

PENALAN PARAMETER PENGENDALI PID DENGAN METODA *MULTIPLE INTEGRATION*

Bayu Setio Handhoko¹ Ir. Agung Warsito DHET² Sumardi, ST, MT²
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

Abstrak - Semenjak Zieger dan Nichols mengembangkan metoda penalaan parameter PID yang pertama, berbagai macam metoda penalaan parameter pengendali PID telah dikembangkan untuk tujuan yang sama yaitu memperoleh setting yang optimal untuk pengendali PID. Banyak dari metoda-metoda penalaan parameter PID tersebut memberikan hasil yang cukup baik. Walaupun demikian, tiap-tiap metoda penalaan memiliki kelebihan dan kekurangan. Secara umum, hasil penalaan akan semakin baik apabila informasi yang diperoleh dari sebuah proses semakin lengkap. Akan tetapi, untuk memperoleh informasi yang lengkap dari sebuah proses, dibutuhkan identifikasi proses dan perhitungan yang rumit.

Metoda *Multiple Integration* merupakan metoda penalaan sederhana dengan menggunakan luasan-luasan dari tanggapan loop terbuka sebuah plant terhadap masukan sinyal tangga satuan untuk menentukan parameter pengendali PID pada plant itu sendiri. Metoda ini digunakan dengan tujuan untuk mengurangi kerumitan perhitungan parameter pengendali PID dengan hasil penalaan yang baik.

Pada tugas akhir ini metoda *Multiple Integration* digunakan untuk menentukan parameter pengendali PID dari lima buah plant sampel yang memiliki fungsi alih dengan orde yang berbeda-beda. Berdasarkan hasil-hasil pengujian dan simulasi, dapat disimpulkan bahwa Metoda *Multiple Integration* mampu memberikan penalaan dengan hasil yang lebih baik. Sebagai contoh, untuk Plant orde-8 yang diujikan (Plant nomor 1), dengan waktu tunda sebesar 1.8 detik, pengendali PID yang parameternya ditentukan dengan menggunakan Metoda *Multiple Integration* mampu mengurangi waktu penetapan sistem loop tertutup yang tidak terkompensasi dari 59.3 detik menjadi hanya sebesar 22,9 detik, dan mampu mengurangi kesalahan offset dari sebesar 0.51984 menjadi hanya sebesar $1,7932 \times 10^{-5}$. Hasil tersebut masih lebih baik jika dibandingkan dengan pengendali PID yang parameternya ditentukan dengan menggunakan Metoda Osilasi (Ziegler-Nichols) yang memberikan waktu penetapan sebesar 55.6 detik dengan kesalahan offset sebesar $3,963 \times 10^{-3}$. Pengujian juga dilaksanakan terhadap sebuah Plant orde-4 dan tiga buah Plant orde-3, waktu penetapan yang lebih cepat dengan kesalahan offset yang lebih kecil juga diperoleh pada pengujian plant-plant tersebut.

I. PENDAHULUAN

Pengendali PID merupakan jenis pengendali yang telah digunakan sejak lama. Pengendali PID mempunyai kinerja yang sangat baik pada beberapa tipe plant. Tetapi, masalah yang muncul kemudian adalah bagaimana cara menala parameter pengendali PID untuk menghasilkan kinerja yang lebih baik. Hal inilah yang mendorong Ziegler dan Nichols dari perusahaan Taylor untuk menemukan salah satu metoda penalaan pengendali PID yang terkenal yaitu metoda “Ziegler-Nichols”.

Setelah metoda Ziegler-Nichols, berbagai macam metoda penalaan PID dikembangkan. Beberapa metoda yang cukup dikenal adalah metoda respon frekuensi, metoda Åstrom relay, metoda Fuzzy, dan metoda algoritma genetik (*Genetic Algorithm*). Tiap-tiap metoda penalaan PID mempunyai kelebihan dan juga kekurangan. Pada umumnya, semakin banyak informasi bisa diperoleh dari suatu sistem maka semakin baik pula hasil penalaan. Tetapi, hal ini akan menyebabkan proses identifikasi sistem serta proses perhitungannya menjadi semakin rumit^[12].

Metoda *Multiple Integration* merupakan metoda penalaan PID dengan algoritma perhitungan yang sederhana dan mampu memberikan hasil penalaan yang baik. Metoda ini dikembangkan berdasarkan suatu kondisi awal dimana penalaan parameter PID untuk sebuah plant diperoleh dari tanggapan loop terbuka plant itu sendiri terhadap masukan sinyal tangga satuan. Dan salah satu kelebihan dari metoda ini adalah, parameter-parameter PID (K_p , K_i , K_d) yang akan digunakan untuk

mengontrol plant dapat dihitung tanpa memperhatikan orde keseluruhan dari fungsi alih plant.

II. DASAR TEORI

2.1 Konsep Dasar Sistem Pengaturan

Sistem pengaturan (*Control System*) pada dasarnya bertujuan agar sistem yang dikendalikan dapat bekerja sesuai dengan kehendak penggunaannya. Secara umum, berdasarkan ada dan tidaknya pengukuran sinyal keluaran yang dijadikan acuan untuk melakukan aksi kendali terhadap proses, maka sistem pengaturan dapat dibedakan menjadi dua yaitu sistem pengaturan loop terbuka dan sistem pengaturan loop tertutup.

2.1.1 Tanggapan Peralihan

Karakteristik performansi dari suatu sistem pengaturan dinyatakan dalam bentuk respon transien terhadap masukan tangga satuan. Dalam menentukan karakteristik tanggapan peralihan sistem pengaturan terhadap masukan tangga satuan, biasanya dicari parameter berikut :

1. Waktu tunda (*delay time*), t_d
Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.
2. Waktu naik (*rise time*), t_r
Waktu naik adalah waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk naik dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95% atau 0% sampai 100% dari harga akhirnya.
3. Waktu puncak (*peak time*), t_p
Waktu puncak adalah waktu yang diperlukan tanggapan sistem untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.

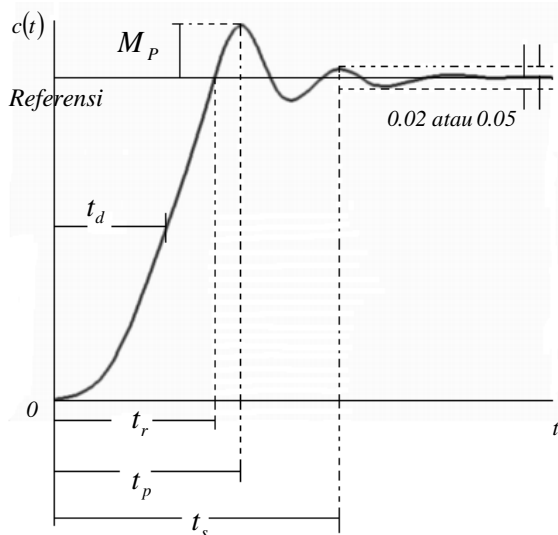
¹ Mahasiswa Teknik Elektro Undip

² Staf Pengajar Teknik Elektro Undip

4. Lewatan maksimum (*maximum overshoot*), M_p
Lewatan maksimum adalah harga puncak maksimum dari kurva tanggapan sistem yang diukur dari satu. Jika harga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka biasanya digunakan persen lewatan maksimum. Parameter ini didefinisikan sebagai :

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (1)$$

5. Waktu penetapan (*settling time*), t_s
Waktu penetapan adalah waktu yang diperlukan kurva tanggapan sistem untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir (biasanya 5% atau 2%).



Gambar 1. Kurva tanggapan sistem yang menunjukkan t_d , t_r , t_p , M_p , dan t_s .

2.1.2 Tanggapan Keadaan Tunak

Tanggapan keadaan tunak dimaksudkan sebagai perilaku tanggapan sistem jika t mendekati tak terhingga atau saat mencapai keadaan tunak^[8]. Jika pada kondisi tunak keluaran sistem tidak tepat sama dengan titik referensi maka dikatakan sistem mempunyai kesalahan keadaan tunak (*offset*).

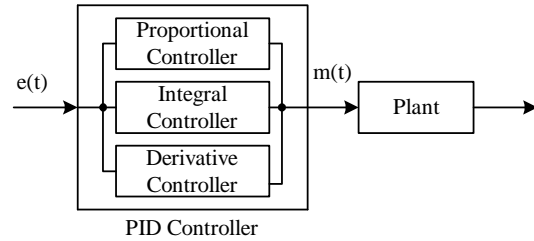
$$\text{Offset} = |y(\text{tunak}) - y(\text{ref})| \quad (2)$$

$y(\text{tunak})$ = tinggi kurva saat mencapai keadaan tunak

$y(\text{ref})$ = tinggi titik referensi

2.2 Pengendali *Proportional, Integral, Differential* (PID)

Pengendali PID merupakan gabungan dari tiga macam pengendali, yaitu pengendali proporsional (*Proportional Controller*), pengendali integral (*Integral Controller*), dan pengendali turunan (*Derivative Controller*). Tujuan dari penggabungan ketiga macam pengendali tersebut adalah untuk memperbaiki kinerja sistem dengan masing-masing kelebihan yang dimiliki oleh tiap pengendali. Blok diagram pengendali PID secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok pengendali PID secara umum.

Rumus umum dari pengendali PID adalah :

$$\begin{aligned} m(t) &= k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \\ &= K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

Sedangkan fungsi alih untuk pengendali pada kawasan Laplace adalah:

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

2.2.1 Pengendali Proporsional

Pada pengendali proporsional, besarnya keluaran selalu sebanding dengan besarnya masukan sesuai dengan konstanta pembandingan 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

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

2.2.2 Pengendali Integral

Pengendali integral adalah tipe pengendali yang digunakan untuk menghilangkan *offset* pada keadaan tunak. Persamaan umum sinyal keluaran pengendali proporsional adalah

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

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

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (8)$$

2.2.3 Pengendali Turunan

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

sistem. Persamaan keluaran untuk pengendali turunan adalah

$$m(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Fungsi alih pengendali turunan adalah

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_d s \quad (10)$$

2.3 Metoda *Multiple Integration*

Metoda *Multiple Integration* adalah suatu metoda penalaan parameter PID berdasarkan hubungan antara luasan daerah yang diperoleh dari tanggapan tangga satuan sebuah proses dengan kriteria *modulus optimum*^[12].

2.3.1 Luasan Daerah Berdasarkan Tanggapan Tangga Satuan

Terdapat lima daerah dari kurva reaksi suatu *plant* terhadap masukan tangga satuan yang dapat digunakan untuk menentukan parameter pengendali PID^[12]. Luasan luasan daerah tersebut ditentukan dengan persamaan

$$A_1 = \int_0^{\infty} (K_{PR} - G_P(\tau)) d\tau \quad (11)$$

$$A_2 = \int_0^{\infty} (A_1 - y_1(\tau)) d\tau \quad (12)$$

$$A_3 = \int_0^{\infty} (A_2 - y_2(\tau)) d\tau \quad (13)$$

$$A_4 = \int_0^{\infty} (A_3 - y_3(\tau)) d\tau \quad (14)$$

$$A_5 = \int_0^{\infty} (A_4 - y_4(\tau)) d\tau \quad (15)$$

y_1 sampai y_5 merupakan fungsi-fungsi yang dapat didefinisikan sebagai berikut

$$y_1(t) = \int_0^t K_{PR} - G_P(\tau) d\tau \quad (16)$$

$$y_2(t) = \int_0^t A_1 - y_1(\tau) d\tau \quad (17)$$

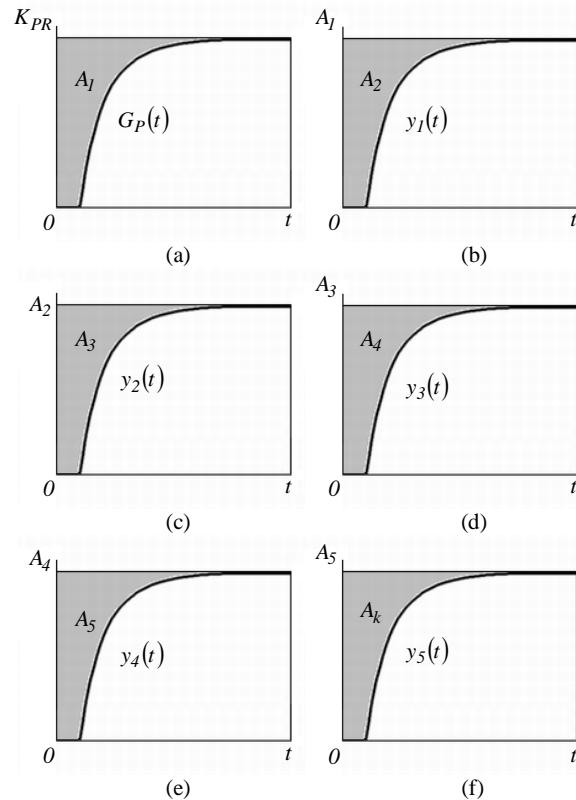
$$y_3(t) = \int_0^t A_2 - y_2(\tau) d\tau \quad (18)$$

$$y_4(t) = \int_0^t A_3 - y_3(\tau) d\tau \quad (19)$$

$$y_5(t) = \int_0^t A_4 - y_4(\tau) d\tau \quad (20)$$

$G_P(t)$ adalah fungsi dari *Plant* yang akan ditalakan, dan K_{PR} merupakan level maksimum dari keluaran *Plant* pada saat keadaan tunak. Luasan daerah A_1 sampai A_5 ditentukan dari nol sampai keadaan tunak. Gambar

kelima luasan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3(a) sampai Gambar 3(e).



Gambar 3 Luasan-luasan daerah yang ditentukan dari kurva tanggapan tangga satuan (a) A_1 , (b) A_2 , (c) A_3 , (d) A_4 , (e) A_5 , (f) luasan A_k

Apabila fungsi alih sebuah *Plant* dinyatakan sebagai

$$G_P(s) = K_{PR} \left(\frac{1 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + b_4s^4 + b_5s^5 + \dots}{1 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 + a_4s^4 + a_5s^5 + \dots} \right) e^{-sT_{del}} \quad (21)$$

maka secara matematis, luasan-luasan daerah pada Gambar 3(a) sampai Gambar 3(e) dapat juga ditentukan dengan menggunakan persamaan^[11]

$$A_k = K_{PR} \left((-1)^{k+1} (a_k - b_k) + \sum_{i=1}^k (-1)^{k+i} \frac{T_{del}^i b_{k-i}}{i!} \right) + \sum_{i=1}^{k-1} (-1)^{k+i-1} A_i a_{k-i} \quad (22)$$

2.3.2 Koefisien-koefisien Fungsi Alih *Plant* yang Terkompensasi PID

Fungsi alih *Plant* yang terkompensasi PID dapat dituliskan sebagai berikut^[12]

$$G_C(s)G_P(s) = K_{PR} \left(\frac{d_0 + d_1s + d_2s^2 + d_3s^3 + d_4s^4 + d_5s^5 + \dots}{c_0s + c_1s^2 + c_2s^3 + c_3s^4 + c_4s^5 + c_5s^6 + \dots} \right) \quad (23)$$

c_0 sampai c_5 merupakan koefisien-koefisien penyebut dari fungsi alih *Plant* terkompensasi PID yang ditentukan sebagai

$$\begin{aligned} c_0 &= T_i \\ c_1 &= a_1 T_i \\ c_2 &= a_2 T_i \\ c_3 &= a_3 T_i \\ c_4 &= a_4 T_i \\ c_5 &= a_5 T_i \dots \end{aligned} \quad (24)$$

sedangkan d_0 sampai d_5 merupakan koefisien-koefisien pembilang dari fungsi alih *Plant* terkompensasi PID yang ditentukan sebagai berikut (untuk sementara $T_{d\text{delay}}$ dapat dianggap nol untuk menyederhanakan perhitungan^[12])

$$\begin{aligned} d_0 &= KK_{PR} \\ d_1 &= KK_{PR}(b_1 + T_i) \\ d_2 &= KK_{PR}(b_2 + T_i b_1 + T_d T_i) \\ d_3 &= KK_{PR}(b_3 + T_i b_2 + T_d T_i b_1) \\ d_4 &= KK_{PR}(b_4 + T_i b_3 + T_d T_i b_2) \\ d_5 &= KK_{PR}(b_5 + T_i b_4 + T_d T_i b_3) \dots \end{aligned} \quad (25)$$

2.3.3 Hubungan Antara Kriteria Modulus Optimum dengan Luasan Daerah dari Kurva Tanggapan yang Digunakan untuk Menentukan Parameter Pengendali PID

Persamaan umum berikut harus terpenuhi untuk memperoleh *modulus optimum*^[12].

$$\sum_{i=0}^{2n+1} (-1)^i d_i c_{2n+1-i} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{2n} (-1)^i c_i c_{2n-i} \quad (26)$$

Untuk menentukan 3 parameter pengendali PID, diambil tiga suku pertama dari persamaan (26)^[12] Dengan cara mensubstitusikan luasan-luasan yang diperoleh dari persamaan (22) ke dalam 3 suku pertama dari persamaan (26) yang sebelumnya telah disubstitusikan dengan persamaan (24) dan persamaan (25), maka akan diperoleh matrik penyelesaian sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} K_i \\ K_p \\ K_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_1 & A_0 & 0 \\ -A_3 & A_2 & -A_1 \\ -A_5 & A_4 & -A_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Matrik (27) dapat diselesaikan dengan menggunakan metoda determinan sehingga diperoleh^[11]

$$K_p = \frac{A_3^2 - A_1 A_5}{2(A_1 A_2 A_3 - A_1^2 A_4 + A_0 A_3^2 - A_0 A_1 A_5)} \quad (28)$$

$$K_i = \frac{A_2 A_3 - A_1 A_4}{2(A_1 A_2 A_3 - A_1^2 A_4 + A_0 A_3^2 - A_0 A_1 A_5)} \quad (29)$$

$$K_d = \frac{A_3 A_4 - A_2 A_5}{2(A_1 A_2 A_3 - A_1^2 A_4 + A_0 A_3^2 - A_0 A_1 A_5)} \quad (30)$$

2.3.4 Pengendali PID dengan Filter Derivatif

Pengendali PID yang mempunyai filter derivatif memiliki fungsi alih sebagai berikut

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1 + s T_f} \quad (31)$$

T_f merupakan konstanta waktu filter yang ditentukan sebesar $0.1 T_d$ ^[12] (T_d = konstanta waktu derivatif). Dengan langkah penurunan yang sama seperti pada pengendali PID ideal, diperoleh matrik penyelesaian

$$\begin{bmatrix} -A_1 & A_0 & 0 \\ -A_3 & A_2 & (-A_1 - T_f A_0) \\ -A_5 & A_4 & (-A_3 - T_f A_2 - T_f^2 A_1 - T_f^3 A_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_i \\ K_p \\ K_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Dengan menyelesaikan Matrik (32), diperoleh parameter pengendali PID dengan filter derivatif^[12]

$$K_p = \frac{T_i}{2(A_1 - T_i)} \quad (33)$$

$$K_i = K_p / \left(\frac{A_3}{(A_2 - A_1 T_d - T_d^2 \delta)} \right); \delta = 0.1^{[12]} \quad (34)$$

$$K_d = \frac{K_p \left(- (A_3^2 - A_5 A_1) + \sqrt{(A_3^2 - A_5 A_1)^2 - 4\delta(A_3 A_2 - A_5)(A_5 A_2 - A_4 A_3)} \right)}{2\delta(A_3 A_2 - A_5)} \quad (35)$$

2.3.5 Penalaan Ulang Parameter Pengendali PID

Parameter pengendali PID yang diperoleh dengan metoda *multiple integration* dapat memiliki penguatan yang sangat besar ($K_p = \infty$) atau negatif. Untuk keadaan tersebut, parameter pengendali PID di-talakan ulang (*retuning*), yaitu dengan cara membatasi penguatan K_p ke harga tertentu (K_{max}), dan menentukan parameter yang lain dengan hanya menggunakan tiga daerah luasan A_1 sampai A_3 ^[13]. Penalaan ulang juga terjadi apabila konstanta penguatan derivatif (K_d) berharga negatif, tak terhingga, atau imajiner. Penalaan ulang mempunyai persyaratan sebagai berikut:

1. Apabila $K_p = \infty$ atau negatif,

$$\text{dan } K_{max} > \frac{I}{\frac{2A_1 A_2}{A_3} - 2K_{PR}} \quad (36)$$

$$\text{maka } T_i = \frac{A_1}{K_{PR} + \frac{I}{2K_{max}}} \quad (37)$$

$$\text{dan } T_d = \frac{A_3}{A_1^2} \left[\frac{A_1 A_2}{A_3} - \frac{I}{2K_{max}} - K_{PR} \right] \quad (38)$$

2. Apabila $K_p = \infty$ atau negatif,

$$\text{dan } K_{max} \leq \frac{I}{\frac{2A_1 A_2}{A_3} - 2K_{PR}} \quad (39)$$

maka T_i seperti persamaan (37) dan $T_d = 0$.

2.3.6 Metoda-metoda Penentuan Luasan

Terdapat beberapa metoda yang dapat digunakan untuk mendapatkan luasan yang diperlukan, sehingga parameter pengendali PID berdasarkan metoda *multiple*

integration dapat ditentukan, beberapa metoda tersebut adalah:

1. Penentuan luasan dengan menggunakan metoda perhitungan.

Metoda penentuan luasan berdasarkan perhitungan dilakukan apabila fungsi alih dari *plant* diketahui. Luasan-luasan yang didapatkan dengan metoda ini ditentukan dengan cara memasukkan koefisien-koefisien dari *Plant* pada persamaan (21) ke dalam persamaan (22)^[11]

2. Penentuan luasan dengan menggunakan kurva tanggapan

Metoda ini digunakan apabila fungsi alih dari *plant* tidak diketahui. Luasan-luasan yang diperoleh dengan metoda ini didapatkan berdasarkan data kurva tanggapan untuk persamaan (16) sampai (20) terhadap masukan tangga satuan. Persamaan (16) sampai (20) dapat dituliskan lagi kedalam bentuk persamaan transformasi Laplace sebagai berikut

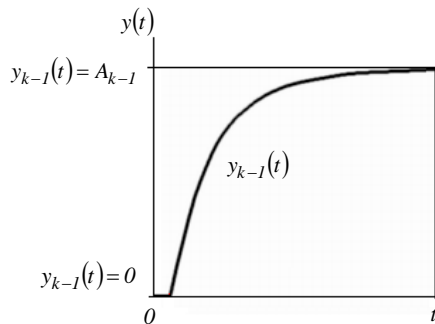
$$y_1(s) = \frac{K_{PR} - G_P(s)}{s} \quad (40)$$

$$y_2(s) = \frac{A_1 s - K_{PR} + G_P(s)}{s^2} \quad (41)$$

$$y_3(s) = \frac{A_2 s^2 - A_1 s + K_{PR} - G_P(s)}{s^3} \quad (42)$$

$$y_4(s) = \frac{A_3 s^3 - A_2 s^2 + A_1 s - K_{PR} + G_P(s)}{s^4} \quad (43)$$

$$y_5(s) = \frac{A_4 s^4 - A_3 s^3 + A_2 s^2 - A_1 s + K_{PR} - G_P(s)}{s^5} \quad (44)$$



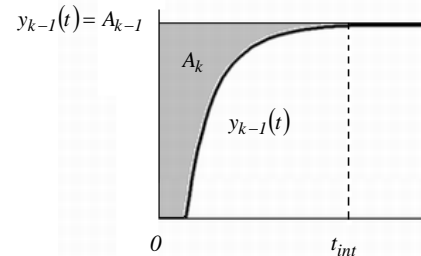
Gambar 4 Kurva tanggapan fungsi $y_{k-1}(s)$

Kurva tanggapan dari $y_1(s)$ sampai $y_5(s)$ ditunjukkan oleh Gambar 4. Dengan memisalkan $A_0 = K_{PR}$ dan $y_0 = G_P(t)$, terlihat bahwa untuk keadaan ideal, pada keadaan tunak amplitudo dari kurva tanggapan fungsi $y_{k-1}(s)$ sama dengan harga A_{k-1} ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Berdasarkan kurva tanggapan pada Gambar 4, terdapat dua buah metoda yang dapat digunakan untuk menentukan luasan-luasan daerah sebuah *plant* yang akan ditalakan. Metoda pertama adalah dengan menggunakan integrasi numerik untuk menentukan

luasan daerah diantara garis $y_{k-1}(t) = A_{k-1}$ dan kurva $y_{k-1}(t)$. Luasan A_k ditentukan berdasarkan persamaan

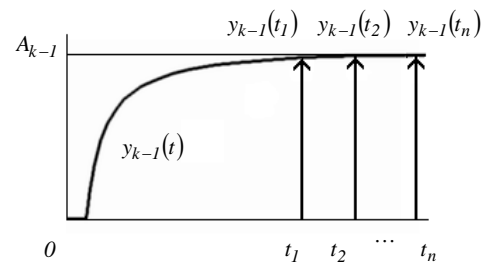
$$A_k = \int_0^{t_{int}} A_{k-1} - y_{k-1}(t) dt; \quad k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (45)$$



Gambar 5 Luasan yang ditentukan berdasarkan integrasi numerik

Gambar 5, menunjukkan luasan daerah A_k , yaitu luasan daerah yang ditentukan dengan menggunakan metoda integrasi numerik. t_{int} merupakan batasan integrasi, yaitu waktu yang digunakan untuk melaksanakan integrasi numerik. Harga t_{int} ditentukan pada saat $A_{k-1} - y_{k-1}(t_{int}) \approx 0$.

Metoda penentuan luasan yang kedua adalah dengan cara merata-rata keluaran tanggapan fungsi $y_{k-1}(t)$ di daerah keadaan tunak.



Gambar 6 Luasan yang ditentukan berdasarkan rata-rata keluaran di daerah keadaan tunak

Luasan yang diperoleh berdasarkan metoda ini ditentukan dengan menggunakan persamaan rata-rata

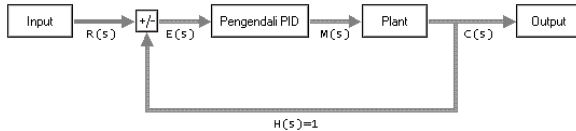
$$\frac{A_k}{A_{k-1}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{k-1}(t_i)}{n}; \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (46)$$

III. PERANCANGAN

3.1 Permodelan Sistem

Gambar 7 menunjukkan diagram blok sistem pengaturan *loop* tertutup menggunakan pengendali PID (komponen waktu tunda sudah termasuk di dalam blok *Plant* yang ditalakan). Fungsi alih *loop* tertutup Gambar 9 adalah

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (47)$$



Gambar 7. Diagram blok sistem pengaturuan loop tertutup menggunakan pengendali PID

Parameter K_p , K_i , dan K_d terdapat di dalam persamaan (47) pada fungsi alih pengendali ($G_c(s)$). Apabila ketiga parameter tersebut diketahui, maka akan didapatkan respon sistem dengan melakukan transformasi Laplace balik dari persamaan

$$C(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \times R(s) \quad (48)$$

$R(s)$ merupakan fungsi tangga satuan.

3.2 Pemilihan Plant

Pada Tugas Akhir ini digunakan 5 *Plant* sampel sebagai berikut:

1. *Plant* 1 : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+1)^3}$
2. *Plant* 2 : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(4s+1)^3}$
3. *Plant* 3 : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+1)^2(10s+1)^2}$
4. *Plant* 4 : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+1)(s^2+2s+2)}$
5. *Plant* 5 : $G_p(s) = \frac{e^{-Ts}}{(s+1)(4s+1)(40s+1)}$

3.3 Perancangan Program Simulasi

Pada pembuatan Tugas Akhir ini digunakan program bantu MATLAB 5.3. Program simulasi dibagi kedalam dua bagian, sesuai dengan proses penalaan Metoda *Multiple Integration*, yaitu:

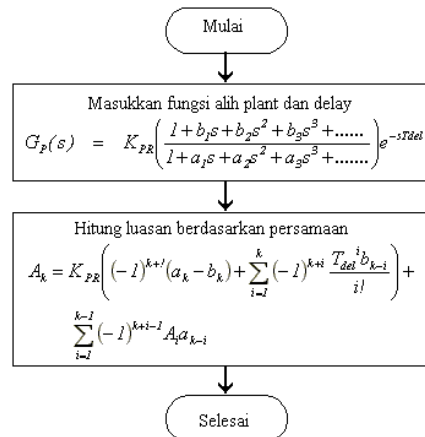
1. Menentukan harga K_{PR} serta luasan A_1 sampai dengan A_5 dari *Plant* yang akan ditalakan.
2. Menentukan parameter pengendali PID dengan menggunakan persamaan (28) sampai (30) untuk pengendali PID ideal, dan persamaan (33) sampai (35) untuk pengendali PID dengan filter derivatif, dan dengan menggunakan persamaan (36) sampai (39) apabila terjadi penalaan ulang.

3.3.1 Penentuan Luasan

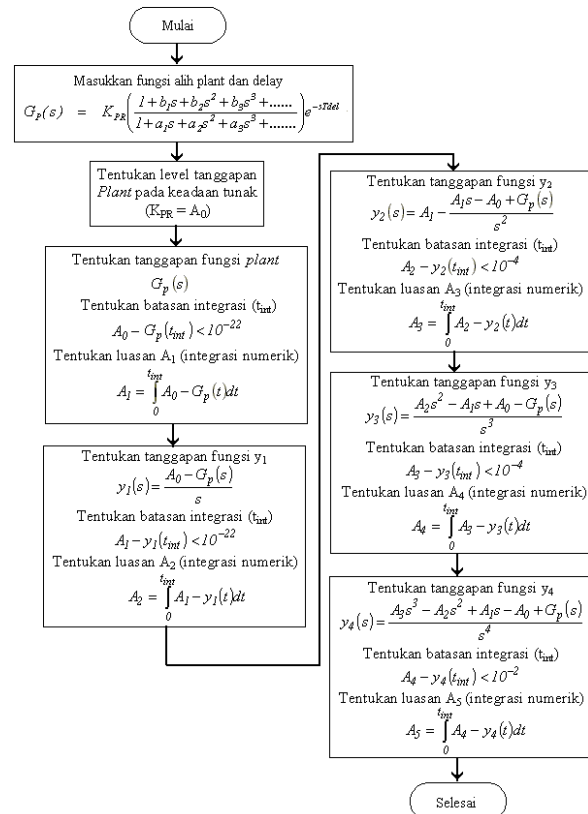
Pada Tugas Akhir ini digunakan tiga metoda penentuan luasan sebagai perbandingan. Yaitu metoda perhitungan, metoda integrasi numerik dan metoda rata-rata keluaran. Gambar 8 menunjukkan diagram alir untuk metoda penentuan luasan dengan menggunakan perhitungan (menggunakan persamaan (22)), Gambar 9 menunjukkan diagram alir untuk metoda penentuan luasan dengan integrasi numerik (persamaan (45)), dan Gambar 10 menunjukkan diagram alir untuk metoda penentuan luasan dengan rata-rata keluaran.

3.3.2 Penentuan Parameter Pengendali PID

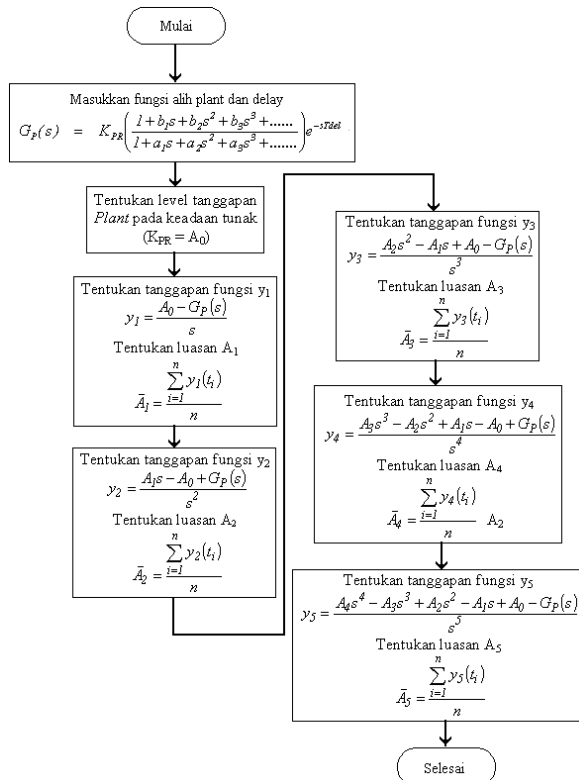
Terdapat dua jenis pengendali PID yang digunakan pada simulasi ini, yang pertama PID ideal tanpa filter derivatif, yang kedua PID dengan filter derivatif. Gambar 11 menunjukkan diagram alir untuk penentuan parameter PID ideal, Gambar 12 menunjukkan diagram alir untuk menentukan parameter PID terfilter, sedangkan Gambar 13 menunjukkan diagram alir untuk penalaan ulang.



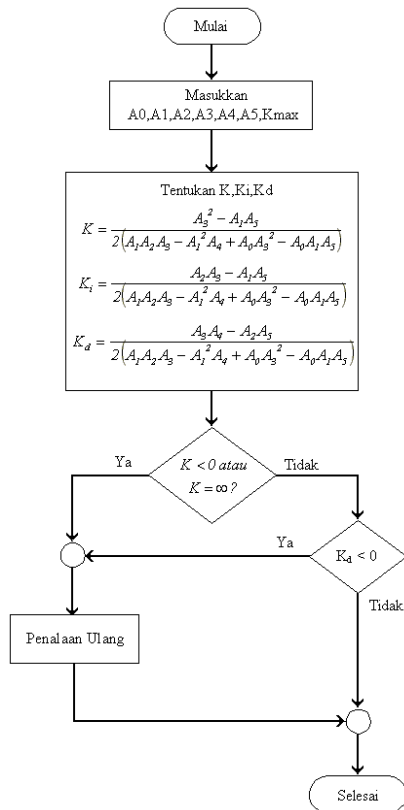
Gambar 8. Diagram alir proses penentuan luasan berdasarkan metoda perhitungan.



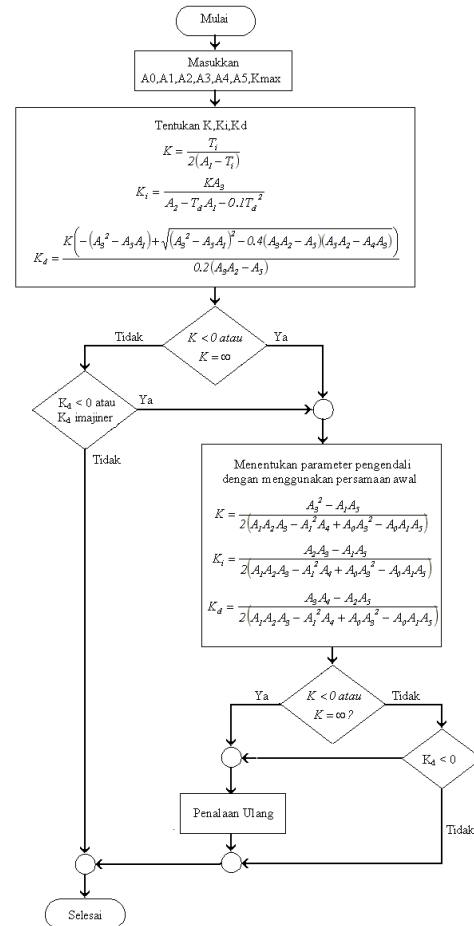
Gambar 9. Diagram alir proses penentuan luasan berdasarkan metoda integrasi numerik



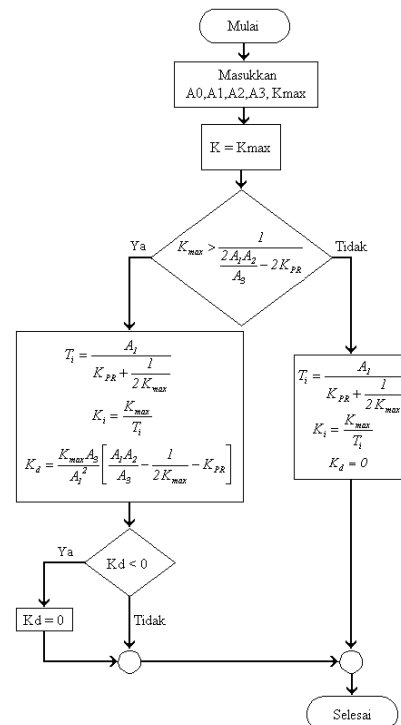
Gambar 10. Diagram alir proses penentuan luasan berdasarkan metoda rata-rata keluaran



Gambar 11. Diagram alir proses penentuan parameter pengendali PID ideal.



Gambar 12. Diagram alir proses penentuan parameter pengendali PID dengan filter derivatif



Gambar 13. Diagram alir proses penalaan ulang

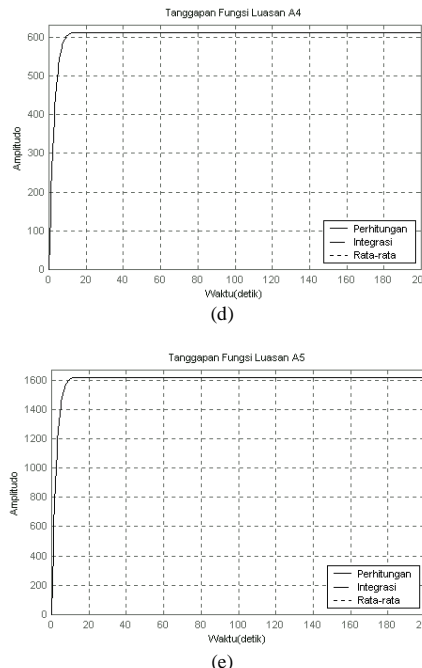
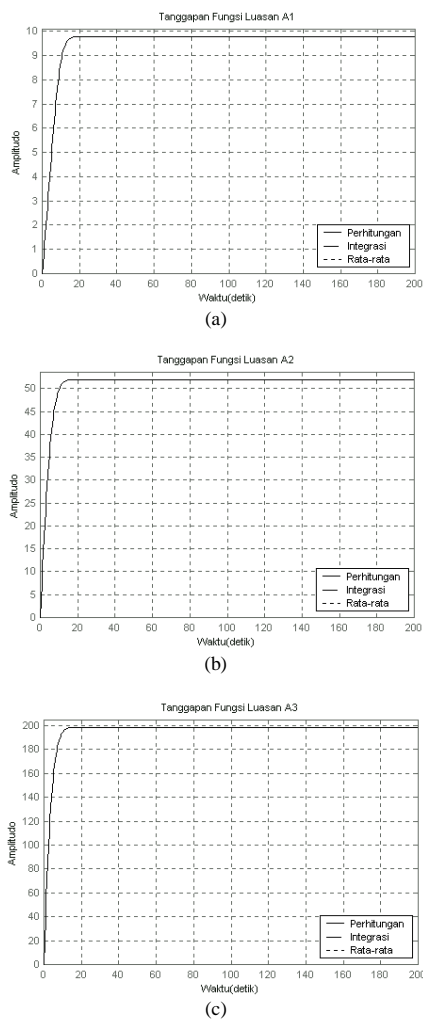
IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Analisa dilakukan terhadap hasil simulasi yang berupa respon sistem waktu dengan membandingkan hasil kinerja pengendali PID untuk *Plant* yang ditalakan menggunakan Metoda *Multiple Integration* dengan ketiga metoda penentuan luasan (perhitungan, integrasi numerik, rata-rata keluaran) dan dengan pengendali PID yang ditalakan menggunakan Metoda Osilasi (Ziegler-Nichols).

Karena banyaknya variasi penalaan, pada makalah Tugas Akhir ini hasil yang ditampilkan dibatasi hanya untuk waktu tunda maksimum ($T_{delay} = 1.8$ detik untuk *Plant* nomor 1, dan $T_{delay} = 2$ detik untuk yang lain), serta sebagai contoh, hasil penggunaan PID dengan filter derivatif hanya diambil dari *Plant* 1 dan *Plant* 2.

4.1 Plant Nomor 1

Hasil simulasi untuk grafik tanggapan fungsi $y_1(t)$ sampai $y_5(t)$ yang digunakan untuk menentukan luasan A_1 sampai A_5 pada *Plant* nomor 1 untuk waktu tunda sebesar 1.8 detik ditunjukkan pada Gambar 14(a) sampai Gambar 14(e).



Gambar 14. Kurva tanggapan yang digunakan untuk menentukan luasan A_1 sampai A_5 pada *Plant* 1.

TABEL I
HASIL PEROLEHAN LUASAN *PLANT* NOMOR 1

Waktu Tunda	Luasan	Metoda Penentuan Luasan		
		Perhitungan	Integrasi Numerik	Rata-rata Keluaran
1.8 detik	K_{PR}	1.00000	1.00000	1.00000
	A_1	9.80000	9.80000	9.80000
	A_2	52.02000	52.02000	52.02000
	A_3	198.73200	198.73205	198.73200
	A_4	612.52240	612.53412	612.53339
	A_5	1619.04866	1619.12973	1619.04786

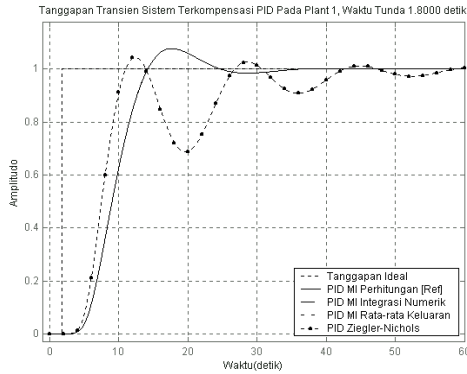
TABEL II
PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID UNTUK *PLANT* NOMOR 1

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata - rata
K_p	0.90724	0.62649	0.62644	0.62649
K_i	0.0953	0.11495	0.11494	0.11495
K_d	2.15922	0.99450	0.99435	0.99450
K_p^*	0.90724	0.60439	0.60435	0.60439
K_i^*	0.09530	0.11269	0.11269	0.11269
K_d^*	2.15922	0.90897	0.90884	0.90897

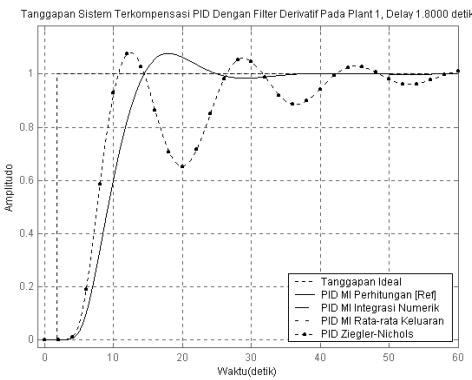
* PID dengan filter derivatif

Walaupun terjadi sedikit perbedaan hasil perolehan luasan dari ketiga metoda penentuan luasan pada Tabel I, tetapi perbedaan yang terjadi relatif cukup kecil sehingga

tidak terlihat pada grafik tanggapan tangga satuan. Berdasarkan hasil-hasil pada Tabel I, dapat ditentukan besarnya parameter pengendali PID untuk *Plant* 1 dan hasilnya dirangkum pada Tabel II serta dibandingkan dengan penalaan PID Metoda Osilasi (*Ziegler-Nichols*). Tanggapan sistem terkompensasi untuk kedua metoda penalaan ditunjukkan oleh Gambar 15.



(a)



(b)

Gambar 15. Kurva tanggapan sistem terkompensasi PID, (a) PID ideal; (b) PID dengan filter derivatif.

TABEL III
PERBANDINGAN KARAKTERISTIK TANGGAPAN WAKTU PLANT NOMOR 1

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
Tr (detik)	4.68	6.73	6.73	6.73
Ts (detik)	55.565	22.895	22.895	22.895
Mp (%)	4.1481	7.7338	7.7297	7.7338
Offset	0.003963	1.7932×10^{-5}	1.7826×10^{-5}	1.7932×10^{-5}
ITAE	113.6841	57.5356	57.5436	57.5356

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
Tr (detik)	4.47	6.81	6.81	6.81
Ts (detik)	57.275	23.255	23.26	23.255
Mp (%)	7.0578	7.7294	7.7311	7.7294
Offset	0.10149	1.8924×10^{-5}	1.924×10^{-5}	1.8924×10^{-5}
ITAE	133.7777	59.6482	59.6542	59.6482

4.2 *Plant* Nomor 2

Hasil simulasi untuk grafik tanggapan fungsi $y_1(t)$ sampai $y_5(t)$ yang digunakan untuk menentukan luasan A_1 sampai A_5 mempunyai bentuk yang serupa seperti pada *Plant* nomor 1, sehingga untuk *Plant* nomor 2 hanya diberikan hasil perolehan luasan sebagai berikut

TABEL IV
HASIL PEROLEHAN LUASAN PLANT NOMOR 2

Waktu Tunda	Luasan	Metoda Penentuan Luasan		
		Perhitungan	Integrasi Numerik	Rata-rata Keluaran
2 detik	K_{PR}	1.00000	1.00000	1.00000
	A_1	14.00000	14.00001	14.00000
	A_2	122.00000	122.00001	122.000000
	A_3	857.33333	857.33640	857.33333
	A_4	5328.66667	5329.02456	5328.66663
	A_5	30600.26667	30627.73090	30600.26455

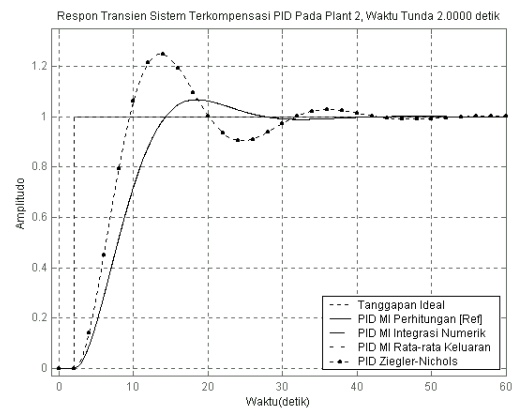
Parameter pengendali untuk *Plant* nomor 2 dengan kedua metoda penalaan diberikan pada Tabel V sebagai berikut

TABEL V
PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID UNTUK PLANT NOMOR 2

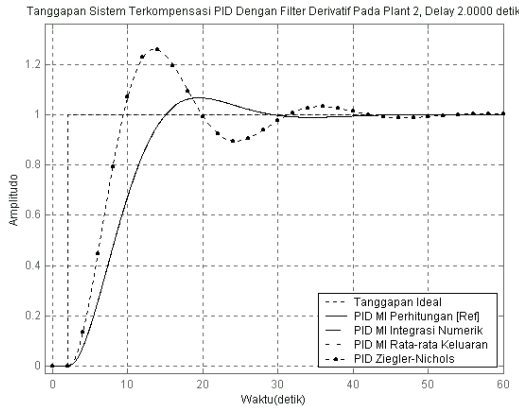
Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata - rata
K_p	2.12998	1.35324	1.34782	1.35324
K_i	0.19526	0.13237	0.13199	0.13237
K_d	5.80861	3.68617	0.366263	3.68617
K_p^*	2.12998	1.26569	1.26123	1.26569
K_i^*	0.19526	0.12612	0.1258	0.12612
K_d^*	5.80861	3.2467	3.22778	3.2467

* PID dengan filter derivatif

Tanggapan sistem terkompensasi untuk kedua metoda penalaan ditunjukkan oleh Gambar 16(a) dan 16(b).



Gambar 16a. Tanggapan sistem terkompensasi PID ideal



Gambar 16b. Tanggapan sistem terkompensasi PID plus filter derivatif

TABEL VI
PERBANDINGAN KARAKTERISTIK TANGGAPAN
WAKTU *PLANT* NOMOR 2

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
Tr (detik)	5.08	8.1	8.13	8.1
Ts (detik)	38.3	24.85	24.945	24.85
Mp (%)	24.5978	6.8104	6.7775	6.8104
Offset	0.0027935	8.7526×10^{-5}	7.478×10^{-5}	8.7526×10^{-5}
ITAE	72.757	50.6556	50.8893	50.6556

PID dengan Filter Derivatif ($T_I = 0.1T_d$)

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
Tr (detik)	4.825	8.3	8.335	8.3
Ts (detik)	46.115	25.63	25.715	25.63
Mp (%)	27.7756	6.9032	6.8678	6.9032
Offset	0.0038298	2.3072×10^{-5}	5.9753×10^{-6}	2.3072×10^{-5}
ITAE	84.572	55.169	55.3797	55.169

4.3 *Plant* Nomor 3

Perolehan luasan pada *Plant* nomor 3 dengan menggunakan ketiga metoda penentuan luasan dapat ditabelkan sebagai berikut

TABEL VII
HASIL PEROLEHAN LUASAN *PLANT* NOMOR 3

Waktu Tunda	Luasan	Metoda Penentuan Luasan		
		Perhitungan	Integrasi Numerik	Rata-rata Keluaran
2 detik	K_{PR}	1.00000	1.00000	1.00000
	A_1	24.00000	23.99999	23.99998
	A_2	389.00000	388.99861	388.99676
	A_3	5395.33333	5395.24064	5395.06563
	A_4	69029.00000	69024.52611	69013.41349
	A_5	841076.26667	840913.25553	840379.24052

Seperti pada *Plant* sebelumnya, perbedaan penentuan luasan yang terjadi pada *Plant* 3 relatif kecil (tak terlihat pada kurva tanggapan fungsi luasan). Parameter

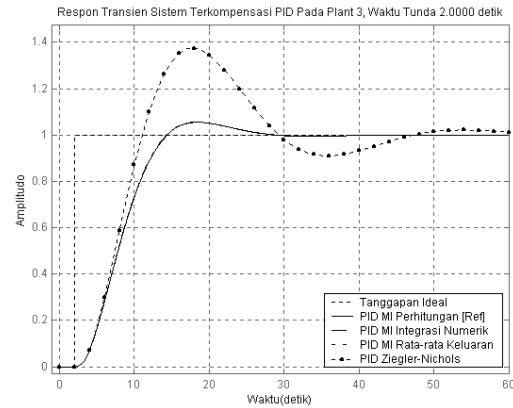
pengendali untuk *Plant* nomor 3 dengan kedua metoda penalaan diberikan pada Tabel VIII sebagai berikut

TABEL VIII
PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID
UNTUK *PLANT* NOMOR 3

PID ideal

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
K_p	3.61547	2.64591	2.64894	2.66229
K_i	0.25088	0.13108	0.13121	0.13176
K_d	13.02560	13.41838	13.43942	13.53152

Tanggapan sistem terkompensasi untuk kedua metoda penalaan ditunjukkan oleh Gambar 17.



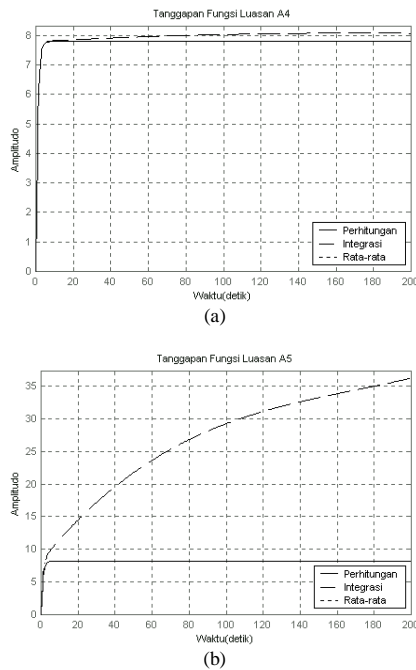
Gambar 17. Tanggapan sistem terkompensasi PID

TABEL IX
PERBANDINGAN KARAKTERISTIK TANGGAPAN
WAKTU *PLANT* NOMOR 3

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
Tr (detik)	5.995	7.84	7.825	7.77
Ts (detik)	46.19	24.665	24.635	24.495
Mp (%)	35.8836	5.4587	5.4815	5.5814
Offset	0.011634	1.5661×10^{-6}	1.2925×10^{-7}	6.8385×10^{-8}
ITAE	154.7567	46.9449	46.8969	46.6984

4.4 *Plant* Nomor 4

Bentuk grafik tanggapan fungsi $y_4(t)$ dan $y_5(t)$ yang digunakan untuk menentukan luasan A_1 sampai A_5 pada *Plant* nomor 4 untuk waktu tunda sebesar 2 detik mempunyai bentuk yang berbeda untuk penentuan luasan A_4 dan A_5 . perbedaan ini terjadi pada grafik penentuan luasan dengan menggunakan metoda integrasi numerik. Perbedaan yang terjadi menyebabkan parameter pengendali PID Metoda *Multiple Integration* memiliki penguatan derivatif (K_d) yang negatif sehingga ditalakan kembali (*retuning*). Grafik tanggapan tangga satuan untuk *Plant* 4 untuk luasan (A_4 dan A_5) ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Krva tanggapan yang digunakan untuk menentukan luasan A_4 dan A_5 pada *Plant* 4, (a) luasan A_4 ; (b) luasan A_5

TABEL X
HASIL PEROLEHAN LUASAN *PLANT* NOMOR 4

Waktu Tunda	Luasan	Metoda Penentuan Luasan		
		Perhitungan	Integrasi Numerik	Rata-rata Keluaran
2 detik	K _{PR}	0.50000	0.50000	0.50000
	A ₁	2.00000	2.00000	2.00000
	A ₂	4.25000	4.25002	4.25000
	A ₃	6.41667	6.42007	6.41667
	A ₄	7.79167	8.13856	7.79166
	A ₅	8.21667	31.69726	8.21609

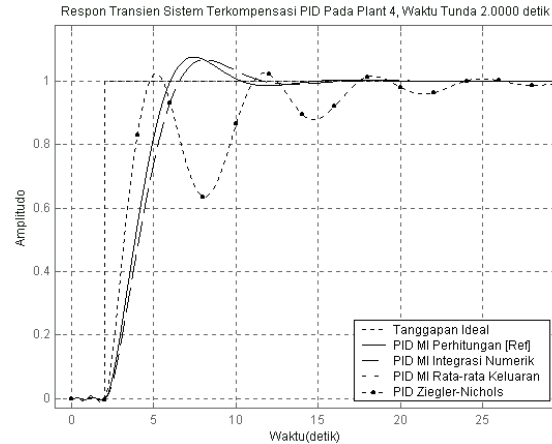
TABEL XI
PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID UNTUK *PLANT* NOMOR 4

PID ideal

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata - rata
K _p	1.61468	1.12406	1.00000	1.12417
K _i	0.41169	0.53102	0.50000	0.53104
K _d	0.68496	0.68496	0.51999	0.68510

■ Penalaan ulang

Tanggapan sistem terkompensasi PID ideal untuk kedua metoda penalaan (Metoda Osilasi dan Metoda *Multiple Integration*) untuk *Plant* 4 dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Tanggapan sistem terkompensasi PID

TABEL XII
PERBANDINGAN KARAKTERISTIK TANGGAPAN WAKTU *PLANT* NOMOR 4

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
Tr (detik)	5.995	7.84	7.825	7.77
Ts (detik)	46.19	24.665	24.635	24.495
M _p (%)	35.8836	5.4587	5.4815	5.5814
Offset	0.011634	1.5661x10 ⁻⁶	1.2925x10 ⁻⁷	6.8385x10 ⁻⁸
ITAE	154.7567	46.9449	46.8969	46.6984

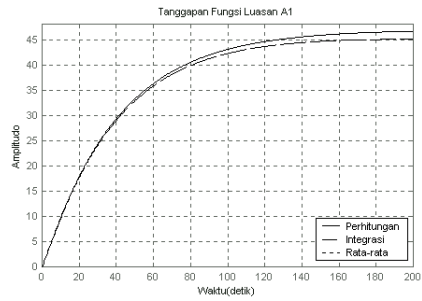
4.5 *Plant* Nomor 5

Tabel rangkuman hasil perolehan luasan untuk *Plant* nomor 5 dengan menggunakan ketiga metoda penentuan luasan ditunjukkan oleh Tabel XIII.

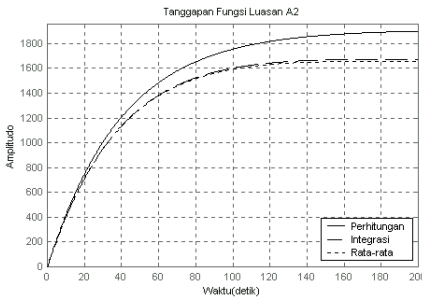
TABEL XIII
HASIL PEROLEHAN LUASAN *PLANT* NOMOR 5

Waktu Tunda	Luasan	Metoda Penentuan Luasan		
		Perhitungan	Integrasi Numerik	Rata-rata Keluaran
2 detik	K _{PR}	1.00000	0.99193	0.99193
	A ₁	47.00000	45.06266	44.96521
	A ₂	1913.00000	1674.06111	1655.76288
	A ₃	76658.33333	56337.76991	54624.7796
	A ₄	3066893.66667	1715921.09323	1609317.28937
	A ₅	122677995.26667	47113109.68044	42151081.56028

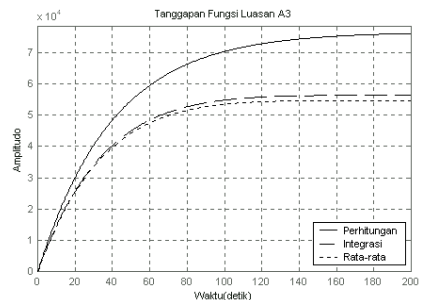
Tanggapan fungsi $y_1(t)$ sampai $y_5(t)$ yang digunakan untuk menentukan luasan A_1 sampai A_5 pada *Plant* 5, ditunjukkan oleh Gambar 20. Terlihat bahwa kesalahan perhitungan pada tahapan awal terakumulasi pada tahapan perhitungan selanjutnya, sehingga kesalahan yang terjadi semakin besar. Hal tersebut menyebabkan terjadinya penalaan ulang untuk metoda penalaan *Multiple Integration* yang menggunakan penentuan luasan daerah menggunakan metoda integrasi numerik dan rata-rata keluaran (karena memiliki harga penguatan derivatif (K_d) yang negatif), hasil penalaan parameter pengendali PID dirangkum pada Tabel XIV.



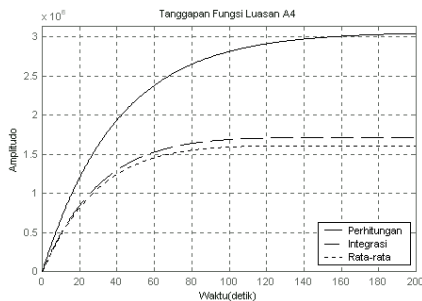
(a)



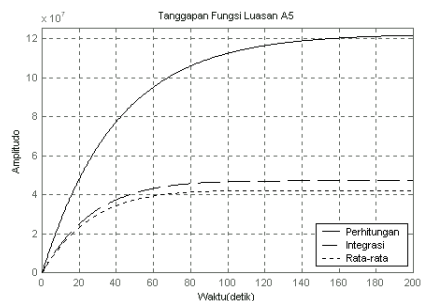
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 20. Kurva tanggapan yang digunakan untuk menentukan luasan A₁ sampai A₅ pada *Plant* 5.

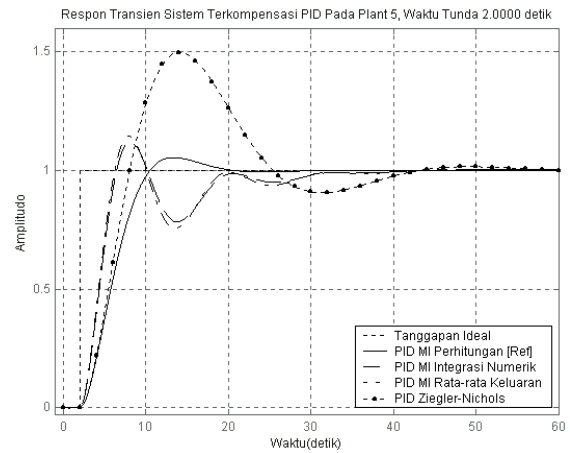
Hasil penalaan parameter pengendali PID untuk *Plant* 5 dirangkum pada Tabel XIV, sedangkan tanggapan sistem terkompensasi untuk kedua metoda penalaan pada *Plant* nomor 5 ditunjukkan oleh Gambar 21.

TABEL XIV
PERBANDINGAN PARAMETER PENGENDALI PID
UNTUK *PLANT* NOMOR 5

PID ideal

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
K_p	10.33786	7.87432	8	8
K_i	0.17818	0.17818	0.18719	0.18760
K_d	29.31159	29.88980	63.16633	66.68616

■ Penalaan ulang



Gambar 21. Tanggapan sistem terkompensasi PID

TABEL XV
PERBANDINGAN KARAKTERISTIK TANGGAPAN
WAKTU *PLANT* NOMOR 5

Parameter	Metoda Osilasi	Metoda <i>Multiple Integration</i>		
		Perhitungan	Integrasi	Rata-rata
Tr (detik)	4.215	5.6	3.075	2.92
Ts (detik)	40.495	17.74	30.85	30.51
Mp (%)	49.744	5.5017	11.6025	13.9217
Offset	0.00086262	1.8131×10^{-6}	0.005705	0.0058062
ITAE	134.7671	24.9838	45.4109	48.2904

Berdasarkan Tabel XV serta Gambar 21, dapat diketahui bahwa untuk *Plant* nomor 5, penalaan ulang yang terjadi pada metoda penalaan *Multiple Integration* dengan penentuan luasan berdasarkan integrasi numerik dan rata-rata keluaran menghasilkan respon tanggapan waktu yang berbeda dengan metoda penentuan luasan berdasarkan perhitungan. Hal disebabkan karena *Plant* nomor 5 memiliki waktu penetapan yang relatif lebih panjang dibandingkan dengan keempat *Plant* sampel sebelumnya, sedemikian sehingga terdapat kesalahan awal pada saat penentuan level K_{PR} (seperti terlihat pada Tabel XIII).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisa terhadap 5 buah *Plant* sampel dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Secara umum, berdasarkan respon transien, penentuan parameter PID dengan Metoda *Multiple Integration* menghasilkan respon sistem dengan lewatan maksimum kecil, waktu penetapan yang singkat, dan *offset* kecil.
2. Perbedaan hasil penentuan parameter PID pada Metoda *Multiple Integration* dapat disebabkan oleh terakumulasinya kesalahan dari tiap-tiap tahapan pada proses penentuan luasan seperti pada penentuan luasan untuk *Plant 5* dengan waktu tunda 0.1 detik ($A_{0\text{perhitungan}} = 1$, $A_{0\text{integrasi}} = 0.99230$, $A_{0\text{rata-rata}} = 0.99193$) perbedaan yang terjadi pada penentuan A_0 semakin terlihat pada penentuan luasan selanjutnya.
3. Pada *Plant 4*, untuk waktu tunda 2 detik, penalaan parameter PID ideal berdasarkan Metoda *Multiple Integration* menggunakan metoda penentuan luasan menggunakan integrasi numerik menghasilkan harga parameter pengendali PID yang negatif yaitu untuk penguatan proporsional (K_p) sebesar -0.33495 , penguatan integral (K_i) sebesar 0.16626 , dan derivatif (K_d) sebesar -1.24548 , sehingga terjadi penalaan ulang dan menghasilkan $K_p = 1$, $K_i = 0.5$, dan $K_d = 0.51999$.
4. Pada *Plant 5* dengan waktu tunda 2 detik, untuk penalaan parameter pengendali PID berdasarkan Metoda *Multiple Integration* yang luasannya ditentukan dengan menggunakan integrasi numerik dan rata-rata keluaran, menghasilkan parameter pengendali PID yang negatif. Untuk metoda penentuan luasan berdasarkan integrasi numerik penalaan awal menghasilkan $K_p = -1.89792$, $K_i = -0.03068$, serta $K_d = -32.14833$ sehingga terjadi penalaan ulang yang menghasilkan $K_p = 7$, $K_i = 0.16518$, dan $K_d = 53.53655$. Untuk metoda penentuan luasan berdasarkan rata-rata keluaran, penalaan awal menghasilkan $K_p = -2.04097$, $K_i = -0.03390$, dan $K_d = -33.96768$ sehingga terjadi penalaan ulang dengan hasil $K_p = 7$, $K_i = 0.16554$, dan $K_d = 56.66183$.
5. Untuk masukkan sinyal tangga satuan yang ideal, penambahan filter derivatif menurunkan kinerja pengendali PID.
6. Berdasarkan kriteria ITAE, Metoda *Multiple Integration* menghasilkan indeks performansi dengan derajat kesalahan yang lebih kecil dibandingkan dengan Metoda Osilasi (Ziegler-Nichols).

5.2 Saran

1. Untuk Metoda *Multiple Integration*, pada penalaan *plant* yang memiliki waktu penetapan yang panjang, dapat digunakan waktu proses penetapan tanggapan fungsi luasan yang lebih lama supaya tanggapan fungsi luasan benar-benar mencapai

keadaan tunak, sehingga diperoleh hasil luasan yang lebih baik.

2. Selain menggunakan Metoda Osilasi (Ziegler-Nichols), untuk membandingkan hasil yang telah diperoleh pada Metoda *Multiple Integration* dapat digunakan metoda lain yang lebih maju, misalnya algoritma genetik, atau logika fuzzy.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Charles L. Phillips, Royce D. Harbor, *Feedback Control Systems, Second Edition*. Prentice-Hall International, Inc. 1991.
- [2] Coughanowr, Donald R, *Process Systems Analysis and Control*, 2nd Edition, McGraw – Hill, New York, 1991.
- [3] 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.
- [4] Littlefield, Bruce, Duane Hanselman, *Mastering Matlab 5 : A Comprehensive Tutorial and Reference*, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
- [5] Ogata, Katsuhiko, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, New Delhi, 1984.
- [6] Ogata, Katsuhiko, *System Dynamics*, 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [7] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*, Diterjemahkan oleh Edi Leksono, Jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1995.
- [8] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)*, Diterjemahkan oleh Edi Leksono, Jilid 2, Erlangga, Jakarta, 1993.
- [9] Palm, William J. III, *Modeling, Analysis, and Control of Dynamic Systems*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- [10] Rohrs, Charles E, James L. Melsa, Donald G. Schultz, *Linear Control Systems*, McGraw-Hill, 1993.
- [11] Vrančić, D., S. Strmčnik, D. Juričić, *MOMI Nastavitvena Metoda za Filtriran PID Regulator*, 2002. <http://ev.fri.uni-lj.si/1-2002/vrancic.pdf>.
- [12] Vrančić, D. *Part II PID Controller Tuning Using the Multiple Integration Method*, 1997. <http://www-e2.ijs.si>.
- [13] Vrančić, D., S. Strmčnik, *Practical Guidelines for Tuning PID Controllers by Using MOMI Method*, 1999. <http://www-e2.ijs.si>.
- [14] Ziegler, J. G., and N. B. Nichols (1942). *Optimum settings for automatic controllers*. Trans. ASME, 64, pp.759-768.

Bayu Setio Handhoko

Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro
Universitas Diponegoro Semarang,
Konsentrasi di Bidang Kontrol.
Angkatan '97 (NIM : L2F097615)

Mengetahui

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Agung Warsito, DHET
NIP. 131 668 485

Sumardi, ST. MT
NIP. 132 125 670