

Optimalisasi Konsumsi *Fuel gas* pada Boiler dengan Implementasi Sistem Kontrol *Oxygen Excess Auto Cascade*

Muhammad Taufik Hidayat, & Bambang Irawan

PT Badak NGL, Bontang, Telp +62548 551300, Fax +62548 27500,

Website: <https://badaklng.com> , E-mail: infocenter@badaklng.com

Abstrak

Boiler berkontribusi 99.8% dari total konsumsi energi di kilang Badak LNG. Sebanyak 15.1% dari konsumsi tersebut, terbuang melalui blowdown, flue gas dan item inefisiensi boiler lainnya. Sistem kontrol pembakaran dilakukan perancangan ulang dengan menggunakan metode cascade control antara loop oxygen excess (AIC-1) dengan loop air flow control (FIC-1). Masing-masing loop kontrol tersebut dilakukan pemodelan untuk mendapatkan fungsi transfer yang digunakan sebagai bahan simulasi respon terhadap input yang mungkin terjadi. Hasil simulasi ini menghasilkan parameter PID yang digunakan dalam proses tuning loop kontrol. Selain itu, proteksi berlapis pada sistem logic serta penambahan alarm telah diintegrasikan ke sistem kontrol. Hasilnya, keandalan sistem teruji terhadap kondisi ekstrim dari eksternal, yaitu kenaikan dan penurunan beban boiler yang mendadak. Optimalisasi ini menurunkan fuel to steam ratio sebesar 0.6 Nm³/ton dengan rata-rata beban boiler satu tahun terakhir sebesar 207,6 ton/h menghasilkan penurunan konsumsi fuel gas sebesar 0,72%.

Kata kunci: Boiler Efisiensi, Sistem Kontrol, Oxygen Excess, Auto Cascade

Abstract

Boilers accounted for 99.8% of total energy consumption at Badak LNG refinery. Of this usage, 15.1% was lost through blowdown, flue gas, and other boiler inefficiencies. The combustion control system was redesigned using a cascade configuration between the excess-oxygen loop (AIC-1) and the air-flow control loop (FIC-1). Each loop was modeled to obtain transfer functions that were then used to simulate responses to possible input disturbances. The simulation results yielded PID parameters that guided on-site loop tuning. In addition, layered logic protection and new alarms were integrated into the control system. As a result, system reliability was validated under external extremes, including abrupt boiler load increases and decreases. The optimization reduced the fuel-to-steam ratio by 0.6 Nm³/ton with the average boiler load over the past year of 207.6 ton/h, this corresponded to a 0.72% reduction in fuel-gas consumption.

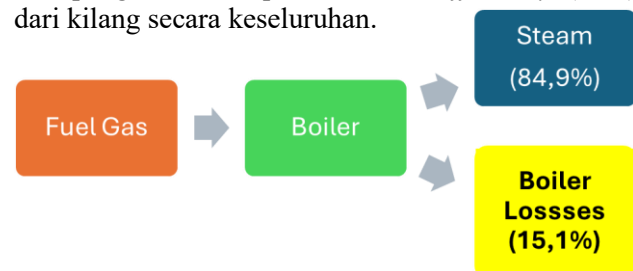
Keywords: Boiler Efficiency, Control System, Oxygen Excess, Auto Cascade

1 PENDAHULUAN

Boiler merupakan tulang punggung sistem energi yang ada di kilang PT Badak NGL (PTB). Boiler tersebut menyuplai *steam* yang menggerakkan turbin, kompresor, dan peralatan kritikal lainnya di kilang. Kontribusi boiler lebih dari 99.8% dari total konsumsi energi yang membuatnya sebagai pengguna energi terbesar di kilang.

Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 1, *fuel gas* digunakan sebagai bahan bakar oleh boiler. Dari 100% bahan bakar tersebut, sebanyak 84.9% nya berhasil dikonversi menjadi *steam* yang berguna untuk kebutuhan pembangkit tenaga listrik, proses di LNG Trains, dan kebutuhan lainnya. Sisa *fuel gas* sebanyak 15.1% terbuang melalui *blowdown*, *flue gas* dan item inefisiensi boiler lainnya. Boiler dikategorikan sebagai pengguna energi paling

signifikan di kilang PTB karena volume pemakaian dan dampaknya. Nilai efisiensi boiler sangat mempengaruhi nilai *plant thermal efficiency* (PTE) dari kilang secara keseluruhan.



Gambar 1 Ilustrasi pemetaan penggunaan energi di PTB

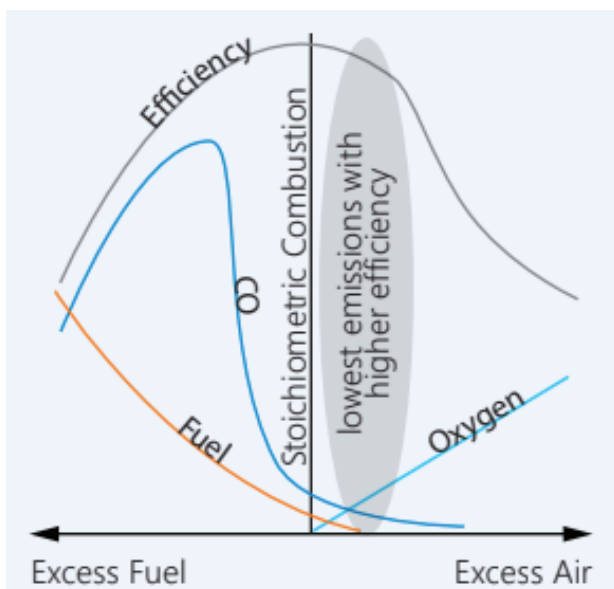
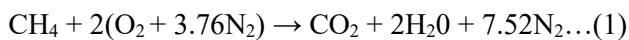
Praktik yang umum digunakan pada proses pembakaran di boiler adalah dengan menggunakan udara yang lebih dari kebutuhan pembakaran untuk

memastikan pembakaran sempurna [1, p. 756]. Kelebihan udara yang dihasilkan dari proses pembakaran ini membawa sebagian energi yang dihasilkan. Konsep kehilangan energi akibat udara berlebih dalam *flue gas* telah banyak dibahas dalam literatur efisiensi boiler [2]. Sistem pengendalian yang baik dapat meningkatkan efisiensi boiler dengan memastikan sisa udara pembakaran sesuai dengan desain.

Sistem pengendalian pembakaran yang ada di PTB saat ini masih menggunakan sistem konvensional dengan input manual dari operator. Hal tersebut mengakibatkan sisa udara pembakaran khususnya oksigen menjadi berlebih dari yang dibutuhkan. Akibat dari hal tersebut, efisiensi boiler menjadi tidak optimal. Perancangan sistem pengendalian proses pembakaran yang lebih akurat dan presisi dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi boiler dan mengurangi kebutuhan intervensi operator.

2 LANDASAN TEORI

Oxygen excess didefinisikan sebagai jumlah *oxygen* yang disuplai diatas kebutuhan stoikiometri untuk pembakaran sempurna. Persamaan stoikiometri pembakaran sendiri berguna untuk mengetahui *fuel* dan *air supply rate* yang tepat untuk pembakaran melalui proporsi stoikiometri reaksi. Pengukuran komposisi *flue gas* dan temperaturnya dapat digunakan sebagai dasar perhitungan efisiensi boiler. Reaksi pembakaran gas metana ideal [1, p. 756] dapat dituliskan seperti persamaan (1).



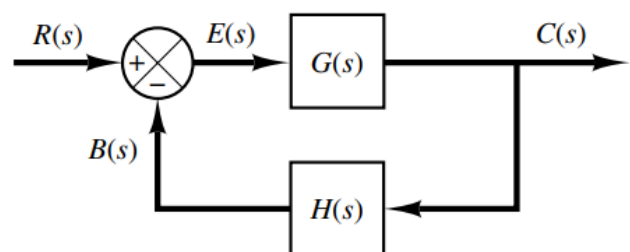
Gambar 2 Kurva stoikiometri secara umum

Kurva stoikiometri mengilustrasikan bagaimana *oxygen excess* mempengaruhi efisiensi pembakaran. Poin stoikiometri merepresentasikan lokasi ideal keseimbangan antara bahan bakar dan udara. Dalam praktiknya, boiler tidak dapat beroperasi tepat pada poin ini karena dinamika proses dan keterbatasan ketelitian pengukuran. Untuk mendapatkan pengetahuan atas dampak operasi pada level *oxygen* yang berbeda, kurva dapat dibagi menjadi tiga zona yang berbeda sebagai berikut.

- Level *oxygen* rendah (*excess fuel*): menunjukkan pembakaran yang tidak sempurna, menghasilkan *carbon monoxide* (CO) yang lebih tinggi, terdapat *hydrocarbon* yang tidak terbakar, adanya risiko kecelakaan proses, dan rendahnya efisiensi.
- Level *oxygen* tinggi (*air excess*): menunjukkan pembakaran sempurna, akan tetapi dengan sisa udara pembakaran yang membawa kalor sehingga mengurangi efisiensi termal boiler.
- Level optimum (*oxygen excess* 2 s.d. 3%): memberikan kepastian pembakaran sempurna dengan efisiensi maksimum dan emisi yang minimum sehingga membuatnya menjadi area target operasi.

Pendekatan optimasi *oxygen excess* pada boiler industri juga dilaporkan memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan pada studi sebelumnya [3].

Proses pembakaran di boiler PTB dikendalikan dengan sistem kontrol konvensional *air to fuel ratio* (AFR). Tujuan utama sistem kontrol ini adalah menjaga api yang stabil, memastikan operasi yang aman, dan *supply steam* yang cukup sesuai permintaan proses (level *oxygen* tinggi). Pada sistem kontrol ini, secara sederhana hanya menggunakan *closed loop feedback control* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.



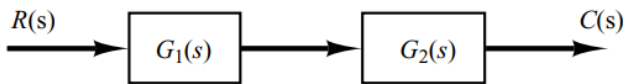
Gambar 3 Closed Loop Feedback Control

Persamaan fungsi transfer untuk sistem kendali tersebut adalah sebagai berikut [4, p. 19].

$$C(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} R(s) \dots \dots \dots (2)$$

Untuk mencapai level yang optimum (*oxygen excess* 2 s.d. 3%) dalam proses pembakaran di boiler,

sistem kontrol perlu modifikasi agar terdapat masukan *oxygen excess* dalam proses kontrol AFR. Sistem kontrol yang digunakan adalah *cascade control* dari dua *closed loop feedback control* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Cascade System

Pada dasarnya *cascade control* adalah arsitektur pengendalian berjenjang yang memakai dua *loop* tertutup. *Loop* dalam (*secondary/inner loop*) mengendalikan variabel sekunder (PV2) yang memiliki respon lebih cepat dan langsung memengaruhi aktuatur atau proses. Sedangkan, *loop* luar (*primary/outer loop*) mengendalikan variabel utama (PV1). *Output* pengendali luar menjadi *set point* bagi *loop* dalam. Konsep pemisahan dinamika antara *loop* primer dan sekunder pada sistem *cascade* secara komprehensif dijelaskan dalam literatur kontrol modern [5].

Sebelum melakukan implementasi *cascade control*, perlu dilakukan beberapa langkah sebagai berikut.

- PV2 dapat diukur dengan cepat dan akurat dengan sensor yang tervalidasi.
- *Output secondary loop* (C2) dapat disetel sehingga menghasilkan sistem kontrol yang responsif dan tidak berosilasi.
- *Output primary loop* (C1) disetel secara konservatif dengan menguji respons SP
- Dilakukan pengujian *interlock* dan *bumpless transfer* dengan *mode of failure* yang jelas.

Proses penyetelan mengikuti algoritma penyetelan PID di DCS Yokogawa Centum yang digunakan sebagai *controller* proses pembakaran di boiler [6, p. 2]. Berikut hal spesifik dalam algoritma tersebut:

$$K_p = \frac{100}{P_b} \quad , \text{dimana } P_b = \text{Proportional Band} \dots \dots \dots (3)$$

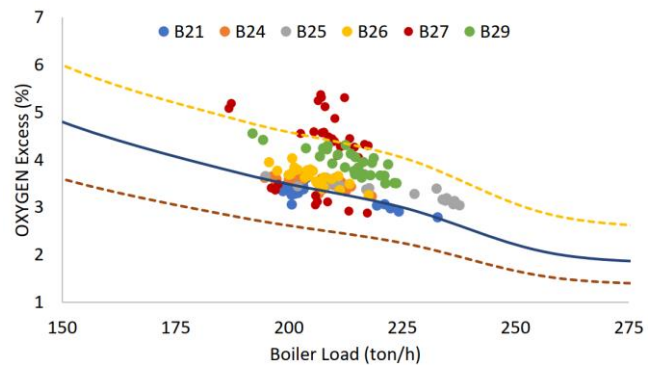
$$T_I = I \quad , \text{dimana } I = \text{Integral Time} \dots \dots \dots (4)$$

$$T_D = D \quad , \text{dimana } D = \text{Derivative Time} \dots \dots \dots (5)$$

3 METODE PERANCANGAN

Terdapat enam (6) unit boiler yang dilakukan pengambilan data perbandingan antara beban boiler (*ton/hour*) dan nilai *oxygen excess* (%) selama periode Juni 2025. Dari keenam boiler tersebut, hanya Boiler No. 27 yang memiliki data *oxygen excess* melebihi garis *optimal band* yang sudah ditentukan.

Data tersebut ditunjukkan oleh titik berwarna merah pada Gambar 5. Garis *optimal band* diperlihatkan oleh garis putus-putus berwarna kuning untuk batas maksimal dan garis putus-putus berwarna coklat untuk batas minimal.



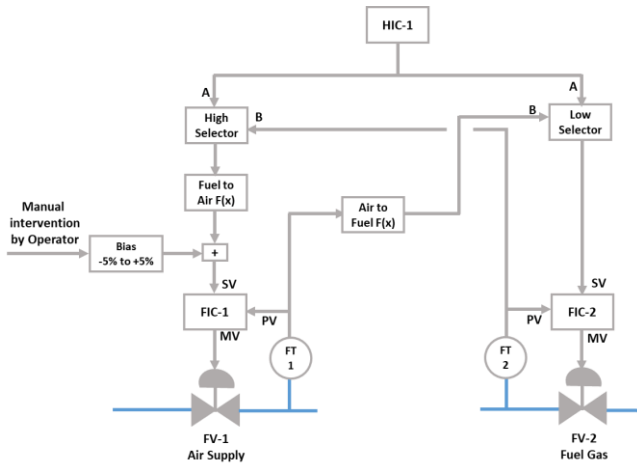
Gambar 5 Boiler Load vs Oxygen Excess

Boiler No. 27 secara konsisten beroperasi di level *oxygen* tinggi dengan rata-rata nilai *oxygen excess* sebesar 4,5%. Nilai ini berada diatas nilai yang direkomendasikan sehingga mengindikasikan adanya *energy losses* yang signifikan. Oleh karena itu, fokus perancangan perbaikan sistem kontrol boiler di kilang PTB dilakukan pada Boiler No. 27.

Proses pembakaran di Boiler No. 27 menggunakan sistem kontrol konvensional yang hanya bergantung pada dua *feedback control loop*, yaitu:

- *Fuel Gas Flow Control* (FIC-2): berfungsi untuk mengendalikan aliran *fuel gas* menuju burner berdasarkan permintaan beban boiler.
- *Air Flow Control* (FIC-1): berfungsi untuk mengendalikan aliran udara yang disuplai oleh *forced draft* (FD) Fan. Pada *loop* ini, terdapat masukan bias yang diisi oleh operator untuk mempengaruhi nilai *oxygen excess* dengan range antara -5% s.d. 5%.

Masukan atau *set value* (SV) untuk kedua *loop* kontrol tersebut berasal dari pengaturan nilai beban boiler (HIC-1). Untuk memastikan operasi pembakaran yang aman dengan mencegah kondisi pembakaran yang kekurangan udara, ditambahkan blok *high selector* pada inputan *loop air flow control* dan blok *low selector* pada inputan *loop fuel gas flow control* seperti yang terlihat pada Gambar 6. Ketika dilakukan peningkatan beban boiler, blok *high selector* akan memastikan suplai udara dinaikan terlebih dahulu dibandingkan dengan suplai bahan bakar. Begitu pula sebaliknya, ketika terjadi penurunan beban boiler, blok *low selector* akan memastikan suplai bahan bakar diturunkan terlebih dahulu dibandingkan dengan suplai udara. Dengan demikian, margin *oxygen excess* yang aman dapat dipertahankan dan meminimalisir risiko pembakaran yang tidak sempurna.



Gambar 6 Simplified Logic Diagram of Boiler Combustion

Target *oxygen excess* tidak secara otomatis disesuaikan oleh sistem kontrol, akan tetapi membutuhkan intervensi operator untuk memberikan nilai bias (-5% s.d. 5%) agar *oxygen excess* dapat mencapai target sesuai beban boiler. Tabel 1 menunjukkan target *oxygen excess* terhadap beban boiler yang menjadi acuan saat operator akan menaikkan ataupun menurunkan beban boiler.

Tabel 1 menunjukkan bahwa pada beban boiler yang rendah, *oxygen excess* margin yang lebih tinggi dibutuhkan untuk memastikan pembakaran sempurna dan mencegah bahan bakar yang tersisa. Ketika beban boiler naik, kebutuhan *oxygen excess* menurun yang mencerminkan stabilitas pencampuran dan pembakaran.

Tabel 1 Target Oxygen Excess terhadap beban boiler

Boiler Load (ton/h)	Oxygen Excess Target (%)
75	7.30
120	6.20
150	4.80
190	3.70
225	3.00
260	2.00
305	1.80
345	1.65
380	1.60

Pada sistem yang ada saat ini, operator bertanggung jawab untuk:

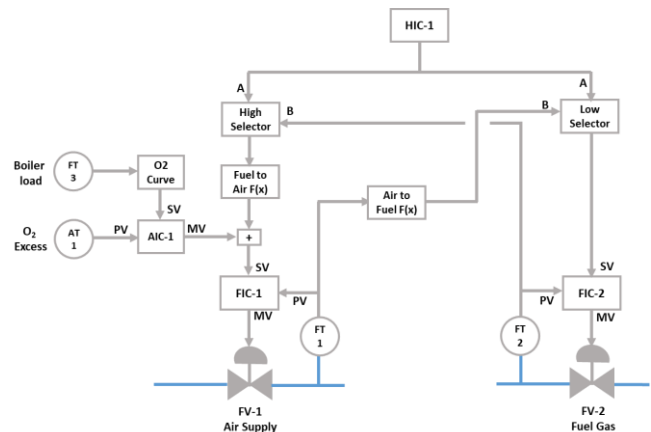
- Membandingkan secara berkelanjutan pembacaan *oxygen excess* aktual dari *oxygen analyzer* dengan target yang ada di Tabel 1.
- Melakukan penyesuaian bias yang akan menjadi masukan *air flow control* (FIC-1) secara manual untuk membawa pembacaan

oxygen excess aktual mendekati target yang ditentukan.

- Mengulangi penyesuaian ini berkali-kali, khususnya pada kondisi beban boiler yang sedang naik-turun ataupun saat ada gangguan proses.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, sistem kontrol pembakaran di boiler dilakukan perancangan ulang dengan menggunakan metode *cascade control* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 7. Penerapan *oxygen trimming real-time* seperti pada studi Nelson dan Lipták [7] memberikan dasar kuat untuk integrasi *loop* AIC-1 pada penelitian ini. Kunci utama dalam perancangan desain sistem kontrol ini adalah sebagai berikut:

- Blok *Oxygen Trimming Curve* (AIC-1 SV): Terdapat penambahan *feedback loop control* untuk pembacaan *oxygen excess*, yaitu AIC-1. Masukan atau *set value* (SV) untuk blok ini berasal dari pembacaan beban boiler. Sebelum menjadi SV, pembacaan beban boiler dikorespondensikan dengan data Tabel 1 sehingga terkonversi menjadi nilai SV dalam persen target *oxygen excess*.
- *Oxygen Excess Cascade Control* (AIC-1 MV): Setelah mendapatkan SV dari blok *oxygen trimming curve*, akan dilakukan perbandingan dengan nilai aktual *oxygen excess* atau *process value* (PV) dari *real-time oxygen analyzer*. Hasil perbandingan ini yang akan menjadi keluaran *loop* ini atau *Manipulated Variable* (MV) dalam persen. Selanjutnya nilai AIC-1 MV akan ikut serta menyesuaikan masukan *loop air flow control* (FIC-1). Dengan demikian, didapatkan proses *control cascade* dengan *loop* AIC-1 sebagai *primary/outer loop* dan *loop* FIC-1 sebagai *secondary/inner loop*.



Gambar 7 Modified Logic Diagram of Boiler Combustion

Harapan dari implementasi perancangan desain sistem kontrol ini, yaitu:

- Mengurangi ketergantungan terhadap operator: meminimalisir intervensi secara

manual, mengurangi beban kerja, dan menghilangkan inkonsistensi penyesuaian target *oxygen excess*

- Meningkatkan efisiensi: *oxygen excess* dapat dijaga lebih dekat dengan kurva optimum proses pembakaran sehingga mengurangi hilangnya energi ke *flue gas*.
- Penghematan bahan bakar: dengan tercapainya konsumsi bahan bakar, dapat dihitung pengurangan biaya produksi.
- Pengurangan emisi CO₂: dengan peningkatan efisiensi boiler secara otomatis mengurangi emisi gas rumah kaca.
- Operasi yang lebih stabil dan andal: otomasi memberikan performa sistem pembakaran yang lebih responsif dan stabil.

Implementasi *oxygen trim system* secara *real-time* seperti yang dijelaskan oleh Fulton [8] menunjukkan bahwa integrasi *loop* pengukuran *oxygen* dengan kontrol udara dapat meningkatkan stabilitas pembakaran dan efisiensi bahan bakar.

Efektifitas sistem kontrol yang baru dirancang ini sangat bergantung pada akurasi dan keandalan dari *oxygen analyzer*. Kegagalan fungsi *oxygen analyzer* dapat menyebabkan sistem kontrol pembakaran keluar dari level optimum ke level *oxygen* rendah ataupun tinggi. Atas risiko tersebut, dilakukan perancangan mitigasi pada sistem kontrol sebagai berikut:

1. Mitigasi atas pembacaan aktual *oxygen excess* (AIC-1 PV) yang *swing*.
 - **Tujuan:** Melakukan deteksi osilasi tidak normal pada AIC-1 PV serta memutuskan sistem *cascade* untuk mencegah sistem kontrol yang tidak terkendali.
 - **Mekanisme:** Menambahkan *logic* pada *loop* AIC-1, yaitu jika terdapat pembacaan nilai yang berosilasi $\geq 2\%$ dalam satu detik, maka *loop* AIC-1 akan menjadi *manual mode* serta muncul alarm (AN0031 – *oxygen analyzer swing*).
2. Mitigasi atas pembacaan aktual *oxygen excess* (AIC-1 PV) yang *stuck* pada satu nilai.
 - **Tujuan:** Melakukan deteksi pembacaan yang *stuck* serta memutuskan sistem *cascade* untuk mencegah sistem kontrol yang tidak terkendali.
 - **Mekanisme:** Menambahkan *logic* pada *loop* AIC-1, yaitu jika deviasi antara PV dan SV $\geq 2\%$, maka *loop* AIC-1 akan menjadi *manual mode* serta muncul alarm (AN0030 – *potential oxygen analyzer stuck*).
3. Mitigasi atas pembacaan aktual *oxygen excess* (AIC-1 PV) yang hilang.

- **Tujuan:** Melakukan deteksi alarm *oxygen analyzer* serta memutuskan sistem *cascade* untuk mencegah sistem kontrol yang tidak terkendali.
- **Mekanisme:** Melakukan komunikasi antara *controller* dengan *oxygen analyzer* secara berkelanjutan serta menambahkan *logic* pada *loop* AIC-1, yaitu jika terdeteksi *fault alarm* dari *oxygen analyzer*, maka *loop* AIC-1 akan menjadi *manual mode* serta muncul alarm (AN0032 – *manual transition notification*).

Pada beban boiler yang sangat rendah, yaitu dibawah 180 ton/H, sistem pembakaran tidak stabil sehingga perlu dilakukan penyesuaian suplai udara oleh operator secara manual. Proses ini mengharuskan *loop* AIC-1 menjadi *manual mode* agar *loop* FIC-1 dapat diinput secara manual. Selain itu, terdapat risiko saat transisi dari *cascade auto mode* ke *manual mode*, nilai SP untuk *loop* FIC-1 beralih secara drastis. Atas faktor risiko tersebut, dilakukan perancangan mitigasi pada sistem kontrol sebagai berikut:

1. Mitigasi atas sistem kontrol *cascade* beroperasi di beban boiler rendah.
 - **Tujuan:** Memberikan alarm saat beroperasi di beban boiler rendah serta memutuskan sistem *cascade* untuk mencegah *boiler trip* karena kekurangan udara.
 - **Mekanisme:** Menambahkan *logic* pada *loop* AIC-1, yaitu jika beban boiler ≤ 180 Ton/H, maka *loop* AIC-1 akan menjadi *manual mode* serta muncul alarm (*load boiler low*).
2. Mitigasi atas transisi yang tidak baik dari mode operasi *auto cascade* ke *manual* dan sebaliknya.
 - **Tujuan:** Melakukan deteksi perintah untuk mengubah mode operasi *loop* AIC-1 dan mencegah MV beralih secara drastis.
 - **Mekanisme:** Menambahkan *logic* pada *loop* AIC-1, yaitu jika terjadi perintah mode operasi agar MV beralih secara gradual.

Air flow control (FIC-1) sudah teruji dapat melakukan proses kontrol dengan *setting* Pb = 300% dan I = 20s. Perlu dilakukan pemodelan untuk menentukan *setting* parameter Pb dan I untuk *loop* AIC-1 yang baru dirancang. Berdasarkan rekomendasi algoritma penyetelan PID untuk DCS Yokogawa, *range* Pb adalah 150-300% dan I = 20-300s untuk *analyzer*. *Loop* AIC-1 sebagai *outer loop* harus memiliki respon yang lebih lambat dibandingkan *inner loop* agar perintahnya dapat diproses. Berdasarkan *rule of thumb*, nilai I *outer loop* = 3 s.d. 4 x I *inner loop*. Oleh karena itu, ditentukan

nilai $I_{outer\ loop} = 3 \times 20 = 60s$ dengan nilai $P_b = 300\%$ yang akan diperkecil jika respon terlalu lambat saat implementasi. Prinsip penyet PID berbasis karakteristik dinamika proses sebagaimana dijelaskan oleh Shinsky [9] menjadi dasar penentuan parameter kontrol pada penelitian ini.

Fungsi transfer kedua $loop$ yang dirancang mengikuti sistem orde-1 yang secara simbolik dituliskan sebagai berikut.

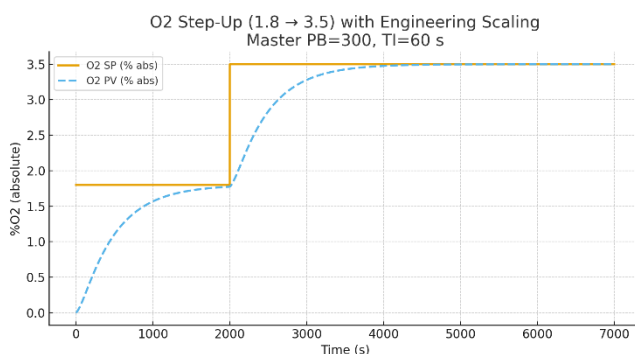
$$Gf(s) = \frac{K_f}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \dots\dots\dots(6)$$

$$Go(s) = \frac{K_o}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \dots\dots\dots(7)$$

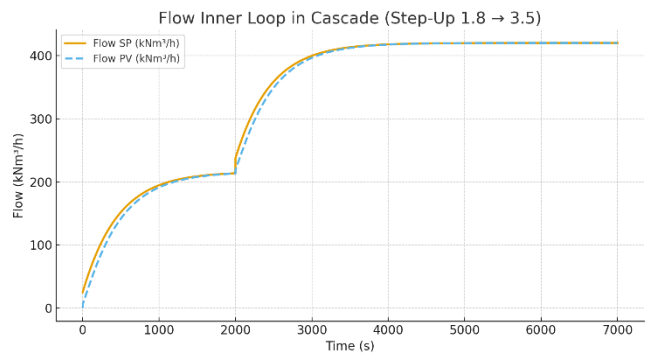
Selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan *Gen AI* dengan parameter PID dan fungsi transfer tersebut terhadap respon *input step* naik maupun turun. *Input step* naik disimulasikan dari *oxygen excess target* 1,8% menuju 3,5% atau untuk kemungkinan penurunan beban boiler dari 305 ton/h menuju 200 ton/h. *Input step* turun disimulasikan dari *oxygen excess target* 3,5% menuju 1,8% atau untuk kemungkinan kenaikan beban boiler dari 200 ton/h menuju 305 ton/h.

Hasil dari simulasi untuk *input step-up* terlihat pada Gambar 7 untuk $loop$ AIC-1 dan Gambar 8 untuk $loop$ FIC-1. Terdapat *overshoot* sebesar 1,51%, *rise time* (mulai dari 10% menuju 90%) selama 970s, dan *settling time* (toleransi 5%) selama 1436s. Sedangkan, hasil dari simulasi untuk *input step-down* terlihat pada Gambar 9 untuk $loop$ AIC-1 dan Gambar 10 untuk $loop$ FIC-1. Terdapat *undershoot* sebesar 2,94%, *fall time* (mulai dari 10% menuju 90%) selama 1169s, dan *settling time* (toleransi 5%) lebih dari 1418s.

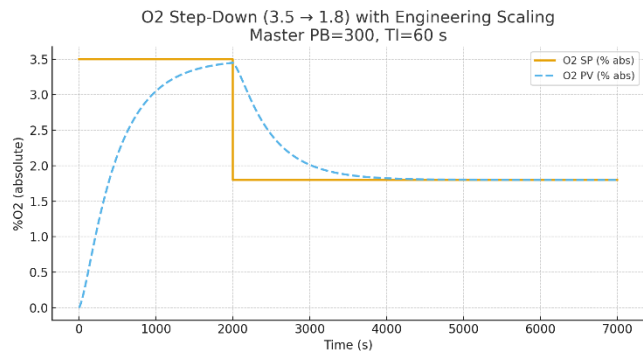
Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan pemodelan sistem *cascade control* lainnya menggunakan *loop-pro software* sebagai referensi [10, p. 180]. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan untuk hasil pengujian dengan *input step-up*. Pada pemodelan dengan *loop-pro software* untuk *cascade control*, *settling time* sekitar 10 menit atau 600 detik.



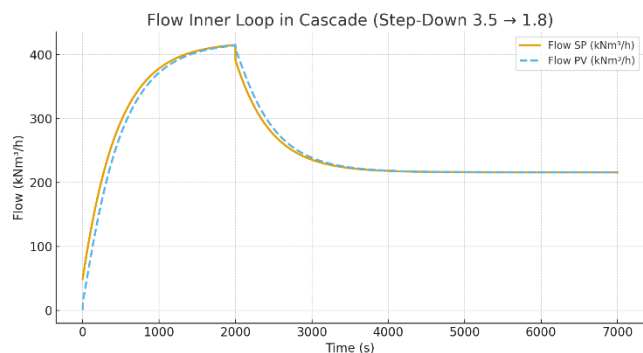
Gambar 8 Step Up Loop AIC-1



Gambar 9 Step Up Loop FIC-1



Gambar 10 Step Down Loop AIC-1

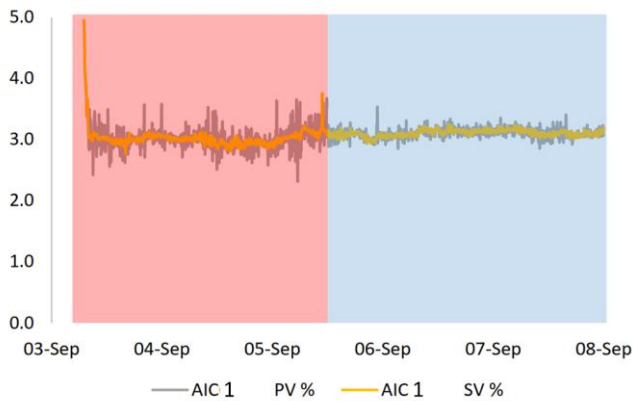


Gambar 11 Step Down Loop FIC-1

Tidak terdapat *ripple* saat kondisi *steady state* baik untuk *step-up input* maupun *step-down input* sehingga parameter sesuai dengan harapan. Selanjutnya parameter PI untuk kedua $loop$ akan diimplementasikan pada rancangan sistem control untuk dilakukan pemantauan hasil dan analisis. Jika terdapat respon yang tidak sesuai dengan harapan, akan dilakukan *fine-tuning* dengan mengecilkan nilai P_b secara perlahan sesuai dengan algoritma penyetelan PID pada DCS Yokogawa.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan sistem kontrol *auto cascade* AIC-1 diimplementasikan dan *commissioning* di Boiler No. 27 pada tanggal 3 September 2025. Setelah proses tersebut dilakukan pemantauan nilai PV terhadap SV seperti yang terlihat pada Gambar 12.

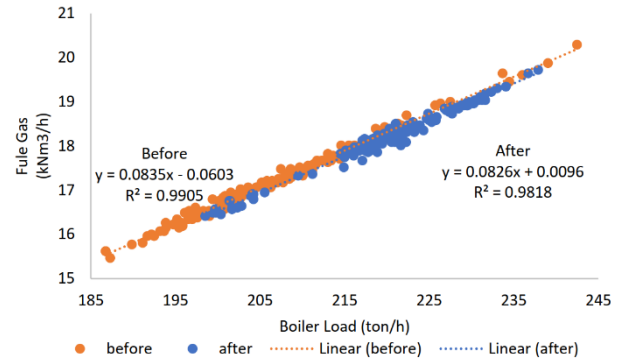


Gambar 12 AIC-1 PV vs SV selama implementasi

Selama periode pemantauan, terdapat perbedaan yang sangat mencolok antara PV dengan SV pada area yang berwarna merah dan biru. Berikut penjelasan untuk perbedaan tersebut.

- 3-5 September (area berwarna merah)
Pada periode awal ini, terdapat deviasi yang tinggi untuk *oxygen excess* antara PV dan SV. Nilai deviasi berfluktuasi dengan *overshoot* mencapai diatas 0.5% dibandingkan dengan SV. Hal ini terjadi karena furnace air register tidak terbuka penuh yang mengakibatkan adanya halangan pada distribusi udara dan menyebabkan ketidakstabilan aliran udara pembakaran.
- 6-8 September (area berwarna biru)
Setelah dilakukan perbaikan dengan membuka penuh air register, respon sistem kontrol dapat meningkat secara signifikan. *Oxygen excess* stabil dan dapat mengikuti AIC-1 SV secara halus dengan fluktuasi yang minimal. Hal ini mengkonfirmasi bahwa sistem kontrol *cascade* berfungsi secara baik ketika kondisi air register bekerja secara optimal (bukaan penuh). Oleh karena itu, tidak direkomendasikan implementasi pada kondisi beban boiler rendah karena air register tidak akan terbuka penuh.

Dalam melakukan evaluasi dampak dari implementasi sistem kontrol *auto cascade* AIC-1, hubungan antara konsumsi *fuel gas* dan beban boiler dianalisis pada dua kondisi operasi, yaitu operasi *baseline* (sebelum implementasi) dan operasi peningkatan (setelah implementasi). Operasi *baseline* didasarkan pada data yang diambil pada periode Desember 2024 s.d. Agustus 2025. Kemudian, operasi peningkatan didasarkan pada data yang diambil pada periode 3 s.d. 15 September 2025. Dengan membandingkan dua set data tersebut, peningkatan efisiensi dapat dikuantifikasi. Hal ini karena *slope* untuk hubungan beban boiler-fuel gas mencerminkan konsumsi bahan bakar spesifik dari boiler.

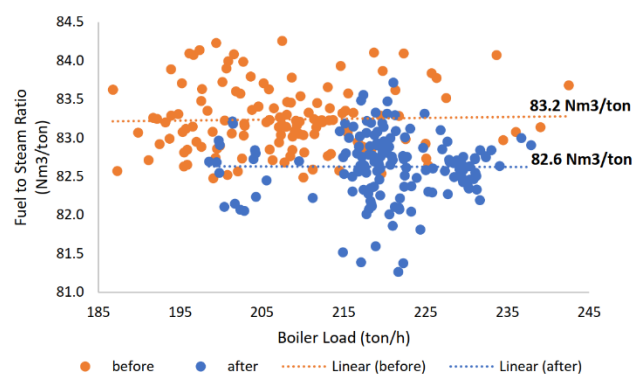


Gambar 13 Konsumsi Fuel Gas vs Beban Boiler No. 27

Kedua set data menunjukkan korelasi linear yang kuat antara beban boiler dengan konsumsi *fuel gas* seperti yang terlihat pada Gambar 12. *Correlation coefficients* (R^2) untuk kedua set data tersebut berada diatas 0.98. Akan tetapi, perbedaan yang penting dapat terlihat pada *slope* dari garis regresi berikut:

- Sebelum implementasi: *slope* = 0.0835 yang mengindikasikan peningkatan konsumsi bahan bakar untuk setiap ton *steam*.
- Setelah implementasi: *slope* = 0.0826 yang sedikit lebih kecil sehingga menunjukkan konsumsi bahan bakar yang lebih sedikit untuk beban boiler yang sama.

Pada beban operasi yang sama, konsumsi bahan bakar boiler lebih sedikit setelah implementasi sistem kontrol *auto cascade*. Hal ini mengkonfirmasi strategi sistem kontrol yang baru meningkatkan efisiensi pembakaran boiler dan mengurangi konsumsi bahan bakar spesifik.



Gambar 14 Fuel to Steam Ratio vs beban Boiler No. 27

Untuk melengkapi evaluasi konsumsi *fuel gas*, dilakukan juga analisis *fuel to steam ratio* untuk mengevaluasi efisiensi energi boiler secara langsung. Parameter ini menunjukkan konsumsi *specific fuel* yang dibutuhkan untuk memproduksi satu ton *steam*. Dengan membandingkan rasio sebelum dan sesudah implementasi sistem kontrol *auto cascade*, dampak terhadap efisiensi boiler dapat lebih terlihat.

Terdapat peningkatan untuk *fuel-to-steam* setelah implementasi seperti yang terlihat pada Gambar 13. dan penjelasan berikut.

- **Sebelum implementasi:** poin data ditunjukkan oleh warna oranye yang terkelompokan pada rasio rata-rata yang lebih tinggi (banyak nilai diatas 83.2 Nm³/ton). Hal ini mengindikasikan secara relatif lebih tingginya permintaan bahan bakar per ton *steam*. Selain itu trend line menunjukkan *slope* yang sedikit naik yang mengindikasikan performa yang tidak stabil.
- **Setelah implementasi:** poin data ditunjukkan oleh warna biru yang terkelompokan pada rasio rata-rata yang lebih rendah (banyak nilai dibawah 83.2 Nm³/ton). Selain itu *trend line* menunjukkan penurunan dan rasio yang lebih konsisten dengan rata-rata pada 82.6 Nm³/ton.

Implementasi sistem kontrol *auto cascade* ini mengindikasikan penghematan yang diestimasikan sekitar 0.6 Nm³ *fuel* untuk setiap satu ton *steam*.

Dampak kuantitatif dari implementasi sistem kontrol *auto cascade* dapat dijelaskan sebagai berikut:

- **Fuel-to-Steam Ratio:** berhasil diturunkan dari 83.2 Nm³/ton menjadi 82.6 Nm³/ton.
- **Konsumsi bahan bakar:** untuk beban Boiler No. 27 dengan rata-rata selama Tahun 2025 207,6 ton/H dan dijadwalkan beroperasi 330 hari per tahun, maka permintaan bahan bakar dapat turun dari 17.27 kNm³/h (14.64 MMSCFD) menjadi 17.15 kNm³/h (14.53 MMSCFD).
- **Penghematan bahan bakar:** Implementasi perancangan sistem kontrol dapat menghemat 0.11 MMSCFD yang setara dengan 0,72%.

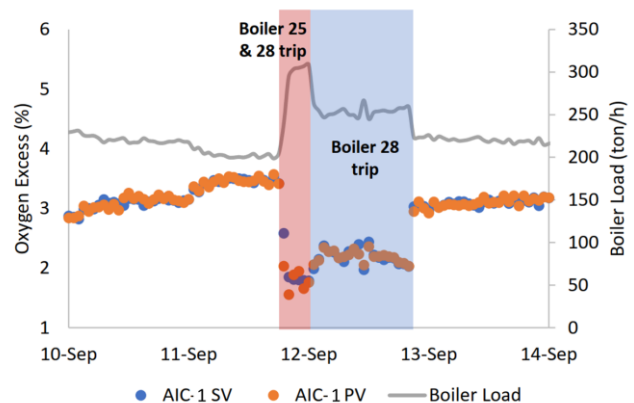
Berdasarkan hal tersebut, implementasi sistem kontrol *auto cascade* menghasilkan keuntungan dari sisi penghematan bahan bakar seperti yang terlihat pada Tabel 2. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Kumar dan Singh [11], yang melaporkan bahwa penerapan strategi kontrol lanjutan mampu menurunkan konsumsi spesifik bahan bakar dan meningkatkan efisiensi termal boiler.

Tabel 2 Penghematan dari implementasi Auto Cascade

Parameters	Unit	Manual	Auto Cascade
Ave Boiler load	Ton/h		207,6
Operating days	Days		330
Fuel to Steam Ratio	Nm ³ /ton	83.2	82.6
Fuel Gas Consumption	kNm ³ /h	17.27	17.15
	MMSCFD	14.64	14.53
Fuel Gas Saving	MMSCFD	-	0.11
	%	-	0,72%

Validasi performa sistem kontrol *auto cascade* terhadap pengaruh kondisi ekstrim dari eksternal dilakukan pemantauan sejak implementasi pada

tanggal 3 September 2025. Terdapat kejadian penting pada tanggal 11 September 2025, yaitu ketika Boiler No. 25 dan No. 28 *trip* bersamaan yang mengakibatkan permintaan beban yang tinggi secara mendadak di sistem *steam* secara keseluruhan. Kejadian ini memberikan kesempatan yang berharga untuk menguji ketangguhan sistem kontrol *auto cascade* menghadapi kondisi ekstrim seperti permintaan beban boiler ataupun penurunan beban boiler yang mendadak. Kejadian ini dapat dibagi menjadi dua zona yang berbeda seperti yang terlihat pada Gambar 15.



Gambar 15 Respon Oxygen Excess Boiler No.27 saat terjadi peningkatan beban boiler yang cepat

Terdapat dua zona waktu yang sangat berbeda ketika Boiler No. 25 dan No. 28 *trip* bersamaan, yaitu:

- Zona 1 (berwarna merah – Boiler No. 25 & 28 *trip*)
Boiler No. 27 meningkatkan permintaan *steam* dari 200 ton/H menjadi 300 ton/H untuk mengkompensasi kehilangan dua boiler lainnya. Hasilnya sistem kontrol *auto cascade* AIC-1 SV berkurang sesuai dengan kurva yang ada pada Tabel 1. Selanjutnya, nilai aktual *oxygen excess* AIC-1 PV mengikuti dengan deviasi yang relatif kecil. Hal ini mengkonfirmasi sistem kontrol yang stabil dan akurat meskipun terjadi peningkatan beban ekstrim yang tiba-tiba.
- Zona 2 (berwarna biru – Boiler No.25 *restart* sedangkan 28 masih *trip*)

Setelah adanya *recovery* dari salah satu boiler yang *trip*, permintaan *steam* Boiler No. 27 turun dari 300 ton/H menjadi 250 ton/H secara mendadak. Selama transisi ini, sistem kontrol *auto cascade* AIC-1 dapat mengikuti secara halus tanpa adanya kendala. Hal ini menunjukkan sistem kontrol dapat stabil dan akurat tidak hanya saat beban boiler naik, tetapi juga saat beban boiler turun secara mendadak.

5 SIMPULAN

Implementasi sistem kontrol *auto cascade* antara *oxygen excess loop* (AIC-1) dengan *air flow control loop* (FIC-1) untuk sistem pembakaran di Boiler No. 27 telah memberikan peningkatan yang signifikan baik dalam hal efisiensi dan keandalan operasi dengan detail sebagai berikut:

1. Sistem kontrol *auto cascade* berhasil mempertahankan level *oxygen* ke level kurva yang optimum (*excess* 2-3%). Optimalisasi ini menurunkan *fuel to steam ratio* dari 83.2 menjadi 82.6 Nm³/ton yang setara dengan penghematan bahan bakar 0.6 Nm³/ton.
2. Proteksi berlapis pada sistem *logic* serta penambahan alarm telah diintegrasikan ke sistem kontrol, termasuk diantaranya adalah proteksi masukan *oxygen excess swing*, *stuck*, serta kegagalan pengukuran. Selain itu, terdapat juga proteksi untuk proses pembakaran di beban boiler rendah dan proses transisi yang gradual dari mode auto ke manual serta sebaliknya.
3. Implementasi sistem kontrol *auto cascade* menghasilkan penghematan 0.11 MMSCFD untuk Boiler No. 27 saja yang setara dengan penghematan 0,72%.
4. Keandalan sistem kontrol *auto cascade* sudah teruji terhadap pengaruh kondisi ekstrim dari eksternal, yaitu kenaikan permintaan beban boiler yang mendadak karena dua boiler *trip* dan penurunan beban boiler yang mendadak karena satu boiler yang *recover*. Sistem kontrol tetap stabil dan akurat dalam dua kondisi ekstrim tersebut.

KEPUSTAKAAN

- [1] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.
- [2] J. G. W. Cleaver and J. M. B. Evans, *Boiler Efficiency and Combustion Control*, 3rd ed. New York, NY, USA: Industrial Press, 2018.
- [3] A. K. Saha, R. K. Sinha, and S. Mukhopadhyay, "Optimization of oxygen excess in industrial boilers using advanced control strategies," *Energy*, vol. 182, pp. 796–805, Sept. 2019.
- [4] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
- [5] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th ed., Boston, MA, USA: Pearson, 2017.
- [6] Y. Ito, *PID Tuning Guidance for Yokogawa DCS (CENTUM VP)*, Tutorial Manual, Yokogawa Solution Service Corporation, Start-up Department, Aug. 12, 2015.
- [7] R. A. Nelson and J. C. Lipták, "Improving boiler efficiency via real-time flue gas oxygen trimming," *ISA Transactions*, vol. 72, pp. 205–214, Mar. 2018.
- [8] J. F. Fulton, "Optimizing Combustion Control for Industrial Boilers Using Oxygen Trim Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 3120–3128, May/June 2018.
- [9] M. Shinskey, *Process Control Systems: Application, Design, and Tuning*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.
- [10] D. J. Cooper, *Practical Process Control: Using LOOP-PRO Software*, Control Station, Inc., Tolland, CT, USA, 2006.
- [11] A. Kumar and P. Singh, "Energy Efficiency Improvement in Steam Boilers through Advanced Control Strategies," *Applied Thermal Engineering*, vol. 185, pp. 116–127, Feb. 2021.