

---

# **Jurnal** ***Rekayasa Elektrika***

---

VOLUME 13 NOMOR 2

AGUSTUS 2017

---

**Perancangan dan Pengujian Sistem Pengendali Sudut untuk Motor DC  
Brushless menggunakan Kendali Algoritma P-D** 82-86

*Rizqi Andry Ardiansyah*

---

JRE	Vol. 13	No. 2	Hal 65-118	Banda Aceh, Agustus 2017	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	------------	-----------------------------	--------------------------------------

# Perancangan dan Pengujian Sistem Pengendali Sudut untuk Motor DC Brushless menggunakan Kendali Algoritma P-D

Rizqi Andry Ardiansyah  
Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik - LIPI  
Jl. Cisitua Sangkuriang 21/154D, Bandung 40135  
e-mail: rizq001@lipi.go.id

**Abstrak**—Banyak aplikasi industri menggunakan motor servo karena memiliki keakuratan tinggi dan mudah untuk diterapkan akan tetapi dengan menggunakan motor servo juga dibutuhkan biaya yang tinggi. Untuk membuat sebuah aktuator yang memiliki akurasi yang baik, dan bisa digunakan secara luas pada banyak aplikasi, maka dilakukan perancangan dan pengujian sebuah sistem pengendali posisi untuk motor DC *brushless*. Supaya menghasilkan pengendali posisi dengan kepresisian yang baik untuk motor DC Brushless, sistem ini dibangun dengan menggunakan sebuah mikrokontroler ATmega 2560, sebuah absolut *encoder* sebagai sensor umpan balik posisi, dan juga algoritma pengendali *Proporsional-Derivative* yang ditanamkan pada mikrokontroler. Pada akhir pengujian didapatkan bahwa sistem ini bekerja dengan toleransi sudut sebesar  $1^\circ$  dan kecepatan sudut rata-rata  $3.88^\circ/\text{ms}$ .

**Kata kunci:** *Sistem Pengendali Sudut, Motor DC Brushless, Algoritma Proporsional Derivative*

**Abstract**—Many industrial applications use servo motor because of its accuracy and user-friendly, but by using it in an application, a higher cost is required. To make an actuator with good precision and universal purpose but with lower cost, a position control system for brushless dc motor was built. To achieve a better precision in the position control for brushless DC motor, the system is utilized with a microcontroller ATmega 2560, an absolute encoder as a position sensor, and also Proportional-Derivative closed-loop control algorithm. In the final test, we obtained that the system worked well on average angular speed about  $3.88^\circ/\text{ms}$  and angle tolerance about  $1^\circ$ .

**Keywords:** *Angular Controller System, Brushless DC Motor, Proporsional Derivative Algorithm*

Copyright © 2017 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

## I. PENDAHULUAN

Secara umum terdapat dua jenis motor DC dalam dunia industri, yaitu motor DC brush dan motor DC brushless. Jenis yang pertama, yakni motor DC brush dimana gerakan rotor dihasilkan oleh gaya elektromagnet (flux) oleh arus yang melewati kumparan stator. Tipe yang kedua adalah motor DC Brushless dimana magnet permanennya terdapat pada sekitar jangkar dinamo statis, sedangkan rotor berada di luar, hal ini dapat menghilangkan masalah yang berhubungan dengan pemberian arus pada jangkar bergerak. Sebuah pengendali elektronik menggantikan komutator dari motor DC brush yang secara terus menerus menyalakan fasa ke gulungan untuk membuat motor tetap bergerak. Komutasi elektronik yang telah dibuat memiliki efisiensi yang tinggi, sedikit getaran, sedikit noise pada penggunaan kecepatan tinggi, sehingga menjadikan BLDC memiliki umur pemakaian yang lama dan biaya perawatan yang rendah. Sekarang motor DC Brushless banyak digunakan pada aplikasi industri, robotika, aplikasi kesehatan, dan otomotif [1], [2], [3].

Terdapat beberapa kegiatan penelitian yang berhubungan dengan pengendalian kecepatan motor DC *Brushless* yang telah dilakukan antara lain: makalah *Brushless DC Motor Speed Fuzzy Adaptive Control System* [4], dimana makalah ini menjelaskan tentang sebuah simulasi pengendali motor Dc brushless menggunakan *Fuzzy Adaptive PID* pada *simulink* Matlab. Pada akhir makalah, ditampilkan hasil perbandingan dari pengendali kecepatan motor DC brushless dengan PID dan *Fuzzy PID*. Makalah *Implementation of Food Processor Application Using Brushless DC Motor Control* [5], menjelaskan tentang penggunaan motor DC brushless pada aplikasi pemroses makanan seperti blender juicer atau mixer. Dalam makalah ini juga didiskusikan tentang aplikasi metode kendali PI pada kendali kecepatan motor DC *brushless*, pengujian akhir dilakukan dengan memutar motor ke kiri dan kanan serta pengujian pengereman. Makalah *Fuzzy Logic Control of In-Wheel Permanent Magnet Brushless DC Motors* [6], berisi tentang perbandingan kendali kecepatan roda motor DC *brushless* menggunakan *Fuzzy* dan PID. Hasil pengujian dilakukan melalui pengukuran

arus, tegangan serta daya motor DC brushless. Sesuai dengan tugas pokok lembaga penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika (P2-Telimek) yakni melakukan kegiatan penelitian dalam bidang Tenaga Listrik dan Mekatronika, P2 Telimek telah dan sedang melakukan pengembangan robotika untuk pertahanan dan keamanan maupun untuk industri. Salah satu robot yang dimiliki P2-Telimek LIPI diantaranya adalah Mobil Robot LIPI versi kedua (REV-11), serta robot industri 6 DOF untuk pelapisan permukaan logam yang keduanya menggunakan penggerak motor dc *brushless*. Karena begitu banyak penggunaan motor dc *brushless* sebagai penggerak robot di lingkungan penelitian kami, maka kami merancang sebuah sistem pengendali sudut motor dc *brushless* sehingga dapat menghasilkan aktuator yang dapat digunakan secara multifungsi, mempunyai kepresisian yang baik serta dengan biaya yang minimal. Sistem ini dibangun menggunakan sebuah motor DC *brushless*, sebuah sensor absolut encoder, algoritma kendali P-D, dan sebuah mikrokontroller ATmega2560. Makalah ini disusun sebagai berikut: bagian kedua berisi tentang penjelasan motor DC brushless dan metode kendali PID, bagian ketiga berisi desain sistem keseluruhan, bagian keempat berisi tentang pengujian dan diskusi, kemudian yang terakhir tentang kesimpulan dan rencana penelitian ke depan.

II. STUDI PUSTAKA

Pada bagian ini dibahas tentang motor DC *brushless* beserta model matematikanya, kemudian metode kendali Proporsional Integral Derivative, serta bagaimana perancangan dari sistem pengendali sudut motor DC *brushless* ini.

A. Motor DC Brushless

Makalah *Research of Novel Modeling and Simulation Approach of Brushless DC Motor Control System* [7] mengenalkan kepada kita tentang persamaan umum tegangan motor DC *brushless* tiga fasa yang bisa dilihat sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} u_U \\ u_V \\ u_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_U \\ e_V \\ e_W \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dimana  $u_U, u_V, u_W$  adalah tegangan fasa lilitan (V);  $i_U, i_V, i_W$  adalah arus fasa tiga fasa dari lilitan stator tegangan fasa (A);  $e_U, e_V, e_W$  adalah EMF balik (V); R adalah tahanan fasa ( $\Omega$ ); L adalah induktansi fasa; hubungan antara induktansi dan tiga lilitan fasa adalah M(H);  $p=d/dt$  adalah operator diferensial; hubungan antara arus tiga fasa adalah

$$i_U + i_V + i_W = 0.$$

Torsi yang dihasilkan dari tiga fasa adalah:

$$T_e = \left(\frac{1}{\omega}\right)(e_U i_U + e_V i_V + e_W i_W) \quad (2)$$

Tabel 1. Karakteristik vexta motor dc brushless

Rated Output Power - HP(W)	1/8(100)
Voltage - VDC	24 +/- 10%
Rated Input Current - A	6
Rated Torque - oz-in (N•m)	56 (0.40)
Permissible Load Inertia J - oz-in2(10-4 kg•m2)	31 (5.6)
Speed max (RPM)	3000

Tabel 2. Perubahan fasa

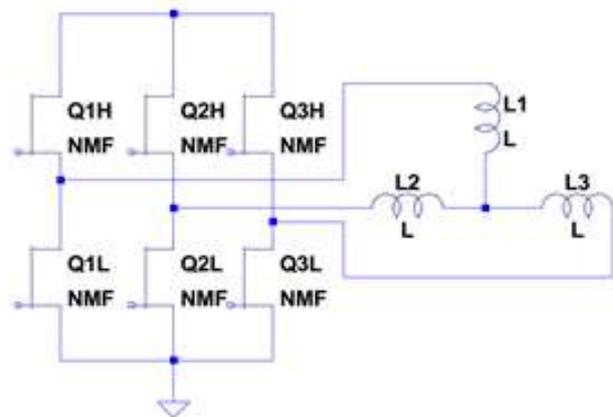
State	Dir = CW	Dir = CCW	Activ FET
1	001	110	Q2H,Q3L
2	011	100	Q1H,Q3L
3	010	101	Q1H,Q2L
4	110	001	Q3H,Q2L
5	100	011	Q3H,Q1L
6	101	010	Q2H,Q1L

Persamaan gerakan motor DC *brushless*:

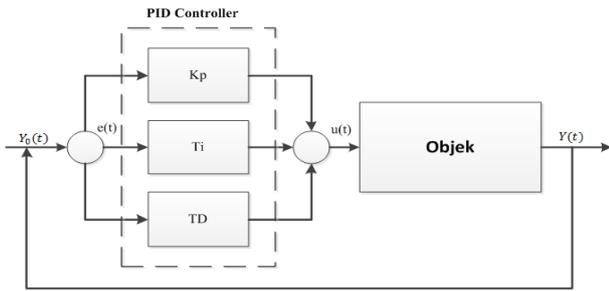
$$T_e - T_L - B\omega = J \left(\frac{d\omega}{dt}\right) \quad (3)$$

Dimana  $T_e$  adalah torsi elektronika (N.m),  $T_L$  torsi beban, B koefisien damping (N. m.s/rad),  $\omega$  adalah kecepatan sudut putar motor (rad/s), J adalah momen inersia dari motor (kg.m<sup>2</sup>). Pada riset ini saya menggunakan motor DC *brushless* tipe KC AXHM5100 VEXTA dengan rasio perbandingan gir 5:1. Kemudian dari gir ini ditambahkan lagi *eksternal* gir dengan rasio perbandingan 30:1 sehingga total rasio perbandingan gir yang dipakai pada percobaan ini adalah 150:1. Tabel 1 memperlihatkan spesifikasi KC AXHM5100.

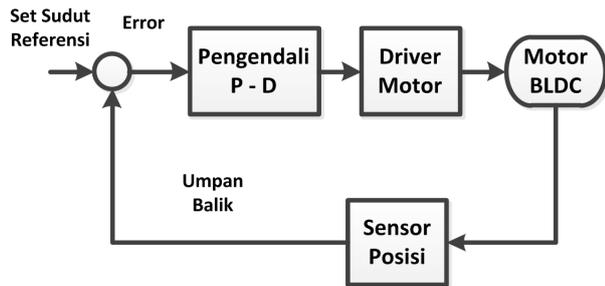
Secara umum skema rangkaian driver motor DC brushless dapat ditunjukkan pada Gambar 1. Ketiga fasa U, V, dan W adalah sama dan hanya memiliki perbedaan fasa masing-masing sebesar 120 derajat. Arah putaran motor DC brushless dapat diatur dengan memberikan penyalaan pada lilitan secara berkesinambungan seperti yang dijelaskan pada Tabel 2.



Gambar 1. Skematik motor DC Brushless Tiga Fasa



Gambar 2. Diagram skematik pengendali PID



Gambar 3. Diagram pengendali sudut motor DC brushless

B. PID–Pengendali Sudut Loop Tertutup

Algoritma kendali *Proporsional–Integral–Derivative* (PID) adalah salah satu dari metode kendali klasik yang telah banyak digunakan pada aplikasi industri karena kemudahan dalam pemakaiannya. Fungsi Transfer dari PID ideal dapat dilihat sebagai berikut [8] :

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right), \quad (4)$$

parameter PID dapat dijelaskan sebagai berikut :

- $K_p$ : gain proporsional
- $T_I$ : waktu integral
- $T_D$ : waktu derivative

$E(s)$  adalah selisih antara nilai posisi acuan  $Y_0(s)$  dan nilai posisi sebenarnya  $Y(s)$ :

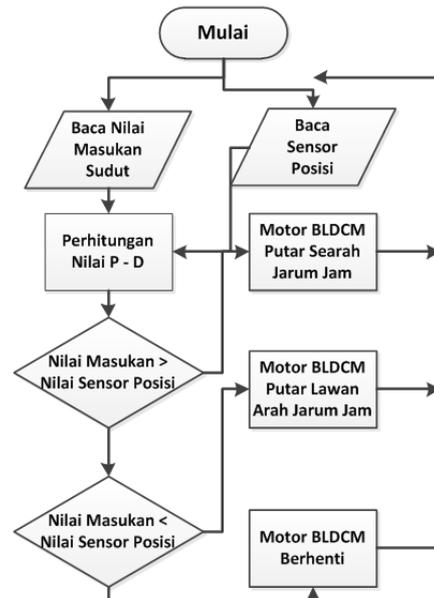
$$E(s) = Y_0(s) - Y(s), \quad (5)$$

Pada domain waktu, kendali PID dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (6)$$

Diagram kendali skematik untuk PID Kontrol secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.

Kelakuan pengendali PID dapat ditentukan dengan mengatur nilai parameter  $K_p$ ,  $T_I$ , dan  $T_D$ . Pada penelitian ini saya mengatur nilai  $K_p$  dan  $T_D$  menggunakan metode *Trial–Error* sedangkan nilai  $T_I = 0$  karena pada penelitian ini menggunakan algoritma pengendali P-D.



Gambar 4. Diagram flowchart

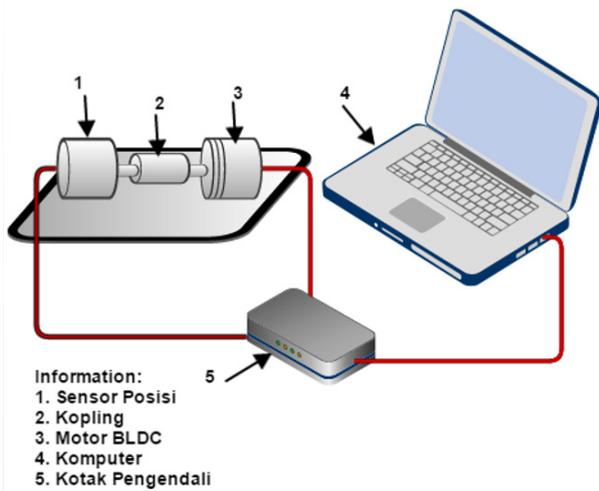
III. METODE

Diagram blok keseluruhan sistem dapat ditampilkan pada Gambar 3.

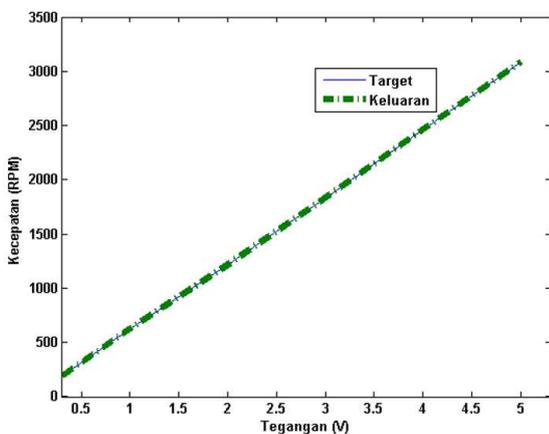
Sebuah sistem pengendali sudut untuk Motor DC *Brushless* ini dibangun dari beberapa komponen, diantaranya adalah mikrokontroler ATmega2560, sebuah motor DC *Brushless*, sebuah sensor absolut *encoder*, dan algoritma P-D. Pada penelitian ini mikrokontroler ATmega2560 berfungsi sebagai pengendali utama pada pengiriman sinyal tegangan pengendali P-D berupa tegangan yang berkisar antara 0 – 5 Volt ke *driver* motor DC *Brushless* dan mengukur sinyal masukan umpan balik sudut dari sensor absolut *encoder*. Sensor absolut *encoder* dan motor DC *Brushless* dipasang satu garis lurus dan dihubungkan menggunakan sebuah kopling. Sensor absolut *encoder* yang digunakan untuk mengukur posisi sudut gerakan motor DC *Brushless* dalam percobaan ini memiliki resolusi 360° putaran dengan sinyal keluaran tegangan analog antara 0-5.5 Volt. Sinyal tegangan keluaran dari sensor ini dibaca dengan menggunakan fitur ADC 10 bit pada mikrokontroller. Cara kerja sistem ini adalah, pertama-tama pengguna memasukkan sebuah nilai sudut melalui komputer, kemudian data ini dikirim ke mikrokontroler sebagai nilai acuan kemudian algoritma P-D akan mengkalkulasi nilai ini sampai didapatkan nilai keluaran P-D. Data ini digunakan mikrokontroler untuk menghasilkan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk men-drive gerakan motor DC *Brushless*. Gambaran sistem ini dapat dilihat pada Gambar 5, dimana no 1 adalah sensor absolut *encoder*, no 2 adalah kopling penghubung antara motor DC *Brushless* dan sensor absolut *encoder*, no 3 adalah motor DC *Brushless*, no 4 adalah sebuah komputer ,dan no 5 adalah sebuah kotak pengendali yang didalamnya berisi mikrokontroler ATmega2560 dan rangkaian driver motor DC *Brushless*. Diagram *flowchart* sistem ini ditampilkan pada Gambar 4.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum melakukan pengujian gerakan sudut, dilakukan terlebih dahulu pengujian kecepatan pada motor DC *Brushless* dengan cara memberikan sinyal tegangan kemudian diukur kecepatan yang dihasilkan. Hal ini dilakukan untuk memverifikasi bahwa kecepatan motor sama dengan kecepatan input (target). Gambar 6 merupakan grafik percobaan Input Tegangan-Keluaran Kecepatan motor DC *Brushless* dimana garis biru merupakan input kecepatan dan garis hijau adalah kecepatan output, sedangkan Gambar 7 merupakan grafik percobaan kecepatan motor DC *Brushless* terhadap waktu dimana garis merah adalah hasil pengukuran dan garis biru adalah garis simulasi dengan menggunakan toolbox sistem identifikasi matlab. Percobaan ini dilakukan dengan memberikan tegangan sebesar 2.94 volt selama 1.4 detik kemudian diukur kecepatannya dengan sensor encoder dengan waktu sampling 50 milidetik. Pada Gambar 6 ditunjukkan bahwa, dari hasil pengujian kecepatan vs tegangan didapatkan bahwa kecepatan output sesuai dengan kecepatan masukan yang diinginkan. Gambar 7 menunjukkan bahwa kecepatan motor akan mengalami kenaikan dari 0 RPM menuju 1794 RPM dan mencapai titik stabil pada 1794 RPM ketika 0.4 detik. Dari percobaan



Gambar 5. Gambaran sistem

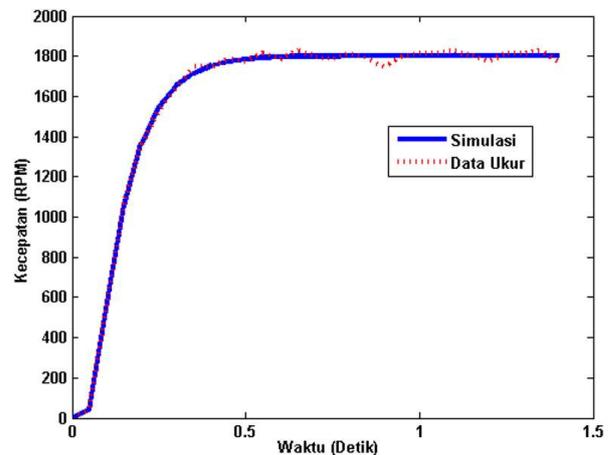


Gambar 6. Grafik tegangan vs kecepatan

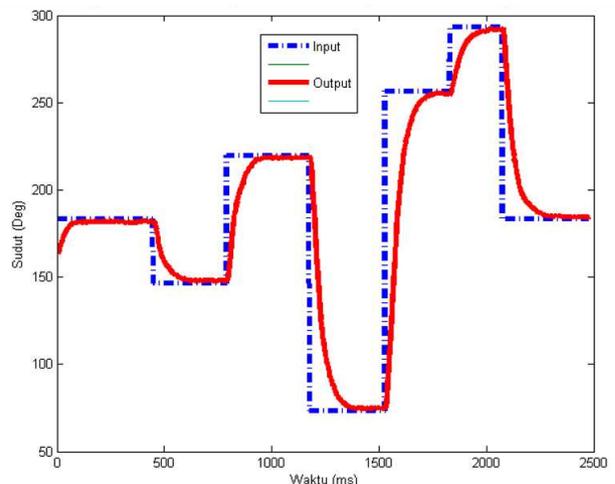
pada Gambar 7 ini didapatkan persamaan fungsi transfer motor DC *Brushless* dengan menggunakan toolbox sistem identifikasi pada matlab seperti pada persamaan (7) berikut:

$$G(s) = \frac{3.735s + 404.2}{s^2 + 47.9s + 402.6} \tag{7}$$

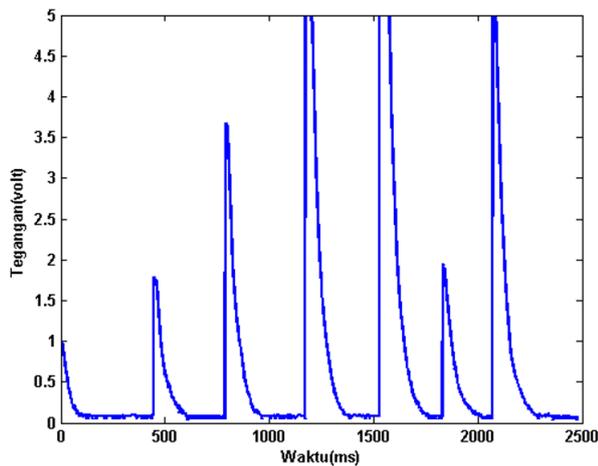
Pada Gambar 8 diperlihatkan grafik hasil pengujian gerakan sudut motor DC *Brushless* dimana garis biru merupakan input sudut dan garis merah adalah hasil sudut keluaran. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan masukan berupa variasi nilai sudut pada perangkat pengendali motor DC *Brushless* kemudian mengukur nilai sudut keluaran motor DC *Brushless*. Pada Gambar 8 dibawah ini dapat ditunjukkan bahwa, nilai output sudut keluaran (garis merah) akan mencapai titik target nilai sudut input (garis biru) saat waktu tertentu sesuai dengan selisih antara sudut awal dan sudut tujuan. Gambar 9 dibawah ini merupakan grafik tegangan keluaran P-D dari mikrokontroler. Pada Gambar 9 dapat kita lihat bahwa terdapat variasi nilai tegangan yang diberikan mikrokontroler ke motor DC *Brushless*. Hal ini karena adanya variasi sudut masukan (target) yang diujicobakan. Besarnya nilai tegangan keluaran mikrokontroler sesuai dengan selisih jarak antara nilai sudut awal dan nilai sudut



Gambar 7. Percobaan kecepatan terhadap waktu



Gambar 8. Percobaan kecepatan terhadap waktu



Gambar 9. Grafik tegangan keluaran P-D dari mikrokontroler

tujuan, semakin besar selisih antara nilai sudut awal dan nilai sudut akhir maka semakin besar tegangan keluaran untuk menggerakkan motor DC *Brushless*. Kemudian nilai tegangan akan secara otomatis sesuai dengan selisih nilai sudut waktu itu dan nilai sudut tujuan. Besaran nilai tegangan keluaran adalah hasil perhitungan algoritma pengendali P-D. Pada penelitian ini dapat dikatakan bahwa performa kinerja algoritma P-D yang diaplikasikan pada pengendali sudut motor DC *Brushless* sudah dapat bekerja dengan baik meskipun terdapat sedikit gangguan, akan tetapi tetap harus dilakukan peningkatan kinerjanya dengan menggunakan metode pengendali yang lain.

## V. KESIMPULAN

Pada makalah ini telah dijelaskan pengaplikasian pengendali P-D pada mikrokontroler untuk mengendalikan sudut motor DC *Brushless*. Algoritma P-D yang digunakan untuk mengendalikan sudut motor DC *Brushless* ditanam dalam sebuah mikrokontroler. Pada beberapa percobaan yang telah dilakukan menunjukkan performa kinerja yang baik pada sistem pengendali P-D. Secara keseluruhan sistem ini sudah dapat digunakan pada berbagai aplikasi karena kemudahan dalam perancangannya serta

performa kinerjanya. Meski demikian terdapat sedikit gangguan, sehingga diperlukan penelitian lanjutan dengan menggunakan mikrokontroler yang mempunyai kecepatan lebih tinggi dan metode algoritma kendali yang lain untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik. Pada beberapa percobaan, dapat diketahui bahwa toleransi akurasi sudut sistem pengendali sudut motor DC *Brushless* ini dibawah  $1^\circ$  dan dengan kecepatan rata-rata gerakan  $3.88^\circ/\text{ms}$ .

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini sepenuhnya didukung oleh Kelompok Penelitian Mekatronik, Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik – LIPI.

## REFERENSI

- [1] Huazhang WANG, "Design and Implementation of Brushless DC Motor Drive and Control System", in *Procedia Engineering* 29, 2219 – 2224, 2012.
- [2] R.Kandiban, R.Arulmozhiyal, "Speed Control of BLDC motor using Adaptive Fuzzy PID controller", in *Procedia Engineering* 38, 306-313, 2012.
- [3] Alireza Shabaniyan, Armin Amini Poustchi Tousiwas, Massoud Pourmandi, Aminollah Khormali, Abdolhay Ataei, "Optimization of brushless direct current motor design using an intelligent technique", *ISA Transactions* 57, 311-321, 2015.
- [4] Shang-zun Yuan, "Brushless DC Motor Speed Fuzzy Adaptive Control System", *Fuzzy Info. and Eng.*, Volume 2, 1229 - 1236, Springerlink, 2009.
- [5] Zu-Sheng Ho, "Implementation of Food Processor Application Using Brushless DC Motor Control", *Proc. PEDS*, 272-277, IEEE Conference Publications, 2011.
- [6] Harun Yildiz, "Fuzzy Logic Control of In-Wheel Permanent Magnet Brushless DC Motors", *Proc. POWERENG*, 1142 - 1146, IEEE Conference Publications, 2013.
- [7] Dian-sheng SUN, "Research of Novel Modeling and Simulation Approach of Brushless DC Motor Control System", *Proc. IEEE*, 1-5, 2010.
- [8] E. Kamenar and S. Zelenika, "Micropositioning mechatronics system based on FPGA architecture," *Proc. 36<sup>th</sup> International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics MIPRO*, pp. 138-143, 2013.

**Penerbit:**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: [rekayasa.elektrika@unsyiah.net](mailto:rekayasa.elektrika@unsyiah.net)

Telp/Fax: (0651) 7554336

