

# Kendali *Auto-Tuning* Berbasis *Loop-Shaping* pada Sistem Orde Dua

Atikah Surriani, Meilia Safitri, Almira Budiyo, Adha Cahyadi

Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Universitas Gadjah Mada  
atikah.surriani.ste13@mail.ugm.ac.id

## Abstrak

Penelitian ini mengajukan perbandingan kalang yang diinginkan ( $L$ ) dalam sistem kendali PD *auto-tuning* berbasis *Loop Shaping* pada sistem quadrotor. Perbandingan dilakukan pada kawasan frekuensi dengan parameter sensitivitas, kalang terbuka  $GC(s)$ , dan pendukung sensitivitas atau kalang tertutup sistem. Perbandingan menggunakan tiga nilai kalang yang diinginkan ( $L$ ) *Loop Shaping* yang berbeda,  $L(s)$ ,  $L_1(s)$ ,  $L_2(s)$ . Dari hasil simulasi memperlihatkan bahwa sistem dengan menggunakan  $L(s)$ , sistem memiliki tanggapan yang paling baik. Hal ini dikarenakan  $L(s)$  memiliki integrator yang mendekati sistem. Hasil perbandingan ini dibuktikan dengan tanggapan ketinggian sistem ketinggian quadrotor pada  $L(s)$  memiliki tanggapan waktu tunak lebih cepat yaitu 13,5 detik. Dari penelitian ini didapat nilai ketinggian dari sistem ketinggian quadrotor dapat mencapai nilai referensi. Dengan memilih Kalang yang diinginkan ( $L$ ) yang tepat mampu menghasilkan nilai  $K_p$  dan  $K_d$  yang sesuai bagi sistem mencapai nilai referensi.

Kata Kunci: Ketinggian, *Loop shaping*, Quadrotor

## 1. Pendahuluan

Sistem kendali merupakan bagian yang penting dalam kehidupan sehari-hari. Sistem kendali berfungsi sebagai umpan balik pada sistem kalang tertutup. Pada sistem umpan balik terdapat proses (hubungan sebab-akibat) dimana operasinya bergantung pada satu atau lebih parameter input yang menimbulkan perubahan pada beberapa parameter lain (Ozby, 2000).

Salah satu pengendali yang banyak digunakan adalah menggunakan pengendali PID (*Proportional Integral Derivatif*). Pada lingkungan industri, pengendali PID secara umum digunakan untuk proses kontrol pada suhu, tekanan, aliran dan lain-lain (Murthy, Kumar, & Kumari, 2012). Selain digunakan pada lingkungan industri, pengendali PID juga digunakan pada lingkungan akademisi dalam makalah penelitian, karena memiliki banyak keuntungan. Salah satu keuntungan dari pengendali PID adalah kesederhanaan struktural dan kemampuan yang cukup untuk memecahkan banyak masalah kontrol secara praktis. Meskipun pengendali PID didasarkan pada model matematika yang tepat yang telah dijamin *stability*, *reliability*, dan *controllability*-nya pada sistem yang linear, tetapi pada sistem nonlinear pengendali PID terkadang tidak sesuai penggunaannya (Vindhya & Reddy, 2013). Oleh karena itu, pengendali PID biasanya dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal. Salah satu pengembangan dari penggunaan pengendali PID adalah dengan memberikan fitur tambahan seperti *auto-tuning*, *gain scheduling*, serta proses adaptasi yang dilakukan secara terus-menerus. Sehingga dalam penelitian ini,

dilakukan *auto-tuning* berdasarkan *loop-shaping*. *Auto-tuning* menjadi sangat penting, karena pada dasarnya kalang yang diinginkan merupakan hasil kali dari perhitungan *plant* dan pengendali. Setelah kita menentukan karakteristik kalang yang diinginkan, serta diketahui karakteristik *plant*-nya, maka kita tinggal mengatur pengendali agar sesuai dengan kalang yang diinginkan. Oleh karena itu, *auto-tuning* sangat diperlukan agar pengendali dapat menyesuaikan nilai secara otomatis.

*Loop-shaping* dalam perancangan pengendali adalah metode yang sangat populer. Dalam *loop-shaping* terdapat kompensator yang dirancang sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk mengubah sensitivitas kalang tertutup dan digunakan untuk dapat saling melengkapi sensitivitas respon frekuensi dengan mengubah bentuk respon kalang terbuka dengan tetap menjaga kestabilannya. Metode *loop-shaping* ini adalah proses berulang untuk mencapai respon yang diinginkan kalang tertutup. Keuntungan utama dari *loop-shaping* adalah kebebasan memilih struktur pengendali dan kemungkinan bagi peneliti di bidang kontrol untuk menilai secara langsung dalam setiap penyesuaian pengendali (Shragai, 2001).

Salah satu *plant* yang sedang banyak digunakan di dunia teknik saat ini adalah quadrotor (P.I. Corke, 2011). Quadrotor merupakan sistem yang *under-actuated* dengan banyak input banyak output sehingga merupakan sistem nonlinear yang pada faktanya sulit untuk dikendalikan. Oleh karena itu pada penelitian ini, dilakukan studi kasus *auto-tuning* berdasarkan *loop-shaping* menggunakan quadrotor, sehingga quadrotor dapat dikendalikan

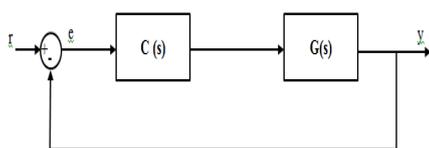
dengan baik. Quadrotor merupakan pesawat tanpa awak yang saat ini sedang marak digunakan baik pada lingkungan akademisi untuk penelitian, lingkungan militer untuk pertahanan, maupun pada lingkungan amatir yang dilakukan untuk sekedar hobi. Terdapat berbagai macam pesawat tanpa awak, seperti pesawat dengan sayap tetap (Beard et al., 2005) (Green & Oh, 2006), pesawat dengan 2 atau 3 rotor (birotor atau trirotor (Yoo, Oh, Won, & Tahk, 2010) (Salazar-cruz, 2008), dan helicopter (Shim, Kim, & Sastry, 2000). Dalam penelitian ini digunakan quadrotor yaitu pesawat dengan 4 rotor karena mudah untuk dikendalikan, serta tidak memerlukan tempat yang luas untuk melakukan proses mendarat dan lepas landas. Implementasi yang dilakukan pada sistem quadrotor ini adalah pada saat keadaan *hovering* atau melayang.

Pada bab 1, dibahas mengenai pendahuluan dan latar belakang penelitian. Bab 2 dibahas mengenai *loop-shaping* dan *auto-tuning*. Bab 3 mengenai implementasi *auto-tuning* berdasar *loop-shaping* menggunakan program Matlab. Terakhir, bab 4 membahas mengenai kesimpulan.

## 2. Metode

### 2.1 Loop Shaping

Dalam suatu sistem kendali umpan balik (*feedback*), hadirnya gangguan dan ketidakpastian yang berasal dari keadaan sekitar menjadi suatu tantangan untuk tetap menjaga agar output sistem tetap sesuai dengan yang kita inginkan. Pada sistem kendali umpan balik pemilihan pengendali menjadi hal penting karena akan menentukan tujuan dari sistem kendali tersebut dapat tercapai atau tidak. Gambar 1. menunjukkan sistem kendali umpan balik sederhana (Ozby, 2000).



Gambar 1. Sistem Kendali Umpan Balik Sederhana (Ozby, 2000)

Berdasarkan Gambar.1 besarnya kesalahan sistem atau *tracking error*  $e(s)$  adalah  $e(s) = r(s) - y(s)$ , dengan  $r(s)$  adalah referensi dan  $y(s)$  adalah keluaran. Fungsi sensitivitas ( $S$ ) dan fungsi pendukung sensitivitas ( $T$ ) diberikan oleh persamaan

$$S(s) = \frac{e(s)}{r(s)} = \frac{1}{1+G(s)C(s)} \quad (2.1)$$

$$T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)} \quad (2.2)$$

dengan  $G(s)$  merupakan *plant* yang dikendalikan dan  $C(s)$  merupakan pengendali.

Untuk mendapatkan *tracking error* yang kecil dapat diperoleh dengan meminimalisasi  $S$  dan  $T$ . Akan tetapi dalam perancangannya  $S$  dan  $T$  harus memenuhi persamaan  $S + T = 1$ , sehingga kita tidak dapat membuat nilai  $S$  dan  $T$  yang kecil dalam waktu yang bersamaan (Gaikwad, Dash, & Stein, 1999).

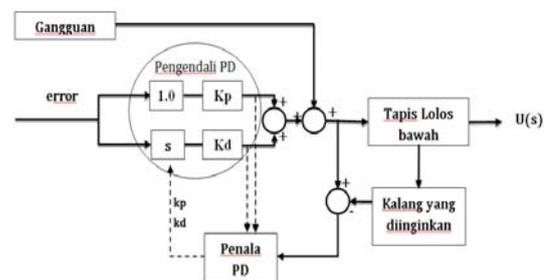
*Loop shaping* adalah suatu metode yang digunakan untuk membuat target *loop* agar dapat memiliki kriteria *loop* tertutup yang diinginkan. Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya bahwa dalam sistem kendali umpan balik, pengendali merupakan komponen penting dari sistem. Metode *loop shaping* dapat digunakan untuk memperoleh pengendali yang sesuai. Dalam metode ini pertama-tama kita tentukan fungsi alih *loop* yang memenuhi  $L(s) = G(s)C(s)$ . Target fungsi alih *loop* yang dipilih harus memenuhi kriteria kestabilan dan *robustness*. Setelan menuntukan fungsi alih  $L(s)$ , fungsi alih pengendali  $C(s)$  dapat ditentukan secara langsung dengan menggunakan persamaan berikut (Hover, 2009),

$$C(s) = \frac{L(s)}{G(s)} \quad (2.3)$$

Akan tetapi penentuan fungsi alih pengendali dengan cara ini sangat sulit jika *plant* yang dikendalikan merupakan *plant* yang kompleks. Dalam penelitian ini fungsi alih pengendali ditentukan secara otomatis dengan menggunakan metode *Gradient*.

### 2.2 Auto-tuning

PD *auto-tuning* dengan metode Gradient bertujuan untuk menentukan nilai  $K_p$  dan  $K_d$  yang optimal. Gambar 2. menunjukkan blok diagram PD *auto-tuning* secara umum. PD *auto-tuning* terdiri dari pengendali PD, tapis lolos bawah, kalang yang diinginkan, dan penala PD dengan menggunakan metode Gradient (Budiyanto, Safitri, Surriani, Sartika, & Cahyadi, 2014).



Gambar 2. Blok Diagram PD *Auto-tuning* (Budiyanto et al., 2014)

Error  $e(s)$  berfungsi sebagai masukan untuk pengendali PD dan keluaran dari pengendali dari isyarat PD  $U(s)$  sebagai,

$$U(s) = K_p e(s) + K_d s e(s) \quad (2.4)$$

Untuk memverifikasi digunakan tapis sebagai pelengkap kalang L, sebagai berikut

$$F(s)L(s) = (K_p e(s) + K_d s e(s)) G(s) \quad (2.5)$$

Fungsi objectif dari *auto-tuning* untuk mendapatkan error minimum adalah,

$$J = \int_0^{min} \{K_p, K_d\} \int_0^t e^2 d\tau \quad (2.6)$$

Sehingga, dengan menggunakan metode gradient, parameter PD  $\theta(\epsilon)$  dapat diperoleh dengan,

$$\theta = -\nabla J(\theta) \quad (2.7)$$

$$= \Gamma \epsilon \theta \quad (2.8)$$

dimana  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  adalah matriks skala yang terkait dengan gain adaptif, sehingga pilihan terbaik untuk  $\Gamma$  adalah matriks diagonal.

### 3. Studi Kasus

Studi kasus yang dilakukan pada penelitian ini adalah menggunakan *plant* quadrotor. Konstanta yang digunakan dalam penelitian ini adalah (Ataka et al., 2013),

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad (3.1)$$

$$I_x = 0.0820 \text{ kg.m}^2 \quad (3.2)$$

$$I_y = 0.0845 \text{ kg.m}^2 \quad (3.3)$$

$$I_z = 0.1377 \text{ kg.m}^2 \quad (3.4)$$

$$b = 1.2953 \times 10^{-3} \text{ kg.m} \quad (3.5)$$

$$d = 0.165 \text{ m} \quad (3.6)$$

$$k = 1.0368 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2 \quad (3.7)$$

$$m = 4.34 \text{ kg} \quad (3.8)$$

Guna menyederhanakan sistem dalam penelitian ini, quadrotor akan dianggap berada dalam keadaan *hovering* (melayang). Ketika dalam keadaan *hovering*, quadrotor memerlukan daya angkat yang konstan, sehingga keadaan-keadaan selain  $z$  dianggap sangat kecil dan dapat diabaikan serta kecepatan sudut dari keempat rotornya dapat dianggap sama. Dalam hal ini hanya 2 persamaan keadaan yang dipertimbangkan, yaitu posisi  $z$  dan kecepatan  $\dot{z}$ . Dengan menggunakan metode linearisasi Jacobian, persamaan keadaan quadrotor dalam keadaan *hovering* dapat representasikan sebagai,

$$\text{State} \quad : \quad \dot{\xi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \xi + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{g}{m} \end{bmatrix} v \quad (3.9)$$

$$\text{Keluaran} \quad : \quad z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \xi \quad (3.10)$$

Berdasarkan persamaan keadaan tersebut didapatkan fungsi alih sebagai berikut,

$$G(s) = \frac{-\frac{g}{s}}{s^2} \quad (3.11)$$

Analisis sistem kendali ketinggian quadrotor atau keluaran  $z$  dilakukan dengan analisis tanggapan sistem dalam kawasan frekuensi. Perbandingan yang dilakukan berdasarkan parameter sensitivitas  $S$  serta pendukung sensitivitas  $T$  dari *Loop Shaping* yang diinginkan  $L(s)$  terhadap kalang terbuka ( $GC$ ) dari sistem ketinggian sistem quadrotor. Dengan menggunakan diagram Bode Plot hasil tanggapan sistem ketinggian quadrotor dapat dianalisis dalam kawasan frekuensi.

Fungsi sensitivitas  $S$  menunjukkan bagaimana umpan balik mempengaruhi gangguan. Gangguan dengan frekuensi yang lebih rendah daripada frekuensi crossover sensitivitas  $\omega_{gc}$  yang dilemahkan oleh umpan balik dan frekuensi dengan  $\omega > \omega_{gc}$  yang diperkuat oleh umpan balik. Untuk sistem dengan umpan balik *error*, fungsi alih dari referensi output sebanding dengan fungsi pendukung sensitivitas  $T$ . Persamaan Fungsi sensitivitas  $S$  dan pendukung sensitivitas  $T$  seperti yang terlihat pada persamaan 2.1 dan 2.2., dimana  $P$  adalah *plant* dan  $C$  adalah pengendali

Pada sistem ketinggian yang dibangun dilengkapi dengan tapis lolos bawah. Tapis lolos bawah pada sistem ketinggian quadrotor digunakan untuk mengurangi *noise* pada sistem yang bekerja pada frekuensi tinggi, sehingga dapat membantu sistem menjadi lebih *robust*. Fungsi alih dari tapis yang digunakan adalah sebagai berikut,

$$F(s) = \frac{s}{-as^2 + as + b} \quad (3.12)$$

Dimana  $a$  digunakan sebagai koefisien penala, nilai  $a$  dan  $b$  dipilih sedemikian sehingga tapis stabil. Pada penelitian ini nilai  $a$  dan  $b$  ditetapkan sebesar 2 dan 1. Untuk memulai perbandingan digunakan tiga buah nilai  $L(s)$  yang berbeda, yaitu dengan menggunakan  $L$  dengan sistem orde satu dan  $L$  dengan sistem orde dua.

Nilai kalang yang diinginkan  $L$  pada percobaan pertama dipilih dari sistem orde satu, yaitu

$$L(s) = \frac{1}{s+0.01} \quad (3.13)$$

Dilanjutkan dengan pemilihan *Loop Shaping*  $L(s)$

$$L_1(s) = \frac{1}{s+1} \quad (3.14)$$

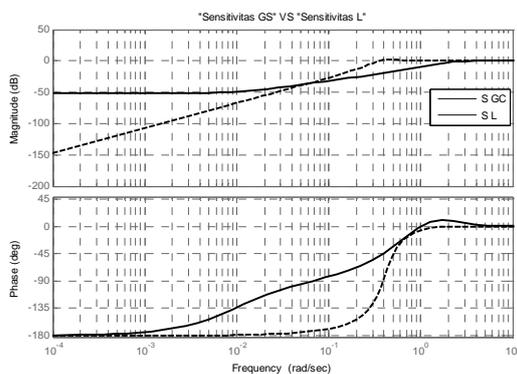
Menggunakan percobaan dengan menggunakan kalang yang diinginkan orde satu yang memiliki nilai *pole* yang berada di daerah *Left Half Plane*, dan menganalisis hasil tanggapan sistem berdasarkan kalang yang diinginkan tersebut.

Nilai  $L$  dengan sistem orde dua, yang juga memiliki *pole* dalam daerah *Left Half Plane* yaitu,

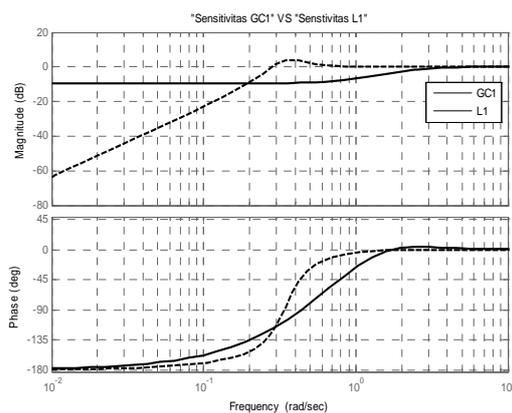
$$L_2(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.15)$$

Dipilih kedua nilai  $L$  tersebut karena memiliki kestabilan yang baik, untuk menjadi pembanding keluaran sistem dan menjadi masukan bagi penala kendali PD sistem ketinggian quadrotor.

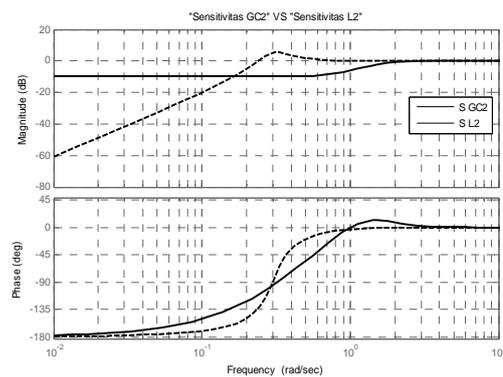
Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 menunjukkan perbandingan dari sensitivitas sistem pengendalian ketinggian quadrotor  $GC(s)$  dengan  $L(s)$ ,  $L_1(s)$ ,  $L_2(s)$ . Berdasarkan Diagram Bode terlihat dari tanggapan sensitivitas dari Gambar 3 menggunakan  $L(s)$  memiliki tanggapan grafik sensitivitas yang paling baik dibandingkan dengan tanggapan sensitivitas dengan menggunakan  $L_1(s)$  dan  $L_2(s)$ . Terlihat dari Gambar 3 grafik sensitivitas dari  $GC(s)$  memiliki pendekatan paling baik dengan  $L(s)$  sedang pada Gambar 4 dan Gambar 5 grafik tanggapan frekuensi sistem memiliki rentang lebih besar.



Gambar 3. Sensitivitas dari  $L(s)$  Dibandingkan Dengan Sensitivitas Sistem



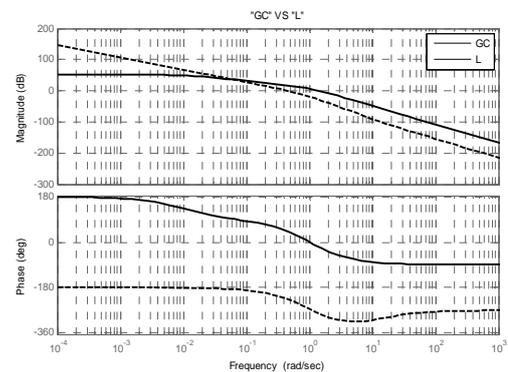
Gambar 4. Sensitivitas dari  $L_1(s)$  Dibandingkan Dengan Sensitivitas Sistem



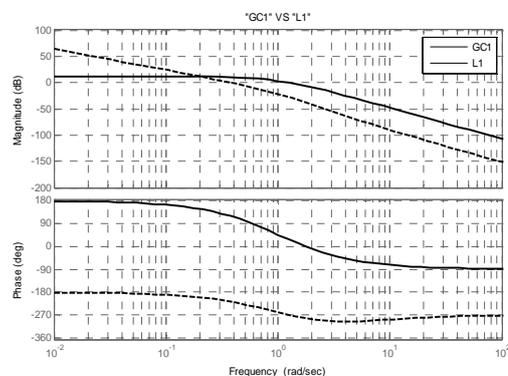
Gambar 5. Sensitivitas dari  $L_2(s)$  Dibandingkan Dengan Sensitivitas Sistem

Pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8 menunjukkan perbandingan dari  $L(s)$ ,  $L_1(s)$ ,  $L_2(s)$  dengan  $GC(s)$  dari system quadrotor. Dari diagram bode terlihat bahwa tanggapan kalang terbuka pada  $L(s)$  memiliki tanggapan yang paling baik berdasarkan grafik pada Gambar 6.

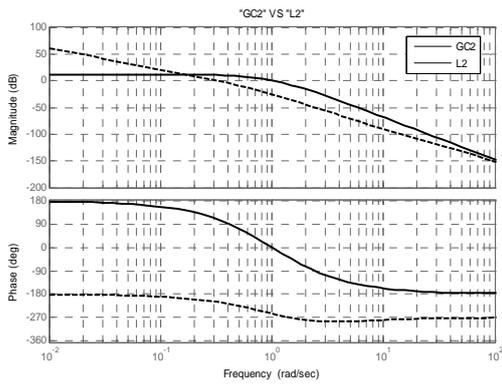
Pada studi kasus ini GC sistem memiliki nilai *gain margin* tak terhingga hal ini dikarenakan sistem GC memiliki *pole* bernilai 0 sehingga membawa sistem menjadi stabil kritis.



Gambar 6. Perbandingan  $L(s)$  Dibandingkan Dengan GC Sistem



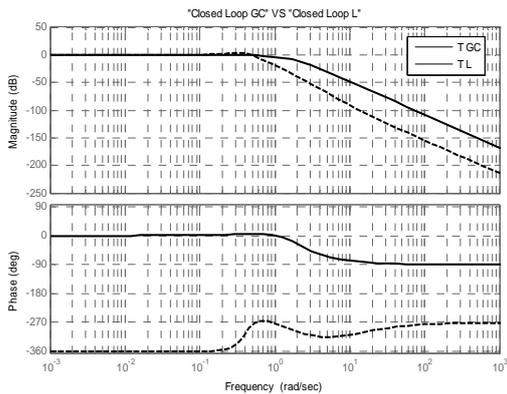
Gambar 7. Perbandingan  $L_1(s)$  Dibandingkan Dengan GC Sistem



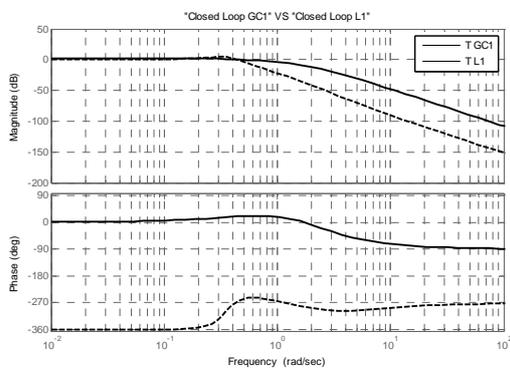
Gambar 8. Perbandingan Kalang  $L_2(s)$  Dibandingkan Dengan GC Sistem

Berikut pada Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11 menunjukkan perbandingan pendukung sensitivitas (T) system dengan  $L(s)$ ,  $L_1(s)$ ,  $L_2(s)$ . Pendukung sensitivitas (T) dari sistem merupakan kalang tertutup sistem (Budiyanto et al., 2014) yaitu

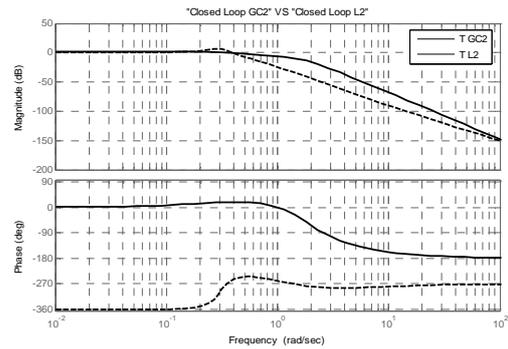
$$G_{ss}(s) = \frac{4K_p \frac{L}{s} + 4K_c \frac{L}{s}}{s^2 + 4K_c \frac{L}{s} + 4K_p \frac{L}{s}} \quad (3.16)$$



Gambar 9. Perbandingan Kalang Tertutup  $L(s)$  Dibandingkan Dengan Pendukung Sensitivitas (T) Sistem



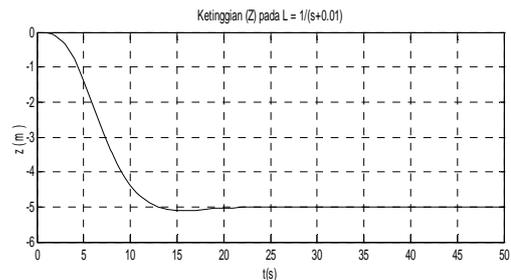
Gambar 10. Perbandingan Kalang Tertutup  $L_1(s)$  Dibandingkan Dengan Pendukung Sensitivitas (T) Sistem



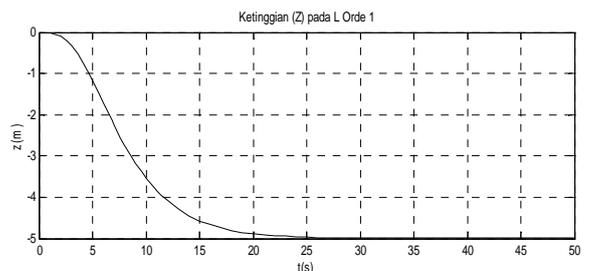
Gambar 11. Perbandingan Kalang Tertutup  $L_2(s)$  Dibandingkan Dengan Pendukung Sensitivitas (T) Sistem

Perbandingan kalang tertutup  $L(s)$ ,  $L_1(s)$ ,  $L_2(s)$  dengan pendukung sensitivitas (T) sistem dari diagram terdapat perbedaan yang signifikan. Perbedaan *gain margin* dan *phase margin* dari tersebut dikarenakan pada analisis GC dari sistem didapatkan *pole* yang bernilai 0, dan ini membawa kalang sistem menjadi stabil kritis. Namun dari grafik tanggapan pendukung sensitivitas sistem memiliki pendekatan paling baik pada  $L(s)$ .

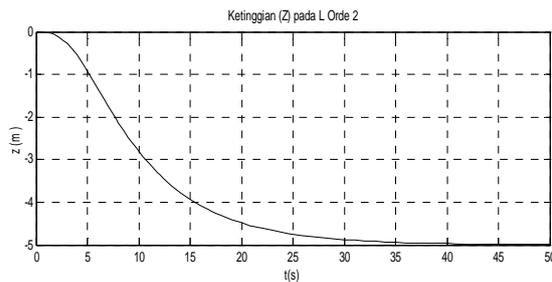
Dari hasil perbandingan sensitivitas, kalang terbuka sistem  $GC(s)$ , pendukung sensitivitas sistem didapatkan bahwa sistem dengan  $L(s) = \frac{1}{s+0.01}$  memiliki tanggapan paling baik karena sistem  $GC(s)$  mampu menghasilkan tanggapan sistem yang mendekati dengan  $L$  atau kalang yang diinginkan. Hal tersebut terjadi karena kalang yang diinginkan  $L(s) = \frac{1}{s+0.01}$  yang memiliki integrator yang mendekati sistem  $GC(s)$ . Dan hasil tersebut dapat dilihat dari respon ketinggian dari sistem.



Gambar 12. Ketinggian pada  $L(s)$



Gambar 13. Ketinggian pada  $L_1(s)$

Gambar 14. Ketinggian pada  $L_2(s)$ 

Gambar.12, Gambar.13, Gambar.14 menunjukkan respon ketinggian dari sistem quadrotor dari 3 kalang tertutup  $L(s)$ ,  $L_1(s)$ , dan  $L_2(s)$ . Pada Gambar 12, 13, 14 memperlihatkan bahwa pada  $L_2(s)$  orde 2 memiliki waktu keadaan tunak paling lambat yaitu 41 detik, dan  $L(s)$  memiliki waktu keadaan tunak yang paling cepat yaitu 13.5 detik. Perbandingan waktu tunak dari masing-masing sistem ditunjukkan pada Tabel.1

Tabel1.Perbandingan Waktu Tunak  $L(s), L_1(s), L_2(s)$ 

Loop Shaping	Waktu Tunak (detik)
$L(s)$	13,5
$L_1(s)$	25,2
$L_2(s)$	41

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini mengajukan perbandingan kalang kalang yang diinginkan (L) dalam sistem kendali PD *auto-tuning* berbasis *Loop Shaping* pada sistem quadrotor. Perbandingan dilakukan pada kawasan frekuensi dengan parameter sensitivitas, kalang terbuka  $GC(s)$ , dan pendukung sensitivitas atau kalang tertutup sistem. Perbandingan menggunakan tiga nilai kalang yang diinginkan (L) *Loop Shaping* yang berbeda,  $L(s), L_1(s), L_2(s)$ .

Dari hasil simulasi memperlihatkan bahwa sistem dengan menggunakan  $L(s)$ , sistem memiliki tanggapan sensitivitas, kalang terbuka, pendukung sensitivitas  $GC(s)$  yang paling baik. Hal ini dikarenakan  $L(s)$  memiliki integrator yang mendekati sistem. Hasil perbandingan ini dibuktikan dengan tanggapan ketinggian sistem ketinggian quadrotor pada  $L(s)$  memiliki tanggapan waktu tunak lebih cepat yaitu 13,5 detik dibandingkan dengan  $L_1(s)$  yang memiliki tanggapan waktu tunak 25,2 detik juga  $L_2(s)$  yang memiliki tanggapan waktu tunak sebesar 41 detik.

Dari penelitian ini didapat nilai ketinggian dari sistem ketinggian quadrotor dapat mencapai nilai referensi. Dengan memilih Kalang yang diinginkan (L) yang tepat mampu menghasilkan nilai  $K_p$  dan  $K_d$  yang sesuai bagi sistem mencapai nilai referensi.

#### Daftar Pustaka

Ataka, A., Tnunay, H., Inovan, R., Abdurrohman, M. Q., Prestianto, H., Cahyadi, A., & Yamamoto, Y.

(2013). Controllability and Observability Analysis of the Gain Scheduling Based Linearization for UAV Quadrotor. *Robotics, Biomimetics, and Intelligent Computational Systems (ROBIONETICS)*, 2–8.

- Beard, R., Kingston, D., Quigley, M., Snyder, D., Christiansen, R., Johnson, W., ... Goodrich, M. A. (2005). Autonomous Vehicle Technologies for Small. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2(January), 92–108.
- Budiyanto, A., Safitri, M., Surriani, A., Sartika, D. A., & Cahyadi, A. (2014). Quadrotor Multi-Loop PD Auto-tuning Based on GM-Loop Shaping. In *Regional Conference on Computer and Information Engineering (RC-CIE)*. Yogyakarta: Jurusan Elektro dan Teknologi Informasi.
- Gaikwad, S., Dash, S., & Stein, G. (1999). Loop-Shaping Ideas. *IEEE, I*, 589–593.
- Green, W. E., & Oh, P. Y. (2006). Autonomous Hovering of a Fixed-Wing Micro Air Vehicle. *IProceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (May), 2164–2169.
- Hover, F. (2009). Design of Electromechanical Robotic System. Massachusetts: MIT OpenCourseWare.
- Murthy, B. V., Kumar, Y. V. P., & Kumari, U. V. R. (2012). Application of Neural Networks in Process Control: Automatic / Online Tuning ofPID Controller Gains for, (978), 348–352.
- Ozbay, H. (2000). *Introduction to Feedback Control Theory*. Ohio: CRC Press LLC.
- P.I.Corke. (2011). *Robotics, vision and control: fundamental algorithm in MATLAB* (p. no. v 73). Brisbane: Springer.
- Salazar-cruz, S. (2008). Real-Time Stabilization of a Small Three-Rotor Aircraft. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 44(April), 783–794.
- Shim, D. H., Kim, H. J., & Sastry, S. (2000). Control System Design for Rotorcraft-based Unmanned Aerial Vehicles using Time-domain System Identification. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications*, (2), 808–813.
- Shragai, H. (2001). Loop Shaping Controller Design Using the Sode Plot. In *Proceedings of the American Control Conference* (pp. 2792–2796). Arlington.
- Vindhya, V., & Reddy, V. (2013). PID-Fuzzy Logic hybrid Controller for a Digitally Controlled DC-DC Converter. In *International Conference on Communication and Conservation of Energy (ICGCE)* (pp. 362–366). Chennai: IEEE.
- Yoo, D.-W., Oh, H.-D., Won, D.-Y., & Tahk, M.-J. (2010). Dynamic modeling and control system design for Tri-Rotor UAV. *2010 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics*, 762–767. doi:10.1109/ISSCAA.2010.5632868