

Rancang Bangun Pengisian Baterai Menggunakan Buck Converter

Asnil^{1,6}, Eko Avin Wibowo^{2,6}, Krismadinata^{3,6}, Hanif Hazman^{4,6}, Irma Husnaini^{5,6}

^{1,2,3,4,5} Jurusan Teknik Elektro FT UNP

⁶Centre for Energy and Power Electronics Research (CEPER), Universitas Negeri Padang
Jl. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar-Padang 25131, Sumatera Barat-Indonesia

asn1181@ft.unp.ac.id¹, ekoavinw@gmail.com², krisma@ft.unp.ac.id³
hanifhaz06@gmail.com⁴, Irma_hnni@ft.unp.ac.id⁵

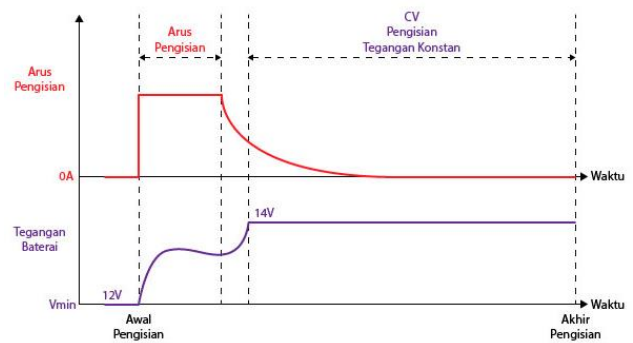
Intisari-Makalah ini membahas tentang rancang bangun *buck converter* yang digunakan untuk pengisian baterai dengan menerapkan metode pengisian tegangan konstan pada system PLTS. Metode kendali PID digunakan untuk menjaga agar tegangan keluaran dari *buck converter* tetap stabil. Dari hasil pengujian, tegangan keluaran *buck converter* stabil pada nilai 14,5 Volt dengan nilai $K_p = 1.95$, $K_i = 3,9$ dan $K_d = 0,000243$. Penalaan PID menggunakan metode Ziegler-Nichols didapatkan nilai *overshoot* tegangan sebesar 0V, nilai *rise time* 0.01s dan *settling time* 0.03s. Pengujian dilakukan pada baterai 12 V/1,2 Ah dengan kondisi tegangan awal 11,5 Volt dapat diisi dalam waktu sekitar 20 menit.

Keywords- *Buck converter*, *PID*, *Ziegler Nichols*, *baterai*

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan teknologi, banyak perangkat listrik yang menggunakan baterai sebagai sumber energi. Perangkat listrik seperti laptop, pesawat tak berawak, bahkan kendaraan listrik menggunakan baterai sebagai sumber energinya [1]. Jika dilihat dari harga dan ketersediaannya maka salah satu jenis baterai yang sering digunakan di masyarakat adalah *Lead Acid Batteries* baik untuk penyimpanan energi, cadangan daya darurat bahkan penerangan [2], [3]. Setelah digunakan baterai akan mengalami penurunan kapasitas dan untuk dapat Kembali kepada kapasitas maksimum maka baterai harus diisi terlebih dahulu. Dari sekian banyak metode pengisian baterai salah satu diantaranya adalah metode tegangan konstan atau yang dikenal dengan constant voltage (CV). Pengisian tegangan konstan ini untuk mencegah pengisian yang berlebihan dimana arus pengisian pada awalnya akan tinggi terutama pada saat baterai kosong dan secara bertahap akan menurun sampai pengisian selesai karena tegangan baterai hampir sama dengan tegangan sumber [4], [5]. Pada Gbr. 1 dapat dilihat karakteristik pengisian baterai menggunakan pengisian tegangan konstan [5].

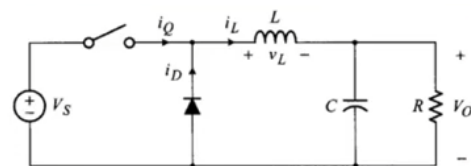
Selama proses pengisian baterai, tegangan pengisian harus dijaga agar tetap konstan. Pada penelitian ini, system pengisian baterai menggunakan konverter DC jenis *buck converter*. Agar tegangan keluaran tetap konstan dan stabil maka diterapkanlah metode kendali *Proportional Integral Derivative* (PID). Sedangkan untuk menentukan parameter PID digunakan metode *Ziegler-Nichols*.



Gbr. 1 Karakteristik pengisian baterai menggunakan tegangan konstan

A. Buck Converter

Buck converter digunakan untuk pengisian baterai dan untuk mengontrol aliran daya dari sumber ke baterai. *Buck converter* adalah sebuah konverter DC penurun tegangan dengan yang memiliki efisiensi mencapai 90% [6]. *Buck converter* bekerja dengan prinsip menggunakan saklar yang beroperasi dalam dua mode, yaitu mode saklar *ON* dan mode saklar *OFF*. Dalam tulisan ini, untuk mengendalikan proses saklar *ON* dan *OFF*, digunakan mikrokontroler arduino sebagai pembangkit sinyal PWM [7]. Durasi *ON* dan *OFF* saklar dipengaruhi oleh tegangan kerja pada baterai. Jika tegangan pengisian baterai yang terdeteksi jauh lebih rendah dari tegangan nominal baterai, maka durasi *ON* saklar akan diperpanjang. Begitu pula sebaliknya, sehingga tegangan pengisian baterai stabil sesuai dengan tegangan kerja baterai [8]–[10]. Pada Gbr.2 dapat dilihat bentuk rangkaian dari *buck converter*.



Gbr. 2 Buck converter

Menentukan parameter dari *buck converter* dapat menggunakan persamaan (1) samapi dengan persamaan (5) [10]. Menentukan nilai tegangan keluaran dari *buck converter* dapat digunakan persamaan (1)

$$V_o = D \times V_{in} \quad (1)$$

V_o adalah tegangan keluaran *buck converter*, D adalah *duty cycle* dan V_{in} adalah tegangan masukan. Menentukan nilai induktor dan arus yang melewati induktor dapat menggunakan persamaan (2) dan (3).

$$L_c = \frac{(1-D_{max})R_{max}}{2f} \quad (3)$$

$$I_{L\ max} = V_o \left[\frac{1}{R_{min}} + \frac{1-D_{min}}{2Lf} \right] \quad (4)$$

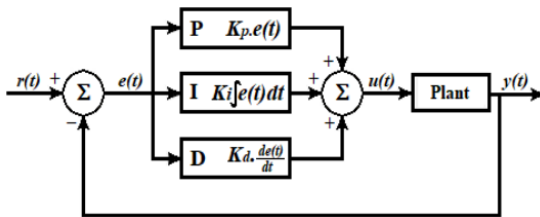
Sedangkan menentukan nilai kapasitor dapat digunakan persamaan (5)

$$C = \frac{(1-D_{min})}{8Lf^2 \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right)} \quad (5)$$

B. Kendali PID

PID merupakan metode umpan balik yang umum digunakan dalam sistem kontrol di industri otomatis. Metode ini menggunakan faktor proporsional (P), aksi integral (I), dan aksi diferensial (D) untuk mengubah sinyal kesalahan menjadi sinyal kontrol input [11]. Sinyal kesalahan diperoleh dengan membandingkan sinyal output yang diukur dengan nilai referensi yang diinginkan. Sinyal kesalahan kemudian diproses oleh kontroler PID untuk mengurangi selisih antara keduanya [12],[13]. Kontroler PID merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Pengontrol PID adalah pengontrol konvensional yang banyak dipakai dalam dunia industri [14].

Pada perancangan *buck converter* sebagai pengisi baterai, kontrol PID digunakan untuk mengontrol tegangan keluaran *buck converter* dengan menghasilkan lebar pulsa yang sesuai dengan set point yang ditentukan. Hal ini bertujuan agar tegangan keluaran *buck converter* tetap stabil meskipun terjadi perubahan pada tegangan masukan. Pada penelitian ini, konstanta kontrol PID akan diproses oleh mikrokontroler Arduino Uno. Pada gambar Gbr 3. Dapat dilihat bentuk blok diagram dari control PID.



Gbr. 3 Blok diagram control PID

Persamaan control PID pada domain waktu dapat ditulis seperti pada persamaan (6). Sedangkan persamaan (7) adalah untuk domain frekuensi.

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{K_i}{s} de(t) \quad (6)$$

dimana :

$U(t)$ = Sinyal keluaran pengendali PID

KP = Konstanta proporsional

KI = Konstanta integral

KD = Konstanta derivative

$e(t)$ = Sinyal kesalahan (Referensi – keluaran plant)

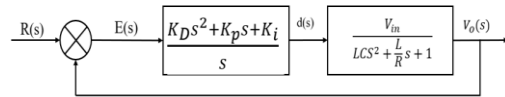
$$U(s) = \left[K_p + \frac{K_i}{s} + K_D \cdot s \right] \cdot E(s) \quad (7)$$

Sehingga fungsi transfer dari control PID dapat dituliskan seperti pada persamaan (8) dan (8)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D \cdot s \quad (8)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (9)$$

Sedangkan blok diagram control PID untuk *buck converter* dapat digambarkan seperti pada Gbr.4



Gbr. 4 Blok diagram control PID dari *buck converter*

Sehingga fungsi alih untuk rangkaian tertutup dari rangkaian *buck converter* dapat dituliskan seperti persamaan (10).

$$\frac{V_o(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{(K_D s^2 + K_p s + K_i) V_{in}}{(L C s^2 + \frac{L}{R} s + 1) \cdot s + (K_D s^2 + K_p s + K_i) \cdot V_{in}} \quad (10)$$

Agar mendapatkan respons yang stabil dan sesuai dengan perencanaan, penyetelan konstanta PID dilakukan menggunakan metode Ziegler-Nichols dengan pendekatan osilasi berkesinambungan. Penyetelan kontrol PID untuk menghasilkan kurva osilasi berkesinambungan dimulai dengan mengatur nilai T_i (waktu integral) menjadi tak terhingga dan T_d (waktu diferensial) menjadi 0. Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai parameter K_p , T_i , dan T_d dapat dilihat pada Tabel 1 [15].

TABEL I
PENALAN PID METODE ZIEGLER NICHOLS

Rule	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	0	0
PI	$0.45 K_u$	$\frac{1}{1.2} P_u$	0
PID	$0.6 K_u$	$\frac{1}{2} P_u$	$\frac{1}{8} P_u$

Metode Ziegler-Nichols menggunakan konstanta hasil eksperimen dari osilasi berkesinambungan (K_u) dan periode osilasi berkesinambungan (P_u) untuk menentukan nilai K_p , T_i , dan T_d dapat digunakan persamaan (13) – (15).

$$T_i = 0.5 \times P_u \quad (11)$$

$$T_d = 0.125 \times P_u \quad (12)$$

$$K_p = 0.6 \times K_u \quad (13)$$

$$K_i = K_p / T_i \quad (14)$$

$$K_d = K_p \times T_d \quad (15)$$

Dimana:

K_p = Konstanta proporsional

K_i = Konstanta integral

K_d = Konstanta derivative

T_i = Konstanta waktu integral

T_d = Konstanta waktu derivative

K_u = Nilai ultimate gain

P_u = Nilai periode gain

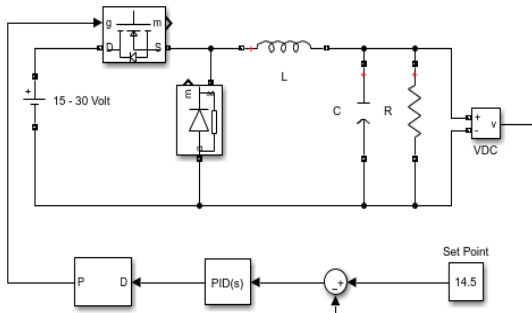
Setelah nilai K_p , K_i , dan K_d diperoleh menggunakan metode Ziegler-Nichols dan respons tegangan keluaran tidak sesuai dengan perencanaan awal maka dilakukan penyesuaian parameter PID berdasarkan kelebihan dan kekurangan masing-masing kontrol PID. Pada penelitian ini digunakan metode penalaan PID menggunakan metode Ziegler-Nichols dimana pada prosesnya penentuan parameter PID dihitung berdasarkan respon osilasi berkesinambungan. Pada penelitian ini juga digunakan aplikasi visual studio sebagai antar muka monitoring dari parameter *buck converter*.

II. METODE

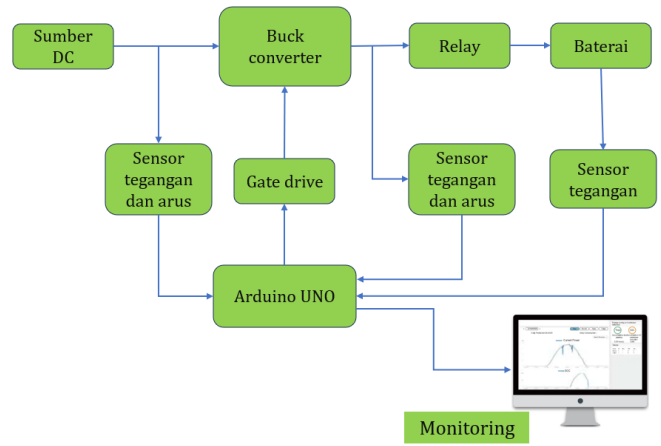
Sistem pengisian baterai yang di rancang bangun pada penelitian ini menggunakan *buck converter* untuk menurunkan tegangan masukan sesuai dengan kapasitas baterai. Sumber tegangan yang dirancang bervariasi dari 15 Volt sampai 30 Volt dengan keluaran konstan sebesar 14,5 Volt. Desain *buck converter* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2. Sedangkan blok diagram system yang diajukan dapat dilihat pada Gbr. 6. Baterai yang digunakan untuk penelitian adalah jenis *Lead Acid Batteries* dengan kapasitas 12 Volt/1,2 Ah.

TABEL II
DESAIN BUCK CONVERTER

Tegangan input	15 – 30 Volt
Tegangan Output	14.5 Volt
Mosfet	IRFP460
Dioda	Schottky SR460
Induktor	100 uH
Kapasitor	100 uF
Resistor	1 KOhm
Fs	31, 25 KHz

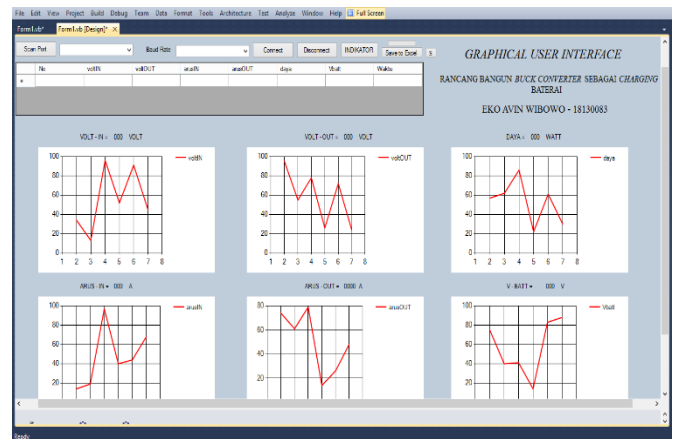


Gbr. 5 Rangkaian *buck converter*



Gbr. 6 Sistem pengisian baterai yang diajukan

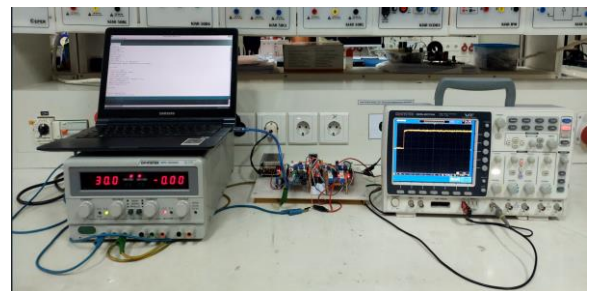
Pada system yang diajukan juga digunakan aplikasi Visual studio untuk memantau dan menampilkan informasi dari parameter kelistrikan secara *real-time*. Pada Gbr. 7 dapat dilihat desain monitoring parameter kelistrikan menggunakan aplikasi *Visual Studio*.



Gbr. 7 Perancangan monitoign menggunakan aplikasi *visual basic*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

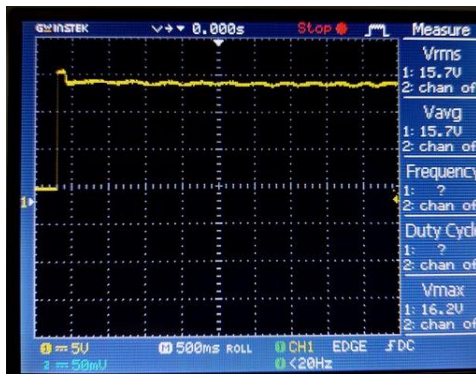
Hasil pengujian sistem pengisian baterai yang diajukan dapat beroperasi sesuai dengan yang diharapkan. Pada Gbr. 8 dapat dilihat perangkat keras sistem pengisian baterai menggunakan *buck converter*.



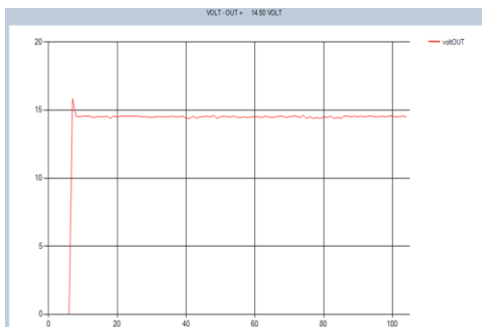
Gbr. 8 Perangkat keras sistem pengisian batereai

A. Pengujian Buck Converter

Gbr. 9 merupakan bentuk keluaran dari rangkaian *buck converter* sebelum menggunakan metode PID dengan konsep Ziegler-Nichols. Sedangkan Gbr. 10 adalah bentuk sinyal keluaran *buck converter* menggunakan aplikasi visual studio



Gbr. 9 Bentuk Tegangan keluaran *Buck converter*



Gbr. 10 Bentuk tegangan keluaran *buck converter* menggunakan aplikasi visual studio

Pada Gbr. 9 dan Gbr. 10 terlihat adanya *overshoot* pada respon tegangan keluaran *buck converter* sebesar 1.7 V dan terdapat juga osilasi. Mengatasi *overshoot* dan osilasi pada tegangan keluaran *buck converter* digunakan metode PID dengan menerapkan Ziegler-Nichols untuk melakukan tuning PID. Metode ini membantu dalam menyesuaikan konstanta PID agar respons sistem menjadi lebih cepat dan stabil.

B. Pengujian Tuning PID

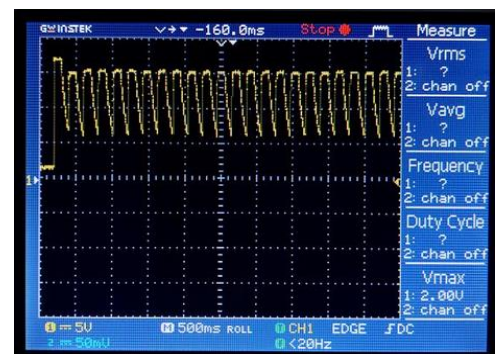
Tuning PID dilakukan untuk menemukan nilai K_p , T_i , dan T_d yang tepat agar mendapatkan respons yang stabil dan sesuai dengan set point yang diinginkan. Proses penentuan konstanta PID sangat penting karena berpengaruh pada kinerja sistem. Penentuan konstanta PID dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols dengan sistem loop tertutup. Penalaan PID dilakukan dengan mengatur nilai T_i dan T_d menjadi 0, kemudian nilai K_p dinaikkan secara bertahap sampai diperoleh respon osilasi yang berkesinambungan. Pada Gbr. 11 dan Gbr. 13 dapat dilihat tampilan respon yang diperoleh dengan menaikkan nilai K_p secara bertahap.



Gbr. 11 Nilai $K_p = 1$

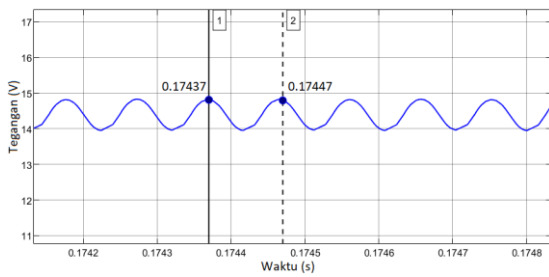


Gbr. 12 Nilai 10 $K_p = 2$



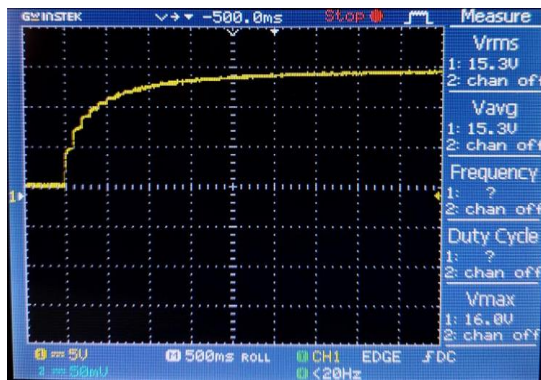
Gbr. 13 Nilai $K_p = 3.25$

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terjadi peningkatan nilai K_p secara bertahap untuk mendapatkan respon osilasi yang berkesinambungan pada nilai $K_p = 3.25$. Berdasarkan hasil simulasi berdasarkan Gbr 5, maka didapatkan nilai periode osilasi (P_u) sebesar 0.0001s seperti pada Gbr 14.

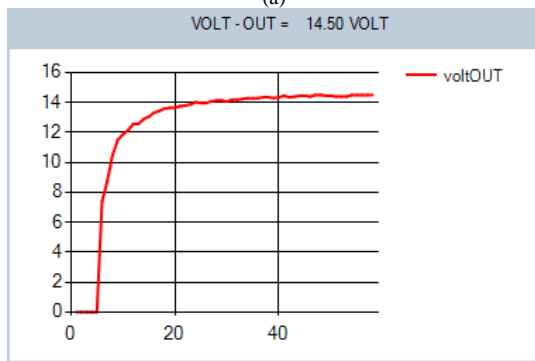


Gbr. 14 Periode osilasi (Pu)

Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan pada table 1 diperoleh nilai konstanta $K_p = 1.95$, $K_i = 3.9$, dan $K_d = 0.0000243$. Menggunakan konstanta tersebut maka diperoleh respon tegangan buck converter seperti pada Gbr 15 dengan set point 14,5 Volt.



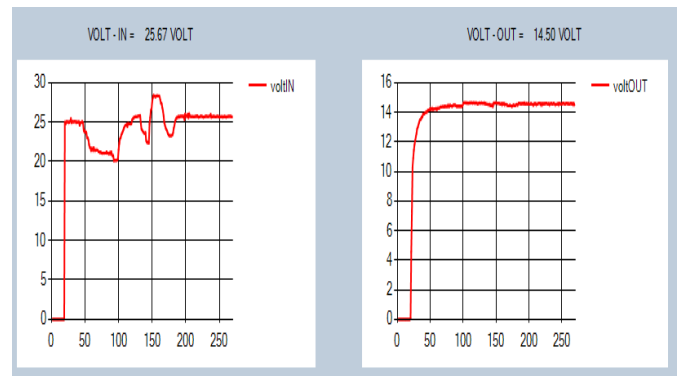
(a)



(b)

Gbr. 15 Tegangan keluaran buck converter setelah menerapkan metode PID (a) pengukuran menggunakan osiloskop, (b) tampilan aplikasi visual studio

Setelah menerapkan metode PID maka didapatkan nilai respon awal tegangan keluaran (*overshoot*) sebesar 0V dengan waktu naik (*rise time*) selama 0.01s dan waktu menuju keadaan mantap (*settling time*) selama 0.03s. Gbr. 16 merupakan tampilan respon tegangan masukan dan keluaran *buck converter* pada aplikasi visual studio. Pada Gbr. 16 terlihat perubahan nilai tegangan masukan namun nilai keluaran tetap stabil. Hal ini bisa didapatkan setelah menerapkan metode kontrol PID dan metode Ziegler-Nichols sebagai tuning PID.



Gbr. 16 Grafik respon *buck converter* setelah menggunakan metode ziegler nichols untuk tuning PID

Berdasarkan Gbr. 16 dapat disimpulkan bahwa penalaan PID dengan metode Ziegler Nichols pada sistem pengisian baterai menggunakan *buck converter* dapat berjalan sesuai dengan yang diinginkan. Dimana tegangan sumber dapat bervariasi dari 15 Volt – 30 Volt sedangkan tegangan keluaran tetap konstan dan stabil pada nilai 4,5 Volt. Menggunakan metode ini juga mampu mereduksi nilai *overshoot* dan meredam osilasi pada tegangan keluaran *buck converter*. Dengan demikian, metode yang digunakan dapat membantu dalam meningkatkan performa sistem *buck converter* dan mempercepat proses penalaan PID. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penalaan PID menggunakan metode osilasi Ziegler-Nichols pada system pengisian baterai menggunakan *buck converter* mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran sesuai dengan nilai setpoint serta mereduksi nilai *overshoot* dan mempercepat nilai *rise time* dan *settling time*.

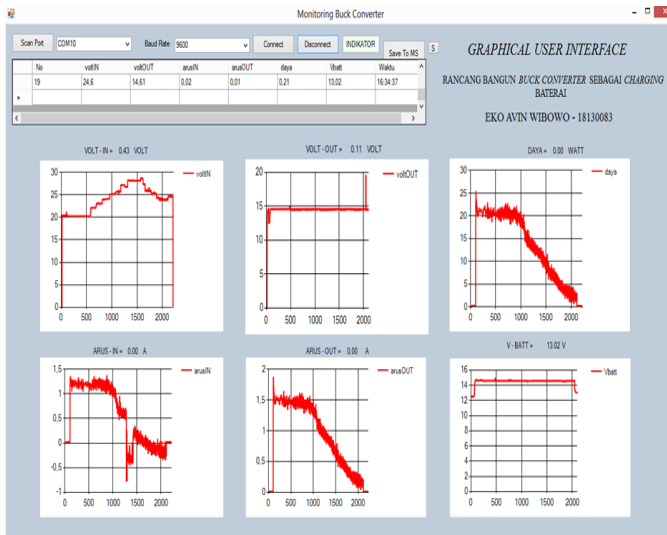
C. Proses Pengisian Baterai (Charging)

Pada proses pengisian baterai data yang diamati adalah waktu pengisian, tegangan baterai sebelum dan setelah pengisian, serta arus pengisian. Selanjutnya, data tersebut dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mengisi baterai dengan efektif dan efisien. Pada tabel 3 dapat dilihat data pengujian selama proses pengisian baterai. Semua data pada tabel 3 didapatkan melalui tampilan monitoring menggunakan aplikasi visual studio. Dimana tampilan monitoring parameter yang dibutuhkan selama proses pengisian baterai dapat dilihat pada Gbr. 17.

TABEL III
HASIL PENGUJIAN PROSES PENGISIAN PADA BATERAI 12 V – 1.2 AH

Waktu	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	P (W)	Tegangan baterai
16:12	-	-	-	-	-	11.58
16:13	22,12	1,42	14,50	1,92	27,08	14,60
16:14	22,18	1,29	14,50	1,43	20,06	14,60
16:15	23,96	1,11	14,50	1,40	19,76	14,62
16:16	25,14	0,87	14,50	1,32	19,18	14,63
16:17	25,51	0,63	14,50	1,13	16,30	14,64
16:18	25,73	0,55	14,50	1,03	14,93	14,63
16:19	26,08	0,26	14,50	0,87	12,51	14,60
16:20	28,25	0,13	14,50	0,82	11,85	14,60
16:21	28,02	0,11	14,56	0,74	10,78	14,60

16:22	28,14	0,62	14,50	0,58	8,43	14,60
16:23	28,57	0,55	14,50	0,55	8,01	14,60
16:24	25,89	0,53	14,50	0,53	7,71	14,60
16:25	25,79	0,24	14,50	0,37	5,40	14,60
16:26	25,03	0,15	14,50	0,26	3,78	14,60
16:27	25,19	0,13	14,50	0,24	3,47	14,60
16:28	24,28	0,11	14,50	0,32	4,61	14,60
16:29	23,96	0,05	14,50	0,18	2,70	14,60
16:30	23,91	0,03	14,50	0,24	3,46	14,60
16:31	23,96	0,02	14,50	0,08	1,16	14,60
16:32	24,60	0,02	14,50	0,05	0,72	14,60
16:33	24,53	0,01	14,50	0,01	0,14	14,60
16:34	-	-	-	-	-	13,02



Gbr. 17 Grafik Respon Proses Pengisian Baterai Pada aplikasi monitoring menggunakan Visual Studio.

Tegangan awal baterai pengujian adalah 11,58 Volt. Nilai arus cukup besar pada tahap awal pengisian dan semakin lama semakin kecil sampai mendekati nilai 0 (nol) dan proses pengisian berhenti. Proses pengisian berhenti secara otomatis saat arus pengisian mendekati nilai 0 dan tegangan baterai mencapai 13 Volt yang menandakan bahwa baterai telah terisi penuh. Pada tahap ini sensor arus akan memberikan umpan balik kepada Arduino, yang selanjutnya memberikan sinyal pada relay. Hal ini menyebabkan relay dalam keadaan normally open sehingga arus dan tegangan terputus yang menandakan bahwa proses pengisian baterai telah selesai.

IV. PENUTUP

Berdasarkan hasil pengujian, penalaan PID menggunakan metode ziegler nichols sangat efektif dalam menentukan konstanta PID. Menggunakan metode ini dapat mempertahankan nilai tegangan keluaran *buck converter* sesuai dengan set point, konstan pada nilai 14,5 Volt meskipun dengan masukan bervariasi. Disamping itu juga dapat mereduksi nilai overshoot dan mempercepat nilai *rise time* dan *settling time*. Pada pengujian pengisian baterai, sistem *buck converter* mampu melakukan pengisian pada baterai 12V/1,2Ah dengan baik dalam waktu lebih kurang 20 menit.

REFERENSI

- [1] H. Suryoatmojo, "Design Li-Po Battery Charger with Buck Converter under Partially CC-CV Method," in *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2020, pp. 101–106.
- [2] K. Shahadat Kabir, "Design of Battery Charging from Solar using Buck Converter with MPPT Algorithm," 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.21498.82886.
- [3] A. Nugroho, E. Rijanto, and L. Rozaqi, "Buck converter control for lead acid battery charger using peak current mode," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 686–694, 2017, doi: 10.11591/ijpeds.v8i2.pp686-694.
- [4] R. Semiconductor, "Charging Method," *Rohm Semiconductor*.
- [5] Hendo, "Metode Pengisian Baterai Asam Timbal," <https://hendo.github.io/library/ototronik/leadacid-charger/>
- [6] I. Sudiharto, O. A. Qudsi, and M. I. Rahadyan, "Design and Implementation of Buck Converter for Fast Charging with Fuzzy Logic," *Journal on Advanced Research in Electrical Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 9–14, 2021.
- [7] N. K. K, N. A. Prasath, Dr. N. Kaleeswari, and G. Ranjithkumar, "Arduino Based Buck Boost Converter for Effectual Solar Panel Applications," vol. 10, no. 8, pp. 9–14, 2022.
- [8] G. Ang, P. J. Arcibal, L. M. R. Crisostomo, C. F. Ostia, P. J. C. S. Joaquin, and J. E. C. Tabuton, "Implementation of a fuzzy controlled buck-boost converter for photovoltaic systems," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 641–648. doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.740.
- [9] W. Indrasari, G. Rama, and R. N. Setiadi, "Circuit Simulation of the DC-DC Converter with Variation of PWM Load in Solar Panel Electrical Energy Storage," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2022, pp. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/2377/1/012020.
- [10] S. Chakraborty, M. M. Hasan, I. Worighi, O. Hegazy, and M. A. Razzak, "Performance Evaluation of a PID-Controlled Synchronous Buck Converter Based Battery Charging Controller for Solar-Powered Lighting System in a Fishing Trawler," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 2722, pp. 1–26, 2018, doi: 10.3390/en11102722.
- [11] K. A. Al Sumarman, N. Sulaiman, N. I. A. Wahab, H. Hizam, and Department, "Artificial Neural Networks , PID , and Fuzzy Logic Controllers," 2022.
- [12] F. S. Dinniyah, W. Wahab, and Muhammad Alif, "Simulation of Converter for Solar Panels using PID Controller," *Energy Procedia*, vol. 115, pp. 102–113, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.011.
- [13] R.-E. Tudoroiu and M. Zaheeruddin, "Fuzzy Logic PID Control of a PMDCM Speed Connected to a 10-kW DC PV Array Microgrid—Case Study," vol. 18, pp. 359–362, 2019, doi: 10.15439/2019F60.
- [14] R. F. Anugrah, "Kontrol Motor Brushless DC Menggunakan Six Step Comutation dengan Kontrol PID (Proportional Integral Derivative)," vol. 7, no. 2, 2020.
- [15] M. Shahrokhii and A. Zomorrodi, "Comparison of PID Controller Tuning Methods".