

Perancangan Sistem Kontrol PID untuk Pengisian Baterai *Lithium-Ion* 18650 pada *Solar Charge Controller*

¹Esa Kingkin Rohita, ²Rizal Arifin, ³Jawwad Sulthon Habiby

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Ponorogo

¹kingkin.esa@gmail.com, ²rarifin@umpo.ac.id, ³jawwad@umpo.ac.id

Abstract—Lithium-ion 18650 batteries require precise regulation of charging current and voltage, as both performance and safety are highly dependent on these parameters. Improper charging management can accelerate capacity loss, reduce operational lifespan, or cause irreversible damage. In this study, a proportional-integral-derivative (PID)-based solar charge controller (SCC) was designed and evaluated for charging a lithium-ion 18650 battery using the Constant Current–Constant Voltage (CC–CV) method. The system incorporates a buck converter for output power regulation, an Arduino Nano as the primary controller, an INA3221 sensor for voltage and current monitoring, and a 20×4 LCD for real-time data display. For constant current mode, the PID parameters were set to $K_p = 0.8$, $K_i = 10$, and $K_d = 0$. For constant voltage mode, the parameters were $K_p = 0.3$, $K_i = 1.5$, and $K_d = 0$. Sensor readings were updated every 50 ms, enabling rapid response to changes in charging conditions. Experimental tests at varying solar panel exposure levels (100%, 75%, 50%, and 25%) demonstrated that the battery voltage remained between 4.14 and 4.18 V, with a maximum deviation of 0.06 V from the 4.20 V target. During constant current mode, the charging current was maintained between 0.97 and 1.04 A, and the battery voltage increased steadily. Reduced solar irradiance resulted in decreased charging current due to lower panel output. The controller transitioned to constant voltage mode at the 270th minute when the battery voltage reached 4.18 V. Upon full charge at the 285th minute, the pulse-width modulation (PWM) output was set to zero, thereby terminating the charging process automatically.

Keywords — PID Control; Solar Charge Controller; Lithium-Ion 18650 Battery; CC-CV Method; Photovoltaic Panel

Abstrak—Baterai *lithium-ion* 18650 memerlukan pengendalian arus dan tegangan yang tepat selama proses pengisian karena karakteristiknya yang sensitif terhadap perubahan kedua parameter tersebut. Proses pengisian yang tidak terkontrol dapat mempercepat penurunan kapasitas, memperpendek umur pakai, serta meningkatkan risiko kerusakan pada baterai. Penelitian ini membahas perancangan dan pengujian *Solar Charge Controller* (SCC) berbasis kontrol PID untuk pengisian baterai *lithium-ion* 18650 dengan menerapkan metode *Constant Current–Constant Voltage* (CC–CV). Sistem dibangun menggunakan rangkaian *buck converter* sebagai pengatur daya keluaran, Arduino Nano sebagai unit pengendali, sensor INA3221 untuk memantau tegangan dan arus, serta LCD 20×4 sebagai media pemantauan kondisi sistem. Pada mode CC, parameter PID yang digunakan adalah $K_p = 0,8$, $K_i = 10$, dan $K_d = 0$, sedangkan pada mode CV digunakan $K_p = 0,3$, $K_i = 1,5$, dan $K_d = 0$. Data sensor diperbarui setiap 50 ms agar pengendali dapat merespons perubahan kondisi pengisian secara cepat. Hasil pengujian pada variasi paparan relatif panel sebesar 100%, 75%, 50%, dan 25% menunjukkan bahwa tegangan baterai tetap berada pada rentang 4,14–4,18 V, dengan deviasi maksimum sebesar 0,06 V terhadap *setpoint* 4,20 V. Selama mode CC, arus pengisian berada pada kisaran 0,97–1,04 A, sementara tegangan baterai meningkat secara bertahap. Ketika intensitas cahaya yang diterima panel berkurang, arus pengisian juga mengalami penurunan akibat berkurangnya daya yang tersedia dari panel surya. Sistem kemudian beralih ke mode CV pada menit ke-270 saat tegangan baterai mencapai 4,18 V. Setelah kondisi penuh terdeteksi pada menit ke-285, nilai PWM diatur menjadi 0 sehingga proses pengisian dihentikan secara otomatis.

Kata Kunci — Kontrol PID; Solar Charge Controller; Baterai Lithium-Ion 18650; Metode CC-CV; Panel Surya

I. PENDAHULUAN

Baterai *lithium-ion* tipe 18650 banyak digunakan sebagai media penyimpan energi pada sistem pengisian berbasis panel surya karena memiliki kepadatan energi tinggi, efisiensi pengisian yang baik, serta umur pakai yang relatif panjang dibandingkan baterai konvensional. Baterai jenis ini sangat sensitif terhadap metode pengisian; pengisian yang tidak terkontrol dapat menyebabkan penurunan kapasitas, pemendekan umur pakai, dan potensi kerusakan permanen [1], [4]. Pada sistem tenaga surya, aliran daya dari panel surya ke baterai diatur oleh *solar charge controller* (SCC), yang berfungsi mencegah *overcharge* maupun *overdischarge* dan menjaga baterai tetap beroperasi pada zona aman [3]. Studi menunjukkan bahwa SCC berbasis *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dapat mencapai efisiensi hingga 72%, jauh lebih tinggi dibandingkan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) yang hanya mencapai 31% [3]. Namun demikian, SCC konvensional masih menghadapi kendala berupa tegangan pengisian yang tidak stabil akibat

perubahan cepat intensitas cahaya, respon yang lambat dalam mencapai tegangan referensi, serta fluktuasi arus pengisian.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperlukan mekanisme kontrol yang lebih responsif dan adaptif. Kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) mampu mengatur tegangan dan arus secara lebih halus dan adaptif terhadap perubahan kondisi sistem, sehingga dapat menekan fluktuasi tegangan dan mempercepat pencapaian kondisi stabil [7]. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kombinasi mode *Constant Current* (CC) untuk pengisian awal dan *Constant Voltage* (CV) untuk tahap akhir dapat mengisi baterai *lithium* secara optimal tanpa risiko *overcharging*, dengan transisi CC ke CV yang sebaiknya dilakukan secara presisi untuk menghindari panas berlebih [1], [4]. Widarko et al. menunjukkan bahwa kontrol PID mampu menstabilkan tegangan keluaran panel surya yang fluktuatif akibat perubahan intensitas cahaya sehingga proses pengisian baterai Li-Ion tetap stabil dan aman [2]. Di sisi lain, tanpa kontrol PID lonjakan tegangan (*overshoot*) saat pengisian dapat mencapai 151%, namun dengan tuning PID yang tepat *overshoot* tersebut dapat ditekan sehingga sistem menjadi aman bagi baterai [5]. Penggunaan mikrokontroler berbasis Arduino juga telah terbukti mampu membaca sensor tegangan dan arus dengan akurasi tinggi serta mengeksekusi algoritma kontrol secara *real-time* untuk mencegah kerusakan akibat *overvoltage* [6].

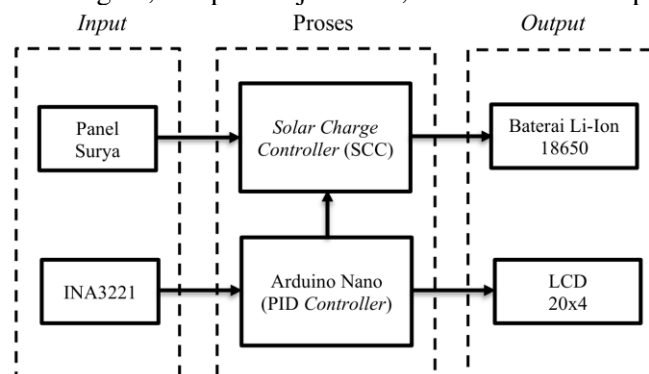
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) merancang sistem kontrol PID pada *solar charge controller* agar tegangan dan arus pengisian baterai tetap stabil meskipun intensitas cahaya berubah; (2) merancang sistem kendali otomatis yang dapat mengatur pengisian baterai dalam dua tahap, yaitu mode arus konstan (CC) dan mode tegangan konstan (CV), secara akurat dan berkelanjutan; serta (3) merancang dan menerapkan sistem proteksi untuk mencegah pengisian berlebih dan kondisi yang dapat membahayakan baterai *lithium-ion* 18650.

II. METODE PENELITIAN

A. Perancangan Sistem

Perancangan sistem menggunakan metode eksperimental (*prototyping*) dengan kontrol umpan balik tertutup. Secara umum, sistem terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Panel surya digunakan sebagai sumber energi utama. Sensor INA3221 bertugas mengukur tegangan dan arus sebagai data umpan balik. Arduino Nano menjalankan kontrol PID dengan referensi arus 1,00 A pada mode *Constant Current* (CC) dan referensi tegangan 4,20 V pada mode *Constant Voltage* (CV). Sinyal PWM yang dihasilkan Arduino digunakan untuk mengatur *duty cycle buck converter* melalui MOSFET. Parameter kontrol yang digunakan pada mode CC adalah $K_p = 0,8$, $K_i = 10$, $K_d = 0$, sedangkan pada mode CV digunakan $K_p = 0,3$, $K_i = 1,5$, $K_d = 0$. Tegangan, arus, dan status pengisian ditampilkan pada LCD 20x4. Data pengujian pengisian dicatat setiap 15 menit. Interval 15 menit ini hanya digunakan untuk pencatatan data pengujian, bukan sebagai waktu cuplik internal PID. Data sumber yang tersedia tidak mencantumkan waktu cuplik internal PID, frekuensi PWM, frekuensi *switching buck converter*, nilai induktor, metode diskritisasi PID, maupun mekanisme anti-*windup*. Nilai-nilai tersebut tidak dicantumkan ulang dalam artikel ini untuk menghindari penambahan parameter yang belum terverifikasi.

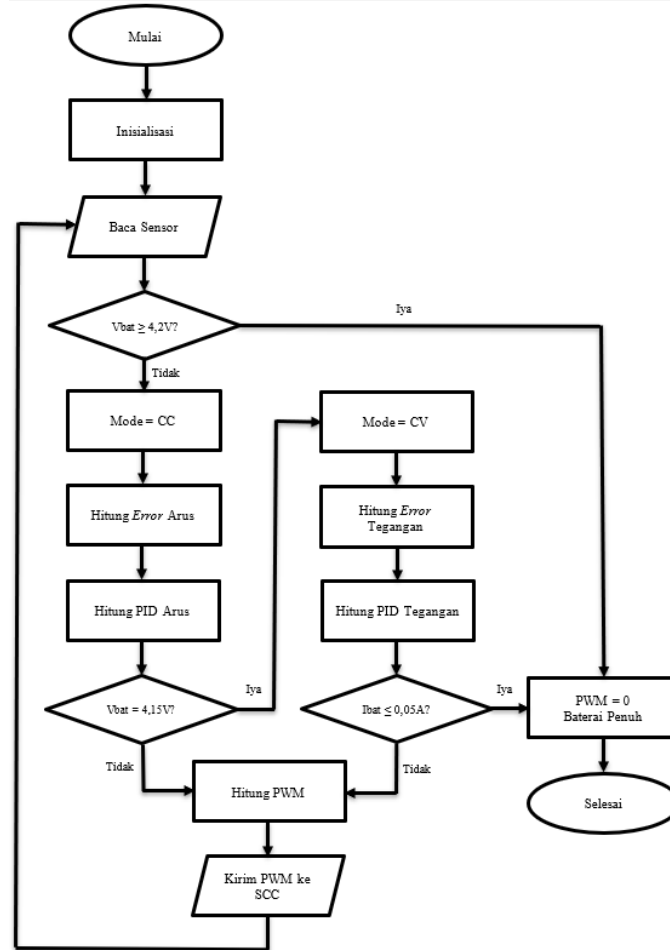
Rancangan sistem disajikan melalui diagram blok, *flowchart* kendali, dan desain alat untuk memberikan gambaran sistematis mengenai hubungan antarbagian, tahapan kerja sistem, serta susunan komponen yang digunakan.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

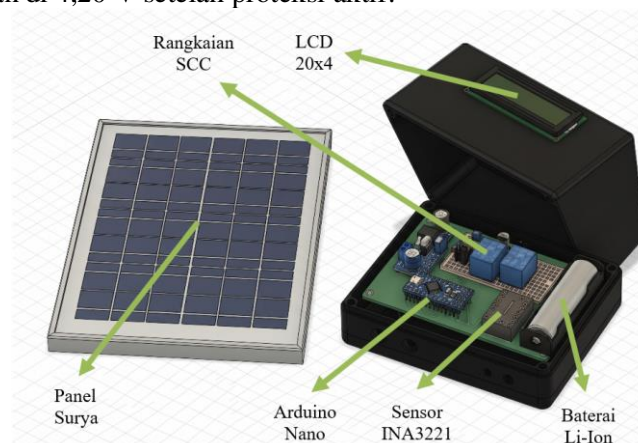
Gambar 1 menunjukkan alur kerja sistem pengisian, yang dimulai dari panel surya sebagai sumber energi, kemudian diteruskan ke *Solar Charge Controller* (SCC) untuk mengatur daya sebelum disalurkan ke baterai *lithium-ion* 18650. Selama proses pengisian, sensor INA3221 memantau nilai tegangan dan arus, lalu mengirimkan data tersebut sebagai umpan balik ke Arduino Nano. Selanjutnya, Arduino Nano mengolah data menggunakan algoritma

PID untuk menentukan sinyal PWM yang sesuai dengan kondisi pengisian. Informasi mengenai tegangan, arus, dan status pengisian kemudian ditampilkan secara *real-time* melalui LCD 20x4.



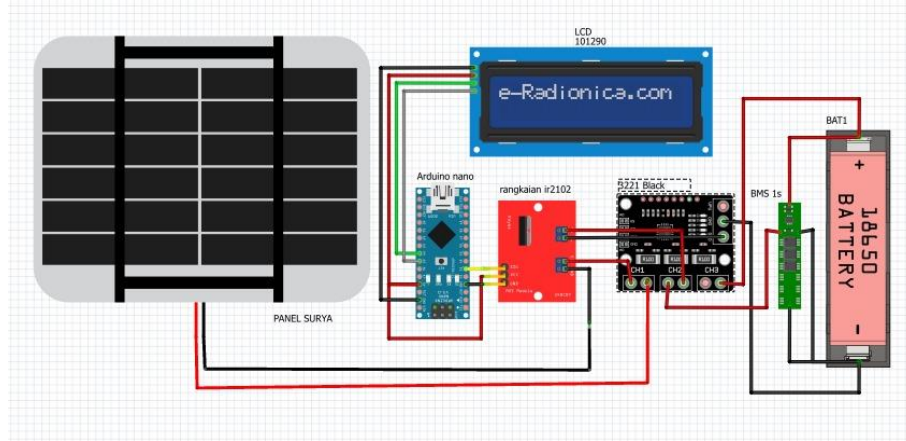
Gambar 2. Flowchart Sistem

Gambar 2 menjelaskan alur pengendalian proses pengisian baterai dengan metode CC–CV. Proses kendali mulai pada mode *Constant Current* (CC) dengan target arus 1,00 A. Arduino memantau tegangan baterai (V_{bat}) dan arus pengisian secara langsung. Selama tegangan baterai masih di bawah 4,15 V, PID mode CC mengatur PWM untuk menjaga arus pengisian tetap dekat 1,00 A. Ketika tegangan baterai mencapai batas 4,15 V, sistem pindah ke mode *Constant Voltage* (CV). Pada mode ini, PID mengatur keluaran agar tegangan baterai mendekati referensi 4,20 V tanpa melewati batas proteksi. Proteksi *overvoltage* menjadi batas keselamatan terpisah. Jika tegangan baterai mencapai atau melebihi 4,20 V, sistem mengatur PWM = 0 dan menghentikan pengisian. Dengan logika ini, sistem tidak mempertahankan tegangan di 4,20 V setelah proteksi aktif.



Gambar 3. Desain Alat

Gambar 3 memperlihatkan rancangan fisik prototipe yang mengintegrasikan panel surya, rangkaian *Solar Charge Controller* (SCC), Arduino Nano, sensor INA3221, LCD 20×4, dan baterai *lithium-ion* 18650 dalam satu sistem. Seluruh komponen disusun secara teratur di dalam kotak pelindung, sehingga koneksi antarbagian menjadi lebih terorganisasi. Susunan ini juga memudahkan pemantauan perangkat serta memperlancar proses pengoperasian dan pengujian prototipe.



Gambar 4. Skema Wiring Sistem Kontrol PID pada *Solar Charge Controller*

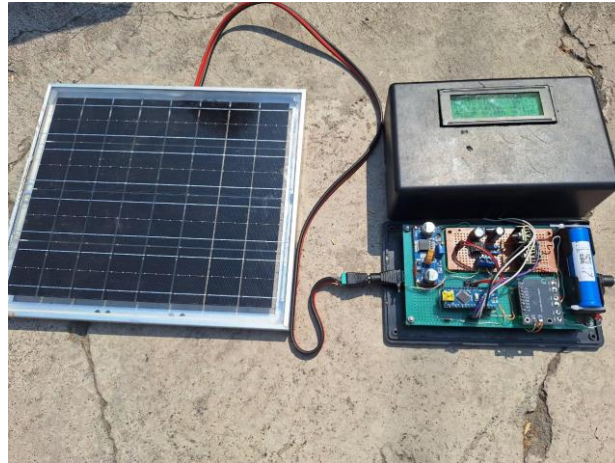
Gambar 4 memperlihatkan hubungan antar komponen sistem. Panel surya dihubungkan ke *buck converter* yang berfungsi untuk menurunkan dan menstabilkan tegangan sesuai kebutuhan baterai. Sensor INA3221 digunakan untuk mengukur tegangan dan arus keluaran, lalu data hasil pengukuran dikirim ke Arduino Nano melalui komunikasi I2C. Arduino memproses data sensor dan setpoint menggunakan algoritma PID, kemudian menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur MOSFET pada *buck converter*. Informasi tegangan, arus, dan status pengisian ditampilkan secara *real-time* pada LCD 20×4 yang juga terhubung ke Arduino melalui I2C.

B. Parameter Pengujian Sistem

Evaluasi kinerja SCC dilakukan melalui tiga jenis pengujian utama. Pengujian pertama bertujuan untuk melihat kestabilan SCC terhadap variasi *input* dengan mengubah persentase permukaan panel yang terkena cahaya menjadi 100%, 75%, 50%, dan 25%. Setiap pengujian menggunakan *setpoint* tegangan 4,20 V dan *setpoint* arus 1,00 A. Persentase ini digunakan sebagai acuan kondisi paparan relatif karena data sumber tidak menyediakan nilai irradiansi dalam W/m² maupun spesifikasi panel seperti Wp, Voc, dan Isc pada titik uji. Oleh karena itu, hasil pengujian ini hanya membandingkan antar kondisi paparan dan tidak digunakan untuk menentukan nilai irradiansi absolut. Pengujian kedua dilakukan untuk mengamati transisi mode pengisian dari CC ke CV dengan cara mengisi baterai hingga sistem menunjukkan status penuh. Data diambil setiap 15 menit untuk memantau perubahan tegangan, arus SCC, dan mode pengisian. Pengujian ketiga dilakukan untuk memastikan fitur proteksi bekerja dengan baik, yaitu menghentikan pengisian saat tegangan baterai mencapai atau melebihi 4,20 V.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan perangkat keras *Solar Charge Controller* yang telah direalisasikan ditunjukkan pada Gambar 5. Sistem menggunakan rangkaian *buck converter* berbasis IC IR2104 dan MOSFET sebagai saklar daya, Arduino Nano sebagai unit kendali, sensor INA3221 untuk pemantauan tegangan dan arus, serta LCD 20×4 sebagai antarmuka pengguna.



Gambar 5. Purwarupa Perangkat Keras *Solar Charge Controller* Berbasis Kontrol PID

C. Parameter Kontrol PID

Tabel 1. Parameter Kontrol PID pada Mode CC dan CV

Mode	K _p	K _i	K _d
Constant Current (CC)	0,8	10	0
Constant Voltage (CV)	0,3	1,5	0

D. Pengujian Kestabilan Pengisian terhadap Perubahan Input

Pengujian dilakukan pada empat variasi tingkat keterbukaan panel surya, yaitu 100%, 75%, 50%, dan 25%, dengan *setpoint* tegangan 4,20 V dan *setpoint* arus 1,00 A. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

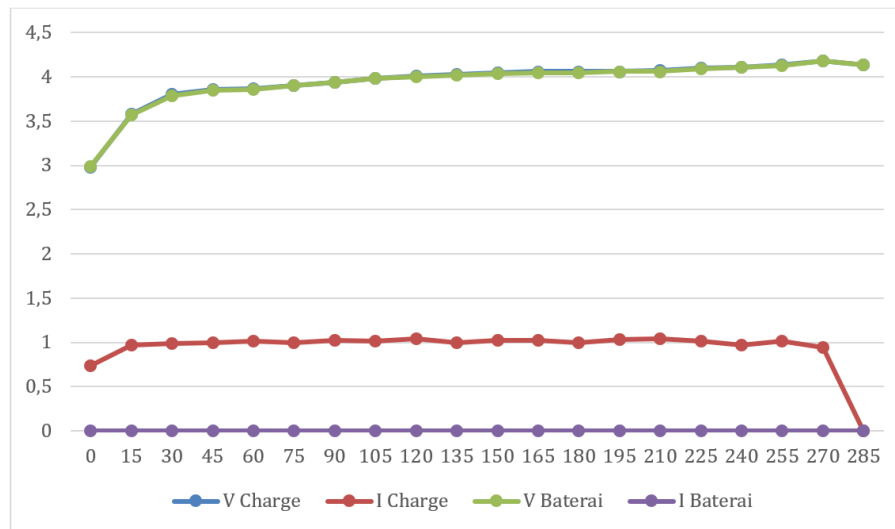
Tabel 2. Hasil Pengujian Kestabilan Pengisian

No	Kondisi Panel	V _{setpoint} (V)	I _{setpoint} (A)	V _{baterai} (V)	I _{baterai} (A)	ΔV (V)
1	Terbuka 100%	4,20	1,00	4,18	0,00	0,02
2	Terbuka 75%	4,20	1,00	4,16	0,00	0,04
3	Terbuka 50%	4,20	1,00	4,14	0,00	0,06
4	Terbuka 25%	4,20	1,00	4,14	0,00	0,06

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan tingkat keterbukaan panel surya hanya menurunkan tegangan baterai sebesar 0,04 V, dari 4,18 V pada kondisi terbuka 100% menjadi 4,14 V pada 25%. Hal ini menunjukkan sistem tetap menjaga tegangan baterai mendekati *setpoint* meskipun cahaya yang diterima panel berkurang. Arus baterai tercatat 0,00 A pada seluruh kondisi karena tidak ada beban yang terhubung ke baterai selama pengujian, sehingga analisis difokuskan pada kestabilan tegangan.

E. Pengujian Peralihan Mode CC ke CV

Pengujian dilakukan dengan mengisi baterai dari kondisi kosong hingga penuh, dengan data dicatat setiap 15 menit. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengujian Pengisian Mode CC ke CV

Tabel 3. Hasil Pengujian Pengisian Mode CC ke CV

No	Waktu (Menit)	Vscc (V)	Iscc (A)	Vbaterai (V)	Ibaterai (A)	Mode
1	0	2,98	0,74	2,99	0,00	CC
2	15	3,58	0,97	3,57	0,00	CC
3	30	3,80	0,99	3,79	0,00	CC
4	45	3,86	1,00	3,85	0,00	CC
5	60	3,87	1,01	3,86	0,00	CC
6	75	3,90	1,00	3,90	0,00	CC
7	90	3,94	1,02	3,94	0,00	CC
8	105	3,98	1,01	3,98	0,00	CC
9	120	4,01	1,04	4,00	0,00	CC
10	135	4,03	1,00	4,02	0,00	CC
11	150	4,05	1,02	4,04	0,00	CC
12	165	4,06	1,02	4,05	0,00	CC
13	180	4,06	1,00	4,05	0,00	CC
14	195	4,06	1,03	4,06	0,00	CC
15	210	4,07	1,04	4,06	0,00	CC
16	225	4,10	1,01	4,09	0,00	CC
17	240	4,11	0,97	4,11	0,00	CC
18	255	4,14	1,01	4,13	0,00	CC
19	270	4,18	0,94	4,18	0,00	CV
20	285	4,14	0,00	4,14	0,00	FULL

Berdasarkan Tabel 3, proses pengisian baterai diawali dengan mode *Constant Current* (CC), di mana arus pengisian dijaga konstan pada sekitar 1 A dan tegangan baterai meningkat secara bertahap. Setelah 270 menit, tegangan baterai mencapai 4,18 V sehingga sistem secara otomatis beralih ke mode *Constant Voltage* (CV). Pada mode ini, arus pengisian mulai diturunkan secara bertahap untuk menjaga tegangan tetap stabil. Pada menit ke-285, baterai dinyatakan penuh dengan arus pengisian turun menjadi 0,00 A dan tegangan baterai tercatat sebesar 4,14 V. Waktu total pengisian hingga baterai penuh adalah sekitar 4 jam 45 menit. Selama pengujian, arus baterai tercatat 0,00 A karena tidak ada beban yang terhubung pada terminal keluaran baterai. Hal ini berbeda dengan arus pengisian dari SCC ke baterai yang tetap stabil di sekitar 1 A pada mode CC. Karena data dicatat setiap 15 menit sedangkan kendali bekerja setiap 50 ms, data ini dapat menggambarkan tracking pada titik pengamatan, tetapi belum cukup untuk menghitung *rise time*, *settling time*, atau *overshoot* transien secara presisi.

F. Pengujian Keamanan Tegangan

Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem menghentikan proses pengisian secara otomatis ketika tegangan baterai mencapai atau melebihi 4,2 V. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Keamanan Tegangan

No	Vbaterai (V)	Ibaterai (A)	Mode/Status
1	4,20	0,00	Proteksi aktif
2	4,15	0,00	CV
3	4,10	0,00	CC
4	4,05	0,00	CC
5	4,00	0,00	CC

Pada rentang tegangan 4,00–4,10 V, sistem tetap mengizinkan pengisian pada mode CC karena tegangan baterai masih di bawah batas maksimum. Saat tegangan baterai mencapai 4,15 V, sistem mulai membatasi pengisian melalui mode CV sebagai langkah awal perlindungan. Ketika tegangan mencapai 4,20 V, sistem mengaktifkan fitur proteksi dan menghentikan pengisian sepenuhnya sehingga baterai tidak menerima energi tambahan setelah mencapai batas aman. Hasil ini menunjukkan bahwa fitur keamanan tegangan bekerja dengan baik dalam mengurangi risiko pengisian berlebih (*overcharging*) pada baterai lithium-ion 18650.

Secara keseluruhan, sistem kontrol PID yang dirancang mampu menjaga tegangan baterai tetap berada pada kisaran 4,14–4,18 V, dengan penyimpangan maksimum 0,06 V dari *setpoint* 4,20 V meskipun intensitas cahaya panel surya berubah-ubah. Sistem juga terbukti mampu menjalankan transisi mode CC ke CV secara otomatis serta menghentikan proses pengisian saat baterai penuh, sehingga risiko pengisian berlebih pada baterai *lithium-ion* 18650 dapat ditekan.

IV. KESIMPULAN

Hasil perancangan dan pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol PID pada *solar charge controller* berhasil diterapkan dengan parameter $K_p = 0,8$, $K_i = 10$, $K_d = 0$ pada mode arus konstan (CC). Pada mode tegangan konstan (CV), digunakan $K_p = 0,3$, $K_i = 1,5$, $K_d = 0$. Sistem ini bisa menjaga tegangan baterai dalam rentang 4,14 sampai 4,18 V. Nilai tersebut mendekati *setpoint* 4,20 V. Arus pengisian menurun ketika intensitas cahaya panel surya berkurang. Sistem kendali otomatis bisa menjalankan proses pengisian baterai dalam dua tahap. Pada mode CC, sistem menjaga arus pengisian mendekati 1 A. Mode CV aktif secara otomatis saat tegangan baterai mencapai kisaran 4,15 sampai 4,18 V hingga baterai penuh. Selain itu, sistem proteksi bekerja sesuai rancangan. Sistem menurunkan nilai PWM menjadi 0 saat baterai sudah penuh, sehingga melindungi baterai *lithium-ion* 18650 dari risiko *overcharging*. Pengembangan berikutnya dapat fokus pada penyetelan ulang parameter kontrol supaya respon terhadap perubahan intensitas cahaya jadi lebih baik. Penambahan sensor suhu dan proteksi arus berlebih juga bisa dilakukan. Pengujian jangka panjang diperlukan untuk menilai keandalan sistem pada berbagai kondisi penggunaan.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. H. Harsito, “Analisis Pengisian Baterai Menggunakan Metode CC-CV Untuk Percepatan Pengisian Pada Baterai Lithium,” 2024.
- [2] N. A. Widarko, I. Irianto, dan A. Tami, “Rancang Bangun Solar Charger dengan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dan Kontrol Proportional Integral Derivative (PID) Untuk Pengisian Baterai Lithium-Ion,” *J. Ecotipe Electron. Control Telecommun. Inf. Power Eng.*, vol. 8, no. 2, hlm. 120–130, 2021.
- [3] R. W. Sikumbang, “Analisis efisiensi solar charge controller menggunakan integrasi numerik dengan matlab simulink,” *Kurvatek*, vol. 9, no. 2, hlm. 127–134, 2024.
- [4] M. Otono, “Perancangan Sistem Charging Baterai Lithium-ion Menggunakan DC-DC Buck Converter Dengan Metode Constant Current–Constant Voltage,” *Setrum Sist. Kendali-Tenaga-Elektron.-Telekomun.-Komput.*, vol. 10, no. 1, 2021.
- [5] R. N. Amalia, I. N. Syamsiana, A. A. Prasajo, dan A. R. A. H. Fauzi, “Desain dan Implementasi Battery Charging pada Fotovoltaik dengan Topologi Non-Inverting Cuk Konverter,” *J. Elektron. Dan Otomasi Ind.*, vol. 12, no. 1, hlm. 19–32, 2025.
- [6] M. A. Darmawan, “Rancang Bangun MPPT Charger Controller Untuk Implementasi Solar Cell Berbasis

Arduino,” 2023.

- [7] F. Azim, A. Ullah, J. Jufrizel, dan A. Faizal, “Implementasi Kendali PID Pada Kecepatan Motor DC Sebagai Media Pembelajaran Berbasis Arduino Dan LabVIEW,” *J. Telecommun. Electron. Control Eng. JTECE*, vol. 6, no. 2, hlm. 139–151, Jul 2024, doi: 10.20895/jtece.v6i2.1461.