

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan efisiensi boiler yang telah dilakukan menggunakan metode langsung (*direct method*), dengan memanfaatkan data operasi aktual berupa produksi uap, kondisi uap, temperatur feedwater, serta konsumsi bahan bakar, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Efisiensi termal *boiler watertube* yang dihitung berdasarkan perbandingan antara energi panas yang diserap oleh fluida kerja (*air/steam*) terhadap total energi panas yang masuk dari bahan bakar menunjukkan bahwa kinerja boiler berada pada kondisi operasional yang relatif stabil dan layak secara termal. Nilai efisiensi yang diperoleh merepresentasikan kemampuan *boiler* dalam mengonversi energi kimia bahan bakar menjadi energi panas uap secara efektif, meskipun menggunakan lebih dari satu jenis bahan bakar secara simultan.
2. Kontribusi energi panas masing-masing bahan bakar ditentukan oleh kombinasi antara nilai kalor dan laju pemakaian aktualnya. Hasil analisis menunjukkan bahwa bahan bakar dengan laju konsumsi yang lebih besar memberikan kontribusi energi masuk yang dominan terhadap total panas yang diterima *boiler*, meskipun nilai kalor per satuan massanya tidak selalu yang tertinggi. Hal ini menegaskan bahwa dalam sistem pembakaran campuran, besarnya kontribusi energi tidak hanya ditentukan oleh kualitas

bahan bakar, tetapi juga oleh kuantitas dan kontinuitas pemakaiannya selama operasi.

3. Berdasarkan evaluasi kontribusi energi dan karakteristik nilai kalor masing-masing bahan bakar, dapat diidentifikasi bahwa bahan bakar yang digunakan secara konsisten dengan laju pemakaian tinggi dan karakteristik pembakaran yang stabil berperan dominan dalam mendukung pencapaian efisiensi termal *boiler* yang optimal. Kombinasi bahan bakar tersebut mampu menjaga suplai energi panas ke ruang bakar secara berkesinambungan, sehingga proses perpindahan panas ke pipa-pipa *boiler* berlangsung lebih merata dan stabil.

Berdasarkan hasil analisis kuantitatif, efisiensi termal *boiler* berada pada rentang 71,8% hingga 76,9%. Nilai efisiensi tertinggi sebesar 76,9% diperoleh pada kondisi operasi dengan total heat input sebesar 3.260.800.000 dan laju produksi *steam* 53 kg/s.

Sebaliknya, efisiensi terendah sebesar 71,8% terjadi pada saat total energi masuk relatif lebih kecil/besar yaitu 3.322.900.00 kJ/hari, yang menunjukkan bahwa variasi komposisi bahan bakar secara langsung mempengaruhi performa perpindahan panas *boiler*.

Kontribusi energi terbesar berasal dari batubara dengan nilai kalor tertinggi sebesar 353.800.000 kcal/hari, sehingga secara signifikan meningkatkan total *heat input* dan berdampak pada peningkatan efisiensi sistem.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa analisis efisiensi termal *boiler watertube* berbasis data aktual operasional dapat

memberikan gambaran nyata mengenai kinerja *boiler* di lapangan. Evaluasi kontribusi energi masing-masing bahan bakar menjadi dasar penting dalam pengambilan keputusan operasional untuk memilih dan mengatur bahan bakar yang paling efektif dalam mendukung efisiensi dan stabilitas sistem *boiler*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, maka saran yang dapat diberikan untuk pengembangan dan peningkatan performa *boiler watertube* dengan penggunaan bahan bakar campuran adalah sebagai berikut:

1. Bagi pihak industri, khususnya unit pembangkit yang menerapkan bahan bakar campuran:
 - A. Perlu dilakukan kontrol yang lebih ketat terhadap kadar air pada biomassa, seperti kulit kayu dan *sludge*, melalui proses pengeringan sebelum pembakaran untuk meminimalkan kerugian panas dan meningkatkan efisiensi termal.
 - B. Pengaturan komposisi bahan bakar campuran sebaiknya mempertimbangkan kontribusi energi yang diberikan masing-masing bahan bakar, sehingga operasi *boiler* tetap mampu mencapai efisiensi yang optimal dan memenuhi kebutuhan beban uap.
 - C. Optimalisasi sistem pembakaran, seperti pengendalian excess air dan temperatur *furnace*, perlu dilakukan untuk menekan kerugian suhu gas buang dan meningkatkan stabilitas pembakaran.

2. Bagi peneliti dan akademisi, diperlukan kajian lebih lanjut terkait:
 - A. Analisis lebih detail mengenai kerugian panas pada berbagai titik sistem, seperti kerugian radiasi dan konduksi yang belum dihitung secara komprehensif dalam penelitian ini.
 - B. Penambahan parameter performa lain seperti emisi gas buang, slagging, dan fouling, terutama karena penggunaan biomassa dapat memengaruhi kualitas operasi jangka panjang.
 - C. Pengujian berbagai variasi kadar campuran yang lebih luas untuk memperoleh komposisi optimum yang lebih akurat berdasarkan kebutuhan energi dan kondisi boiler yang berbeda.
3. Bagi penelitian di masa mendatang, disarankan:
 - A. Menghitung efisiensi thermal dengan masing-masing bahan bakar yang di uji
 - B. Menggunakan data operasi aktual yang lebih lengkap dan mencakup rentang waktu yang lebih panjang agar hasil yang diperoleh memiliki tingkat validitas yang lebih tinggi.
 - C. Melakukan evaluasi performa dengan menyertakan metode penghitungan efisiensi langsung dan tidak langsung secara bersamaan, sehingga mampu menggambarkan performa boiler secara lebih menyeluruh.
 - D. Menyertakan pendekatan analisis ekonomi dan keberlanjutan, seperti biaya operasi dan dampak lingkungan, agar implementasi bahan bakar campuran dapat dinilai dari berbagai aspek.

Dengan adanya saran ini, diharapkan penelitian selanjutnya maupun penerapan di lapangan dapat memberikan kontribusi yang lebih optimal terhadap peningkatan efisiensi energi serta mendukung pengelolaan sumber daya energi yang lebih berkelanjutan di industri.

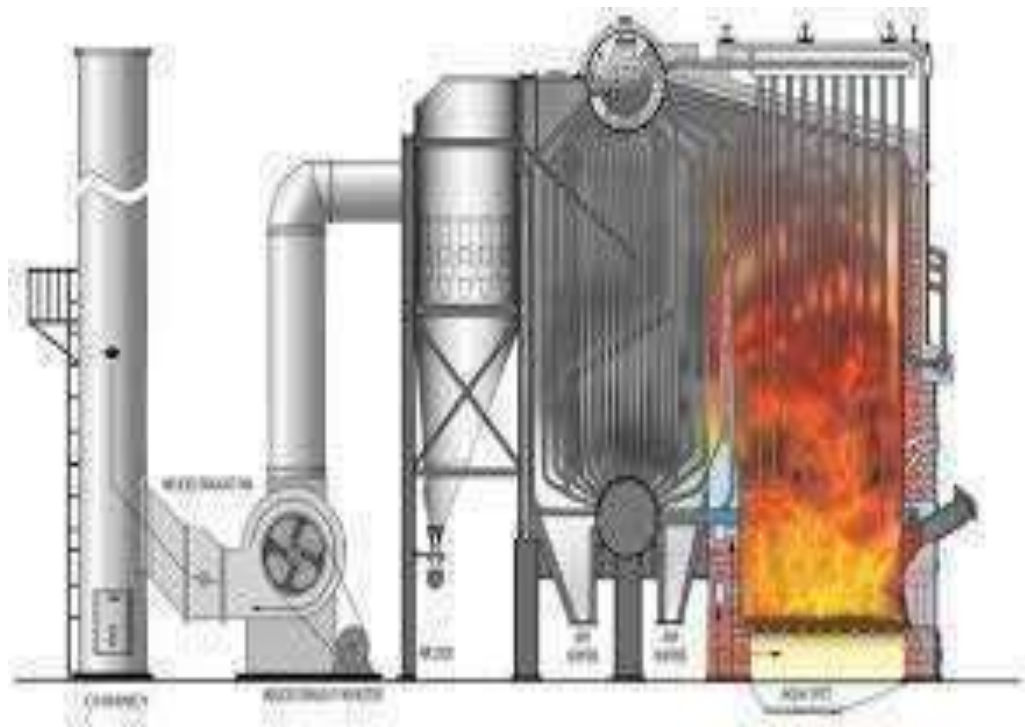
DAFTAR PUSTAKA

- Arikunto, S. 2020. *Prosedur Penelitian: Suatu Pendekatan Praktik* (Edisi Revisi). Jakarta: Rineka Cipta.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Hardi, I. M., & Heryadi, Y. 2021. Analisis Efisiensi Boiler Atmospheric Fluidized Bed Combustion Tipe Water Tube 75 Ton/jam. *Jurnal Teknologika*, 11(2), 1-11.
- Kumar, D., & Ghosh, A. 2020. *Steam Boiler Operation: Principles and Practice*. New Delhi: Tech Press.
- Maulana, A., Widodo, S., & Nugroho, H. A. 2016 Analisa efisiensi water tube boiler berbahan bakar fiber dan cangkang. *Jurnal Teknik Mesin*, 5(2), 123–130.
- Moleong, L. J. 2021. *Metodologi Penelitian Kualitatif* (Edisi Revisi). Bandung: Remaja Rosdakarya.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. 2010) *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (7th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Nag, P. K. 2021. *Power Plant Engineering* (4th ed.). New Delhi: McGraw-Hill Education.
- Prabir Basu. 2020. *Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance*. Springer.
- Setiawan, Y. 201). Karakteristik Campuran Cangkang Dan Serabut Buah Kelapa Sawit Terhadap Nilai Kalor Di Propinsi Bangka Belitung. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 1(1).
- Simanjuntak, E. 2023. Analisis Performa Boiler Berbahan Bakar Kombinasi Fiber Dan Cangkang Pada Boiler Takuma N-600 SA.
- Simanjuntak, E. 2023. Analisis Performa Boiler Berbahan Bakar Kombinasi Fiber Dan Cangkang Pada Boiler Takuma N-600 SA.
- Siswanto, J. E. (2020). Analisis limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler dengan menggunakan variasi campuran antara fiber dan cangkang buah sawit. *Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA)*, 3(1), 22-27.
- Sugiyono. 2020. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Sutrisno, B. 2018. Analisis Efisiensi Termal Boiler Tipe CFB pada PLTU Berbahan Bakar Batubara. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(2), 45–52.
- Tahdid, T., Ridwan, K. A., Rezatantia, T., & Pratama, M. A. 2022. Efisiensi Termal dan Specific Fuel Consumption(Sfc) Water Tube Boiler berdasarkan rasio udara bahan bakar diesel dan lpg untuk memproduksi saturated dan superheated steam. *Publikasi Penelitian Terapan dan Kebijakan*, 5(1), 19-26.

- Taishan Group. (n.d.). Key Factors Influencing Heat Transfer and Combustion Efficiency in CFB Boilers. CoalBiomassBoiler.com. Diambil pada 31 Juli 2025,
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Utami, J. P. U. 2023. Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Tekanan Terhadap Efisiensi Boiler-Submit Jurnal/Seminar (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Kalimantan).
- Cahyo, N., Sulistyowati, D., Rahmanta, M. A., Felani, M. I., Soleh, M., Paryanto, P.Hariana, H. (2024). *A techno-economic and environmental analysis of co-firing implementation using coal and wood bark blend at circulating fluidized bed boiler. International Journal of Renewable Energy Development*, 13(4), 726–735.

Lampiran A

Sketsa watertube boiler



Lampiran B

Steam table

t °C	P kPa, MPa	v_f m ³ /kg	v_g m ³ /kg	u_f kJ/kg	Δu_f kJ/kg	u_g kJ/kg	h_f kJ/kg	Δh_f kJ/kg	h_g kJ/kg	s_f kJ/kg K	Δs_f kJ/kg K	s_g kJ/kg K
0.01	0.6113	0.001000	206.132	0.00	2375.3	2375.3	0.00	2501.3	2501.3	0.0000	9.1562	9.1562
5	0.6721	0.001000	147.118	20.07	2361.3	2381.2	20.06	2489.6	2510.5	0.0761	8.9406	9.0267
10	1.2276	0.001000	106.377	41.99	2347.2	2389.2	41.99	2477.7	2519.7	0.1510	8.7498	8.9007
15	1.7051	0.001001	77.925	62.96	2333.1	2386.0	62.96	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7813
20	2.3385	0.001002	57.790	83.94	2319.0	2402.9	83.94	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6671
25	3.1691	0.001003	43.359	104.86	2304.9	2409.8	104.87	2442.3	2547.2	0.3673	8.1905	8.5579
30	4.2461	0.001004	32.893	125.77	2290.8	2416.6	125.77	2430.5	2556.2	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.6280	0.001006	25.216	146.66	2276.7	2423.4	146.66	2418.6	2565.3	0.5052	7.8478	8.3530
40	7.3837	0.001008	19.523	167.53	2262.6	2430.1	167.54	2406.7	2574.3	0.5724	7.6845	8.2569
45	9.5934	0.001010	15.258	188.41	2248.4	2436.8	188.42	2394.8	2583.2	0.6386	7.5261	8.1647
50	12.350	0.001012	12.032	209.30	2234.2	2443.5	209.31	2382.7	2592.1	0.7037	7.3725	8.0762
55	15.756	0.001015	9.568	230.19	2219.9	2450.1	230.20	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9912
60	19.941	0.001017	7.671	251.00	2205.5	2456.6	251.11	2358.5	2609.6	0.8311	7.0794	7.9095
65	25.033	0.001020	6.197	272.00	2191.1	2463.1	272.00	2346.2	2618.2	0.8934	6.9375	7.8309
70	31.158	0.001023	5.042	292.93	2176.6	2469.5	292.96	2333.8	2626.8	0.9548	6.8004	7.7532
75	38.578	0.001026	4.131	313.87	2162.0	2475.9	313.91	2321.4	2635.3	1.0154	6.6679	7.6824
80	47.390	0.001029	3.407	334.84	2147.4	2482.2	334.88	2308.8	2643.7	1.0752	6.5389	7.6121
85	57.834	0.001032	2.828	355.82	2132.6	2488.4	355.88	2296.0	2651.9	1.1342	6.4102	7.5444
90	70.139	0.001036	2.361	376.82	2117.7	2494.5	376.90	2283.2	2660.1	1.1924	6.2866	7.4790
95	84.554	0.001040	1.992	397.86	2102.7	2500.6	397.94	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4158
100	0.10135	0.001044	1.6729	418.91	2087.6	2506.5	419.02	2257.0	2676.0	1.3068	6.0480	7.3546
105	0.12062	0.001047	1.4194	440.00	2072.3	2512.3	440.13	2243.7	2683.8	1.3629	5.9328	7.2958
110	0.14325	0.001052	1.2102	461.12	2057.0	2518.1	461.27	2230.2	2691.5	1.4184	5.8202	7.2388
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.28	2041.4	2523.7	482.46	2216.5	2699.0	1.4733	5.7100	7.1832
120	0.19853	0.001060	0.9019	503.48	2025.8	2529.2	503.69	2202.6	2706.3	1.5275	5.6020	7.1295
125	0.2321	0.001065	0.77059	524.72	2009.9	2534.6	524.96	2188.5	2713.5	1.5812	5.4962	7.0774
130	0.2701	0.001070	0.66550	546.00	1993.9	2539.9	546.29	2174.2	2720.5	1.6343	5.3925	7.0280
135	0.3130	0.001075	0.58217	567.34	1977.7	2545.0	567.67	2159.6	2727.3	1.6869	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001080	0.50685	588.72	1961.3	2550.0	589.11	2144.8	2733.9	1.7390	5.1908	6.9296
145	0.4154	0.001085	0.44632	610.16	1944.7	2554.9	610.61	2129.6	2740.3	1.7906	5.0928	6.8832

Lampiran C

Superheater steam table

$P = 100 \text{ kPa}$				
T °C	$\hat{v}$ m ³ /kg	$\hat{u}$ kJ/kg	$\hat{h}$ kJ/kg	$\hat{s}$ kJ/kg K
sat	1.6940	2506.1	2675.5	7.3593
100	1.6958	2506.6	2676.2	7.3614
150	1.9364	2582.7	2776.4	7.6133
200	2.1723	2658.0	2875.3	7.8342
250	2.4060	2733.7	2974.3	8.0332
300	2.6388	2810.4	3074.3	8.2157
400	3.1026	2967.8	3278.1	8.5434
500	3.5655	3131.5	3488.1	8.8341
600	4.0278	3301.9	3704.7	9.0975
700	4.4899	3479.2	3928.2	9.3398
800	4.9517	3663.5	4158.7	9.5652
900	5.4135	3854.8	4396.1	9.7767
1000	5.8753	4052.8	4640.3	9.9764
1100	6.3370	4257.3	4890.9	10.1658
1200	6.7986	4467.7	5147.6	10.3462
1300	7.2603	4683.5	5409.5	10.5182