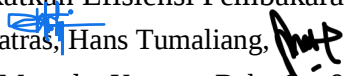


Optimization Primary Air Fan System to Enhance Combustion Efficiency Boiler

Optimalisasi Sistem Primary Air Fan Untuk Meningkatkan Efisiensi Pembakaran Pada Boiler

Moh.Fadel Anugrah, Lily Stiowati Patras,  Hans Tumaliang,

Dept. of Electrical Engineering, Sam Ratulangi University Manado, Kampus Bahu St., 95115, Indonesia

e-mails : mohanugrah023@student.unsrat.ac.id, lily_spatras@unsrat.ac.id, hanstumaliang@unsrat.ac.id

Received: [date]; Revised: [date]; Accepted: [date]

Abstract — The Primary Air Fan (PA Fan) plays a crucial role in the combustion system of a boiler, particularly in coal-fired Steam Power Plants (PLTU), as it supplies the primary air required for the combustion process. This study aims to evaluate the performance of the PA Fan in Unit 2 of PLTU 2 North Sulawesi and propose optimization measures to improve boiler combustion efficiency. The methodology includes collecting technical and operational data, as well as analyzing fan and boiler efficiency test results. The findings show that the PA Fan efficiency only reached 64%, which is significantly lower than the design specification of 87%, while the boiler efficiency was recorded at 80%. This low efficiency is attributed to several factors, including deteriorating mechanical conditions of the fan, air leakage, and suboptimal air flow regulation. The study recommends improvements such as enhanced maintenance programs, the implementation of a Variable Frequency Drive (VFD), air duct system repairs, and fan blade maintenance. These findings are expected to serve as a reference for improving boiler combustion performance and the overall operational efficiency of the power plant.

Keywords: Combustion Boiler; Efficiency Energy; PA Fan; Steam Power Plant.

Abstrak — Primary Air Fan (PA Fan) berperan penting dalam sistem pembakaran pada boiler, khususnya di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), karena berfungsi menyuplai udara primer yang dibutuhkan dalam proses pembakaran batubara. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja PA Fan pada unit 2 PLTU 2 Sulawesi Utara serta mengusulkan langkah-langkah optimalisasi guna meningkatkan efisiensi pembakaran boiler. Metodologi yang digunakan mencakup pengumpulan data teknis dan operasional, serta analisis hasil pengujian efisiensi fan dan sistem boiler. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi PA Fan hanya mencapai 64%, jauh di bawah nilai ideal berdasarkan spesifikasi yaitu 87%, sementara efisiensi boiler tercatat sebesar 80%. Rendahnya efisiensi disebabkan oleh beberapa faktor, seperti kondisi mekanis fan yang menurun, adanya kebocoran udara, serta pengaturan aliran udara yang belum optimal. Penelitian ini merekomendasikan perbaikan melalui peningkatan pemeliharaan, pemasangan Variable Frequency Drive

(VFD), perbaikan sistem saluran udara, dan perawatan sudu fan. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam peningkatan performa pembakaran boiler dan efisiensi operasional PLTU secara keseluruhan.

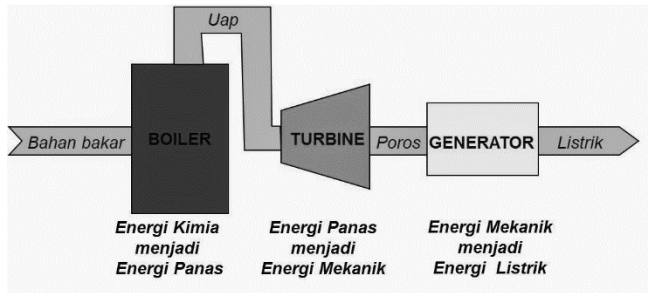
Kata Kunci: Efisiensi Energi; PA Fan; PLTU; Pembakaran Boiler.

I. PENDAHULUAN

Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), keberadaan sistem fan memegang peranan penting dalam menunjang proses pembakaran di dalam boiler. Udara yang digunakan dalam proses pembakaran umumnya dibagi menjadi dua jenis: udara primer yang disuplai oleh Primary Air Fan (PA Fan), dan udara sekunder yang disuplai oleh Secondary Air Fan (SA Fan). Kedua fan tersebut merupakan komponen vital dalam pembakaran bahan bakar batubara, karena memastikan distribusi udara dan bahan bakar berjalan seimbang dan efisien. PA Fan merupakan fan bertekanan positif yang berfungsi untuk mengalirkan udara primer ke dalam sistem pembakaran. Udara ini sebelumnya dipanaskan melalui air heater sebelum disalurkan ke burner atau furnace. Udara primer ini tidak hanya berfungsi sebagai media pembakaran, tetapi juga sebagai alat untuk membawa batubara halus dari pulverizer ke ruang bakar. Di PLTU 2 Sulawesi Utara Unit 2, PA Fan menyuplai hingga 65% dari total kebutuhan udara pembakaran. Dengan demikian, performa PA Fan sangat menentukan stabilitas nyala api di dalam furnace dan efisiensi proses pembakaran secara keseluruhan. Pengamatan selama magang di PLTU 2 Sulut menunjukkan adanya permasalahan pada sistem PA Fan, khususnya pada unit 2. Hasil evaluasi awal menunjukkan bahwa kinerja fan tidak optimal dan terdapat indikasi penurunan efisiensi. Hal ini menarik perhatian penulis untuk mengangkatnya sebagai topik penelitian. Beberapa potensi penyebab yang teridentifikasi antara lain kondisi mekanis fan yang menurun, pengaturan aliran udara yang kurang tepat, serta kemungkinan adanya kebocoran pada saluran udara. Ketidakseimbangan dalam suplai udara dapat menyebabkan proses pembakaran tidak sempurna, konsumsi bahan bakar meningkat, dan efisiensi boiler menurun. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kondisi aktual kinerja PA Fan dan bagaimana kontribusinya terhadap efisiensi pembakaran di boiler PLTU 2 Sulut Unit 2. Melalui pendekatan teknis dan analisis data operasional, penelitian ini akan mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi performa fan, menghitung efisiensi aktual, serta merumuskan strategi optimalisasi yang aplikatif. Fokus penelitian mencakup parameter teknis seperti tekanan udara, temperatur, dan konsumsi daya listrik pada sistem PA Fan. Diharapkan bahwa hasil dari penelitian ini dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai pentingnya peran PA Fan dalam sistem pembakaran PLTU, serta menjadi referensi dalam pengelolaan dan peningkatan efisiensi sistem fan di masa mendatang. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan memberi kontribusi praktis dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional PLTU secara keseluruhan, khususnya

melalui pemeliharaan berbasis data, pengendalian energi, dan inovasi dalam sistem kontrol udara.

A. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

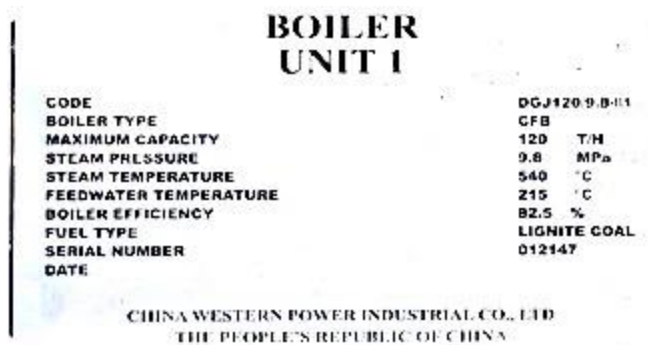


Gambar 1 Siklus Energi Kimia Menjadi Energi Listrik

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah Generator yang di hubungkan ke turbin dimana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering. Dalam PLTU, energi primer yang dikonversikan menjadi energi listrik adalah bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dapat berupa batubara (padat), minyak (cair), atau gas [5].

Prinsip kerja PLTU dimulai dari pembakaran bahan bakar di dalam boiler untuk menghasilkan panas. Panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar digunakan untuk memanaskan air dalam boiler. Boiler terdiri dari pipa-pipa dan tabung-tabung yang didesain untuk memaksimalkan kontak antara air dan gas panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar. Air dalam boiler dipanaskan hingga menjadi uap. Uap air yang dihasilkan oleh pemanasan air dalam boiler memiliki tekanan dan suhu yang tinggi. Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Uap yang dihasilkan dari boiler melewati turbin uap. Turbin uap memiliki bilah-bilah yang dipasang pada poros, dan saat uap melewati bilah-bilah ini, itu menyebabkan poros berputar. Inilah yang menciptakan energi mekanis dari panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar. Energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin uap kemudian diteruskan ke generator. Generator menggunakan prinsip elektromagnetisme untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Dalam generator, poros dari turbin terhubung dengan kumparan kawat konduktor yang ditempatkan di antara medan magnet. Gerakan rotasi poros memotong garis medan magnet, menciptakan arus listrik dalam kawat

B. Peralatan Utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap



Gambar 2. Name Plate Boiler pada PLTU 2 Sulawesi Utara



Gambar 3. Turbin Uap pada PLTU 2 Sulawesi Utara



Gambar 4. Generator pada PLTU 2 Sulawesi Utara



Gambar 5. Condensor pada PLTU 2 Sulawesi Utara

1) Boiler

PLTU 2 Sulut menggunakan boiler tipe CFB (Circulating Fluidized Bed). Pada boiler tipe CFB, superheater terdapat pada heat recovery area atau backpass. Superheater digunakan sebagai pemanas lanjut uap agar uap tersebut menjadi uap kering. Pemanasan pada superheater diambil dari panas gas buang hasil pembakaran di ruang pembakaran (furnace). Gangguan yang sering terjadi pada superheater, khususnya final secondary superheater, yaitu fouling. Fouling merupakan fenomena menempelnya dan menumpuknya abu pada dinding penghantar panas (superheater maupun reheater) yang dipasang di lingkungan di mana suhu gas pada bagian belakang furnace lebih rendah dibandingkan suhu melunak abu (ash softening temperature) (Jurnal, 2018).

2) Turbine Uap

Turbin uap berfungsi mengubah energi panas dari uap air menjadi energi mekanik melalui putaran poros, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan sistem lain, seperti generator dalam Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Proses ini dimulai dari perubahan energi panas menjadi energi kinetik oleh turbin, lalu diubah menjadi energi mekanik dan akhirnya menjadi energi listrik oleh generator. Tidak seluruh energi panas dapat dimanfaatkan; sebagian dibuang melalui kondensor dengan bantuan air pendingin. PLTU umumnya menggunakan turbin uap multistage, yaitu terdiri dari Turbin Tekanan Tinggi (HP), Tekanan Menengah (IP), dan Tekanan Rendah (LP). Uap superheat dari boiler pertama-tama masuk ke Turbin HP, lalu dipanaskan ulang sebelum dialirkan ke Turbin IP, dan akhirnya ke Turbin LP. Setelah itu, uap dikondensasikan dan digunakan kembali dalam siklus pembangkitan.

3) Generator

Generator adalah konverter yang digunakan untuk mengubah energi kimia atau kinetik menjadi energi listrik pada sebuah pembangkit listrik (Erviyanto Nur et al., 2022). di mana energi mekanik tersebut biasanya berasal dari turbin yang digerakkan oleh uap bertekanan tinggi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Prinsip kerjanya mengikuti hukum Faraday, yaitu ketika rotor yang menghasilkan medan magnet berputar di dalam stator yang berisi lilitan kawat, perubahan medan magnet ini akan menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) sehingga menghasilkan arus listrik bolak-balik (AC) yang kemudian dialirkan ke sistem distribusi listrik. Beberapa komponen penting dalam generator meliputi rotor, stator, sistem exciter untuk medan magnet, sistem pendingin, serta perlengkapan proteksi. Dalam operasionalnya di PLTU, generator mampu bekerja secara kontinu untuk menghasilkan daya besar, namun tetap memerlukan sistem pendinginan serta pemeliharaan berkala guna menjaga keandalannya dan mencegah gangguan akibat panas berlebih atau kerusakan teknis. Peran generator sangat penting dalam proses pembangkitan energi, karena tanpanya energi mekanik dari turbin tidak dapat diubah menjadi energi listrik yang siap digunakan oleh konsumen.

4) Kondensor

Kondensor merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berfungsi untuk mengubah uap bekas dari turbin uap hingga menjadi air dengan bantuan dari air pendingin utama (Zakaria & Suryaman, 2020). Proses ini menggunakan air dari sumber eksternal seperti sungai, danau, atau laut, atau dengan bantuan menara pendingin (cooling tower), yang kemudian air yang telah terkondensasi dipompa kembali ke boiler untuk dipanaskan ulang, sehingga menciptakan siklus tertutup yang efisien dan hemat air. Salah satu fungsi utama kondensor adalah menurunkan tekanan pada sisi buang turbin, yang memungkinkan turbin beroperasi pada tekanan lebih rendah, sehingga meningkatkan efisiensi dalam mengubah energi mekanik menjadi listrik. Kondensor yang umum digunakan adalah surface condenser, di mana uap tidak bersentuhan langsung dengan air pendingin, tetapi mengembun pada permukaan pipa-pipa kondensor, sementara air pendingin mengalir di dalamnya. Proses ini

menjaga efisiensi perpindahan panas dan kebersihan sistem. Meskipun demikian, kondensor juga dapat menghadapi masalah seperti fouling (penumpukan kotoran pada pipa), korosi akibat kualitas air yang buruk, serta kebocoran pipa yang dapat menurunkan efisiensinya. Oleh karena itu, pemeliharaan secara rutin sangat diperlukan untuk menjaga kinerja kondensor dan memastikan sistem pembangkit beroperasi secara efisien. Kondensor yang berfungsi dengan baik akan meningkatkan efisiensi turbin dan menjamin keberlanjutan siklus pembangkit dengan penggunaan air yang lebih sedikit.

C. System Fan Pada PLTU

Proses pembakaran dalam PLTU didukung oleh beberapa jenis fan, yaitu:

- 1) **Primary Air Fan (PA Fan):** Merupakan fan tekanan positif yang berfungsi untuk mengalirkan udara dan membawa bahan bakar (batubara) dari pulverizer menuju boiler burner [2]. PA Fan juga merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang bertugas menyuplai udara primer untuk proses pembakaran bahan bakar di dalam boiler. Udara ini diambil dari atmosfer menggunakan kipas bertenaga motor, kemudian dialirkan melalui saluran udara menuju ruang bakar (furnace) dengan tekanan yang lebih tinggi dari tekanan udara luar. Tekanan tersebut membantu mempercepat dan menyalurkan bahan bakar secara merata agar terbakar dengan sempurna. Selain mengalirkan bahan bakar, udara primer juga menyuplai oksigen yang sangat dibutuhkan dalam proses pembakaran. Jumlah dan kecepatan aliran udara ini diatur oleh sistem kontrol otomatis berdasarkan beban boiler, jenis bahan bakar, serta kondisi operasi, sehingga pembakaran dapat berlangsung secara efisien dan stabil
- 2) **Secondary Air Fan (SA Fan):** Merupakan fan tekanan positif yang berfungsi untuk menyediakan udara sekunder yang diperlukan untuk mencapai pembakaran sempurna pada boiler. Udara atmosfer dihisap Force Draft Fan dan didorong ke secondary air heater. Udara panas dari secondary air heater lalu masuk ke wind box dan kemudian didistribusikan ke tiap burner yang ada untuk menciptakan pembakaran [9]. SA Fan juga merupakan komponen penting dalam sistem boiler yang berfungsi untuk menyuplai udara sekunder ke ruang bakar guna melengkapi pasokan oksigen yang belum mencukupi dari udara primer, sehingga proses pembakaran bahan bakar dapat berlangsung secara lebih sempurna. Udara yang disuplai oleh SA Fan biasanya diarahkan ke bagian atas burner atau area tertentu di furnace untuk meningkatkan pencampuran antara udara dan bahan bakar, serta memperpanjang waktu partikel bahan bakar berada di dalam ruang bakar agar dapat terbakar sepenuhnya.
- 3) **Induced Draft Fan (ID Fan):** berfungsi sebagai pengatur tekanan di furnace (ruang bakar) agar tetap minus. IDF merupakan double inlet Sentrifugal fan dengan penggerak motor listrik. Selain itu fungsi IDF adalah sebagai penghisap udara yang telah bercampur dengan abu sisa pembakaran pada boiler [9]. ID Fan juga merupakan salah satu perangkat penting dalam sistem pembakaran pada boiler yang berperan menarik gas hasil pembakaran dari ruang bakar dan mengarahkannya ke sistem pengendalian polusi seperti electrostatic precipitator (ESP), flue gas desulfurization (FGD), hingga ke cerobong asap (stack). ID Fan bekerja dengan menciptakan tekanan negatif di dalam furnace, yang

membantu menarik udara pembakaran dan memastikan aliran gas buang tetap mengalir lancar dari awal hingga akhir proses. Dengan fungsinya tersebut, ID Fan turut menjaga kestabilan tekanan internal boiler dan mendukung efisiensi perpindahan panas di dalam sistem. ID Fan biasanya bekerja bersinergi dengan kipas Forced Draft (FD Fan) dan Secondary Air Fan (SA Fan), di mana ID Fan bertugas pada sisi gas buang, sedangkan FD dan SA Fan menangani pasokan udara masuk untuk pembakaran

- 4) Forced Draft Fan (FD Fan): komponen penting dalam sistem boiler PLTU yang berfungsi untuk mengalirkan udara bertekanan ke ruang bakar guna mendukung proses pembakaran. Udara yang diambil dari lingkungan luar dipompa oleh FD Fan dan biasanya dialirkan melalui pemanas udara (air preheater) terlebih dahulu untuk menaikkan temperaturnya sebelum masuk ke furnace. Dengan memberikan tekanan positif, FD Fan mendorong udara masuk ke ruang bakar secara stabil dan memastikan pasokan oksigen cukup untuk pembakaran bahan bakar. FDF juga berfungsi sebagai penghasil udara sekunder (secondary air) yang digunakan sebagai kebutuhan utama udara pembakaran di dalam boiler, udara sekunder dihembuskan menuju furnace boiler (ruang yang berisi pipa – pipa boiler yang digunakan untuk tempat pembakaran) [6].

D. Fungsi Dan Kinerja PA Fan

PA Fan merupakan salah satu komponen utama dalam sistem pembakaran boiler yang menyuplai udara primer bertekanan positif ke furnace. Udara ini dipanaskan terlebih dahulu melalui air heater dan digunakan untuk mendukung proses pembakaran. Kinerja PA Fan yang optimal sangat penting untuk menjaga efisiensi dan kestabilan pembakaran di dalam boiler.

E. Dampak Kinerja PA Fan Yang Kurang Optimal Terhadap Boiler

Jika PA Fan tidak berfungsi optimal, beberapa konsekuensi yang dapat terjadi antara lain:

- 1) Efisiensi pembakaran menurun.

Suplai udara primer yang tidak memadai menyebabkan pencampuran bahan bakar dan udara menjadi tidak sempurna. Akibatnya, proses pembakaran berlangsung tidak optimal, sehingga menghasilkan sisa pembakaran berupa karbon yang tidak terbakar (unburned carbon).

- 2) Konsumsi bahan bakar meningkat.

Ketidakseimbangan antara aliran udara dan bahan bakar dapat menurunkan efisiensi termal, sehingga boiler membutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk mencapai output yang sama.

- 3) Kenaikan Emisi Gas Buang

Pembakaran yang tidak efisien menyebabkan peningkatan emisi gas berbahaya seperti CO dan partikel lainnya, yang berdampak pada kualitas lingkungan dan berpotensi melanggar batas emisi yang ditetapkan regulasi.

- 4) Distribusi Pembakaran Tidak Merata

Ketidakstabilan aliran udara primer menyebabkan distribusi serbuk batubara dalam furnace menjadi tidak seragam. Hal ini berisiko menimbulkan perbedaan temperatur antar zona pembakaran yang dapat memicu terjadinya slagging dan kerusakan pada dinding furnace.

- 5) Gangguan pada Stabilitas Operasi Boiler

Fluktuasi tekanan atau volume udara dari PA Fan dapat mengganggu kestabilan nyala api di dalam ruang bakar. Ketidakstabilan ini bisa menyebabkan interlock atau trip pada sistem boiler.

- 6) Beban Tambahan pada Sistem Udara Lainnya

Ketika PA Fan tidak mampu memenuhi kebutuhan udara primer, sistem akan mengandalkan komponen lain seperti Secondary Air Fan atau Induced Draft Fan untuk mengkompensasi kekurangannya. Hal ini bisa meningkatkan beban dan menurunkan keandalan sistem secara keseluruhan

F. Menghitung Efisiensi Primary Air

Untuk menghitung efisiensi dari primary air fan dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\eta_{fan} = \frac{P(output)}{P(input)} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

η_f = Efisiensi Primary Air Fan

P_{Output} = Daya yang dihasilkan Fan

P_{input} = Daya input ke Fan

$$P_{output} = Q \cdot \Delta p$$

Dimana:

Q = laju aliran udara masuk (m³/s)

Δp = perbedaan tekanan (pa)

G. Menghitung Konsumsi Energi Primary Air Fan

Untuk menghitung efisiensi dari boiler dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E = P(input) \times t \quad (2)$$

Dimana:

E = Konsumsi Energi Primary Air Fan

P_{input} = Daya input ke fan

t = Waktu operasi (jam)

H. Menghitung Efisiensi Boiler

Efisiensi boiler adalah sebuah besaran yang menunjukkan hubungan antara supply energi masuk ke dalam boiler dengan energi keluaran yang dihasilkan oleh boiler (Sugiharto, 2020). Untuk menghitung efisiensi dari boiler dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\eta_{boiler} = \frac{q(hg-hf)}{Q \times GCV} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana:

q = Kapasitas steam yang dihasilkan (kg/h)

hg = Enthalpy steam jauh (kJ/kg)

hf = Enthalpy air umpan (kJ/kg)

Q = Jumlah bahan bakar yang digunakan (kg/h)

GCV = Nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)

II. METODE PENELITIAN

A. Spesifikasi PA Fan

Primary Air Fan (PA Fan) dirancang dengan spesifikasi teknis untuk menyuplai udara primer bertekanan tinggi ke ruang bakar (furnace) pada boiler, yang sangat penting untuk mendukung proses pembakaran bahan bakar. PA Fan memiliki kapasitas aliran udara yang besar, diukur dalam satuan SCFM atau m³/h, yang disesuaikan dengan kebutuhan pembakaran dan sirkulasi udara dalam sistem. Tekanan udara yang dihasilkan harus cukup untuk mengalirkan udara ke furnace dan membawa bahan bakar dengan efektif. Efisiensi energi juga menjadi prioritas utama, sehingga PA Fan dirancang untuk menghasilkan aliran udara yang diperlukan dengan konsumsi daya yang efisien, menggunakan motor yang hemat energi dan desain aerodinamis yang baik

TABEL 1
Spesifikasi Fan

SPESIFIKASI FAN	
Model	RJ25-SW2020F
Speed	1480r/min
Flow Rate	78000m ³ /h
Total Pressure	17400Pa
Atmosphere Pressure	101325mmHg
Medium Temperature	30°C
Axial Power	438.8kw
Moment Of Inertia	480kg.m2
Efisiensi	87%
Bearing Type	23132CC/W33 22324CC/W33

TABEL 2
Spesifikasi Motor

SPESIFIKASI MOTOR	
Type	YKS400-4
Daya (KW)	500
Tegangan (V)	6300
Arus (A)	56
Frequency (Hz)	50
Putaran (rpm)	1485
Cos,phi	0,88
Berat (kg)	4000
Enclosure (IP)	55
Bearing Type DE	NU 326 EMC3
Bearing Type NDE	SKF 6326 C3

B. Pengujian Kinerja PA Fan

TABEL 3
Uji Karakteristik PA Fan

CCR		Arus	Pressure		PA Flow		Vibrasi mm/s	
DM	Feedback	Motor (A)	Outlet (Kpa)		Nm ³ /h			
			Inlet	Outlet	Upper	Lower	DE	NDE
			APH	APH				
0%	0	21.3	1.25	1.76	0	0	0.59	1.25
10%	11.1	30.6	4.59	4.73	403	705	0.55	1.28
20%	20.2	39.3	6.58	6.50	14700	20070	0.57	1.23
30%	31.3	44.5	7.14	7.63	19700	25618	0.55	1.28
40%	40	47.4	7.89	8.52	22913	29504	0.57	1.32
50%	49.9	48.9	8.30	9.04	24350	31508	0.57	1.22
60%	60	50.3	8.49	9.3	25804	32762	0.57	1.25
70%	70	51.8	8.90	9.74	26493	35046	0.57	1.17
80%	80	53.3	9.16	10.02	27105	35393	0.56	1.2
90%	90	54.6	9.37	10.27	27741	37184	0.56	1.25
100%	100	55.3	9.55	10.48	28128	36223	0.56	1.17

Pengujian lapangan dilakukan pada 26 Februari 2025 dengan pembukaan damper (100%). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa fan menghasilkan aliran udara sebesar 64.351 Nm³/h atau sekitar 201,63 m³/s, dengan selisih tekanan 1700 Pa.

1) Daya input motor dihitung menggunakan rumus daya tiga fasa

$$\begin{aligned}
 P_{\text{input}} &= \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \\
 &= \sqrt{3} \times 6300 \times 55,3 \times 0,88 \\
 &= 533,4 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

2) Daya yang dihasilkan fan

$$\begin{aligned}
 P_{\text{output}} &= Q \cdot \Delta p \\
 &= 201.63 \times 1700 \\
 &= 342.8 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

3) Efisiensi Aktual PA Fan

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{fan}} &= \frac{P(\text{output})}{P(\text{Input})} \times 100\% \\
 \eta_{\text{fan}} &= \frac{342.8 \text{ kW}}{533,4 \text{ kW}} \times 100\% \\
 &= 64\%
 \end{aligned}$$

Nilai ini menunjukkan adanya selisih signifikan dibandingkan efisiensi rancangannya sebesar 87%.

C. Konsumsi Energi Harian PA Fan

Berdasarkan durasi operasi selama 12 jam per hari, konsumsi energi listrik oleh PA Fan dihitung sebagai berikut:

$$E = P(\text{input}) \times t = 533,4 \times 12 = 6400.8 \text{ Kwh}$$

D. Perhitungan Efisiensi Boiler

Data operasi menunjukkan bahwa boiler menghasilkan uap sebanyak 73.000 kg/h dengan entalpi uap sebesar 3489,93 kJ/kg dan entalpi air umpan sebesar 1354,55 kJ/kg. Konsumsi batubara tercatat sebesar 11.810 kg/h dengan nilai kalor sebesar 16.476,5 kJ/kg.

Efisiensi boiler dihitung dengan persamaan:

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{q(h_g - h_f)}{Q_{\text{x GCV}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{boiler}} = \frac{73.000(3.489,93 - 1.354,55)}{12500 \times 16.476,5} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{boiler}} = 80\%$$

Hasil ini menunjukkan bahwa performa boiler berada dalam kisaran efisiensi yang masih dapat ditingkatkan, terutama melalui optimalisasi sistem udara pembakaran.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Evaluasi Kinerja Primary Air Fan (PA Fan)

Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan pada tanggal 26 Februari 2025, diketahui bahwa efisiensi aktual Primary Air Fan (PA Fan) pada unit 2 PLTU 2 Sulawesi Utara hanya mencapai 64%. Perhitungan ini diperoleh dari hasil pengukuran laju aliran udara fan sebesar 201,63 m³/s dan perbedaan tekanan sebesar 1700 Pa. Daya output mekanis fan dihitung sebesar 342,8 kW, sedangkan daya input listrik motor yang menggerakkan fan tercatat sebesar 533,4 kW. Dengan demikian, efisiensi fan 64%. Nilai ini menunjukkan penurunan performa yang cukup signifikan dibandingkan dengan efisiensi rancangannya, yaitu sebesar 87%. Penurunan efisiensi ini menandakan terjadinya inefisiensi dalam sistem fan, yang secara langsung dapat menurunkan efisiensi pembakaran dan menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar. Faktor - faktor yang diduga menyebabkan rendahnya efisiensi fan antara lain adalah penurunan kondisi mekanis (seperti ausnya bearing dan ketidakseimbangan sudu fan), adanya kebocoran udara pada saluran distribusi, dan kurang optimalnya pengaturan sistem aliran udara. Penumpukan debu dalam saluran juga dapat menambah beban kerja fan, serta menyebabkan turunnya tekanan aliran udara.

B. Hasil Efisiensi Boiler

. Hasil perhitungan efisiensi boiler menunjukkan nilai sebesar 80%. Perhitungan ini didasarkan pada kapasitas steam 73.000 kg/h, entalpi uap sebesar 3489,93 kJ/kg, dan entalpi air umpan 1354,55 kJ/kg, serta konsumsi bahan bakar sebesar 11.810 kg/h dengan nilai kalor (GCV) sebesar 16.476,5 kJ/kg. Dengan menggunakan nilai-nilai tersebut efisiensi boiler didapatkan sebesar 80% ini masih berada di bawah standar optimal untuk boiler tipe Circulating Fluidized Bed (CFB) yang umumnya berkisar antara 85% hingga 88%. Hal ini dapat dikaitkan dengan ketidakseimbangan suplai udara pembakaran akibat performa PA Fan yang rendah, serta kualitas batubara yang digunakan mengandung kadar air cukup tinggi ($\pm 30\%$) dan nilai kalor relatif rendah (sekitar 4000 kcal/kg). Kelebihan kadar air dalam batubara memaksa sistem untuk menggunakan energi lebih banyak dalam proses penguapan, sehingga energi yang tersisa untuk mengubah air menjadi uap lebih sedikit. Akibatnya, efisiensi termal boiler menurun.

C. Konsumsi Energi Primary Air Fan (PA Fan)

Dalam satu siklus operasi harian selama 12 jam, PA Fan tercatat mengonsumsi energi listrik sebesar 6400,8 kWh. Nilai ini dihitung dari daya input motor sebesar 533,4 kW dikalikan waktu operasi. Tingginya konsumsi energi ini berkontribusi terhadap peningkatan biaya operasional pembangkit. Konsumsi energi dapat ditekan apabila efisiensi fan ditingkatkan.

D. Strategi Optimalisasi Sistem Primary Air Fan

Berdasarkan hasil analisis kinerja fan dan efisiensi boiler, beberapa langkah perbaikan yang direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi sistem antara lain:

1) Peningkatan Program Perawatan

- Perawatan rutin (preventif) meliputi pelumasan bearing, pemeriksaan kondisi seal, pembersihan saluran udara dari debu atau abu, serta inspeksi komponen seperti ducting dan damper untuk mencegah kebocoran.
- Perawatan prediktif dilakukan dengan memantau getaran dan suhu menggunakan alat ukur khusus agar potensi kerusakan dapat dideteksi lebih awal.
- Perawatan korektif diperlukan jika ditemukan kerusakan, seperti penggantian bearing, sudu fan, atau penyetelan ulang poros motor.

2) Penanganan Kebocoran Udara

Kebocoran pada saluran udara dapat mengurangi tekanan dan volume udara yang disuplai ke ruang bakar. Oleh karena itu, diperlukan pemeriksaan berkala serta penyegelan ulang sambungan saluran untuk meminimalkan kehilangan tekanan.

3) Penerapan Variable Frequency Drive (VFD)

Penerapan Variable Frequency Drive (VFD) pada sistem Primary Air Fan memberikan berbagai manfaat teknis maupun ekonomis dalam pengoperasian pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Secara umum, manfaat utama penggunaan VFD pada PA Fan adalah sebagai berikut:

a. Efisiensi Energi yang Lebih Tinggi

VFD memungkinkan pengaturan kecepatan motor sesuai dengan kebutuhan aliran udara. Dengan prinsip daya listrik yang sebanding dengan kubik dari kecepatan, pengurangan kecepatan fan menghasilkan penurunan konsumsi daya secara signifikan, yang berdampak pada efisiensi energi secara keseluruhan.

b. Peningkatan Efisiensi Pembakaran

Dengan pengaturan aliran udara yang lebih presisi, rasio udara dan bahan bakar dapat dijaga tetap optimal. Hal ini menghasilkan proses pembakaran yang lebih sempurna, sehingga efisiensi termal boiler dapat meningkat.

c. Pengurangan Biaya Operasional

Penurunan konsumsi energi secara langsung berkontribusi terhadap efisiensi biaya operasional. Selain itu, penggunaan VFD juga mengurangi keperluan pengoperasian damper, sehingga mengurangi losses akibat throttling.

d. Perbaikan Stabilitas dan Akurasi Kontrol Proses

VFD memungkinkan kontrol aliran udara secara halus dan responsif terhadap perubahan beban boiler. Hal ini

memberikan kestabilan pada proses pembakaran serta mengurangi fluktuasi tekanan dan temperatur.

e. Perpanjangan Umur Motor dan Peralatan Pendukung

Fitur soft start yang terdapat pada VFD menghindari lonjakan arus saat motor dinyalakan, sehingga memperpanjang umur motor listrik dan mengurangi risiko kegagalan dini pada komponen kelistrikan.

4) Pemulihan atau Penggantian Sudu Fan

Jika sudu fan mengalami keausan atau deformasi, aliran udara menjadi tidak stabil. Rekonstruksi atau penggantian dengan desain sudu aerodinamis yang sesuai, serta proses penyeimbangan ulang fan, penting untuk mengembalikan performa optimal.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai Optimalisasi Sistem PA Fan Untuk Meningkatkan Efisiensi Pembakaran Pada Boiler Di PLTU 2 SULUT, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Efisiensi dari pada PA Fan untuk unit 2 PLTU 2 SULUT di peroleh nilai 64% ini menunjukkan adanya penurunan efisiensi dibanding dengan kondisi normal dari data spesifikasi peralatan tersebut.
- 2) Ada beberapa hal untuk meningkatkan efisiensinya sehingga masuk dalam range spesifikasi dilakukan beberapa hal, seperti:
 - a. Peningkatan Program Perawatan rutin (preventif) meliputi pelumasan bearing, pemeriksaan kondisi seal, pembersihan saluran udara dari debu atau abu, serta inspeksi komponen seperti ducting dan damper untuk mencegah kebocoran. Perawatan prediktif dilakukan dengan memantau getaran dan suhu menggunakan alat ukur khusus agar potensi kerusakan dapat dideteksi lebih awal. Perawatan korektif diperlukan jika ditemukan kerusakan, seperti penggantian bearing, sudu fan, atau penyetelan ulang poros motor.
 - b. Penanganan Kebocoran Udara pada saluran udara dapat mengurangi tekanan dan volume udara yang disuplai ke ruang bakar. Oleh karena itu, diperlukan pemeriksaan berkala serta penyegelan ulang sambungan saluran untuk meminimalkan kehilangan tekanan.
 - c. Penerapan Variable Frequency Drive (VFD) pada motor PA Fan untuk menyesuaikan kecepatan fan dengan kebutuhan aliran udara primer berdasarkan beban boiler. Dengan pengaturan kecepatan motor yang lebih fleksibel, penggunaan energi dapat lebih efisien, mengurangi pemborosan, dan mendukung efisiensi pembakaran.
 - d. Pemulihan atau Penggantian Sudu Fan Jika sudu fan mengalami keausan atau deformasi, aliran udara menjadi tidak stabil. Rekonstruksi atau penggantian dengan desain sudu aerodinamis yang sesuai, serta proses penyeimbangan ulang fan, sangat penting untuk mengembalikan performa optimal.

B. Saran

Semoga hasil dari Penelitian ini kiranya dapat menjadi referensi untuk meningkatkan efisiensi kinerja dari PA Fan baik untuk melanjutkan penelitian, sebagai acuan dengan penelitian

yang mungkin sama ataupun untuk PLTU 2 SULUT sehingga dapat memberikan hasil kinerja PA Fan yang optimal dan bermanfaat untuk semuanya.

V. REFERENSI

- [1] Apriandi, R., & Mursadin, A. (2016). ANALISIS KINERJA TURBIN UAP BERDASARKAN PERFORMANCE TEST PLTU PT. INDOCEMENT P-12 TARJUN. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 1(1), 37–46. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v1i1.26>
- [2] Dwinata, B. (2022). REKONSTRUKSI SUDU PRIMARY AIR FAN PLTU MENGGUNAKAN STANDAR NACA. *EDUSAINTEK: Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, 9(3), 906–919. <https://doi.org/10.47668/edusaintek.v9i3.616>
- [3] Ervianto Nur, A., A Karim, S., & Hasrul, H. (2022). PENGARUH PERUBAHAN BEBAAN GENERATOR TERHADAP EFISIENSI PLTU (STUDI PADA PLTU SEMEN TONASA UNIT 35 MW). *Jurnal Media Elektrik*, 20(1), 62–66. <https://doi.org/10.59562/metrik.v20i1.5485>.
- [4] Jurnal, R. T. (2018). PENGARUH FOULING TERHADAP LAJU PERPINDAHAN PANAS PADA SUPERHEATER BOILER CFB PLTU SEBALANG. *Power Plant*, 6(1), 48–57. <https://doi.org/10.33322/powerplant.v6i1.72>.
- [5] Lewerissa, Y. J. (2018). ANALISIS ENERGI PADA PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DENGAN CYCLE TEMPO. *Jurnal Voering*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.32531/jvove.v3i1.85>.
- [6] Priambodo, R. B., & Indartono, I. (2015). ANALISA EFISIENSI FORCED DRAFT FAN B UNIT #10 PT. PJB UBJ O & M PLTU REMBANG (EFFICIENCY ANALYSIS OF FORCED DRAFT FAN B UNIT # 10 PT. PJB UBJ O & M REMBANG). In *Undergraduate thesis, D3 Kerjasama PT. PLN Bidang Mesin Fakultas Teknik*.
- [7] Rais, M., Ritnawati, R., Wahyu, P., Syarif, I., Thamrin D, A., Aminuddin, R., Sarman, E., Rauf, R., Berlianti, R., Penerbit, B., & Menulis, Y. (2024). *Pembangkit Energi Listrik: Instalasi dan Prinsip Kerja*.
- [8] Sugiharto, A. (2020). Perhitungan Efisiensi Boiler Dengan Metode Secara Langsung pada Boiler Pipa Api. *Majalah Ilmiah Swara Patra*, 10(2), 51–57. <https://doi.org/10.37525/sp/2020-2/260>.
- [9] Syarief, A., Nugroho, W. S., & Nugraha, A. (2021). ANALISA UNJUK KERJA INDUCED DRAFT FAN PLTU ASAM-ASAM UNIT 3 DAN 4. *INFO-TEKNIK*, 21(2), 185. <https://doi.org/10.20527/infotek.v21i2.10053>.
- [10] Zakaria, T., & Suryaman, T. (2020). ANALISA KERUSAKAN KONDENSOR UNIT 1- 4 PLTU - XYZ BANTEN (AN ENGINEERING REPORT CASE STUDY). *Jurnal Intent: Jurnal Industri Dan Teknologi Terpadu*, 3(2), 111–121. <https://doi.org/10.47080/intent.v3i2.957>.
- [11] Gunawan, Wawan, and Bambang Ali Gunawan. 2020. “STUDI EFISIENSI BOILER TERHADAP NILAI KALOR BATUBARA PADA BOILER JENIS PULVERIZER COAL KAPASITAS 300 T/H.” *Jurnal Intent: Jurnal Industri dan Teknologi Terpadu* 3(2): 122–

30. doi:10.47080/intent.v3i2.958.

- [12] Refaldi, Ichsan, Yuslan Basir, and Dyah Utari Yusa Wardhani. 2022. "Analisis Fluktuasi Beban Terhadap Efisiensi Generator Sinkron Di PT. PEMBANGKIT LISTRIK PALEMBANG JAYA." Jurnal Ampere 6(2): 91. doi:10.31851/ampere.v6i2.7293.

TENTANG PENULIS



Moh.Fadel Anugrah, penulis adalah anak tunggal, lahir di Kota Sangata, Kalimantan Timur, pada tanggal 11 Juni 2002. Penulis menempuh Pendidikan pertama di MIN 2 Tana Toraja pada tahun 2008 sampai 2014, setelah itu pada tahun 2014 melanjutkan Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di MTsN 2 Tana Toraja sampai tahun 2017. Kemudian Penulis melanjutkan

Pendidikan di SMKN 1 ENREKANG 1, Sulawesi Selatan pada tahun 2017 hingga lulus pada tahun 2020. Penulis memulai Pendidikan di Universitas Sam Ratulangi pada tahun 2021, Di Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro dengan mengambil konsentrasi minat Teknik Tenaga Listrik pada tahun 2023. Dalam menempuh Pendidikan, penulis telah melaksanakan Kerja Praktek di PLTU 2 SULUT pada bulan Juli sampai Oktober tahun 2023 yang berlokasi di Tawaang, Amurang, Minahasa Selatan, dan mengikuti Kuliah Kerja Terpadu (KKT) pada bulan November sampai Desember pada KKT Posko Talete 2, Kecamatan Tomohon Tengah, Kota Tomohon. Kemudian pada bulan Februari sampai April tahun 2025 melakukan penelitian dan pengambilan data di PLTU 2 SULUT. Penulis juga banyak mengikuti organisasi baik didalam kampus maupun luar kampus dan penulis aktif sebagai asisten dosen untuk jurusan elektro pada KDK Tegangan Tinggi.