

Optimalisasi Penggunaan Bahan Bakar Gas Pada Boiler Pipa Api Melalui Integrasi Kontrol PID

Haanaadza Muqti Alfataa^{1*}

¹Teknik Elektro, Universitas Mercu Buana, Jakarta

*mhaanaadza@gmail.com

Abstrak— Boiler industri adalah perangkat vital dalam proses produksi yang efisiensi dan keamanannya berdampak langsung pada produktivitas dan keselamatan pekerja, dengan risiko seperti luka bakar, sengatan listrik, dan ledakan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem kontrol otomatis yang aman dan andal untuk meningkatkan efisiensi operasional dengan mengurangi penggunaan bahan bakar berlebih, serta menciptakan sistem yang adaptif terhadap berbagai kondisi operasional. Metodologi yang digunakan melibatkan pengembangan sistem kontrol berbasis PID dan relay elektromagnetik, dengan desain, pemasangan sensor dan aktuator, serta kalibrasi parameter operasi. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan efisiensi boiler dari 84,33% menjadi 87,50%, membuktikan bahwa sistem kontrol ini dapat meningkatkan efisiensi dan keamanan operasi boiler secara signifikan.

Kata Kunci— Boiler Pipa Api, Boiler, Boiler System, Burner, Diagram alir, Kontrol PID, Relay,

DOI: 10.22441/jte.2025.v16i3.008

I. PENDAHULUAN

Boiler industri merupakan peralatan esensial dalam berbagai proses produksi karena kemampuannya menyediakan uap yang andal dan efisien. Efisiensi dan keamanan operasional boiler sangat berpengaruh terhadap produktivitas serta keselamatan pekerja, mengingat resiko yang dapat terhadap seperti luka bakar, sengatan listrik, dan ledakan [1]. Efisiensi boiler sangat dipengaruhi oleh pemeliharaan rutin dan optimalisasi sistem kontrol. Namun, banyak boiler yang masih beoperasi dengan efisiensi di bawah target desain akibat pemeliharaan yang kurang optimal, dan penumpukan kerak [2].

Urgensi penelitian ini didasarkan pada kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi dan keamanan boiler industri melalui sistem kontrol otomatis yang lebih baik. Penggunaan teknologi kontrol tekanan tinggi pada boiler dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan kogenerasi [3]. Dengan mengurangi udara berlebih dan akumulasi jelaga untuk meningkatkan efisiensi boiler[4].

Masalah yang dihadapi dalam operasi boiler meliputi bagaimana membuat sistem boiler yang aman dan andal, meningkatkan efisiensi sambil mengurangi penggunaan bahan bakar berlebih, dan memastikan sistem dapat beradaptasi dengan berbagai kondisi operasional. Sebagai solusi, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem kontrol berbasis PID (Proportional-Integral-Derivative) dan relay elektromagnetik. Sistem kontrol PID dapat memberikan pengaturan yang lebih

tepat terhadap laju alir bahan bakar dan air, sehingga tekanan uap dan ketinggian air dapat dipertahankan sesuai dengan set point yang diinginkan.

Dengan integrasi sistem kontrol PID dan relay elektromagnetik, penelitian ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar, meningkatkan efisiensi operasional, dan mengurangi risiko kecelakaan. Implementasi sistem ini diharapkan dapat memberikan manfaat besar bagi industri yang bergantung pada operasi boiler, meningkatkan produktivitas, dan memastikan keselamatan pekerja

II. PENELITIAN TERKAIT

Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja boiler industri. membahas peningkatan efisiensi fire tube boiler pada unit penyulingan minyak dengan menganalisis operasi boiler untuk mengidentifikasi sumber inefisiensi seperti pembakaran suboptimal atau kehilangan panas, yang kemudian digunakan untuk menyesuaikan parameter pengoperasian dan pemeliharaan [1]. mengeksplorasi cara meningkatkan kinerja boiler pipa api industri melalui pemeriksaan menyeluruh terhadap pengoperasian boiler, mengidentifikasi masalah seperti penumpukan jelaga atau kebocoran udara, dan melakukan perbaikan seperti pembersihan permukaan panas secara rutin serta mengoptimalkan pembakaran [5].

dalam studinya menekankan pentingnya pengurangan udara berlebih dan pengurangan akumulasi jelaga untuk meningkatkan efisiensi boiler 500MW yang dikembangkan oleh BHEL di India [4]. menunjukkan bahwa penggunaan teknologi boiler bertekanan tinggi di pabrik gula dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan kogenerasi, menghasilkan lebih banyak uap dan listrik, serta mengurangi penggunaan bahan bakar [3]

Penelitian di pabrik gula Rerm-Udom yang dilakukan oleh Chooprsert, Suluksa, dan Tummu (2020) menyoroti pentingnya mengurangi jumlah udara berlebih selama pembakaran dan meningkatkan frekuensi pengoperasian soot blower untuk menghilangkan jelaga, sehingga meningkatkan perpindahan panas dan kinerja boiler secara keseluruhan [2]. menilai potensi peningkatan efisiensi energi melalui pemulihan panas belakang di boiler pemulihan kraft, dengan menggunakan sistem pemulihan panas yang menurunkan suhu gas buang di bawah titik embunnya untuk meningkatkan pemulihan energi dari gas buang [6].

Penelitian-penelitian tersebut memberikan landasan kuat untuk pengembangan sistem kontrol boiler berbasis PID dan

relay elektromagnetik yang diusulkan dalam penelitian ini. Tujuan utamanya adalah meningkatkan efisiensi operasional dengan mengurangi penggunaan bahan bakar, serta meningkatkan keamanan dan keandalan sistem boiler industri.

III. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 1 Fishbone Diagram

Diagram tersebut menggambarkan alur proses pengembangan sistem boiler, yang terdiri dari beberapa tahap.

A. Identifikasi

Identifikasi dilakukan untuk mengetahui bagaimana sistem akan dibuat dan dikembangkan berikut data yang di peroleh:

Tabel 1 Data operasional boiler

No	Parameter	Unit
1	Maximum working pressure	2.74 MPa = 27.4 bar
2	Evaporation	10 T/h
3	Hydro test pressure	4.11 MPa = 41 bar
4	Tahun pembuatan	2000
5	Tekanan gas	2.5 bar
6	Kebutuhan tekanan uap operasional	16 - 17 bar
7	Kebutuhan evaporasi operasional	10 t/h = 10000 kg/h
8	Flow gas perjam sebelum perubahan	197.9 m ³ /h = 890.7 Nm ³ /h

B. Kalkulasi kebutuhan bahan bakar

Kalkulasi steam pada boiler dilakukan untuk memastikan efisiensi energi dengan mengoptimalkan kinerja boiler. ini juga membantu mengatur proses industri dengan menentukan jumlah steam yang dibutuhkan. Dari perspektif keselamatan, kalkulasi ini membantu mengendalikan biaya operasional dan bahan bakar dengan lebih baik dan mencegah kondisi operasi yang berpotensi menyebabkan kegagalan atau ledakan.

Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung produksi steam:

$$H = Hg_{18\text{bar}} - Hf_{35^\circ\text{C}} = 2795.9 - 146.63 = 2649.27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

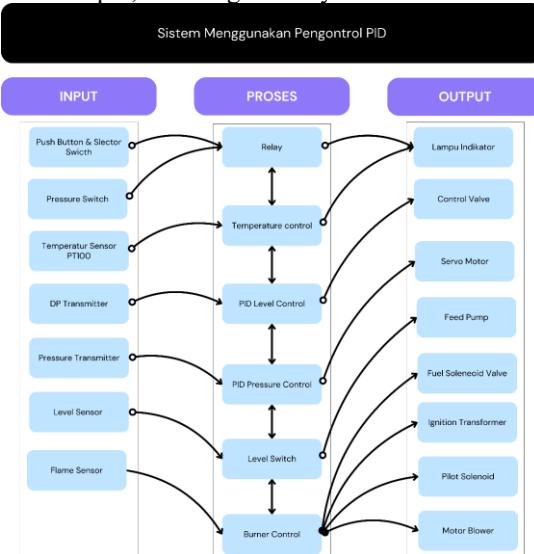
$$Q = Sf * H = 10000 * 2649.27 = 26492700 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\begin{aligned} \text{bahan bakar yang di perlukan} &= \frac{Q}{Eff * Kal} \\ &= \frac{26492700}{0.80 * 35800} = 925.02 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

Oleh karena itu, untuk memenuhi kebutuhan steam sebesar 10t/h dengan efisiensi 80%, diperlukan gas sebesar 925.02 Nm³/h atau 270.05 m³/h

C. Block Diagram

Dalam Penelitian ini digunakan diagram block sistem open loop dimana keluaran (output) tidak mempengaruhi masukan input, berikut gambarnya:



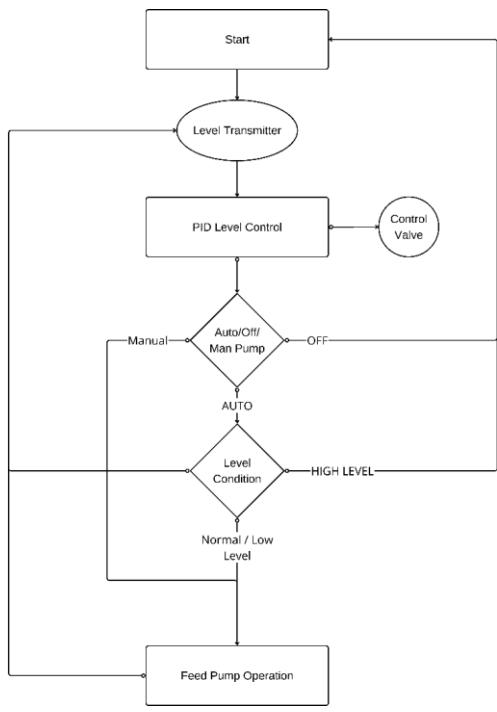
Gambar 2 Diagram block sistem

D. Flow Chart

Diagram alir adalah representasi grafis yang menggambarkan urutan proses atau langkah-langkah dalam sebuah sistem atau program. Diagram ini menggunakan elemen seperti panah, persegi panjang, dan berlian untuk memvisualisasikan alur kerja atau logika yang diperlukan untuk mencapai hasil tertentu.

1. Sistem Air umpan

Sistem pengisian air sebelumnya bekerja berdasarkan ketinggian air di dalam boiler. jika air didalam boiler berada pada kondisi minimum maka pompa akan menyala hingga pompa berhenti beroperasi pada ketinggian maksimumnya, yang kemudian dirubah menjadi seperti diagram alur berikut:



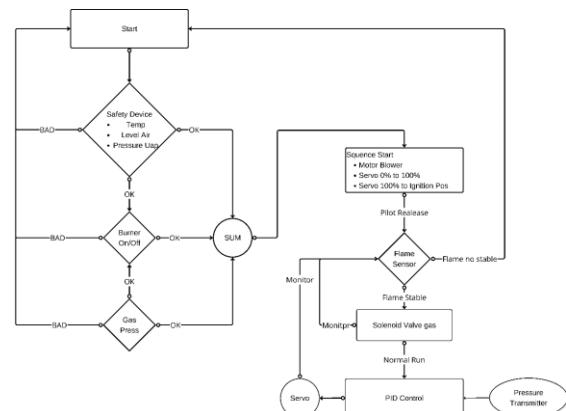
Gambar 3 Flow chart sistem air umpan

Proses dimulai dengan opsi untuk mengatur katup dalam tiga mode: otomatis, manual, atau mati. Dalam mode otomatis, kontrol PID mengaktifkan dan mengatur katup berdasarkan data yang dikirim oleh level transmitter.

Dua pompa dalam sistem ini diprogram untuk diaktifkan berdasarkan kondisi level yang terdeteksi oleh level sensor, jika sensor mendeteksi level rendah atau normal pompa 1 dan pompa 2 akan dinyalakan secara otomatis. Namun, jika level mencapai ketinggian yang kritis, kedua pompa akan berhenti. Sistem juga memiliki indikator level normal, rendah, dan tinggi yang menunjukkan status level saat ini

2. Sistem pembakaran

Sistem pembakaran sebelumnya bekerja berdasarkan tekanan maksimum dan minimum dari pressure switch untuk menentukan apakah kondisi pengapian akan besar atau kecil. Pada kondisi ini tekanan uap akan naik turun dan tidak stabil pada tekanan yang diinginkan. Kemudian dilakukan pengembangan sistem berdasarkan diagram alir berikut

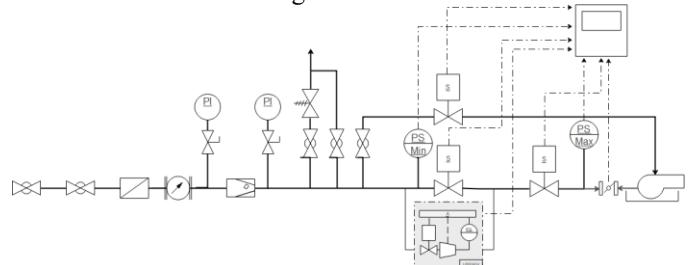


Gambar 4 Flow chart sistem pembakaran

untuk mengoperasikan sistem pembakaran, beberapa syarat harus dipenuhi. Pertama, level air dalam boiler harus berada pada posisi normal, kemudian suhu cerobong harus rendah atau normal, dan tekanan uap harus sesuai dengan tekanan kerja. Saat sistem pembakaran mulai bekerja, sistem akan mengetahui apakah tekanan gas normal atau ada kebocoran. Jika semua sudah selesai, sistem pembakaran akan memulai operasi, memulai dengan blower dan membuka solenoid. Setelah pembakaran terjadi, detektor api akan memantau kondisi api di monitor. Pada posisi auto pengontrol PID digunakan untuk meningkatkan pembakaran atau menurunkan servo untuk mengatur aliran gas yang dibutuhkan pembakaran sesuai dengan set point yang diinginkan

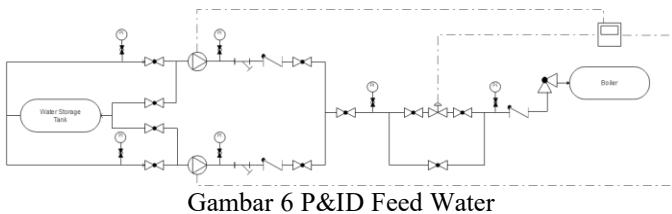
E. Piping & Instrument Diagram (P&ID)

Merupakan P&IDE yang digunakan dalam pengembangan sistem kontrol Boiler sebagai berikut:



Gambar 5 P&ID gas train

Untuk mengontrol aliran gas secara fisik, ada ball valve yang dapat dioperasikan secara manual, setelah itu filter di pasang untuk memastikan gas yang masuk ke sistem adalah gas murni. Setelah melewati filter, gas mengalir melalui flow meter, yang mengukur volume gas yang dialirkkan, untuk memastikan bahwa pembakaran sesuai dengan jumlah gas yang tepat untuk operasi yang efisien. Setelah itu indikator tekanan dipasang sebelum dan sesudah regulator gas untuk menurunkan tekanan gas dari yang sebelumnya bar menjadi milibar, yang kemudian dipasang solenoid dan control valve untuk menghentikan aliran secara otomatis dan mengatur besarnya laju alir bahan bakar.



Tangki penyimpanan air adalah sumber awal air. Air dialirkan melalui beberapa pipa yang dilengkapi dengan beberapa katup yang mengontrol air. Beberapa katup dioperasikan secara manual, sementara yang lain dioperasikan secara otomatis. Kemudian melewati pompa dan aktuator untuk mengatur aliran, tekanan, dan parameter lainnya yang penting untuk pengoperasian boiler secara efisien dan aman. Pompa bertanggung jawab untuk memastikan pasokan air dengan tekanan yang sesuai untuk proses boiler.

F. Tuning Kontrol PID

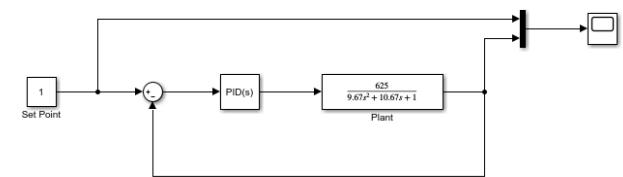
Merupakan proses untuk menentukan nilai parameter PID (K_p , K_i , K_d). dengan bentuk matematis dengan mempertimbangkan model sensor tekanan, aktuator, dan katup, adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T(s) &= \frac{625(V_{out} - 4)}{16} = 625 \\ A(s) &= \frac{1}{9.67s + 1} \\ V(s) &= \frac{1}{s + 1} \\ H(s) &= T(s) * A(s) * V(s) \\ H(s) &= 625 * \frac{1}{9.67s + 1} * \frac{1}{s + 1} \\ H(s) &= \frac{625}{9.67s^2 + 10.67s + 1} \end{aligned}$$

Kemudian dilakukan analisa stabilitas sistem, untuk memastikan sistem stabil dengan menganalisis letak poles dari fungsi transfer. Poles dari sistem adalah dominator $H(s)$:

$$\begin{aligned} 9.67s^2 + 10.67s + 1 &= 0 \\ s &= \frac{-10.67 \pm \sqrt{10.67^2 - 4 * 9.67 * 1}}{2 * 9.67} \\ s &= \frac{-10.67 \pm \sqrt{113.4489 - 38.68}}{19.34} \\ s &= \frac{-10.67 \pm \sqrt{74.7689}}{19.34} \\ s &= \frac{-10.67 \pm 8.65}{19.34} \\ s_1 &= \frac{-10.67 + 8.65}{19.34} \approx -0.104 \\ s_2 &= \frac{-10.67 - 8.65}{19.34} \approx -1.00 \end{aligned}$$

Kedua poles berada di sebelah kiri sumbu imajiner, yang menunjukkan bahwa sistem memiliki respons stabil berdasarkan analisis polesnya.



Gambar 7 Block diagram kendali PID

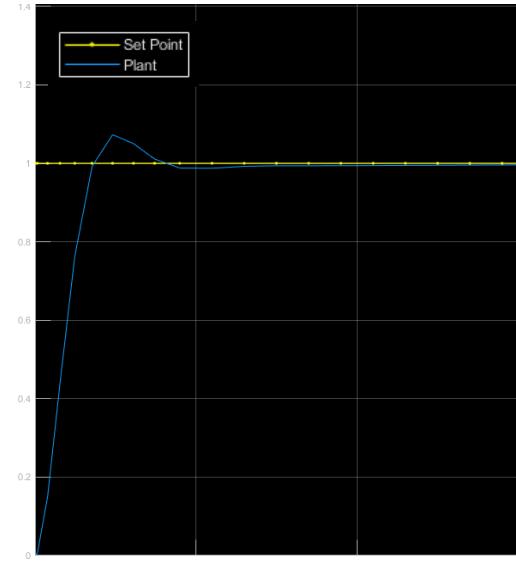
Titik set point adalah input yang menentukan nilai yang diinginkan dari sistem. Nilai itu dibandingkan dengan keluaran aktual sistem menggunakan pengurangan subraktor, yang menghasilkan sinyal kesalahan. Sinyal kesalahan ini kemudian masuk ke kontrol PID, yang berfungsi meminimalkan kesalahan dengan menyesuaikan sinyal kontrol.

IV. HASIL DAN ANALISA

Pengujian dilakukan dengan melakukan simulasi kontrol PID dengan menggunakan aplikasi MATLAB dan menarapkannya secara langsung pada boiler dengan kapasitas 10 ton per jam. Kemudian dilakukan analisa pengaruh terhadap penggunaan bahan bakar boiler.

A. Simulasi PID

Parameter K_p diberikan nilai 0.5, K_i diberikan nilai 1, dan K_d diberikan nilai 1, dengan hasil simulasi ditunjukkan pada grafik berikut



Gambar 8 Grafik respons kontrol PID

Sumbu horizontal (x-axis) menunjukkan waktu, dan sumbu vertikal (y-axis) menunjukkan nilai respons sistem. Nilai yang diinginkan untuk output sistem di tunjukkan oleh kurva set point (kuning). Yang merupakan garis horizontal konstan di nilai 1 dan kurva proses (biru) menunjukkan bagaimana sistem merespons terhadap kontrol PID untuk mencapai nilai set point tersebut.

Controller Parameters	
	Block
P	0.5
I	1
D	1
N	100

Performance and Robustness	
	Block
Rise time	0.0239 seconds
Settling time	0.0707 seconds
Overshoot	7.35 %
Peak	1.07
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	61.1 deg @ 56.5 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Gambar 9 Performance kontrol PID

Kinerja sistem diukur melalui berbagai metrik. Waktu naik (Rise Time) sebesar 0.0239 detik menunjukkan kecepatan sistem untuk merespons dari kondisi awal ke kondisi tertentu. Waktu stabil (Settling Time) sebesar 0.0707 detik menunjukkan kecepatan sistem untuk mencapai dan tetap dalam rentang tertentu dari nilai set point. Overshoot sebesar 7.35% menunjukkan seberapa besar keluaran melebihi nilai set point sebelum stabil. Puncak (Peak) sebesar 1.07 menunjukkan nilai maksimum dari respons sistem relatif terhadap set point.

B. Pengujian Operasional

Pengujian ini dilakukan dalam waktu 12 jam, setelah itu hasilnya didokumentasikan dalam bentuk tabel dengan mencatat beban operasi, tekanan gas, aliran bahan bakar, ketinggian air dalam boiler , dan suhu cerobong yang dihasilkan.

Tabel 1 Check sheet operasi

No	Parameter Pengukuran	Standar / Set point	Jam											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Beban	Max 10000 kg/h	9851	9850	9852	9751	9812	9892	9950	9955	9864	9871	9971	9825
2	Flow bahan bakar	m³/h	266.3	266.2	266.2	263.5	265.1	267.3	268.9	269.0	266.5	266.7	269.4	265.5
3	Tekanan Gas	240 mbar	200	195	185	195	200	180	200	190	210	210	195	195
4	Temperatur cerobong	Max 280°C	269	263	271	265	275	265	271	272	165	266	268	265
5	Tekanan Uap	16-17 bar	16.6	17.2	16.5	16.7	16.1	16.7	16.8	16.4	17.1	16.3	16.6	16.8

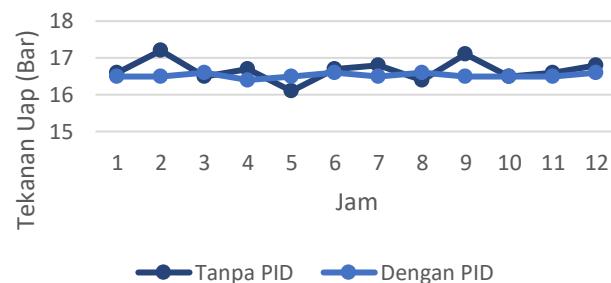
Berdasarkan data yang dikumpulkan Tabel 4. 3 Check sheet operasional menggunakan PID menunjukkan bahwa beban boiler rata-rata adalah 9854.6 kg/jam, dan kinerja boiler menunjukkan tekanan boiler rata-rata 16.5 bar dari set point

tekanan uap 16.6 bar. dengan beban ini, pemakaian gas per jam adalah 256.66 m³/jam, dan suhu cerobong 266.5 °C, level air normal (set point =65%) dengan aktual 66.05 °C.

C. Perbandingan

Untuk mengetahui kesetabilan uap yang dihasilkan setelah menggunakan pengontrol PID dan sebelum menggunakan pengontrol PID, perbandingan ini dilakukan. Hasil yang diperoleh ditunjukkan di bawah ini

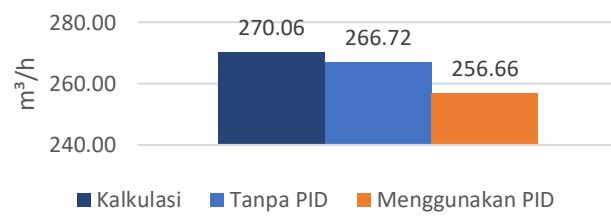
KESETABILAN TEKANAN UAP



Gambar 10 Grafik kesetabilan tekanan uap

Gambar 10 Grafik kesetabilan tekanan uap Menunjukkan perbedaan antara tekanan uap yang dihasilkan sebelum dan sesudah menggunakan pengontrol PID . Data yang dikumpulkan menunjukkan bahwa tekanan uap yang dihasilkan saat menggunakan pengontrol PID lebih stabil dibandingkan saat menggunakan tidak pengontrol PID.

PERBANDINGAN PEMAKAIAN BAHAN BAKAR



Gambar 11 Grafik perbandingan penggunaan bahan bakar

menunjukkan bahwa penggunaan PID dapat mengubah penggunaan bahan bakar. Ini menurunkan jumlah bahan bakar dari 266.72 m³ per jam menjadi 256.66 m³ per jam, dan mengurangi penggunaan bahan bakar gas sebesar 3%.

V. KESIMPULAN

Keamanan operasi boiler terjamin melalui sistem yang akan menghentikan operasi jika terjadi kondisi berbahaya, seperti tekanan uap melebihi batas kerja, tekanan gas yang tidak normal, atau level air yang kritis, sehingga mencegah kerusakan dan kecelakaan. Interaksi dengan pengguna dirancang agar mudah dipahami dan dioperasikan, didukung oleh tata letak panel antarmuka yang intuitif serta indikator yang membantu dalam pengoperasian dan pemecahan masalah. Stabilitas terhadap variasi beban tercapai dengan penggunaan pengontrol

PID, yang menyesuaikan pembakaran secara otomatis sesuai kebutuhan berdasarkan tekanan uap yang terdeteksi, serta menjaga ketinggian air pada level normal dengan mengontrol aliran air secara terus-menerus. Efisiensi energi meningkat dibandingkan sistem sebelumnya, di mana pengontrol PID pada pembakaran dan penyediaan air mengurangi penurunan tekanan uap dan suhu air, sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar pada kapasitas beban yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. A. Shahab and S. Amna, "EFFICIENCY ANALYSIS OF FIRE TUBE BOILER TYPE AT REFINERY UTILITY UNIT CENTER FOR OIL AND GAS HUMAN RESOURCES DEVELOPMENT (PPSDM MIGAS) CEPU," 2023. [Online]. Available: <http://abajangjournal.com/index.php/JCI>
- [2] P. Chooprert, K. Suluksna, and P. Tummu, "Improvement of boiler efficiency for Rerm-Udom sugar factory," in E3S Web of Conferences, EDP Sciences, Sep. 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202018703005.
- [3] M. Umer, I. U. Mesum, and A. H. Zahid, "Efficiency Improvement in Sugar Mills; The Role of High-Pressure Boiler Technology in Cogeneration," MATEC Web of Conferences, vol. 381, p. 01001, 2023, doi: 10.1051/matecconf/202338101001.
- [4] V. K. Dwivedi, S. K. Gupta, H. Verma, N. Yadav, and H. Yadav, "Improvement in Energy Efficiency & Heat Loss Minimization during Boiler Operation: A Case Study," IOP Conf Ser Mater Sci Eng, vol. 1116, no. 1, p. 012044, Apr. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1116/1/012044.
- [5] M.Z.U. Haq, Z. Yahya, H.M. Masood, N. Ali, and M. Ashraf, "Performance Enhancement Of An Industrial Fire Tube Boiler," Journal of Pakistan Institute of Chemical Engineers, 2020.
- [6] J. Saari, E. Sermyagina, J. Kaikko, M. Haider, M. Hamaguchi, and E. Vakkilainen, "Evaluation of the energy efficiency improvement potential through back-end heat recovery in the kraft recovery boiler," Energies (Basel), vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061550.