

PERANCANGAN SISTEM TEGANGAN DAN ARUS TERKENDALI (CONSTANT VOLTAGE DAN CONSTANT CURRENT) BERBASIS KONTROL PID

Hamasah Abdul Aziz *), Sudjadi, dan Trias Andromeda

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro

Program Studi Sarjana Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

*)E-mail: mashamas@students.undip.ac.id

Abstrak

Metode *Constant Current Constant Voltage* (CCCV) merupakan salah satu metode pengisian baterai yang dapat meminimalisir kerusakan saat pengisian, metode ini memerlukan suatu sistem pengendalian arus dan tegangan secara otomatis agar tidak terjadi *overcharge*. Dalam penelitian ini metode kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) digunakan untuk mengendalikan arus dan tegangan pengisian. Kontroler PID digunakan untuk mencapai dan mempertahankan nilai referensi parameter dengan cara mengoreksi *error*. Dengan menggunakan mikrokontroler, sinyal kontrol akan diteruskan ke driver untuk mengontrol aktuatur arus dan tegangan. *Gain* PID didapatkan dengan menggunakan metode *trial and error*. Dari hasil pengujian pengontrolan arus memiliki *error steady state* rata – rata sebesar 0,29% dan nilai *overshoot* 18%.. Sedangkan pengontrolan tegangan memiliki *error steady state* rata – rata sebesar 0,24% dan nilai *overshoot* 0.5%.

Kata-kunci : *PID, CCCV, Constant Current Constant Voltage, kontrol tegangan, kontrol arus, pengisian baterai, error steady state, overshoot.*

Abstract

Constant Current Constant Voltage (CCCV) is a method of charging the battery that can minimize damage during charging, this method requires an automatic current and voltage control system to prevent overcharge. In this study, the Proportional Integral Derivative (PID) method is used to control the charging current and voltage. The PID controller is used to achieve and maintain the parameter reference value by correcting errors. By using a microcontroller, the control signal will be passed to the driver to control the actuator current and voltage. PID gain was obtained using the trial and error method. From the test results, the current control has an average steady state error of 0.29% and an overshoot value of 18%. While the voltage control has an average steady state error of 0.24% and an overshoot value of 0.5%.

Keywords: PID, CCCV, Constant Current Constant Voltage, voltage control, current controller, charging battery, steady state error, overshoot.

1. Pendahuluan

Berbagai jenis baterai diciptakan didunia, dengan spesifikasi dan kemampuan yang berbeda disetiap jenisnya, untuk membantu berbagai keperluan manusia. Pemakaian baterai terus menerus tentunya akan mengurangi daya baterai, sehingga teknologi baterai yang dapat diisi ulang atau *Rechargeable Battery* akan semakin membantu manusia dalam memenuhi kebutuhan.

Proses pengisian pada baterai isi ulang dilakukan dengan mengalirkan arus searah dengan nilai tertentu secara terus menerus agar tegangan pada baterai bertambah hingga mencapai nilai tertentu. Pengisian yang berlebihan dapat merusak baterai sehingga mengurangi usia pakai baterai.

Oleh karena itu diperlukan metode serta spesifikasi pengisian yang tepat untuk setiap baterai agar tidak terjadi *overcharge* saat dilakukan pengisian[1][2].

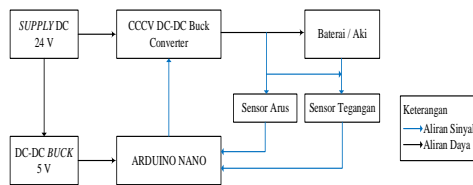
Terdapat beberapa metode untuk pengisian normal baterai, salah satunya adalah CC-CV (*constant current-constant voltage*)[3]. Metode tersebut mengisi ulang baterai dengan arus yang konstan pada awal pengisian hingga tegangan pada baterai mencapai nilai tegangan tertentu, kemudian terjadi penurunan arus secara bertahap agar nilai tegangan konstan pada nilai tersebut hingga nilai arus pengisian menjadi sangat kecil atau mendekati nol. Lalu *cutt-off* akan terjadi saat nilai arus telah mendekati nol[4].

Ditemukan pada penelitian terdahulu metode CC-CV tersebut dapat dilakukan dengan mengendalikan nilai PWM (*Pulse Width Modulation*) menggunakan metode *on-off* untuk mengendalikan nilai arus yang menuju baterai [5]. Sehingga dalam penelitian ini penulis meneliti pengendalian respon metode CC-CV pada pengisian baterai isi ulang dengan metode kontrol *Proportional Integral Derivative* berbasis mikrokontroler.

2. Metode

2.1 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras dibutuhkan untuk pengambilan data, pengontrolan dan analisis. Pada penelitian ini dirancang sebuah purwarupa *buck converter* tipe CCCV untuk pengisian baterai motor (accumulator), Yang mana akan dirangkai seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok perangkat keras.

Pada perancangan perangkat keras ini dibuat CCCV DC-DC *Buck converter*, menggunakan MOSFET dan diode sebagai komponen switching serta inductor toroid dan kapasitor sebagai rangkaian tapis frekuensi rendah. Modul mikrokontroler digunakan sebagai pusat pengaturan seluruh kerja system, mikrokontroler tersebut membaca masukan berupa tegangan dan arus, lalu mengolah data hasil pembacaan untuk pengendalian dengan metode PID. Sinyal kontrol yang dihasilkan akan mengatur nilai PWM dari frekuensi yang dibangkitkan mikrokontroler. Nilai PWM tersebut akan digunakan untuk mengatur *duty cycle* MOSFET sehingga didapat arus dan tegangan sesuai *setpoint*.

Tabel 1. Spesifikasi *Buck converter*.

Parameter	Nilai Besaran
Tegangan input	24 V _{DC}
Tegangan output	0 – 18,6 V _{DC}
Arus output	0 – 5 A

Dengan tegangan masukan sebesar 24 VDC *buck converter* yang digunakan dapat menghasilkan tegangan tegangan keluaran sebesar 0 hingga 18 volt dan arus keluaran sebesar 0 hingga 5 ampere sesuai keterangan yang tertera pada table 1. sehingga telah memenuhi kebutuhan pengisian baterai motor.

2.2 Perancangan Kontrol

Perancangan control otomatis diawali dengan pengambilan data awal yang dibutuhkan yaitu hubungan antara besar PWM yang mengatur *duty cycle* dengan tegangan

keluaran. Kemudian merancang system control dalam bentuk state diagram beserta algoritma program yang diinginkan guna keberjalanan system.

2.2.1. Pengambilan Data Awal

Pengambilan data awal dibutuhkan untuk melihat pengaruh nilai PWM terhadap tegangan yang dihasilkan oleh system. Data awal didapat dengan melakukan uji open loop pada perangkat keras yang telah dirancang pada subbab sebelumnya. Nilai PWM diatur secara manual dan mencatat tegangan keluaran system. Dengan menggunakan beban resistor 15 ohm dan tegangan masukkan sebesar 24 VDC, diinginkan tegangan keluaran sebesar 13 VDC. Hasil pengambilan data awal dapat dilihat pada table 3.2 berikut.. Table 3.2 Perbandingan besar *duty cycle* dengan tegangan keluaran.

Tabel 2. Hubungan *duty cycle* dengan tegangan keluaran.

Duty Cycle (%)	Tegangan Keluaran (V)	Error
0	0	-13
21,56	9,64	-3,36
49,01	13,58	0,58
50,98	13,84	0,84
54,9	14,26	1,26
58,8	14,67	1,67
60,7	14,89	1,89
100	18,66	5,66

Table 2 menunjukkan hubungan antara *duty cycle* dan tegangan keluaran system, nilai eror merupakan selisih dari nilai keluaran dengan nilai tegangan yang diinginkan. Didapat kisaran nilai error yang mungkin terjadi pada system yaitu -13 hingga 5,66. Kisaran nilai error tersebut akan digunakan untuk mempersempit range trial and error dalam penentuan nilai *gain proportional* (Kp), *gain integral* (Ki) dan nilai *gain derivative* (Kd).

2.2.2. Perancangan State Diagram

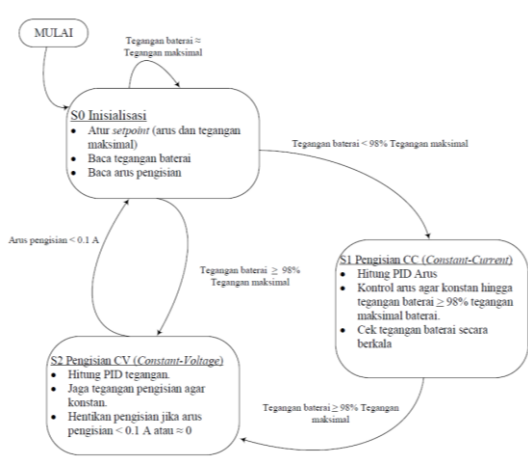
Algoritma control dituangkan dalam bentuk diagram state, sebagai langkah awal dan acuan untuk membuat system control serta memudahkan pemrograman.

Gambar 2 adalah diagram state dari system control CCCV *buck converter* yang berisi algoritma program yang terbagi dalam beberapa state. Saat system control dimulai, program akan masuk ke state 0 yaitu inialisasi, berisi pembacaan arus dan tegangan baterai serta pengaturan *setpoint*.

Saat nilai tegangan yang terbaca kurang dari nilai batas yang mana telah ditentukan diawal program akan berpindah ke state 1 yaitu mode *Constant Current* atau CC. Pada state 1 baterai akan diisi dengan arus yang konstan secara terus menerus hingga tegangan baterai mencapai dan atau melebihi nilai batas.

Kontrol PID digunakan untuk menjaga nilai arus pengisian agar selalu sesuai dengan nilai *setpoint*. Pertama-tama nilai

setpoint arus, K_p , K_i dan K_d kontrol arus ditentukan. Lalu nilai nilai tersebut akan diolah dan dihitung dengan nilai error yang terdeteksi. Sehingga mikrokontroler akan menentukan besaran duty cycle agar *buck converter* menghasilkan arus pengisian sesuai dengan nilai setpoint. Perhitungan akan dilakukan terus menerus agar nilai error yang didapat mendekati nol.



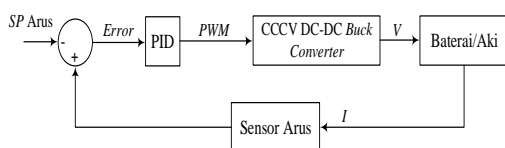
Gambar 2. State Diagram Pengisian Baterai

State 2 yaitu pengisian *Constant Voltage* atau *CV* akan berjalan ketika tegangan terbaca telah mencapai dan atau melebihi nilai batas. Kemudian control PID akan digunakan untuk menjaga agar baterai diisi dengan tegangan pengisian yang konstan. Pertama-tama nilai setpoint tegangan serta K_p , K_i dan K_d kontrol tegangan ditentukan. Lalu nilai nilai tersebut akan diolah dan dihitung dengan nilai error yang terdeteksi. Sehingga mikrokontroler akan menentukan besaran duty cycle agar *buck converter* menghasilkan tegangan pengisian sesuai dengan nilai setpoint. Perhitungan akan dilakukan terus menerus agar nilai error yang didapat mendekati nol. Dengan tegangan pengisian yang konstan, semakin lama nilai arus pengisian akan semakin kecil hal ini dikarenakan beda potensial dari baterai dengan system akan semakin kecil. Ketika arus mendekati 0 maka nilai PWM diatur agar nilai tegangan yang mengalir menjadi 0.

2.2.3. Perancangan PID

1) Kontrol Arus

System pengendalian arus pada penelitian ini menggunakan metode *Proportional integral derivative*, dengan diagram blok kontrol arus ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram blok kontrol arus.

Pada gambar 3, masukan kontrol PID berupa nilai error yang didapat dari selisih nilai setpoint dengan nilai pembacaan sensor arus yang mendeteksi nilai arus pengisian, atau dapat ditulis

$$errorC = current_{read} - setpointC \quad (1)$$

Dimana $errorC$ adalah error arus, $current_{read}$ adalah arus yang dibaca oleh sensor dan $setpointC$ adalah nilai setpoint arus. Kemudian nilai error yang didapat akan dikalikan dengan nilai *gain proportional* (K_pC) untuk menghitung nilai konstanta *proportional* untuk arus (P_c) yang ditunjukkan oleh persamaan berikut.

$$P_c = K_pC \times errorC \quad (2)$$

Dan nilai konstanta *integral* untuk arus (I_c) dapat dihitung dengan persamaan

$$I_c = I_c + (K_iC \times errorC) \quad (3)$$

Juga nilai delta error yaitu perubahan error guna mendapatkan nilai konstanta *derivative* (D_c) yang ditunjukkan oleh persamaan 3.4 dan 3.5 berikut

$$\Delta errorC = errorC_{last} - errorC \quad (4)$$

$$D_c = K_dC \times \Delta errorC \quad (5)$$

Sehingga didapat nilai PID untuk pengendalian arus (PID_c) dengan persamaan (3.6)

$$PID_c = P_c + I_c + D_c \quad (6)$$

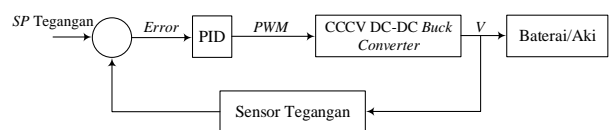
Sedangkan keluaran PID berupa nilai PWM yang akan mengatur besar nilai tegangan pengisian sehingga arus pengisian yang dihasilkan menjadi konstan. Konversi nilai PID ke nilai PWM didapatkan dengan menggunakan persamaan (3.7).

$$PWM = PID_c \times PWM_{factor} \quad (7)$$

Nilai K_p yang digunakan adalah 6 dan nilai K_i yang digunakan adalah 5 dan nilai K_d yang digunakan adalah 1.

2) Kontrol Tegangan

System pengendalian tegangan pada penelitian ini menggunakan metode *Proportional integral derivative*, dengan diagram blok system kontrol arus ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Diagram blok kontrol tegangan.

Pada gambar 4, masukan kontrol PID berupa nilai error yang didapat dari selisih nilai setpoint dengan nilai

pembacaan sensor tegangan yang mendeteksi nilai tegangan pengisian, atau dapat ditulis

$$errorV = voltage_{read} - setpointV \quad (8)$$

Dimana $errorV$ adalah $error$ tegangan, $voltage_{read}$ adalah tegangan yang dibaca oleh sensor dan $setpointC$ adalah nilai setpoint tegangan. Kemudian nilai error yang didapat akan dikalikan dengan nilai $gain\ proportional (Kp_V)$ untuk menghitung nilai konstanta $proportional$ untuk tegangan (P_V) yang ditunjukkan oleh persamaan (3.9)

$$P_V = Kp_V \times errorV \quad (9)$$

Dan nilai konstanta $integral$ untuk tegangan (I_V) dapat dihitung dengan persamaan

$$I_V = I_V + (Ki_V \times errorV) \quad (10)$$

Juga nilai delta error yaitu perubahan error guna mendapatkan nilai konstanta derivative (D_V) yang ditunjukkan oleh persamaan 3.4 dan 3.5 berikut

$$\Delta errorV = errorV_{last} - errorV \quad (11)$$

$$D_V = Kd_V \times \Delta errorV \quad (12)$$

Sehingga didapat nilai PID untuk pengendalian arus (PID_C) dengan persamaan 3.6

$$PID_V = P_V + I_V + D_V \quad (13)$$

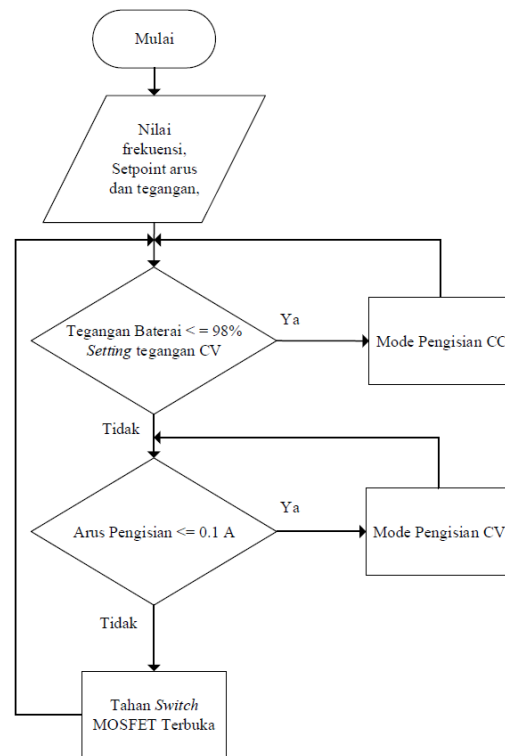
Sedangkan keluaran PID akan diubah menjadi nilai PWM yang akan mengatur besar nilai tegangan pengisian sehingga arus pengisian yang dihasilkan menjadi konstan. Konversi nilai PID ke nilai PWM didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut

$$PWM = PID_V \times PWM_{factor} \quad (14)$$

Nilai KP yang digunakan adalah 5 dan nilai Ki yang digunakan adalah 2 dan nilai Kd yang digunakan adalah 1.

2.3 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dimulai dengan membuat algoritma pengisian baterai. Algoritma ini digunakan untuk menentukan kondisi pengisian baterai (constant current atau constant voltage) berdasarkan tegangan baterai yang akan diisi. Nilai tegangan dan arus akan dibaca oleh sensor dan akan diolah oleh mikrokontroler untuk menentukan besar duty cycle yang dibutuhkan. Flowchart algoritma pengisian baterai dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5 dibawah ini.



Gambar 5. Flowchart Algoritma Perangkat Lunak.

Flowchart pada Gambar 5 menunjukkan terjadi 2 kondisi pengisian baterai pada penelitian ini, yaitu pengisian Constant current (CC) yang terjadi pada saat tegangan baterai masih lebih rendah daripada tegangan setpoint, maka arus pengisian dijaga konstan sebesar nilai yang ditentukan yaitu 0.7 A. Tegangan baterai diperiksa secara berkala dengan memutus arus pengisian agar didapat nilai tegangan baterai yang tidak terinterupsi oleh tegangan pengisian. Kondisi lainnya adalah pengisian constant voltage (CV) dengan menjaga tegangan pengisian sesuai tegangan yang telah ditentukan diawal yaitu sebesar 13.3 volt.

3. Hasil dan Analisis

3.1 Pengujian Respon Sistem

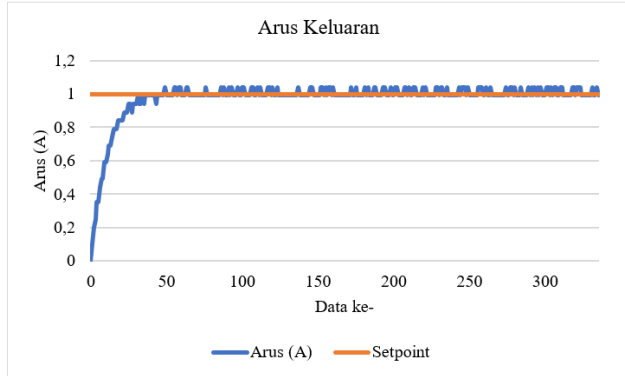
Pengujian kontrol pid dilakukan dengan tujuan mengetahui kinerja dan respon sistem serta pengaruh kontrol dalam menjaga nilai keluaran agar sesuai nilai $setpoint$. Pengujian kontrol meliputi pengujian kontrol arus dan kontrol tegangan secara terpisah..

3.1.1 Pengujian Kontrol Arus

Pengujian kontrol arus dilakukan untuk mengetahui kinerja dan respon sistem serta pengaruh kontrol dalam menjaga nilai arus keluaran. Nilai $gain$ yang digunakan untuk kontrol arus adalah $Kp = 6$, $KI = 5$ dan $Kd=1$. Tahapan pengujian dibagi menjadi 3 yaitu uji kontrol tanpa gangguan, dengan gangguan dan uji kontrol dengan baterai sebagai beban.. Dari pengujian ini dapat diketahui

kemampuan kontrol *proportional integral derivative* dalam merespon *error* antara referensi arus dan keluaran arus untuk mencapai dan mempertahankan referensi arus yang tetap. Menggunakan beban awal sebesar 15 ohm dan tegangan masukan sebesar 24 V serta waktu *sampling* yang digunakan pada pengujian ini selama 0.2 detik. Jadi tiap data mewakili 0,2 detik.

1) Pengujian Respon Sistem

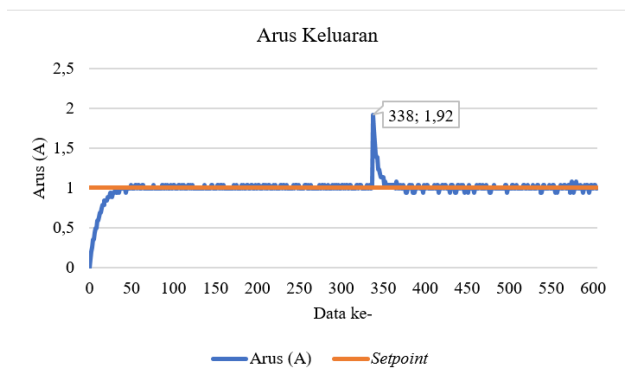


Gambar 6. Respon Sistem Kontrol PID Suhu

Berdasarkan gambar 6 dapat dilihat bahwa sistem kontrol PID telah berhasil menghasilkan dan menjaga arus keluaran arus mendekati nilai *setpoint* yaitu 1 ampere. Respon *Transient system* adalah $T_d = 1,2$ detik, $T_r = 9,8$ detik, $T_p = 11$ detik, $T_s = 12$ detik, $M_p = 4\%$. Dengan menggunakan metode *Mean Absolute Error* untuk menghitung rata rata *error* yang terjadi didapat nilai *error steady state* sebesar 0,019 atau 0,14 %.

2) Pengujian Respon Sistem dengan Gangguan

Pengujian respon sistem dengan gangguan dilakukan dengan mengirimkan referensi arus sebesar 1A yang kemudian diberi pengaruh dengan mengubah nilai beban menjadi 7,5 ohm. Hasil pengujian respon sistem secara keseluruhan ditunjukkan Gambar 7.



Gambar 7. Respon Sistem Kontrol PID Arus dengan Gangguan

Hasil respon sistem pada Gambar 7 menunjukkan bahwa gangguan diberikan saat data ke 338 atau pada detik ke

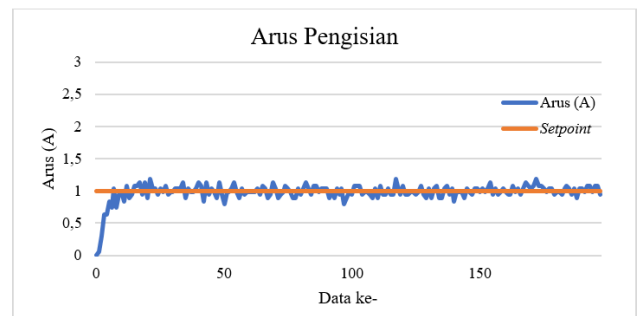
67,6 yaitu dengan mengubah beban yang bernilai awal 15 Ω menjadi 7,5 Ω . Penurunan nilai beban mengakibatkan nilai arus naik sesaat menjadi 1,92 A dari nilai referensi 1 A.

Settling time yang dibutuhkan adalah 2,6 detik setelah sistem diberi gangguan, dengan menggunakan metode *Mean Absolute Error* didapat rerata nilai *error steady state* setelah diberi gangguan sebesar 0,024 atau 0,18 %.

Dari hasil pengujian respon sistem dengan gangguan dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol PID telah mampu bekerja dengan baik dalam menanggapi gangguan.

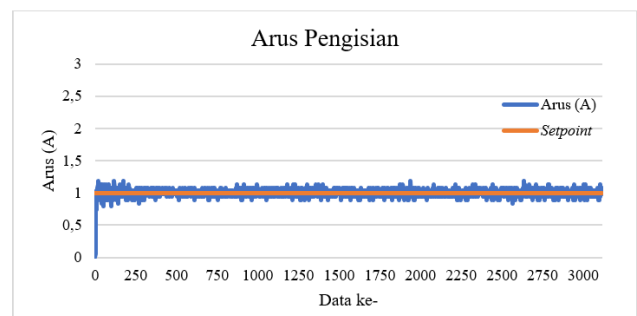
3) Pengujian Respon Sistem dengan beban baterai

Pengujian kontrol arus dengan beban baterai menggunakan baterai motor berkapasitas 3Ah dengan arus pengisian maximal yang diperbolehkan adalah 3A. Tegangan baterai sesaat sebelum pengujian adalah 12,15 volt. Dengan tegangan masukan sebesar 24 volt, *setpoint* diatur sesuai dengan nilai arus pengisian yang diperbolehkan yaitu sebesar 1 A Waktu *sampling* yang digunakan adalah 0,2 detik, sehingga didapat respon sistem seperti gambar 8.



Gambar 8. Respon sistem saat diberi beban baterai

Gambar 8 menunjukkan respon sistem saat diuji menggunakan beban berupa baterai. Waktu yang dibutuhkan controller untuk mencapai nilai arus sebesar 1 ampere adalah 2,2 detik. Respon *Transient system* adalah $T_d = 0,8$ detik, $T_r = 2,2$ detik, $T_s = 4,6$ detik, $M_p = 18\%$. Untuk melihat kestabilan sistem, pengujian kontrol arus dilakukan selama +10 menit dan didapat grafik arus pengisian terhadap waktu seperti Gambar 4.X dibawah ini



Gambar 9. Grafik kinerja sistem kontrol arus

Grafik respon sistem seperti yang terlihat pada gambar Gambar 9 menunjukkan kontrol PID telah berhasil mencapai dan mempertahankan arus pengisian sesuai dengan *setpoint*. Metode *Mean Absolute Error* untuk menghitung rata-rata *error* yang terjadi sehingga didapat nilai *error steady state* sebesar 0,039 atau 0,29 %.

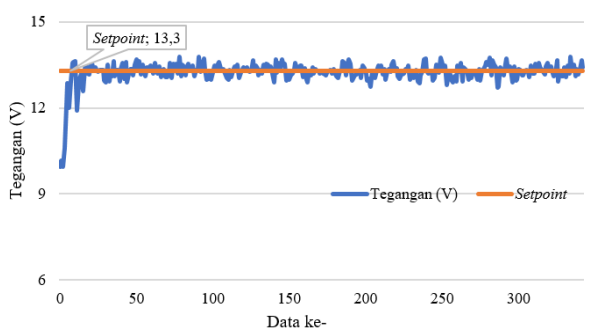
Dari hasil pengujian respon sistem dengan beban baterai dapat disimpulkan bahwa kontrol PID telah mampu mencapai dan mempertahankan arus pengisian sebesar 1A dengan nilai *error steady state* rata-rata sebesar 0,039 A atau 0,29% dan nilai *overshoot maximum* 18% . Dengan demikian kontrol PID dapat memenuhi parameter pengisian baterai pada penelitian ini.

3.1.2. Pengujian Kontrol Tegangan

Pengujian kontrol arus dilakukan untuk mengetahui kinerja dan respon sistem serta pengaruh kontrol dalam menjaga nilai arus keluaran. Nilai *gain* yang digunakan untuk kontrol arus adalah $K_p = 6$, $K_I = 5$ dan $K_d = 1$. Tahapan pengujian dibagi menjadi 3 yaitu uji kontrol tanpa gangguan, dengan gangguan dan uji kontrol dengan baterai sebagai beban.. Dari pengujian ini dapat diketahui kemampuan kontrol *proportional integral derivative* dalam merespon *error* antara referensi Arus dan keluaran arus untuk mencapai dan mempertahankan referensi suhu yang tetap. Menggunakan beban awal sebesar 15 ohm dan tegangan masukan sebesar 24 V serta waktu *sampling* yang digunakan pada pengujian ini selama 0.2 detik. Jadi tiap data mewakili 0,2 detik.

1) Pengujian Respon Sistem

Berdasarkan hasil respon sistem seperti yang ditunjukkan Gambar 11 sistem kontrol PID telah berhasil mencapai dan mempertahankan nilai tegangan mendekati nilai *setpoint* yaitu 13,3 V.

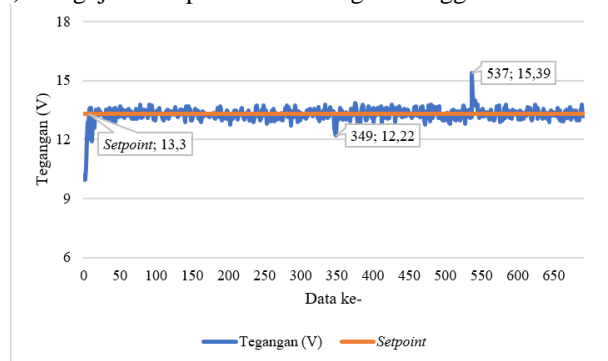


Gambar 10. Respon sistem kontrol PID tegangan

Berdasarkan hasil respon sistem pada gambar 10 dapat dilihat bahwa kontrol PID mampu membuat sistem mencapai dan mempertahankan nilai tegangan keluaran dari 16 volt hingga menjadi 13,3 volt. Waktu yang dibutuhkan controller untuk mencapai tegangan 13,3 V

adalah 3,2 detik. . Respon *Transient system* adalah $T_d = 1,2$ detik, $T_r = 2,8$ detik, $T_p = 3$ detik, $T_s = 3,4$ detik, $M_p = 2,4$ % . Dengan menggunakan metode *Mean Absolute Error* untuk menghitung rata-rata *error* yang terjadi didapat nilai *error steady state* sebesar 0,167 atau 1,26%.

2) Pengujian Respon Sistem dengan Gangguan



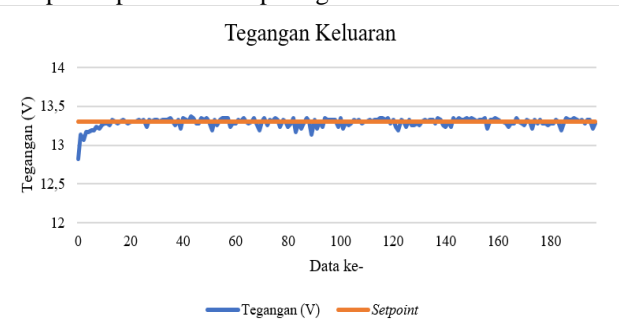
Gambar 11. Respon sistem saat diberi gangguan

Dapat dilihat bahwa gangguan diberikan pada data ke 349 atau pada detik ke 69,2 dengan cara mengubah nilai beban menjadi 7,5 Ω Gangguan menyebabkan tegangan turun sesaat menjadi 12,2 V dari referensi 13,3 volt. Kemudian pada data ke 537 atau pada detik ke 107,4 gangguan kembali diberikan dengan mengubah nilai beban menjadi 15 Ω . Gangguan kedua ini menyebabkan tegangan naik sesaat ke nilai 15,39 V. Dari 2 gangguan yang diberikan, kontrol PID mampu mengembalikan nilai tegangan keluaran mendekati nilai *setpoint*.

Dengan menggunakan metode *Mean Absolute Error* untuk menghitung rata-rata *error* yang terjadi setelah diberi gangguan didapat nilai *error steady state* sebesar 0,162 atau 1,22 %.

3) Pengujian Respon Sistem dengan Beban Baterai

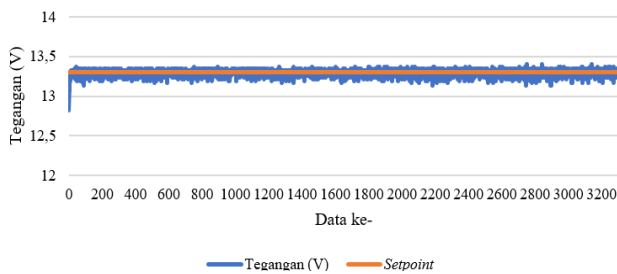
Pengujian kontrol tegangan dengan beban baterai menggunakan baterai motor berkapasitas 3Ah dengan arus pengisian maximal yang diperbolehkan adalah 3A. Tegangan baterai sesaat sebelum pengujian adalah 12,8 volt. Dengan tegangan masukan sebesar 24 volt, *setpoint* diatur sesuai dengan tegangan pengisian yaitu 13,3. Waktu *sampling* yang digunakan adalah 0,2 detik, sehingga didapat respon sistem seperti gambar 4.7



Gambar 12. Respon sistem saat diberi beban baterai

Gambar 12 menunjukkan respon sistem saat diuji menggunakan beban berupa baterai. tegangan pengisian yang bernilai awal 12,82 V mencapai nilai *setpoint* 13,3 V pada saat sistem kontrol dijalankan. Waktu yang dibutuhkan controller untuk mencapai nilai tegangan sebesar 13,3 V adalah 2,6 detik. Respon *Transient system* yang didapat adalah $T_d = 0,6$ detik, $T_r = 2,6$ detik, $T_s = 3,4$ detik, $M_p = 0,52$ %.

Untuk melihat kestabilan sistem, pengujian kontrol arus dilakukan selama ± 10 menit dan didapat grafik arus pengisian terhadap waktu seperti Gambar 4.8 dibawah ini



Gambar 13. Grafik kinerja sistem kontrol tegangan

Grafik respon sistem seperti yang terlihat pada gambar Gambar 13 menunjukkan kontrol PID telah berhasil mencapai dan mempertahankan tegangan pengisian sesuai dengan *setpoint*. Metode *Mean Absolute Error* untuk menghitung rata rata *error* yang terjadi sehingga didapat nilai *error steady state* sebesar 0,032 atau 0,24 %.

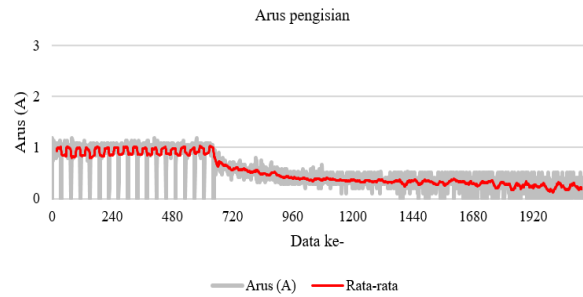
Dari hasil pengujian respon sistem dengan beban baterai dapat disimpulkan bahwa kontrol PID telah mampu mencapai dan memperahankan tegangan pengisian sebesar 13,3 volt dengan nilai *error steady state* rata-rata sebesar 0,032 atau 0,24% dan nilai *overshoot* sebesar 0,5% . Dengan demikian kontrol PID dapat memenuhi parameter pengisian baterai pada penelitian ini.

3.2. Pengujian Sistem pengisian Baterai

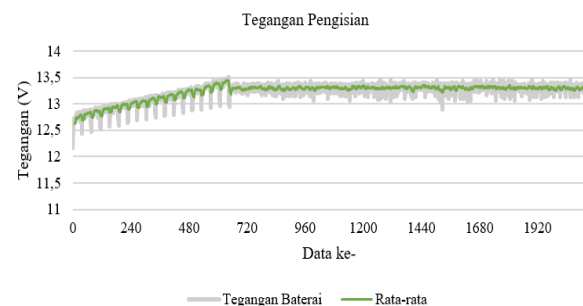
Pengujian pengisian baterai aki atau *accumulator* dilakukan ketika baterai dalam keadaan *State of Charge* (SOC) sebesar 50% ~ 60% yang berarti saat tegangan baterai memiliki nilai 12.06 ~ 12.20 V [19]. Pemilihan *State of Charge* (SOC) sebesar 50~60% tersebut bertujuan untuk memperpanjang umur baterai dan banyak pemakaian (*cycle life*) dari baterai. Selama proses pengisian nilai tegangan dan arus keluaran diukur oleh sensor untuk diumpun balikkan ke Arduino Nano untuk mengatur nilai *duty cycle* PWMnya. Pengujian menggunakan baterai dengan kapasitas 3 Ah dengan arus maximum untuk pengisian yang diperbolehkan adalah sebesar 3A.

Tegangan baterai sesaat sebelum pengujian adalah sebesar 12,17 V. Dijelaskan pada bab pendahuluan bahwa baterai akan diisi menggunakan metode CCCV. Pertama-tama baterai akan diisi dengan arus tetap atau dengan mode CC

sebesar 1 A. Kemudian disaat tegangan baterai telah mencapai nilai batas yang telah ditentukan baterai akan diisi dengan tegangan yang konstan yaitu sebesar 13,3 V. Dengan time *sampling* per 5 detik maka didapat grafik arus dan tegangan pengisian yang ditunjukkan pada gambar 14.



(a) Grafik Arus Pengisian



(b) Grafik Tegangan Pengisian

Gambar 14. Respon Sistem pengisian baterai

Gambar 14 menunjukkan grafik arus dan tegangan pengisian. Pengisian baterai dilakukan selama kurang lebih 3 jam.

Dapat dilihat pada gambar 14 (a) diawal pengisian arus telah berhasil dijaga secara konstan sebesar 1A selama mode CC sehingga tegangan baterai akan relative naik secara cepat. Arus mulai menurun setelah data ke 632 atau setelah 52 menit karena tegangan baterai telah melebihi nilai batas yang telah ditentukan. Sehingga pengisian akan mulai berganti ke mode CV. Pada mode CV tegangan pengisian akan terus dijaga konstan sebesar 13,3 V hingga arus pengisian mendekati nol.

Fitur *Moving Average* pada *software* Ms. Excel digunakan untuk menghitung nilai rata rata respon sistem sehingga didapatkan grafik arus tegangan pengisian yang lebih halus. Dari grafik dan analisa diatas dapat disimpulkan bahwa sistem pengisian baterai yang dibuat telah berhasil melakukan pengisian baterai menggunakan metode CCCV.

4. Kesimpulan

Telah berhasil dirancang sistem pengisian baterai dengan metode CCCV yang dikontrol dengan metode kontrol PID,

untuk mengendalikan arus dan tegangan .dalam mempertahankan nilai dan mencapai referensi yang telah ditentukan. Nilai PID untuk pengontrolan Arus mempunyai nilai $K_p=6$, $K_i=5$, $K_d=1$ dan mempunyai *error steady state* sebesar 0,29% serta *overshoot* 18%, Sedangkan nilai untuk pengontrolan tegangan mempunyai nilai $K_p=5$, $K_i=2$, $K_d=1$ dan mempunyai *error steady state* sebesar 0,24% serta *overshoot* 0,5%.

Referensi

- [1] Mikitaka Tamai, Sumoto. "Rechargeable Battery Charging Method". Osaka: United States Patent. 1995.
- [2] Kiehne, H. A. "Battery Technology Handbook". Breckerfeld, Germany: MARCEDLE KKEIRN,C. 2003.
- [3] Simpson, Chester. "Battery Charging". Dallas, Texas: Texas Instruments. 2011.
- [4] W. H. Daniel. "Power Electronic". Indiana, Valparasio Universtity:The Mcgraw-Hill Companies. 2011.
- [5] R. Prayogo, "Pengaturan PWM (Pulse Width Modulation) dengan PLC," p. 24, 2012.
- [6] Setiawan, Iwan. 2008. *Kontrol PID Untuk Proses Industri*. PT Elex Media Komputindo.
- [7] Triwiyatno, Aris. 2014. *Sistem Kontrol Analog*. Semarang: UPT UNDIP Press Semarang.
- [8] Wisnu A. M., Bhaskara "Perancangan Sistem Charging Baterai Menggunakan Dc-Dc Buck Converter Metode Constant Current (Cc) Dan Constant Voltage (Cv)," Laporan Tugas Akhir, Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang, 2020.
- [9] Guo, Liping, "Implementation of Digital PID Controllers for DC-DC Converters using Digital Signal Processors" dalam 2007 IEEE International Conference on Electro/Information Technology, 2007, hal. 306-311.
- [10] <https://wiki.uiowa.edu/display/greenergy/Battery+Systems+Overview>, diakses pada tanggal 1 Oktober 2020.
- [11] <https://www.batterystuff.com/blog/how-to-tell-if-your-battery-is-bad.html>, diakses pada tanggal 2 Oktober 2020
- [12] Ejury, Jens. "Buck Converter Design". Durham: DN 2013-01 Infineon Technologies North America. 2013
- [13] Maulana, "Teori Dasar MOSFET", pp. 1-34.
- [14] "Arduino nano datasheet": Farnell.com.
- [15] "ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P datasheet", Microchip, 2018.