator DC, agar selain sebagai penghasil energi dari kayuhan pedal, komponen tersebut juga dapat difungsikan sebagai motor penggerak sepeda listrik, meskipun akan menambah biaya sistem.
3. Untuk pengembangan lebih lanjut, sistem dapat ditambahkan fitur pemantauan dan pencatatan data (*data logging*) secara *real-time* sehingga pengguna dapat memantau parameter penting seperti tegangan,

arus, suhu, dan status pengisian baterai melalui aplikasi *Android* atau antarmuka *web*.

V. Daftar Pustaka

- [1] H. N. Sari, I. Nurjannah, Aminudin, I. M. Arsana, H. Arizal, and A. H. Ramadani, "Perancangan Komponen Dan Analisis Uji Beban Elektrik Bike," *Indones. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 62–65, 2023.
- [2] M. Ulum *et al.*, "Planning and Manufacturing of Four Axis Solar Panels With Reflector Angle Adjustments," *JEEE-U (Journal Electr. Electron. Eng.)*, vol. 6, no. 1, pp. 83–94, 2022, doi: 10.21070/jeeeu.v6i1.1628.
- [3] N. D. Pratiwi, R. Muhammad, and A. Fiatno, "Analysis of the Use of Generators and Rectifier Regulators as Additional Charging Systems for BLDC-Based Electric Bicycles," *J. Eng. Sci. Technol. Manag.*, vol. 3, no. 2, pp. 77–82, 2023, doi: 10.31004/jestm.v3i2.114.
- [4] I. P. Putra, R. Sulistyowati, H. A. Sujono, and N. S. Erwanti, "Rancang Bangun PID Controlled Buck Boost Converter Sebagai Penstabil Tegangan Pembangkit Listrik Picohydro Portable," *Semin. Nasional Fortei*, vol. 7, no. 1, pp. 3–8, 2023.
- [5] M. Arif, A. Aziz, E. P. Hidayat, and I. Munadhif, "Kontrol Proportional Integral Derivative (PID) Sebagai Penstabil Tegangan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid," vol. 15, no. 3, pp. 326–332, 2022.
- [6] S. Dewi, Y. Atmajaya, I. N. W. Satiawan, I. Bagus, and F. Citarsa, "Pemodelan Buck-Boost Converter dengan Kendali Artificial Neural Network untuk Pengisian Baterai pada Sistem Photovoltaic," vol. 10, no. 1, pp. 64–71, 2023.
- [7] A. B. W. Widhiawan, S. Handoko, and Darjat, "PERANCANGAN SISTEM CHARGING BATERAI MENGGUNAKAN BUCK- BOOST CONVERTER DENGAN SUMBER PANEL SURYA BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO NANO," vol. 10, no. 1, pp. 17–25, 2021.
- [8] S. Suwarno, *PENGEMBANGAN PEMBANGKIT LISTRIK HIBRID PADA LAMPU PENERANGAN JALAN MELALUI*. 2022.
- [9] E. Prianto, N. Yuniarti, and D. C. Nugroho, "Boost-Converter Sebagai Alat Pengisian Baterai pada Sepeda Listrik Secara Otomatis," *J. Edukasi Elektro*, vol. 4, pp. 52–62, 2020.
- [10] Jumiyaatun, I. Mahmudi, and A. Mustari, *KONTROL POWER ELEKTRONIK DAN APLIKASINYA - Google Books*. 2021.
- [11] A. F. Ibadillah, A. Ubaidillah, L. Sholihah, R. Alfita, S. Adi Kurniawan, and H. Sukri, "Design and Implementation of Programmable Single Ended Primary Inductor Converter Using Proportional Integral Derivative Method," *Proceeding - IEEE 9th Inf. Technol. Int. Semin. ITIS 2023*, no. October 2023, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/ITIS59651.2023.10420368.
- [12] W. Purwanto, Wagino, H. Maksum, A. Arif, and T. Sugiarto, *Teknologi Pada Sistem Alat Berat*. Padang: UNP Press, 2020.
- [13] I. Y. Basri and D. Irfan, *Komponen Elektronika*.

-
- Padang: SUKABINA Press, 2009.
- [14] F. Mulyana and Ismanto, *Dasar-Dasar Teknik Elektronika Semester 2*. Jakarta: Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, 2022.
- [15] N. Ilham, R. Mahardika, and Y. Elviralita, "Sistem Kendali Beban Listrik Menggunakan Suara," vol. 01, no. 4, 2020.
- [16] A. P. Yuda, D. Riyanto, and J. S. Habiby, "Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Surya dilengkapi Informasi Lokasi," vol. 3, no. 1, pp. 316–325, 2023.
- [17] M. Nurhuda and M. Khosyi'in, "PERANCANGANALAT UJI RELAY THERMAL TRAFO TENAGA BERBASIS ARDUINO MEGA 2560 DAN SENSOR SUHU THERMOCOUPLE TYPE K," *J. Syntax IDEA*, vol. 6, no. 10, 2024.