

DESAIN KONTROLER PI PADA SISTEM KONTROL KECEPATAN SEPEDA LISTRIK DENGAN METODE ROOT LOCUS

Ahmad Hanif Azhar, Rahmadwati, Goegoes Dwi Nusantoro.

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Malang 65145-Telp (0341) 554166
Email: ahmad.hanif.azhar@gmail.com

ABSTRAK

Sepeda listrik merupakan salah satu alternatif kendaraan ramah lingkungan. Penggerak dari sepeda listrik ini yaitu motor *Brushless DC* (BLDC). Motor BLDC ini mempunyai torsi awal yang tinggi dan kecepatan yang tinggi. Motor BLDC ini memiliki output yang cepat, namun memiliki *error steady state*. Oleh karena itu dibutuhkan suatu kontroler yang tepat dan sesuai dengan plant sistem. Kontroler Proporsional Integral (PI) adalah kontrol yang memiliki output yang cepat, sehingga sesuai untuk mengontrol kecepatan motor BLDC. Sehingga metode yang digunakan untuk mencari parameter PI yaitu metode *root locus*. Dimana metode *root locus* diharapkan untuk mendapatkan output yang lebih baik. Oleh karena itu metode ini digunakan untuk mencari parameter dan didapatkan nilai parameter $K_p = 2.7301$ dan $K_i = 8$. Dari parameter tersebut kemudian diimplementasikan pada motor BLDC.

Kata Kunci : *Motor BLDC, Kontrol Kecepatan, Kontrol PI, Root Locus*

Electric bicycle is one of alternative environmental-friendly vehicles. The movers of the electric bicycle Brushless DC (BLDC) motor. BLDC motor has a high initial torque and high speed. BLDC motor has a fast output, but has a steady state error. Therefore it needs a controller is appropriate and in accordance with the plant system. The controller is a proportional Integral (PI) is a control that has a fast output, so according to control BLDC motor speed. So that the method used to find the parameters of the root locus method of PI. Where the root locus method is expected to get a better output. Therefore the method is used to find the parameters and parameter values are obtained by $K_p = 2.7301$ and $K_i = 8$. From these parameters are implemented for BLDC Motors.

Keywords : *BLDC Motor, Speed Control, PI Control, Root Locus*

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi saat ini semakin berkembang pesat. Contohnya sepeda listrik, yang diproyeksikan menjadi kendaraan masa depan. Karena sepeda listrik ini ramah lingkungan dan tidak menggunakan bahan bakar fosil. Penggerak utama dari sepeda listrik ini adalah motor Brushless DC (BLDC).

Motor *Brushless DC* (BLDC) merupakan aktuator yang banyak digunakan pada aplikasi sepeda listrik. Motor BLDC memiliki output yang cepat, torsi awal yang tinggi dan kecepatan yang tinggi, namun masih memiliki *error steady state (offset)* [1].

PI adalah kontroler yang merupakan gabungan dari kontroler proporsional dan kontroler integral. Gabungan dari kedua kontroler ini diharapkan agar mendapatkan keluaran sistem yang mempunyai *settling time* cepat, tidak *error steady state* dan tidak ada *overshoot* [2].

Pada penelitian ini menggunakan metode *root locus* untuk mencari parameter K_p dan K_i nya. Metode *root locus* ini diharapkan dapat memberikan output yang baik [3].

Pada pengendali ini menggunakan suatu rangkaian digital. Dimana program ini memerintahkan komputer untuk mengambil nilai

setpoint dan data hasil pengukuran dari sensor. Selanjutnya hasil ini dikirim ke aktuator [4].

Metode *root locus* / letak kedudukan akar digunakan untuk meneliti perilaku sistem dengan parameter sistem berubah pada lingkup tertentu, misalnya perubahan parameter penguatan K . Di dalam analisis sistem, penguatan K dipilih sedemikian rupa agar sistem stabil serta memberikan output yang baik. Rancangan dimaksudkan agar letak pole dan zero dari fungsi alih loop tertutup terletak pada daerah yang ditentukan. Agar sistem stabil, pole dan zero harus terletak pada bidang s sebelah kiri sumbu imajiner.

Pada skripsi ini akan dibuat suatu desain pengendali PI untuk mengendalikan kecepatan pada motor Brushless DC (BLDC) dengan menggunakan metode *root locus*.

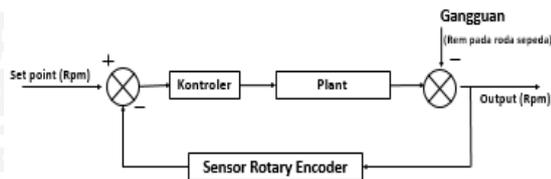
II. METODE PENELITIAN

Langkah-langkah untuk menyelesaikan rumusan masalah dan tujuan penelitian dapat diuraikan sebagai berikut :

2.1 Diagram Blok Sistem

Pada perancangan alat diperlukan blok diagram sistem yang dapat menjelaskan sistem secara garis besar dan diharapkan alat dapat bekerja sesuai

dengan rencana. Blok diagram sistem loop tertutup dapat dilihat dalam Gambar 1.



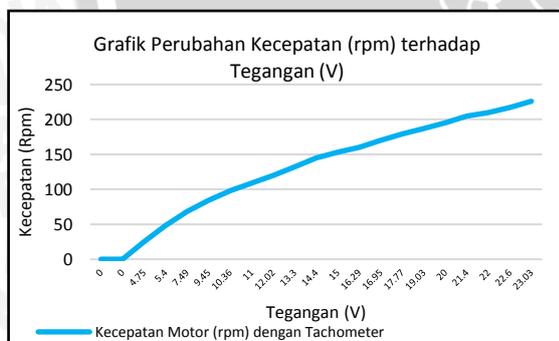
Gambar 1 Blok Diagram Sistem Loop Tertutup

Keterangan :

1. *Setpoint* sistem berupa kecepatan putaran motor yang memiliki tiga nilai yaitu 100 rpm, 120 rpm, dan 140 rpm.
2. Kontroler yang digunakan adalah kontroler Proporsional Integral (PI) menggunakan perangkat keras Arduino Mega 2560.
3. *Plant* yang digunakan adalah sepeda listrik yang terhubung motor BLDC dan *driver* motor tiga fasa.
4. Sensor *Rotary Encoder* sebagai pembaca putaran motor digunakan untuk *feedback* sistem.
5. Gangguan pada motor berupa rem sepeda.

2.2 Pengujian Motor BLDC

Pengujian motor BLDC dilakukan untuk mengetahui kelinieran kecepatan motor BLDC dengan menggunakan *tachometer* terhadap perubahan tegangan dapat dilihat dalam Gambar 2.

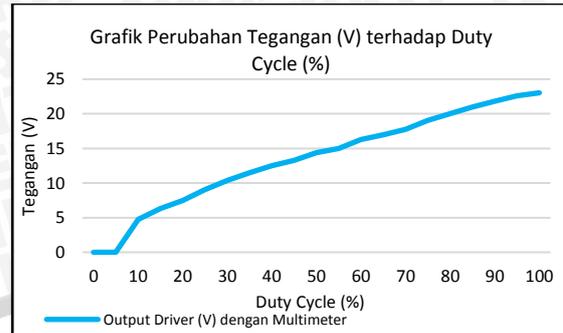


Gambar 2 Perubahan Kecepatan Motor BLDC (rpm) terhadap Tegangan (V)

Dari Gambar 2 diketahui bahwa semakin besar tegangan, maka kecepatan motor semakin besar juga.

2.3 Pengujian Driver Motor 3 Fasa

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik driver motor terhadap perubahan *duty cycle*, karena nilai tegangan keluaran dari *driver* akan mempengaruhi kecepatan motor BLDC. Pengujian *driver* motor dapat dilihat pada Gambar 3.

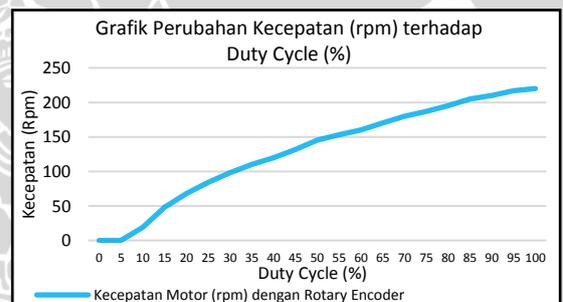


Gambar 3 Perubahan tegangan output driver terhadap *duty cycle*

Dari Gambar 3 diketahui bahwa semakin besar *duty cycle*, maka tegangan *output driver* semakin besar juga.

2.4 Pengujian Rotary Encoder

Pengujian *rotary encoder* dilakukan untuk mengetahui hasil pembacaan kecepatan motor BLDC dengan *rotary encoder* terhadap *duty cycle*. Grafik perubahan kecepatan motor BLDC terhadap *duty cycle* dapat dilihat dalam gambar 4.



Gambar 4 Perubahan Kecepatan Motor BLDC terhadap *Duty Cycle*

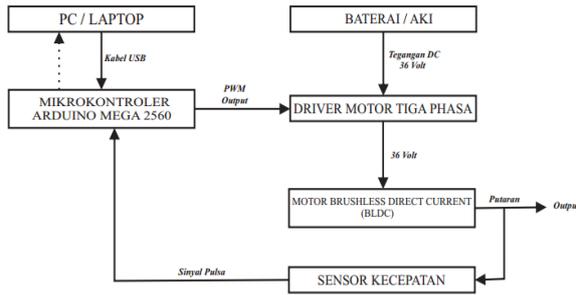
Dari Gambar 4 diketahui bahwa semakin besar *duty cycle*, maka kecepatan motor semakin besar juga.

2.5 Pembuatan Perangkat Keras

Pembuatan perangkat keras dilakukan sebagai langkah awal sebelum terbentuknya suatu sistem beserta pemrogramannya, hal ini dimaksudkan agar desain pengendali PI pada kendali kecepatan motor BLDC dengan menggunakan metode *root locus* dapat berjalan sesuai deskripsi awal yang telah direncanakan.

Pembuatan perangkat keras yang dilakukan meliputi:

1. Skema pembuatan perangkat keras.
2. Penentuan modul elektronik yang digunakan meliputi :
 - Komputer atau PC.
 - Baterai atau Aki.
 - Mikrokontroler Arduino Mega 2560.
 - Driver motor Brushless DC.
 - Motor Brushless DC (BLDC).
 - Rotary encoder.



Gambar 5 Skema Pembuatan Perangkat Keras

2.6 Penentuan Fungsi Alih Motor BLDC

Fungsi alih motor BLDC didapatkan dengan cara membangkitkan sinyal *Pseudo Random Binary* (PRBS) pada mikrokontroler yang kemudian menjadi sinyal masukan motor BLDC. Dari data PRBS, selanjutnya dilakukan identifikasi dengan menggunakan sintaks *ident* pada *software Matlab*.

Sehingga didapatkan fungsi alih motor BLDC yang memiliki *best fits* sebesar 81.78 dalam persamaan 1.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{843.5}{s^2 + 99.27s + 851.1} \quad (1)$$

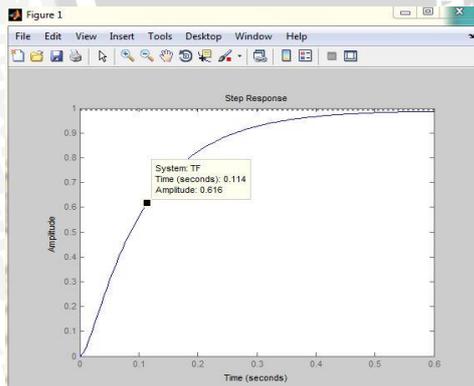
$$F(s) = \frac{843.5}{s^2 + 99.27s + 851.1} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

$$2\xi\omega_n = 99.27 \quad (3)$$

$$\omega_n = \sqrt{843.5} = 29.043 \quad (4)$$

$$\xi = \frac{99.27}{2 \times 29.043} = 1.70901 \quad (5)$$

Dengan memberikan masukan *unit step* pada program *Matlab* didapatkan *output* sistem pada Gambar 6.



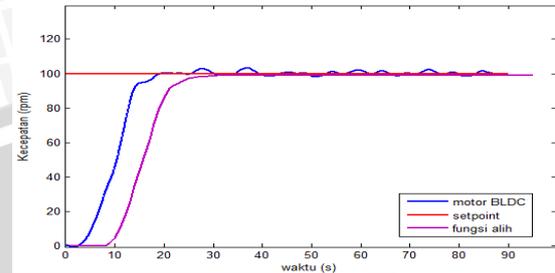
Gambar 6 Output sistem dengan masukan *unit step*

Dari Gambar 6 didapatkan *output* sistem (lihat persamaan 1) dengan waktu yang dibutuhkan *output* untuk mencapai nilai *time constant* 63.2% dari nilai *steady state* yaitu 0.114 seconds.

2.7 Validasi Fungsi Alih Motor BLDC

Validasi fungsi alih motor BLDC dilakukan dengan cara membandingkan *output* fungsi alih dengan *output* kecepatan motor BLDC yang dapat

dari pembacaan *rotary encoder* dengan memberikan masukan *unit step*. Perbandingan kedua *output* yang didapat dengan menggunakan *Matlab*. Hasil *output* sistem dan kecepatan motor BLDC dapat dilihat dalam Gambar 7.



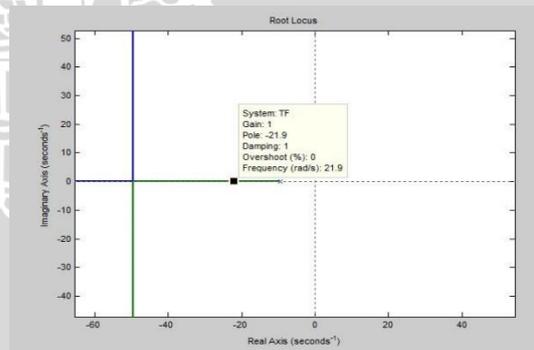
Gambar 7 Output sistem dan Output Motor BLDC

Dari *output* diatas dapat dilihat bahwa *output* fungsi alih yang telah didapat dari proses identifikasi hampir menyerupai *output* kecepatan motor BLDC. Jadi fungsi alih yang telah didapatkan dianggap dapat mewakili pemodelan *plant* motor BLDC.

2.8 Penentuan Parameter Kontroler PI

Untuk memenuhi tujuan performansi loop yang diinginkan, maka perlu ditambahkan kontroler pada sistem tersebut. Kontroler yang dipilih ialah kontroler Proporsional Integral (PI). Setelah didapatkan fungsi alih sistem yaitu Selanjutnya adalah menentukan letak simpul *loop* tertutup.

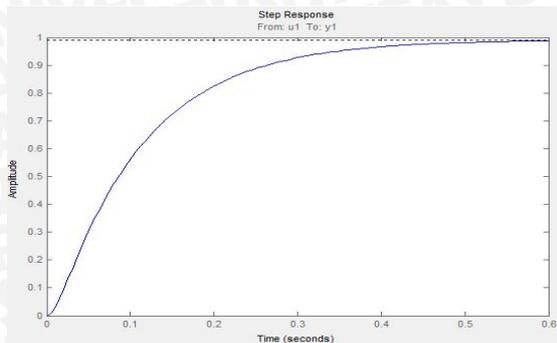
Berdasarkan fungsi alih (lihat persamaan 1) dapat diketahui sistem berorde dua. Nilai parameter PI ditentukan oleh pemilihan *pole* pada diagram *root locus*. Pada penelitian ini digunakan $s_1 = -21.9$. Penentuan letak *pole* pada diagram *root locus* dapat dilihat dalam Gambar 8.



Gambar 8 Root Locus Fungsi Alih Sistem dan Pemilihan Pole

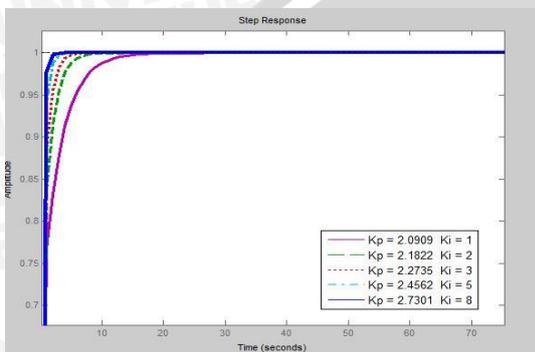
selanjutnya dilakukan perhitungan untuk menentukan parameter PI sesuai dengan kriteria yang diinginkan dalam hal ini menggunakan metode *root locus* yang diimplementasikan dalam program *Matlab*.

Gambar 9 menunjukkan *output* sistem tanpa menggunakan kontroler PI dengan *input unit step*.



Gambar 9 Output Sistem tanpa kontroler PI dengan input unit step

Gambar 10 menunjukkan output sistem dengan menggunakan kontroler PI.



Gambar 10 Output Sistem dengan kontroler PI dengan input unit step

Dari Gambar 9 dapat diketahui bahwa output sistem tanpa menggunakan PI lebih lama menuju steady state. Dengan digunakannya parameter PI hasil perhitungan dengan metode root locus didapatkan output lebih cepat dari pada output tanpa menggunakan PI, serta dapat mencapai setpoint yang diinginkan seperti tertera dalam Gambar 10.

Dari 5 jenis parameter PI yang didapat dipilih nilai PI yang memiliki output terbaik yaitu :

KP = 2.7301
KI = 8

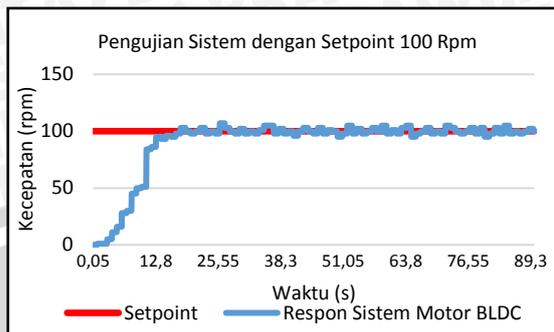
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem secara keseluruhan ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar nilai kontroler yang dibutuhkan agar sistem bekerja sesuai dengan setpoint yang diinginkan serta mengetahui hasil output yang diimplementasikan pada alat.

3.1 Pengujian sistem pada alat setelah diimplementasikan tanpa gangguan.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui output sistem motor tanpa diberi gangguan. Pada pengujian ini setpoint yang diberikan sebesar 100 rpm, 120 rpm, dan 140 rpm. Hasil pengujian ditunjukkan dalam Gambar 11, Gambar 12, dan Gambar 13.

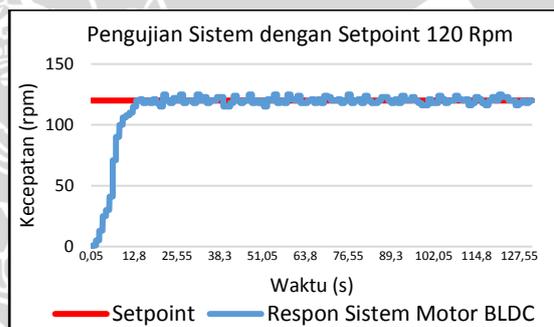
Gambar 11 menunjukkan output motor BLDC dengan setpoint 100 rpm.



Gambar 11 Output motor BLDC dengan setpoint 100 rpm

Dari output sistem yang ditunjukkan dalam Gambar 11 dapat disimpulkan bahwa sistem terdapat error steady state sebesar 5 %, t_s sebesar 27 s, dan terdapat overshoot sebesar 7 %.

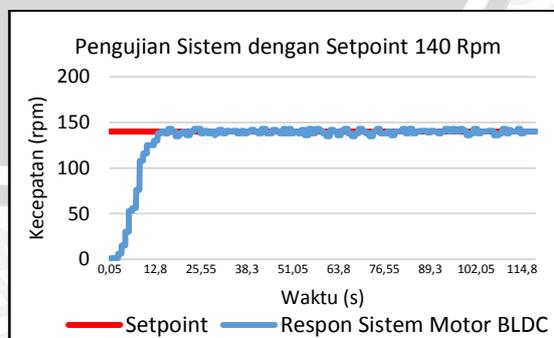
Gambar 12 menunjukkan output motor BLDC dengan setpoint 120 rpm.



Gambar 12 Output motor BLDC dengan setpoint 120 rpm

Dari output sistem yang ditunjukkan dalam Gambar 12 dapat disimpulkan bahwa sistem terdapat error steady state sebesar 4.17 %, t_s sebesar 24 s, dan tidak terdapat overshoot.

Gambar 13 menunjukkan output motor BLDC dengan setpoint 140 rpm.



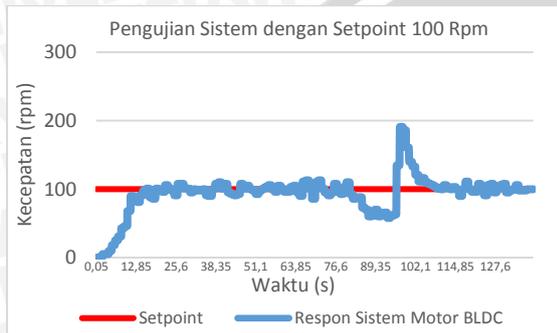
Gambar 13 Output motor BLDC dengan setpoint 140 rpm

Dari *output* sistem yang ditunjukkan dalam Gambar 13 dapat disimpulkan bahwa sistem terdapat *error steady state* sebesar 2.14 %, t_s sebesar 20 s, dan tidak terdapat *overshoot*.

3.2 Pengujian sistem pada alat setelah diimplementasikan dengan gangguan.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *output* sistem motor setelah diberi gangguan. Hasil pengujian ditunjukkan dalam Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16.

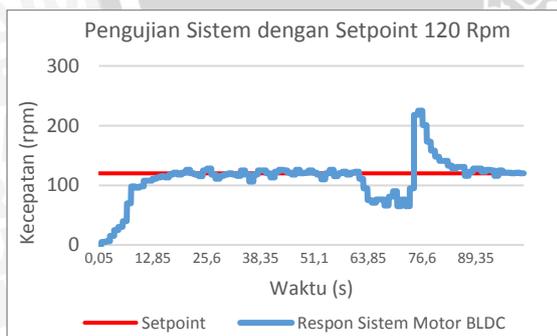
Gambar 14 menunjukkan *output* motor BLDC dengan *setpoint* 100 rpm dengan gangguan.



Gambar 14 *Output* motor BLDC dengan *setpoint* 100 rpm dengan gangguan

Dari Gambar 14 *output* sistem dapat disimpulkan bahwa sistem terdapat osilasi dan *output* sistem kembali keadaan *steady state* dengan *recovery time* sebesar 38 s.

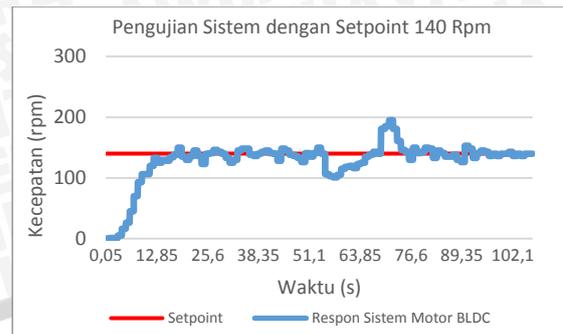
Gambar 15 menunjukkan *output* motor BLDC dengan *setpoint* 120 rpm dengan gangguan.



Gambar 15 *Output* motor BLDC dengan *setpoint* 120 rpm dengan gangguan

Dari Gambar 15 *output* sistem dapat disimpulkan bahwa sistem terdapat osilasi dan *output* sistem kembali keadaan *steady state* dengan *recovery time* sebesar 39 s.

Gambar 16 menunjukkan *output* motor BLDC dengan *setpoint* 140 rpm dengan gangguan.



Gambar 16 *Output* motor BLDC dengan *setpoint* 140 rpm dengan gangguan

Dari Gambar 16 *output* sistem dapat disimpulkan bahwa sistem terdapat osilasi dan *output* sistem kembali keadaan *steady state* dengan *recovery time* sebesar 40 s.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Berdasarkan data *output* sistem yang diperoleh dari pengujian dengan menggunakan sinyal *Pseudo-Random Binary Sequence* (PRBS) didapat nilai fungsi alih $\frac{843.5}{s^2+99.27s+851.1}$ dengan nilai *best fit* sebesar 81.78.
2. Berdasarkan *output* sistem yang diperoleh dari pengujian dengan menggunakan metode *root locus* didapat nilai parameter kontroler PI dengan penguatan sebesar $K_p = 2.7301$ dan $K_i = 8$.
3. Berdasarkan hasil implementasi tanpa gangguan, *output* sistem pada motor BLDC dengan nilai *setpoint* 100 rpm terdapat *error steady state* 5%, t_s sebesar 27 s dan *overshoot* 7%. Pada *setpoint* 120 rpm terdapat *error steady state* 4.17%, t_s sebesar 24 s dan tidak terdapat *overshoot*. Dan pada *setpoint* 140 rpm terdapat *error steady state* 2.14%, t_s sebesar 20 s dan tidak terdapat *overshoot*.
4. Berdasarkan dari hasil implementasi dengan gangguan, pada *setpoint* 100 rpm, 120 rpm, dan 140 rpm mengalami perlambatan dan percepatan. Dan *output* sistem motor kembali keadaan *steady state* dengan *recovery time* sebesar 38 s, 39 s, dan 40 s.

4.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah pada pengujian berbeban proses pengereman dilakukan pada saat sistem pertama kali berjalan, mengimplementasi motor *Brushless* DC sebagai aktuator pada mobil listrik dan menggunakan sensor kecepatan yang lebih teliti sehingga data pengujian yang didapatkan mendekati dengan nilai sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1].Tantowi, Irham. 2015. *Rancang Bangun Three Phase Six Step PWM Inverter sebagai Pedal Assited System (PAS) Sepeda Listrik*. Malang : Skripsi Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- [2].Ogata, K. 1997. *Teknik Kontrol Automatik*. Terjemahan : Edi Laksono Ir. Jakarta : Penerbit Erlangga.
- [3]. Prabarianto, Bayu. 2015. *Desain Pengendali Digital Alat Kendali Kecepatan Motor DC dengan Menggunakan Metode Root Locus*. Malang : Skripsi Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
- [4].Rozi, Fakhrrur. 2015. *Sistem Kontrol Pengendali PI pada Kecepatan Motor Berbasis Arduino Mega 2560*. Malang : Skripsi Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang

