

Perbandingan Penentuan Parameter Pengendali PID Pada *Plant* Orde Tinggi Plus Transportasi Lag Dengan Menggunakan Metoda Ziegler-Nichols dan Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup Melalui Pemodelan Orde Tereduksi

Teguh Muliando, Mahasiswa TE Undip, Wahyudi, Staf Pengajar TE Undip, Aris Triwiyatno, Staf Pengajar TE Undip

Abstrak – Pengendali PID merupakan salah satu jenis pengendali yang paling banyak diaplikasikan dalam dunia industri. Berbagai macam metoda penalaan telah dikembangkan untuk menghasilkan parameter pengendali PID yang dapat memberikan tanggapan sistem yang memuaskan (*satisfactory response*) sesuai dengan spesifikasi perancangan yang diinginkan, khususnya untuk sistem-sistem linier SISO. Salah satu metoda penalaan yang umum digunakan adalah aturan Ziegler-Nichols.

Pada tugas akhir ini, metoda penalaan yang didasarkan pada strategi penempatan *pole-pole* loop tertutup melalui pemodelan orde tereduksi digunakan untuk menentukan parameter pengendali PID pada beberapa sampel *plant* orde tinggi plus transportasi lag yang memiliki karakteristik tanggapan beresilasi dan tidak beresilasi. Metoda ini diharapkan dapat menghasilkan tanggapan sistem yang lebih baik dibandingkan dengan Metoda ke-2 Ziegler-Nichols. Kinerja sistem dapat dilihat dari kurva tanggapan transien (waktu naik, lewatan maksimum, waktu penetapan, dan *offset*), dan indeks performansi (ITAE).

I. PENDAHULUAN

Pengendali PID merupakan jenis pengendali konvensional yang paling banyak digunakan dalam proses kontrol industri dibandingkan jenis kendali-kendali lain yang lebih maju [13]. Hal ini dikarenakan pengendali PID memiliki struktur yang relatif sederhana, mudah dipahami dan diterapkan. Karena kepopulerannya dalam dunia industri, berbagai metoda penalaan telah dikembangkan untuk menentukan parameter-parameter pengendali PID (K_p , K_i , K_d). Tujuannya adalah untuk mendapatkan respon sistem yang optimal sesuai dengan spesifikasi perancangan yang diinginkan. Diantara metoda penalaan tersebut, yang terkenal adalah Metoda Ziegler-Nichols [1], [6], Metoda Cohen-Coon [1], IAE dan ITAE [8], dan IMC (*Internal Model Control*) [1].

Umumnya, metoda-metoda penalaan tersebut dikembangkan untuk mengendalikan proses-proses yang khusus, sehingga pengendali menghasilkan operasi yang baik hanya pada lingkungan khusus tersebut [13]. Oleh karena itu, diperlukan suatu metoda penalaan yang dapat menghasilkan kinerja tinggi untuk menangani proses-proses linier yang umum, khususnya pada proses-proses yang memiliki elemen transportasi lag yang besar atau kecil.

Pada Tugas Akhir ini, Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi digunakan untuk menentukan parameter pengendali PID khususnya pada sampel-sampel *plant* orde tinggi plus transportasi lag (*transport lag/pure time delay*) yang

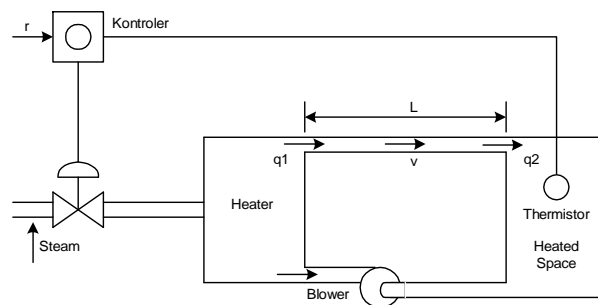
memiliki karakteristik respon beresilasi atau tidak beresilasi. Pemodelan orde tereduksi merupakan teknik pemodelan *plant* dengan cara mereduksi *plant* orde tinggi plus transportasi lag menjadi *plant* model orde kedua plus transportasi lag. Hasil-hasil yang diperoleh pada pengujian dan simulasi akan dibandingkan dengan Metoda ke-2 Ziegler-Nichols.

II. DASAR TEORI

A. Sistem dengan Elemen Transportasi Lag

Beberapa sistem memiliki elemen waktu mati, waktu tunda atau kelambatan transportasi (*transport lag*) yang tidak dapat dihindari dalam aliran sinyal antar komponen-komponennya [10]. Waktu tunda tersebut biasanya terjadi akibat adanya pemisahan secara fisik komponen-komponen yang terdapat dalam suatu sistem, sehingga terdapat tundaan antara perubahan pada variabel yang digunakan dan pengaruhnya terhadap *plant* atau terhadap elemen pengukuran [10].

Gambar 1 menunjukkan suatu sistem pengaturan suhu berupa udara panas yang disirkulasikan untuk menjaga temperatur suatu ruang agar konstan [8], [10].



Gambar 1 Sistem pengaturan suhu dengan elemen transportasi lag dalam arah maju.

Pada sistem ini elemen ukur, yaitu *thermistor* dipasang pada bagian hilir sejauh L m dari elemen pemanas, dan jarak ini cukup panjang. Bila kecepatan udara dalam pipa v m/det, maka tundaan sebesar $T=L/v$ detik akan berlalu sebelum setiap perubahan temperatur udara yang meninggalkan elemen pemanas dirasakan oleh elemen ukur. Waktu tunda dalam pengukuran, waktu tunda dari aksi pengendali, atau waktu tunda dari operasi aktuator dan sebagainya disebut waktu mati atau kelambatan transportasi.

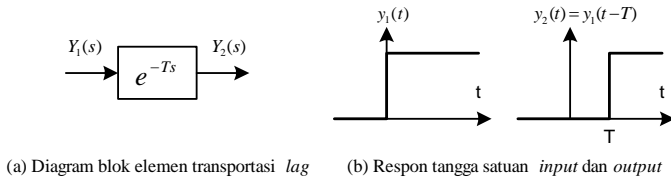
Masukan $x(t)$ dan keluaran $y(t)$ dari suatu elemen transportasi lag direlasikan oleh [8]

$$y(t) = x(t - T) \quad (1)$$

dimana T adalah transportasi *lag*. Fungsi alih dari transportasi *lag* diberikan oleh

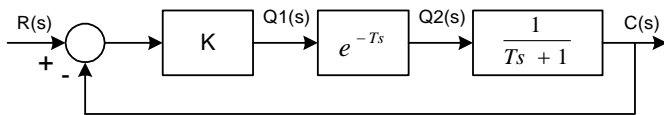
$$\text{Fungsi alih} = \frac{\mathcal{L}[x(t-T)1(t-T)]}{\mathcal{L}[x(t)1(t)]} = \frac{X(s)e^{-Ts}}{X(s)} = e^{-Ts} \quad (2)$$

Hubungan antara *input* dan *output* pada elemen transportasi *lag* terhadap masukan fungsi tangga satuan diperlihatkan pada Gambar 2 [10].



Gambar 2 Diagram blok elemen transportasi *lag*, dan hubungan *input* dan *output* pada elemen transportasi *lag* terhadap masukan tangga satuan.

Misalkan *plant* pada Gambar 2 dimodelkan sebagai sistem orde pertama dan pengendali yang digunakan adalah pengendali proporsional, maka diagram blok sistem pengaturan suhu ditunjukkan pada Gambar 3 [10].

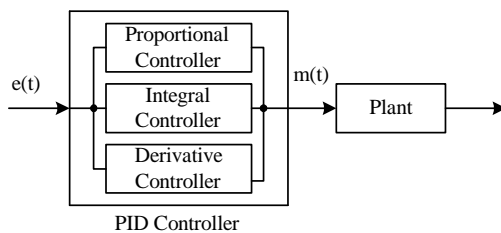


Gambar 3 Diagram blok kendali proporsional pada *plant* orde satu (sistem pengendali suhu).

Aliran udara panas dari elemen pemanas adalah $q_1(t)$ dan pengaruhnya pada *Plant* adalah $q_2(t)$. Sehingga, $q_2(t) = q_1(t-T)$ atau $Q_2(s) = e^{-Ts}Q_1(s)$.

B. Konsep Dasar Pengendali Proporsional-Integral-Turunan (PID)

Pengendali PID merupakan gabungan dari tiga macam pengendali, yaitu pengendali proporsional, pengendali integral, dan pengendali turunan. Tujuan dari penggabungan ketiga macam pengendali tersebut adalah untuk memperbaiki kinerja sistem di mana masing-masing pengendali akan saling melengkapi dan menutupi dengan kelemahan dan kelebihan masing-masing. Gambar 4 menunjukkan diagram blok pengendali PID secara umum.



Gambar 4 Diagram blok pengendali PID secara umum.

Persamaan umum pengendali PID diberikan oleh

$$m(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Fungsi alih menggunakan transformasi Laplace adalah

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4)$$

B.1 Pengendali Proporsional

Pada pengendali proporsional, besarnya keluaran selalu sebanding dengan besarnya masukan sesuai dengan konstanta pembanding tertentu. Pada sistem pengaturan loop tertutup, pengendali proporsional digunakan untuk memperkuat sinyal kesalahan penggerak sehingga mempercepat keluaran sistem untuk mencapai titik referensi. Persamaan umum sinyal keluaran pengendali proporsional adalah

$$m(t) = K_p e(t) \quad (5)$$

dengan $e(t)$ adalah sinyal kesalahan penggerak. Sedangkan fungsi alihnya adalah

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \quad (6)$$

Pada keadaan tunak, keluaran sistem dengan pengendali proporsional masih terdapat *offset*, artinya keluaran yang dihasilkan tidak sama dengan nilai referensinya.

B.2 Pengendali Integral

Pengendali integral digunakan untuk menghilangkan *offset* pada keadaan tunak. *Offset* biasanya terjadi pada *Plant-Plant* yang tidak mempunyai faktor integrasi ($1/s$). Sifat dari pengendali integral adalah ia dapat menghasilkan keluaran pada saat masukan sama dengan nol. Pada pengendali integral, harga keluaran kontroler $m(t)$ diubah dengan laju yang sebanding dengan sinyal kesalahan penggerak $e(t)$, sehingga

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (7)$$

atau

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (8)$$

dengan K_i adalah konstanta yang dapat diatur, dan $e(t)$ adalah sinyal kesalahan penggerak. Fungsi alih pengendali integral adalah

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

B.3 Pengendali Turunan (*Derivative*)

Pengendali turunan memberikan respon terhadap laju perubahan sinyal kesalahan penggerak dan dapat menghasilkan koreksi berarti sebelum sinyal kesalahan penggerak menjadi terlalu besar. Jadi, pengendali turunan mendahului sinyal kesalahan penggerak, mengawali aksi koreksi dini, dan cenderung memperbesar kestabilan sistem.

Walaupun pengendali turunan tidak mempengaruhi kesalahan keadaan tunak secara langsung, akan tetapi menambah redaman sistem sehingga memungkinkan

penggunaan harga penguatan K yang lebih besar sehingga akan memperbaiki ketelitian keadaan tunak.

Persamaan keluaran untuk pengendali turunan adalah

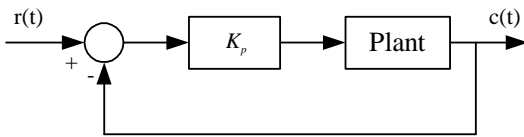
$$m(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

Fungsi alih pengendali turunan adalah

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_d s \quad (11)$$

C. Metoda ke-2 Ziegler-Nichols

Metode ini didasarkan pada reaksi sistem loop tertutup. *Plant* disusun serial dengan pengendali PID. Semula parameter integrator disetel tak berhingga dan parameter turunan disetel nol ($T_i = \infty, T_d = 0$). Parameter proporsional kemudian dinaikkan secara bertahap hingga mencapai harga yang mengakibatkan reaksi sistem berosilasi dengan amplitudo tetap (*sustained oscillation*). Gambar 5 menunjukkan sistem loop tertutup pada penalaan PID metoda osilasi.



Gambar 5 Sistem loop tertutup dengan kendali proporsional.

Nilai penguatan proporsional pada saat sistem mencapai kondisi *sustained oscillation* disebut penguatan kritis (*ultimate gain*), K_{cr} . Periode dari *sustained oscillation* disebut periode kritis (*ultimate period*), P_{cr} . Rumusan penalaan parameter PID berdasarkan metoda kurva reaksi diperlihatkan pada Tabel I.

TABEL I
RUMUS PARAMETER PENGENDALI PID DENGAN METODA OSILASI.

Type Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$(1/1.2) P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$1.25 P_{cr}$

D. Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi

Proses penalaan terbagi atas proses pemodelan *plant*, dan proses penempatan *Pole-Pole* loop tertutup sesuai dengan *plant* model yang telah diperoleh [13].

D.1 Model Orde Tereduksi

Fungsi alih *plant* model orde tereduksi adalah

$$\hat{G}(s) = \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + c} \quad (12)$$

dengan a , b , c , dan L merupakan nilai-nilai yang akan ditentukan. Respon sistem tergantung pada nilai-nilai a , b , dan c yang menghasilkan *pole-pole* nyata atau konjugasi kompleks.

Jika $s = j\omega_b$ dan $s = j\omega_c$ disubstitusikan ke (12), dimana

$$\angle \hat{G}(j\omega_b) = -\frac{\pi}{2} \quad \text{dan} \quad \angle \hat{G}(j\omega_c) = -\pi \quad \text{sehingga}$$

$G(j\omega_b) = \hat{G}(j\omega_b)$ dan $G(j\omega_c) = \hat{G}(j\omega_c)$, maka diperoleh

$$c - a\omega_b^2 + j\omega_b = \frac{\cos(\omega_b L) - j \sin(\omega_b L)}{-j |G(j\omega_b)|} \quad (13)$$

$$c - a\omega_c^2 + j\omega_c = \frac{\cos(\omega_c L) - j \sin(\omega_c L)}{-|G(j\omega_c)|} \quad (14)$$

Persamaan (13) dan (14) diselesaikan dengan menggunakan metoda eliminasi, sehingga diperoleh

$$a = \frac{1}{\omega_c^2 - \omega_b^2} \left[\frac{\cos(\omega_c L)}{|G(j\omega_c)|} + \frac{\sin(\omega_b L)}{|G(j\omega_b)|} \right] \quad (15)$$

$$b = \frac{\sin(\omega_c L)}{\omega_c |G(j\omega_c)|} \quad (16)$$

$$c = \frac{1}{\omega_c^2 - \omega_b^2} \left[\frac{\omega_c^2 \sin(\omega_b L)}{|G(j\omega_b)|} + \frac{\omega_b^2 \cos(\omega_c L)}{|G(j\omega_c)|} \right] \quad (17)$$

$$\frac{\sin(\omega_c L)}{\cos(\omega_b L)} = \frac{\omega_c |G(j\omega_c)|}{\omega_b |G(j\omega_b)|} := \theta \quad (18)$$

Persamaan (18) merupakan persamaan non-linier dan tidak mempunyai penyelesaian langsung. Namun, jika terdapat suatu nilai taksiran awal yang mendekati nilai sebenarnya, maka metoda Newton-Raphson dapat digunakan untuk menentukan nilai penyelesaian yang lebih teliti setelah beberapa iterasi. Nilai taksiran awal diperoleh dengan mendekati fungsi sinus dan kosinus dalam bentuk persamaan polinomial orde kedua.

$$\sin(x) = px^2 + qx \quad (19)$$

$$\cos(x) = px^2 + rx + 1 \quad (20)$$

Substitusikan nilai-nilai $x = 0, (\pi/4), (\pi/2)$ ke (19) dan (20), dan dengan metoda eliminasi diperoleh

$$p = (8/\pi^2)(1 - \sqrt{2}), q = (2/\pi)(2\sqrt{2} - 1), r = (2/\pi)(2\sqrt{2} - 3)$$

Substitusikan p , q , dan r ke (18), sehingga diperoleh

$$p(\omega_c^2 - \theta\omega_b^2)L^2 + (q\omega_c - \theta r\omega_b)L - \theta = 0 \quad (21)$$

dengan $\theta = \frac{\omega_c |G(j\omega_c)|}{\omega_b |G(j\omega_b)|}$. Harga mutlak akar yang lebih kecil

(*smaller absolute root*) digunakan sebagai nilai taksiran awal, sehingga Metoda Newton-Raphson dapat digunakan untuk menentukan waktu tunda *plant* model (L). Bentuk umum persamaan Metoda Newton-Raphson adalah

$$L_{n+1} = L_n - \frac{f(L_n)}{f'(L_n)} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (22)$$

dengan

$$f(L) = \frac{\sin(\omega_c L)}{\cos(\omega_b L)} - \frac{\omega_c |G(j\omega_c)|}{\omega_b |G(j\omega_b)|}$$

$$f'(L) = \frac{\omega_b \sin(\omega_b L) \sin(\omega_c L) + \omega_c \cos(\omega_b L) \cos(\omega_c L)}{\cos^2(\omega_b L)}$$

Substitusikan nilai L pada (22) ke (15) sampai (17) sehingga diperoleh nilai-nilai a , b , dan c .

D.2 Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup

Respon sistem loop terbuka *plant* model terhadap masukan tangga satuan dibedakan dalam tiga kondisi, yaitu :

1. Jika $b^2 - 4ac = 0$

Pole-pole loop terbukanya adalah $s_{1,2} = -\frac{b}{2a}$, sehingga sistem dapat didekati dengan kasus redaman kritis ($\zeta_0 = 1$). Konstanta waktu proses (τ_0) dirumuskan

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{b}{2a} \quad (23)$$

2. Jika $b^2 - 4ac > 0$

Pole-pole loop terbukanya memiliki harga nyata negatif dan berbeda, yaitu $s_{1,2} = -\left(\frac{b}{2a} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{c}{a}}\right)$. Sehingga sistem dapat didekati dengan kasus redaman lebih ($\zeta_0 > 1$). Konstanta waktu proses (τ_0) berkaitan dengan suku eksponensial yang mengecil lebih lambat dan dirumuskan

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{c}{a}} \quad (24)$$

Dengan rasio redaman, $\zeta_0 = \frac{b}{2\sqrt{ac}}$.

3. Jika $b^2 - 4ac < 0$

Pole-pole loop terbuka adalah $s_{1,2} = -\frac{b}{2a} \pm j\sqrt{\left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{c}{a}}$. Sehingga sistem dapat didekati dengan kasus redaman kurang ($0 < \zeta_0 < 1$). Konstanta waktu proses (τ_0) dirumuskan

$$\frac{1}{\tau_0} = \frac{b}{2a} \quad (25)$$

Dengan rasio redaman, $\zeta_0 = \frac{b}{2\sqrt{ac}}$.

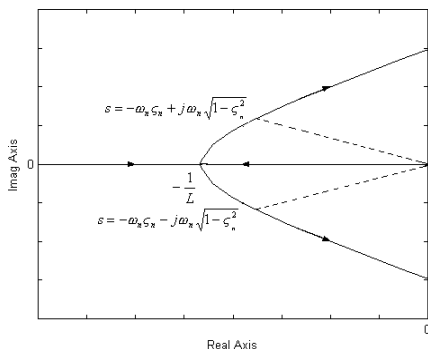
Pengendali PID dirancang untuk menghapus *pole-pole plant* model yang tidak diinginkan, sehingga fungsi alih pengendali PID pada (5) dapat ditulis ulang dalam bentuk

$$G_c(s) = \frac{k(as^2 + bs + c)}{s} \quad (26)$$

dengan $K_D = a \times k$, $K_P = b \times k$, dan $K_I = c \times k$. Fungsi alih loop terbuka pengendali PID dan *plant* model menjadi

$$G(s) = \frac{ke^{-sL}}{s} \quad (27)$$

Diagram tempat kedudukan akar-akar dari fungsi alih pada (27) diperlihatkan pada Gambar 6 [10], [13].



Gambar 6 Diagram lokus akar dari fungsi alih $G(s) = \frac{ke^{-sL}}{s}$.

Titik *breakaway* diperoleh dengan menggunakan [10]

$$\begin{aligned} \frac{dk}{ds} &= \frac{d}{ds}(-se^{sL}) = 0 \\ -Lse^{sL} - e^{sL} &= 0 \\ s &= -\frac{1}{L} \end{aligned} \quad (28)$$

Menurut [10], [13], pada proses-proses *highly oscillatory*, dinamik *un-cancelled* dapat menyebabkan sistem menuju ke *heavy oscillation*, sehingga *pole-pole* loop tertutup dengan harga nyata dipilih agar osilasi tidak mendominasi respon sistem. Sedangkan pada proses-proses *non-oscillatory* atau *lightly oscillatory*, dinamik *un-cancelled* tidak menyebabkan sistem menuju ke *heavy oscillation*, sehingga *pole-pole* loop tertutup dengan harga kompleks dipilih untuk menambah sedikit lewatan (*overshoot*) agar mempercepat tanggapan sistem.

Berdasarkan [8], kasus redaman kurang dengan ζ antara 0.5 dan 0.8 mencapai harga akhir lebih cepat dari sistem redaman kritis atau redaman lebih sehingga harga $\zeta = 0.7071$ dipilih agar respon sistem yang dihasilkan relatif cepat, tetapi memiliki lewatan maksimum yang relatif kecil.

Berdasarkan kedua alasan di atas, dan hasil pengujian pada [13], maka pemilihan *pole-pole* loop tertutup dibagi dalam dua kasus, yaitu :

1. $\zeta_0 > 0.7071$ atau $\left(\frac{L}{\tau_0}\right) < 0.15$ atau $\left(\frac{L}{\tau_0}\right) > 1$.

Pole-pole loop tertutup yang dipilih merupakan pasangan konjugasi kompleks dengan akar-akar persamaan karakteristik adalah

$$s_{1,2} = -\omega_n \zeta_n \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2}$$

ζ_n merupakan rasio redaman loop tertutup. Berdasarkan syarat sudut diperoleh

$$\begin{aligned} -\omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2} L - (180^\circ - \cos^{-1} \zeta_n) &= -180^\circ \\ \omega_n &= \frac{\cos^{-1} \zeta_n}{L \sqrt{1 - \zeta_n^2}} \end{aligned} \quad (29)$$

Berdasarkan syarat magnitudo diperoleh

$$k = \omega_n e^{-\omega_n \zeta_n L} \quad (30)$$

Substitusikan $\zeta_n = 0.7071$ ke (29) dan (30), sehingga diperoleh penguatan k sebesar

$$k = \frac{0.50043}{L} \quad (31)$$

2. $\zeta_0 \leq 0.7071$ atau $0.15 \leq \left(\frac{L}{\tau_0}\right) \leq 1$.

Pole-pole loop tertutup yang dipilih merupakan *pole-pole* nyata dan sama. Lokasinya dipilih agar kecepatan respon sistem loop tertutup sama dengan kecepatan respon saat loop terbuka [13]. Akar-akar persamaan karakteristiknya adalah $s_{1,2} = -\left(\frac{1}{\tau_0}\right)$. Jika *pole-pole* loop tertutup berada sebelum titik *breakaway*, maka diperoleh penguatan k sebesar

$$k = -se^{sL} \Big|_{s = -\left(\frac{1}{\tau_0}\right)} = \frac{1}{\tau_0} e^{-\left(\frac{L}{\tau_0}\right)} \quad (32)$$

Jika *pole-pole* loop tertutup berada pada titik *breakaway* atau sesudahnya, maka diperoleh penguatan k sebesar

$$k = -se^{sL} \Big|_{s=-\left(\frac{1}{L}\right)} = \frac{1}{eL} \quad (33)$$

Nilai-nilai konstanta PID diperoleh dengan menggunakan (26).

III. PERANCANGAN

A. Perancangan Program Pengujian dan Simulasi

Perancangan program pengujian dan simulasi menggunakan bahasa pemrograman *MATLAB* 5.3 dari *The MathWorks, Inc.* melalui beberapa sub-program, yaitu :

1. *MATLAB Command Window*

MATLAB Command Window digunakan untuk memanggil dan menjalankan hasil perancangan program dari *MATLAB Editor/Debugger*, *MATLAB GUI*, dan *MATLAB Simulink*.

2. *MATLAB Editor/Debugger*

MATLAB Editor/Debugger digunakan dalam perancangan program untuk memanggil dan menjalankan *simulink*, dan program untuk membuat simulasi dan menampilkan hasilnya.

3. *MATLAB Graphical User Interface (GUI)*

MATLAB GUI digunakan untuk merancang program tampilan simulasi.

B. Pemilihan *Plant*

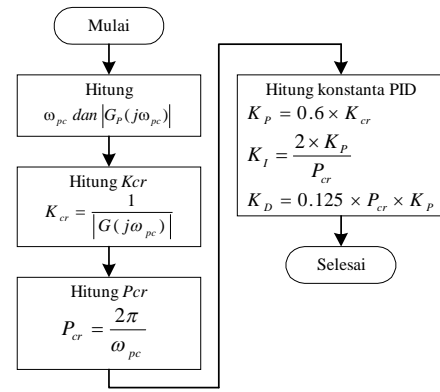
Plant yang digunakan pada pengujian dan simulasi merupakan *plant-plant* sampel orde tinggi plus transportasi *lag*. Berdasarkan [13], *plant - plant* yang digunakan, yaitu :

1. *Plant 1* : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+3)^5}$
2. *Plant 2* : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+1)(s+5)^2}$
3. *Plant 3* : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+3)(s^2+2s+3)}$
4. *Plant 4* : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+2)(s^2+s+1)}$
5. *Plant 5* : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s^2+s+1)(s+2)^2}$
6. *Plant 6* : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+3)(s^2+2s+3)^3}$

Waktu tunda (T) yang digunakan minimal 0.1 detik dan maksimal 2.0 detik. Variasi waktu tunda digunakan untuk mengetahui pengaruh penambahan waktu tunda terhadap kinerja sistem terkompensasi PID dengan metoda penalaan yang berbeda.

C. Perancangan Metoda ke-2 Ziegler-Nichols

Diagram alir proses penalaan PID dengan Metoda ke-2 Ziegler-Nichols diperlihatkan pada Gambar 7.

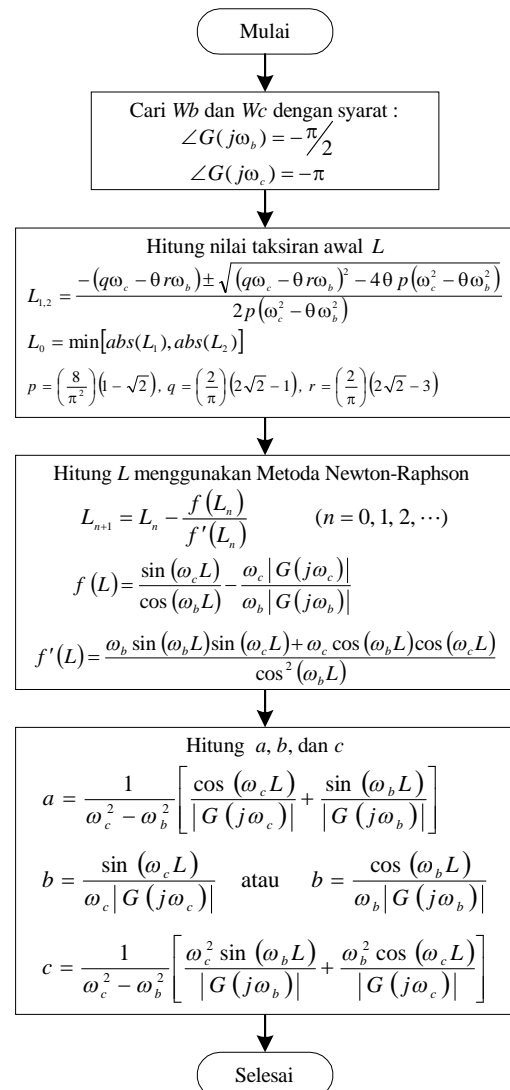


Gambar 7 Diagram alir proses penentuan parameter PID dengan Metoda ke-2 Ziegler-Nichols.

ω_{pc} (frekuensi *crossover* fasa) adalah frekuensi saat sudut fasa *plant* loop terbuka melintasi -180° . Pada frekuensi ini, respon sistem akan beresilasi terus-menerus dengan amplitudo tetap.

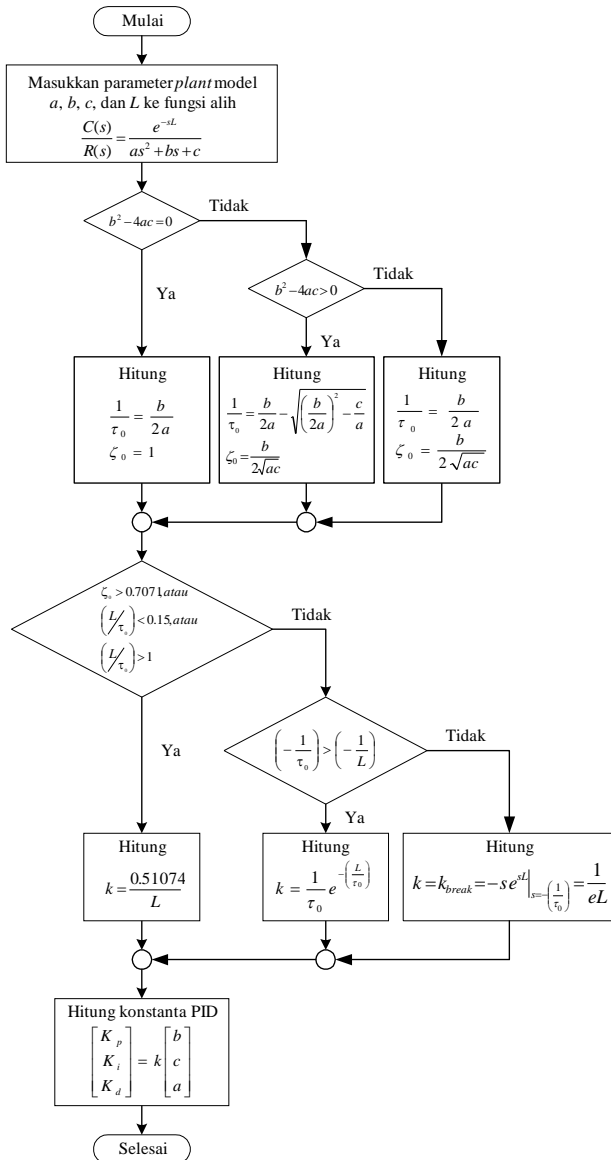
D. Perancangan Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi

Diagram alir proses pemodelan *plant* diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Diagram alir proses pemodelan *plant*.

Diagram alir proses penempatan *pole-pole* loop tertutup diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 9 Diagram alir proses penempatan *pole-pole* loop tertutup.

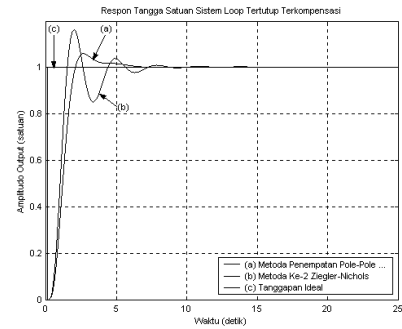
IV. PENGUJIAN DAN ANALISA

A. Pengujian Sistem Terkompensasi PID

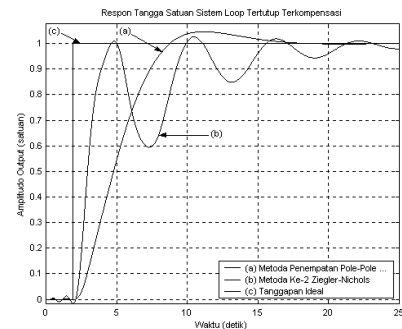
Unjuk kerja sistem yang dicari dari hasil pengujian dan simulasi meliputi karakteristik respon transien (tr , Mp , ts , dan $offset$) dan indeks performansi kesalahan ($ITAE$).

A.1. Pengujian pada *Plant 1*

Hasil pengujian pada *Plant 1* dengan waktu tunda 0.1 detik dan 1.9 detik diperlihatkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 1* dengan waktu tunda 0.1 detik.



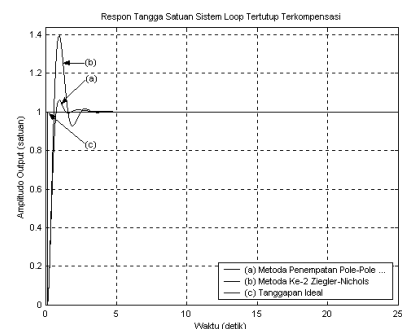
Gambar 11 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 1* dengan waktu tunda 1.9 detik.

TABEL II
PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID, KARAKTERISTIK RESPON TRANSIEN, DAN INDEKS PERFORMANSI KESALAHAN.

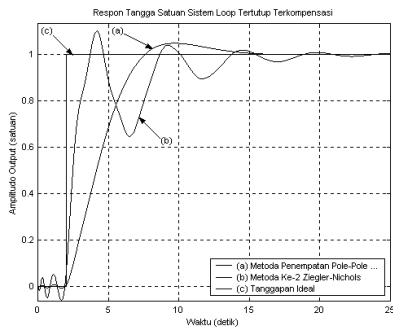
Waktu Tunda	Parameter	Metoda ke-2 Ziegler-Nichols	Metoda Penempatan <i>Pole-Pole</i> Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi
0.1 detik	K_p	366.166	240.638
	K_i	233.342	219.349
	K_d	143.649	102.229
	tr (detik)	0.816	1.158
	Mp (%)	11.4018	4.95647
	ts (detik)	7.731	5.233
	$offset$	5.11271×10^{-6}	3.75073×10^{-9}
1.9 detik	K_p	180.274	59.3266
	K_i	51.2431	51.27
	K_d	158.552	20.982
	tr (detik)	tidak settling	4.448
	Mp (%)	tidak settling	4.63719
	ts (detik)	tidak settling	14.65
	$offset$	tidak settling	6.30213×10^{-4}
	$ITAE$	22.5504	16.6266

A.2. Pengujian pada *Plant 2*

Hasil pengujian pada *Plant 2* dengan waktu tunda 0.1 detik dan 2.0 detik diperlihatkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 2* dengan waktu tunda 0.1 detik.



Gambar 13 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 2* dengan waktu tunda 2.0 detik.

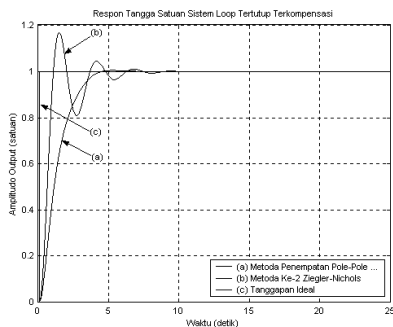
TABEL III

PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID, KARAKTERISTIK RESPON TRANSIEN, DAN INDEKS PERFORMANSI KESALAHAN.

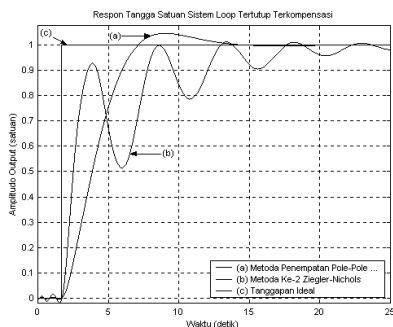
Waktu Tunda	Parameter	Metoda ke-2 Ziegler-Nichols	Metoda Penempatan <i>Pole-Pole</i> Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi
0.1 detik	K_p	108.972	81.5993
	K_i	144.574	66.7945
	K_d	20.5341	21.4879
	tr (detik)	0.323	0.417
	Mp (%)	39.51	6.07283
	ts (detik)	2.316	1.237
	offset	7.21645×10^{-15}	9.32587×10^{-15}
	ITAE	0.426781	0.160164
2.0 detik	K_p	21.897	7.88711
	K_i	6.87943	6.06622
	K_d	17.4244	1.93165
	tr (detik)	1.362	3.883
	Mp (%)	9.5755	4.62407
	ts (detik)	18.008	12.765
	offset	2.621007×10^{-3}	4.65333×10^{-3}
	ITAE	14.3148	12.6266

A.3. Pengujian pada *Plant 3*

Hasil pengujian pada *Plant 3* dengan waktu tunda 0.1 detik dan 1.7 detik diperlihatkan pada Gambar 14 dan Gambar 15.



Gambar 14 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 3* dengan waktu tunda 0.1 detik.



Gambar 15 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 3* dengan waktu tunda 1.7 detik.

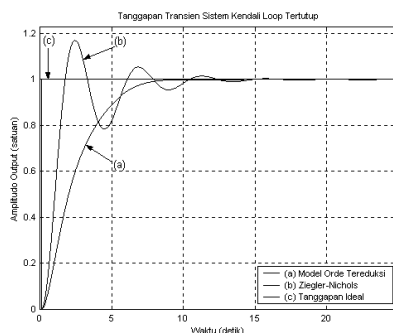
TABEL IV

PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID, KARAKTERISTIK RESPON TRANSIEN, DAN INDEKS PERFORMANSI KESALAHAN.

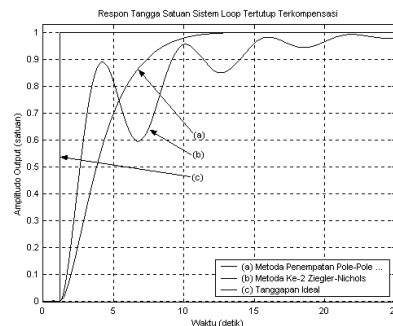
Waktu Tunda	Parameter	Metoda ke-2 Ziegler-Nichols	Metoda Penempatan <i>Pole-Pole</i> Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi
0.1 detik	K_p	14.7873	4.45282
	K_i	12.0639	6.48109
	K_d	4.53137	2.66249
	tr (detik)	0.669	2.338
	Mp (%)	16.9599	0.524505
	ts (detik)	5.906	3.847
	offset	7.24089×10^{-8}	9.81593×10^{-12}
	ITAE	1.40653	1.4684
1.7 detik	K_p	5.44767	1.76911
	K_i	1.92653	2.35518
	K_d	3.85112	0.842955
	tr (detik)	tidak settling	3.606
	Mp (%)	tidak settling	4.65094
	ts (detik)	tidak settling	11.881
	offset	tidak settling	9.20935×10^{-5}
	ITAE	22.048	10.9026

A.4. Pengujian pada *Plant 4*

Hasil pengujian pada *Plant 4* dengan waktu tunda 0.1 detik dan 1.2 detik diperlihatkan pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 4* dengan waktu tunda 0.1 detik.



Gambar 17 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 4* dengan waktu tunda 1.2 detik.

TABEL V

PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID, KARAKTERISTIK RESPON TRANSIEN, DAN INDEKS PERFORMANSI KESALAHAN.

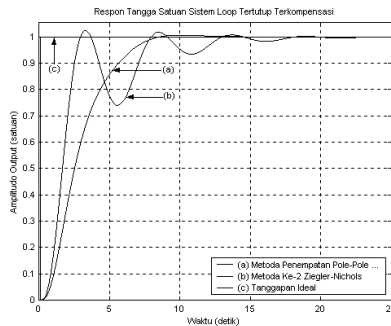
Waktu Tunda	Parameter	Metoda ke-2 Ziegler-Nichols	Metoda Penempatan <i>Pole-Pole</i> Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi
0.1 detik	K_p	3.26549	0.795319
	K_i	1.62984	0.801144
	K_d	1.63566	0.924926
	tr (detik)	1.112	4.47
	Mp (%)	16.9975	0.00168187
	ts (detik)	9.921	7.152
	offset	1.93486×10^{-4}	1.43046×10^{-7}
	ITAE	4.38043	4.71722

TABEL V Lanjutan

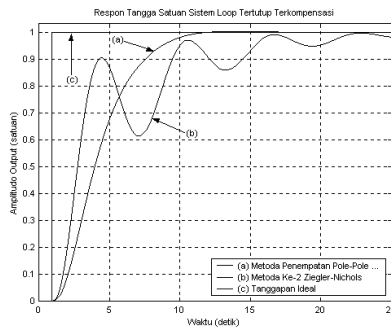
Waktu Tunda	Parameter	Metoda ke-2 Ziegler-Nichols	Metoda Penempatan <i>Pole-Pole</i> Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi
1.2 detik	K_p	1.30329	0.505721
	K_i	0.40448	0.466125
	K_d	1.04985	0.507915
	tr (detik)	tidak settling	5.342
	Mp (%)	tidak settling	0.0428662
	ts (detik)	tidak settling	10.024
	offset	tidak settling	1.00761×10^{-3}
	ITAE	24.8981	11.558

A.5. Pengujian pada *Plant 5*

Hasil pengujian pada *Plant 5* dengan waktu tunda 0.1 detik dan 0.9 detik diperlihatkan pada Gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 18 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 5* dengan waktu tunda 0.1 detik.



Gambar 19 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 5* dengan waktu tunda 0.9 detik.

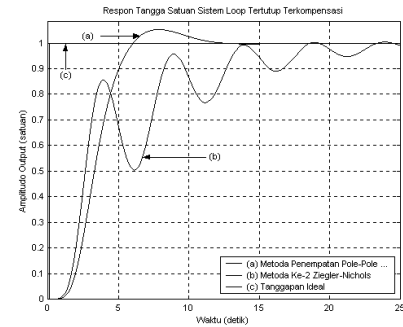
TABEL VI

PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID, KARAKTERISTIK RESPON TRANSIEN, DAN INDEKS PERFORMANSI KESALAHAN.

Waktu Tunda	Parameter	Metoda ke-2 Ziegler-Nichols	Metoda Penempatan <i>Pole-Pole</i> Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi
0.1 detik	K_p	4.23319	1.50188
	K_i	1.62774	1.36714
	K_d	2.75227	1.71562
	tr (detik)	1.688	4.569
	Mp (%)	2.42014	0.696481
	ts (detik)	12.393	7.49
	offset	2.67807×10^{-1}	3.23693×10^{-6}
	ITAE	7.90808	6.1768
0.9 detik	K_p	2.74945	1.07093
	K_i	0.815665	0.910357
	K_d	2.31697	1.07526
	tr (detik)	tidak settling	5.444
	Mp (%)	tidak settling	0.344407
	ts (detik)	tidak settling	20.781
	offset	tidak settling	1.29979×10^{-6}
	ITAE	24.1145	12.2645

A.6. Pengujian pada *Plant 6*

Hasil pengujian pada *Plant 6* dengan waktu tunda 0.1 detik diperlihatkan pada Gambar 20.



Gambar 20 Kurva respon sistem terkompensasi PID pada *Plant 6* dengan waktu tunda 0.1 detik.

TABEL VII

PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID, KARAKTERISTIK RESPON TRANSIEN, DAN INDEKS PERFORMANSI KESALAHAN.

Waktu Tunda	Parameter	Metoda ke-2 Ziegler-Nichols	Metoda Penempatan <i>Pole-Pole</i> Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi
0.1 detik	K_p	43.8025	19.3481
	K_i	15.4068	25.174
	K_d	31.1334	15.7611
	tr (detik)	tidak settling	3.071
	Mp (%)	tidak settling	5.30362
	ts (detik)	tidak settling	10.376
	offset	tidak settling	8.61239×10^{-6}
	ITAE	27.1754	8.12344

B. Analisa Hasil Pengujian

B.1. Analisa Respon Transien pada *Plant 1*

Pada Gambar 10 dan Gambar 11 terlihat bahwa Metoda ke-2 Ziegler-Nichols menghasilkan respon sistem yang cepat dengan lewatan maksimum yang besar, dan respon yang berosilasi. Penambahan waktu tunda menjadi 1.9 detik menyebabkan respon sistem semakin berosilasi (dengan puncak pertama menjadi lebih kecil) sehingga tidak dapat *settling* dalam 25 detik. Pada pengujian yang sama, Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi menghasilkan respon sistem yang lambat dengan lewatan maksimum yang kecil, dan respon yang tidak berosilasi. Tabel I menunjukkan bahwa metoda ini memiliki waktu naik yang lebih lambat, lewatan maksimum yang lebih kecil, waktu penetapan yang paling singkat, dan *offset* yang lebih kecil.

B.2. Analisa Respon Transien pada *Plant 2*

Pada Gambar 12 dan Gambar 13 terlihat bahwa Metoda ke-2 Ziegler-Nichols menghasilkan respon sistem yang cepat dengan lewatan maksimum yang besar, dan respon yang berosilasi. Penambahan waktu tunda menjadi 2.0 detik menyebabkan respon sistem semakin berosilasi. Pada pengujian yang sama, Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi menghasilkan respon sistem yang lambat dengan lewatan maksimum yang kecil, dan respon yang tidak berosilasi (untuk waktu tunda 2.0 detik). Tabel III menunjukkan bahwa metoda ini memiliki waktu naik yang lebih lambat, lewatan maksimum yang lebih kecil, waktu penetapan yang paling singkat, dan *offset* yang lebih kecil (untuk waktu tunda 2.0 detik).

B.3. Analisa Respon Transien pada *Plant 3*

Pada Gambar 14 dan Gambar 15 terlihat bahwa Metoda ke-2 Ziegler-Nichols menghasilkan respon sistem

yang cepat dengan lewatan maksimum yang besar, dan respon yang berosilasi. Penambahan waktu tunda menjadi 1.7 detik menyebabkan respon sistem semakin berosilasi (dengan puncak pertama menjadi lebih kecil) sehingga tidak dapat *settling* dalam 25 detik. Pada pengujian yang sama, Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi menghasilkan respon sistem yang lambat dengan lewatan maksimum yang kecil, dan respon yang tidak berosilasi. Tabel IV menunjukkan bahwa metoda ini memiliki waktu naik yang lebih lambat, lewatan maksimum yang lebih kecil, waktu penetapan yang paling singkat, dan *offset* yang lebih kecil.

B.4. Analisa Respon Transien pada *Plant* 4

Pada Gambar 16 dan Gambar 17 terlihat bahwa Metoda ke-2 Ziegler-Nichols menghasilkan respon sistem yang cepat dengan lewatan maksimum yang besar, dan respon yang berosilasi. Penambahan waktu tunda menjadi 1.2 detik menyebabkan respon sistem semakin berosilasi (dengan puncak pertama menjadi lebih kecil) sehingga tidak dapat *settling* dalam 25 detik. Pada pengujian yang sama, Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi menghasilkan respon sistem yang lambat dengan lewatan maksimum yang kecil, dan respon yang tidak berosilasi. Tabel V menunjukkan bahwa metoda ini memiliki waktu naik yang lebih lambat, lewatan maksimum yang lebih kecil, waktu penetapan yang paling singkat, dan *offset* yang lebih kecil.

B.5. Analisa Respon Transien pada *Plant* 5

Pada Gambar 18 dan Gambar 19 terlihat bahwa Metoda ke-2 Ziegler-Nichols menghasilkan respon sistem yang cepat dengan lewatan maksimum yang besar, dan respon yang berosilasi. Penambahan waktu tunda menjadi 0.9 detik menyebabkan respon sistem semakin berosilasi (dengan puncak pertama menjadi lebih kecil) sehingga tidak dapat *settling* dalam 25 detik. Pada pengujian yang sama, Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi menghasilkan respon sistem yang lambat dengan lewatan maksimum yang kecil, dan respon yang tidak berosilasi. Tabel VI menunjukkan bahwa metoda ini memiliki waktu naik yang lebih lambat, lewatan maksimum yang lebih kecil, waktu penetapan yang paling singkat, dan *offset* yang lebih kecil.

B.6. Analisa Respon Transien pada *Plant* 6

Pada Gambar 20 terlihat bahwa Metoda ke-2 Ziegler-Nichols menghasilkan respon sistem yang cepat dengan osilasi yang besar sehingga tidak dapat *settling* dalam 25 detik. Pada pengujian yang sama, Metoda Penempatan *Pole-pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi menghasilkan respon sistem yang lambat dengan lewatan maksimum yang kecil, dan respon yang tidak berosilasi. Tabel VII menunjukkan bahwa metoda ini memiliki lewatan maksimum yang kecil, waktu penetapan yang singkat, dan *offset* yang kecil.

Adanya waktu tunda dalam sistem loop tertutup dapat mempengaruhi bentuk respon keluaran dan menurunkan

kestabilan sistem [10]. Fungsi alih sistem loop tertutup dengan elemen waktu tunda adalah

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{KG(s)e^{-Ts}}{1 + KG(s)e^{-Ts}}$$

Pada persamaan fungsi alih loop tertutup di atas, waktu tunda menyebabkan akar-akar persamaan karakteristik memiliki *Pole-Pole* yang tidak terbatas. Semakin besar waktu tunda, maka pengaruh terhadap bentuk respon sistem dan kestabilan sistem akan semakin besar. Hal ini dikarenakan elemen waktu tunda mengakibatkan hubungan antara respon keluaran dan sinyal masukan menjadi tidak linier.

Pada Tabel II hingga Tabel VII terlihat bahwa penambahan elemen waktu tunda mengurangi penguatan proporsional (K_p) untuk kedua metoda penalaan. Pada penalaan dengan Metoda ke-2 Ziegler-Nichols, pengurangan konstanta proporsional berarti mengurangi penguatan kritis (K_{cr}) sehingga jumlah penguatan yang dapat diberikan ke sistem loop tertutup agar sistem tetap stabil semakin mengecil. Penguatan kritis (K_{cr}) adalah penguatan maksimum yang menyebabkan respon sistem loop tertutup berosilasi secara terus-menerus dengan amplitudo tetap.

B.7. Analisa Indeks Performansi Kesalahan

Perhitungan indeks performansi menunjukkan bahwa Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi memiliki derajat kesalahan yang lebih besar pada pengujian *Plant* 3 dan *Plant* 4 dengan waktu tunda 0.1 detik. Hal ini dikarenakan respon sistem yang dihasilkan lebih lambat dan tidak berosilasi sehingga bobot dari perkalian $t|e(t)|$ menjadi besar seiring dengan pertambahan waktu. Selain itu, perancangan Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi tidak memperhatikan indeks performansi kesalahan, khususnya kriteria ITAE.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa terhadap enam buah sampel *plant* orde tinggi plus transportasi lag dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Secara umum, berdasarkan respon transien, penalaan dengan Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi menghasilkan respon sistem dengan lewatan maksimum yang kecil, waktu penetapan yang singkat, dan *offset* yang kecil serta respon yang tidak berosilasi.
2. Hasil pengujian pada *Plant* 1 dengan waktu tunda 1.9 detik, *Plant* 3 dengan waktu tunda 1.7 detik, *Plant* 4 dengan waktu tunda 1.2 detik, *Plant* 5 dengan waktu tunda 0.9 detik, dan *Plant* 6 dengan waktu tunda 0.1 detik menunjukkan bahwa Metoda ke-2 Ziegler-Nichols tidak dapat *settling* dalam waktu 25 detik. Sedangkan pengujian pada *Plant* 2 dengan waktu tunda 2.0 detik menunjukkan bahwa Metoda ke-2 Ziegler-Nichols menghasilkan sinyal yang semakin berosilasi.

3. Adanya waktu tunda dalam sistem loop tertutup dapat mempengaruhi bentuk respon keluaran dan menurunkan kestabilan sistem.
4. Berdasarkan kriteria ITAE, pada pengujian *Plant 3* dan *Plant 4* dengan waktu tunda 0.1 detik, Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi menghasilkan indeks performansi dengan derajat kesalahan yang lebih besar dibandingkan dengan Metoda ke-2 Ziegler-Nichols.

Mengetahui/Mengesahkan

Pembimbing I

Pembimbing II

Wahyudi, ST. MT
NIP 132 086 662

Aris Triwiyatno, ST
NIP 132 230 559

B. Saran

Saran-saran yang dapat diambil dari hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan adalah

1. Pada perancangan Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi sebaiknya memperhatikan kriteria indeks performansi kesalahan sehingga derajat kesalahan yang dihasilkan juga lebih kecil.
2. Selain menggunakan Metoda ke-2 Ziegler-Nichols, untuk membandingkan hasil yang telah diperoleh pada Metoda Penempatan *Pole-Pole* Loop Tertutup melalui Pemodelan Orde Tereduksi dapat digunakan metoda lain yang lebih maju, misalnya algoritma genetik, jaringan syaraf atau logika fuzzy.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Coughanowr, Donald R, *Process Systems Analysis and Control*, 2nd Edition, McGraw – Hill, New York, 1991.
- [2] Distefano, Joseph J, Allen R. Stubberud, Ivan J. Williams, *Sistem Pengendalian dan Umpan Balik*, Diterjemahkan oleh Hermawan Widodo Soemitro, Edisi ke-3, Erlangga, Jakarta, 1996.
- [3] Golten, Jack, Andy Verwer, *Control System Design and Simulation*, McGraw-Hill, Singapura, 1992.
- [4] Hassul, Michael, Bahram Shahian, *Control System Design Using Matlab*, Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [5] Littlefield, Bruce, Duane Hanselman, *Mastering Matlab 5 : A Comprehensive Tutorial and Reference*, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
- [6] Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, New Delhi, 1984.
- [7] Ogata, Katsuhiko, *System Dinamics*, 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [8] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*, Diterjemahkan oleh Edi Leksono, Jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1995.
- [9] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*, Diterjemahkan oleh Edi Leksono, Jilid 2, Erlangga, Jakarta, 1993.
- [10] Palm, William J. III, *Modeling, Analysis, and Control of Dynamic Systems*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- [11] Phillips, Charles L, Royce D. Harbor, *Sistem Kontrol : Dasar-dasar*, Diterjemahkan oleh Prof. R. J. Widodo, PT Prenhallindo, Jakarta, 1998.
- [12] Rohrs, Charles E, James L. Melsa, Donald G. Schultz, *Linear Control Systems*, McGraw-Hill, 1993.
- [13] Wang, Qing-Guo, Tong-Heng Lee, Ho-Wang Fung, Qiang Bi, Yu Zhang, *PID Tuning for Improved Performance*, IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 7, No. 4, July 1999.



Teguh Mulianto lahir di Dumai, 26 Juni 1978. Lulus dari SMU Negeri 1 Pemalang pada tahun 1997 dan melanjutkan kuliah di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro dengan konsentrasi kontrol.
E-mail: tguh_elechtro97@yahoo.com