

Pemodelan Sistem Pengendalian Level *Deaerator* Berbasis *Self-Tuning Fuzzy PID Controller* di PLTU Teluk Balikpapan

Rahmat Widi Raharjo¹, A Asni B², Mayda Waruni Kasrani^{3*}

^{1,2,3*}Universitas Balikpapan

*Email: rahmatwr9@gmail.com

Abstract

The deaerator is very important equipment in a steam power plant. Deaerator serves to remove dissolved gases contained in the feed water. The deaerator level is a very important parameter to be maintained during the deaeration process. If the deaerator level is too low, it can damage the boiler feed pump and disrupt the air supply to the boiler, but if the level is too high, the content of dissolved gases such as carbon dioxide (CO₂) and oxygen (O₂) will be high. Setting the deaerator level at PLTU Teluk Balikpapan must pay attention to the discharge pressure of the condensate pump. Setting the deaerator level and discharge pressure of the PLTU Teluk Balikpapan condensate pump is done by adjusting the opening of the deaerator level control valve and condenser recycle control valve. This study made a fuzzy PID controller self-tuning control system that is simulated using MATLAB-Simulink software. Based on three tests carried out using three different disturbance characteristics, the self-tuning fuzzy PID controller gave a satisfactory response because it managed to maintain the deaerator level and condensate pump pressure in accordance with the operating limits of these two parameters. From the results of the calculation of the 2 test values that have been carried out, the maximum error level is 6.6288% and the Root Mean Square Error (RMSE) is 15,94 mm, while the maximum error for pressure is 5,09%, and RMSE is 0.0017 Mpa.

Keywords: Deaerator level, condensate pump discharge pressure, deaerator level control valve, condenser recycle control valve, self-tuning fuzzy PID controller

Abstrak

Deaerator merupakan peralatan yang sangat penting pada pembangkit listrik tenaga uap. Deaerator berfungsi untuk menghilangkan gas-gas terlarut yang terkandung dalam air pengisi (*feed wate*). Level deaerator adalah parameter yang sangat penting untuk dijaga saat proses deaerari (pembuangan gas-gas terlarut). Jika level deaerator terlalu rendah, dapat mengakibatkan rusaknya *boiler feed pump* dan mengganggu pasokan air ke *boiler*, namun jika level terlalu tinggi, kandungan gas-gas terlarut seperti karbondioksida (CO₂) dan Oksigen (O₂) akan tinggi. Pengaturan level deaerator pada PLTU Teluk Balikpapan harus memperhatikan *condensate pump discharge pressure*. Pengaturan level deaerator dan *condensate pump discharge pressure* pada PLTU Teluk Balikpapan dilakukan dengan mengatur bukaan deaerator level control valve dan condenser recycle control valve. Penelitian ini akan memodelkan sistem kontrol *self-tuning fuzzy PID controller* yang disimulasikan menggunakan software MATLA-Simulink. Berdasarkan 2 pengujian yang dilakukan menggunakan 2 karakteristik gangguan yang berbeda, *self-tuning fuzzy PID controller* memberikan respon yang memuaskan karena berhasil menjaga level deaerator dan *condensate pump discharge pressure* sesuai dengan batasan operasi kedua parameter tersebut. Dari hasil 2 pengujian yang telah dilakukan, didapatkan nilai *error* maksimum level sebesar 6,6288 % dan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 15,94 mm sedangkan untuk *error* maksimum tekanan sebesar 5,09 % dan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0,0017 Mpa.

Kata kunci: Level deaerator, condensate pump discharge pressure, deaerator level control valve, condenser recycle control valve, self-tuning fuzzy PID controller

1. Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem ketenagalistrikan di Indonesia. Sebagian besar pasokan tenaga listrik di Indonesia di suplai oleh PLTU karena dianggap lebih ekonomis dan dapat menghasilkan energi listrik dalam jumlah besar [1]. Salah satu komponen yang sangat penting pada PLTU adalah *boiler*. *Boiler* berfungsi untuk menghasilkan uap panas bertekanan tinggi hasil dari pembakaran batubara di dalam ruang bakar (*furnace*), yang kemudian digunakan untuk menggerakkan *turbine* yang porosnya terhubung dengan *generator* sehingga dapat menghasilkan energi listrik [2], [3]. Keandalan *boiler* sebagai salah satu komponen utama PLTU harus dijaga sebagai upaya untuk meningkatkan keandalan PLTU. Salah satu cara menjaga keandalan *boiler* adalah dengan memperhatikan kualitas air yang masuk ke dalam *boiler*. Parameter air yang penting untuk dikendalikan adalah kadar *dissolved oxygen* (DO) atau gas yang terlarut dalam air. Kandungan *oxygen* dan gas terlarut lainnya dalam air pengisi dapat menyebabkan korosi pada pipa *boiler* dan memperpendek umur *plant* [4]. Untuk mengendalikan kandungan *dissolved oxygen* dalam kandungan air pengisi, air pengisi harus melalui proses deaerasi di dalam *deaerator*.

Deaerator adalah tabung yang berfungsi untuk membuang gas-gas terlarut untuk mencegah korosi pada boiler dan sebagai pemanas lanjut agar siklus panas menjadi lebih efektif [3], [5], [6], [7]. *Deaerator* pada PLTU Teluk Balikpapan mendapatkan suplai uap panas dari ekstraksi *turbine* nomor 3, *gland steam leakage line*, dan *leak rod valve line*. Prinsip kerja *deaerator* didasari oleh hukum Henry yang menyatakan bahwa kelarutan gas dalam cairan berbanding lurus dengan tekanan parsial. Dengan demikian, apabila tekanan gas terlarut diturunkan dengan menambahkan uap di *deaerator*, maka kelarutannya akan berkurang dan gas terpisah dari air. Deaerasi dilakukan untuk mencegah korosi, mengurangi waktu pemeliharaan *plant*, dan mengurangi biaya operasi [6].

Dalam proses deaerasi (pembuangan gas-gas terlarut) pada *deaerator*, level *deaerator* merupakan variabel yang penting untuk dijaga tetap stabil sesuai dengan *set point*. Jika level air terlalu tinggi dapat menyebabkan pemisahan gas-gas yang terlarut dalam air pengisi kurang sempurna. Hal ini dapat menyebabkan air pengisi memiliki kandungan oksigen yang tinggi dan dapat menyebabkan korosi pada *boiler*. Jika level air *deaerator* terlalu rendah, dapat merusak peralatan lain yaitu *boiler feed pump* (BFP) dan menghambat proses suplai air ke *boiler* [8].

Pengendalian level *deaerator* pada PLTU Teluk Balikpapan dilakukan dengan mengatur *flow condensate pump* dan memperhatikan tekanan *discharge condensate pump*. Tekanan yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan *overpressure* pada pipa *discharge* dan apabila tekanan terlalu rendah dapat mengakibatkan suplai air ke *deaerator* terganggu karena *pressure* yang terlalu kecil mengakibatkan *condensate water* tidak dapat mengalir ke *deaerator*. Pengaturan *flow condensate water* dan tekanan *discharge condensate pump* dilakukan dengan mengatur *deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve* dimana kerja kedua *valve* ini harus dikoordinasikan dengan baik untuk menghasilkan *flow* dan *pressure* sesuai dengan kebutuhan sehingga sistem yang terbentuk menjadi tidak linear akibat banyaknya variabel yang terus berubah dalam sistem kontrol.

Proportional Integral Derivative (PID) *controller* konvensional yang saat ini digunakan di PLTU Balikpapan belum mampu memberikan respon yang baik untuk mengendalikan level *deaerator* dan tekanan *discharge condensate pump* PLTU Teluk Balikpapan karena PID *controller* sulit menangani sistem non-linear [9]. Kurangnya lainnya dari PID *controller* ialah sulitnya melakukan penalaan [10]. *Fuzzy logic* akan digunakan untuk memperbaiki performa PID *controller* dengan melakukan *self-tuning* parameter PID berdasarkan level *deaerator* dan *condensate pump discharge pressure*.

Fuzzy logic controller (FLC) didasarkan pada aturan *fuzzy* (*fuzzy rules*) dan inferensi *fuzzy*. Aturan *fuzzy* dapat merefleksikan pengetahuan atau pengalaman manusia dan menunjukkan kenonlinearan untuk mengendalikan *plant* yang lebih kompleks, yang dapat berupa sistem linear atau nonlinear [11]. *Fuzzy logic controller* (FLC) adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk melakukan *tuning* PID *controller*. Penggabungan FLC dan PID biasa disebut *self-tuning fuzzy PID controller*. Implementasi logika *fuzzy* dan algoritma genetika untuk *tuning* parameter kontroler PID sebagai pengendali kecepatan motor DC mampu mengarahkan sistem menuju *set point* [12]. Penelitian terdahulu telah membuat desain *fuzzy PID controller* berdasarkan PID *controller* konvensional dan faktor nonlinear untuk mengendalikan kecepatan motor *direct current* (DC) [11].

Penelitian lainnya berhasil mengembangkan metode *tuning fuzzy* PID berbasis PID *controller* terhadap sistem orde 3 metode pengaturan OR. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *fuzzy PID controller* memiliki performa yang lebih baik dibandingkan PID *controller* [13]. Selanjutnya penelitian dengan mengaplikasikan mengaplikasikan *fuzzy logic* untuk melakukan otomasi pada *dryer* ikan menggunakan mikrokontroler Arduino mega 2560. Setelah otomasi diterapkan, menghasilkan peningkatan berat ikan hingga mencapai 50% [14]. Penelitian lainnya melakukan otomasi pada sistem pendinginan *diesel engine* menggunakan *fuzzy logic* sebagai kontroler [15]. Pengukuran yang dilakukan terhadap komponen-komponen yang didinginkan menunjukkan bahwa sistem pendingin berhasil bekerja dengan baik.

Penelitian sebelumnya hanya berfokus pada *prototype* dengan sistem yang tidak terlalu kompleks. Berdasarkan hal tersebut, fokus penelitian ini adalah membuat simulasi sistem kontrol yang lebih kompleks yang dapat diterapkan pada dunia industri. Sistem kontrol yang akan dibuat berbasis *self-tuning fuzzy PID controller* untuk

mengendalikan *deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve* guna mengendalikan *condensate water flow* dan tekanan *discharge condensate pump*. *Fuzzy logic* akan digunakan untuk melakukan *tuning* parameter PID dengan menggunakan *rule base* yang telah ditetapkan oleh praktisi dari PLTU Teluk Balikpapan. Hasil penelitian akan menjadi acuan untuk menentukan mampu tidaknya *self-tuning fuzzy PID controller* untuk mengendalikan *deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve* sehingga level *deaerator* dan tekanan *discharge condensate pump* dapat dikendalikan sesuai dengan *set point*.

2. Metoda Penelitian

2.1 Pemodelan *Deaerator Storage Tank*

Deaerator yang digunakan pada PLTU Teluk Balikpapan adalah *deaerator* tipe *tray* dengan *storage tank* berbentuk *horizontal tank* dengan kepala berbentuk *ellipsoid* seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut:



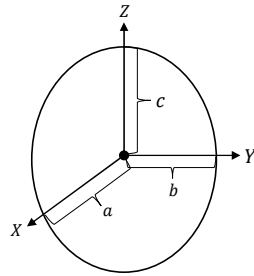
Gambar 1. *Deaerator* PLTU Teluk Balikpapan

Spesifikasi dimensi *horizontal tank* dari *deaerator storage tank* berdasarkan *drawing* [16] *deaerator* PLTU Teluk Balikpapan adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi dimensi *horizontal tank*

No.	Dimensi	Nilai (mm)
1	<i>Length</i>	12040
2	<i>Radius</i>	1600
3	<i>Height</i>	3200

Ilustrasi pendekatan kepala *deaerator* yang berbentuk elipsoid ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Ellipsoid

Spesifikasi dimensi elipsoid dari *deaerator storage tank* berdasarkan *drawing* [16] *deaerator* PLTU Teluk Balikpapan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Spesifikasi dimensi *ellipsoidal*

No.	Dimensi	Nilai (mm)
1	a	1600
2	b	850
3	c	1600
4	Height	3200

Pemodelan *level* air *deaerator* menggunakan hukum kesetimbangan massa [17]. Pemodelan volume *deaerator storage tank* adalah volume tabung + volume *ellipsoid*. Pemodelan *deaerator storage tank* adalah sebagai berikut.

$$V_{st} = V_t + V_e \quad (1)$$

$$\frac{dV_{st}}{dt} = \frac{dV_t}{dt} + \frac{dV_e}{dt} \quad (2)$$

Dimana:

V_{st} = Volume *deaerator storage tank*

V_t = Volume tabung

V_e = Volume elipsoid

$\frac{dV_{st}}{dt}$ = Perubahan volume *deaerator storage tank*

$\frac{dV_t}{dt}$ = Perubahan volume tabung

$\frac{dV_e}{dt}$ = Perubahan volume elipsoid

Volume tabung horizontal dapat dihitung menggunakan persamaan 6 berikut.

$$V_t = \int_0^h W \cdot L \, dh \quad (3)$$

$$W = 2\sqrt{(D-h)h} \quad (4)$$

Perubahan volume tabung horizontal adalah.

$$\frac{dV_t}{dt} = 2L\sqrt{(D-h)h} \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

Dimana:

$\frac{dV_t}{dt}$ = perubahan volume tabung

L = panjang tabung horizontal

D = diameter tabung

h = ketinggian air

$\frac{dh}{dt}$ = perubahan ketinggian air

Volume *ellipsoid* dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$V_e = \int_{-c}^{-c+h} S(z) \, dz \quad (6)$$

Dimana:

V_e = volume *ellipsoid*

$S(z)$ = luas area vertikal *ellipsoid* terhadap sumbu Z

Nilai $S(z)$ dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut [18].

$$S(z) = \pi xy \quad (7)$$

$$S(z) = \pi ab \left(1 - \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (8)$$

Volume parsial dari *ellipsoid* dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$V_e = \int_{-c}^{-c+h} \pi ab \left(1 - \frac{z^2}{c^2}\right) dz \quad (9)$$

$$V_e = \frac{\pi abch^2}{c} - \frac{\pi abh^3}{3c^2} \quad (10)$$

Persamaan perubahan volume *ellipsoid* adalah sebagai berikut.

$$\frac{dV_e}{dt} = \frac{dh}{dt} \left(\frac{\pi abh}{c} - \frac{\pi abh^2}{3c^2} \right) \quad (11)$$

Dimana:

$\frac{dV_e}{dt}$ = Perubahan volume *ellipsoid*

$\frac{dh}{dt}$ = Perubahan ketinggian air

Setelah perasmaan perubahan volume tabung horizontal dan *ellipsoid* diketahui, maka kedua persamaan tersebut disubstitusikan ke persamaan 4. Sehingga diperoleh persamaan 16 sebagai berikut.

$$\frac{dV_{st}}{dt} = 2L \frac{dh}{dt} \sqrt{(D-h)h} + \frac{dh}{dt} \left(\frac{\pi abh}{c} - \frac{\pi abh^2}{3c^2} \right) \quad (12)$$

Persamaan perubahan volume *deaerator storage tank* adalah.

$$\frac{dV_{st}}{dt} = \frac{dh}{dt} \left(2L\sqrt{(D-h)h} + \left(\frac{\pi abh}{c} - \frac{\pi abh^2}{3c^2} \right) \right) \quad (13)$$

Persamaan massa jenis yaitu $m = \rho \times V$. Dengan demikian, maka persamaan 3 dapat dirubah menjadi persamaan berikut.

$$\rho \cdot \frac{dV_{st}}{dt} = \dot{m}_c - \dot{m}_f \quad (14)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\dot{m}_c - \dot{m}_f}{\rho \left(2L\sqrt{(D-h)h} + \left(\frac{\pi abh}{c} - \frac{\pi abh^2}{3c^2} \right) \right)} \quad (15)$$

Variabel-variabel dimensi *deaerator* kemudian dimasukkan ke persamaan perubahan level *dearator* berdasarkan spesifikasi dimensi *deaerator* pada tabel 1 dan 2 sehingga diperoleh model matematis *deaerator storage tank* sebagai berikut.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\dot{m}_c - \dot{m}_f}{998,02 \times 10^{-12} \left(24080\sqrt{(3200h-h^2)} + (2670,4h - 0,556h^2) \right)} \quad (16)$$

2.2 Pemodelan Level Transmitter

Level transmitter yang digunakan untuk mendeteksi level *deaerator* pada PLTU Teluk Balikpapan adalah *differential pressure (DP) transmitter*. Input dari *DP transmitter* adalah level *deaerator* antara 0 hingga 2400 mm dan output *DP transmitter* berupa arus listrik 4-20 mA. Persamaan matematis *DP transmitter* adalah sebagai berikut [19].

$$L(s) = \frac{G_T}{T_C s + 1} \quad (17)$$

Dimana:

$$G_T = \text{Gain transmitter}$$

$$T_C = \text{Time constant transmitter (s)}$$

$$G_T = \frac{\text{Span output}}{\text{Span input}} \quad (18)$$

$$G_T = \frac{(20-4)mA}{(2,8-0)MPa} = 5,7143 \text{ mA/MPa}$$

Diketahui bahwa *time constant transmitter* sebesar 0,5 s sehingga persamaan *DP transmitter* adalah sebagai berikut.

$$L(s) = \frac{5,7143}{0,5 s + 1}$$

2.3 Pemodelan Pressure Transmitter

Pressure transmitter digunakan untuk mengukur tekanan pada pipa *discharge condensate pump*. Input dari *pressure transmitter* adalah tekanan *discharge condensate pump* yaitu 0-2,8 MPa dan menghasilkan output berupa sinyal arus listrik sebesar 4-20 mA. Pemodelan *pressure transmitter* adalah sebagai berikut

$$G_T = \frac{(20-4)mA}{(2,8-0)MPa} = 5,7143 \text{ mA/MPa} [19].$$

Diperoleh fungsi transfer *pressure*

transmitter sebagai berikut.

$$L(s) = \frac{5,7143}{0,5 s + 1}$$

2.4 Pemodelan Aktuator

Terdapat 2 aktuator yang digunakan pada sistem pengontrolan level *deaerator* yaitu *deaerator level control valve* yang berfungsi untuk mengatur laju aliran *condensate water* menuju *deaerator* dan *condenser recycle control valve* yang berfungsi untuk mengatur laju aliran resirkulasi pompa sehingga *minimum flow* pompa selalu terpenuhi meskipun pompa beroperasi pada beban rendah. Pengaturan bukaan *deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve* akan mempengaruhi level *deaerator* dan tekanan *discharge condensate pump*. Spesifikasi *condensate pump* berdasarkan *turbine manual book* PLTU Teluk Balikpapan adalah sebagai berikut [20].

Tabel 3. Spesifikasi *condensate pump*

No.	Nama	Keterangan
1	Model	7LDTNB-5PJS
2	Flow	417,5 m ³ /h
3	Allowable NPSH	1,6 m
4	Rotating	1470 rpm
5	Rated power	315 kw
6	Rated current	36,3 A
7	Voltaege	6Kv

Pemodelan *deaerator level control valve* dilakukan dengan mengasumsikan bahwa kedua *valve* tersebut memiliki karakteristik yang linear sehingga dapat ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut [19], [21].

$$MV_{I/s}(s) = \frac{K_{total}}{\tau_{cv}s + 1} \quad (19)$$

$$K_{total} = K_{I/P} \cdot K_{actuator} \quad (20)$$

$$K_{actuator} = \frac{\text{output actuator}}{\text{input actuator}} \quad (21)$$

$$K_{I/P} = \frac{\text{output positioner}}{\text{input positioner}} \quad (22)$$

$$\tau_{cv} = T_v(\Delta V + R_v) \quad (23)$$

$$\Delta V = \frac{v_{max} - v_{min}}{v_{max}} \quad (24)$$

Dimana:

$$MV_{I/s} = \text{Manipulated variable}$$

$$K_{total} = \text{Gain total control valve}$$

$$T_{cv} = \text{Time constant dari control valve}$$

$$K_{total} = K_{I/P} \cdot K_{actuator}$$

τ_{cv} = Time constant control valve.

T_v = Waktu stroke penuh (s).

ΔV = fraksi perubahan control valve.

R_v = Perbandingan time inevent dengan time stroke (untuk diaphragm adalah 0,03 [21]).

2.4.1 Pemodelan deaerator level control valve terhadap condensate water flow

Berdasarkan tabel 3, laju aliran maksimum pompa adalah 417,5 m³/h atau setara dengan 0,116 t/s dengan minimum flow pompa sebesar 35 %, sehingga flow maksimum yang dihasilkan oleh deaerator level control valve ketika terbuka penuh adalah 0,0754 t/s. Berdasarkan datasheet positioner deaerator level control valve, nilai perubahan tekanan sebesar 20,305-101,526 psi [22].

$$K_{actuator} = \frac{0,0754 \text{ t/h} - 0 \text{ t/s}}{101,526 \text{ psi} - 20,305 \text{ psi}} = 0,0009 \frac{\text{t/s}}{\text{psi}}$$

Berdasarkan datasheet positioner deaerator level control valve, span sinyal kontrol deaerator level control valve adalah 4-20 mA [22].

$$K_{I/P} = \frac{101,526 \text{ psi} - 20,305 \text{ psi}}{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}} = 5,0763 \text{ psi/mA}$$

$$K_{total} = 0,0009 \frac{\text{t/s}}{\text{psi}} \times 5,0763 \text{ psi/mA}$$

$$K_{total} = 0,0047114 \frac{\text{t/s}}{\text{mA}}$$

$$\Delta V = \frac{0,0754 - 0}{0,0754} = 1$$

Berdasarkan hasil uji dilapangan, diperoleh nilai T_v sebesar 47 s sehingga time constant deaerator level control valve adalah.

$$\tau_{cv} = 47(1 + 0,03)$$

$$\tau_{cv} = 48,41 \text{ s}$$

Fungsi transfer deaerator level control valve terhadap condensate water flow adalah.

$$MV_{I/s}(s) = \frac{0,0047114}{48,41s + 1}$$

2.4.2 Pemodelan deaerator level control valve terhadap condensate pump discharge pressure

Tekanan discharge condensate pump

ketika deaerator level control valve tertutup (full close) dan condenser recycle control valve terbuka 100 % (full open) adalah sebesar 1,7 MPa. Ketika deaerator level control valve membuka, maka tekanan discharge condensate pump akan turun secara linear. Pemodelan condenser recycle control valve berkaitan dengan tekanan discharge condensate pump adalah sebagai berikut.

$$K_{actuator} = \frac{0 - 1,7 \text{ MPa}}{101,526 \text{ psi} - 20,305 \text{ psi}} = -0,0209 \frac{\text{MPa}}{\text{psi}}$$

$$K_{I/P} = 5,0763 \text{ psi/mA}$$

$$K_{total} = -0,1062 \frac{\text{MPa}}{\text{mA}}$$

$$\Delta V = \frac{1,7 - 0}{1,7} = 1$$

$$\tau_{cv} = 48,41 \text{ s}$$

$$MV_{I/s}(s) = \left(\frac{-0,1062}{48,41s + 1} \right) + 1,7$$

2.4.3 Pemodelan condenser recycle control valve terhadap condensate water flow

Flow condensate water akan bertambah secara linear seiring dengan menutupnya condenser recycle control valve dan penambahan flow maksimum condensate water. Ketika condenser recycle control valve tertutup (full close), akan memberikan flow condensate water sebesar 0,0406 t/s. Pemodelan condenser recycle control terhadap perubahan flow condensate water adalah sebagai berikut.

$$MV_{I/s}(s) = \frac{K_{total}}{\tau_{cv}s + 1} + (v_{max} - v_{min})$$

Berdasarkan datasheet positioner condenser recycle control valve, nilai perubahan tekanan sebesar 20,305-101,526 psi [22].

$$K_{actuator} = \frac{0 \text{ t/s} - 0,0406 \text{ t/s}}{101,526 \text{ psi} - 20,305 \text{ psi}} = -0,0005 \frac{\text{t/s}}{\text{psi}}$$

Berdasarkan datasheet positioner condenser recycle control valve, span sinyal kontrol condenser recycle control valve adalah 4-20 mA [22].

$$K_{I/P} = \frac{101,526 \text{ psi} - 20,305 \text{ psi}}{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}} = 5,0763 \text{ psi/mA}$$

$$K_{total} = -0,00057 \frac{\text{t/s}}{\text{psi}} \times$$

$$5,0763 \text{ psi/mA}$$

$$K_{total} = -0,002537 \frac{t/s}{mA}$$

$$\Delta V = \frac{208,3368-0}{208,3368} = 1$$

Berdasarkan hasil uji dilapangan, diperoleh nilai T_v *condenser recycle control valve* adalah 17,51 s sehingga *time constant condenser recycle control valve* adalah.

$$\tau_{cv} = 17,51(1 + 0,03)$$

$$\tau_{cv} = 18,0353 \text{ s}$$

$$MV_{\frac{1}{s}}(s) = \left(\frac{-0,002537}{18,0353s} \right) + 0,0406$$

2.4.4 Pemodelan *condenser recycle control valve* terhadap *condensate pump discharge pressure*

Condensate pump discharge pressure akan naik secara linear seiring dengan menutupnya *condenser recycle control valve* dan turun secara linear seiring dengan membukanya *condenser recycle control valve* dengan tekanan maksimum yang dihasilkan sebesar 1,1 MPa ketika *condenser recycle control valve* tertutup (*full close*). Dengan demikian pemodelan *condenser recycle control valve* adalah sebagai berikut.

$$K_{actuator} = \frac{0 - 1,1 \text{ MPa}}{101,526 \text{ psi} - 20,305 \text{ psi}} = -0,0135 \frac{\text{MPa}}{\text{psi}}$$

$$K_{I/P} = \frac{101,526 \text{ psi} - 20,305 \text{ psi}}{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}} = 5,0763 \text{ psi/mA}$$

$$K_{total} = -0,0135 \frac{t/s}{\text{psi}} \times 5,0763 \text{ psi/mA}$$

$$K_{total} = -0,0687 \frac{\text{MPa}}{\text{mA}}$$

$$\Delta V = \frac{1,1-0}{1,1} = 1$$

$$\tau_{cv} = 17,51(1 + 0,03)$$

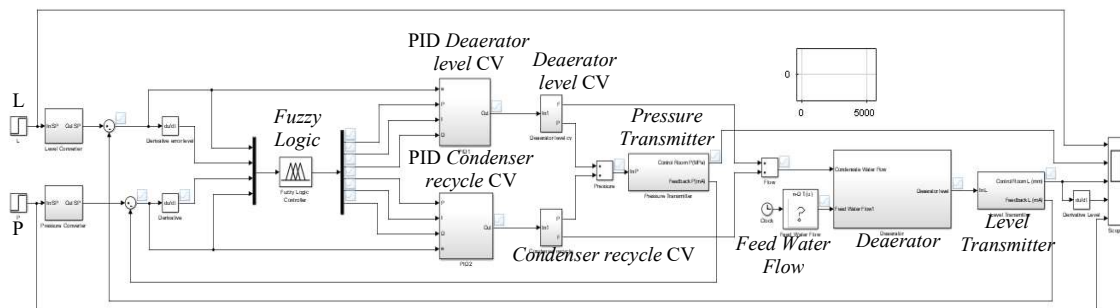
$$\tau_{cv} = 18,0353 \text{ s}$$

$$MV_{\frac{1}{s}}(s) = \left(\frac{-0,0687}{18,0353s+1} \right) + 1,1$$

2.5 Fuzzy PID Controller

Sistem kontrol yang saat ini digunakan untuk mengendalikan level *deaerator* di PLTU Teluk Balikpapan adalah *PID controller*. *PID controller* yang ada saat ini belum mampu mengendalikan level *deaerator* dengan baik karena *PID controller* tidak mampu mengintegrasikan kerja *deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve* sebagai aktuatur utama untuk mengendalikan level *deaerator* dan tekanan *discharge condensate pump*. *Fuzzy PID controller* digunakan untuk mengintegrasikan kerja dari *deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve* sehingga kedua *valve* dapat menghasilkan respon kontrol level

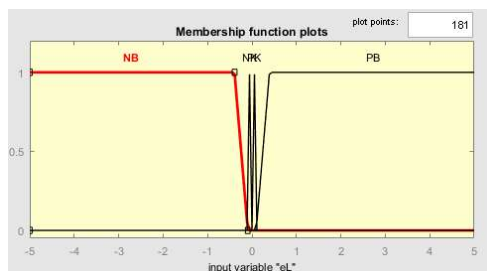
Deaerator dan *condensate pump discharge pressure* yang baik. Logika *fuzzy* adalah sistem berbasis aturan (*rule base system*) yang didalamnya terdapat aturan *fuzzy* (*fuzzy rules*) yang merepresentasikan mekanisme pengambilan keputusan. Aturan yang dibuat digunakan untuk memetakan variabel input ke variabel *output* implikasi [23]. *Output* logika *fuzzy* pada sistem yang akan dibangun berupa *gain PID controller* yang berubah-ubah sesuai dengan keadaan *input* yang telah ditetapkan pada *rule base*. *Rule base* dan fungsi keanggotaan yang digunakan ditentukan oleh pakar yang merupakan seorang parktisi di PLTU Teluk Balikpapan (*operator*).



Gambar 3. Blok diagram model *fuzzy PID controller*

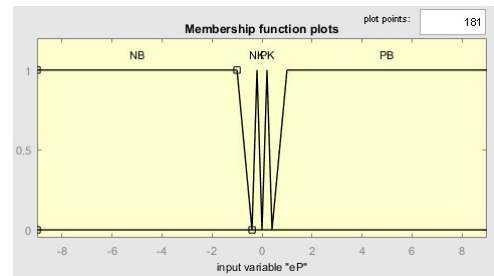
Gambar 3 menunjukkan desain simulasi *fuzzy PID controller* dimana terdapat 2 *set point* untuk mengatur level *deaerator* dan *condensate pump discharge pressure*. *Set point* (SP) kemudian dibandingkan dengan kondisi aktual (PV) sehingga didapatkan nilai *error*. Nilai *error* dan perbedaan *error* kemudian akan menjadi input dari *fuzzy logic*. *Fuzzy logic* akan menghasilkan 6 *output* sebagai parameter *PID controller deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve*. Persentase bukaan *deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve* ditentukan oleh *PID controller* dan akan mempengaruhi tekanan *discharge condensate pump* dan *flow condensate water* yang nantinya akan mempengaruhi ketinggian air (level) *deaerator*. Tekanan *discharge condensate pump* dibaca oleh *pressure transmitter* dan level *deaerator* dibaca oleh *level transmitter*.

Terdapat 4 input logika *fuzzy* yang akan menghasilkan 6 *output* logika *fuzzy*. Input logika *fuzzy* antara lain *error level*, perbedaan *error level*, *error pressure*, dan perbedaan *error pressure*. *Error level* memiliki 4 fungsi keanggotaan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4 berikut.



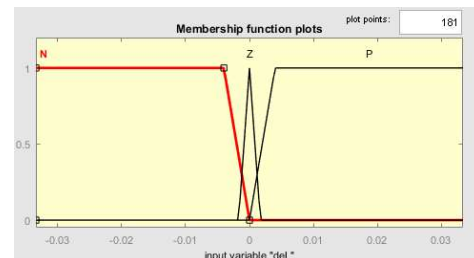
Gambar 4. Fungsi keanggotaan *error level*

Error pressure juga memiliki 4 fungsi keanggotaan yaitu Negatif Besar (NB), Negatif Kecil (NK), Positif Kecil (PK), dan Positif Besar (PB) dan dapat dilihat pada gambar 5, sementara *Derivative error level* memiliki 3 fungsi keanggotaan yaitu Negatif (N), Zero (Z), dan Positif (P) ditunjukkan pada gambar 6.



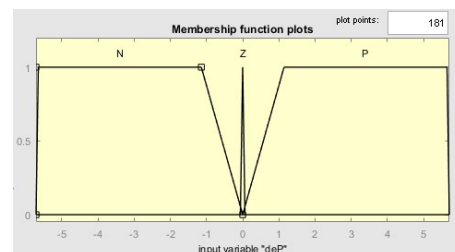
Gambar 5. Fungsi keanggotaan *error pressure*

Derivative error level memiliki 3 fungsi keanggotaan yaitu Negatif (N), Zero (Z), dan Positif (P) seperti yang ditunjukkan pada gambar 6 berikut.



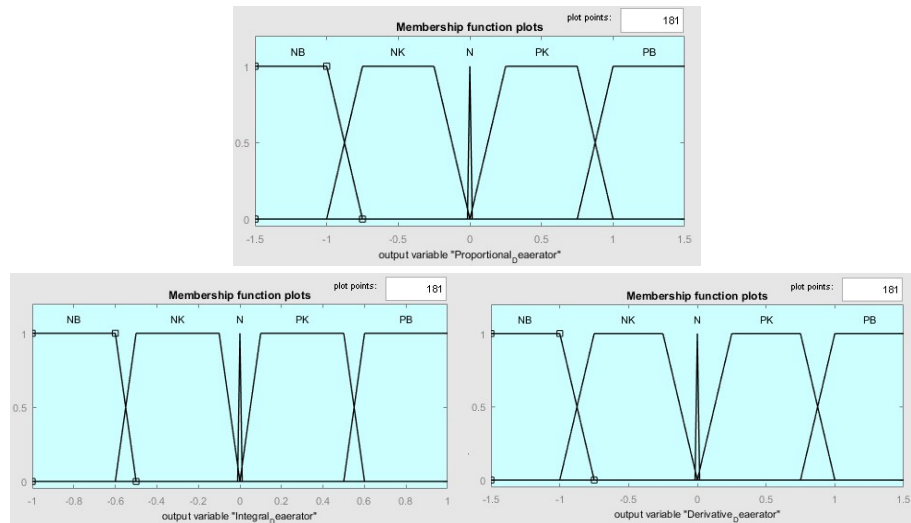
Gambar 6. Fungsi keanggotaan perbedaan *derivative error level*

Derivative error pressure memiliki 3 fungsi keanggotaan yaitu Negatif (N), Zero (Z), dan Positif (P) seperti yang ditunjukkan pada gambar 7 berikut.

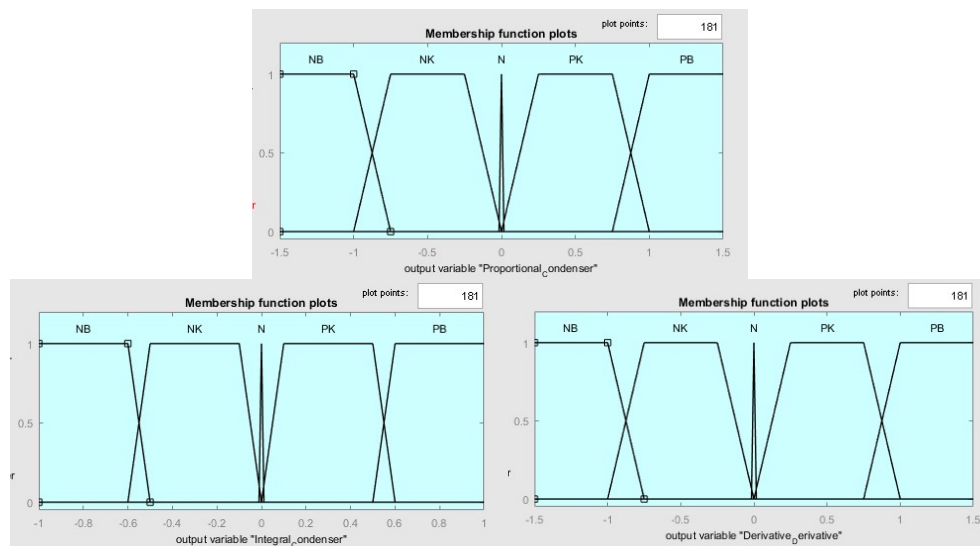


Gambar 7. *Derivative error pressure*

Output logika *fuzzy* berupa gain K_p , K_i , dan K_d *deaerator level control valve* dan *condenser recycle control valve*. *Ouptut* logika *fuzzy* K_p , K_i , dan K_d yang akan menjadi input dari *PID controller deaerator level control valve* memiliki 5 fungsi keanggotaan yaitu Negative Besar (NB), Negatif Kecil (NK), Nol (N), Positif Kecil (PK), dan Positif Besar (PB) seperti yang dapat dilihat pada gambar 8.

Gambar 8. Fungsi keanggotaan output *fuzzy logic*

Output *fuzzy logic* sebagai *gain PID condenser recycle control valve* juga memiliki 5 fungsi keanggotaan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 9 berikut.

Gambar 9. Fungsi keanggotaan output *fuzzy logic*

Sistem inferensi *fuzzy* yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem inferensi mamdani. Metode mamdani dipilih karena sistem inferensi mamdani dapat mengimplementasikan pengetahuan dan pengalaman pakar ke dalam sistem dengan

baik dan lebih intuitif dibanding sistem inferensi *fuzzy* yang lain [24]. *Fuzzy rules* untuk parameter K_i , K_p , dan K_d untuk *PID controller deaerator level* dan *condenser recycle control valve* dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. *Fuzzy rules* untuk parameter K_p deaerator level control valve

eL.deL \ eP.deP	NB.N	NB.Z	NB.P	NK.N	NK.Z	NK.P	PK.N	PK.Z	PK.P	PB.N	PB.Z	PB.P
NB.N	PB	PK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB.Z	PB	PK	N	0	0	0	0	PB	PB	0	PK	PK
NB.P	0	0	N	0	0	0	0	PB	PB	0	PK	PK
NK.N	PB	N	0	PB	0	0	NK	0	0	0	0	0
NK.Z	PB	PK	0	PB	NK	NK	NB	0	PK	0	PK	PB

NK.P	0	0	0	0	NK	NK	0	0	PK	N	PK	PB
PK.N	0	0	0	PB	PB	0	NB	0	N	0	N	0
PK.Z	PB	0	0	PB	0	0	NB	0	N	0	N	PK
PK.P	PB	PK	0	PB	0	N	0	0	N	0	N	0
PB.Z	0	PK	0	0	0	0	NK	NK	0	0	0	0
PB.P	0	PK	0	0	0	0	NK	N	0	0	0	0

Tabel 5. Fuzzy rules untuk parameter Ki deaerator level control valve

eL.deL \ eP.deP	NB.N	NB.Z	NB.P	NK.N	NK.Z	NK.P	PK.N	PK.Z	PK.P	PB.N	PB.Z	PB.P
NB.N	PB	PK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB.Z	PB	PK	NK	0	0	0	0	PB	PB	0	PK	PK
NB.P	0	0	NK	0	0	0	0	PB	PB	0	PK	PK
NK.N	PB	PK	0	PB	0	0	NK	0	0	0	0	0
NK.Z	PB	N	0	PB	NK	NK	NB	0	PK	0	PK	PB
NK.P	0	0	0	0	NK	NK	0	0	PK	N	PK	PB
PK.N	0	0	0	PB	PB	0	NB	0	N	0	N	0
PK.Z	PB	0	0	PB	0	0	NB	0	PK	0	N	PK
PK.P	PB	PK	0	PB	0	N	0	0	PK	0	N	0
PB.Z	0	PK	0	0	0	0	NK	NK	0	0	0	0
PB.P	0	PK	0	0	0	0	NK	N	0	0	0	0

Tabel 6. Fuzzy rules untuk parameter Kd deaerator level control valve

eL.deL \ eP.deP	NB.N	NB.Z	NB.P	NK.N	NK.Z	NK.P	PK.N	PK.Z	PK.P	PB.N	PB.Z	PB.P
NB.N	PB	PK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB.Z	PB	PK	N	0	0	0	0	PB	PB	0	PK	PK
NB.P	0	0	N	0	0	0	0	PB	PB	0	PK	PK
NK.N	PB	PK	0	PB	0	0	NK	0	0	0	0	0
NK.Z	PB	PK	0	PB	NK	NK	NB	0	PK	0	NK	PB
NK.P	0	0	0	0	NK	NK	0	0	PK	N	PK	PB
PK.N	0	0	0	PB	PB	0	NB	0	N	0	N	0
PK.Z	PB	0	0	PB	0	0	NB	0	N	0	N	PK
PK.P	PB	PK	0	PB	0	N	0	0	N	0	N	0
PB.Z	0	PK	0	0	0	0	NK	NK	0	0	0	0
PB.P	0	PK	0	0	0	0	NK	N	0	0	0	0

Tabel 7. Fuzzy rules untuk parameter Kp condenser recycle control valve

eL.deL \ eP.deP	NB.N	NB.Z	NB.P	NK.N	NK.Z	NK.P	PK.N	PK.Z	PK.P	PB.N	PB.Z	PB.P
NB.N	N	NK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB.Z	N	NK	N	0	0	0	0	N	N	0	N	N
NB.P	0	0	N	0	0	0	0	N	N	0	N	N
NK.N	NB	NK	0	N	0	0	NK	0	0	0	0	0
NK.Z	NK	NK	0	N	N	N	N	0	N	0	N	N
NK.P	0	0	0	0	N	N	0	0	N	N	N	N
PK.N	0	0	0	PK	PK	0	N	0	PK	0	N	0
PK.Z	NK	0	0	N	0	0	N	0	NB	0	NK	NB
PK.P	NK	N	0	N	0	NK	0	0	NB	0	N	0
PB.Z	0	N	0	0	0	0	N	NK	0	0	0	0
PB.P	0	N	0	0	0	0	NK	NK	0	0	0	0

Tabel 8. Fuzzy rules untuk parameter Ki condenser recycle control valve

eL.deL \ eP.deP	NB.N	NB.Z	NB.P	NK.N	NK.Z	NK.P	PK.N	PK.Z	PK.P	PB.N	PB.Z	PB.P
NB.N	N	NK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB.Z	N	NK	NK	0	0	0	0	N	N	0	N	N
NB.P	0	0	NK	0	0	0	0	N	N	0	N	N

NK.N	NB	N	0	N	0	0	NK	0	0	0	0	0
NK.Z	NK	N	0	N	N	N	N	0	N	0	N	N
NK.P	0	0	0	0	NN	N	0	0	N	N	PK	N
PK.N	0	0	0	PK	PK	0	N	0	PK	0	N	0
PK.Z	NK	0	0	N	0	0	NK	0	NB	0	NK	NB
PK.P	NK	N	0	N	0	NK	0	0	NB	0	NB	0
PB.Z	0	NK	0	0	0	0	N	NK	0	0	0	0
PB.P	0	N	0	0	0	0	NK	NK	0	0	0	0

Tabel 9. Fuzzy rules untuk parameter Kd condenser recycle control valve

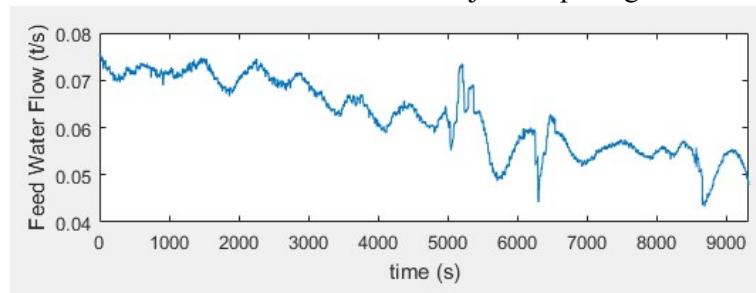
eL.deL \ eP.deP	NB.N	NB.Z	NB.P	NK.N	NK.Z	NK.P	PK.N	PK.Z	PK.P	PB.N	PB.Z	PB.P
NB.N	N	NK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB.Z	N	N	N	0	0	0	0	N	N	0	N	N
NB.P	0	0	N	0	0	0	0	N	N	0	N	N
NK.N	N	N	0	N	0	0	NK	0	0	0	0	0
NK.Z	NK	NK	0	N	N	N	N	0	N	0	N	N
NK.P	0	0	0	0	N	N	0	0	N	N	N	N
PK.N	0	0	0	N	N	0	N	0	PK	0	N	0
PK.Z	NK	0	0	N	0	0	N	0	N	0	N	NB
PK.P	NK	N	0	N	0	NK	0	0	NK	0	N	0
eL.deL \ eP.deP	NB.N	NB.Z	NB.P	NK.N	NK.Z	NK.P	PK.N	PK.Z	PK.P	PB.N	PB.Z	PB.P
PB.Z	0	NK	0	0	0	0	N	NK	0	0	0	0
PB.P	0	N	0	0	0	0	NK	NK	0	0	0	0

3. Hasil Penelitian

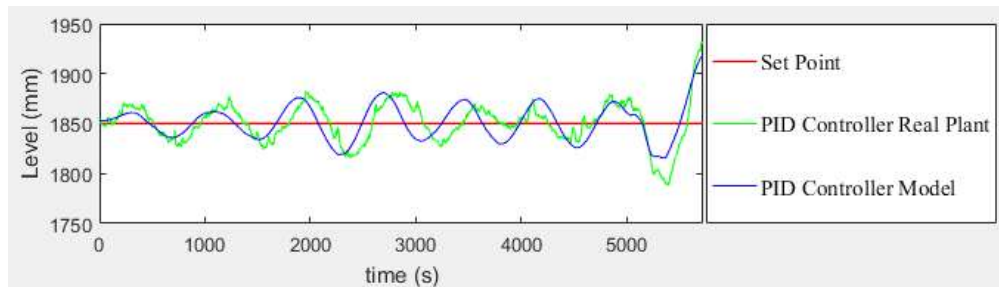
Model dinyatakan merepresentasikan *real plant* apabila nilai *error* maksimum < 10 % [25], [26]. Apabila model sistem dinilai dapat merepresentasikan *real plant* maka penelitian dilanjutkan dengan melakukan pengujian sistem kontrol *fuzzy PID controller*.

3.1. Validasi Model

Validasi dilakukan dengan cara membandingkan respon *PID controller real plant* dengan *PID controller model* menggunakan data *feedwater* ketika dilakukan pengujian PID. *Feedwater flow* pada saat dilakukan pengujian PID dapat dilihat pada gambar 11. Sementara hasil validasi model terkait respon parameter *level* ditunjukkan pada gambar 12.



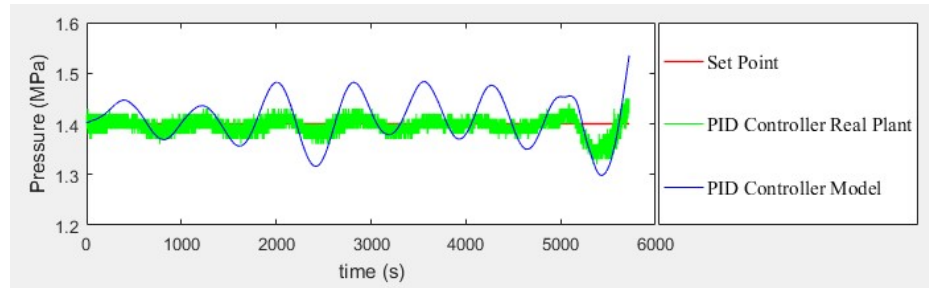
Gambar 11. Feed water flow ketika dilakukan pengujian PID controller real plant



Gambar 12. Perbandingan respon level PID controller model dan *real plant*

Validasi model terhadap *real plant* berkaitan dengan respon *level deaerator* seperti yang ditunjukkan pada gambar 12 menunjukkan bahwa *error* terbesar adalah 1,88% dan rata-rata *error* sebesar 0,55%.

Hasil validasi model berkaitan dengan respon *pressure* ditunjukkan oleh gambar 13 berikut.

Gambar 13. Perbandingan respon pressure PID controller model dan *real plant*

Hasil validasi menunjukkan bahwa maksimum *error* sebesar 7,33% dan rata-rata *error* sebesar 2,21%. Berdasarkan hasil pengujian validasi terhadap respon *level* dan *pressure*, dapat disimpulkan bahwa model dapat merepresentasikan *real plant* [25], [26].

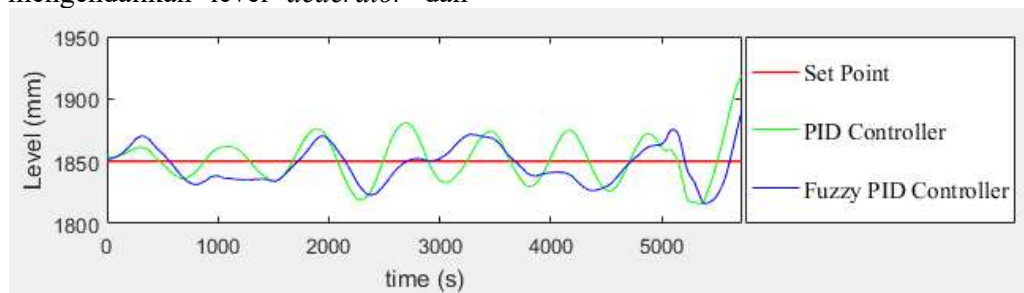
3.2. Pengujian Fuzzy PID Controller

Pengujian dilakukan menggunakan data *trending* operasi *feed water flow* pada saat dilakukan pengujian PID controller *real plant* dan ketika unit pembangkit pada keadaan normal operasi. Keberhasilan sistem diukur berdasarkan kemampuan sistem kontrol untuk mengendalikan level *deaerator* dan

condensate pump discharge perssure sesuai dengan *set point* dan standar batasan operasi kedua parameter tersebut. Nilai *low level deaerator* sebesar 1600 mm dan nilai *high* sebesar 2000 mm. Sedangkan untuk *pressure*, memiliki nilai *low* sebesar 1,2 Mpa dan nilai *high* sebesar 1,8 Mpa.

3.2.1 Feed Water Flow Ketika Dilakukan Pengujian PID Controller Real Plant

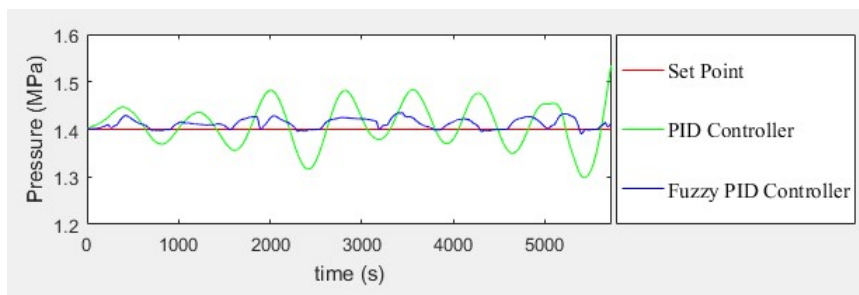
Feed water flow yang digunakan sebagai gangguan pada pengujian ini diperlihatkan oleh gambar 11. Hasil dari pengujian dapat dilihat pada gambar berikut.

Gambar 14. Level *deaerator* saat pengujian PID controller

Dari hasil pengujian respon PID controller dan fuzzy PID controller untuk mengendalikan level *deaerator* seperti yang ditunjukkan oleh gambar 14, didapatkan nilai *error level* PID controller maksimum sebesar 3,63% dan rata-rata *error* sebesar 0,75% dengan RMSE sebesar 17,09 mm. *Error level*

maksimum fuzzy PID controller sebesar 2,19% dan rata-rata *error* sebesar 0,7% dengan RMSE sebesar 15,15 mm.

Respon PID controller dan fuzzy PID controller untuk mengendalikan *discharge pressure condensate pump* ditunjukkan oleh gambar 15 berikut.



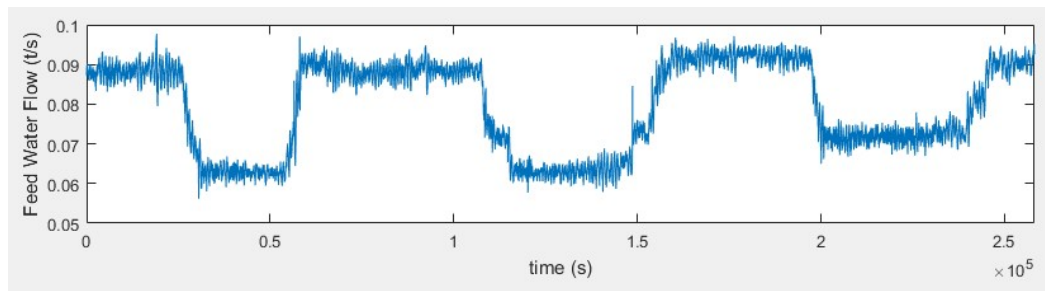
Gambar 15. Discharge pressure condensate pump saat pengujian PID controller

Berdasarkan hasil pengujian respon *pressure*, didapatkan nilai *error* maksimum PID controller sebesar 8,87%, rata-rata *error* sebesar 2,5%, dan RMSE sebesar 0,043 MPa. Sedangkan *error* maksimum fuzzy PID controller sebesar 2,5%, rata-rata *error* sebesar 0,92%, dan RMSE sebesar 0,016 MPa.

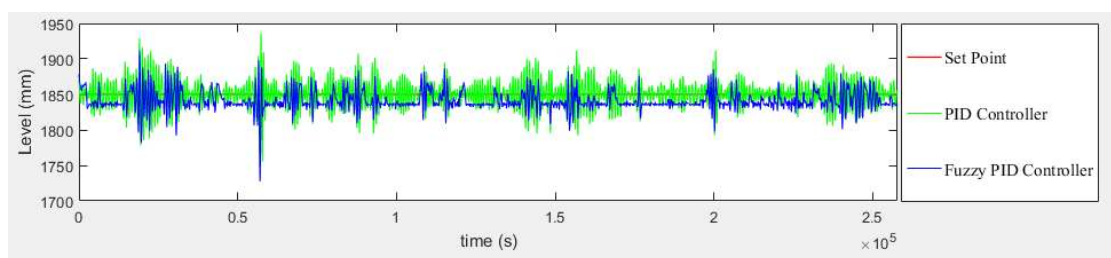
3.2.2 Feed Water Flow Ketika Unit Pembangkit Normal Operasi

Pengujian ini dilakukan untuk

mengetahui respon *controller* ketika unit pembangkit beroperasi secara normal dengan pembebanan sesuai dengan permintaan pengatur beban (*dispatcher*). Pengujian akan dilakukan menggunakan data trending *feed water flow* selama 258129 s yang diambil pada tanggal 27/01/2022 pukul 16:16:08 hingga 30/01/2022 pukul 16:16:08 seperti yang ditunjukkan gambar 16. Sedangkan hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 17.



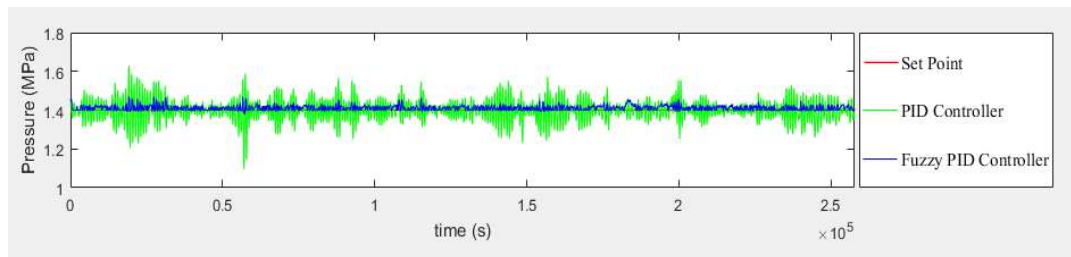
Gambar 16 Feed water flow ketika unit pembangkit normal operasi

Gambar 17. Level deaerator ketika diberikan gangguan *feedwater flow* normal operasi

Hasil pengujian menunjukkan *error level* maksimum PID controller sebesar 5,21% dan rata-rata *error* sebesar 0,81% dengan RMSE sebesar 19,54 mm. *Error* maksimum fuzzy PID controller sebesar 6,62% dengan rata-

rata *error* sebesar 0,74% dan RMSE sebesar 15,94 mm.

Respon pengendalian *pressure* PID controller dan Fuzzy PID dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 18. *Condensate pump discharge pressure* ketika diberikan gangguan *feedwater flow* normal operasi

Berdasarkan hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada gambar 18, diperoleh nilai *error* maksimum PID *controller* sebesar 22,03% dengan rata-rata *error* sebesar 2,98% dan RMSE sebesar 0,055 MPa. Pada waktu ke 19974 s PID *controller* tidak mampu menjaga *condensate pump discharge pressure* dalam batasan operasinya karena *pressure* turun hingga 1,19 MPa. Sedangkan *error* maksimum fuzzy PID *controller* sebesar 5,09% dan rata-rata *error* sebesar 0,91% dan RMSE sebesar 0,0017 MPa dengan minimum *pressure* sebesar 1.37 MPa.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian-pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa fuzzy PID *controller* memiliki respon yang lebih baik dalam mengendalikan level *deaerator* dengan rata-rata *error* yang lebih kecil pada 2 pengujian yang telah dilakukan. Kelemahan dari model fuzzy PID yang telah didesain yaitu memiliki nilai *error* maksimum yang lebih tinggi dibanding PID *controller* yang artinya fuzzy PID *controller* kurang baik dalam menangani perubahan gangguan secara mendadak. Namun demikian, level yang dikendalikan

Dalam hal pengendalian *pressure*, fuzzy PID *controller* mampu mengendalikan *pressure* dengan baik dengan menjaga *condensate pump discharge pressure* tetap di dalam batasan operasinya dan mendekati *set point*, berbeda dengan PID *controller* yang tidak mampu menjaga *condensate pump discharge pressure* dalam batasan operasinya (>1.2 MPa) dan memiliki nilai RMSE yang cukup tinggi sehingga tidak dapat digunakan sebagai sistem kontrol untuk mengendalikan level *deaerator* dan *condensate pump discharge pressure*.

5. Saran

Untuk mengatasi perubahan gangguan (*feed water flow*) yang cukup signifikan, perlu ditambahkan *feed forward signal* berupa *feed water flow* itu sendiri sehingga sistem kontrol tidak hanya mempertimbangkan parameter yang sedang terjadi, namun mampu memprediksi perubahan level *deaerator*. Dengan demikian, diharapkan sistem kontrol menjadi lebih responsif terutama saat ada perubahan gangguan yang cukup signifikan.

6. Daftar Pustaka

- [1] I. Pamungkas, H. T. Irawan, and T. . A. Pandria, "Implementasi Preventive Maintenance Untuk Meningkatkan Keandalan Pada Komponen Kritis Boiler Di Pembangkit Listrik Tenaga Uap," *VOCATECH Vocat. Educ. Technol. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 73–78, 2021, doi: 10.38038/vocatech.v2i2.53.
- [2] I. Pamungkas, H. T. Irawan, A. Arhami, and ..., "Usulan Waktu Perawatan Dan Perbaikan Berdasarkan Keandalan Pada Bagian Boiler Di Pembangkit Listrik Tenaga Uap," *J. ...*, vol. 5, pp. 82–95, 2019, [Online]. Available: <http://180.250.41.45/joptimalisasi/article/view/1255>.
- [3] M. D. Pasha and D. K. Puspaningrum, "Simulasi Otomasi Process Shut Down Deaerator pada Unit Boiler dengan Parameter Suhu dan Level Berbasis PLC Allen - Bradley," *Maj. Ilm. Swara Patra*, vol. 11, no. 2, pp. 51–61, 2021, doi: 10.37525/sp/2021-2/295.
- [4] K. Y. Kim and Y. J. Lee, "Fault Detection and Diagnosis of the Deaerator Level Control System in Nuclear Power Plants," *J. Korean Nucl. Soc.*, vol. 36, no. 1, pp. 73–82, 2004.
- [5] J. E. Siswanto, "Analisa Pengaruh Perubahan Beban Output Turbin

- Terhadap Efisiensi Boiler,” *J. Electr. Power Control Autom.*, vol. 3, no. 2, pp. 44–48, 2020, doi: 10.33087/jepca.v3i2.39.
- [6] S. Gomathy and T. Anitha, “Deaerator Storage Tank Level & Deaerator Pressure Control Using Soft Computing,” *Int. J. Sci. Adv. Res. Technol.*, vol. 1, no. 5, pp. 137–142, 2015.
- [7] S. Setyawan, I. S. R. Putra, A. D. Putra, and R. B. Cahyono, “Modifikasi Proses Pengolahan Boiler Feed Water (BFW) dari All Volatile Treatment (AVT) menjadi Oxygenated Treatment (OT) untuk Produksi Listrik Ramah Lingkungan,” *J. Rekayasa Proses*, vol. 15, no. 2, pp. 131–140, 2021, doi: 10.22146/jrekpros.65976.
- [8] R. B. Permana, N. Effendy, and A. Arif, “Design of Control Water Level System on Deaerator with PI Nested Cascade at PT. Petrokimia Gresik.” Yogyakarta, 2016, [Online]. Available: <http://etd.repository.ugm.ac.id/>.
- [9] R. H. Subrata, R. Tarumasely, and C. D. Setiawan, “Perancangan Pengendali PID untuk gerakan pitch dan roll pada quadcopter,” *Jetri J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 14, no. 2, pp. 1–16, 2017.
- [10] I. Hudati, A. P. Aji, and S. Nurrahma, “Kendali Posisi Motor DC dengan Menggunakan Kendali PID,” *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 25–30, 2021, doi: 10.22146/juliet.v2i2.71148.
- [11] C. T. Chao, N. Sutarna, J. S. Chiou, and C. J. Wang, “An optimal fuzzy PID controller design based on conventional PID control and nonlinear factors,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 6, 2019, doi: 10.3390/app9061224.
- [12] I. Khadari, Subiyanto, and D. Prastiyanto, “Jurnal Ilmiah Setrum,” *J. Ilm. Setrum*, vol. 8, no. 2, pp. 186–196, 2019.
- [13] N. Sutarna and S. Rahayu, “Metode Tuning Operating Range Fuzzy PID Controller pada Sistem Orde Tiga,” *J. Tek. Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 33–39, 2020.
- [14] N. Yanti, T. Nur, and R. Randis, “Implementation of Fuzzy Logic in Fish Dryer Design,” *Ilk. J. Ilm.*, vol. 14, no. 1, pp. 39–51, 2022, doi: 10.33096/ilkom.v14i1.1092.39-51.
- [15] Randis, S. S. Islam, Nuryanti, and Novita, “Jurnal Polimesin,” *J. Polimesin*, vol. 21, no. 2, pp. 253–258, 2023.
- [16] H. B. Group, “11H36-0(C版).pdf.” PT. PERUSAHAAN LISTRIK NEGARA (PERSERO), Balikpapan, p. 1, 2015.
- [17] Sri Wuryanti, “Neraca Massa dan Neraca Energi,” Bandung, 2016.
- [18] Keisan, “How to calculates the volume of an ellipsoidal cap,” 2015. .
- [19] P. A. Pratiwi, “Perancangan Sistem Pengendalian Level Menggunakan Fuzzy Logic pada Unit Deaerator 101U di Pabrik Ammonia PT. Petrokimia Gresik,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [20] Anonim, *Turbine Operation Manual- Version A*, 3rd ed. Indonesia, 2015.
- [21] N. Pricilya, “Level Berbasis Mrac Pada Deaerator Unit 101-U Di Pt . Petrokimia Gresik,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [22] *Sipart PS2 Manual*, 10th ed. Munich, Jerman, 2006.
- [23] M. W. Kasrani, A. Asni, and A. S. Putra, “Perancangan Sistem Pengendalian Kecerahan Lampu Utama Pada Mobil Berbasis Arduino Uno,” *Jte Uniba*, vol. 5, no. 1, pp. 1–5, 2020.
- [24] N. Nuraida, I. Iryanto, and D. Sebayang, “Analisis Tingkat Kepuasan Konsumen Berdasarkan Pelayanan, Harga Dan Kualitas Makanan Menggunakan Fuzzy Mamdani (Studi Kasus pada Restoran Cepat Saji CFC Marelana),” *Saintia Mat.*, vol. 1, no. 6, pp. 543–555, 2013.
- [25] A. Acquaviva, E. Lattanzi, and A. Bogliolo, *Power-aware network swapping for wireless palmtop PCs*, vol. 5, no. 5. 2006.
- [26] S. Gupta and F. N. Najm, “Power modeling for high-level power estimation,” *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst.*, vol. 8, no. 1, pp. 18–29, 2000, doi: 10.1109/92.820758.