

## **DESAIN SISTEM KONTROL LEVEL CAIRAN DENGAN METODE PID BERBASIS PLC**

**Ratna Ika Putri<sup>\*1)</sup>, Hendra Mars Setiawan<sup>1,2)</sup>, Budhy Setiawan<sup>1)</sup>, Sunu Hasta Wibowo<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia

<sup>2)</sup> Teknik Elektro, Politeknik Negeri Banjarmasin, Banjarmasin, Indonesia

e-mail: [ratna.ika@polinema.ac.id](mailto:ratna.ika@polinema.ac.id), [mars097setiawan@gmail.com](mailto:mars097setiawan@gmail.com), [budhy.setiawan@polinema.ac.id](mailto:budhy.setiawan@polinema.ac.id),  
[hasta@poliban.ac.id](mailto:hasta@poliban.ac.id)

Diterima: 1 Juni 2022 – Direvisi: 6 Juni 2022 – Disetujui: 16 Juni 2022

### **ABSTRACT**

*This article discusses the water level control of the tank using PID control which is implemented on PLC (Programmable Logic Control) with HMI interface. This plant system consists of a controlled tank, a supply tank, a water level sensor, a water faucet in the form of a motorized valve, PLC and HMI. In previous studies, the plant system used usually only has a controlled tank without a supply tank so that the control of the system becomes simpler. However, in this study a supply tank was also used so that the flow of water flowing in controlling the water level would depend on the water level of the supply tank and the opening of the water faucet. This plant system with a tank that has an open outlet pipe is a classic system that is non-linear so linearization is needed in its control. In order for the system to be linearized, it is assumed that both the supply tank and the controlled tank only operate within a certain value range. The realization of a water level control system using a PID controller was made and tested for its effectiveness at the setpoint values of 10 cm and 20 cm. Based on the simulation and experimental results, it was found that the system worked well where the PID control was able to stabilize the system at both setpoint values where the obtained overshoot were below 10%.*

**Keywords:** Water level, level control, PID controller, PLC (Programmable Logic Control), Zero-pole cancellation.

### **ABSTRAK**

*Dalam artikel ini dibahas pengontrolan level air satu tangki menggunakan kontrol PID yang diimplementasikan pada PLC (Programmable Logic Control) dengan interface HMI. Sistem plant ini terdiri dari sebuah tangki terkontrol, tangki penyuplai, sensor level air, keran air berupa motorized valve, PLC dan HMI. Pada penelitian terdahulu sistem plant yang digunakan biasanya hanya memiliki sebuah tangki terkontrol tanpa ada tangki penyuplai sehingga pengontrolan sistemnya menjadi lebih sederhana. Namun dalam penelitian ini juga digunakan tangki penyuplai sehingga debit air yang dialirkan dalam pengontrolan level air akan tergantung oleh faktor ketinggian air tangki penyuplai dan bukaan keran air. Sistem plant ini dengan tangki yang memiliki pipa outlet yang terbuka merupakan sistem klasik yang bersifat nonlinear sehingga dalam pengontrolannya diperlukan linearisasi. Agar sistemnya dapat dilinearisasikan maka diasumsikan bahwa baik tangki penyuplai maupun tangki terkontrol hanya beroperasi dalam kisaran nilai tertentu saja. Realisasi dari sistem pengontrolan level air menggunakan controller PID ini dibuat dan diuji efektivitasnya pada nilai setpoint 10 cm dan 20 cm. Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen diperoleh bahwa sistem bekerja dengan baik dimana kontrol PID mampu menstabilkan sistem pada kedua nilai setpoint dimana nilai overshoot yang diperoleh berada dibawah 10%.*

**Kata Kunci:** Kontrol level, Kontrol PID, Level air, PLC (Programmable Logic Control), Zero-pole cancellation.

## **I. PENDAHULUAN**

**P**ENGONTROLAN level air atau cairan pada sebuah tangki merupakan salah satu persoalan kontrol yang menarik khususnya dalam hal pengembangan metode controller [1],[2],[3], pengembangan sensornya [4], maupun sebagai media untuk pengajaran/pelatihan penerapan teori teknik kontrol [5],[6],[7]. Beragam metode controller telah digunakan untuk menyelesaikan persoalan ini, diantaranya dengan menggunakan kontrol PID [1],[5],[6],[7] maupun kombinasi metode kontrol PID dengan metode

lainnya [2],[3],[8]. Dalam persoalan pengontrolan ini, aktuator yang digunakan umumnya berupa keran/valve [2],[6],[7], pompa dan valve [8], ataupun hanya dengan pompa saja [9]. Pada penelitian sebelumnya, pemodelan sistem kontrol level cairan biasanya mengasumsikan tekanan pada sumber cairan adalah tetap sebagaimana [1],[3]. Padahal tekanan sumber ini berpengaruh terhadap laju debit cairan yang keluar melalui pipa penghubung dan aktuator yang digunakan untuk menyuplai cairan ke dalam tangki terkontrol (penampung). Dengan mengetahui besarnya tekanan ini maka besarnya debit cairan dapat pula diketahui sehingga pengontrolan level cairan pada tangki terkontrol akan lebih akurat. Untuk menyelesaikan persoalan tersebut maka dalam penelitian ini diusulkan penggunaan tangki lain sebagai sumber cairan dan memperhitungkannya dalam penurunan model sistem.

Persoalan lain yang muncul pada sistem ini adalah adanya pipa outlet yang ada pada bagian bawah tangki terkontrol yang selalu terbuka. Akibatnya laju debit cairan yang keluar akan berubah secara dinamis dan ini berbanding lurus dengan tekanan cairan pada tangki terkontrol. Besarnya tekanan ini dipengaruhi oleh faktor dimensi tangki, luasan penampang pipa, dan ketinggian level cairan pada tangki terkontrol. Semakin tinggi nilai *setpoint* level cairan pada tangki terkontrol maka akan semakin besar debit cairan yang keluar (melalui pipa outlet). Oleh karena itu pengontrolan level cairan pada tangki terkontrol menjadi lebih dinamis. Dalam penelitian ini digunakan metode kontrol PID untuk menyelesaikan persoalan kontrol level cairan pada sebuah tangki dimana pada bagian bawah tangki terdapat pipa outlet yang selalu terbuka.

Dengan adanya pipa outlet pada bagian bawah tangki terkontrol ini, maka pada dasarnya sistem tersebut bersifat tak-linear (*nonlinear*) sehingga solusi untuk mengatasi persoalan ini adalah dengan membawanya ke dalam sistem linear. Untuk memenuhi sifat sistem linear ini, maka dilakukan pembatasan terhadap daerah operasi dari level air tangki terkontrol yang diperbolehkan, yaitu berkisar antara 0 cm sampai dengan 30 cm. Penggunaan daerah operasi yang sempit ini akan membuat sistemnya dapat didekati dengan pendekatan sistem linear. Sehingga kontribusi dari penelitian ini adalah terkait dengan pengembangan sistem kontrol level air menggunakan kontrol PID yang diterapkan pada sebuah tangki dengan pipa terbuka dibagian bawahnya serta pemodelan sistem dengan memasukkan tangki lain sebagai sumber cairan.

Aplikasi dari pengontrolan level cairan (*liquid*) ini secara luas dapat ditemukan di industri [2], seperti untuk pengontrolan level untuk bahan kimia ataupun proses kontrol untuk minyak [1]. Pemilihan metode kontrol PID ini karena metode ini cukup populer digunakan di industri dimana struktur kontrollernya yang sederhana (yang terdiri dari tiga bagian) namun efektif untuk pengendalian sistem yang bersifat linear. Realisasi dari desain controller ini yang kemudian diimplementasikan ke dalam PLC (*Programmable Logic Control*) [10] karena devais ini (PLC) merupakan sebuah controller dengan standar industri. Manfaat dari implementasi sistem kontrol ini selain untuk pengembangan metode kontrol, juga dapat pula digunakan sebagai alat praktek untuk mendemonstrasikan penerapan sistem kontrol.

## II. METODE PENELITIAN

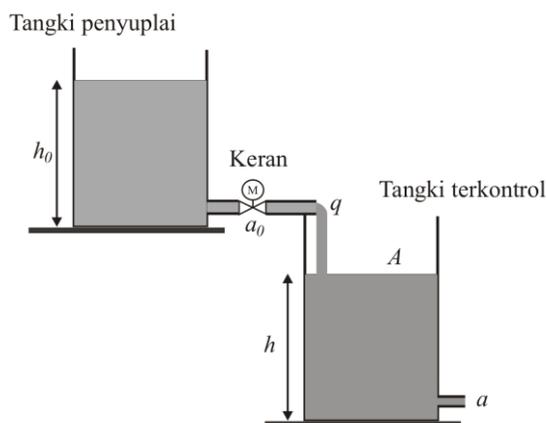
Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi : (a) perancangan model sistem untuk aktuator dan tangki, kemudian (b) perancangan kontrol PID dengan menggunakan fungsi transfer yang diperoleh dari penurunan persamaan sistem secara keseluruhan. Pendekatan yang dilakukan dalam penelitian ini berbeda dengan metode yang dilakukan oleh [1] maupun [2], dimana keduanya hanya menggunakan fungsi transfer dari model sebuah tangki saja (tanpa memasukkan model aktuatornya). Langkah berikutnya, yaitu (c) melakukan simulasi menggunakan program Malab/Simulink maupun (d) eksperimen dengan PLC dengan antarmuka HMI (*human machine interface*) yang direalisasikan pada sistem pengontrol level air. Dalam simulasi, penentuan tuning terhadap controller gain dapat dilakukan secara matematis dengan menggunakan konsep *root locus* yaitu dengan memilih akar persamaannya agar selalu berada didaerah bidang sebelah kiri dari sumbu imajiner. Sebaliknya pada eksperimen, penentuan controller gain dilakukan secara *trial-and-error*.

### A. Model Tangki Terkontrol

Dalam penelitian ini diajukan sistem tangki terkontrol beserta tangki penyuplai sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Sistem ini terdiri dari sebuah tangki dengan dimensi ukuran tangki sesuai

TABEL 1  
PARAMETER SISTEM PLANT UNTUK KONTROL LEVEL AIR SATU TANGKI

Simbol	Kuantitas	Nilai dan Satuan
$A$	luas penampang tangki	$4,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
$a$	luas penampang pipa outlet	$7,85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ (diameter: 10 mm)
$h_s$	Tinggi level air pada tangki terkontrol	0,25 m
$K_e$	Konstanta EMF	0,01 V/rad/detik
$J$	Momen inersia rotor	0,01 kg.m <sup>2</sup>
$K_t$	Konstanta motor torque	0,01 N.m/A
$b$	Konstanta motor viscous friction	0,1 N.m.detik
$L$	Induktansi listrik	0,0 H
$R$	Resistansi listrik	1 Ohm
$a_0$	Luas penampang pipa inlet (input)	$3,57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (diameter 21.33 mm atau jari-jari 1/2 inch)
$A_0$	Luas penampang tangki penyuplai	$4,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
$h_0$	Tinggi level air pada tangki penyuplai	0,5 m
$g$	gravitasi	9,81 m/s <sup>2</sup>



Gambar 1. Model level air satu tangki

dengan parameter yang diberikan pada Tabel 1. Pada bagian sisi bawah dari tangki terkontrol terdapat pipa outlet yang terbuka bebas tanpa ada aktuator untuk membuka/menutup. Model dinamis dari sistem pengontrolan level air satu tangki dapat ditunjukkan sebagaimana Gambar 1. Model ini dapat diturunkan dengan memodifikasi persamaan *fluid level control* yang dijabarkan oleh [11]. Dalam sistem ini terdapat 2 tangki yaitu *tangki penyuplai* dan *tangki terkontrol* dimana diantara kedua tangki terdapat keran penghubung berupa *motorized valve*. Penurunan model dari sistem tersebut dapat dirumuskan bahwa perubahan Model matematis fluida satu tangki dengan luas penampang yang berbeda dapat dituliskan pada Persamaan 1.

$$\frac{d}{dt} \left( \int_0^h A(h) dh \right) = q - a\sqrt{2gh} \quad (1)$$

dimana  $h$  adalah ketinggian level air,  $q$  adalah debit air yang masuk pada tangki terkontrol sebagai kontrol input,  $a$  merupakan luasan pipa, sedangkan  $\sqrt{2gh}$  adalah kecepatan aliran air. Dengan memodifikasi Persamaan 1 dimana tangki yang digunakan memiliki penampang yang tetap ( $A$ ), maka Persamaan 1 dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan 2.

$$A \frac{dh}{dt} = q - a\sqrt{2gh} \quad (2)$$

Sistem dalam Persamaan 2 merupakan sistem nonlinear karena adanya akar kuadrat. Untuk itu, persamaan tersebut perlu dilakukan linearisasi sehingga dihasilkan persamaan linear. Penurunan persamaan nonlinear untuk sistem ini sebelumnya telah dilakukan oleh [5] dengan cara pendekatan deret Taylor. Dengan menggunakan pendekatan yang sama melalui deret Taylor maka akan diperoleh Persamaan 3 dan 4.

$$\sqrt{h} = h_s^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{1!} \frac{1}{2} h_s^{-\frac{1}{2}} (h - h_s) - \frac{1}{2!} \frac{1}{4} h_s^{-\frac{3}{2}} (h - h_s)^2 + \frac{1}{3!} \frac{3}{8} h_s^{-\frac{5}{2}} (h - h_s)^3 + \dots \quad (3)$$

$$\sqrt{h} = h_s^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} h_s^{-\frac{1}{2}} (h - h_s) - \frac{1}{8} h_s^{-\frac{3}{2}} (h - h_s)^2 + \frac{3}{48} h_s^{-\frac{5}{2}} (h - h_s)^3 + \dots \quad (4)$$

dimana  $h_s$  adalah suatu titik operasi. Dengan menyederhanakan Persamaan 4 dengan hanya menggunakan orde 1, maka akan kita peroleh Persamaan 5.

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{a\sqrt{2gh_s}}{A} - \frac{a}{2A} \sqrt{\frac{2g}{h_s}} (h - h_s) + \frac{q}{A} \quad (5)$$

Persamaan 5 dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan 6.

$$\frac{dh}{dt} = f(h, u) = f(h_s, u_s) + \frac{\partial f}{\partial h} (h - h_s) + \frac{\partial f}{\partial u} (q - q_s) \quad (6)$$

Pada saat *steady-state* maka digunakan Persamaan 7.

$$f(h_s, q_s) = 0 \quad (7)$$

Dengan menggunakan variabel pada Persamaan 8.

$$\tilde{h} = h - h_s, \quad \tilde{q} = q - q_s \quad (8)$$

Maka Persamaan 6 dapat kita tuliskan menjadi Persamaan 9 dan 10.

$$\frac{d\tilde{h}}{dt} = \frac{d}{dt} (h - h_s) = \frac{\partial f}{\partial h} \Big|_{h_s} (h - h_s) + \frac{\partial f}{\partial q} \Big|_{q_s} (q - q_s) \quad (9)$$

$$\frac{d\tilde{h}}{dt} = \frac{\partial f}{\partial h} \Big|_{h_s} (h - h_s) + \frac{\partial f}{\partial q} \Big|_{q_s} (q - q_s) \quad (10)$$

Dimana Persamaan 11 dan 12 sebagai berikut.

$$\frac{\partial f}{\partial h} \Big|_{h_s} = \frac{\partial (-a\sqrt{2gh} + q)}{A \partial h} \Big|_{h_s} = -\frac{a}{2A} \sqrt{\frac{2g}{h}} \Big|_{h_s} = -\frac{a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h}} \Big|_{h_s} = -\frac{a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_s}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial f}{\partial q} \Big|_{q_s} = \frac{\partial (-a\sqrt{2gh} + q)}{A \partial q} \Big|_{q_s} = \frac{1}{A} \Big|_{q_s} = \frac{1}{A} \quad (12)$$

Sehingga diperoleh Persamaan 13.

$$\frac{d}{dt} (h - h_s) = -\frac{a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_s}} (h - h_s) + \frac{1}{A} (q - q_s) \quad (13)$$

Jika digunakan notasi untuk  $x = (h - h_s)$  dan  $u = (q - q_s)$ , maka didapat Persamaan 14

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{a}{A} \sqrt{\frac{g}{2h_s}} x + \frac{1}{A} u \quad (14)$$

atau dapat dituliskan menjadi Persamaan 15.

$$\dot{x} = -\frac{1}{T}x + \frac{1}{A}u \quad (15)$$

dimana  $T$  dapat diperoleh dari nilai masing-masing variabel pada Tabel 1 sesuai dengan Persamaan 16

$$T = \frac{A}{a} \sqrt{\frac{2h_s}{g}} = 0,00869 \quad (16)$$

sehingga persamaan keadaan ruang (*state-space*) dari tangki air dapat dituliskan menjadi Persamaan 17 dan 18.

$$\dot{x} = -0,00869x + 25u \quad (17)$$

$$y = x \quad (18)$$

Dengan mengubah Persamaan 17 dan 18 kedalam fungsi transfer, kita peroleh Persamaan 19 dan 20.

$$sX = -0,00869X + 25U \quad (19)$$

$$Y = X \quad (20)$$

Maka dengan memasukkan Persamaan 20 kedalam Persamaan 19 akan didapat Persamaan 21.

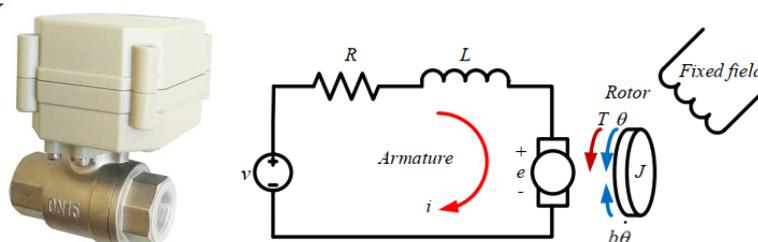
$$G_s(s) = \frac{Y}{U} = \frac{25}{(s + 0,00869)} \quad (21)$$

Dimana  $G_s(s)$  adalah fungsi transfer untuk tangki terkontrol.

#### B. Model Keran (*Motorized Valve*)

Dalam pemodelan keran untuk mengalirkan air dari tangki penyuplai ke tangki terkontrol sebagaimana Gambar 1, digunakan model servo motor. Sebagaimana karakter dari keran ini, apabila aktuatur diberi tegangan 10 V maka keran akan terbuka secara penuh, dan sebaliknya, jika diberi 0 V maka keran akan menutup sempurna. Oleh karena itu dapat kita asumsikan bahwa model keran ini akan mirip seperti sebuah servo motor untuk mengendalikan posisi. Apabila aktuatur diberi sinyal inputan 0V adalah sama dengan posisi sudut 0 derajat, sedangkan 10V akan sama dengan posisi sudut 180 derajat. Model ini dapat diterima karena pada kasus yang lain, sebagaimana diberikan oleh [8], model pompa yang digunakan juga menggunakan model DC motor untuk mewakili berupa pompa air. Perbedaan mencolok antara model [8] dengan model yang diturunkan disini adalah bahwa dalam pemodelan disini keran (*motorized valve*) merupakan model servomotor dengan karakter *proporsional-valve* sedangkan model yang digunakan pada [8] adalah model dc motor untuk kecepatan motor, sehingga model aktuatur yang dihasilkan disini adalah fungsi transfer dengan orde tiga yang berbeda dengan fungsi transfer dari pompa [8] dengan orde dua. Karena sistem dari keran ini terpisah dari tangkinya, maka dalam penurunan model yang dibuat juga dilakukan secara terpisah. Namun demikian, pada saat simulasi dilakukan, model aktuatur keran dan model tangki terkontrol akan digabung menjadi satu kesatuan.

Sebagaimana Gambar 2, model DC motor dapat diturunkan melalui persamaan torsi (Persamaan 22) dan tegangan (Persamaan 23).



Gambar 2. Model dc motor

$$T = K_t i \quad (22)$$

$$e = K_e \dot{\theta} \quad (23)$$

Dengan menggunakan rumus Kirchoff dan memasukkan Persamaan 23, maka sistem pada Gambar 2 dapat kita tuliskan sebagai Persamaan 24 dan 25.

$$v = L \frac{di}{dt} + iR + e \quad (24)$$

$$L \frac{di}{dt} + iR = v - K_e \frac{d\theta}{dt} \quad (25)$$

Sedangkan persamaan newton atau mekanis dari motor pada Gambar 2 diperoleh Persamaan 26.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = K_t i \quad (26)$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace, kita dapati bahwa Persamaan 25 dan 26 sebagai Persamaan 27 dan 28.

$$s^2 J \theta + s b \theta = K_t I \Rightarrow I = \frac{(s^2 J + s b) \theta}{K_t} \quad (27)$$

$$s L I + R I = V - s K \theta \Rightarrow V = (s L + R) I + s K \theta \quad (28)$$

Maka dengan menggabungkan Persamaan 27 dan 28, diperoleh Persamaan 29.

$$V = s K \theta + \frac{(R + s L)(s b + s^2 J) \theta}{K} \quad (29)$$

Maka berdasarkan Persamaan 26 diperoleh persamaan fungsi transfer sesuai dengan Persamaan 30 dan 31.

$$\frac{\theta}{V} = \frac{K}{s((Js + b)(Ls + R) + K^2)} \quad (30)$$

$$G_m(s) = \frac{K}{s(LJ s^2 + (Lb + RJ)s + (bR + K^2))} \quad (31)$$

dimana  $G_m(s)$  adalah fungsi transfer untuk dc motor, sedangkan nilai  $K$  pada Persamaan 29 adalah  $K = K_t = K_e$ .

Jika induktansi  $L$  diasumsikan sangat kecil sehingga dapat diabaikan dan dengan memasukkan nilai-nilai parameter pada Tabel 1, maka Persamaan 31 dapat disederhanakan menjadi Persamaan 32 [12].

$$G_m(s) = \frac{0,01}{s(0,01s + 0,1001)} \quad (32)$$

dimana model ini merupakan fungsi transfer sistem loop terbuka dengan orde dua. Agar karakteristik dari model ini sesuai dengan model *motorized valve* yang bersifat *proporsional-valve*, maka model (32) ditambahkan satu proportional gain yang bernilai 30 yang membentuk sistem loop tertutup dengan *feedback* 1. Penyederhanaan dari sistem loop tertutup ini dapat dituliskan dalam bentuk fungsi transfer (sistem loop terbuka) menggunakan Persamaan 33.

$$\tilde{G}_m(s) = \frac{30}{s^2 + 10,01s + 30} \quad (33)$$

Selain dari itu, apabila nilai input berupa fungsi step dengan nilai 10 (atau 10V) diberikan pada sistem, maka keluaran dari sistem ini haruslah sama dengan keluaran maksimal dari pipa *inlet*, yaitu 0.11192 m<sup>3</sup>/detik. Dengan demikian, nilai ini digunakan sebagai konstanta gain pada Persamaan 33, sehingga akan diperoleh Persamaan 34.

$$\tilde{G}_m(s) = \frac{0,33576}{s^2 + 10,01s + 30} \quad (34)$$

dimana Persamaan 34 adalah fungsi transfer dengan orde 2. Untuk penyederhanaan sistem, Persamaan 34 ini dapat direduksi menjadi sistem dengan orde 1, yaitu Persamaan 35.

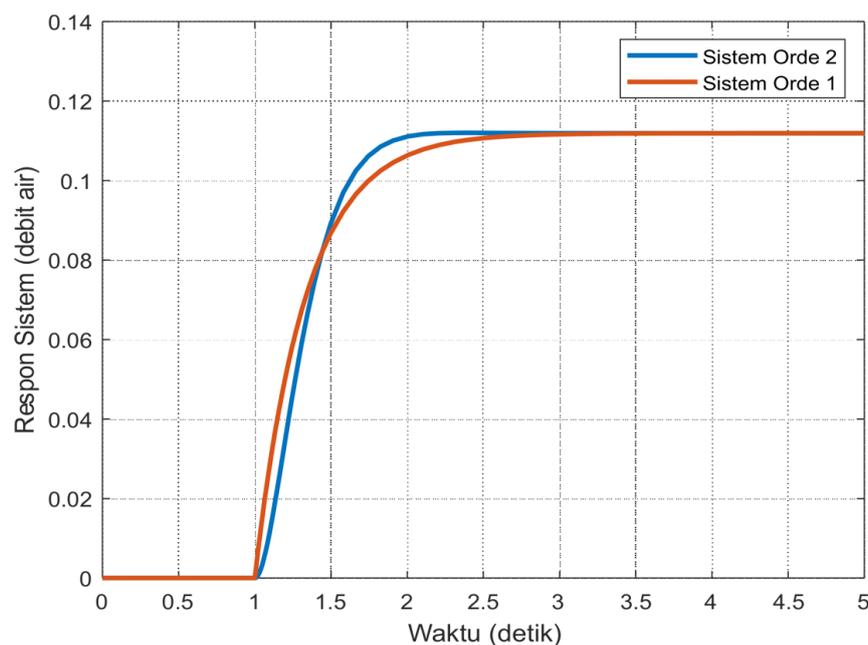
$$G_m^*(s) = \frac{0,33576}{10,01s + 10} \quad (35)$$

Sehingga menjadi Persamaan 36.

$$G_m^*(s) \approx \tilde{G}_m(s) \quad (36)$$

Penyederhanaan ini dapat dilihat dari respon sistem terhadap fungsi step untuk fungsi transfer berorde 2 dan fungsi transfer berorde 1 sebagaimana diberikan pada Gambar 3. Secara grafis, pada Gambar 3 diberikan bagaimana respon dari fungsi transfer loop terbuka untuk model keran berorde 2 dan orde 1 apabila input berupa fungsi step diberikan dengan nilai akhir adalah 10. Dari gambar tersebut terlihat bahwa keduanya memiliki respon yang hampir mendekati. Dengan demikian, model sistem keran berupa *motorized valve* pada Persamaan 34 dapat direduksi menjadi fungsi transfer orde 1 sebagaimana dituliskan dalam Persamaan 35.

Nilai dari *steady-state* yang dicapai oleh sistem aktuator pada Gambar 3 adalah 0.11192. Nilai ini diperoleh dengan menggunakan asumsi bahwa jika level atau permukaan air berada pada tinggi  $h_0$  maka hal ini akan menghasilkan tekanan pada bagian dasarnya, dan jika air ini dialirkan maka kecepatan aliran yang bisa dicapai adalah Persamaan 37.



Gambar 3. Perbandingan respon sistem open loop dari fungsi transfer dari model keran

$$\sqrt{2gh_0} = 3,132 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \quad (37)$$

Dengan mengasumsikan bahwa bukaan keran maksimum terjadi apabila diberi tegangan 10V sehingga luasan penampang pipa *inlet*  $a_0$  akan memberikan debit air maksimum yang bisa dialirkan dari tangki penyuplai menuju tangki terkontrol. Debit aliran air ini dapat dihitung dengan Persamaan 38 [11].

$$q = a_0 \sqrt{2gh_0} = 1,1192 \times 10^{-3} \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad (38)$$

Dimana nilai  $h_0$  dan  $a_0$  diberikan pada Tabel 1. Persamaan 38 inilah yang digunakan sebagai pengali pada saat pemodelan keran sebagaimana Persamaan 34. Apabila diubah kedalam bentuk satuan lain, maka dapat diperoleh nilai debit air adalah Persamaan 39.

$$q = a_0 \sqrt{2gh_0} = 67,15 \text{ (L.min}^{-1}\text{)} \quad (39)$$

### C. Desain Kontrol PID

Pengontrolan level cairan pada sebuah tangki dapat dilakukan dengan menggunakan kontrol PID [1],[2],[3]. Berbeda dengan pendekatan sebelumnya, dalam penelitian ini digunakan metode *pole zero cancellation* [13],[14] dimana dalam metode ini bagian *zero* pada fungsi transfer kontrollernya dibandingkan dengan *pole* pada fungsi transfer sistem plantnya sehingga keduanya dapat saling menghilangkan (*cancellation*). Dengan menyamakan bagian *zero* dan *pole* ini maka sistem keseluruhan akan menjadi lebih sederhana dan hanya menyisakan sebuah integrator. Persyaratan penting agar kedua bagian ini dapat saling menghilangkan melalui penyamaan parameter sistem plant dengan bagian gain kontrollernya (yaitu  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ ) adalah dengan mengetahui nilai dari parameter sistem plant tersebut secara tepat.

Dalam implementasinya, simulasi yang dilakukan melalui simulink dapat ditentukan nilai gain kontrolnya yang memenuhi kondisi sedemikian sehingga sistem loop tertutupnya menjadi stabil. Hal ini dimungkinkan karena parameter dari sistem plant dapat diketahui dengan tepat secara teoritis yang diwujudkan dalam bentuk program simulasi. Namun, hal ini berbeda dengan eksperimen yang dilakukan melalui PLC, karena penentuan gain kontrolnya tidak serta merta dapat ditentukan dengan jelas karena parameter sistem plant sebenarnya sulit diketahui secara tepat. Oleh karena itu, penentuan gain kontrol dalam implementasinya melalui PLC dilakukan secara *trial-and-error* untuk mendapatkan hasil yang terbaik. Penentuan gain kontrol dalam eksperimen ini juga mengikuti prosedur yang umumnya dilakukan secara bertahap.

Berdasarkan model aktuator dan model tangki terkontrol pada Persamaan 21 dan 36. Fungsi transfer dari sistem plant ini diberikan oleh Persamaan 40.

$$H(s) = G_m^*(s)G_s(s) \quad (40)$$

dan dengan memasukkan Persamaan 4 dengan menggunakan Persamaan 21 dan 35 akan didapat Persamaan 41.

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{8,394}{10,01s^2 + 10,087s + 0,0869} \\ &= \frac{0,8394}{s^2 + 1,00769s + 0,00868132} \end{aligned} \quad (41)$$

Untuk merancang sistem kendali menggunakan kontrol PID, digunakan Persamaan 42.

$$\begin{aligned} C(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \\ &= K_d \frac{s^2 + \frac{K_p}{K_d} s + \frac{K_i}{K_d}}{s} \end{aligned} \quad (42)$$

$C(s)$  adalah fungsi transfer untuk blok controller dimana  $K_p, K_i$  dan  $K_d$  adalah gain controller yang dapat dituning sedemikian sehingga sistem secara keseluruhan dapat dibuat stabil. Dengan mengalikan fungsi transfer pada Persamaan 42 dan 41 akan diperoleh Persamaan 43.

$$C(s)H(s) = K_d \frac{s^2 + \frac{K_p}{K_d}s + \frac{K_i}{K_d}}{s} \frac{0,27952}{s^2 + 1,00769s + 0,00868132} \quad (43)$$

Dengan mengalikan bagian pengali dari  $C(s)$  dan pembagi dari  $H(s)$  akan diperoleh bahwa kedua persamaan ini akan saling menghilangkan apabila nilainya sama, yaitu Persamaan 44 dan 45.

$$\frac{K_p}{K_d} = 1,00769 \quad (44)$$

$$\frac{K_i}{K_d} = 0,00868132 \quad (45)$$

Apabila kondisi dari Persamaan 44 dan 45 ini terpenuhi maka Persamaan 43 dapat disederhanakan menjadi Persamaan 46.

$$C(s)H(s) = \frac{K_d}{s} 0,27952 \quad (46)$$

Untuk memastikan bahwa sistem Persamaan 46 stabil, maka akar dari  $s$  harus berada pada bagian sebelah kiri bidang sumbu imajiner, yaitu dengan membuat Persamaan 47.

$$C(s)H(s) = -1 \quad (47)$$

dengan memasukkan Persamaan 46 kedalam Persamaan 47 akan diperoleh Persamaan 48.

$$s + K_d 0,27952 = 0 \quad (48)$$

Sehingga dengan memastikan bahwa  $K_d > 0$ , maka akan diperoleh *root locus* dari Persamaan 48 berada di sebelah kiri bidang sumbu imajiner. Dengan menghubungkan Persamaan 48 dengan Persamaan 44 dan 45, maka diperoleh Persamaan 49.

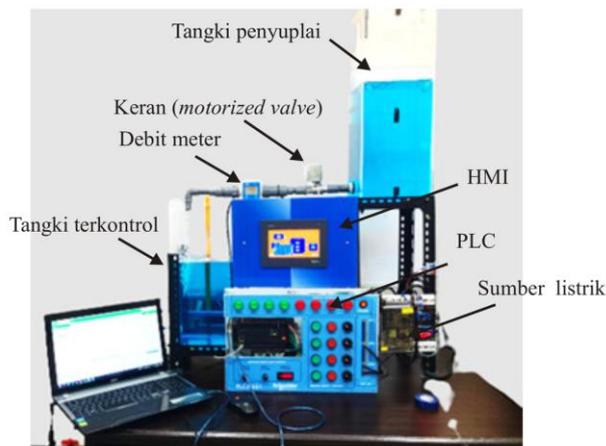
$$\begin{aligned} K_p &= 1,00769 K_d \\ K_i &= 0,00868132 K_d \end{aligned} \quad (49)$$

Dengan demikian, apabila nilai gain controller untuk  $K_d > 0$  ditentukan, maka gain controller  $K_p$  dan  $K_i$  sebagaimana Persamaan 49 juga akan diketahui.

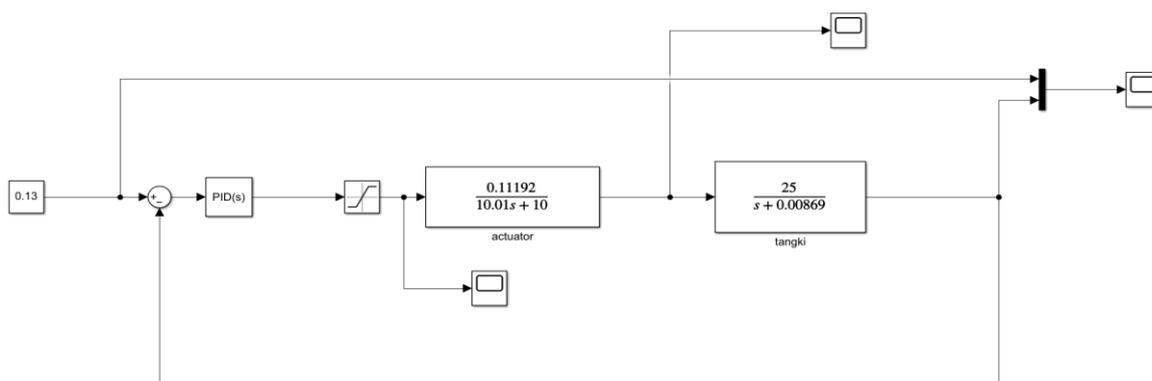
#### D. Implementasi Desain Controller pada PLC

Penerapan kontrol PID untuk pengontrolan level air satu tangki menggunakan PLC dapat ditemukan dalam penelitian sebelumnya [7],[8]. Dalam kedua penelitian tersebut, digunakan kombinasi pompa air dan valve untuk mengalirkan air pada tangki yang akan dikendalikan. Selain dari itu, dalam [7] dibandingkan respon dari controller P, PI, dan PID dalam penerapan pengontrolan level air satu tangki. Hal ini berbeda dengan [8] dimana controller PID dikombinasikan dengan metode *Particle Swam Optimization (PSO)* untuk menentukan gain controller PID. Berbeda dengan kedua literatur sebelumnya, dalam penelitian ini digunakan kontrol PID yang diimplementasikan pada PLC dengan cara mempelajari model sistem dan simulasi sistem. Berbeda dengan simulasi, dalam eksperimen, penentuan gain controller pada PLC dilakukan secara *trial-and-error*.

Untuk mempermudah perhitungan debit air yang masuk melalui pipa *inlet*, maka diasumsikan bahwa level air pada tangki penyuplai bersifat tetap ( $h_0 = 0,5$  m) sehingga debit air yang keluar akan tergantung pada sudut bukaan keran yang dihasilkan dari masukan berupa tegangan dari keluaran controller PID. Nilai tegangan ini mulai dari 0V sampai dengan 10V dimana nilai 0V akan memberikan tutupan maksimal sedangkan 10V berarti bukaan maksimal. Dengan demikian, apabila 0V diberikan pada



Gambar 4. Realisasi sistem pengontrolan level air satu tangki menggunakan PLC.



Gambar 5. Simulasi Sistem Kendali Level Satu Tangki dengan Simulink

*motorized valve* maka pipa *inlet* tertutup rapat, sedangkan jika diberikan 10V maka bukaan pipa *inlet* sesuai dengan luasan pipa *inlet* dimana diameter pipa *inlet* adalah 1 inchi (2,54 cm).

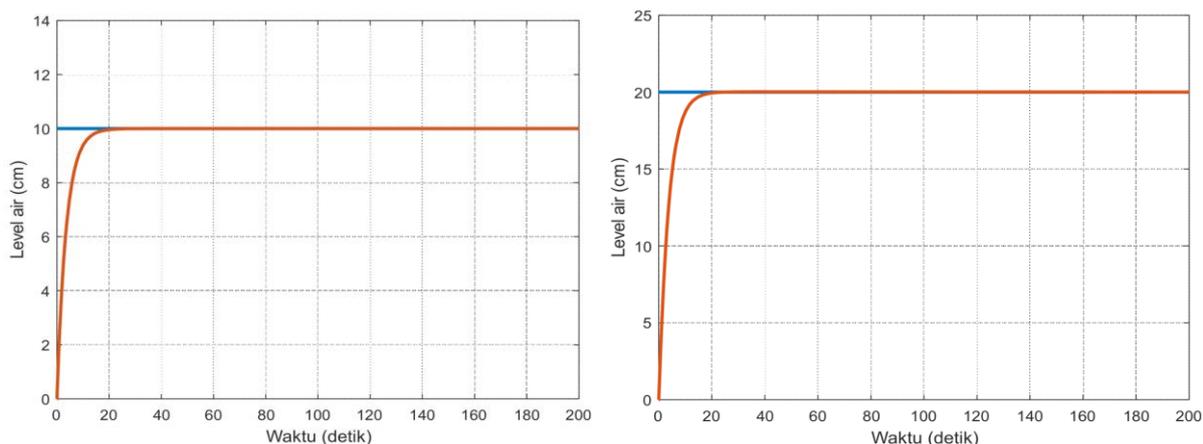
Realisasi dari sistem pengontrolan level air dapat diberikan pada Gambar 4. Ada 2 tangki yang digunakan dimana salah satunya diantaranya adalah tangki terkontrol yang menjadi objektif dari persoalan kontrol ini. HMI (*human machine interface*) digunakan sebagai antarmuka (*interface*) bagi perancang controller dalam mengubah nilai setpoint maupun untuk keperluan tuning gain kontrol. Pada tangki penyuplai, air akan selalu dipompa apabila ketinggian airnya melewati batas minimal yang telah ditentukan, serta akan menghentikan pompa air apabila batas ketinggian maksimalnya dilewati. Sebagai umpan balik digunakan sensor ketinggian air yang direndam ataupun diposisikan pada bagian dasar dari tangki terkontrol. Sebuah alat untuk membaca debit air tidak masuk dalam bagian umpan balik sistem loop tertutup, namun hanya digunakan sebagai monitoring aliran air yang mengalir dari tangki penyuplai ke tangki terkontrol.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

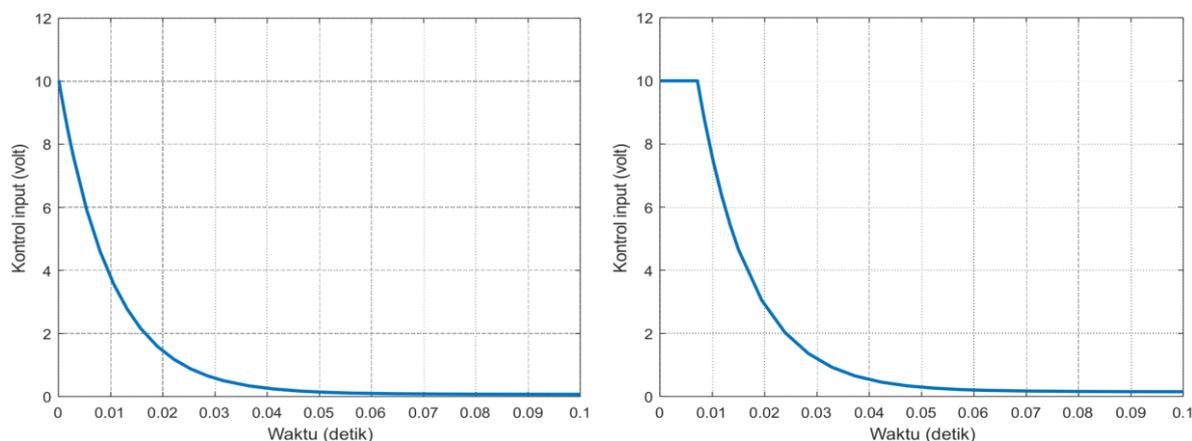
#### A. Hasil Simulasi

Dalam simulasi ini dilakukan dengan menggunakan program Matlab/Simulink sebagaimana diberikan pada Gambar 5. Skenario yang digunakan dalam simulasi ini adalah membandingkan respon sistem untuk kasus dimana (1) gain controller yang dipilih sesuai dengan tehnik yang diberikan pada persamaan (49), sedangkan untuk kasus (2) diasumsikan bahwa tuning yang dilakukan untuk nilai controller gain kurang tepat atau tidak mengikuti tehnik yang diberikan pada persamaan (49). Nilai-nilai controller gain untuk kedua kasus ini diberikan pada Tabel 2. Berdasarkan hasil simulasi, Gambar 6-8 merupakan respon sistem untuk level air, kontrol input, dan debit air pada kasus pertama, sedangkan Gambar 9, 10, dan 11 adalah respon sistem untuk level air, kontrol input, dan debit air pada skenario kasus yang kedua. Nilai setpoint yang ditampilkan hanya untuk nilai setpoint 10 cm dan 20 cm dimana nilai ini juga berlaku pada hasil eksperimen sehingga bisa dibandingkan.

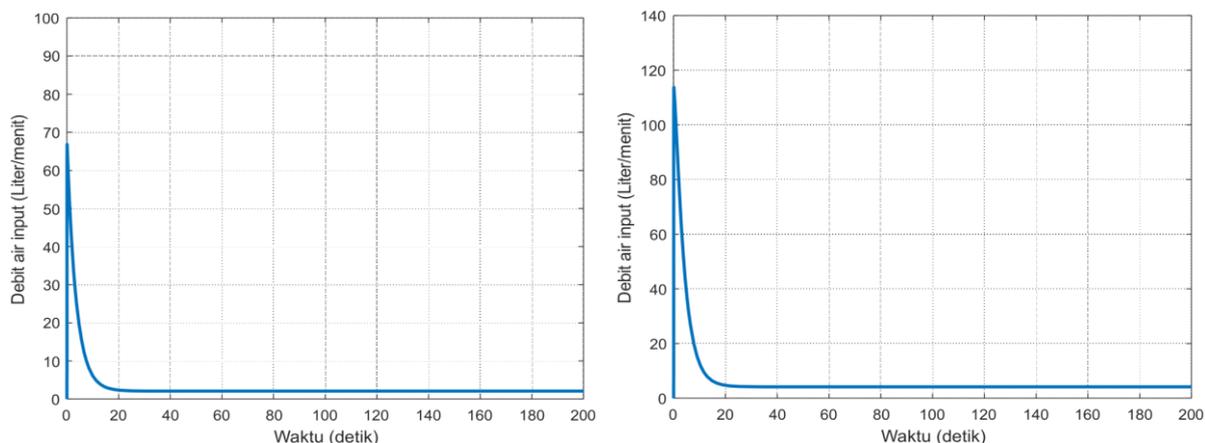
Secara umum, baik untuk kasus pertama maupun kasus kedua, hasil simulasi menunjukkan bahwa



Gambar 6. Respon level air untuk nilai setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)



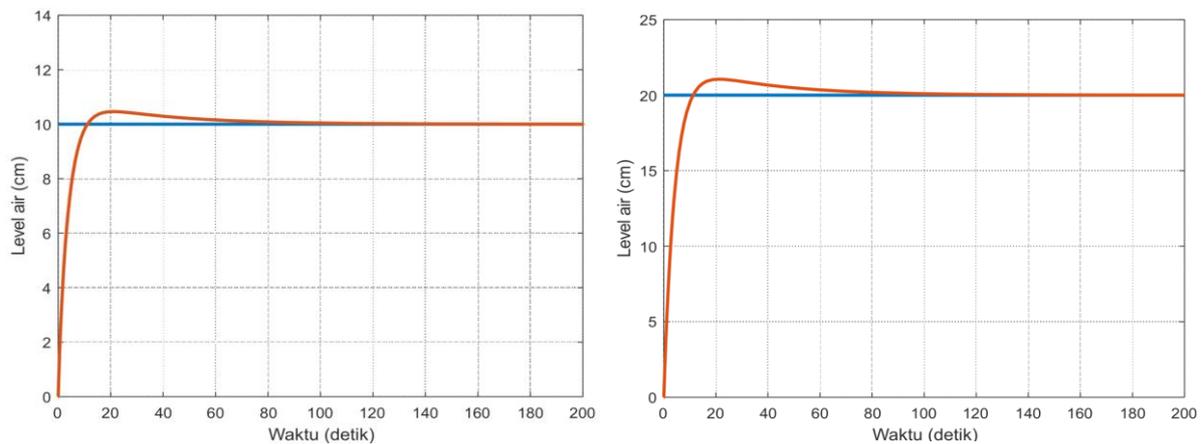
Gambar 7. Respon kontrol input untuk nilai setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)



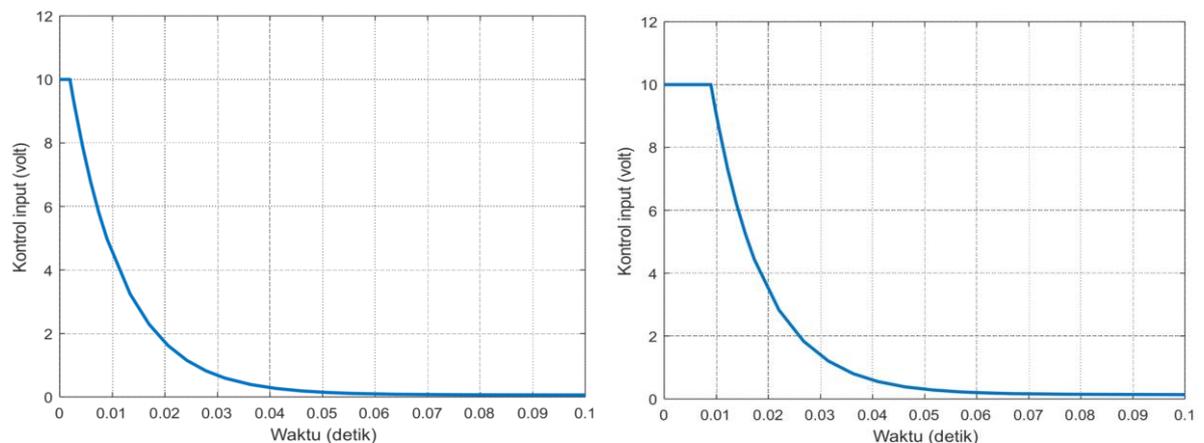
Gambar 8. Respon debit air untuk setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)

sistem dapat dikendalikan dimana respon level air akan konvergen atau akan menuju ke nilai posisi setpointnya. Hal ini terjadi selama akar-akar dari sistem loop tertutup tersebut berada disebelah kiri dari sumbu imajiner. Respon sistem untuk level air pada Gambar 6 tidak muncul adanya *overshoot* karena sistemnya merupakan sistem dengan orde satu. Berbeda dengan Gambar 9 dimana tidak terjadi *cancellation* karena nilai gain dari kontroller tidak sesuai dengan kondisi yang diberikan oleh persamaan (49). Oleh karenanya, terdapat *overshoot* pada respon sistem level airnya sebagaimana Gambar 9. Nilai *overshoot* untuk setpoint 10 cm dan 20 cm berbeda, namun berada dikisaran rata-rata 4,2%.

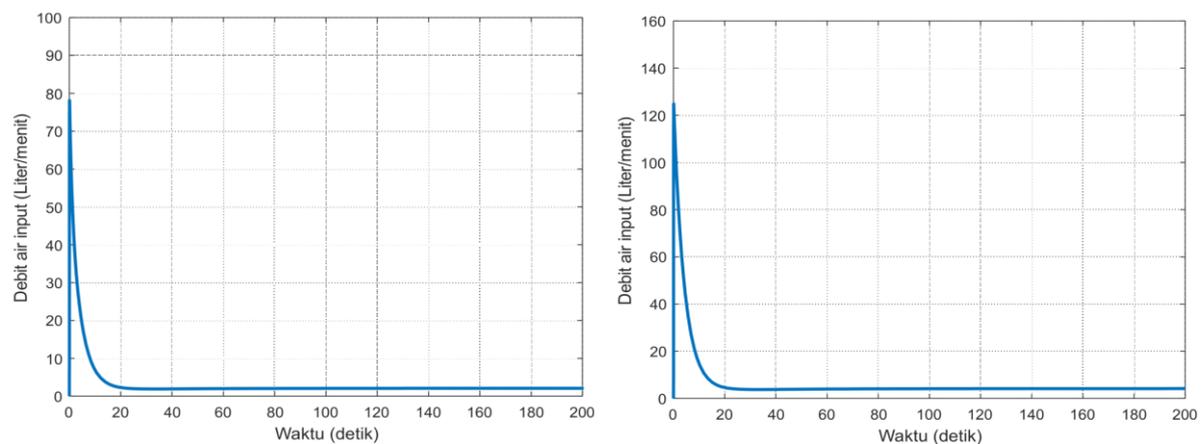
Berdasarkan hasil simulasi, baik untuk skenario 1 dan 2, diketahui bahwa untuk masing-masing nilai setpoint (10 cm dan 20 cm), nilai debit air awalnya akan lebih tinggi sesuai dengan nilai setpointnya,



Gambar 9. Respon level air untuk nilai setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)

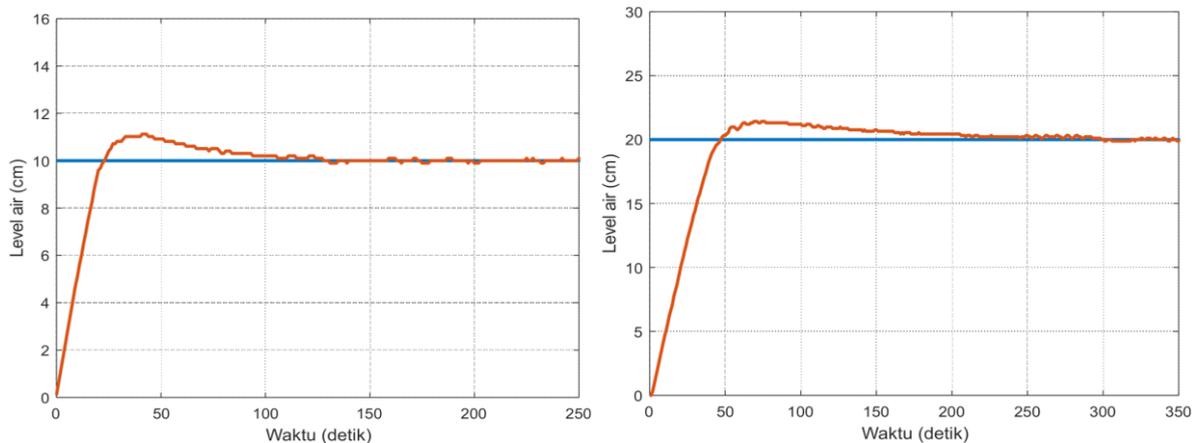


Gambar. 10. Respon kontrol input untuk nilai setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)

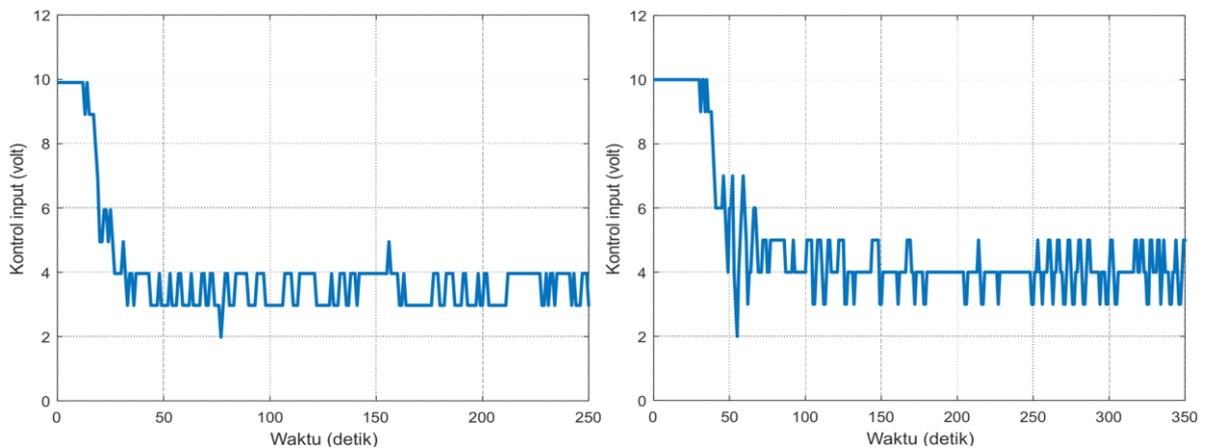


Gambar. 11. Respon debit air untuk setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)

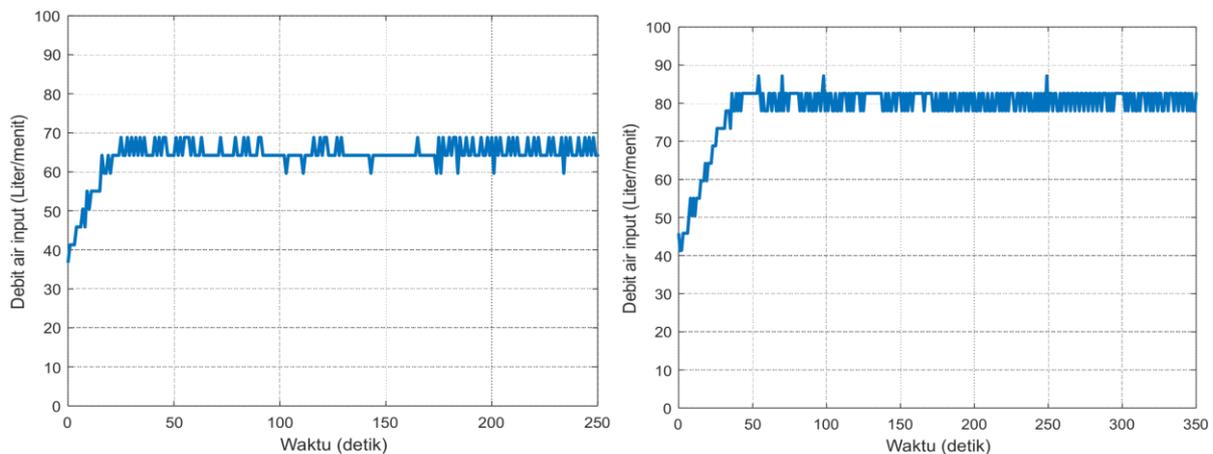
selanjutnya pada saat level air mencapai nilai setpointnya maka nilai debit air input akan berakhir pada suatu nilai tertentu dimana nilai ini selalu berada diatas 0. Ini disebabkan karena sistem mencoba untuk mengkompensasi aliran air yang keluar dari tangki terkontrol dimana nilai dari debitnya akan tergantung dari ketinggian level air pada tangki terkontrol. Semakin tinggi level air tangki terkontrol maka akan semakin deras aliran air yang keluar dari pipa outlet yang selalu terbuka. Pada Gambar 8 dan 11, terlihat bahwa debit air untuk setpoint 10 cm adalah sekitar kurang dari 70 liter/menit dan 80 liter/menit untuk masing-masing kasus 1 dan 2. Selanjutnya, terkait kontrol input berupa tegangan terlihat pada Gambar 7 dan 10. Keduanya menunjukkan bahwa maksimum keluaran dari output controller adalah 10V yang berarti bahwa keran terbuka secara maksimal. Setelah level air mencapai nilai setpointnya kemudian tegangan dari keluaran controller akan turun dan mendekati nilai 0, namun tidak tepat 0V. Ini



Gambar 12. Respon level air untuk nilai setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)



Gambar 13. Respon kontrol input untuk nilai setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)



Gambar 14. Respon debit air untuk setpoint 10 cm (kiri) dan setpoint 20 cm (kanan)

menunjukkan bahwa pada posisi tersebut keran masih terbuka walaupun kecil, sehingga air yang mengalir pada tangki terkontrol akan sama dengan debit air yang keluar dari pipa outlet pada bagian bawah tangki terkontrol.

### B. Hasil Eksperimen

Dalam eksperimentasi, realisasi rancangan sistem controller diimplementasikan pada PLC Schneider tipe TM221CE40R dimana waktu sampling (*time sampling*) yang digunakan adalah  $T_s = 0,5$  ms. Untuk nilai masing-masing controller gain PID diberikan pada Tabel 2. Eksperimen dilakukan untuk melihat respon dari sistem untuk dua buah nilai setpoint, yaitu 10 cm dan 20 cm sebagaimana dengan nilai setpoint yang dilakukan pada simulasi. Hasil eksperimen dapat ditunjukkan pada Gambar 12, 13 dan 14.

TABEL 2  
 PERBANDINGAN PERFORMA KONTROLLER PID DALAM SIMULASI DAN EKSPERIMEN

Jenis Pengujian	Simulasi				Eksperimen	
<i>Gain control</i>	$K_p = 1.00769,$		$K_p = 1.02769,$		$K_p = 90,$	
	$K_i = 0.00869,$		$K_i = 0.02869,$		$K_i = 7,$	
	$K_d = 1$		$K_d = 1.2$		$K_d = 40$	
<i>Setpoint (cm)</i>	10	20	10	20	10	20
<i>Rise Time (sec)</i>	7,8942	8,0422	6,9468	7,1004	17,20	33,5699
<i>Overshoot (%)</i>	0,0020	0,1055	4,6225	5,0911	6,000	8,5221
<i>Steady-state error</i>	0,0000	0,0211	0,0046	1,0182	0,900	1,3044

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12 terlihat bahwa respon sistem berupa level air mengalami *overshoot* diatas 5%. Selanjutnya pada Gambar 13 ditunjukkan tegangan keluaran yang diperoleh dari hasil perhitungan kontroller PID. Nilai 10 V adalah nilai maksimum yang dapat diberikan pada *motorized valve* sehingga keran dapat terbuka sempurna, sebaliknya pada posisi kesetimbangannya diperoleh bahwa hasil tegangan yang keluar dari kontroller adalah kurang dari 4V untuk setpoint 10 cm dan 4.5V untuk setpoint 20 cm.

Pada Gambar 14 diperoleh hasil bahwa apabila nilai setpoint ditinggikan maka debit air input yang dialirkan ke tangki terkontrol pun juga ikut naik. Ini sesuai dengan prediksi atau perhitungan yang diberikan pada persamaan model tangki dengan pipa outlet yang terbuka, dimana debit air yang keluar tergantung dari ketinggian level airnya. Gambar 14 mengkonfirmasi bahwa apabila setpoint 10 cm, maka grafik debit air yang diperoleh menunjukkan nilai yang lebih rendah daripada debit air untuk setpoint 20 cm. Untuk setpoint 10 cm, debit air yang mengalir stabil dikisaran 65 liter/menit, sebaliknya untuk setpoint 20 cm diperoleh debit air yang stabil mengalir pada kisaran 80 liter/menit. Perbedaan nilai aktual debit air pada eksperimen dan nilai debit air pada simulasi hanya berkisar antara 14 sampai dengan 40 liter/menit. Meski demikian, tren yang terjadi adalah sama, yaitu ada kenaikan debit air untuk nilai setpoint yang berbeda. Makin tinggi nilai setpoint maka debit air input juga ikut meningkat untuk mengkompensasi debit air yang keluar dari pipa outlet.

Metode dalam penentuan tuning kontroller gain PID dalam eksperimen tersebut dilakukan secara *trial-and-error* walaupun ada metode lain yang dapat digunakan dalam penentuan nilai kontroller gain tersebut. Kesulitan yang diperoleh dalam implementasi dari persamaan (49) adalah bahwa sebenarnya nilai perbandingan pada persamaan tersebut tidak dapat diketahui dengan pasti sehingga metode *pole and zero cancellation* melalui manipulasi matematis pada bagian denominator dari  $H(s)$  dan bagian pembagi dari  $C(s)$  tidak dapat dilakukan. Sebagai contoh, apabila diketahui nilai  $K_p = 1,00769K_d$  dan  $K_i = 0,00868132K_d$  maka akan mudah untuk menentukan nilai gain kontroller proporsional dan integralnya, yaitu dengan cara menentukan terlebih dahulu nilai  $K_d$ . Namun pada penerapannya akan sulit memastikan korelasi antara gain proporsional dan derivatif yang dihubungkan dengan perbandingan nilai 1,00769 dan 0,00868132 untuk bagian integralnya.

Untuk melihat kinerja dari kontroller PID yang diterapkan untuk mengontrol level air pada satu tangki, maka diberikan tabulasi data pada Tabel 2 dimana perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen diberikan untuk parameter *rise time*, *overshoot*, dan *steady state error*. Berdasarkan dari Tabel ini diperoleh bahwa kinerja kontroller PID dalam mengontrol level air relatif bagus karena nilai *overshoot* dan *steady-state error* cukup kecil. Perbedaan yang cukup besar terlihat pada bagian eksperimen dengan nilai setpoint 20 cm karena nilai *overshoot* dan *steady-state error*nya relatif besar dibandingkan lainnya. Sebaliknya, untuk nilai *rise time* terlihat bahwa secara umum hasil simulasi jauh lebih kecil dibandingkan dengan hasil eksperimen dimana rata-rata dibawah 10 detik. Hal ini menunjukkan bahwa untuk mencapai kestabilan, diperlukan waktu lebih singkat dalam simulasi dibandingkan realisasinya pada hasil eksperimen. Jika dibandingkan dengan [15], dapat dilihat bahwa baik hasil simulasi dan eksperimen yang ditunjukkan pada Tabel 2 kinerja kontrollernya relatif kurang baik dibandingkan dengan [15]. Namun demikian, secara konfigurasi sistem yang digunakan pada [15] memang berbeda dengan apa yang diusulkan dalam penelitian ini. Perbedaan ini dapat terjadi apabila debit air yang dialirkan pada tangki terkontrol tidak memiliki batasan sehingga kenaikan level air untuk mencapai nilai setpoint akan lebih cepat. Untuk memperbaiki respon sistem ini dapat dilakukan melalui perbaikan

penggunaan metode kontrolnya termasuk identifikasi sistemnya, maupun perbaikan dimensi tangki penyuplai sehingga debit air yang keluar dari pipa *inlet* bisa lebih besar.

#### IV. KESIMPULAN

Dalam artikel ini telah diusulkan sistem pengontrol level air dengan konfigurasi berupa sebuah tangki penyuplai, tangki terkontrol, dan keran (*motorized valve*). Model untuk aktuator dan tangki diturunkan dengan menggunakan batasan debit air yang dimungkinkan berdasarkan ketinggian air pada tangki penyuplai. Selanjutnya perancangan kontroler dilakukan dengan menggunakan kontrol PID dengan menggunakan *zero pole cancellation* untuk penentuan nilai kontroler gain dimana metode ini diterapkan untuk simulasi. Selanjutnya dalam penentuan kontroler gain untuk eksperimen dilakukan dengan cara *trial-and-error*. Berdasarkan dari hasil simulasi dan eksperimen diperoleh bahwa rancangan sistem kontroler PID ini mampu mengendalikan level air satu tangki dengan konfigurasi sistem sebagaimana yang diusulkan. Dari kedua hasil simulasi dan eksperimen ini diperoleh bahwa performa dari kontroler ini cukup baik. Hal ini terlihat dari nilai *overshoot* rata-rata untuk nilai setpoint 10 cm dan 20 cm yang masih berada dibawah 10% dan ini masih berada dibawah margin dari standar *overshoot* IEEE yaitu kurang dari 15%.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. A. Mahmood, A. T. Nawaf, and S. A. Mohamedali, "Simulation and Performance of Liquid Level Controllers for Linear Tank," *J. Teknol.*, vol. 82, no. 3, pp. 75–82, Apr. 2020, doi: 10.11113/jt.v82.14245.
- [2] P. Jiang, "Summary of PID Control System of Liquid Level of a Single Capacity Tank," in *International Conference on Advances in Optics and Computational Sciences*, 2021, pp. 1–9.
- [3] A. Aboelhassan, M. Abdelgeliel, E. E. Zakzouk, and M. Galea, "Design and Implementation of Model Predictive Control Based PID Controller for Industrial Applications," *Energies*, vol. 13, pp. 1–22, 2020.
- [4] S. Bhattacharya, M. Chakraborty, P. K. Sadhu, and B. Bhadra, "Study of A PID Control System for Liquid Level Measurement Using Non Contact type Sensor," in *International Conference on Computational Intelligence & IoT*, 2018, pp. 555–559.
- [5] V. Karade, A. Shinde, and S. Sutar, "Design and Implementation of PID Controller for Single Capacity Tank," *Int. J. Innov. Res. Sci.*, vol. 5, no. 11, pp. 18898–18904, 2016.
- [6] X. Li and Z. Li, "The Application of Linear and Nonlinear Water Tanks Case Study in Teaching of Process Control," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 113, p. 012165, Feb. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/113/1/012165.
- [7] S. Yahya, S. W. Jadmiko, K. Wijayanto, and A. R. A. Tahtawi, "Design and implementation of training module for control liquid level on tank using PID method based PLC," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, pp. 1–8.
- [8] S. Howimanporn, S. Chookaew, and W. Sootkaneung, "Design of PLC for Water Level Control Employing Swarm Optimization-Based PID Gain Scheduling," in *2018 International Conference on Control and Robots (ICCR)*, Sep. 2018, pp. 63–67, doi: 10.1109/ICCR.2018.8534490.
- [9] L. A. Sabri and H. A. Al-Mshat, "Implementation of Fuzzy and PID Controller to Water Level System using LabView," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 116, no. 11, pp. 6–10, 2015.
- [10] R. M. Afram and M. J. Marie, "Design and Implementation of Optimal PID Controller Using PLC for Al-Tahady ESP," *Int. J. Image, Graph. Signal Process.*, vol. 12, no. 5, pp. 1–12, Oct. 2020, doi: 10.5815/ijigsp.2020.05.01.
- [11] J.-J. E. Slotine and W. Li, "Feedback Linearization," in *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, inc, 1991, pp. 207–271.
- [12] K. Ogata, *Teknik Kontrol Automatik*, 2nd ed. Erlangga, 1997.
- [13] D. M. Sajnekar, S. B. Deshpande, and R. M. Mohril, "Comparison of Pole Placement & Pole Zero Cancellation Method for Tuning PID Controller of A Digital Excitation Control System," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 3, no. 4, pp. 1–7, 2013.
- [14] H. Du, X. Hu, and C. Ma, "Dominant Pole Placement with Modified PID Controllers," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 17, no. 11, pp. 2833–2838, Nov. 2019, doi: 10.1007/s12555-018-0642-4.
- [15] M. U. Adam, M. H. Ali, and S. L. Dhar, "Determination of the Performance of Neural PID, Fuzzy PID and Conventional PID Controllers on Systems with Several Overshoots," *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 771–778, 2015.