Desain Pengendali Fractional Order PID $(PI^{\lambda}D^{\mu})$ Dengan Metode A Modified ZN untuk Pengendalian Level Air pada Pressurized Water Reactor (PWR)

Rissa Damayanti (1,a)*, Abdul Halim (1)*

(1) Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia, 16424 Email: (a*) rissa.damayanti@ui.ac.id

Diterima (05 Juli 2021), Direvisi (22 Juli 2021)

Abstract. Controller Design A Modified Fractional Order PID (PI $^{\lambda}$) D $^{\mu}$) for Controlling Pressurizer Level in Pressurized Water Reactor (PWR). The water level control system on the pressurizer is carried out to maintain safety when the PWR reactor is operating. This control is carried out by maintaining the water level in the pressurizer at a certain height setpoint. The air level will change according to the conditions of the nuclear reactor, such as when there is a process of filling, heating, cooling, changes in the concentration of boric acid in the primary loop, as well as the possibility of a leak in the main circulation pump or primary pipeline. Various control methods have been developed with the aim of getting a control system with the best response rate and safety system. This study aims to answer the existing problems by using the Fractional Order PID control system and prove that using the control system will give better results than the existing system. In this study, the gain control configuration of FOPID that best fits the design requirements is obtained with a Kp value of 223,764, Ki of 132.404, Kd of 93.98 and 0.0119, of 1.0080, which results in a faster setting time of 285 times and a maximum pass time. (maximum overshoot) 48.6 times lower than the PID Integer controller combined with CMAC in the previous study.

Keywords Pressurizer, PWR, Fractional Order PID (FOPID), Proportional Integral Derivative (PID), A Modified ZN.

Abstrak. Desain Pengendali A Modified Fractional Order PID $(PI^{\lambda}D^{\mu})$ untuk Pengendalian Level Pressurizer pada Pressurized Water Reactor (PWR). Sistem pengendalian level air pada pressurizer ini dilakukan untuk menjaga keselamatan saat reaktor PWR sedang beroperasi. Pengendalian ini dilakukan dengan mempertahankan level air di pressurizer pada setpoint ketinggian tertentu. Ketinggian level air akan berubah sesuai dengan kondisi dari reaktor nuklir seperti bila terjadi proses pengisian, pemanasan, pendinginan, perubahan konsentrasi boric acid dalam kalang primer, serta kemungkinan adanya kebocoran di pompa sirkulasi utama atau jalur pipa primer. Berbagai metode pengendalian telah banyak dikembangkan dengan tujuan untuk mendapatkan sistem pengendalian dengan tingkat respond sistem dan keselamatan paling baik. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab permasalah yang ada dengan menggunakan sistem pengendalian Fractional Order PID serta membuktikan bahwa dengan menggunakan sistem pengendali tersebut akan memberikan hasil yang lebih baik dari aplikasi sistem yang sudah ada. Pada penelitian ini diperoleh konfigurasi gain pengendali FOPID yang paling sesuai dengan persyaratan desain dengan nilai Kp sebesar 223.764, Ki sebesar 132.404, Kd sebesar 93.98 dan λ sebesar 0.0119, μ sebesar 1.0080, yang menghasilkan waktu penetapan (settling time) lebih cepat 285 kali dan lewatan maksimum (maximum overshoot) lebih rendah 48.6 kali bila dibandingkan dengan pengendali PID Integer digabung dengan CMAC pada penelitian sebelumnya.

Kata kunci: Pressurizer, PWR, Fractional Order PID (FOPID), Proportional Integral Derivative (PID), A Modified ZN.

PENDAHULUAN

Pressurizer merupakan bagian dari reaktor PWR yang berfungsi menjaga agar tekanan di dalam daur primer pada suatu harga atau set point tertentu. Hal ini dapat terjadi, jika tinggi muka level air (level cairan) konstan. Dengan demikian, bila terjadi perubahan level cairan maka dengan sendirinya terjadi perubahan tekanan pressurizer. Sehingga dibutuhkan sistem pengendalian level air di pressurizer, dimana pengendalian dilakukan dengan mempertahankan level air pressurizer ketinggian pada tertentu. Ketinggian level air tersebut akan berubah seiring dengan perubahan keadaan dari reaktor nuklir karena adanya proses pemanasan, pengisian, pendinginan, serta akibat adanya perubahan dari konsentrasi boric acid dalam kalang primer, kemudian dapat juga akibat adanya kebocoran dari jalur pipa primer atau pompa sirkulasi utama. Tingkatan ketinggian dari level permukaan air yang terlalu rendah dapat membahayakan untuk pemanas secara umum posisinya adalah terendam di dalam tangki, namun sebaliknya bila level dari permukaan airnya terlalu tinggi dapat mengganggu kinerja dari spray flooding nozzle yang berada pada bagian atas tangki, hal ini dapat mengakibatkan tidak validnya sistem pengaturan tekanan yang ada pada pressurizer.

Ditinjau dari metode sistem pengendalian yang telah diterapkan untuk sistem pengendalian level air PWR menggunkan pengendali Proportional (P), Proportional-Integral (PI) serta Proportional-Integral dan Derivative (PID)[1][2]. Metode pengendali PID masih menghasilkan respon yang kurang stabil bila diberikan masukan parameter yang semakin banyak. Hal ini berdampak pada overshoot atau lewatan maksimum dari set point yang ditentukan sangat bergantung pada seberapa jauh ketepatan penentuan parameter Kp, Ki dan Kd[3][4]. Metode lainnya menggunakan aplikasi artificial neural network-radial basis (ANN-RBF) function [5] untuk memperbaiki sekaligus menghaluskan luaran kendali PID, yang selanjutnya di klaim lebih tahan terhadap interferensi.

Penelitian ini bertujuan untuk meniawab permasalah yang ada dengan menggunakan sistem pengendalian Fractional Order PID serta membuktikan dengan menggunakan sistem bahwa pengendali tersebut akan memberikan hasil yang lebih baik dari aplikasi sistem menggunak metode pengendali yang telah ada. Dalam penelitian ini terdapat dua hal yang akan dilakukan. Pertama, penelitian membahas dan menguraikan ini akan lengkap kinerja dari pengontrolan Fractional Order PID untuk berbagai variasi konfigurasi sehingga dapat diperoleh pemahaman yang utuh dari pengendali **FOPID** karakteristik dan diperoleh konfigurasi parameter Fractional Order PID terbaik dalam mengendalikan level permukaan air pressurizer di PWR. Kedua, sistem pengendalian level air pressurizer yang telah didesain pada penelitian sebelumnya akan dibandingkan penelitian dengan hasil dari Pembandingan dilakukan dengan menggunakan parameter berikut : nilai waktu naik (rise time), waktu penetapan (settling time), dan persentase lewatan maksimum (maximum overshoot) yang dihasilkan. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan dampak yang positif tentang pemahaman sistem kendali level air berbasis Fractional Order PID serta dapat diaplikasikan dengan baik.

METODE PENELITIAN

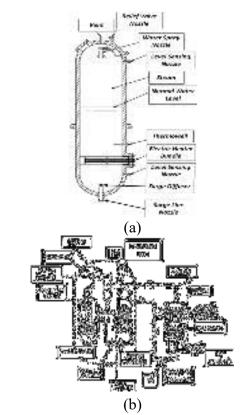
Pada bagian ini akan dijelaskan bagaimana metode-metode yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya. Pada sistem pembangkit listrik tenaga nuklir jenis Pressurized Water Reactor (PWR), pendinginan sistem menggunakan dengan tekanan tinggi dengan sistem primer memiliki sirkulasi membentuk siklus tertutup. Agar pemindahan panas dari reaktor tidak mendidih dibutuhkanlah tekanan tinggi tersebut. Disinilah fungsi

dari sebuah pressurizer yaitu membuat tekanan dan mennjaga agar tetap tinggi. Sebuah PLTN hanya memiliki satu unit pressurizer. Gambar 1.(a). menunjukkan letak sebuah pressurizer di PWR. blok pressurizer terdapat dua bagian yaitu bagian yang terisi air dan bagian yang berisi uap panas. Saat kondisi steady state, perbandingan air dengan kondisi saturasi berkisar 60%, dengan kondisi uap panas berkisar 40%. Kemudian untuk menjaga uap tersebut stabil tidak terlalu panas terdapat spray pada sistem pressurizer[6]. Selain itu terdapat sistem pemanas cadang yang berfungsi untuk menjaga kestabilan uap bila terjadi penurunan tekanan agar panas yang diteruskan ke steam generator pada keadaan stabil. Dalam hal ini berarti sebuah pressurizer sangat penting untuk mencegah terjadinya overpressure dan untuk menjaga kestabilan panas yang dihasilkan dari teras reaktor agar air pendingin tidak mendidih. Dan sistem pressurizer juga digunakan sebagai sistem keselamatan yaitu untuk penghalang dari terjadinya overpressure yang menyebabkan munculnya lepasan radionuklida kelingkungan sekitar.

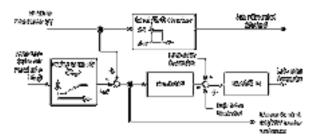
Rincian dari komponen yang menyusun pressurizer terdapat pada Gambar 1(a). Sistem utama pressurizer tersusun dari beberapa komponen antara lain: pressurizer vessel, surge line, electric immersion heaters dan system. spray pressurizer ini dilengkapi dengan beberapa valve/katup vang tidak terlihat pada Gambar 1(a), antara lain: safety valves, isolation valves dan relief valves serta pressurizer relief tank yang berfungsi sebagai sistem kontrol dan utamanya untuk penunjang keamanan sistem dan keselamatan. Pada Gambar 1(b) menunjukkan adanya dua jenis surge line yaitu volume insurge dan volume outsurge, dimana volume insurge adalah kondisi saat air pendingin primer masuk, sedangkan volume outsurge adalah kondisi saat air pendingi keluar primer guna

mengkondisikan temperatur air pendingin pada set point tertentu vang telah ditetapkan akibat adanya perubahan beban. Dengan kata lain perubahan volume akibat perubahan suhu berpengaruh pada kondisi ketinggian permukaan air serta tekanan gas pada pressurizer. Pengendalian ketinggian air pada sistem ini juga relatif sederhana mengintegrasikannya dengan pengaturan sistem pengisian air pendingin di kalang primer melalui ketinggial dari chemical and volume control system (CVCS).

Bila ketinggian air pressurizer menurun melewati set point yang ditetapkan sebelumnya maka akan ditambahkan seiumlah air. dan bila ketinggian air meningkat melebihi set point yang ditetapkan sebelumnya,



Gambar 1. (a) Posisi pressurizer pada rangkaian reaktor nuklir tipe PWR (b) detil konstruksinya[3]



Gambar 2. Sistem pengontrolan level air pada pressurizer (2)

maka akan dibuang sejumlah air dari sistem pendingin. Proses ini ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem pengendalian level dilakukan dengan tiga masukan kendali antara lain masukan level air dengan level referensinya, laju pengisian dan laju ekstraksi aliran. Sistem pengendalian dilengkapi juga dengan sistem pengaman bilamana terjadi penurunan level air yang signifikan, maka sistem isolasi akan menutup pressurizer sekaligus mematikan pemanas agar tidak terbakar.

Agar ketinggian air sesuai dengan maka referensinya proses pengisian dilakukan dengan mengubah sudut katup untuk pengisian alirannya. Perubahan dari suhu air rata-rata dari pendingin reaktor sangat berpengaruh pada referensi set point dari level air. Ekspansi volume air akan mengakibatkan ketinggian dari level air hal disebabkan bila suhu rata-rata pendingin naik, dan begitu pula sebaliknya. Dengan demikian, pengontrolan juga dapat dilakukan dengan memanfaatkan ekspansi atau kontraksi dari pendingin primer denan perubahan suhu memantau Sehingga. filosofi pengendalian pada Gambar adalah bagaimana 2 mengendalikan level air dengan mengamati perubahan temperatur rerata dari pendingin sehingga beban kerja **CVCS** reaktor terhadap fluktusi permintaan daya pembangkitan terkurangi.

Untuk memudahkan simulasi pengontrolan level air di pressurizer PWR, beberapa penelitian mengusulkan fungsi transfer untuk memodelkan sebuah pressurizer[7][5]. Fungsi transfer yang

dibuat ini berupa model independen pressurizer di PWR terlepas dari interaksi pengaruh teras reaktor, steam generator dan permintaan beban. Literatur menunjukkan bahwa perilaku pressurizer tersusun dari persamaan kekekalan massa, konservasi energi dan konservasi total volume yang salah satunya ditunjukkan secara sederhana di persamaan (4) [5]. Pada Persamaan 1. ini menunjukkan pemodelan dinamika ketinggian level pressurizer (dz/dt) dengan memperhitungkan beberapa parameter seperti luasan pressurizer (parameter diameter D dalam meter), laju massa aliran pendingin surge line (M1 dalam kg/m3), volume air pressurizer (v1 dalam m3), tekanan pressurizer (p dalam MPa) dan enthalpy air pada surge (h dalam satuan kJ/kg).

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{4}{\pi D^2} \left[v_1 \frac{dM_1}{dt} + M_1 \left(\frac{dv_1}{dp} \frac{dp}{dt} + \frac{dv_1}{dh_1} \frac{dh_1}{dt} \right) \right]$$
(1)

Selanjutnya persamaan differensial pressurizer yang terlinierisasi tersebut diatas ditransformasikan kedalam bentuk laplace seperti yang telah diperoleh dari penelitian sebelumnya dapat dilihat pada **Persamaan 2**. [8].

$$H(s) = \frac{10.05}{s^2 + 2s + 10.5} \frac{0.003}{s} \tag{2}$$

Fungsi alih pada persamaan 2 tersebut yang akan digunakan untuk mensimulasikan karakteristik level air di pressurizer, yang kemudian dikendalikan dengan metode pengendali *Fractional Order PID*, seperti yang akan diimplementasikan dalam penelitian ini.

Pengendali PID

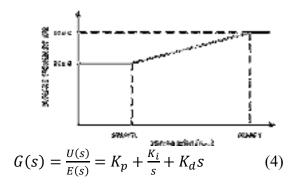
PID (Proporsional, Integral, Derivative) adalah pengendalian dengan parameter P,I dan D dengan model matematika terdiri dari masukan Gain+Integral+Derivative[9]. PID merupakan metode pengendali dengan model matematis yang baik karena error dapat diubah mendekati nol, pengendalian

kestabilan dapat dicapai dengan cara menyamakan nilai dari proses variabel dengan nilai set point. Meskipun PID merupakan metode pengendalian dapat dikatakan unggul, namun ketiga unsur P, I, D yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan, dapat berdiri sendiri atau dapat dipasangkan yang akan saling berpengaruh sehingga dapat menghasilkan sinyal keluaran atau respon pengendali terbaik dari sistem dikendalikan[10].

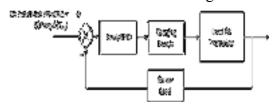
Definisi *PID*(t) sebagai hasil kendali output, sedangkan sebagai standar algoritma *PID* ditunjukkan pada **Persamaan 3**.:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

(3) dimana e(t) merupakan sinyal input dan u(t) merupakan sinyal output. Berdasarkan **Persamaan 3.**, maka fungsi transfer pengendali PID pada **Persamaan 4.**:



Gambar 3. Diagram Pengendalian Pressurizer dengan *PID*



Gambar 4. Contoh set point level pressurizer sebagai fungsi suhu rata-rata pendingin primer di PWR.

Tuning PID

A Modified Ziegler-Nichols Methode. Dua metode tuning classic untuk PI/PID controller diusulkan oleh Ziegler dan Nichols (Ziegler dan Nichols, 1943). Dalam Astrom dan Hagglund (1988), metode frekuensi domain Ziegler-Nichols untuk parameter pengendalian, memperoleh dimana critical point dapat didefinisikan sebagai titik dimana kurva Nyquist berpotongan dengan sumbu riil negatif, dan dipindahkan ke tertentu. Secara umum yang menggabungkan metode tuning classic ZN metode frekuensi domain dirumuskan dan dinamai oleh Astrom dan Hagglund (1988) sebagai metode A Modified Ziegler-Nichols (MZN)[11].Hal ini secara singkat digambarkan sebagai berikut:

Diberikan titik A pada kurva Nyquist dari proses (s): $G(j\omega_0) = r_a e^{j(\pi+\phi_a)}$, Misalkan titik A akan dipindahkan ke A1 yang diwakili oleh $G_1(j\omega_0) = r_b e^{j(\pi+\phi_b)}$, Diasumsikan bahwa pengontrol PID pada frekuensi ω_0 adalah $G_c(s) = r_c e^{j\phi_c}$. Kemudian dapat ditentukan pada **Persamaan 5**., berikut :

$$r_b e^{j(\pi + \phi_b)} = r_a r_c e^{j(\pi + \phi_a + \phi_c)}$$
 (5)

Sehingga, $r_c = r_b/r_a$ dan $\phi_c = \phi_b - \phi_a$. Jadi, berdasarkan analisis di atas, pengendali *PI* dan *PID* dapat dirancang sebagai berikut:

• Pengendali *PI A Modified ZN*Sistem pengendali *PI* dapat dirancang dengan menggunakan **Persamaan 6**. dan **7**., berikut :

$$K_p = \frac{r_b \cos(\phi_b - \phi_a)}{r_a}$$

$$T_I = \frac{\binom{6}{1}}{\frac{1}{\omega_0 \tan(\phi_b - \phi_a)}}$$

$$\binom{7}{1}$$

Dengan catatan bahwa $\phi_a > \phi_b$ untuk T_I bernilai positif. Untuk kondisi khusus, desain algoritma Ziegler-Nichols untuk pengendali PI dapat dirancang

menggunakan Persamaan 8. dan 9.

$$K_p = K_c r_b \cos \phi_b \tag{8}$$

$$K_p = K_c r_b \cos \phi_b$$
 (8)

$$T_i = -\frac{T_c}{2\pi \tan \phi_b}$$
 (9)

Dan dimana:

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c}$$
; $r_a = \frac{1}{K_c}$; $dan \, \phi_a = 0$

• Pengendali *PID A Modified ZN*

Sistem pengendali PID dapat dirancang menggunakan Persamaan 10. dan 11., berikut:

$$K_p = \frac{r_b \cos(\phi_b - \phi_a)}{r_a} \tag{10}$$

$$\omega_0 T_d = \tan(\phi_b - \phi_a) \tag{11}$$

Sebagai catatan bahwa gain K_n yang diperoleh pengendali Persamaan 6. dan 7. adalah unik, tapi nilai T_i dan T_d tidak unik. Kondisi tambahan sehingga harus diperkenalkan menentukan dua parameter terakhir ini secara unik. Metode yang umum untuk menentukan hubungan antara Ti dan TD terdapat pada Persamaan 12. dan 13., berikut:

$$T_i = \frac{1}{2\alpha\omega_0} \left(\tan(\phi_b - \phi_a) + \sqrt{4\alpha + \tan^2(\phi_b - \phi_a)} \right)$$
 (12)

$$T_d = \alpha T_i \tag{13}$$

Dimana nilai α yang direkomendasikan (Astrom dan Hagglund, 1991) adalah sebesar 1/4.

Persamaan tuning Ziegler – Nichols ditulis dapat ulang pada Persamaan 14., 15. dan 16., berikut:

$$K_p = K_c r_b cos \phi_b \tag{14}$$

$$T_i = \frac{T_c}{\pi} \left(\frac{1 + \sin \phi_b}{\cos \phi_b} \right) \tag{15}$$

$$T_d = \frac{T_c}{4\pi} \left(\frac{1 + \sin\phi_b}{\cos\phi_b} \right) \tag{16}$$

$$r_a = \frac{1}{K_c}$$
, $\phi_a = 0 \ dan \ \alpha = 1/4$

Terlihat bahwa pengendali PI dan PID dapat dirancang dengan pilihan r_b dan ϕ_b yang sesuai. Kemudian yg mempengaruhi desain pengendali adalah pemilihan nilai yang cocok untuk dua parameter ini untuk memberikan kinerja yang sesuai, dan selanjutnya metode tuning pengendali PI atau PID ini disebut "A Modified Tuning Ziegler – Nichols"

Fractional Calculus

Operator differintegral dinotasikan $_{a}^{t}D^{\alpha}$ merupakan kombinasi operator differential-integral yang digunakan pada calculus. Operator fractional menggabungkan fractional derivative dan fractional integral menjadi satu ekspresi dan didefinisikan pada Persamaan 17., berikut [11]:

$$_{a}D_{t}^{\alpha} = \begin{cases} \frac{d^{\alpha}}{dt^{\alpha}} & , Re \ \alpha > 0\\ 1 & , Re \ \alpha = 0\\ \int_{\alpha}^{t} (d\tau)^{-\alpha} & , Re \ \alpha < 0 \end{cases}$$

$$(17)$$

dimana $\alpha \in \mathbb{C}$ merupakan fractional order dan a, t merupakan batas operasi. Terdapat beberapa definisi untuk fractional derivative, diantaranya adalah definisi Caputo yang ada pada Persamaan 18., berikut:

$${}_{a}D_{t}^{\alpha}f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_{0}^{t} \frac{f^{(m)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}},$$

$$(18) \qquad m-1 < \alpha < m$$

dengan *m* merupakan integer pertama yang lebih besar dari α. Transformasi Laplace dari **Persamaan 6.** diuraikan pada Persamaan 19., berikut:

$$\mathcal{L}\{ {}_{0}D_{t}^{\alpha}f(t)\} = s^{\alpha}F(s) - \sum_{k=0}^{n-1}s^{\alpha-k-1}f^{(k)}(0), \qquad (19)$$
$$n-1 < \alpha \le n$$

dengan $n \in \mathbb{N}$. Untuk kondisi awal sistem nol, Persamaan 7. menjadi bentuk pada Persamaan 20., berikut:

$$\mathcal{L}\{ {}_{0}D_{t}^{\alpha}f(t)\} = s^{\alpha}F(s) \tag{20}$$

Tuning Fractional Order PID

Pada tahun 1999 dikembangkan suatu modifikasi dari Pengendali PID dengan menambahkan dua parameter baru yaitu λ mana masing-masing dan μ, yang merupakan order integral dan derivative. Pengendali tersebut dinamakan Pengendali Fractional Order PID $(PI^{\lambda}D^{\mu})$, yang perpaduan merupakan mana antara pengendali PID dan konsep fractional calculus. Bentuk model matematika dari Pengendali Fractional Order PID[12][13] terdapat pada Persamaan 21.:

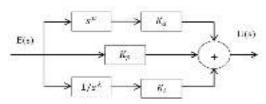
$$u(t) = K_n e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^{\mu} e(t)$$
 (21)

dimana D^{α} merupakan operator differintegral dengan order α sehingga berdasarkan **Persamaan 9.** diperoleh fungsi transfer Pengendali *Fractional Order PID* pada **Persamaan 22.** :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{F(s)} = K_p + \frac{K_i}{s^{\lambda}} + K_d s^{\mu}, (\lambda, \mu > 0)$$
 (22)

Pada Pengendali PID terdapat tiga parameter yaitu Kp, Ki dan Kd sedangkan untuk Pengendali FOPID memiliki dua parameter lebih yaitu λ dan μ . Proses tuning parameter kontrol menggunakan metode A Modified Ziegler-Nichols, untuk mendapatkan nilai parameter terbaik dan yang tepat digunakan pada proses ini.

Kemudian untuk melakukan *tuning* pada parameter Orde Fraksi (λ dan μ) memggunakan penyelesain dengan persamaan berikut ini, dimisalkan ϕ_{pm} merupakan *phase margin* yang diinginkan dan ω_{cp} adalah frekuensi titik kritis pada kurva Nyquist dari G(s) yang dimana



Gambar 5. Diagram blok Pengendali Fractional Order PID $(PI^{\lambda}D^{\mu})$

 $\arg(G(j\omega_{cp})) = -180^{\circ}$ dan gain margin didefinisikan pada **Persamaan 23.**, berikut :

$$g_m = \frac{1}{|G(j\omega_{cp})|} = k_c \tag{23}$$

Kemudian untuk membuat *phase margin* sistem sama dengan ϕ_{pm} dan $|C(j\omega_{cp})G(j\omega_{cp})| = 1$, menjadi **Persamaan 24.**:

$$C(j\omega_{cp}) = \frac{1}{|G(j\omega_{cp})|} e^{j\phi_{pm}} = k_c \cos\phi_{pm} + jk_c \sin\phi_{pm}$$
(24)

Kemudian, $C(j\omega_{cp})$ dengan **Persamaan 22**. Dan **24.**[14] dapat dituliskan menjadi **Persamaan 25**. :

$$C(j\omega_{cp}) = k_p + k_i \omega_{cp}^{-\lambda} \cos\left(\frac{pi}{2}\lambda\right) + k_d \omega_{cp}^{\mu} \cos\left(\frac{pi}{2}\mu\right) + j\left[-k_i \omega_{cp}^{-\lambda} \sin\left(\frac{pi}{2}\lambda\right) + k_d \omega_{cp}^{\mu} \sin\left(\frac{pi}{2}\mu\right)\right]$$
(25)

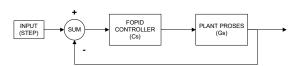
Mengacu pada **Persamaan 24.** dan **25.**, didapatkan solusi atau penyelesaian numeric untuk λ dan μ dapat diperoleh dengan menggunakan **Persamaan 26.** dan **27.** :

$$f_{1}(\lambda,\mu) = k_{p} + k_{i}\omega_{cp}^{-\lambda}\cos\left(\frac{pi}{2}\lambda\right) + k_{d}\omega_{cp}^{\mu}\cos\left(\frac{pi}{2}\mu\right) - k_{c}(\cos\phi_{pm}) = 0$$

$$(26)$$

Dan,

$$f_2(\lambda, \mu) = -k_i \omega_{cp}^{-\lambda} \sin\left(\frac{pi}{2}\lambda\right) + k_d \omega_{cp}^{\mu} \sin\left(\frac{pi}{2}\mu\right) - k_c \left(\sin\phi_{pm}\right) = 0$$
 (27)



Gambar 6. Blok diagram sistem kendali *FOPID* sistem pengendalian level air pressurizer PWR

Desain dan simulasi pengendalian ini diawali dengan melakukan proses tuning parameter Pengendali PID yaitu Kp, Ki dan simulasi pengendalian Kd dilakukan terhadap sistem sehingga diperoleh respon sistem dengan Pengendali PID. Tuning dilakukann dengan metode A Modified Ziegler-Nichols. Selanjutnya, performansi Pengendali PID terhadap sistem diperbaiki menggunakan Pengendali Fractional Order PID yaitu dengan menambahkan dua parameter yaitu λ dan μ . Tuning Parameter fractional tersebut dilakukan menggunakan Persamaan 14. dan 15. tersebut diatas. Simulasi yang dilakukan mencakup kondisi pengendalian menggunakan PIDFractional Order PID. Berdasarkan hasil yang diperoleh, dilakukan analisa untuk menentukan pengendali yang paling baik diantara beberapa desain pengendali yang telah dibuat tersebut untuk diterapkan pada sistem. Perancangan Sistem Kendali Fractional Order PID Pada Sistem Pengendalian Level Pressurizer PWR dapat dilihat pada **Gambar 6** diatas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

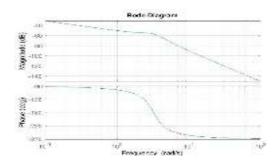
Pada bagian ini akan diuraikan hasil dari desain sistem pengendalian level pressurizer PWR dengan pengendali *PID* dan *Fractional Order PID* serta analisis perfomasi hasil sistem pengendaliannya. Fungsi alih dari Model plant yang digunakan terdapat pada persamaan 2 tersebut diatas. Parameter desain yang digunakan adalah sebagai berikut:

Settling time / waktu penetapan maksimum : $\leq 300 \text{ detik}[15]$

Maximum Overshoot/Lewatan Maksimum : < 20% [15]

Dengan menggunakan model matematis dari sistem level pressurizer PWR dengan fungsi alih laplace tersebut diatas, kemudian melakukan analisis. Analisis model plant dalam frekuensi domain, diperoleh hasil pada Bode Plot pada Gambar 7 tersebut.

Analisis Kestabilan Sistem



Gambar 7. Bode Plot plant tanpa pengendali

Dari bode plot yang ditunjukkan pada Gambar 7 diatas diperoleh nilai gain margin sebesar 56,9 dB dan phase margin sebesar 90 deg. Dapat diketahui bahwa sistem tersebut adalah sistem stabil kritis, sehingga diperlukan sebuah sistem pengendali yang dapat membuat sistem tersebut memilik kestabilan yang baik.

Rancangan Pengendali

Pengendali PID

Perancangan pengendali *PID* dilakukan penggunakan metode *A Modified Tuning Ziegler – Nichols*. Parameter kondisi yang digunakan untuk melakukan *tuning* dari bode plot pada **Gambar 7** diatas serta dilakukan perhitungan untuk beberapa parameter lain yaitu:

$$r_b = 0.5$$
; $\alpha = 0.25$
 $\phi_b = 40^{\circ} - 70^{\circ}$

Sehingga diperoleh:

$$r_a = \frac{1}{K_c} = 0.000144$$
 $T_c = \frac{2\pi}{\omega_g} = 1.934$

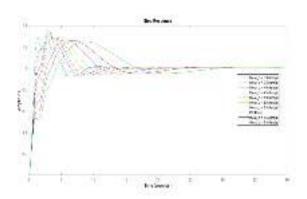
Selanjutnya dengan menggunakan **Persamaan 14**, **15** dan **16**. dilakukan perhitungan tuning parameter pengendali *PID*. Hasil tuning tersebut dapat dilihat pada tabel 1 serta respon transiennya dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Gambar 8** berikut ini:

Tabel 1. Hasil respon pengendali *PID* dengan variasi nilai $\phi_b = 30^\circ - 70^\circ$

ϕ_b	$K_p(P)$	$K_i(I)$	$K_d(D)$	Rise Time (detik)	Maks. Overshoot (%)	Settling Time (detik)
30°	301.38	284.32	78.36	0.74	35.66	8.62
35°	285.06	241.58	70.06	0.89	32.42	10.46
40°	266.57	201.94	87.97	0.89	32.4	10.4
45°	246.04	166.24	91.03	1.14	29.06	11.63
50°	223.76	132.40	93.98	1.66	28.38	0.91
55°	199.40	102.26	95.71	1.9	27.96	15
60°	174	75.98	99.18	2.13	26.46	17.53
65°	147.07	53.09	101.5	2.47	25.94	21.08
70°	119.02	34.10	103.5	3.38	25.29	26.43

Pengendali FOPID

Kemudian melakukan *tuning* untuk parameter λ dan μ . *Tuning* parameter λ dan μ menggunakan **Persamaan 26.** dan **27.**, sehingga diperoleh hasil seperti pada **Tabel 2.** :

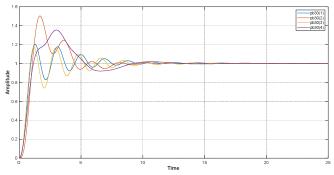


Gambar 8. Respon Transient Pengendali

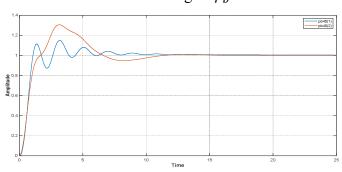
PID Metode A Modified Tuning Ziegler – Nichols dengan variasi nilai $\phi_b = 30^{\circ} - 70^{\circ}$

Tabel 2. Hasil respon sistem G(s) dengan pengendali FOPI menggunakan rentang nilai Phase Margin 50° -70°, dan variasi nilai $\lambda \leq 1$

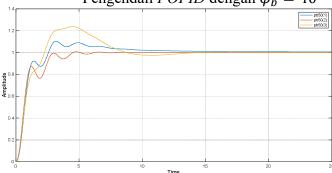
ϕ_b	$K_p(P)$	$K_i(I)$	$K_d(D)$	Lamda (λ)	Miu (μ)	Rise Time (detik)	Maks. Overshoot (%)	Settling Time (detik)
30°	301.377	284.32	78.36	0.2545	0.9510	0.58	19.88	102.11
				1.0122	0.0350	0.6	50.76	24.66
				0.0248	1.0009	0.56	17.06	23.47
				1.0022	1.0093	0.73	36.3	24.66
40°	266.568	201.94	87.97	0.3694	0.9370	0.66	12.93	118.27
				0.9629	1.0147	0.89	30.92	20.73
50°	223.764	132.404	93.98	0.5052	0.7994	0.92	10.55	119.75
				0.0119	1.0080	2.21	0.50	12.51
				0.9076	1.0123	1.65	24.37	30.36
60°	174	75.98	99.18	0.7751	0.5924	Tidak	Tidak	Tidak
						mencapai	mencapai	mencapai
						setpoint	setpoint	setpoint
				0.0001	1.0122	3.44	0.5	14.97
				0.7680	1.0122	2.19	15.69	76.95
70°	119.023	34.10	103.55	0.9774	0.3141	2.45	14.37	42.74
				0.0002	1.0121	5.48	0.50	24.98
				0.6286	1.0120	2.68	19.76	143.36



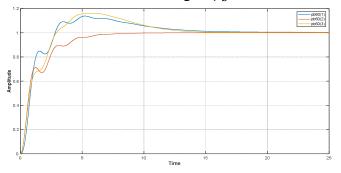
Gambar 9. Respon Transient Pengendali *FOPID* dengan $\phi_b = 30^\circ$



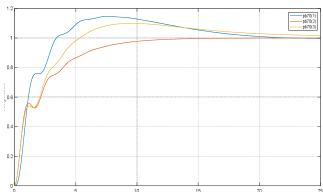
Gambar 10. Respon Transient Pengendali *FOPID* dengan $\phi_b = 40^\circ$



Gambar 11. Respon Transient Pengendali *FOPID* dengan $\phi_b = 50^\circ$



Gambar 12. Respon Transient Pengendali *FOPID* dengan $\phi_b = 60^\circ$

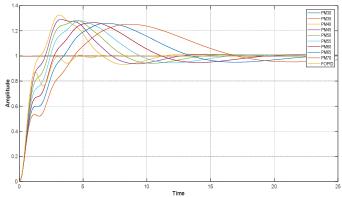


Gambar 13. Respon Transient Pengendali *FOPID* dengan $\phi_b = 70^\circ$

Dari hasil yang ditunjukkan pada Tabel 2., diperoleh respon transient terbaik yaitu dengan nilai Kp sebesar 223.764, Ki sebesar 132.404, Kd sebesar 93.98 dan λ sebesar 0.0119, μ sebesar 1.0080 dimana subsistem ketinggian air dalam pressurizer PWR mampu mencapai kestabilan pada set point level (ternormalisasi) 0.6% dengan waktu penetapan (settling time) sebesar 12.51 detik dan dengan lewatan maksimum (maximum overshoot) sebesar 0.5%. Dan dari hasil simulasi tersebut memiliki respon transien dengan waktu penetapan (settling time) dan lewatan maksimum (maximum overshoot) sesuai atau masih berada dalam batasan desain yang ditetapkan. Dengan demikian mengacu pada Persamaan 22. maka diperoleh fungsi alih dari Pengendali Fractional Order PID untuk subsistem pengendalian level air dalam pressurizer PWR adalah sebagai berikut:

$$C_{FOPID}(s) = 223.764 + \frac{132.404}{s^{0.0119}} + 93.98s^{1.008}$$
(28)

Hasil respon transien sistem dengan pengendali *PID Integer/Classic* bila diperbandingkan dengan sistem menggunakan pengendali *FOPID* dapat dilihat pada grafik berikut ini :

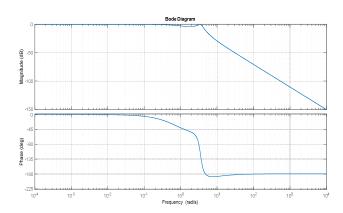


Gambar 14. Perbandingan respon sistem G(s) dengan pengendali PID dan FOPID

Dari hasil simulasi dapat diketahui respon pengendali Fractional Order PID memiliki waktu penetapan (settling time) yang lebih cepat dibandingkan dengan pengendali PID Integer yang dapat dilihat pada **Tabel** 1., sedangkan dibandingkan dengan pengendali PI pada penelitian sebelumnya[15] yang memiliki waktu penetapan (settling time) sebesar 12.2 detik dan dengan lewatan maksimum overshoot) sebesar (maximum 22.2% ataupun PID Integer digabung dengan CMAC pada penelitian sebelumnya[8] memiliki waktu penetapan (settling time) sebesar 3570 detik dan dengan lewatan maksimum (maximum overshoot) sebesar 24.3%. Nilai parameter dari PID Integer digabung dengan CMAC ini tidak dapat bila dibandingkan diterima dengan beberapa syarat dari pressurizer pada PWR, yang salah satunya adalah waktu penetapan maksimum (settling time) tidak lebih dari 300 detik.

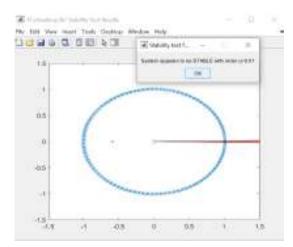
Analisis kestabilan sistem *G(s)* yang telah diberikan pengendali *FOPID*

Selanjutnya dilakukan analisis kestabilan untuk sistem yang telah diberikan pengendali *FOPID* sesuai dengan **Persamaan 28.** menggunakan bode plot diagram berikut ini :



Gambar 15. Bode plot sistem G(s) dengan pengendali FOPID

Dari bode plot pada **Gambar 15.** tersebut diperoleh nilai Gain Margin (Gm) sebesar 3.39 dB, nilai Phase Margin (Pm) 57.76°. Dengan demikian hasil plot analisis menunjukkan bahwa sistem yang diberikan pengendali *FOPID* mencapai kondisi stabil, karena kedua margin bernilai positif atau lebih besar dari 0 (nol). Kemudian untuk memverifikasi hasil tersebut dilakukan pengecekan kestabilan menggunakan fomcon toolbox, yang diperoleh hasil dibawah ini.



Gambar 16. Tes kestabilan sistem $\phi_b = 50^\circ$, $\lambda = 0.0119$, $\mu = 1.008$

Sistem tersebut stabil, dengan parameter : K = 1; q = 0.01; $err = 1.7195x10^{-8}$

KESIMPULAN

telah Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat disipulkan bahwa bila Fractional Order PID diaplikasikan secara nyata untuk pengendalian level pressurizer PWR, maka metode ini sangat mampu untuk mengendalikan proses pengendalian level air pada pressurizer PWR sesuai dengan salah satu persyaratan dimana waktu penetapan maksimum (settling time) tidak lebih dari 300 detik. Konfigurasi gain pengendali FOPID yang paling sesuai dengan persyaratan tersebut adalah dengan nilai Kp sebesar 223.764, Ki sebesar 132.404, Kd sebesar 93.98 dan λ sebesar 0.0119, μ sebesar 1.0080, yang menghasilkan waktu penetapan (settling time) lebih cepat 285 kali dan lewatan maksimum (maximum overshoot) lebih rendah 48.6 kali bila dibandingkan dengan pengendali PID Integer digabung dengan CMAC pada penelitian sebelumnya [8].

UCAPAN TERIMA KASIH

Beasiswa Saintek Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Riset dan Inovasi Nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. V. De Oliveira and J. C. S. De Almeida, "Application of artificial intelligence techniques in modeling and control of a nuclear power plant pressurizer system," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 63, pp. 71–85, 2013, doi: 10.1016/j.pnucene.2012.11.005.
- [2] Y. C. Wang, S. J. Wang, C. S. Chien, and S. C. Chiangb, "Analysis of pressurizer level control system using MAAP4 code," *Nucl. Eng.*

- Des., vol. 240, no. 1, pp. 160–165, 2010, doi: 10.1016/j.nucengdes.2009.10.001.
- [3] R. Maerani and S. Bakhri, "Perbandingan Sistem Pengontrolan Pid Konvensional Dengan Pengontrolan Cmac, Fuzzy Logic Dan Ann Pada Water Level," *Sigma Epsil.*, vol. 17, no. 3, pp. 129–141, 2013.
- [4] Y. Oka and K. Suzuki, An Advanced Course in Nuclear Engineering Series Editor: Mitsuru Uesaka Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control. 2013.
- [5] G. D. Zhang, X. H. Yang, X. L. Ye, H. Xu, D. Q. Lu, and W. Chen, "Research on pressurizer water level control of pressurized water reactor nuclear power station," *Energy Procedia*, vol. 16, no. PART B, pp. 849–855, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.01.136.
- [6] S. Dibyo, "Studi Karakteristik Pressurizer Pada Pwr," *Pros. PPI PDIPTN*, pp. 179–185, 2007.
- [7] W. Zhou and X. Zhang, "The preliminary research of pressure control system danymic simulation for Ap1000 pressurizer based on parameter adaptive fuzzy pid control algorithm," *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 98 LNEE, no. VOL. 2, pp. 583–591, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-21765-4 71.
- [8] J. Yi, J. Ye, Y. Xue, X. Yang, and H. Qian, "Research on pressurizer water level control of nuclear reactor based on CMAC and PID controller," 2009 Int. Conf. Artif. Intell. Comput. Intell. AICI 2009, vol. 3, pp. 8–11, 2009, doi: 10.1109/AICI.2009.209.
- [9] M. Ali, "Pembelajaran Perancangan

- Sistem Kontrol Pid Dengan Software Matlab," *J. Edukasi Elektro*, vol. 1, no. 1, p. 2, 2004.
- [10] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, Fifth. New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [11] D. Xue, Y. Chen, and D. Atherton, Linear Feedback Control, Analysis and design with MATLAB - Advances in Design and Control. 2007.
- [12] V. Shekher, P. Rai, and O. Prakash, "Tuning and Analysis of Fractional Order PID Controller," *Int. J. Electron. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 11–21, 2012.
- [13] A. A. Dastjerdi, N. Saikumar, and S. H. HosseinNia, "Tuning guidelines for fractional order PID controllers: Rules of thumb," *Mechatronics*, vol.

- 56, no. May, pp. 26–36, 2018, doi: 10.1016/j.mechatronics.2018.10.004.
- [14] D. Valério and J. S. Da Costa, "Tuning-rules for fractional PID controllers," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 2, no. PART 1, pp. 28–33, 2006, doi: 10.3182/20060719-3-pt-4902.00004.
- [15] S. Bakhri, "Hasil validasi dari konfigurasi ini juga terbukti stabil, mampu mengatasi gangguan selama 10 detik dengan puncak maksimum level 0,005%, dan mampu mengikuti perubahan," *Investig. Pengendali. Lev. Permukaan Air Press. Di Pwr Berbas. Kendali Proportional Integr.*, pp. 149–159, 2014.

Rissa Damayanti : Desain Pengendali Fractional Order PID $(PI^{\lambda}D^{\mu})$ Dengan Metode A Modified ZN untuk Pengendalian Level Air pada Pressurized Water Reactor (PWR)