

# Perancangan Sistem Kontrol Ketinggian Muka Cairan Pada Tangki Spherical Menggunakan Kontroler PID-Gain Scheduling

Fariz Galang Rizqi<sup>1\*</sup>, Wahyudi<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang  
<sup>\*</sup>farizgalang08@gmail.com

**Abstrak**—Tangki spherical adalah salah satu tangki *pressure vessel* yang memiliki bentuk yang sangat nonlinear karena bentuk geometrisnya dan tangki ini banyak digunakan pada industri untuk menyimpan cairan dengan kapasitas besar. Tangki spherical ini banyak digunakan karena keunggulannya untuk mendistribusi tegangan yang lebih merata sehingga cenderung tidak memiliki titik lemah, dan juga luas permukaan per satuan volume yang dimiliki lebih kecil membuatnya panas yang ditransferkan dari lingkungan lebih kecil dibandingkan bentuk tangki lainnya. Pengendalian ketinggian muka cairan pada tangki ini menjadi tantangan karena sifat nonlinearnya yang menyebabkan dinamika proses bervariasi secara ekstrem. Penelitian ini mengusulkan metode kontrol PID dengan pendekatan *Gain Scheduling* (PID-GS) untuk mengatasi tantangan tersebut. Metode ini memungkinkan parameter kontrol beradaptasi dengan melakukan penjadwalan sesuai perubahan kondisi operasi. Simulasi pada penelitian ini menggunakan MATLAB Simulink untuk mengevaluasi performa PID-GS dibandingkan PID konvensional pada berbagai *setpoint*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PID-GS memiliki *rise time* lebih cepat, *final value* lebih akurat, dan *overshoot* yang lebih kecil dibandingkan PID konvensional. Selain itu, PID-GS memberikan stabilitas sistem yang lebih baik dengan *settling time* yang lebih singkat. Analisis kesalahan kumulatif menggunakan parameter seperti IAE, ITAE, ITSE, dan ISE menunjukkan bahwa PID-GS unggul pada *setpoint* rendah hingga menengah. Namun, peningkatan kesalahan kumulatif pada *setpoint* tinggi menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut terhadap parameter *Gain Scheduling*. Secara keseluruhan, PID-GS menawarkan solusi kontrol yang efektif dan efisien untuk sistem non-linear seperti tangki spherical, dengan potensi untuk dikembangkan lebih lanjut guna meningkatkan kinerja di seluruh rentang operasi.

**Kata Kunci**—Gain Scheduling, Kontrol PID, Tangki Spherical, Adaptif, Kontrol level, Non-linear.

DOI: 10.22441/jte.2025.v16i2.007

## I. PENDAHULUAN

Pada industrial proses terutama pada industri kimia saat ini memiliki tantangan mengenai permasalahan dalam pengontrolan karena pada industri tersebut sering terjadi dinamika dan parameter non-linier yang berubah-ubah seiring waktu [1]. Hal ini terjadi karena pengaruh ketidakpastian, gangguan, serta waktu mati (*dead time*) yang memperburuk performa dari proses tersebut [1], [2]. Pengendalian pada industri menjadi faktor yang sangat krusial dalam proses produksi, agar produksi tetap tercapai maka suatu sistem pengendalian sangat diperlukan untuk menjaga kestabilan variabel proses yang meliputi temperature, tekanan, *flow*, level, konsentrasi, volume, dan lain sebagainya [3].

Salah satu permasalahan yang sering terjadi dalam industri ialah pengendalian ketinggian fluida dalam tangki proses [4]. Ketinggian fluida pada industri proses telah menjadi parameter proses yang penting serta harus dikendalikan pada tingkat yang diinginkan agar proses dapat berjalan lancar serta menjaga produk dengan kualitas yang lebih baik [4]. Industri proses seperti petrochemical, kertas, pengolahan air pada umumnya menggunakan tangki penyimpanan dengan geometri yang bervariasi seperti tangki spherical, tangki canonical, hingga tangki silinder yang paling banyak digunakan [2].

Tangki-tangki yang banyak digunakan pada industri ini merupakan salah satu bentuk dari sistem yang non-linear karena area penampang dimiliki tangki tersebut bervariasi pada ketinggian tertentu. Salah satu tangki yang banyak dipergunakan ialah tangki berbentuk bola (spherical) [1]. Tangki bola atau spherical tank ialah salah satu jenis *pressure vessel* yang berfungsi sebagai tangki penyimpanan dengan kapasitas besar agar menjaga kelancaran ketersediaan produk dan bahan baku [5], [6]. Salah satu contoh industri yang menggunakan tangki spherical ini ialah pada industri LPG dikarenakan harus disimpan dengan tekanan yang rendah. Penggunaan tangki spherical ini dikarenakan keunggulannya yaitu distribusi tegangan yang lebih merata sehingga cenderung tidak memiliki titik lemah, dan juga luas permukaan per satuan volume yang dimiliki lebih kecil membuatnya panas yang ditransferkan dari lingkungan lebih kecil dibandingkan bentuk tangki lainnya [7].

Tangki spherical pada dasarnya ialah sistem yang sangat non-liner karena bentuk geometrisnya [7]. Dalam pengisian ataupun pengosongan fluida dalam tangki akan membuat level tangki sangat bervariasi sesuai dengan geometri volumenya. Pengendalian ketinggian muka cairan pada tangki penampungan merupakan masalah umum ketika level air pada tangki penampungan tidak diketahui secara pasti serta kurangnya pemantuan tangki penampungan dapat menyebabkan luapan atau pengosongan tangki [8]. Pengontrolan level pada tangki ini menjadi tantangan karena variasi yang ekstrem dalam dinamika proses dan pengendaliannya [9].

Secara umum pada industri proses banyak menggunakan kontrol proportional-integral (PI) dan proportional-integral-derivatif (PID) [1], [9]. Dengan kemudahan pengaplikasiannya kontroler PID banyak digunakan karena dapat diterapkan dalam perangkat keras seperti PLC, DCS, dan lainnya [10]. Proses di industri umumnya bersifat kompleks, nonlinear dan multivariabel sehingga dalam pengendaliannya memerlukan strategi kontroler yang mampu mengatasi permasalahan

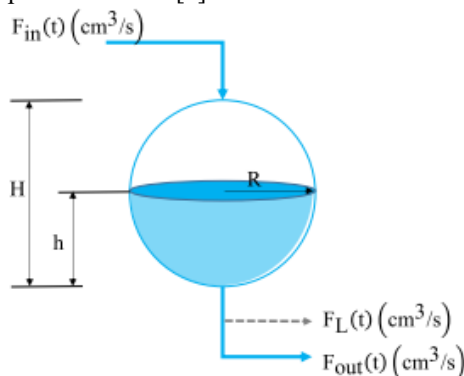
tersebut [11]. Tidak terkecuali pengendalian ketinggian muka air yang umumnya menggunakan kontrol PID, akan tetapi kontrol tersebut tidak cukup untuk pengendalian yang efisien dalam tangki spherical ini yang memiliki sifat nonlinear.

Seiring berjalannya waktu saat ini telah banyak penelitian yang berfokus pada teknik pengendalian ketinggian muka cairan pada sebuah tangki meliputi kontroler PID *back-stepping* [12], *feed-forward* kompensator, kontroler linearisasi dengan *feedback*, *machine learning*, *Fuzzy Logic Controller* (FLC), *Self Tuning Regulator* (STR), *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) [13], dan *Gain Scheduling*. Pada penelitian ini penulis mengajukan metode kontrol PID-Gain Scheduling untuk mengendalikan ketinggian muka air pada tangki spherical, sehingga diharapkan kontroler tidak hanya mampu mengikuti referensi yang diinginkan tetapi juga dapat mampu mengatasi masalah ketidakpastian yang dimiliki oleh sebuah tangki nonlinear.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

### A. Model Tangki spherical

Pada penelitian ini menggunakan simulasi untuk menggambarkan karakteristik yang dimiliki oleh tangki spherical tertuju pada Gambar 1. Dalam simulasi untuk membantu analisis yang dilakukan, diasumsikan bahwa suhu dianggap dalam kondisi suhu ruangan, cairan yang berada dalam tangki memiliki viskositas rendah, dan tangki terbuka dibagian atasnya sehingga tangki tidak bertekanan. Adapun tangki yang akan disimulasikan harus dimodelkan secara matematis yaitu menggunakan persamaan matematika yang menggambarkan sistem akan diturunkan untuk membantu mempelajari sistem. permodelan secara matematis dari sistem tangki spherical ditujukan pada Gambar 1 [2].



Gambar 1. Tangki spherical

Volume tangki spherical diperlihatkan pada persamaan (1).

$$V = \frac{4}{3}\pi h^3 \quad (1)$$

Parameter tangki spherical diperlihatkan pada Tabel 1 [1], [2].

Tabel 1. Parameter tangki spherical

| Variabel      | Simbol | Nilai |
|---------------|--------|-------|
| Radius Tangki | $r$    | 25 cm |

|                                          |                    |                        |
|------------------------------------------|--------------------|------------------------|
| Tinggi Tangki                            | $H$                | 50 cm                  |
| Luas permukaan tangki                    | $A$                | $\text{cm}^2$          |
| Hambatan aliran                          | $R$                | $\text{s}/\text{cm}^2$ |
| Tinggi muka cairan (variabel terkontrol) | $h$                | Cm                     |
| Laju aliran masuk (variabel manipulasi)  | $F_{in}(t)$        | $\text{cm}^3/\text{s}$ |
| Laju aliran keluar                       | $F_{out}(t) = h/R$ | $\text{cm}^3/\text{s}$ |

Persamaan diferensial orde pertama dari sistem diperlihatkan pada persamaan (2):

$$A \frac{dh}{dt} = F_{in} - F_{out} = F_{in} - \frac{h}{R} \quad (2)$$

$$AR \frac{dh}{dt} + h = RF_{in} \quad (3)$$

Pada keadaan steady state diberikan oleh persamaan (4).

$$h_s = RF_{in, s} \quad (4)$$

Berdasarkan persamaan deviasi dari (2) dan (3).

$$AR \frac{dh}{dt} + h' = RF'_i \quad (5)$$

Dimana  $h'$  ditunjukkan pada persamaan (6) dan  $F'_i$  ditunjukkan pada persamaan (7).

$$h' = h - h_s \quad (6)$$

$$F'_i = F'_{in} - F'_{in, s} \quad (7)$$

Persamaan (8) merupakan konstanta waktu proses sedangkan persamaan (9) ialah *gain steady state* proses.

$$\tau_p = \frac{AR}{h_s} \quad (8)$$

$$F'_i = F'_{in} - F'_{in, s} \quad (9)$$

Sehingga didapatkan fungsi alihnya ialah:

$$G(s) = \frac{h'(s)}{F'_{in}} = \frac{K_p}{\tau_n s + 1} \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{R_t}{\tau s + 1} \quad (11)$$

$$R_t = \frac{2h_s}{q_2} \quad (12)$$

Dimana:

$h_s$  = ketinggian muka cairan pada tangki saat steady state

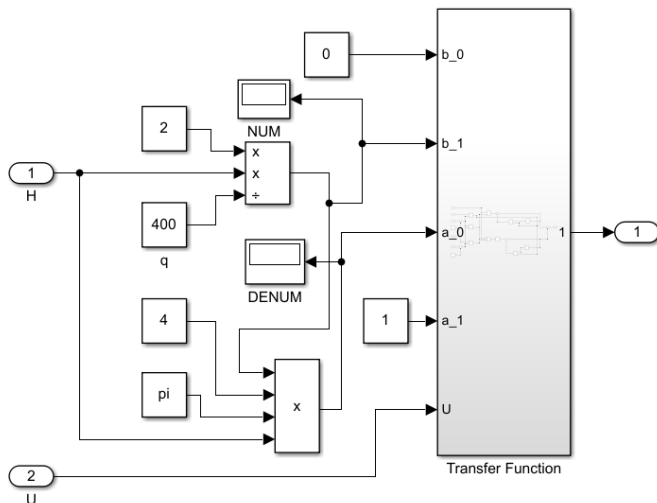
$$\tau = 4\pi h_s R_t$$

Persamaan (13) merujuk kepada hasil permodelan yang dimiliki oleh tangki spherical dalam bentuk *transfer function*.

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{\frac{2h_s}{q_2}}{(4\pi h_s R_t)s + 1} \quad (13)$$

Hasil dari permodelan sistem yang dimiliki oleh tangki spherical ini akan dimodelkan pada aplikasi MATLAB Simulink. Gambar 2. merupakan bentuk model plant tangki

spherical dalam MATLAB Simulink. Persamaan (13) dan Gambar 2. menunjukkan bahwa *transfer function* bergantung pada nilai ketinggian masukan dalam sistem dan nilai debit aliran diberikan pada nilai 400 m<sup>3</sup>/s.



Gambar 2. Model *plant* tangki spherical dalam MATLAB Simulink

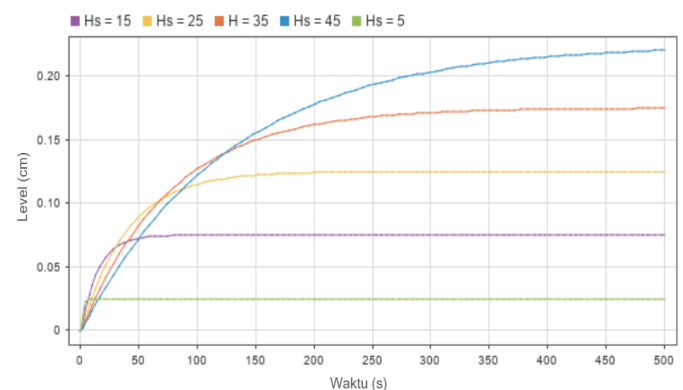
### B. Perancangan kontroler PID-Gain Scheduling

Pada umumnya banyak industri proses yang menggunakan kontroler PI karena kekuatan dan kesederhanaannya, selain itu kontroler ini dapat mengurangi error steady state dan osilasi pada sistem terutama dalam sistem linear [14]. Kontroler PID menggunakan penguatan operasional untuk menghasilkan penguatan proporsional, integral, dan derivative [15]. Kinerja sistem dapat ditingkatkan dengan melakukan penyesuaian pada penguatan  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dalam kontroler PID. Penguatan proporsional ( $K_p$ ) digunakan untuk mempercepat keluaran untuk dapat mencapai masukan referensi. Akan tetapi, keluaran sistem tidak mampu untuk mencapai kesalahan *error steady state* nol. Oleh karena itu, untuk mencapai kesalahan keadaan tunak yang sangat kecil, penguatan integral ( $K_i$ ) diberikan dalam sistem. Penguatan derivative ( $K_d$ ) digunakan untuk meningkatkan kinerja sistem yang lebih baik. Nilai penguatan  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dapat disesuaikan secara manual untuk menghasilkan keluaran yang sesuai. Kontroler PID diberikan oleh persamaan (14).

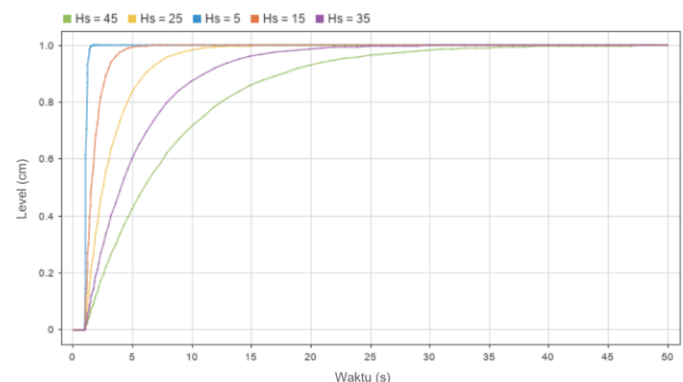
$$U_{PID} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

Kontroler PID dapat digunakan pada sistem nonlinear akan tetapi perlu dilakukannya pendekatan lainnya untuk menghasilkan hasil yang lebih baik. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan ialah kontroler *Gain scheduling* yang mampu mengatur parameter PID menggunakan penjadwalan berdasarkan kondisi atau titik operasi sistem. Pengontrolan ketinggian muka cairan pada tangki nonlinear yang berbentuk bulat atau spherical ini akan menggunakan metode kontrol PID-Gain scheduling (PID-GS). Kontroler ini akan mengendalikan ketinggian muka cairan dalam tangki spherical agar tetap terjaga sesuai dengan *setpoint*.

Titik operasi yang digunakan sebagai variabel penjadwal dalam kontroler PID *Gain Scheduling* ini terdiri dari 5 titik operasi yang merupakan hasil linearisasi dari tangki spherical dengan ketinggian maksimal 50cm untuk setiap rentang ketinggian 10cm agar dapat dilanjutkan untuk merancang penjadwalan dari kontroler *Gain Scheduling*. Kontroler *Gain Scheduling* berfungsi untuk melakukan penjadwalan terhadap parameter  $K_p$  dan  $K_i$  dari sistem [16]. Gambar 4. menunjukkan respon sistem *open loop* dari masing-masing titik operasi dan respon sistem tersebut digunakan untuk melakukan *tuning* parameter PID. Dengan pemodelan tangki spherical yang didapatkan dalam bentuk fungsi alih dapat menggambarkan sifat dan dapat digunakan untuk merancang parameter PID menggunakan *PIDTuner* Matlab. Pada Gambar 5. ditunjukkan respon sistem hasil *tuning* PID menggunakan PID Tuner pada masing-masing titik operasi.



Gambar 3. Respon sistem *open loop*



Gambar 4. Respon sistem hasil *tuning* PID

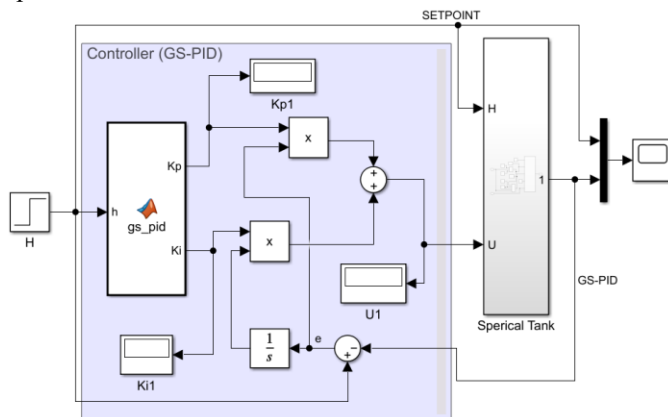
Tabel 2. menampilkan hasil *tuning* yang dilakukan untuk setiap titik operasi dari rancangan kontroler PID-GS. *Tuning* parameter PID yang dilakukan dengan kriteria kontroler mampu mengikuti nilai *setpoint*, nilai rise time yang kecil, nilai *overshoot* yang kecil dan kontroler memiliki kekuatan (*robust*) yang tinggi.

Tabel 2. Hasil *tuning* parameter PID untuk kontroler PID-GS.

| Tangki              |       | Fungsi Alih |        | Parameter PID |       |       |
|---------------------|-------|-------------|--------|---------------|-------|-------|
| <i>Range</i><br>$h$ | $h_s$ | $K$         | $\tau$ | $K_p$         | $K_i$ | $K_d$ |

|       |    |       |         |         |         |   |
|-------|----|-------|---------|---------|---------|---|
| 0-10  | 5  | 0,025 | 1,5708  | 680,342 | 433,118 | 0 |
| 10-20 | 15 | 0,075 | 14,1372 | 237,468 | 16,797  | 0 |
| 20-30 | 25 | 0,125 | 39,269  | 142,481 | 3,628   | 0 |
| 30-40 | 35 | 0,175 | 76,969  | 101,772 | 1,322   | 0 |
| 40-50 | 45 | 0,225 | 127,234 | 79,156  | 0,622   | 0 |

Hasil tuning PID pada masing-masing titik operasi akan menjadi keluaran pada kontroler, namun sebelumnya kontroler akan melakukan linearisasi untuk memberikan parameter PID yang lebih sesuai agar memberikan respon sistem yang lebih baik. Gambar 6. menunjukkan diagram blok yang dimiliki oleh pengontrolan ketinggian muka cairan pada tangki spherical menggunakan kontroler PID-GS. Pada diagram blok menunjukkan bahwa model plant akan berubah sesuai dengan masukan ketinggian yang diberikan kedalam sistem, hal ini untuk menunjukkan sifat nonlinear yang dimiliki oleh tangki spherical.

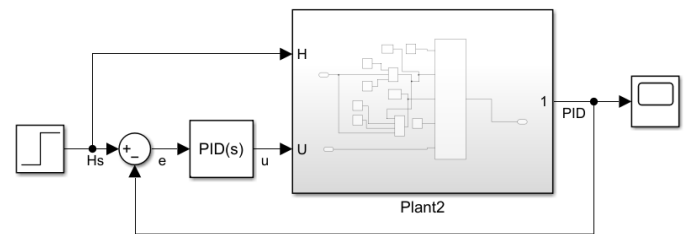


Gambar 5. Diagram blok pengontrolan ketinggian muka cairan pada tangki spherical.

### III. HASIL DAN ANALISIS

Percobaan dan pengujian sistem yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan aplikasi MATLAB. Model plant tangki spherical dan kontroler PID-GS dimodelkan serta disimulasikan pada MATLAB Simulink Respon sistem. Pada pengujian sistem dalam penelitian ini akan menggunakan kontroler PID konvensional sebagai kontroler pembandingan dari kontroler yang akan diuji (PID-GS). Parameter PID yang digunakan pada kontroler PID konvensional ini merupakan hasil tuning PIDTuner pada titik tengah tangki spherical ( $h_s = 25$  cm) sehingga parameter PID yang didapatkan ialah  $K_p = 142,481$  dan  $K_i = 3,628$ . Gambar 7. menunjukkan diagram blok yang

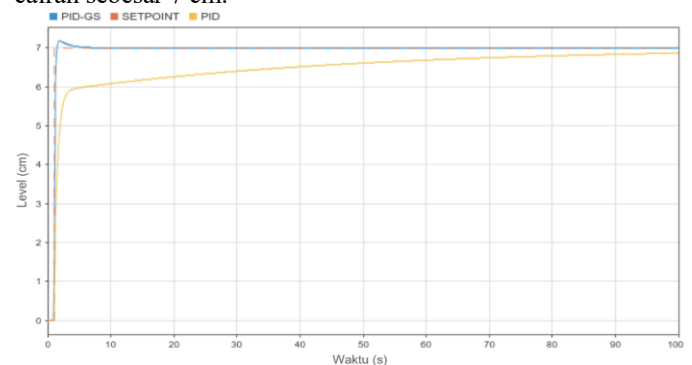
dimiliki oleh kontroler PID konvensional dengan bentuk plant yang berubah-ubah sesuai dengan nilai masukan *setpoint*.



Gambar 6. Kontroler PID konvensional

Pengujian kontroler PID-GS dan PID konvensional dilakukan dengan memberikan variasi masukan pada ketinggian 7, 15, 28, 36, dan 47 cm. Variasi masukan ini dimaksudkan untuk menggambarkan performa kinerja dari kontroler PID-GS pada setiap titik operasi yang telah dirancang secara keseluruhan. Parameter performa yang digunakan untuk menilai kinerja sistem ialah berupa *final value*, *rise time*, *settling time*, dan *overshoot*. Parameter *settling time* dihitung dengan nilai perubahan maksimal sebesar  $\pm 0,2\%$ .

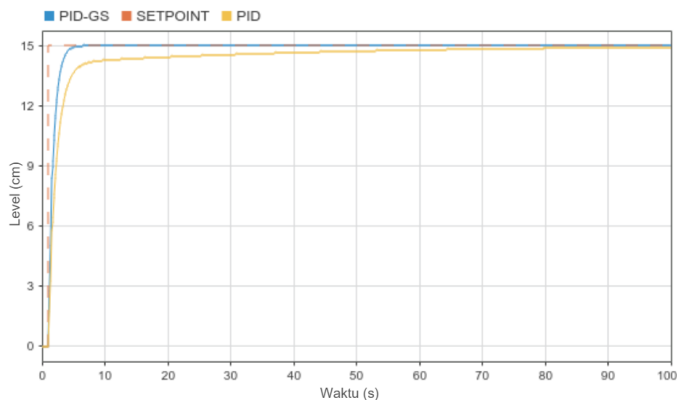
Pada masukan  $h_s = 7$  cm, kontroler PID-GS mencapai nilai *final value* sebesar 7cm dengan *rise time* bernilai 0,3s, *settling time* bernilai 2,49s, dan *overshoot* senilai 2,57%. Sedangkan kontroler PID memiliki respon yang lebih buruk dibandingkan kontroler PID-GS dengan parameter performa yaitu *final value* pada 6,95cm, *rise time* bernilai 20,78s, *settling time* pada waktu ke 92,97s dan tidak mengalami *overshoot*. Gambar 8. ditunjukkan grafik perbandingan antara respon kontroler PID-GS dan PID konvensional dengan masukan ketinggian muka cairan sebesar 7 cm.



Gambar 7. Grafik respon sistem kontroler PID-GS dan PID dengan setpoint  $h_s = 7$ cm.

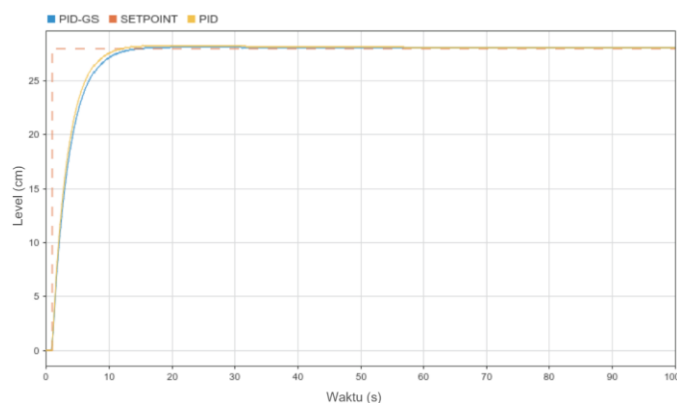
Dengan masukan  $h_s = 15$ cm, kontroler PID-GS mampu mencapai nilai masukan dan mempertahankannya dalam kurun waktu yang lebih cepat dibandingkan kontroler PID. Kontroler PID-GS memiliki parameter performa sistem yaitu waktu naik (*rise time*) 1,71s, *final value* bernilai 15cm dan *overshoot* bernilai 0,5%. Sedangkan parameter perfoma dari kontroler PID ialah *rise time* bernilai 3,523s, *final value* sebesar 14,92cm dan *overshoot* bernilai -1,428%. Gambar 9. menunjukkan grafik respon sistem untuk pengendalian ketinggian muka cairan

menggunakan kontroler PID-GS dan PID konvensional pada masukan  $h_s=15\text{cm}$ .



Gambar 8. Respon sistem kontroler PID-GS dan PID pada masukan  $h_s=15\text{cm}$

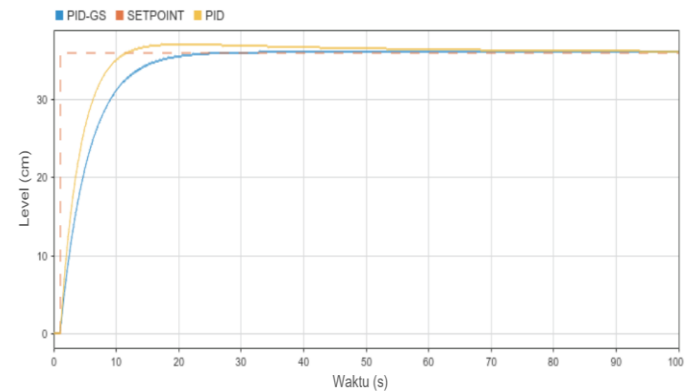
Pada masukan  $h_s=28\text{cm}$ , kontroler PID-GS mencapai final value pada nilai 27,97cm atau memiliki error senilai 0,1% yang lebih kecil dibandingkan dengan kontroler PID yang mencapai final value pada nilai 28,1cm dengan nilai error senilai 0,35%. Pada kontroler PID-GS ini juga memiliki parameter performa lainnya yaitu *rise time* senilai 5,83s, *settling time* bernilai 11s, dan *overshoot* senilai 0,38%. Sedangkan, kontroler PID parameter *rise time* selama 5,24s, *settling time* bernilai 9,67s, serta *overshoot* sebesar 0,84%. Pada masukan  $h_s=28\text{cm}$ , kedua kontroler memiliki respon transient yang cenderung sama namun kontroler PID memiliki nilai *settling time* yang lebih cepat dibandingkan kontroler PID-GS. Gambar 10. ditunjukkan grafik perbandingan antara respon kontroler PID-GS dan PID konvensional dengan masukan ketinggian muka cairan sebesar 28 cm.



Gambar 9. Respon sistem kontroler PID-GS dan PID pada masukan  $h_s=28\text{cm}$

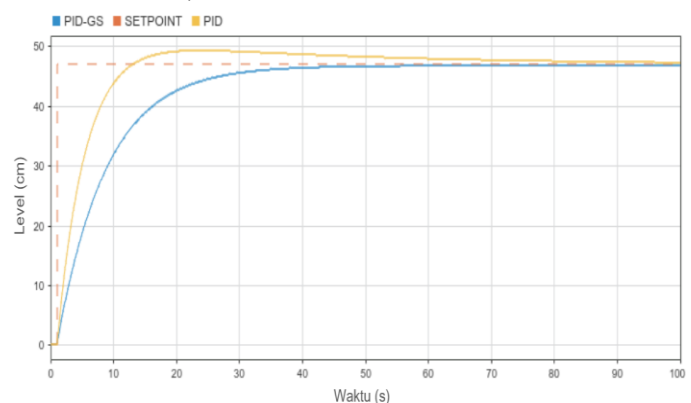
Dengan masukan  $h_s=36\text{cm}$ , kontroler PID-GS mencapai *final value* yang bernilai 36cm dengan *rise time* bernilai 9,95s, *settling time* pada waktu 18,57s, dan *overshoot* sebesar 0,06%. sedangkan pada kontroler PID mencapai *final value* sebesar 37 cm pada *settling time* sebesar 36,7s, untuk nilai *rise time* senilai 6,28s, dan *overshoot* sebesar 2,8%. Gambar 11. menunjukkan

grafik respon sistem kontroler PID-GS dan PID dengan masukan  $h_s=36\text{cm}$ .



Gambar 10. Respon sistem kontroler PID-GS dan PID pada masukan  $h_s=36\text{cm}$

Pada variasi terakhir yaitu masukan  $h_s=47\text{cm}$ , kontroler PID-GS mencapai final value pada nilai 46,91cm atau memiliki error senilai 0,19% yang lebih kecil dibandingkan dengan kontroler PID yang mencapai final value pada nilai 47,11cm dengan nilai error senilai 0,23%. Pada kontroler PID-GS ini juga memiliki parameter performa lainnya yaitu *rise time* senilai 17,55s, *settling time* bernilai 33,23s, dan tidak terdapat *overshoot*. Sedangkan, kontroler PID parameter *rise time* selama 7,67s, *settling time* bernilai 60,49s, serta *overshoot* sebesar 4,9%. Dengan masukan  $h_s=47\text{cm}$ , kontroler PID memiliki *rise time* yang lebih cepat namun nilai *settling time* yang lebih lama dibandingkan kontroler PID-GS. Gambar 12. ditunjukkan grafik perbandingan antara respon kontroler PID-GS dan PID konvensional dengan masukan ketinggian muka cairan sebesar 47cm.



Gambar 11. Respon sistem kontroler PID-GS dan PID pada masukan  $h_s=47\text{cm}$

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan melakukan variasi masukan dan perbandingan antara kontroler PID-GS dan kontroler PID, parameter performa pada masing-masing masukan dirangkum pada Tabel 3. yang menggambarkan respon sistem berdasarkan parameter performa (*final value*, *rise time*, *settling time*, dan *overshoot*) pada kontroler PID-GS dan kontroler PID.

Tabel 3. Performa respon dengan variasi *setpoint* pada PID-GS dan PID konvensional.

| <i>Setpoint</i> (cm) | Kontroler | <i>Final value</i> (cm) | <i>Rise time</i> (s) | <i>Settling time</i> (s) | <i>Overshoot</i> (%) |
|----------------------|-----------|-------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| $h_s=7\text{cm}$     | PID-GS    | 7                       | 0,3                  | 2,49                     | 2,57                 |
|                      | PID       | 6,95                    | 20,78                | 92,97                    | 0                    |
| $h_s=15\text{cm}$    | PID-GS    | 15                      | 1,74                 | 4,10                     | 0                    |
|                      | PID       | 14,99                   | 3,63                 | 45,82                    | 0                    |
| $h_s=28\text{cm}$    | PID-GS    | 27,97                   | 5,83                 | 11                       | 0,38                 |
|                      | PID       | 28,1                    | 5,24                 | 9,67                     | 0,84                 |
| $h_s=36\text{cm}$    | PID-GS    | 36                      | 9,95                 | 18,57                    | 0,06                 |
|                      | PID       | 37                      | 6,28                 | 36,7                     | 2,8                  |
| $h_s=47\text{cm}$    | PID-GS    | 46,91                   | 17,55                | 33,23                    | 0                    |
|                      | PID       | 47,11                   | 7,67                 | 60,49                    | 4,9                  |

Berdasarkan hasil simulasi kontrol ketinggian pada tangki spherical yang ditujukan pada Tabel 3. menunjukkan nilai akhir (*final value*) yang mendekati *setpoint* pada seluruh variasi  $h_s$ , dengan waktu pencapaian yang lebih cepat dibandingkan PID konvensional. Selain itu, PID-GS memiliki *rise time* yang jauh lebih kecil dibandingkan PID pada seluruh *setpoint* yang menindikasikan respons sistem yang lebih cepat. Pada parameter *settling time*, PID-GS juga memberikan waktu stabilitas yang jauh lebih singkat dibandingkan PID konvensional membuat PID-GS lebih cepat mencapai kondisi stabil setelah terjadi perubahan *setpoint*. Pada parameter *overshoot*, PID-GS menunjukkan keunggulan dalam menjaga lonjakan *output* tetap minimal atau bahkan nol pada sebagian besar *setpoint*. Pada masukan  $h_s=7\text{cm}$ , *overshoot* PID-GS tercatat sebesar 2,57% sedangkan PID konvensional tidak menunjukkan *overshoot*.

Namun, pada *setpoint* yang lebih tinggi seperti  $h_s=15\text{cm}$ ,  $h_s=36\text{cm}$ , dan  $h_s=47\text{cm}$  *overshoot* PID-GS lebih kecil dibandingkan PID konvensional sehingga menunjukkan kemampuan PID-GS dalam memberikan transisi yang lebih halus.

Pengujian kedua kontroler ini juga dilakukan analisis kinerja pada setiap variasi *setpoint* yang mencakup parameter *integral time absolute error* (ITAE), *integral absolute error* (IAE), *integral time square error* (ITSE), dan *integral square error* (ISE) digunakan untuk mengukur kualitas respon sistem dengan memperhitungkan nilai error selama rentang seluruh waktu [17], [18]. Tabel 4. menunjukkan hasil analisis kinerja untuk unjuk kinerja sistem dengan variasi *setpoint* ( $h_s$ ) pada PID-GS dan PID konvensional.

Tabel 4. Analisis kinerja setiap variasi *setpoint* pada PID-GS dan PID konvensional

| <i>Setpoint</i> (cm) | Kontroler | ITAE  | IAE   | ITSE  | ISE       |
|----------------------|-----------|-------|-------|-------|-----------|
| $h_s=7\text{cm}$     | PID-GS    | 1,319 | 2,289 | 3,556 | 3,859     |
|                      | PID       | 54,4  | 2305  | 44,82 | 727,1     |
| $h_s=15\text{cm}$    | PID-GS    | 11,91 | 21,36 | 89,28 | 124,7     |
|                      | PID       | 54,81 | 1567  | 171,5 | 638,2     |
| $h_s=28\text{cm}$    | PID-GS    | 79,56 | 595,7 | 1053  | 2469      |
|                      | PID       | 77,39 | 788,2 | 958,7 | 2158      |
| $h_s=36\text{cm}$    | PID-GS    | 165   | 1108  | 2942  | 9609      |
|                      | PID       | 151,3 | 2826  | 2017  | 5910      |
| $h_s=47\text{cm}$    | PID-GS    | 401,6 | 6003  | 8795  | 4,452e+04 |
|                      | PID       | 279,8 | 6539  | 4483  | 1,807e+04 |

Berdasarkan hasil analisis kinerja untuk setiap *setpoint* ketinggian muka cairan ( $h_s$ ) yang mencakup 4 parameter yaitu ITAE, IAE, ITSE, dan ISE. Pada masukan  $h_s \leq 25\text{cm}$ , kontroler PID-GS lebih unggul dengan memiliki nilai parameter unjuk

kinerja yang lebih kecil daripada kontroler PID konvensional. Hal ini disebabkan hasil tuning dari parameter PID mampu mengevaluasi nilai error yang dihasilkan oleh sistem. Apabila masukan  $h_s \geq 25\text{cm}$ , kontroler PID-GS memiliki nilai parameter

unjuk kinerja yang lebih besar dibandingkan kontroler PID konvensional.

Dalam perancangan sistem kontrol PID-GS, kontroler ini dirancang untuk memberikan stabilitas sistem dan *robustness* yang lebih baik dibandingkan PID konvensional. Hal ini terlihat pada Tabel 3. dimana PID-GS memiliki kemampuan waktu respons yang lebih cepat dan mampu mempertahankan *overshoot* yang minimal. Namun, hasil analisis error menunjukkan bahwa untuk beberapa *setpoint* tertentu, kontroler PID-GS menghasilkan nilai error kumulatif yang cukup tinggi, seperti terlihat pada parameter ITAE, ITSE, ISE. Pada parameter IAE, PID-GS lebih unggul dibandingkan PID konvensional

Kinerja PID-GS yang lebih baik dalam menjaga stabilitas dapat diatribusikan pada kemampuan *gain scheduling* untuk menyesuaikan parameter kontroler secara adaptif sesuai dengan perubahan dinamika sistem. Meskipun demikian, keuntungan ini diperoleh dengan kompromi berupa peningkatan error pada kondisi tertentu. Peningkatan error ini menunjukkan bahwa pada *setpoint* tinggi, pengaturan *gain scheduling* mungkin belum optimal sehingga respons kontroler menjadi kurang efektif dalam meminimalkan error kumulatif. Oleh karena itu, meskipun PID-GS mampu memberikan stabilitas sistem yang lebih baik, perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap parameter *gain scheduling* untuk mengurangi error pada *setpoint* tinggi.

Secara keseluruhan, metode PID-GS menunjukkan performa yang lebih baik dalam hal waktu respons dan stabilisasi sistem. Keunggulan ini menjadikan PID-GS sebagai metode yang lebih efektif dan efisien untuk pengendalian ketinggian pada tangki spherical yang merupakan sistem nonlinear atau sistem dengan dinamika yang berubah-ubah. Pendekatan *gain scheduling* dapat secara adaptif menyesuaikan parameter kontrol sesuai dengan kondisi operasi.

#### IV. KESIMPULAN

Penggunaan metode kontrol PID dengan kombinasi *gain scheduling* menunjukkan performa yang lebih baik dalam hal waktu respons dan stabilitas sistem. Hal ini terlihat pada parameter performa berupa *rise time*, *final value*, *settling time*, dan *overshoot* yang lebih baik pada setiap variasi  $h_s$ . Namun, hasil analisis unjuk kinerja menggunakan perhitungan nilai error kumulatif selama rentang seluruh waktu yang terlihat pada parameter ITAE, IAE, ITSE, dan ISE dengan nilai *setpoint*  $h_s$  yang lebih tinggi dari 25 cm menunjukkan bahwa kinerja dari kontroler PID-GS kurang efektif dalam meminimalkan error kumulatif. Oleh karena itu, meskipun PID-GS mampu memberikan stabilitas sistem yang lebih baik perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap parameter PID yang menjadi parameter *gain scheduling* untuk mengurangi error pada *setpoint* yang lebih tinggi. Dengan optimasi yang lebih baik PID-GS berpotensi memberikan kinerja yang konsisten pada seluruh rentang operasi sehingga stabilitas sistem dapat tetap dipertahankan tanpa mengorbankan nilai error secara signifikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Bharathi, C. Selvakumar, and A. Kalpana, "Model based Controller Design for a Spherical Tank," *IOSR J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 74–79, 2014, doi: 10.9790/1676-09267479.
- [2] C. Urrea and Y. Garcia-Garcia, "Design and Performance Analysis of Level Control Strategies in a Nonlinear Spherical Tank," *Processes*, vol. 11, no. 3, 2023, doi: 10.3390/pr11030720.
- [3] R. A. Haryanto, "Perancangan Sistem Kendali Level Air pada Deaerator Menggunakan Kendali PID Studi Kasus PLTU 2x110 MW Teluk Balikpapan," *Simetris*, pp. 1–23, 2020.
- [4] C. Urrea and F. Pérez, "Design and comparison of strategies for level control in a nonlinear tank," *Processes*, vol. 9, no. 5, 2021, doi: 10.3390/pr9050735.
- [5] D. Anjar Nyawa, A. Trimulyono, and H. Yudo, "Analisis Kekuatan Spherical Vessel Tank 42-T-404 G PT. Pertamina dengan Variasi Ketebalan dari Grade Material," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 11, no. 4, pp. 48–58, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [6] M. C. R. Muhammad Ali Reza, Mohammad Miftachul Munir, "Design Spherical Storage Tank for Storage LPG on Project Tenau, Kupang," pp. 20–23, 2020, [Online]. Available: [http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain\\_spektra\\_indo](http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indo)
- [7] S. Boobalan, K. Lakshmi, and S. Gobhinath, "Mathematical modelling and simulation of non-linear PID controller for spherical tank level control in oil and gas industry," *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, no. 7, pp. 1389–1394, 2019.
- [8] S. Rahmani, S. A. Rosana, and G. H. Tian, "Pengaplikasian Kontroler PID Pada Sistem Kontrol Level Ketinggian Air Menggunakan MATLAB," *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali dan Elektron. Terap.*, vol. 10, no. 2, pp. 174–181, 2022.
- [9] M. Vinodhini, "Real-Time Level Control of Spherical Tank Process using Gain Scheduled PID Controller," *J. Adv. Res. Instrum. Control Eng.*, vol. 09, no. 3&4, pp. 1–7, 2022, doi: 10.24321/2456.1398.202201.
- [10] C. N. Hamdani, W. W. Adi, and D. O. Anggriawan, "Comparative Study on Fuzzy Supervision and Gain Scheduling for Nonlinear Level Control System," *Proc. 2nd Borobudur Int. Symp. Sci. Technol. (BIS-STE 2020)*, vol. 203, pp. 493–497, 2021, doi: 10.2991/aer.k.210810.085.
- [11] T. Bowo Setiyo, A. Triwiyatno, and Sumardi, "Perancangan Model Predictive Control (Mpc) Pada Proses Quadruple Tank," *Transient*, vol. 2, pp. 565–572, 2013.
- [12] G. Forte, F. Alberini, M. Simmons, and H. E. Stitt, "Use of acoustic emission in combination with machine learning: monitoring of gas-liquid mixing in stirred tanks," *J. Intell. Manuf.*, vol. 32, no. 2, pp. 633–647, 2021, doi: 10.1007/s10845-020-01611-z.
- [13] S. A. Wananda, P. S. Maria, A. Ullah, and J. Jufrizel, "Desain Model Kendali Mrac-Pd Untuk Pengaturan Level Deaerator Pada Pt Pertamina Ru Ii Dumai," *J. Al-AZHAR Indones. SERI SAINS DAN Teknol.*, vol. 8, no. 1, p. 67, 2023, doi: 10.36722/sst.v8i1.1761.
- [14] R. B. Balam Naik and S. Kanagalakshmi, "Mathematical Modelling and Controller Design for Interacting Hybrid Two Tank System (IHITS)," *Proc. 4th Int. Conf. Inven. Syst. Control. ICISC 2020*, no.

- Icisc, pp. 297–303, 2020, doi: 10.1109/ICISC47916.2020.9171218.
- [15] S. M. Turkane, “Design Of Gain Scheduled PID Controller For Nonlinear Liquidlevel System,” *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 9, no. 10, 2020, [Online]. Available: [www.ijstr.org](http://www.ijstr.org)
- [16] P. P. Simanjuntak and A. Triwiyatno, “PENGATURAN SUHU DENGAN METODE GAIN SCHEDULING PI PADA PROTOTIPE INKUBATOR TELUR BERBASIS,” vol. 10, no. 3, pp. 84–93, 2022.
- [17] A. Khuriati, “Identifikasi dan Perancangan Pengendali PID Menggunakan Penduga ARX Terhadap Sistem Pemanas Udara dengan Kriteria ISE, IAE, ITSE, dan ITAE,” *Berk. Fis.*, vol. 15, no. 4, pp. 111–116, 2012.
- [18] A. A. M. Zahir, S. S. N. Alhady, W. A. F. W. Othman, A. A. A. Wahab, and M. F. Ahmad, “Objective functions modification of GA optimized PID controller for brushed DC motor,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 2426–2433, 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i3.pp2426-2433.