

Desain dan Simulasi Kontrol Suhu Main Steam pada PLTU dengan Sistem *Desuperheater* yang Dikendalikan Menggunakan PID

I Kadek Arika Raharja^{1,*}, Sri Utami², Ign. Riyadi Mardiyanto³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : ^{1,*}arikaraharja11@gmail.com; ²sri.utami@polban.ac.id; ³ignatius.mardiyanto@polban.ac.id

ABSTRAK

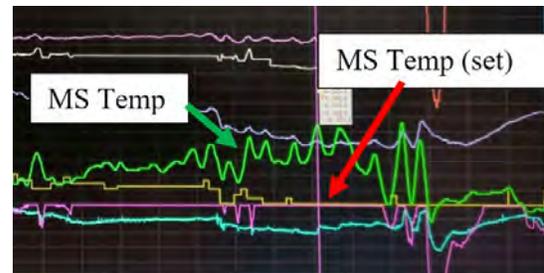
Pada PLTU, temperatur *Main steam* atau uap yang menuju *High Pressure Turbine* sering kali mengalami kenaikan melebihi batas normal operasi, umumnya sebesar 538°C. Hal ini dapat menyebabkan penurunan umur sudu turbin akibat dari *creep fatigue* pada materialnya. Kenaikan suhu ini umumnya disebabkan oleh terjadinya *trip* pada *coal feeder* dan *pulverizer*, atau mungkin juga disebabkan oleh faktor yang tidak diketahui dengan pasti, seperti adanya *slagging*. Meskipun telah ada komponen pengatur temperatur *Main steam* (*Attemperator*) untuk menstabilkan suhu pada *setpoint*, namun pada beberapa kondisi masih sulit untuk menstabilkan fluktuasi yang ekstrim. Untuk mengatasi masalah ini, dilakukan penambahan sistem *desuperheater* pada *outlet boiler* dengan kapasitas 60 ton/jam. Sistem *desuperheater* ini berhasil menurunkan suhu *Main steam* dari titik tertingginya, yaitu sekitar 565°C, menjadi stabil kembali pada *setpoint* yang diinginkan. Pengendalian suhu berhasil dilakukan melalui kontrol PID konvensional berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak Simulink. Berdasarkan hasil *tuning* menggunakan perangkat lunak Simulink, konstanta PID yang digunakan adalah $P = -23.5$, $I = -2.8$, $D = -40.9$, dan $N = 1.9$. Simulasi menunjukkan bahwa penambahan sistem *desuperheater* dengan kontrol PID berhasil menjaga suhu *Main steam* tetap stabil pada *setpoint*.

Kata Kunci

Temperatur, Steam, Setpoint, Desuperheater, PID, Simulink

1. PENDAHULUAN

Pada PLTU, terjadi masalah dengan kenaikan temperatur *main steam* yang tidak terkendali. Meskipun *control valve* untuk *attemperator* sudah dibuka penuh, temperatur *main steam* tetap melebihi *setpoint* dan bahkan melewati batas temperatur spesifikasinya. Penyebab kenaikan ini dapat bervariasi, seperti *overfiring* saat salah satu *coal feeder trip*, *slagging* yang mengganggu perpindahan panas, serta *delay combustion*.



Gambar 1 Trend Main steam Temperature pada tanggal 11 - 12 November 2022 pada salah satu PLTU kapasitas 600 MW

Kondisi ini terlihat pada Gambar 1, yaitu fluktuasi temperatur yang melebihi *setpoint*. Jika temperatur *main steam* melebihi temperatur *rated*, dapat terjadi kerusakan *creep* pada sudu turbin, terutama pada sisi tekanan tinggi (*HP turbine*) [1]. *Creep* terjadi saat logam memuai akibat suhu tinggi dalam waktu lama, dan dapat menyebabkan peregangan butir atau struktur logam.

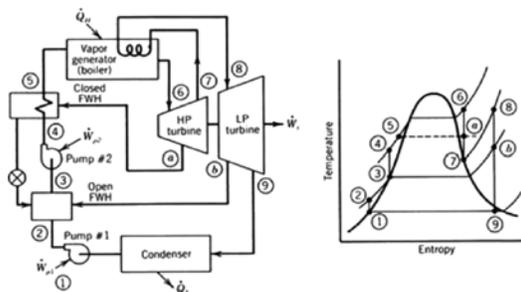
Untuk mencegah kerusakan *creep* temperatur uap yang masuk ke turbin harus dijaga pada *setpoint*. Oleh karena itu, desuperheater menjadi penting sebagai *backup* untuk *attemperator* atau sistem *existing* untuk mengendalikan temperatur dan perlindungan turbin dari temperatur *main steam* yang tinggi. *Desuperheater* dapat berfungsi untuk menurunkan temperatur *main steam* agar mencapai *setpoint* yang diinginkan. Dalam konteks ini, *attemperator* atau *desuperheater* memiliki peranan vital dalam mengendalikan temperatur uap agar tetap aman dan sesuai dengan target operasional.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai teori – teori yang berasal dari berbagai referensi sebelum membahas lebih lanjut ke tahapan pembuatan rancangan.

2.1 Siklus Rankine Regenerative Reheat PLTU

PLTU yang menggunakan siklus *Rankine* dengan tipe *regenerative reheat* adalah PLTU dengan komponen *reheater* dan *feedwater heater*. Siklusnya bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Siklus Regenerative Reheat

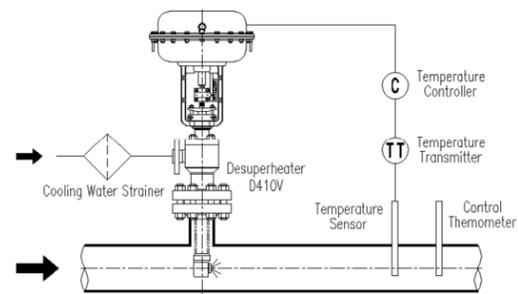
Dimulai dari proses nomor 1 – 2, air kondensat dari kondensator yang dipompakan oleh *Condensate Extraction Pump* menuju ke *feedwater heater*. Selanjutnya proses 2 – 3 merupakan proses pemanasan air yang terjadi di *LP feedwater heater*. Proses 3 – 4 adalah proses pemompaan air kondensat oleh *Boiler Feed Pump Turbine* yang dibantu oleh *Booster Boiler Feed Pump*. Dari proses 3 – 4 – 5 air melewati *HP feedwater heater* dan *economizer* hingga tiba di *steam drum*. Pada proses nomor 5 – 6, air dipanaskan di *steam drum* hingga berubah fasa menjadi uap, kemudian uap dipanaskan oleh *superheater* sehingga mencapai temperatur dan tekanan tertentu. Uap ini akan masuk ke turbin, kemudian dipanaskan kembali untuk dimasukkan ke turbin dengan tingkatan tekanan menengah.

Setelah itu, uap keluaran turbin tekanan menengah akan masuk ke turbin tekanan rendah. Uap dari turbin tekanan rendah akan masuk ke kondensator sehingga menjadi sebuah siklus uap dan air [2].

2.3 Desuperheater

Desuperheater adalah sebuah komponen dalam sistem boiler yang berfungsi untuk menurunkan suhu uap yang panas menjadi suhu yang lebih rendah dengan cara menginjeksikan air atau fluida pendingin ke dalam aliran uap tersebut [3]. Hal ini dilakukan untuk menjaga suhu uap dalam batas yang diinginkan atau *setpoint* yang telah ditentukan.

Sistem *desuperheater* terdiri dari 4 komponen utama yaitu *control valve*, *desuperheater*, alat ukur temperatur, dan *controller*. Uap yang melalui *desuperheater* yang memiliki temperatur tinggi akan didinginkan menggunakan *spray water* yang berasal dari *feedwater system* dengan *mass flow* yang dikendalikan oleh *control valve*, sehingga temperatur uap bisa turun menuju *setpoint* dan stabil [4].



Gambar 3 Sistem Desuperheater

Desuperheater memiliki beberapa jenis tergantung dari spesifikasi *spray water flow* maksimum yang dibutuhkan, tekanan *spray water* serta tujuan pengaplikasiannya.

2.4 Control Valve

Sebuah *control valve* terdiri dari tiga bagian utama: *valve* itu sendiri, aktuator yang berfungsi untuk menggerakkan *valve*, dan positioner yang mengendalikan posisi *valve* sehingga sesuai dengan sinyal pengendali [5].

Berikut adalah beberapa jenis dari *control valve*.

1. *Equal Percentage* (katup pengendali yang paling umum digunakan)

- Digunakan pada proses-proses di mana perubahan tekanan yang besar diharapkan.
- Digunakan pada proses-proses di mana persentase kehilangan tekanan total yang kecil diizinkan oleh katup.

- Digunakan pada sistem pengendalian suhu dan tekanan.
2. *Linear*
 - Digunakan pada pengendalian *level* atau *flow*.
 - Digunakan pada sistem-sistem di mana perubahan tekanan melintasi katup diharapkan tetap konstan (misalnya sistem dalam keadaan mantap).
 3. *Quick Opening* (pembukaan cepat)
 - Digunakan untuk layanan sering on-off.
 - Digunakan untuk proses-proses di mana aliran besar diperlukan "seketika" (misalnya sistem keselamatan atau sistem pendingin).

Pemilihan katup pengendali ini bergantung pada karakteristik dan persyaratan khusus dari suatu proses atau sistem [6].

2.5 Pemodelan Matematika Sistem

Untuk memodelkan sistem pada *software simulink*, sistem yang dirancang perlu dimodelkan dalam diagram *block*. Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai bagaimana cara pemodelan yang digunakan.

2.5.1 Pemodelan Control Valve

Control Valve dimodelkan dengan fungsi transfer sebagai berikut:

$$G_v(s) = \frac{K_v}{\tau_{cv} \cdot s + 1} \quad (1)$$

Dimana:

$G_v(s)$ = Fungsi Transfer *Control Valve*

K_v = *Gain Control Valve*
(kg/s)/mA

τ_{cv} = Konstanta Waktu *Control Valve* (s)

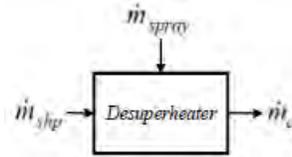
Gain digunakan untuk mengkonversi satuan arus listrik 4 – 20 mA dari *Controller* menjadi *flow rate* yang disebabkan oleh pembukaan *control valve* setelah diberika arus. Konstanta waktu merupakan 63,2 % dari *maximum stroking time control valve* [7].

2.5.2 Pemodelan Desuperheater

Pada *Desuperheater* terjadi pencampuran antara air *spray* dan uap panas, sehingga akan berlaku persamaan neraca massa dan neraca energi [8]. Persamaan neraca massa dan neraca energi digambarkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Persamaan neraca massa:

$$\dot{m}_{shp} + \dot{m}_{spray} = \dot{m}_d \quad (2)$$



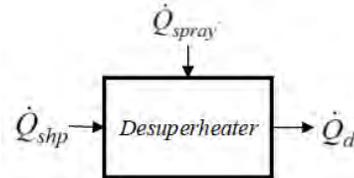
Gambar 4 Neraca Massa pada Desuperheater

Persamaan neraca energi:

$$\dot{m}_{shp} \cdot h_{shp} + \dot{m}_{cw} \cdot h_{cw} - H_d = 0$$

(3)

$$H_d = \dot{m}_{shp} \cdot h_{shp} + \dot{m}_{cw} \cdot h_{cw} \quad (4)$$



Gambar 5 Neraca Energi pada Desuperheater

Dimana:

\dot{m}_{shp} = *Mass Flow* uap masuk
(kg/s)

\dot{m}_{spray} = *Mass Flow Spray Water*
(kg/s)

\dot{m}_d = *Mass Flow* uap keluar
(kg/s)

h_{shp} = *Entalpi Spesifik* uap masuk
(kJ/kg)

h_{cw} = *Entalpi Spesifik Spray Water*
(kJ/kg)

H_d = *Laju Energi* uap keluar
(kJ/s)

Setelah mendapatkan laju energi uap keluar, maka bisa didapatkan nilai entalpi spesifik uap keluar sehingga nilai temperatur uap keluar bisa didapatkan menggunakan persamaan regresi linier [9].

$$h_d = \frac{H_d}{\dot{m}_d} \quad (5)$$

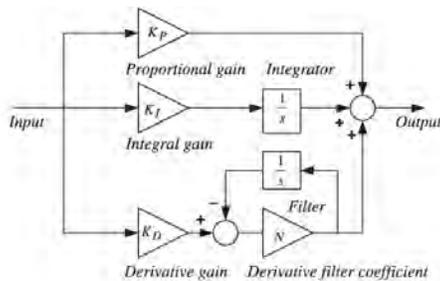
$$h_d = \frac{H_d}{\dot{m}_{shp} + \dot{m}_{spray}} \quad (6)$$

Dimana:

h_d = Entalpi Spesifik uap keluar (kJ/kg)

2.6 PID Tuning Menggunakan Simulink

Pengendali PID (*Proportional Derivative Integral*) merupakan pengendali yang beroperasi secara kontinyu, yaitu mengendalikan elemen aktuator (seperti *control valve* atau *regulator*) dalam suatu *range* 0 – 100% (misal bukaan *valve*) untuk menjaga *process variable* (seperti *flow*, temperatur, tekanan, dll.) agar tetap berada pada *setpoint* [10]. Pengendali PID digambarkan pada Gambar 6.



Gambar 6 PID dengan Filter

Untuk menjalankan fitur *tuning* pada blok PID di *simulink*, diperlukan pemodelan keseluruhan dari sistem yang akan disimulasikan terlebih dahulu. Setelah sistem selesai disusun pada *simulink* yang umumnya berupa blok – blok komponen yang saling dihubungkan, maka baru bisa melakukan *tuning* menggunakan blok PID ini. Ketika *tuning*, konstanta P,I,D dan N akan ditentukan secara otomatis. Hasil yang didapatkan masih bisa disesuaikan secara manual untuk mendapatkan hasil *output* yang diinginkan.

3. METODE PENELITIAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai bagaimana metode atau langkah yang digunakan untuk melakukan pembuatan rancangan sistem. Pembuatan rancangan dimulai dengan merancang sistem *desuperheater* terlebih dahulu sebelum lanjut ke sistem pengendaliannya.

3.1 Metode Pembuatan Rancangan Sistem Desuperheater

Untuk merancang sistem *desuperheater*, dilakukan pemilihan komponen utama dari sistem *Desuperheater*, yaitu *Desuperheater*, *Control Valve* dan Alat Ukur Temperatur. Data – data yang menjadi pertimbangan untuk pemilihan komponen – komponen tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Parameter Main Steam dan Spray Water pada PLTU kapasitas 600 MW

Parameter	Keterangan	Satuan
Temperatur Main Steam tertinggi pada tren	565	°C
Temperatur normal Main Steam	538	°C
Main Steam Flow saat beban penuh	1880	t/h
Tekanan maksimum Main Steam	169	kg/cm ²
Temperatur Spray Water saat beban penuh	190	kg/cm ²
Tekanan Spray Water saat beban penuh	190	°C
Diameter pipa	16.5	in

Dengan parameter – parameter pada Tabel 1, maka dapat dilakukan pemilihan komponen – komponen utama.

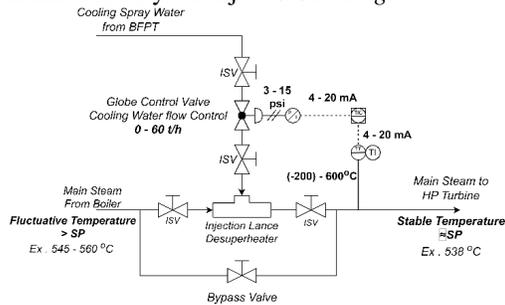
Tabel 2 Pemilihan Komponen Utama Sistem Desuperheater

Komponen Terpilih	Pertimbangan
<i>Injection Lance Desuperheater</i>	Dipilih berdasarkan kebutuhan <i>spray water flow</i> maksimum sebesar 60 t/h, diameter pipa, dan tekanan <i>spray water</i>
<i>Control Valve</i> dengan <i>plug linier</i>	Fluktuasi <i>Main Steam</i> tidak bisa ditoleransi karena bisa menyebabkan vibrasi pada turbin dan <i>open/close</i> yang terlalu cepat dapat menimbulkan <i>water hammer</i> .
Sensor Temperatur THMJ - C06 - 03 dihubungkan ke <i>Thermowell</i> dan Transmitter XTH - 0 - UNV	Range pengukuran (0 – 600°C) serta kondisi lingkungan tempat pengukuran temperatur yang bertekanan tinggi.

Control valve yang dipilih adalah *control valve* dengan karakteristik linier karena bisa memberikan hasil yang lebih stabil dari *equal percentage* serta kondisi tekanan pada aliran air *spray* tidak begitu berubah secara signifikan [11]. Komponen – komponen yang terpilih seperti dijelaskan pada Tabel 2 digambarkan dengan P&ID. P&ID pada Gambar 7 merupakan hasil rancangan sistem *desuperheater*. Ditambahkan *isolation valve* yang berfungsi untuk mengisolasi peralatan jika terjadi masalah pada peralatan tersebut. *Isolation valve* dipasang pada sisi *inlet*

dan outlet. Isolation valve dipasang pada *desuperheater* dan *control valve*. Sedangkan *bypass* berfungsi untuk melewati *main steam* langsung menuju turbin tanpa melewati *desuperheater* jika *desuperheater* mengalami suatu permasalahan.

Setiap komponen yang telah dipilih akan disimulasikan pada *software simulink* dengan memodelkannya menjadi *block diagram*.



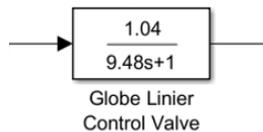
Gambar 7 P&ID Sistem Desuperheater

3.2 Pemodelan Sistem Desuperheater pada Simulink

Software Simulink digunakan untuk mensimulasikan sistem yang dimodelkan dalam *Block Diagram*. Setiap komponen dalam sistem *Desuperheater* yang telah dirancang pada 3.1 perlu dimodelkan terlebih dahulu dengan *Block Diagram*.

3.2.1 Pemodelan Control Valve

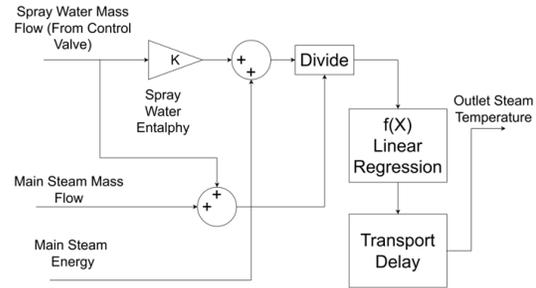
Control Valve memiliki *input* 4 – 20 mA dan *output* sebesar 0 – 60 t/h. Dari data teknis, *control valve* yang digunakan memiliki *maximum stroking time* sebesar 15 detik, sehingga diagram bloknya digambarkan seperti pada Gambar 8. Persamaan yang digunakan adalah persamaan 1.



Gambar 8 Fungsi Transfer Control Valve

3.2.2 Pemodelan Desuperheater

Desuperheater dimodelkan dengan menggunakan persamaan neraca massa dan neraca energi. Untuk mendapatkan temperatur outlet digunakan persamaan regresi linier untuk mengkonversi entalpi spesifik menjadi temperatur pada tekanan konstan. Tekanan konstan yang dipakai adalah sebesar 151.08 kg/cm².

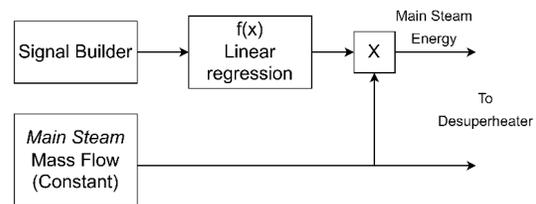


Gambar 9 Model Desuperheater pada Simulink

Persamaan yang digunakan adalah persamaan 3,4,5 dan 6. Selain persamaan neraca massa dan neraca energi, ditambahkan *Transport Delay* untuk mensimulasikan waktu yang dibutuhkan oleh campuran uap dan air untuk mencapai sensor temperatur. Jarak dari *nozzle* ke sensor ditentukan pada *datasheet* dari *desuperheater*. Melalui penyesuaian dengan jarak yang ditentukan dari *datasheet*, didapatkan nilai *transport delay* adalah 0.4 detik.

3.2.3 Pemodelan Disturbance (Main Steam)

Tren temperatur *main steam* yang berfluktuasi di atas *setpoint* merupakan permasalahan yang akan diatasi oleh *desuperheater*. Untuk memodelkan fluktuasi temperatur ini digunakan blok *signal builder*. Pada *signal builder*, tren temperatur digambarkan secara manual.

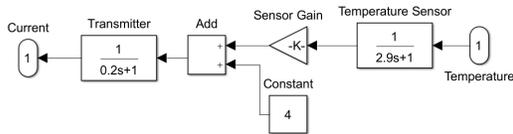


Gambar 10 Pemodelan Main Steam pada Simulink

Dari *signal builder* yang merupakan tren temperatur pada kondisi aktual, dimasukkan ke fungsi regresi linier untuk mengkonversi satuan temperatur menjadi entalpi spesifik pada tekanan konstan. Energi spesifik tersebut dikalikan dengan *mass flow* sehingga menjadi *main steam energi*. Pemodelan kondisi *Main Steam* pada *simulink* dapat dilihat pada Gambar 10.

3.2.4 Pemodelan Alat Ukur Temperatur (Sensor dan Transmitter)

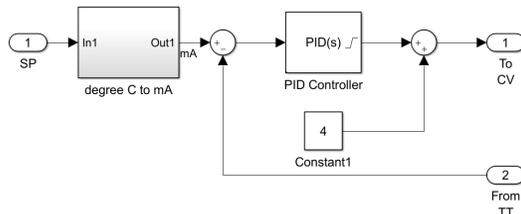
Sensor dan Transmitter dimodelkan menggunakan persamaan FOPDT. Konstanta waktu didapatkan dari *datasheet* sensor. Pemodelan untuk sensor temperatur dan transmitter dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11 Pemodelan Sensor dan Transmitter pada Simulink

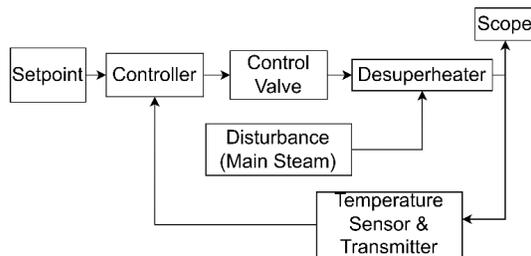
3.2.5 Pemodelan Controller dan Hasil Tuning PID

Controller menerima sinyal arus 4 – 20 mA dari transmitter dan input berupa setpoint dari operator. Selisih dari kedua sinyal tersebut akan dievaluasi oleh PID controller sehingga menghasilkan sinyal output yang sesuai untuk mengontrol control valve. Controller dimodelkan pada Gambar 12.



Gambar 12 Pemodelan Controller pada Simulink

Untuk mendapatkan konstanta PID, maka seluruh komponen dihubungkan menjadi satu diagram blok seperti Gambar 13.



Gambar 13 Pemodelan Sistem Desuperheater pada Simulink

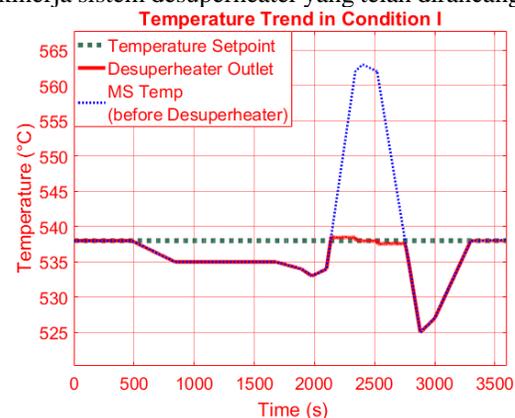
Setelah sistem dimodelkan, maka konstanta PID bisa didapatkan dengan menggunakan fitur *auto tuning* pada blok PID *simulink*. Konstanta PID yang didapatkan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Konstanta PID Hasil Auto Tuning Simulink

Konstanta	Keterangan	Nilai
P	Proportional	-23.5
I	Integral	-2.8
D	Derivative	-40.9
N	Filter Coefficient	1.9

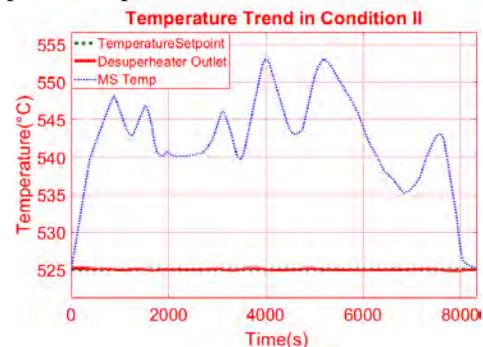
4. HASIL SIMULASI

Dalam rangka menguji kinerja sistem *desuperheater* yang dirancang, dua kondisi umum yang sering terjadi pada PLTU disimulasikan. Kondisi pertama terjadi ketika terjadi peningkatan temperatur akibat *overfiring*, yang disebabkan oleh peningkatan laju aliran massa batubara karena penyesuaian sistem pulverizer setelah salah satu *pulverizer* mengalami *trip*. Kondisi kedua adalah fluktuasi temperatur yang disebabkan oleh adanya *slagging* pada pipa-pipa boiler. Kedua kondisi ini, meskipun insidental, sering terjadi pada PLTU. Data kedua kondisi diambil dari salah satu PLTU dengan kapasitas 600 MW. Simulasi dilakukan untuk membuktikan kinerja sistem *desuperheater* yang telah dirancang.



Gambar 14 Hasil Simulasi Kondisi 1

Pada kondisi 1, dimulai dengan penurunan temperatur akibat penurunan laju massa bahan bakar, kemudian diikuti oleh kenaikan temperatur yang signifikan karena terjadi *overfiring*. Setelah itu, terjadi penurunan drastis dalam temperatur karena sistem yang sudah ada mulai berfungsi. Selama kenaikan temperatur main steam dari boiler, berdasarkan hasil simulasi, sistem *desuperheater* yang dirancang mampu menjaga temperatur main steam tidak berfluktuasi melewati setpoint. Hasil simulasi untuk kondisi 1 dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 15 Hasil Simulasi Kondisi 2.

Pada kondisi 2, terjadi kenaikan temperatur dengan durasi yang lebih lama dari kondisi 1 karena *slugging* pada pipa boiler tidak bisa dengan cepat dibersihkan. Pada kondisi 2, temperatur diset oleh operator di 525°C untuk meningkatkan kinerja sistem *existing*. Berdasarkan hasil simulasi, temperatur *main steam* yang menuju turbin mampu dikendalikan secara stabil pada *setpoint*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software simulink*, temperatur *main steam* yang lebih tinggi dari *setpoint* karena salah satu *coal feeder* dan *pulverizer trip* dan fluktuasi *main steam temperature* di atas *setpoint* karena adanya *slugging* berdasarkan data – data pada PLTU berhasil diturunkan menuju *setpoint*. Sistem *desuperheater* menggunakan jenis *desuperheater Injection Lance* dan *Globe Valve* dengan karakteristik linier. *Control Valve* pada sistem dikendalikan menggunakan pengendali PID yang konstanta P, I, D serta koefisien filter yang didapatkan menggunakan *tuning* pada *software simulink* adalah sebagai berikut: P = -23.5; I = -2.8; D = -40.9; N = 1.9.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. W. Comeli, A. S. Rocha, C. A. S. Oliveira, G. Lemos, R. M. Castro, "Effects of Tempering Temperature on the Microstructure and Creep Resistance of X22CrMoV12-1 Steel Used on Steam Turbine Blades," *American Journal of Materials Science*, vol. 8, No. 4, pp. 65-72, 2018.
- [2] M. Mehrpooya, M. Taromi, B. Ghorbani, "Thermo-economic assessment and retrofitting of an existing electrical power plant with solar energy under different operational modes and part load conditions," *Energy Report*, vol. 5, pp. 1137 – 1150, July 2019.
- [3] L. Wen, "Model of thermal power plant considering water spray desuperheater for power system analysis," *Journal of Physics: Conference Series*, Ser. 1633 012029, 2020.
- [4] T. Karuppiyah, A. Periasamy, P. Rajkumar, S. Muruganand, "Desuperheater Temperature Control System Using Distributed Control System (DCS)," *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 1, no.7, pp. 587 – 591, July 2013.
- [5] T. Hägglund, "A friction compensator for pneumatic control valves," *Journal of Process Control*, vol. 12, pp. 897–904, Feb. 2002.
- [6] E. A. S. Chandar, "Design and Flow Coefficient Analysis of Globe Valve as Control Valve Using MATLAB," *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 279 – 283, Jan. 2022.
- [7] A. Misbachta, A. S. Wardhana, R. H. Triyanto "Pengujian Kestabilan Sistem Tuning Level Control Pada Gunt Hamburg Rt-578 Menggunakan Nyquist Stability," *SNTEM*, vol. 1, pp. 1011 – 1019, Nov. 2021.
- [8] Y. Uruno, C. Geunwon, M. Sung, J. Chung, H. Kim, K. Lee, "Transient Analysis Of Attemperator Enthalpy Balance Based On The Commissioning Data Of A Coal-Fired Steam Power Plant," *Elsevier : Applied Thermal Engineering*, pp. 1141 – 1158, Januari 2019.
- [9] N. A. Farianto "Superheater Steam Temperature Control using PI-Fuzzy Auto-Tuner Controller," Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [10] A. A. Ishak, M. A. Hussain, "Effect of Valve Characteristics to The Controllability of pH in a Continuous Stirred Tank Reactor," Regional Symposium on Chemical Engineering, 28-30 Oct. 2002, Kuala Lumpur, MALAYSIA, pp 1693-1699.