

Desain Sistem Manajemen Baterai Menggunakan Buck–Boost Converter dengan Kendali PID

R. Akbar Nur Apriyanto, Mohammad Erik Echsony, Ibra Satriatama*, Andhika Putra Widyadharma, Imam Junaedi, Adiratna Ciptaningrum, R. Gaguk Pratama Yudha, Rossanti Dwi Hapsari, Haykal Puguh Pratama

Politeknik Negeri Madiun, Madiun, Jawa Timur, Indonesia
Jl. Ring Road Barat, Kota Madiun, Jawa Timur 63162, Indonesia
E-mail: ibrasatria@hotmail.com

Naskah Masuk: 17 September 2025; Diterima: 27 Februari 2026; Terbit: 31 Maret 2026

ABSTRAK

Abstrak - Sistem Manajemen Baterai (Battery Management System/BMS) merupakan komponen utama dalam menjaga efisiensi, keamanan, dan umur panjang baterai, khususnya pada aplikasi seperti kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi. Penelitian ini merancang BMS yang dilengkapi dengan Buck–Boost Converter berbasis kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) untuk mengoptimalkan kinerja baterai, dengan tujuan menghasilkan tegangan keluaran yang stabil sesuai dengan nilai referensi yang diinginkan. Konverter dirancang agar dapat beroperasi pada mode penurunan tegangan (buck) maupun penaik tegangan (boost) sesuai dengan kondisi masukan, dan sistem dikembangkan menggunakan dua pendekatan kontrol: open-loop dan closed-loop. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode open-loop tidak dapat secara konsisten mencapai tegangan keluaran target sebesar 15 V, sehingga memerlukan penyesuaian duty cycle sebesar 5%, sedangkan metode closed-loop dengan kontrol PID berhasil mencapai error tegangan kurang dari 5%, yang menunjukkan kestabilan yang baik terhadap gangguan dan perubahan beban. Selain itu, penerapan kontrol PID pada konfigurasi Buck Converter berhasil menurunkan tegangan dari 18 V menjadi 15 V dengan error sekitar 3%.

Kata kunci: Battery Management System, Buck-boost Converter, PID

ABSTRACT

Abstract - The Battery Management System (BMS) is a key component in maintaining the efficiency, safety, and longevity of batteries, particularly in applications such as electric vehicles and energy storage systems. This study designs a BMS equipped with a Buck-Boost Converter based on Proportional-Integral-Derivative (PID) control to optimize battery performance, with the objective of producing a stable output voltage that matches the desired reference value. The converter is designed to operate in both voltage step-down (buck) and voltage step-up (boost) modes depending on the input conditions, and the system is developed using two control approaches: open-loop and closed-loop. Test results show that the open-loop method could not consistently achieve the target output voltage of 15 V, requiring a 5% duty cycle adjustment, whereas the closed-loop method with PID control achieved a voltage error of less than 5%, indicating good stability against disturbances and load changes. Furthermore, the application of PID control in a Buck Converter configuration successfully reduced the voltage from 18 V to 15 V with an error of approximately 3%.

Keywords: Battery Management System, Buck-boost Converter, PID

Copyright © 2026 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Energi listrik memiliki peran strategis dalam perkembangan peradaban karena kemudahannya untuk diaplikasikan serta dikonversi menjadi berbagai bentuk energi, termasuk disimpan dalam bentuk energi kimia melalui baterai. Hingga saat ini, pasokan listrik masih didominasi oleh sumber energi fosil. Namun, krisis minyak tahun 2008 dan meningkatnya perhatian terhadap pemanasan global telah mendorong pencarian sumber energi bersih berbasis energi terbarukan. Dalam konteks tersebut, sistem penyimpanan energi menjadi komponen penting untuk menjamin ketersediaan pasokan listrik yang andal dan

berkelanjutan dalam jangka panjang [1]. Secara global, pengembangan teknologi baterai untuk kendaraan listrik terus meningkat sebagai upaya mitigasi emisi karbon. Keberhasilan aplikasi ini sangat bergantung pada pemantauan parameter utama serta diagnosis sistem penyimpanan baterai secara akurat [2].

Di Indonesia, sektor perkeretaapian mulai beralih ke energi listrik karena lebih ramah lingkungan dan keterbatasan bahan bakar fosil. Operasional kereta api memerlukan suplai listrik yang kontinu, khususnya untuk sistem persinyalan dan telekomunikasi. Oleh karena itu, baterai dipasang sebagai sumber daya cadangan dalam bentuk UPS guna menjamin keamanan dan kelancaran operasional [3]. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan Battery Management System (BMS) yang efektif dalam meningkatkan kinerja dan keselamatan baterai melalui kontrol pengisian-pengosongan serta perlindungan suhu [4].

BMS terdiri dari perangkat keras untuk mengukur tegangan, arus, dan suhu secara real-time serta perangkat lunak untuk memperkirakan State of Charge (SOC) dan State of Health (SOH) [5]. SOC merepresentasikan kapasitas energi tersisa, sedangkan SOH menunjukkan tingkat kesehatan baterai berdasarkan rasio kapasitas aktual terhadap kapasitas nominal. Estimasi kedua parameter ini umumnya dilakukan secara tidak langsung melalui pengukuran [6].

Salah satu komponen penting dalam BMS adalah buck-boost converter, yaitu konverter DC-DC yang mampu menaikkan maupun menurunkan tegangan melalui pengaturan PWM. Pengendalian PID yang tepat diperlukan agar tegangan keluaran stabil sesuai set point. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan pada desain sistem manajemen baterai menggunakan buck-boost converter dengan kendali PID untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan keandalan penyimpanan energi, terutama pada aplikasi energi terbarukan dan kendaraan listrik [7]. Penelitian ini berfokus pada pengembangan BMS yang dapat meningkatkan efisiensi dan keamanan baterai, terutama untuk mendukung aplikasi sistem energi terbarukan atau kendaraan listrik.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Baterai

Baterai merupakan perangkat elektrokimia yang berfungsi mengubah energi kimia menjadi energi listrik yang memiliki dua kutub, yaitu katoda sebagai kutub positif dan anoda sebagai kutub negatif. Kutub positif memiliki energi potensial lebih tinggi dibandingkan kutub negatif, sedangkan kutub negatif berperan sebagai sumber elektron. Arus listrik yang dihasilkan bersifat searah atau *direct current* (DC). Berdasarkan kemampuan pengisian ulang, baterai diklasifikasikan menjadi baterai primer yang hanya digunakan sekali dan tidak dapat diisi ulang, serta baterai sekunder yang dapat diisi ulang untuk penggunaan berulang [8].

2.2 State of Charge (SOC) dan State of Health (SOH)

State of Charge (SOC) merupakan rasio energi tersisa terhadap kapasitas maksimum baterai (0–100%) dan diperlukan untuk mencegah overcharge maupun over-discharge [9]. Estimasi SOC dapat dilakukan dengan metode *coulomb counting* melalui integrasi arus masuk dan keluar baterai [10]

$$SoC(t) = SoC(t_0) - \frac{\eta}{c_n} \int_{t_0}^t I dt \quad (1)$$

State of Health (SOH) digunakan untuk memprediksi sisa umur baterai berdasarkan penurunan kapasitas dan peningkatan resistansi internal. Berdasarkan IEEE 1188-1996, baterai direkomendasikan diganti jika kapasitas turun di bawah 80% [11]. SOH didefinisikan sebagai:

$$SOH = \frac{Q_{now}}{Q_{new}} \times 100\% \quad (2)$$

2.3 Buck-Boost Converter

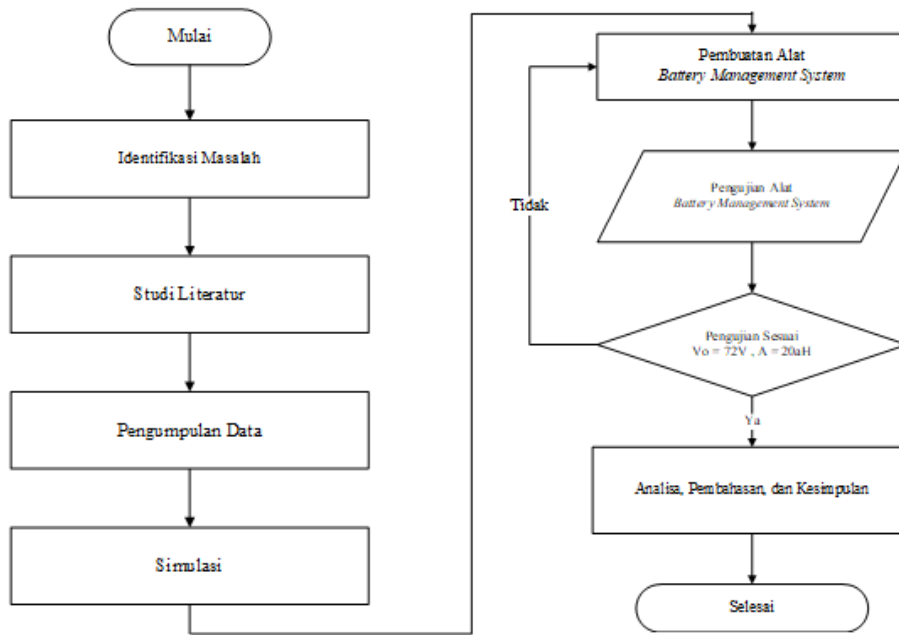
Buck-boost Converter adalah perangkat konverter elektronika daya yang berfungsi mengubah tegangan DC masukan menjadi tegangan DC keluaran. Tegangan keluaran pada *buck-boost Converter* dapat lebih rendah atau lebih tinggi dari tegangan sumbernya. Konverter ini termasuk jenis konverter switching, yang beroperasi dengan mengatur pembukaan dan penutupan saklar elektronik [12]. Rangkaian *Buck-boost Converter* terdiri dari komponen induktor, dioda, kapasitor, dan mosfet yang berfungsi sebagai saklar elektronik. Konverter ini mengubah polaritas tegangan keluaran relatif terhadap tegangan masukan.

3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini memiliki tahapan-tahapan diantaranya identifikasi masalah, studi literatur, pengumpulan data, simulasi, implementasi alat, validasi, informasi kelayakan dan kesimpulan.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada Gambar 1 ditunjukkan diagram alir dari Alat *Battery Management System* dengan *Buck-Boost Converter* dengan Kontrol PID.

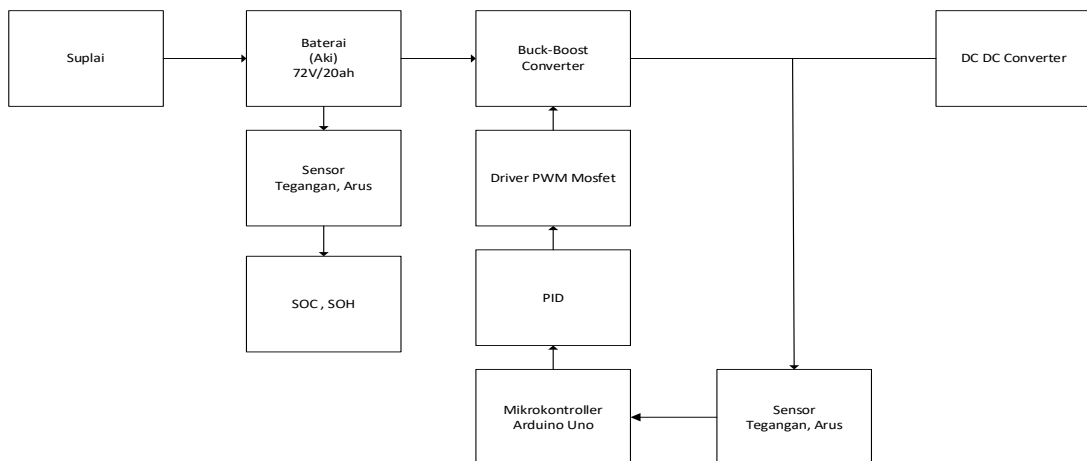


Gambar 1. Diagram alir penelitian

Gambar 1 Merupakan alur dari sistem yang akan bekerja pada alat *Battery Management System* dengan *Buck-Boost Converter* dengan Kontrol PID.

3.2 Blokdigram Sistem

Berikut adalah flowchart sistem pada penelitian yang berjudul “Desain Sistem Manajemen Baterai Menggunakan *Buck-Boost Converter* dengan Kendali PID” dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2 Blok diagram sistem

Gambar di atas merupakan diagram alir dari penelitian yang akan dilakukan. Gambar 2 menunjukkan blok diagram sistem *Battery Management System* (BMS) berbasis *Buck-Boost Converter* dengan kontrol PID, yang dirancang untuk menyediakan suplai daya stabil dan efisien melalui pengendalian cerdas dan monitoring real-time.

3.3 Spesifikasi Baterai

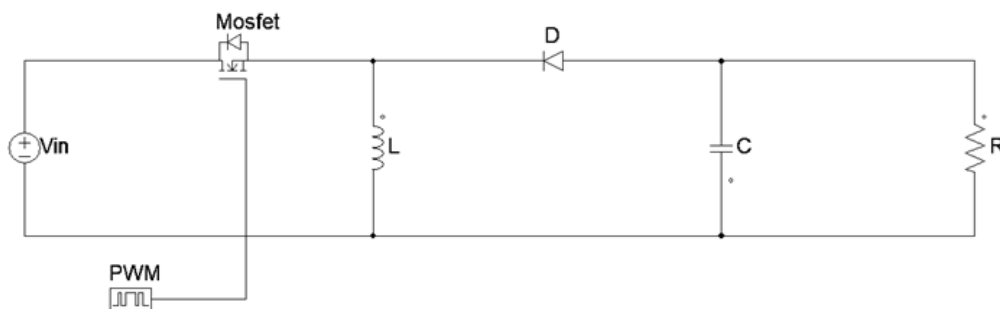
Tabel 1. Spesifikasi Baterai

No	Spesifikasi	Deskripsi
1	Zeus Battery Aki VRLA	12V 20Ah
2	Cycle use	14.50V - 14.90V (25°C)
3	Standby use	13.50V - 13.80V (25°C)
4	Arus Awal	Kurang dari 6,0 A
5	Dimensi (Panjang × Lebar × Tinggi)	18cm x 7,5cm x 16,5cm
6	Berat	6.5 kg

Sumber : Dokumen Pribadi

Baterai VRLA adalah baterai timbal-asam tertutup yang bebas perawatan dan aman karena tidak memerlukan pengisian ulang cairan.

3.4 Desain Buck-Boost Converter



Gambar 3 Desain Buck-Boost Converter

Buck-Boost Converter dirancang menggunakan MOSFET sebagai sakelar. Konverter Buck-Boost digunakan untuk menstabilkan tegangan keluaran baterai, yang diperkirakan mencapai 72 V. Desain Konverter Buck-Boost mencakup perhitungan komponennya dan konfigurasi sirkuit secara keseluruhan, seperti yang dirinci pada Tabel 2.

Tabel 2 Parameter Perhitungan Buck-Boost Converter

Tegangan input minimum ($V_{in, min}$)	54 V
Tegangan input maksimum ($V_{in, maks}$)	84 V
Tegangan keluaran (V_{out})	72 V
Tegangan keluaran ripple (ΔV_{out})	0.1% = 0.072 V
Arus ripple Induktor (ΔI_L)	1% = 0.1 A
Arus keluaran (I_o)	10 A
Frequency (F)	100 Khz
Duty Cycle (D)	0.5714 & 0.4615
Induktor (L)	193 mH
Kapasitor (C)	1000 uF
Resistor (R)	100Ω

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan proses pengujian dan diskusi untuk studi tentang Desain dan Pengembangan Sistem Manajemen Baterai dengan Konverter Buck-Boost yang Dikendalikan PID.

4.1 Kalibrasi Sistem Sensor dan Komponen Konverter

Pengujian Kalibrasi dilakukan untuk memastikan akurasi pengukuran serta kestabilan kerja sistem Buck-Boost Converter pada Battery Management System. Sensor tegangan diuji pada sisi input dan output konverter dengan membandingkan hasil pembacaan ADC terhadap nilai teoretis pembagi tegangan. Hasil pengujian menunjukkan respons linier dengan error kecil, sehingga hubungan matematis diperoleh melalui regresi linier untuk implementasi pada mikrokontroler.

Sensor arus ACS712-30A juga dikalibrasi dengan beban variabel dan dibandingkan terhadap perhitungan teoretis berdasarkan sensitivitas sensor. Pengujian menghasilkan karakteristik linier

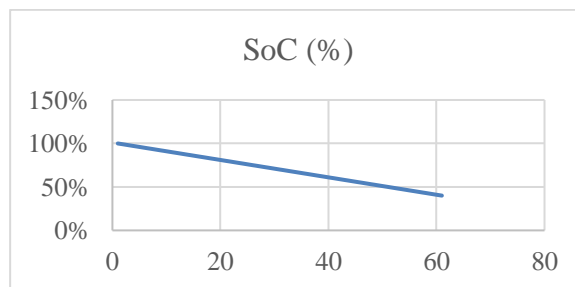
dengan tingkat kesalahan rendah, sehingga pembacaan arus dapat digunakan secara andal dalam sistem.

Kalibrasi sinyal PWM dilakukan untuk memastikan frekuensi switching sebesar 50 kHz serta kesesuaian duty cycle pada driver MOSFET. Hasil pengujian menunjukkan tegangan keluaran driver mendekati nilai teoretis, menandakan driver berfungsi baik sebagai isolator dan pelindung mikrokontroler.

Selain itu, nilai induktor dikonfirmasi menggunakan LCR meter untuk memastikan kesesuaian dengan spesifikasi desain. Induktansi terukur mendekati nilai teoretis dengan deviasi sekitar 0,43%, sehingga masih berada dalam toleransi komponen dan mendukung kinerja konverter secara optimal.

4.2 Pengujian Baterai

Pengujian dilakukan pada baterai 12 V dengan kapasitas nominal 20 Ah (MS20-12) menggunakan beban konstan 1,4 A. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperkirakan State of Charge (SOC) menggunakan metode Penghitungan Coulomb dan untuk menentukan State of Health (SOH).



Gambar 4 Grafik Persentase State of Charge (SOC)

Penurunan State of Charge (SoC) baterai diamati selama proses pemakaian dengan arus konstan 1.4 A. Pengukuran dilakukan dari 13:20:38 hingga 21:54:52, sekitar 8 jam dan 34 menit. Berdasarkan data yang dikumpulkan, SoC secara konsisten menurun dari 100% menjadi 40%, dengan penurunan rata-rata 1% setiap 9 menit. Pola penurunan ini linier, mencerminkan arus pelepasan yang stabil tanpa beban tambahan atau fluktuasi yang signifikan. Selama proses pemakaian, volume bateraitage berangsur-angsur menurun dari 13.30 V menjadi 10.03 V.

Tabel 3 Parameter Uji Baterai

Parameter	Nilai
Tegangan awal	13,3 V (SOC 100%)
Tegangan akhir	10,3 V (SOC 40%)
Arus beban	1,4 A
Ampere-jam (Ah).	1Ah = 1A × 3600 s = 3600 Coulomb
Durasi Total	8 jam 34 menit 14 detik = 30.854 detik

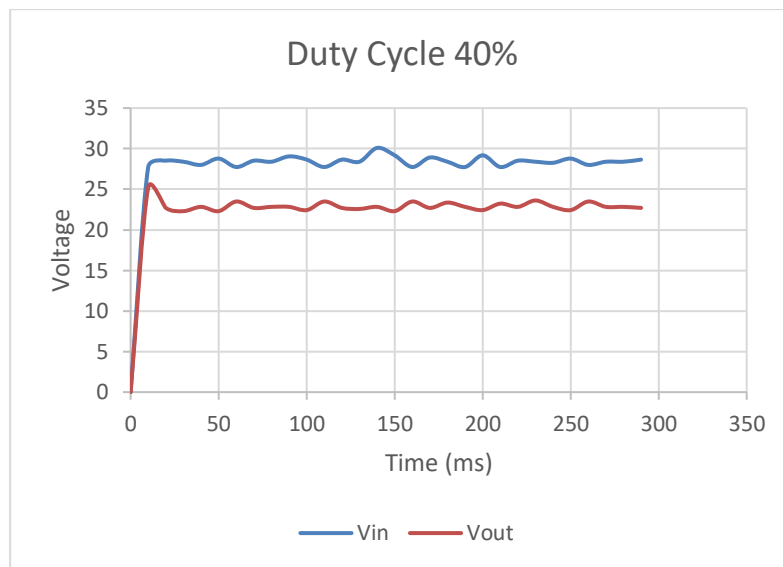
Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode Penghitungan Coulomb dapat digunakan secara akurat untuk memperkirakan SOC. Perkiraan nilai SOC akhir 40.01% berdasarkan integrasi arus sangat konsisten dengan nilai tegangan akhir 10.03 V. Selama pengujian, yang berlangsung lebih dari 8,5 jam dengan beban konstan 1,4 A, baterai mampu menghasilkan 11,998 Ah, setara dengan sekitar 60% dari total kapasitasnya. Perkiraan kapasitas penuh aktual (SOH) mencapai 99,98%, menunjukkan bahwa baterai tetap dalam kondisi sangat baik.

4.3 Buck–Boost Converter Testing with Target Output Voltage $V_o = 15 V$

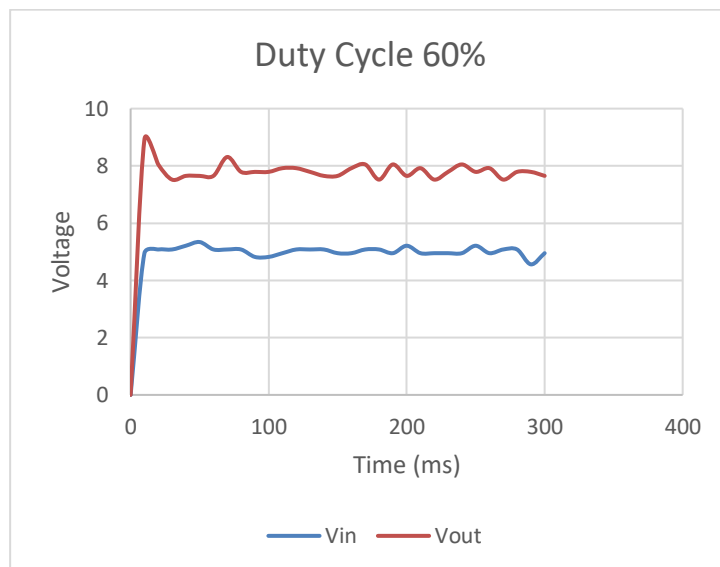
Pengujian Konverter Buck-Boost dilakukan menggunakan beban resistor variabel 100 Ω, memungkinkan penyesuaian beban secara manual. Sumber tegangan input disediakan oleh catu daya DC yang memberikan tegangan stabil, dapat disesuaikan sesuai kebutuhan untuk pengujian. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja dan karakteristik Konverter Buck-Boost di bawah tegangan input yang bervariasi. Dalam pengujian ini, tegangan keluaran target 15 V ditetapkan, yang mengharuskan siklus kerja disesuaikan secara bertahap untuk mencapai tegangan ini. Proses pengujian dilakukan secara sistematis untuk mengamati respons konverter dalam kondisi input yang berbeda. Hasil pengujian ini disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil Uji Konverter Buck–Boost dengan Tegangan Keluaran Target $V_o = 15\text{ V}$

Vin (V)	Duty	Vo (V)	Vo LCD (V)	Vo Target (V)	Error (%)
10	0,58	15,32	15	15	2,13
11	0,56	15,41	15	15	2,73
12	0,54	15,57	15,6	15	3,80
13	0,52	15,64	15,4	15	4,27
14	0,5	15,64	15,4	15	4,27
15	0,48	15,35	15	15	2,33
16	0,46	15,34	15	15	2,27
17	0,44	15,48	15,2	15	3,20
18	0,42	15,54	15,3	15	3,60
19	0,39	15,49	15,3	15	3,27
20	0,36	15,59	15,3	15	3,93
Rata - Rata					3,25



Gambar 5 Grafik hasil pengujian *Buck Boost Converter* pada kondisi *Duty Cycle 40%*



Gambar 6 Grafik hasil pengujian *Buck Boost Converter* pada kondisi *Duty Cycle 60%*

Pada duty cycle 40%, V_{out} naik cepat hingga steady-state $\sim 24\text{ V}$ dengan rise time $\sim 15\text{ ms}$, overshoot $\sim 13\%$ (30 V), dan settling time $\sim 50\text{ ms}$. Respons cukup cepat dengan sedikit overshoot dan pemulihan moderat dan Pada duty cycle 60%, V_{out} naik ke steady-state $\sim 8\text{ V}$ dengan rise time ~ 10

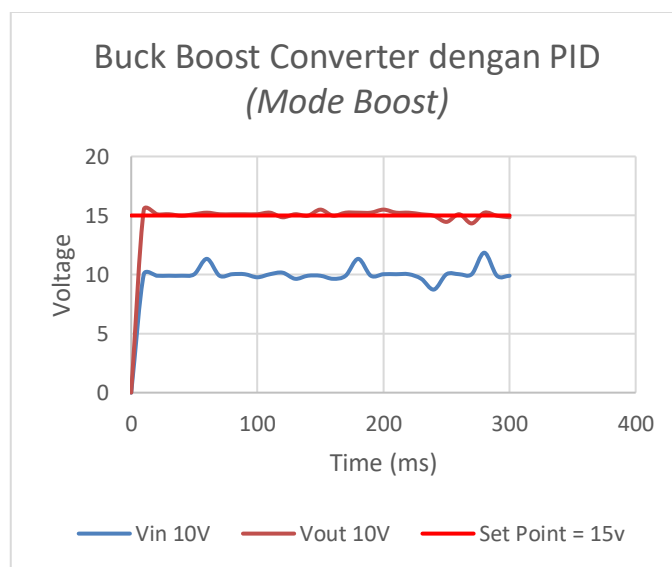
ms, overshoot ~12,5% (9 V), dan settling time ~30 ms. Respons lebih cepat dan pemulihan lebih singkat, meskipun overshoot mirip dengan duty cycle 40%.

4.4 Pengujian Kontrol PID

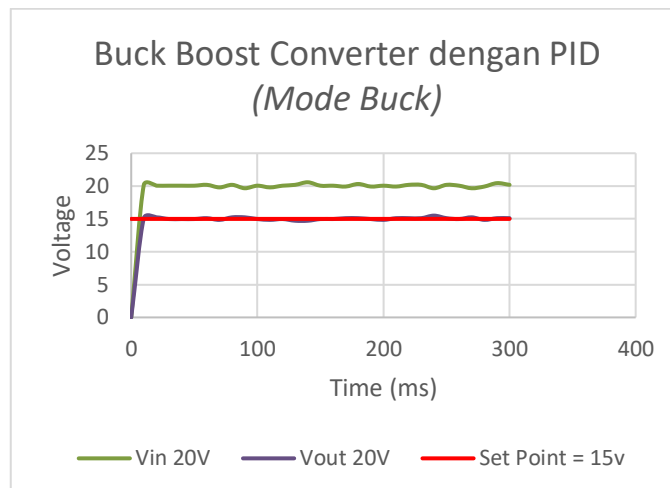
Pengujian Konverter Buck–Boost bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem yang dikendalikan menggunakan kontrol PID. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan tegangan input konverter sambil mengatur titik setel output pada 15 V. Tujuannya adalah untuk mengamati kemampuan Buck–Boost Converter untuk mempertahankan tegangan keluaran yang stabil meskipun ada perubahan tegangan input, dengan siklus kerja yang disesuaikan secara otomatis oleh sistem PID. Menggunakan parameter PID $K_p = 0.2$, $K_i = 0.014$, dan $K_d = 0.0025$, konverter diuji untuk mengevaluasi respons sistem terhadap variasi tegangan input dengan output target 15 V. Parameter ini mengontrol siklus kerja untuk memastikan bahwa tegangan keluaran tetap stabil pada nilai referensi. Penggunaan kontrol PID memungkinkan konverter untuk merespons perubahan input dengan lebih akurat, meminimalkan kesalahan keadaan stabil, dan mengurangi overshoot. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat mempertahankan tegangan keluaran yang stabil dengan kesalahan dalam batas yang dapat diterima, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Table 5 Buck–Boost Converter Test Results with PID Control

Vin (V)	Duty	Vo (V)	Vo LCD (V)	Vo Target (V)	Error (%)
10	0,4	15,54	15,11	15	3,60
11	0,36	15,37	15,11	15	2,47
12	0,33	15,4	15,11	15	2,67
13	0,3	15,44	15,11	15	2,93
14	0,28	15,39	15,11	15	2,60
15	0,26	15,52	15,11	15	3,47
16	0,25	15,38	15,11	15	2,53
17	0,22	15,5	15,24	15	3,33
18	0,21	15,45	15,24	15	3,00
19	0,2	15,42	15,5	15	2,80
20	0,19	15,47	15,11	15	3,13
Rata - Rata					2,96



Gambar 7. Output voltage respons dalam mode boost dengan kontrol PID



Gambar 8. Output voltage respons dalam mode buck dengan kontrol PID

Gambar 7 & 8 menggambarkan kinerja konverter buck-boost di bawah kontrol PID untuk dua kondisi tegangan input: 10 V dan 20 V, dengan tegangan keluaran target 15 V. Pada $V_{in} = 10$ V (mode boost), tegangan keluaran mendekati 15 V, dengan riak kecil terjadi setelah sekitar 50 ms, menunjukkan bahwa pengontrol PID terus menyesuaikan sinyal kontrol untuk menjaga stabilitas. Pada $V_{in} = 20$ V (mode buck), tegangan keluaran juga diatur mendekati 15 V, menunjukkan fluktuasi yang lebih kecil dibandingkan dengan mode boost, yang menunjukkan respons sistem yang lebih stabil. Kedua kondisi tersebut menunjukkan overshoot awal singkat sebelum mencapai keadaan stabil, karakteristik khas sistem kontrol loop tertutup. Secara keseluruhan, grafik mengonfirmasi bahwa parameter PID ($K_p = 0.2$, $K_i = 0.014$, $K_d = 0.0025$) secara efektif mempertahankan tegangan keluaran di dekat titik setel meskipun ada variasi tegangan input.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini melibatkan perencanaan, perakitan, pengujian, dan pengumpulan data untuk mengembangkan Sistem Manajemen Baterai (BMS) dengan konverter buck-boost yang dikendalikan oleh PID. BMS yang dirancang berhasil menstabilkan tegangan baterai, menghasilkan 15 V dari rentang input 10–20 V. Hasil pengujian menunjukkan kinerja dan stabilitas yang baik, terutama di bawah kontrol PID, menunjukkan bahwa sistem memastikan pengoperasian baterai yang aman dan andal. Kontrol PID terbukti efektif dalam mempertahankan tegangan keluaran meskipun ada fluktuasi input. Dengan parameter $K_p = 0,2$, $K_i = 0,014$, dan $K_d = 0,0025$, sistem mencapai waktu naik ~ 10 ms, overshoot $\pm 3\%$, waktu penyelesaian ~ 40 ms, dan kesalahan keadaan stabil sekitar 3%.

6. REFERENSI

- [1] Chairul Hudaya, "Peranan Riset Baterai Sekunder dalam Mendukung Penyediaan Energi Bersih Di Indonesia 2025." Advanced Energy Materials Processing Laboratory Energy Storage Research Center, 2021.
- [2] Tito Ahmad Fauzan, Rahman Arifuddin, and Resi Dwi Jayanti Kartika Sari, "Sistem Manajemen Baterai Pada Peralatan Catu Daya Di Equipment Room Stasiun Manggarai Dengan Aplikasi Blynk Berbasis Esp8266," *Uranus*, vol. 2, no. 3, pp. 174–195, Jul. 2024, doi: 10.61132/uranus.v2i3.270.
- [3] M. S. Hossain Lipu *et al.*, "Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook," *Journal of Cleaner Production*, vol. 292, p. 126044, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126044.
- [4] A. F. R. Fajari, M. F. Arsyad, and P. H. Prasteyo, "Pengaruh Perawatan Preventif Lifetime Baterai Lead Acid Untuk Persinyalan Kereta Api Listrik," vol. 2, no. 1, 2023.
- [5] S. A. Mathew, R. Prakash, and P. C. John, "A smart wireless battery monitoring system for Electric Vehicles," in *2012 12th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, Kochi, India: IEEE, Nov. 2012, pp. 189–193. doi: 10.1109/ISDA.2012.6416535.
- [6] F. A. Rifansyah, "Analisa State Of Charge (SOC) Menggunakan Algoritma Coulomb Counting Dan State Of Health (SOH) Untuk Mendukung Kendaraan Listrik," 2022.
- [7] I. N. W. Satiawan and I. B. F. Citarsa, "Desain Buck Converter Untuk Charging Batere Pada Beban Bervariasi," 2018.

- [8] Y. Afrida and A. Afandi, "Studi Penentuan State Of Charge (SOC) pada Baterai Valve Regulated Lead Acid NP7-12 Menggunakan MATLAB," vol. 17, 2023.
- [9] Z. Rahmawan, "Estimasi State Of Charge (SOC) Pada Baterai Lead-Acid Dengan Menggunakan Metode Coulomb Counting Pada Pv Hybrid." 2018.
- [10] A. Nugroho and E. Rijanto, "Simulasi Optimasi Pengukuran State Of Charge Baterai Dengan Integral Observer," *Widyariset*, vol. 17, 2014.
- [11] X. Liu, J. Li, Z. Yao, Z. Wang, R. Si, and Y. Diao, "Research on battery SOH estimation algorithm of energy storage frequency modulation system," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 217–223, May 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.015.
- [12] DanielW. Hart, *Power Electronics*. McGraw-Hill, 2011.